



Ricerca di Sistema elettrico

## Realizzazione di una sezione di prova in scala ridotta per test di accumulo termico con materiale ceramico

Antonio De Luca

REALIZZAZIONE DI UNA SEZIONE DI PROVA IN SCALA RIDOTTA PER TEST DI ACCUMULO TERMICO CON  
MATERIALE CERAMICO

Antonio De Luca (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Energia elettrica da fonte solare

Obiettivo: Studio di configurazioni impiantistiche alternative

Responsabile del Progetto: Domenico Mazzei, ENEA

## Indice

INDICE .....	3
INDICE DELLE FIGURE.....	3
SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE .....	5
2 CORRELAZIONI DI SCAMBIO TERMICO.....	5
3 CORRELAZIONE PER IL CALCOLO DELLE PERDITE DI CARICO .....	7
4 LAYOUT E STRUMENTAZIONE DELLA SEZIONE DI PROVA.....	7
5 METODOLOGIA DI ESECUZIONE DELLE PROVE .....	9
6 VELOCITÀ E PORTATE DI RIFERIMENTO PER L'ESECUZIONE DELLE PROVE.....	9
7 CONCLUSIONI.....	11
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	11

## Indice delle figure

Figura 4-1 –Misuratore di pressione differenziale tra le sezioni di ingresso e uscita dell'aria .....	8
Figura 4-2- Layout della sezione di prova .....	8
Figura 4-3 – Generatore di aria calda utilizzato per fornire energia termica alla sezione di prova .....	8

## Sommario

In questo documento sono riassunti i criteri che hanno permesso di definire la geometria della sezione di prova realizzata per verificare i valori calcolati delle grandezze caratteristiche di un elemento di accumulo di calore con materiale ceramico.

La sezione di prova è costituita da una tubazione di diametro  $64\text{ mm}$  e lunghezza  $2.2\text{ m}$ , in cui sono stivate delle sfere di allumina compattate in modo da raggiungere una frazione di vuoto  $\cong 0.4$ , per sfruttare al massimo la capacità di assorbire energia termica.

Tra le sfere di materiale ceramico (pebble bed), sono inserite delle termocoppie in posizione prestabilita rispetto all'asse del tubo, per misurare la temperatura del ceramico durante le fasi di accumulo e di recupero di energia termica in funzione del tempo.

Durante la fase di accumulo l'aria viene immessa nella tubazione con portata e temperatura d'ingresso costanti (entrambe misurate), per determinare :

- La distribuzione di temperatura lungo l'asse della tubazione in funzione del tempo
- La velocità di avanzamento del fronte di massima temperatura del materiale ceramico
- Il tempo caratteristico in cui la temperatura dell'aria che fuoriesce dalla tubazione inizia a salire rispetto alla temperatura iniziale del pebble bed.
- La differenza di pressione tra le sezioni d'ingresso e di uscita dell'aria dalla tubazione, per valutare le perdite di carico

Per recuperare l'energia termica accumulata, il verso del flusso d'aria che attraversa il materiale ceramico viene invertito. In questo caso le grandezze che si misurano sono:

- La distribuzione di temperatura lungo l'asse della tubazione in funzione del tempo
- La velocità con cui si sposta il fronte di massima temperatura del materiale ceramico
- Il tempo caratteristico in cui la temperatura di uscita dell'aria raggiunge il valore della temperatura di ingresso.

Le stesse condizioni di prova possono essere simulate numericamente, utilizzando correlazioni di scambio termico e perdite di carico, riportate in letteratura.

Le attività sperimentali sono tuttora in corso, Il confronto tra i risultati delle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali, ha l'obiettivo di valutare lo scostamento della capacità di accumulo calcolata rispetto a quella ottenuta elaborando i dati della distribuzione di temperatura misurata in funzione del tempo.

## 1 Introduzione

L'elemento di accumulo è uno scambiatore a fascio tubiero costituito da 9 tubi ad U, di lunghezza 30 m, diametro interno 350 mm, in cui sono stivate sfere di allumina di diametro medio 6 mm, compattate in modo da avere una frazione di vuoto pari a circa 0.4 (pebble bed).

L'elemento di accumulo è collegato in serie a una linea di 2 collettori solari lineari parabolici, di lunghezza totale circa 200 m, che in condizioni di esercizio inviano allo scambiatore aria compressa a circa 100 bar e temperatura 560 °C, con portata variabile in funzione dell'intensità della radiazione solare concentrata.

Il range della temperatura funzionamento previsto dell'elemento di accumulo è 251÷560 °C. La velocità dell'aria che attraversa i tubi ad U è dell'ordine dei  $cm s^{-1}$ , quindi l'aria compressa lambisce la superficie del materiale ceramico sempre in regime di flusso laminare.

In letteratura esistono correlazioni di scambio termico e perdite di carico, che sono comunemente utilizzate per valutare il comportamento termo-fluidodinamico di fluidi comprimibili ad alta temperatura che attraversano un pebble bed.

Queste correlazioni sono state utilizzate per valutare la capacità termica del sistema di accumulo e le perdite di carico in funzione della lunghezza dei tubi ad U e hanno permesso di dimensionare l'elemento di accumulo per avere una capacità termica di circa 4 MWh.

L'obiettivo delle attività sperimentali è quello di validare la metodologia messa punto per dimensionare l'elemento di accumulo, con test realizzati a pressione atmosferica, ma con valori di velocità e temperatura dell'aria, uguali a quelle previste nelle condizioni di esercizio di un impianto solare che utilizzi il ciclo di Brayton per la produzione di energia elettrica.

## 2 Correlazioni di scambio termico

Per valutare il trasferimento di energia termica tra aria compressa e materiale ceramico è utilizzato un modello unidimensionale, con le seguenti assunzioni:

- Si considerano solo condizioni stazionarie di portata in massa, temperatura e pressione dell'aria, nella sezione d'ingresso del sistema di accumulo
- Si trascura lo scambio termico per conduzione nei punti di contatto tra le sfere
- Si trascura lo scambio termico per irraggiamento tra sfere adiacenti

Per valutare il coefficiente di scambio termico per convezione forzata, è stata utilizzata la correlazione semi-empirica di Gnielinski che lega il coefficiente di scambio termico alla velocità dell'aria e alla distanza caratteristica percorsa dai filetti fluidi sulla superficie di scambio.

La velocità media di un fluido che attraversa un pebble bed, è data dal rapporto:  $u_p = \frac{u}{\varepsilon}$ , dove  $u$

rappresenta la velocità che lo stesso fluido avrebbe in un tubo vuoto di uguale diametro.

La distanza geometrica caratteristica per valutare il numero di  $Re$ , è pari al diametro medio degli elementi sferoidali ( $d$ ).

La correlazione è stata ottenuta a partire dalle correlazioni relative alle due possibili condizioni di moto del fluido su parete piana (soluzioni asintotiche):

- Moto laminare:

$$Nu_l = 0.664 Pr^{1/3} \left( \frac{Re}{\varepsilon} \right)^{0.5} \quad (0.1)$$

Dove:

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} ; \quad Pr = \frac{c_p \mu}{K}$$

– Moto completamente turbolento:

$$Nu_t = \frac{0.037 \left( \frac{Re}{\varepsilon} \right)^{0.8} Pr}{1 + 2.443 \left( \frac{Re}{\varepsilon} \right)^{-0.1} \left( Pr^{2/3} - 1 \right)}$$

il numero di Nusselt relativo al flusso termico scambiato sulla superficie di un corpo di forma sferoidale è ottenibile con la seguente combinazione delle soluzioni asintotiche:

$$Nu_{sp} = 2 + \left( Nu_t^2 + Nu_s^2 \right)^{0.5}$$

La relazione precedente deve essere empiricamente modificata dal fattore correttivo che segue, può essere utilizzata per calcolare il numero di Nusselt per convezione forzata in un pebble bed:

$$f(\varepsilon) = 1 + 1.5(1 - \varepsilon)$$

Quindi:

$$Nu = f(\varepsilon) Nu_{sp}$$

La correlazione precedente è valida per frazioni di vuoto comprese nel range  $0.26 < \varepsilon < 0.935$  e fino a un valore massimo di  $\frac{Re}{\varepsilon} \cong 2.0 \cdot 10^4$  e assumendo  $\varepsilon \cong 0.4$ , sarebbe applicabile fino a  $Re \cong 8000$ .

Una seconda correlazione è stata ricavata da Achenbach:

$$Nu = \left[ \left( 1.18 Re^{0.58} \right)^4 + \left( 0.23 Re_h^{0.75} \right)^4 \right]^{0.25}$$

Dove:

$$Re_h = \frac{Re}{1 - \varepsilon} ; Pr = \frac{c_p \mu}{K} = 0.71$$

Questa correlazione può essere utilizzata fino a valori di  $\frac{Re}{\varepsilon} = 7.7 \cdot 10^5$  (con  $\varepsilon \cong 0.4$  è applicabile fino a valori di  $Re \cong 300000$ ). Il confronto con i dati sperimentali di letteratura è mostrato nella figura seguente.

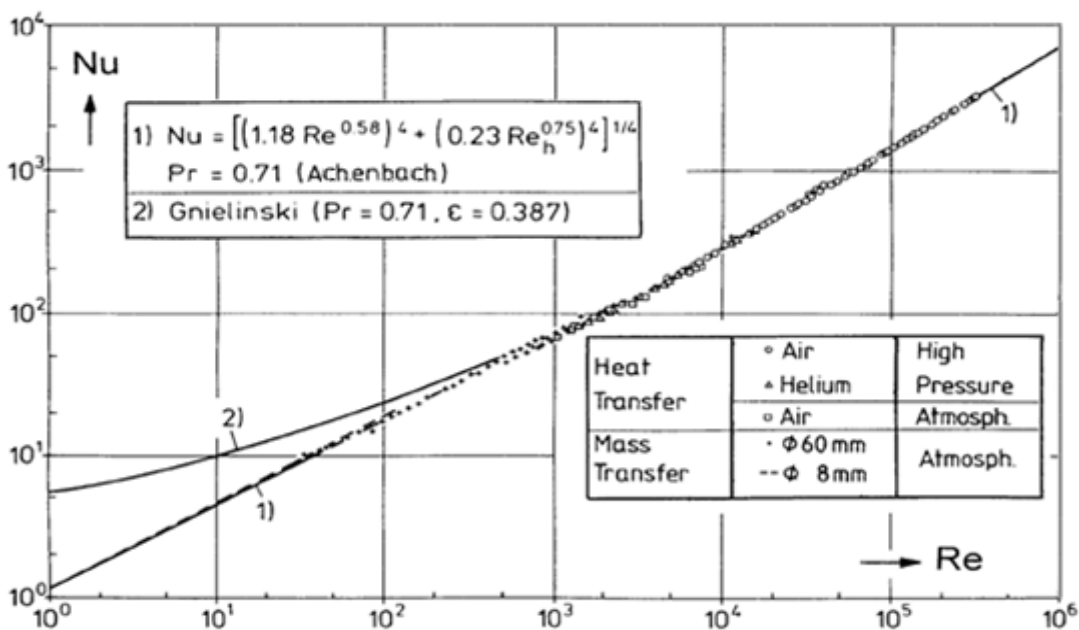


Figura 3-1 - Coefficiente di scambio termico convettivo nel pebble bed

### 3 Correlazione per il calcolo delle perdite di carico

Per valutare le perdite di carico ( $Pa$ ), è stata utilizzata la correlazione di Karman-Kozeni, Ergun, che ha l'espressione seguente:

$$\Delta P_c = f^* l \frac{\rho u^2 (1-\varepsilon)}{d_s \varepsilon^3}$$

Dove  $l$  è la lunghezza dei tubi ( $m$ ) ed  $f^*$  il coefficiente di attrito, definito nel modo seguente :

$$f^* = \frac{150}{Re^*} + 1.75$$

Con:

$$Re^* = \frac{\rho u d_s}{\mu(1-\varepsilon)}$$

L'equazione precedente permette di valutare le perdite di carico in qualsiasi condizione di moto (laminare, turbolento e in presenza di entrambe le componenti di moto), infatti:

- Per  $Re^* < 10$  (moto laminare), si ha:

$$f^* \cong \frac{150}{Re^*}$$

quindi:

$$\Delta P_c \cong 150 \frac{l \mu u (1-\varepsilon)^2}{d_s^2 \varepsilon^3}$$

- Per  $Re^* > 2000$  (moto completamente turbolento), si ha:

$$f^* \cong 1.75$$

quindi:

$$\Delta P_c \cong 1.75 \frac{l \rho u^2 (1-\varepsilon)}{d_s \varepsilon^3}$$

### 4 Layout e strumentazione della sezione di prova

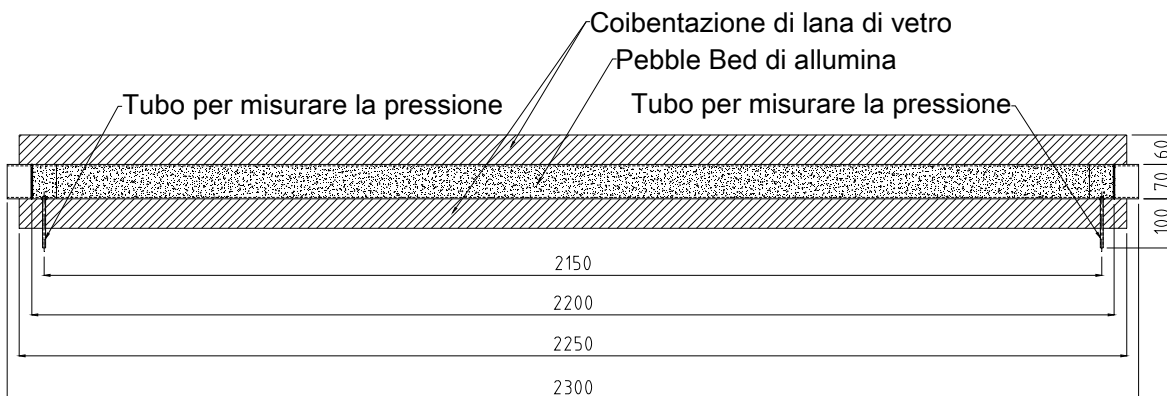
La sezione di prova è costituita da un tubo d'acciaio di diametro interno  $64 \text{ mm}$  e spessore  $3 \text{ mm}$ , all'interno del quale sono stivate le sfere di allumina di diametro  $6 \text{ mm}$ .

Alle due estremità sono saldati due spezzoni di tubo dello stesso diametro e spessore del tubo centrale, su cui sono saldati i due sostegni terminali delle sfere di allumina, ciascuno costituito da una rete di fili d'acciaio di diametro  $0.5 \text{ mm}$  e magliatura circa  $2 \times 2 \text{ mm}$ , che hanno la funzione di sostenere le sfere con una minima riduzione della sezione di passaggio dell'aria e quindi con un lieve aumento delle perdite di carico. In ciascuno dei due tubi terminali è stato realizzato un foro di circa  $6 \text{ mm}$  di diametro, in cui è inserito e saldato un tubo d'acciaio di diametro esterno  $5 \text{ mm}$  e spessore  $0.5 \text{ mm}$ , che è in contatto diretto con la cavità del tubo d'acciaio che contiene il materiale ceramico e ha la funzione di trasmettere la pressione nelle sezioni di ingresso e uscita della sezione di prova, a uno strumento (Schiltknecht ManoAir 500), che misura la pressione differenziale tra le due sezioni e quindi permette di valutare le perdite di carico (full range di misura  $\pm 2000 \text{ Pa}$ , con una risoluzione di circa  $1 \text{ Pa}$ ). Questo strumento permette di misurare anche la velocità dell'aria e quindi la portata volumetrica.



**Figura 4-1 –Misuratore di pressione differenziale tra le sezioni di ingresso e uscita dell’aria**

La superficie esterna del tubo centrale è coibentata con uno spessore di circa *60 mm* di lana di vetro per alta temperatura (fino a *600 °C* ), per ridurre le perdite di energia termica verso l’ambiente esterno. Sulla superficie esterna della coibentazione è avvolto un nastro di alluminio che oltre ad avere la funzione di contenimento della lana di vetro, riduce ulteriormente lo scambio termico verso l’ambiente. Nella figura seguente è mostrato il layout della sezione di prova.



**Figura 4-2- Layout della sezione di prova**

Per produrre aria calda a temperatura e portata volumetrica controllata, si utilizza un generatore d’aria calda per uso industriale (Steinel HG 4000 E), mostrato nella figura seguente.



**Figura 4-3 – Generatore di aria calda utilizzato per fornire energia termica alla sezione di prova**



L'apparecchiatura mostrata in **Figura 4-3** ha le seguenti caratteristiche:

- Potenza  $1.75 \text{ kW}$
- Range di temperatura dell'aria  $20 \div 600 \text{ }^\circ\text{C}$
- Portata volumetrica massima  $600 \text{ litri min}^{-1}$
- Regolazione continua della portata e della temperatura

## 5 Metodologia di esecuzione delle prove

La sezione di prova ha una lunghezza utile di  $2.2 \text{ m}$  ed è strumentata con termocoppie posizionate ogni 20 cm a partire dalla sezione di ingresso dell'aria. La tubazione può essere collegata a un alimentatore in corrente alternata, per essere riscaldata elettricamente ad una prefissata temperatura del materiale ceramico misurata nella zona di mezzera della sezione di prova.

Il controllo dell'alimentatore può essere realizzato sia manualmente, impostando direttamente il valore della corrente elettrica che circola nel tubo d'acciaio, sia con un programma automatico di regolazione della tensione, sviluppato in ambiente LABVIEW.

Tutti i dati misurati (tensione, corrente e temperature), sono acquisiti e possono essere elaborati in un foglio Excell.

Prima di iniziare le prove sperimentali la sezione di prova deve essere caratterizzata per misurare la potenza elettrica necessaria a mantenere in condizioni stazionarie la temperatura del materiale ceramico nella sezione centrale del tubo d'acciaio.

Queste prove hanno lo scopo di determinare la potenza termica scambiata dal sistema con l'ambiente in funzione della temperatura del tubo d'acciaio (allo stato stazionario le perdite di calore sono uguali alla potenza elettrica fornita dall'alimentatore).

Di queste perdite è necessario tenere conto nella elaborazione dei dati sperimentali, ad esempio nelle prove di accumulo di energia a partire dalla condizione iniziale di materiale ceramico a temperatura ambiente, l'energia termica realmente assorbita dalle sfere di allumina è uguale all'energia termica ceduta dall'aria calda meno le perdite di calore verso l'ambiente.

Dello scambio di calore con l'ambiente bisogna tenere conto anche nelle prove di recupero dell'energia termica accumulata ad una prefissata temperatura del pebble bed. Queste prove si realizzano con l'ausilio dell'alimentatore, che riscalda il materiale ceramico fino a raggiungere lo stato stazionario della temperatura di prova. Staccato l'alimentatore, si invia nella sezione di prova aria a temperatura inferiore rispetto alla temperatura del ceramico. La potenza complessivamente ceduta dal materiale ceramico è uguale alla somma di quella assorbita dall'aria più le perdite di calore verso l'ambiente.

Le prove sperimentali che riguardano la misura delle perdite di carico si realizzano a partire da temperatura ambiente fino alla temperatura dell'aria e del pebble bed di  $560 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Queste prove sono necessarie per confrontare i risultati sperimentali con i dati previsti dalla correlazione di Karman-Kozeny, Ergun, per capire dalle perdite di carico misurate per unità di lunghezza, se è possibile aumentare ulteriormente la capacità termica dell'elemento di accumulo aumentando la lunghezza.

## 6 Velocità e portate di riferimento per l'esecuzione delle prove

Le condizioni di riferimento per la realizzazione delle prove in laboratorio, derivano dalle condizioni di esercizio previste per il gruppo costituito da 2 collettori solari lineari parabolici connessi in serie (lunghezza totale 200 m), che alimentano l'elemento di accumulo.

Fermo restando che la temperatura dell'aria compressa (a circa  $100 \text{ bar}$ ), che fuoriesce dalla linea di tubi ricevitori è fissata a  $560 \text{ }^\circ\text{C}$ , per avere una temperatura massima dell'ultimo tubo d'acciaio  $< 600 \text{ }^\circ\text{C}$ , la portata volumetrica è funzione della Aperture Normal Irradiance, corretta tenendo conto del coseno dell'angolo di incidenza modificato, delle perdite ottiche alle estremità dei collettori solari e del fattore di ombreggiamento con sole basso ( $ANI_m$ ). Nella tabella seguente sono riassunti i valori previsti della velocità

e della portata volumetrica dell'aria in funzione della  $ANI_m$ .

$ANI_m$ (W m <sup>-2</sup> )	velocità (m s <sup>-1</sup> )	Portata volumetrica (litri min <sup>-1</sup> )
200	1.1	244.0
300	3.0	694.0
400	4.7	1074.6
500	6.3	1445.8
600	7.9	1814.5
700	9.5	2182.7
800	11.0	2551.2
900	12.6	2920.6
1000	14.2	3279.5

**Tabella 6.1 – Velocità e portata dell'aria a 560 °C nei tubi ricevitori**

La **Tabella 6.2** riassume i valori previsti di velocità e portata volumetrica dell'aria che attraversa il singolo tubo dell'elemento di accumulo.

$ANI_m$ (W m <sup>-2</sup> )	velocità (m s <sup>-1</sup> )	Portata volumetrica (litri min <sup>-1</sup> )
200	1.2E-02	27.1
300	3.3E-02	77.1
400	5.2E-02	119.4
500	7.0E-02	160.6
600	7.0E-02	160.6
700	1.1E-01	242.5
800	1.2E-01	283.5
900	1.4E-01	324.5
1000	1.6E-01	364.4

**Tabella 6.2 – Velocità e portata dell'aria a 560 °C in un tubo dell'elemento di accumulo**

Le prove in laboratorio sono realizzate alla stessa velocità dell'aria che attraversa l'elemento di accumulo (per valutare le perdite di carico), quindi tenendo conto che il diametro del tubo d'acciaio della sezione di prova è 64 mm, le velocità e le portate di riferimento per le prove di accumulo con aria a 560 °C sono riportate nella tabella seguente.

$ANI_m$ (W m <sup>-2</sup> )	velocità (m s <sup>-1</sup> )	Portata volumetrica (litri min <sup>-1</sup> )
200	1.2E-02	0.9
300	3.3E-02	2.6
400	5.2E-02	4.0
500	7.0E-02	5.4
600	7.0E-02	5.4
700	1.1E-01	8.1
800	1.2E-01	9.5
900	1.4E-01	10.9
1000	1.6E-01	12.2

**Tabella 6.3 – Velocità e portata dell'aria a 560 °C nella sezione di prova**

## 7 Conclusioni

L'elemento di accumulo di un modulo del campo solare a collettori lineari parabolici alimentati da aria compressa, è costituito da 9 tubi ad U di diametro interno 350 mm e lunghezza 30 m, che contengono allumina sferoidale di diametro medio 6 mm, con una frazione di vuoto  $\cong 0.4$ .

La fonte di calore che alimenta l'elemento di accumulo è la radiazione solare diretta riflessa da due collettori lineari parabolici di apertura 5.9 m e concentrata su una linea di tubi ricevitori di lunghezza circa 200 m.

Nel documento sono descritte le attività svolte per realizzare una sezione di prova in scala ridotta da utilizzare in laboratorio per valutare sperimentalmente la capacità di un pebble bed di allumina sferoidale di assorbire energia termica ad alta temperatura e pressione ( $\cong 100$  bar).

Il tubo d'acciaio della sezione di prova che contiene le sfere di allumina ha diametro interno 64 mm e lunghezza 2.2 m. Le prove sono realizzate a pressione atmosferica ma con le stesse temperature e velocità di flusso che si avrebbero nell'elemento di accumulo in condizioni di esercizio.

Le simulazioni numeriche del pebble bed in esercizio, si basano su un modello monodimensionale semplificato, che utilizza correlazioni di scambio termico e perdite di carico di letteratura (Gnielinski per il coefficiente di scambio termico e Karman-Kozeny, Ergun per le perdite di carico).

Queste simulazioni hanno permesso di valutare la lunghezza dell'elemento di accumulo per avere una capacità di immagazzinamento di energia termica pari a circa 3.75 MWh.

Le attività sperimentali sulla sezione di prova sono tuttora in corso. Il confronto tra i risultati delle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali permetterà di verificare lo scostamento della capacità di accumulo calcolata rispetto a quella ottenuta elaborando i dati della distribuzione di temperatura misurata in funzione del tempo.

L'obiettivo è confermare sperimentalmente la possibilità di aumentare la quantità di energia termica immagazzinabile aumentando ulteriormente la lunghezza dell'elemento di accumulo.

## 8 Riferimenti bibliografici

1. E. Achenbach, "Heat and Flow Characteristics of Packed Beds", Experimental Thermal and Fluid Science; 10: 17-27, Elsevier Science Inc, 1995
2. M. Rhodes, "Fluid Flow Through a Packed bed of Particles", Introduction to particle technology, pag. 153-157, John Wiley & Sons, Inc, 2008
3. M. Kaviany, "Fluid Mechanics", Principles of heat transfer in porous media, Second edition, pag. 17-48, Springer-Verlag, 1995