



Ricerca di Sistema elettrico

# Caratterizzazione termica e analisi del comportamento termico in condizioni operative simulate

A. Miliozzi, R. Liberatore, D. Nicolini, G. Napoli, G. Giorgi

Report RdS/PTR(2021)/262

CARATTERIZZAZIONE TERMICA E ANALISI DEL COMPORTAMENTO TERMICO  
IN CONDIZIONI OPERATIVE SIMULATE

A. Miliozzi, R. Liberatore, D. Nicolini, G. Napoli, G. Giorgi

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: 1

Progetto di ricerca: 1.2 Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico, power to gas, e relative interfacce con le reti

Pacco di lavoro: 2 Accumulo termico

Linea di Attività: LA2.12 Sviluppo e caratterizzazione di elementi di accumulo termico compatti in calcestruzzo con proprietà termiche incrementate

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Pacco di Lavoro: Raffaele Liberatore, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE .....	6
2 L'IMPIANTO SPERIMENTALE SOLTECA3 .....	6
2.1 IL FLUIDO TERMOVETTORE: THERMINOL66.....	7
3 INSTALLAZIONE DEI PROTOTIPI SH02 .....	9
4 DESCRIZIONE DELLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE .....	16
4.1 VALUTAZIONE DELLE PERDITE TERMICHE AD UNA TEMPERATURA COSTANTE (METODO ENERGY BALANCE) .....	16
4.2 CURVA DI POTENZA DEL HTF IN UN CICLO CARICO/SCARICO.....	17
4.3 VALUTAZIONE DELLE PERDITE TERMICHE A SISTEMA INATTIVO DURANTE UN INTERVALLO DI TEMPO T (METODO DI CONFRONTO).....	18
4.4 ANALISI FASI CARICO/SCARICO DEL TES IN PIÙ CICLI.....	19
5 ANALISI DELLE CONDIZIONI FLUIDODINAMICHE INTERNE .....	20
6 RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE .....	22
6.1 PERDITE TERMICHE A TEMPERATURA COSTANTE.....	22
6.1.1 <i>Provino con materiale tipo A</i> .....	22
6.1.2 <i>Provino con materiale tipo B</i> .....	23
6.1.3 <i>Provino con materiale tipo C</i> .....	24
6.2 CURVE DI POTENZA IN CARICO/SCARICO .....	26
6.2.1 <i>Capacità termica teorica</i> .....	26
6.2.2 <i>Prototipo con materiale tipo A</i> .....	30
6.2.3 <i>Prototipo con materiale tipo B</i> .....	31
6.2.4 <i>Prototipo con materiale tipo C</i> .....	31
6.3 PERDITE TERMICHE A SISTEMA INATTIVO DURANTE UN INTERVALLO TEMPORALE T .....	32
6.4 ANALISI A 3 CICLI.....	32
6.4.1 <i>Prototipo con materiale tipo A</i> .....	32
6.4.2 <i>Prototipo con materiale tipo B</i> .....	33
6.4.3 <i>Prototipo con materiale tipo C</i> .....	34
7 DISCUSSIONE DEI RISULTATI .....	36
8 VALUTAZIONE DEI COSTI.....	38
8.1 <i>L'ELEMENTO BASE DI ACCUMULO</i> .....	38
8.2 <i>IL MODULO DI ACCUMULO</i> .....	39
8.2.1 <i>Il "container"</i> .....	39
8.2.2 <i>Dimensionamento del coibente</i> .....	39
8.2.3 <i>Layout del modulo</i> .....	40
8.3 <i>ANALISI DEI COSTI</i> .....	42
8.3.1 <i>Costo di un mezzo di accumulo a base cementizia</i> .....	42
8.3.2 <i>Costo di un elemento base di accumulo termico</i> .....	45
8.3.2.1 <i>Tubo metallico a serpentina</i> .....	45
8.3.2.2 <i>Le staffe di rinforzo</i> .....	45
8.3.2.3 <i>Il calcestruzzo</i> .....	45
8.3.2.4 <i>Costo elemento base</i> .....	45
8.3.3 <i>Costo di un modulo di accumulo</i> .....	47
8.3.3.1 <i>Gli elementi base</i> .....	47
8.3.3.2 <i>La coibentazione</i> .....	47
8.3.3.3 <i>Costo modulo</i> .....	47
8.4 <i>DISCUSSIONE</i> .....	49
9 CONCLUSIONI.....	50

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI..... 51  
ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI ..... 51

## Sommario

Nel presente documento è descritto il lavoro realizzato all'interno della linea di attività LA2.12 del PTR 2019-2021, relativa allo "Sviluppo e caratterizzazione di elementi di accumulo termico in calcestruzzo con proprietà termiche incrementate". Tale attività rientra nel WP2 "Accumulo termico" del Progetto "Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power-to-gas, e relative interfacce con le reti", afferente al PAR2021 dell'Accordo di Programma ENEA-MISE 2019-2021.

I risultati ottenuti hanno riguardato la completa caratterizzazione termica di singoli elementi di accumulo termico basati su nuove tipologie di calcestruzzi, cui possono essere aggiunte piccole quantità di materiale a cambiamento di fase stabilizzato in forma (SS-PCM o mEPCM), e la valutazione dei costi associati realizzazione di questi e di un sistema modulare (insieme di più elementi di accumulo posti in serie o in parallelo in numero appropriato alle esigenze di una utenza). Le prove sperimentali sono state eseguite utilizzando l'impianto sperimentale denominato Solteca3, presente nel CR ENEA Casaccia.

La caratterizzazione di due prototipi SH02, realizzati con materiali cementizi di tipo A e B ha consentito di evidenziare che: i) Le perdite termiche elevate del sistema di prova completo, unitamente al forte contributo dovuto alla coibentazione, rendono impossibile una caratterizzazione termica dell'insieme; ii) la coibentazione risulta sicuramente ben dimensionata rendendo quasi adiabatico l'elemento e consentendo una temperatura esterna al coibente inferiore ai 30 °C; iii) I tempi di carico sono di circa 6-7 ore e condizionati dal livello di perdite termiche; iii) Il materiale B con il 5% in peso di PCM, nell'intervallo di temperatura 220-250 °C, ha evidenziato in fase di carico le migliori prestazioni potendo sfruttare il contributo all'accumulo termico del calore latente; iv) il materiale B consente, nel complesso, delle prestazioni termiche migliori rispetto al calcestruzzo base: una sostanziale parità nei tempi di caricamento, un buon incremento della capacità di accumulo, soprattutto per intervalli operativi stretti ed intorno alla temperatura di fusione, una maggiore stabilità durante il ciclaggio ed un incremento di resistenza termica che limita anche le perdite di calore.

L'analisi dei costi ha evidenziato per l'elemento base di accumulo un costo crescente con la quantità di PCM utilizzato, che, per una capacità termica nominale di 6-7kWh, conduce a costi specifici, escludendo la manodopera, di 43-45 €/kWh, che sono in perfetta linea con quelli attuali di altre tipologie di TES. Il vantaggio principale dei sistemi con mEPCM non risiede quindi in un minore costo specifico ma in una maggiore densità di energia accumulata (42-50 kWh/m<sup>3</sup>) e, di conseguenza, in volumi ridotti e minori costi di installazione. Detti costi mostrano, peraltro, ampi margini di miglioramento sia lato miscela sia lato componenti metallici. Il modulo di accumulo termico, qui ipotizzato come un container in cui sono disposti 42 elementi base secondo una matrice 6x7, presenterà un costo di 110-120 €/kWh o di 228-250 €/kWh se si portano in conto anche i costi accessori ed il contributo di installazione/lavorazione.

## 1 Introduzione

Il lavoro qui descritto è stato realizzato all'interno della linea di attività LA2.12 del PTR 2019-2021 relativa allo "Sviluppo e caratterizzazione di elementi di accumulo termico in calcestruzzo con proprietà termiche incrementate". Tale attività rientra nel WP2 "Accumulo termico" del Progetto "Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power-to-gas, e relative interfacce con le reti", afferente al PAR2021 dell'Accordo di Programma ENEA-MISE 2019-2021.

I prototipi di un tre diversi elementi base di accumulo termico in calcestruzzo, denominati SH02 e contenenti del materiale a cambiamento di fase stabilizzato in forma (SS-PCM o mEPCM) in piccole quantità, sono stati progettati e realizzati nella prima parte della presente linea di attività [1]. Ogni elemento ha una dimensione di 220x220x3000 mm.

Il lavoro, presentato in questo documento, è quindi consistito nell'eseguire una completa caratterizzazione termica dei tre differenti elementi di accumulo utilizzando l'impianto sperimentale denominato Solteca3, presente nel CR ENEA Casaccia.

Infine sono stati valutati i costi associati alla realizzazione del singolo elemento e del sistema modulare, cioè un insieme di elementi di accumulo posti in serie o in parallelo in numero appropriato alle esigenze dell'utenza. Il progetto del modulo è stato realizzato dall'Università di Perugia nella linea LA 2.13.

## 2 L'impianto sperimentale Solteca3

L'impianto sperimentale denominato SOLTECA3 è utilizzato per la caratterizzazione fino a 300 °C di elementi di accumulo termico di medio-piccola taglia in condizioni operative quasi reali di portata. Il limite operativo di temperatura è imposto dall'olio utilizzato come fluido termovettore.

Tale impianto, già presente in ENEA ed utilizzato anche per lo svolgimento del presente lavoro (Figura 2-1), è stato leggermente aggiornato al fine di migliorarne le prestazioni.



Figura 2-1- Impianto Solteca3 e console di controllo.

In particolare, una prima serie di attività di messa a punto dell'impianto, effettuate ne 2020 e documentate nel dettaglio in [2], hanno riguardato:

- La sostituzione del misuratore di portata con uno con maggiore precisione (errore da 1.6% a 0.1%), che si avvale dell'effetto Coriolis ed ha il vantaggio di essere indipendente dalle caratteristiche del fluido di processo liquido;



Figura 2-2- Serbatoio olio diatermico.

- La sostituzione dello scambiatore olio/acqua per il raffreddamento del fluido di processo, per simulare le condizioni di scarica dell'accumulo termico, con un dispositivo di raffreddamento olio/aria, in modo da poter meglio modulare gli scambi termici, poiché quello olio/acqua non era regolabile a portate troppo basse a causa della possibile evaporazione dell'acqua nei tubi e conseguente aumento di pressione, a basse portate;
- La coibentazione di alcune parti dell'impianto per limitare le perdite termiche. Queste hanno interessato in particolare la pompa di circolazione e il tratto di collegamento verso e dal modulo di accumulo;
- La sostituzione della pompa a trascinamento magnetico, che perdeva olio con una nuova di caratteristiche identiche;
- La sostituzione del serbatoio di accumulo dell'olio termico, che si era danneggiato (Figura 2-2). In questo caso il serbatoio è stato realizzato in acciaio inossidabile (AISI 304), invece che acciaio al carbonio come quello preesistente.

## 2.1 Il fluido termovettore: Therminol66

Le proprietà del fluido termovettore, il Therminol66, sono riportate qui di seguito in funzione della temperatura operative, in accordo con il Data Sheet del fornitore [4]:

$$\text{Density} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = -0.614254 * T - 0.000321 * T^2 + 1020.62$$

$$\text{Thermal Conductivity} \left( \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right) = -0.000033 * T - 0.00000015 * T^2 + 0.118294$$

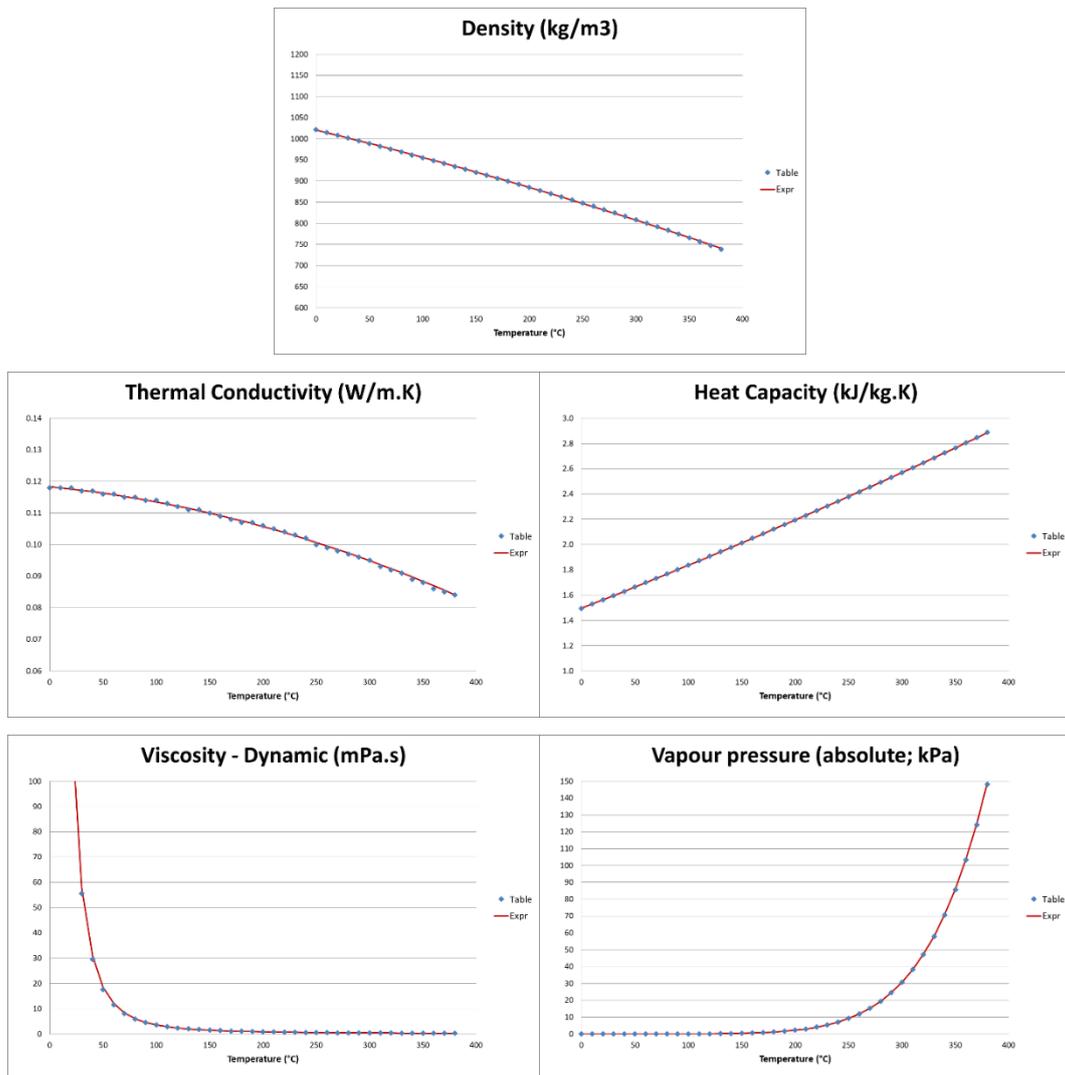
$$\text{Heat Capacity} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \right) = 0.003313 * T + 0.0000008970785 * T^2 + 1.496005$$

$$\text{Kinematic Viscosity} \left( \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \right) = e^{\left( \frac{586.375}{T+62.5} - 2.2809 \right)}$$

$$\text{Vapour pressure (absolute, kPa)} = e^{\left( \frac{-9094.51}{T+340} + 17.6371 \right)}$$

In tutte le relazioni la temperatura è espressa in °C.

Queste proprietà sono anche graficate in **Figura 2-3**, confrontando i valori numerici del fornitore con quelli delle relative formule.



**Figura 2-3- Andamento in funzione della temperatura delle principali proprietà fisiche del Therminol66 con confronto tra valori numerici e formule.**

### 3 Installazione dei prototipi SH02

Nel presente capitolo sono descritte le fasi che hanno permesso l'installazione dei moduli. Questi hanno richiesto una coibentazione adeguata e l'accoppiamento con l'impianto Solteca3, nonché il collegamento delle termocoppie associate per il rilevamento delle temperature, con il sistema di acquisizione dei dati.

Per evitare dispersioni termiche elevate (superiori per es. ad 1.5 kW) e far sì che la temperatura di parete esterna del modulo coibentato non superasse i 30 °C (anche per questioni di sicurezza degli operatori) si è ricorsi ad una coibentazione di 40 cm di spessore per ogni faccia del modulo di forma parallelepipedica. La coibentazione è costituita di materassini di lana di roccia aventi densità di circa 120 kg/m<sup>3</sup> e spessore di ricoperta da lamierino.

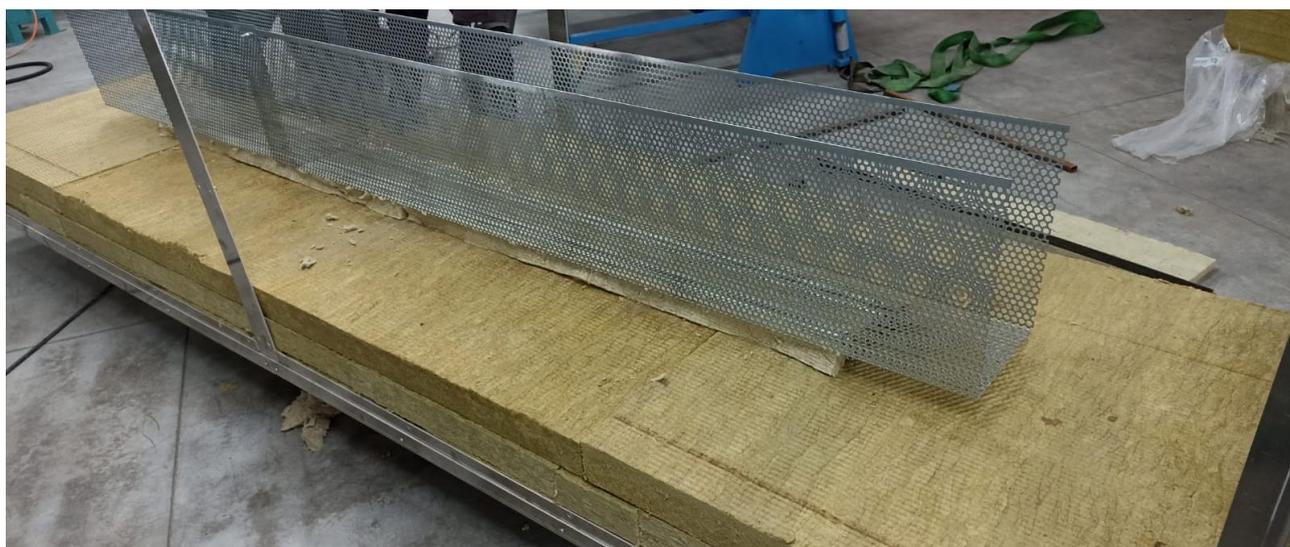
Siccome ogni modulo prima di essere caratterizzato termicamente, aveva la necessità di essere degassato senza coibentazione, quest'ultima doveva essere facilmente smontabile e riapplicabile sul modulo stesso. Inoltre, dato che i moduli erano in numero di 3 da caratterizzarsi in periodi successivi, per limitare i costi e problemi di smaltimento, si è preferito utilizzare un'unica coibentazione da applicare a tutti i moduli in fasi non contemporanee.

In **Figura 3-1** si può notare la prima fase di costruzione del sistema di coibentazione costituita dalla realizzazione del pavimento in alluminio, al quale è stato accoppiato un carrello a rotelle in grado di sostenere il modulo cementizio.



**Figura 3-1- Pavimento e carrello del sistema di coibentazione del modulo cementizio.**

Dopo che i primi materassini di lana di roccia sono stati appoggiati sul pavimento in alluminio, è stata applicata una griglia sopra al carrello, per racchiudere il modulo cementizio (**Figura 3-2**), quindi sono state aggiunte le lastre di alluminio laterali e sono stati posizionati i materassini di lana di roccia (**Figura 3-3**).



**Figura 3-2 -Posizionamento della griglia di contenimento del modulo cementizio.**



**Figura 3-3 -Posizionamento dei materassini di lana di roccia all'interno del sistema di coibentazione del modulo.**

Il modulo cementizio, dunque dopo degassaggio effettuata esternamente a Solteca 3 e tramite circolatore-riscaldatore Julabo SE per 35 ore fino a temperatura di 160 °C (Figura 3-4 e Figura 3-5) è inserito all'interno del sistema di coibentazione con l'aiuto di un carroponte (Figura 3-6). L'ingresso e l'uscita dello scambiatore di acciaio inserito all'interno del modulo viene a questo punto collegato, per mezzo di raccordi  $\alpha$ -lock, con l'impianto Solteca3 (Figura 3-7). Il sistema viene quindi coperto con coperchio metallico dopo aver inserito gli ultimi materassini di lana di roccia (Figura 3-8).



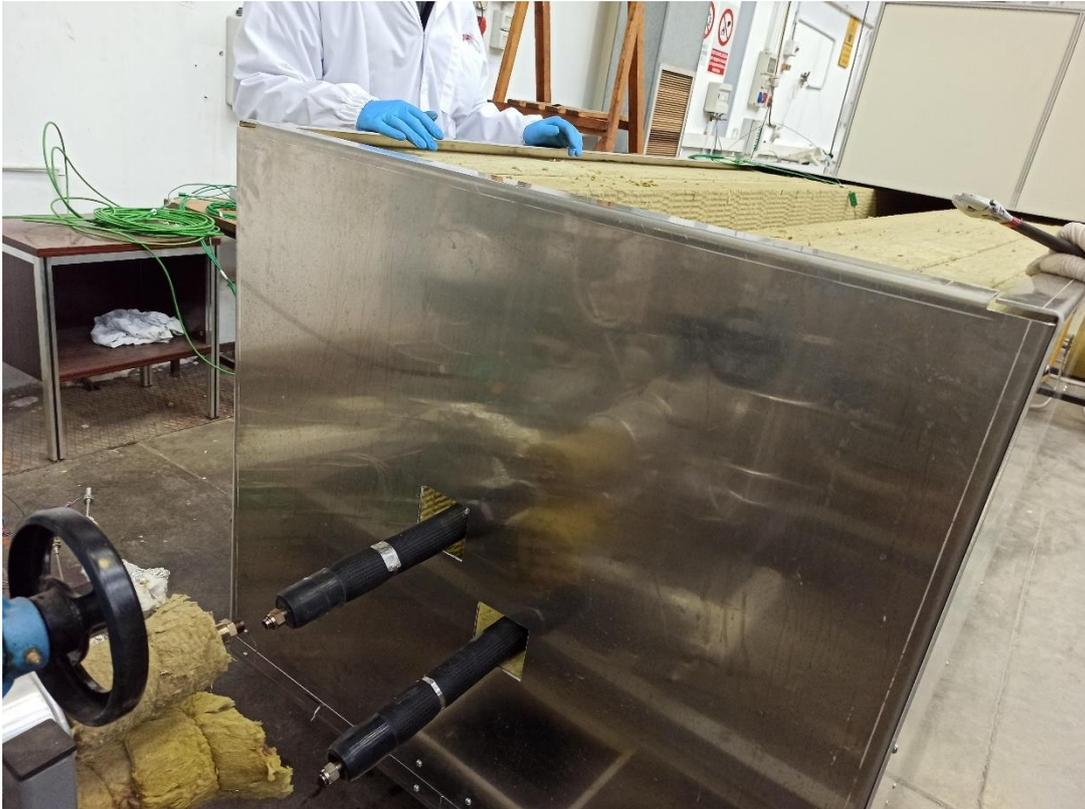
Figura 3-4 - circolatore riscaldatore Julabo SE nella procedura di degassamento del modulo cementizio.



**Figura 3-5 - Particolare del degassamento del modulo cementizio che mostra il vapore acqueo uscente dal modulo stesso.**



**Figura 3-6 – Inserimento del modulo cementizio all'interno de sistema di coibentazione.**



**Figura 3-7 – accoppiamento del modulo cementizio con Solteca3.**



**Figura 3-8 – Sistema di coibentazione completato e con il modulo cementizio inserito.**

Infine, vengono installate le termocoppie per la misura della temperatura al sistema di acquisizione.

Le termocoppie di tipo K da 1mm sono posizionate nella parte centrale ed in maniera equidistante longitudinalmente all'interno del modulo, una è posizionata sulla parete esterna, al centro, al di sotto della coibentazione ed una sopra alla coibentazione.

La scheda di acquisizione utilizzata è la NI (National Instruments) -TB 9214 accoppiata alla NI cDAQ 9188 XT (Figura 3-9) per essere accoppiata a NI LabView per mezzo di una interfaccia appositamente sviluppata, nella quale le temperature imposte, la velocità ed il posizionamento delle valvole è programmabile ed anche pilotabile da remoto (Figura 3-10). La parte di acquisizione relativa all'impianto Solteca3 è rimasta identica a quella descritta in ed utilizzata per le prove della LA2.1 del 2019 [3].

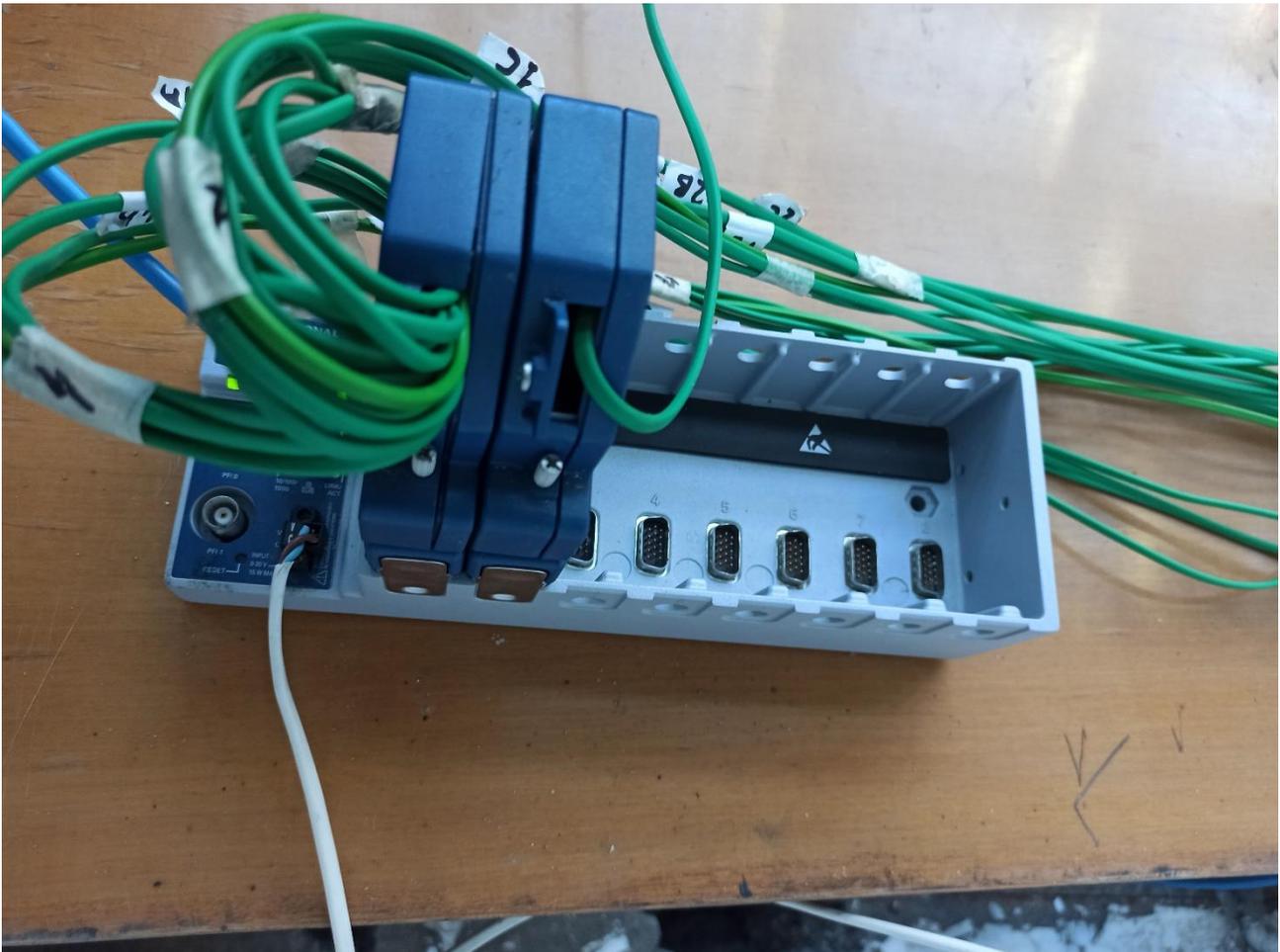


Figura 3-9 – Termocoppie installate su schede di acquisizione della National Instruments.

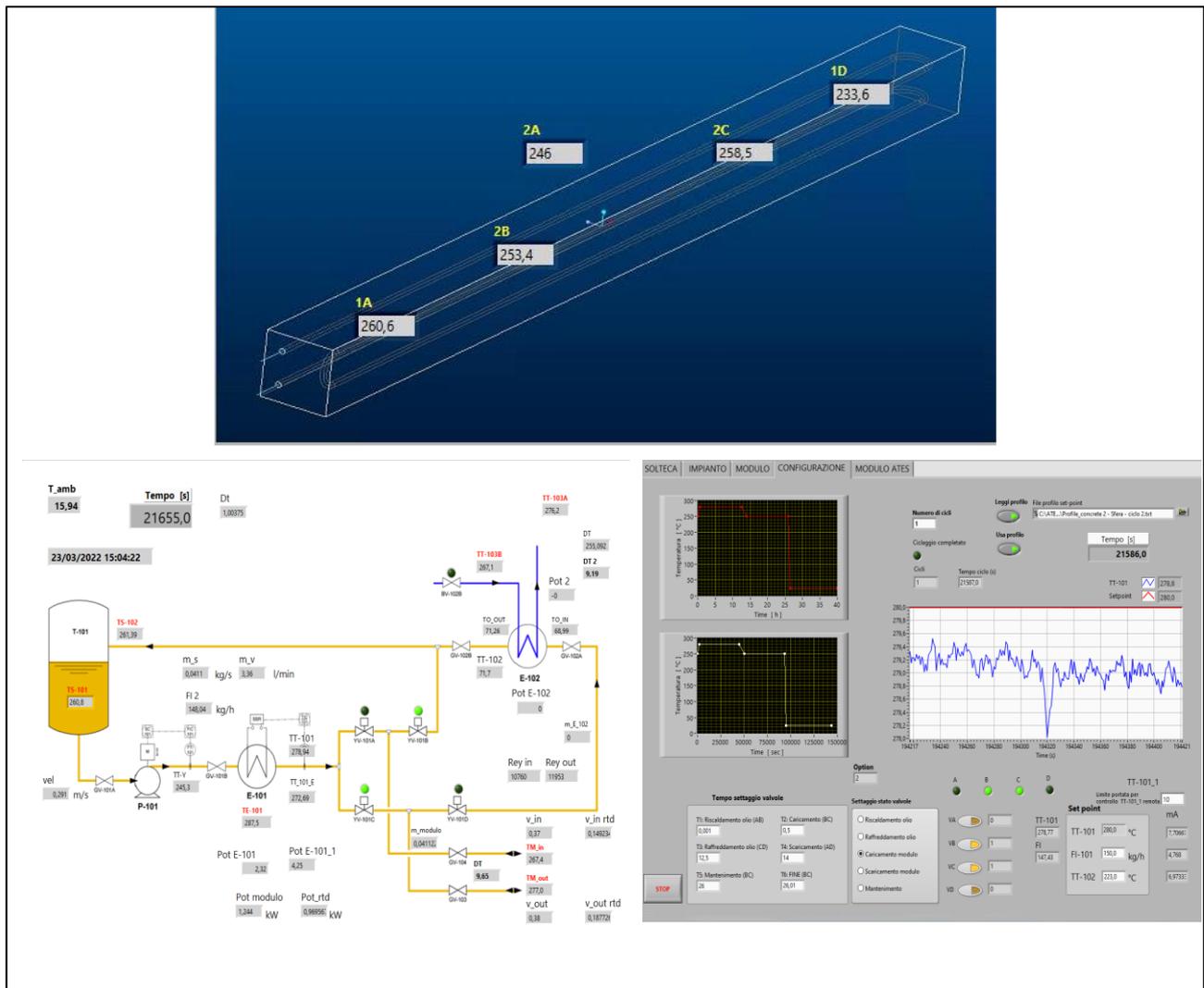


Figura 3-10 – interfaccia di comando realizzata in NI LabView.

## 4 Descrizione delle prove di caratterizzazione

Le prove di caratterizzazione dei prototipi SH02 sono di quattro tipi differenti:

- 1 Valutazione delle perdite termiche ad una temperatura costante (metodo Energy balance);
- 2 Curva di Potenza del HTF in un ciclo carico/scarico;
- 3 Valutazione delle perdite termiche a sistema inattivo durante un intervallo di tempo t (metodo di confronto);
- 4 Analisi fasi carico/scarico del TES in più cicli.

Le varie prove verranno descritte in dettaglio nei paragrafi seguenti.

### 4.1 Valutazione delle perdite termiche ad una temperatura costante (metodo Energy balance)

Questo tipo di prova è finalizzato a quantificare le perdite termiche del sistema da caratterizzare in funzione delle temperature operative. Le perdite termiche,  $P_{lost}$ , del prototipo in esame, anche se non possono essere estrapolate per sistemi TES di maggiori grandi, forniscono indicazioni di interesse soprattutto nella analisi dei risultati delle prove successive.

La procedura per quantificare le perdite termiche ad una temperatura  $T_{SM}$  del mezzo di accumulo termico è la seguente:

- Preriscaldare il prototipo di accumulo, alla portata di riferimento, ad una temperatura prossima a  $T_{SM}$ . Questa situazione deve essere verificata misurando la temperatura all'interno del prototipo.
- Caricare il prototipo TES finché il sistema è isotermico ad una temperatura costante  $T_{SM}(t)$ . Pertanto, è necessario misurare  $T_{HTF,in}(t)$ ,  $T_{HTF,out}(t)$  così come la temperatura ambiente,  $T_{\infty}$ .

$$T_{SM}(t) = \frac{T_{HTF,in}(t) + T_{HTF,out}(t)}{2}$$

- Misurare il flusso di HTF,  $q_{HTF}(t)$ , calcolare le perdite di calore di potenza,  $P_{lost}$ , alla temperatura del HSM assunta costante,  $T_{SM}$ , bilanciandolo con la potenza del HTF in carico

$$P_{HTF}(t) = \rho_{HTF} q_{HTF}(t) \bar{c}_{p,HTF} (T_{HTF,out}(t) - T_{HTF,in}(t)) = P_{lost}(t, T_{SM} - T_{\infty})$$

Nel nostro caso, la procedura dovrebbe essere ripetuta per diverse temperature, es.: 220, 235, 250, 265, 280 °C. In dettaglio, la prova completa può essere strutturata nel modo seguente:

**Tabella 4-1 Procedura per la valutazione delle perdite termiche ad una temperatura costante (Metodo Energy balance)**

Fase #	Descrizione	T finale (°C)	Durata (h)
0	Condizioni iniziali	220	10
1	Riscaldamento olio	235	0.5
2	Carico	235	10
3	Riscaldamento olio	250	0.5
4	Carico	250	10
5	Riscaldamento olio	265	0.5
6	Carico	265	10
7	Riscaldamento olio	280	0.5
8	Carico	280	10
9	Raffreddamento olio	220	0.5
10	Scarico	220	7.5
11	Mantenimento	220	0

La portata del HTF può essere mantenuta costante e pari a 550 kg/h.

#### 4.2 Curva di Potenza del HTF in un ciclo carico/scarico

La procedura seguente è fondamentalmente un "test unificato" che può essere utilizzato per stimare cinque indicatori di prestazioni:

- Tempi di carico e scarico;
- Perdite di calore (metodo isoterma);
- Capacità termica di accumulo;
- Efficienza di accumulo;
- Fattore di utilizzo.

La procedura è:

1. Riscaldare il TES alla portata nominale e alla temperatura minima fino a quando non si osserva una condizione stazionaria di fine carico;
2. Le perdite di calore dinamiche alla temperatura minima possono essere misurate ora;
3. Caricare il TES alla portata nominale e alla temperatura massima fino a quando non viene osservato uno stato stazionario di fine carico (potrebbero essere utilizzati diversi criteri di fine carico, a condizione che siano chiaramente descritti);
4. Le perdite di calore dinamiche alla temperatura massima e il tempo di carico possono essere misurate ora;
5. Scaricare il TES alla portata nominale e alla temperatura minima fino a quando non si osserva una condizione stazionaria di fine scarico;
6. Le perdite di calore dinamiche alla temperatura minima e il tempo di scarico possono essere misurate ora;
7. L'energia totale trasferita allo stoccaggio  $E_{charge}$  può essere calcolata da 1 a 3,
8. L'energia accumulata estratta può essere calcolata da 4 a 6 in funzione della temperatura di uscita  $E_{discharge}(T_{out,discharge})$
9. La capacità di accumulo è uguale a  $E_{discharge}(T_{out,discharge})$  *full discharge conditions*

$$E_{discharge}(T_{out,discharge}) = SC = \int_{initial\ conditions}^{full\ discharge\ conditions} (\dot{m}_{out}h_{out} - \dot{m}_{in}h_{in})dt$$

10. Il tasso di utilizzo può essere calcolato anche in funzione di  $T_{out,discharge}$

$$UR(T_{out}) = \frac{E_{discharge}(T_{out,discharge})}{Theoretical\ storage\ capacity}$$

11. L'efficienza di accumulo può essere calcolata in funzione della temperature di uscita

$$\eta_{TES}(T_{out,charge,max}, T_{out,discharge,min}) = \frac{E_{discharge}(T_{out,discharge,min})}{E_{charge}(T_{out,charge,max})}$$

12. L'efficienza exergetica di accumulo può essere calcolata in funzione della temperature di uscita

$$\eta_{ex} = \frac{\epsilon_{discharge}}{\epsilon_{charge}} = \frac{\int_{discharge} \left(1 - \frac{T_0}{T_{out}}\right) dE}{\int_{charge} \left(1 - \frac{T_0}{T_{in}}\right) dE} = \frac{\int_{discharge} \left(1 - \frac{T_0}{T_{out}}\right) P dt}{\int_{charge} \left(1 - \frac{T_0}{T_{in}}\right) P dt}$$

13. La Potenza termica media ( $P_{mean}$ ) è la Potenza media di scarico. Essa è il valore medio su tutto il period di scarico, ed è strettamente collegata al tempo di scarico ( $t_{discharge}$ ).

$$P_{mean} = \frac{Storage\ capacity}{t_{discharge}}$$

Le condizioni di prova carico/scarico completo sono caratterizzate da un flusso di HTF costante per tutta la prova, una condizione nominale iniziale di temperatura del HTF sia per la fase di carico che per quella di scarico ed un set-point di temperatura massima/minima di uscita (ovvero da un criterio di fine carico/scarico).

Il test in questione dovrebbe essere ripetuto con diversi possibili livelli di potenza: massima, metà e minima. Ciò equivale, sostanzialmente, a variare la portata del sistema.

Nel caso specifico si utilizzerà un solo valore di portata (550 kg/h, portata media) e due diversi intervalli di temperatura (220-250 °C e 250-280°C).

Su tale base si analizzeranno i seguenti casi per ciascuna tipologia di prototipo:

**Tabella 4-2 Condizioni di prova per il Test#2 del prototipo SH02**

Caratteristica	Test #2/a	Test #2/b
Portata in massa (kg/h)	550	550
Velocità HTF ingresso TES (m/s)	1.36	1.36
Carico –T ingresso (°C)	250	280
Scarico - T ingresso (°C)	220	250

In dettaglio, una prova completa può essere strutturata nel modo seguente:

**Tabella 4-3 Procedura per la valutazione della curva di potenza del HTF in un ciclo carico/scarico**

	Intervallo	(220-250)		(250-280)	
Fase #	Descrizione	T finale (°C)	Durata (h)	T finale (°C)	Durata (h)
0	Condizioni iniziali	220	10	250	10
1	Riscaldamento olio	250	0.5	280	0.5
2	Carico	250	10	280	10
3	Raffreddamento olio	220	0.5	250	0.5
4	Scarico	220	10	250	10
5	Mantenimento	220	x	250	x

### 4.3 Valutazione delle perdite termiche a sistema inattivo durante un intervallo di tempo t (metodo di confronto)

Questo test va eseguito dopo il Test#2, una volta calcolata la potenza termica media per uno scarico completo, necessaria alle valutazioni che seguiranno:

$$P_{100\%,mean} = \frac{1}{t_{discharge}^{100 \rightarrow 0}} \int_{t_{100}}^{t_0} P_{HTF}(t) dt$$

In questa prova (Test#3) occorre effettuare una nuova fase di carico termico fino ad avere il prototipo di accumulo completamente carico (100%). Successivamente si interrompe la circolazione del HTF e si lascia il prototipo inattivo per un certo tempo t. A causa delle perdite termiche, il livello di accumulo, dopo il tempo t, si riduce al livello di accumulo A. Si sottolinea che in tale prova la temperatura ambiente dovrebbe essere il più possibile costante. A questo punto si effettua uno scarico completo, e si calcola la corrispondente potenza media,  $P_{A,mean}$ :

$$P_{A,mean} = \frac{1}{t_{discharge}^{A \rightarrow 0}} \int_{t_{1A}}^{t_0} P_{HTF}(t) dt$$

L'energia persa nell'intervallo temporale t,  $P_{Idle\_lost,t}$ , sarà calcolata dalla seguente relazione

$$tP_{\text{Idle,lost},t}^A = t_{\text{discharge}}^{100 \rightarrow 0} P_{100\%,\text{mean}} - t_{\text{discharge}}^{A \rightarrow 0} P_{A,\text{mean}}$$

In dettaglio, la prova completa può essere strutturata nel modo seguente:

**Tabella 4-4 Procedura per la valutazione delle perdite termiche a sistema inattivo durante un intervallo di tempo t (metodo di confronto)**

Intervallo		(250-280)	
Fase #	Descrizione	T finale (°C)	Durata (h)
0	Condizioni iniziali	250	10
1	Riscaldamento olio	280	0.5
2	Carico	280	10
3	Attesa	280	1
4	Raffreddamento olio	250	0.5
5	Scarico	250	10
6	Mantenimento	250	x

La prova può essere effettuata ad una portata di riferimento a scelta (es.:550 kg/h)

#### 4.4 Analisi fasi carico/scarico del TES in più cicli

Scopo principale della presente prova è quello di verificare la ripetibilità del ciclo nel tempo senza mostrare perdite di prestazione (durabilità).

Il Test#4 è perfettamente analogo al Test#2: si tratta di ripetere N volte un tipico ciclo di carico/scarico, con durata di circa 12 ore. L'intervallo di tempo  $t^*$  tra il carico e lo scarico deve essere molto piccolo, il minimo necessario per il passaggio del sistema alla temperatura nominale di scarico (stato di ricircolo), per poi riprendere il pompaggio. Occorre scegliere la portata di riferimento e l'intervallo di temperatura.

Nel presente caso la portata sarà di 550 kg/h e l'intervallo di temperatura 250-280°C mentre il numero di cicli impostato è pari a 3.

## 5 Analisi delle condizioni fluidodinamiche interne

Prima di procedere alla caratterizzazione termica del prototipo SH02, si ritiene utile effettuare una breve analisi delle possibili condizioni fluidodinamiche che si potrebbero avere durante le prove di caratterizzazione termica al variare della portata del fluido termovettore.

L'impianto sperimentale Solteca3, dopo essere stato caricato con l'olio diatermico Therminol 66, sarà programmato per farlo circolare ad una portata volumetrica costante con temperature operative tra i 220 ed i 280°C. Tale portata potrebbe assumere valori diversi, tra i quali, ad esempio, i seguenti: 800 kg/ora, 550 kg/ora e 200 kg/ora.

Il fluido termovettore scorrerà all'interno dello scambiatore del prototipo SH02 assumendo una velocità che sarà funzione, oltre che della portata e delle proprietà del fluido stesso, anche delle dimensioni del tubo di scambio. Il tubo è caratterizzato da un diametro esterno di 16 mm ed uno spessore di 1.5 mm. Di conseguenza, il diametro interno sarà pari a 13 mm. Lo scambiatore è costituito da un tubo a serpentina di lunghezza complessiva pari a circa 12 metri e con quattro tratti rettilinei di circa 3 metri.

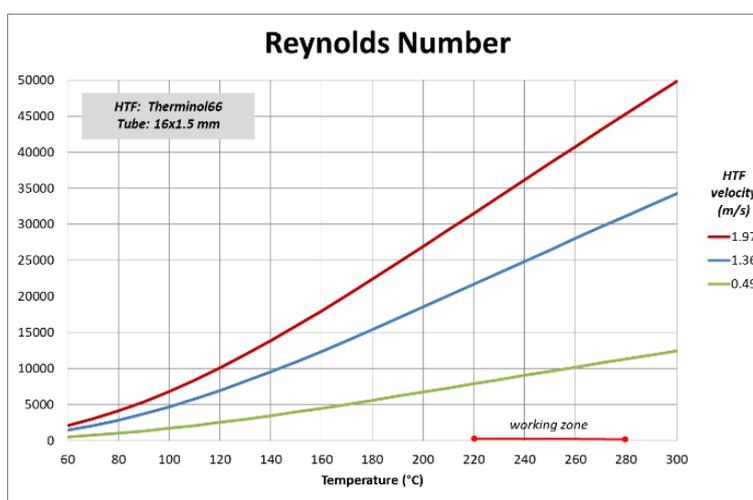
Da questi valori è anche possibile dedurre la velocità in ingresso del fluido termovettore:

**Tabella 5-1 Portata e velocità fluido termovettore in SH02**

Proprietà	Unità	Prova 1	Prova 2	Prova 3
Portata ingresso	kg/h	800	550	200
Portata ingresso	m <sup>3</sup> /s	2.62 E-04	1.8 E-04	6.55E-05
Velocità ingresso	m/s	1.97	1.36	0.49

A partire dai dati riportati in precedenza è quindi possibile calcolare, per i tre valori di riferimento di portata e velocità, i numeri di Reynolds e di Nusselt e, quindi, valutare il coefficiente di scambio termico.

In tutti i test si osserva che il Numero di Reynolds, sopra i 220 °C, superiore a 4000. Quindi, in questi casi si avrà un deflusso dell'HTF di tipo turbolento.



**Figura 5-1- Numero di Reynolds.**

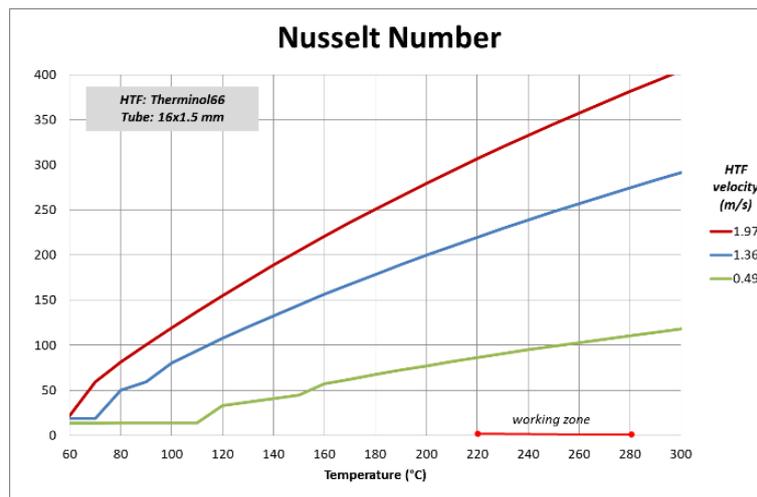
Gli andamenti delle curve relative al numero di Nusselt, Nu, sono calcolati utilizzando le seguenti correlazioni:

$$Nu_f = \begin{cases} 1.86 \left(\frac{d_i}{L}\right)^{1/3} Re_f^{0.33} Pr_f^{0.33} & \text{se } Re_f < 2300 \text{ (regime laminare)} \\ 0.0033 Re_f Pr_f^{0.37} & \text{se } 2300 < Re_f < 4000 \text{ (transizione)} \\ \frac{(f/8)(Re_f - 1000) Pr_f}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr_f^{2/3} - 1)} & \text{se } Re_f > 4000 \text{ (regime turbolento)} \end{cases}$$

In cui:

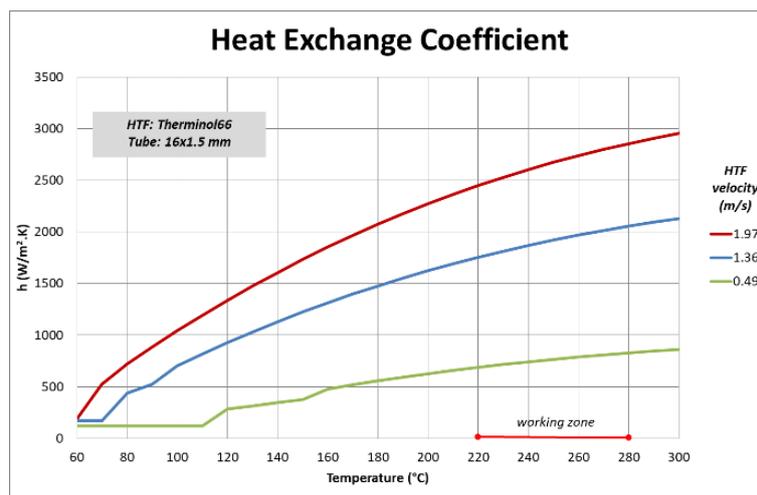
$$f = (0.79 \ln(Re_f) - 1.64)^{-2}$$

Da questi ultimi si evidenzia come il regime di transizione laminare-turbolento si esaurisce almeno sotto i 120°C, passando poi ad un regime di tipo turbolento.



**Figura 5-2- Numero di Nusselt**

In linea con il valore di Nusselt è, chiaramente, il coefficiente di scambio termico h. Per i vari test esso varia tra 690 e 830 W/m<sup>2</sup>°C per il primo, tra 1750 e 2050 W/m<sup>2</sup>°C per il secondo e, infine, tra 2450 e 2950 W/m<sup>2</sup>°C per il terzo.



**Figura 5-3- Coefficiente di scambio termico h calcolato.**

Una portata di circa 550 kg/h permetterebbe, quindi, di avere un buon coefficiente di scambio termico, essendo in regime turbolento, con una velocità di poco superiore ad 1 m/s, che escluderebbe l'innescò di fenomeni vibratorii nelle tubazioni.

## 6 Risultati della caratterizzazione

In questo capitolo vengono riassunti i risultati ottenuti dalle prove di caratterizzazione dei prototipi SH02, suddivisi per tipologia di prova effettuata.

### 6.1 Perdite termiche a temperatura costante

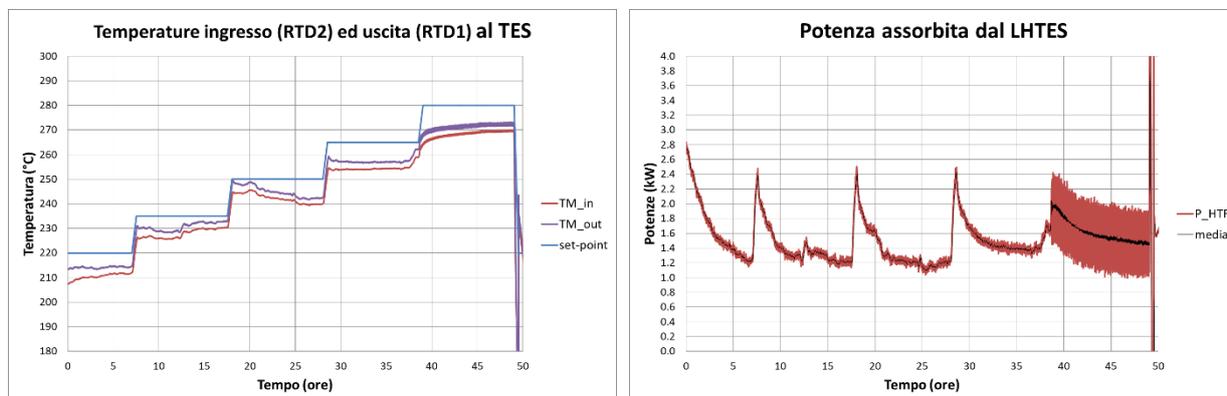
I risultati delle prove per la valutazione delle perdite termiche a temperatura costante, per ciascuno dei materiali utilizzati, sono riportati qui di seguito ed utilizzati nelle prove successive al fine di meglio calibrare le valutazioni energetiche effettuate.

#### 6.1.1 Provino con materiale tipo A

L'elemento di accumulo costituito da materiale di tipo A (senza aggiunta di PCM) è stato sottoposto ad un transitorio costituito da una sequenza di stati pseudo-stazionari a 220, 235, 250, 265 e 280 °C (nominali). Al termine di ciascun stazionario è stata allora valutata la potenza fornita che dovrebbe, teoricamente, compensare le perdite termiche.

In **Figura 6-1** sono mostrati gli andamenti delle temperature di set-point e di mandata e ritorno del HTF oltre che quello della potenza fornita al sistema TES. Da quest'ultima si sono dedotti i valori delle perdite alle temperature di funzionamento raggiunte durante gli stazionari programmati. Tali valori sono riassunti in **Tabella 6-1**.

Come si può vedere le perdite termiche crescono con l'aumentare della temperatura e vanno dai 1.2 kW a 220°C e salgono in modo esponenziale rapidamente fino ai 1.65 kW. I relativi flussi termici verso l'ambiente sono sicuramente elevati e vanno dai 70 ai 95 W/m<sup>2</sup>.



**Figura 6-1- Andamento delle temperature di ingresso ed uscita HTF e di set-point (sinistra). Andamento della potenza fornita al sistema TES.**

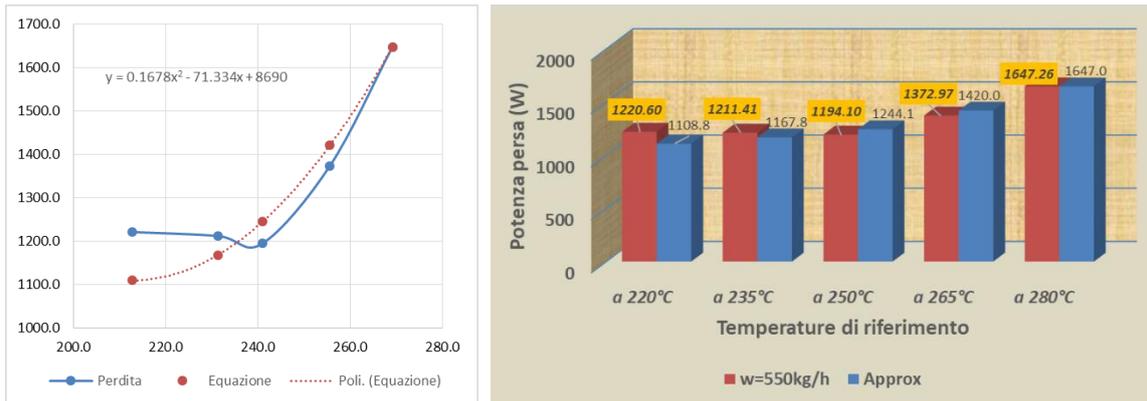
**Tabella 6-1 Perdite misurate in funzione della temperatura media operativa in SH02/A**

Temperatura nominale	P <sub>loss</sub> W	T <sub>m</sub> °C	Flusso W/m <sup>2</sup>
220°C	1220.60	212.77	69.41
235°C	1211.41	231.32	68.89
250°C	1194.10	240.96	67.91
265°C	1372.97	255.63	78.08
280°C	1647.26	269.20	93.68

Cerchiamo ora di interpolare i dati ottenuti attraverso una funzione della temperatura operativa che consenta di ottenere una previsione delle potenza termica persa. La funzione può essere:

$$P_{loss} = 0.1678 * T^2 - 71.334 * T + 8690$$

In **Figura 6-2** è mostrato il confronto tra la curva relativa ai dati misurati e quella interpolante (sinistra) e le barre con i valori per i punti di misura (destra). Lo scostamento massimo tra le perdite misurate e la funzione interpolante è inferiore al 9%.



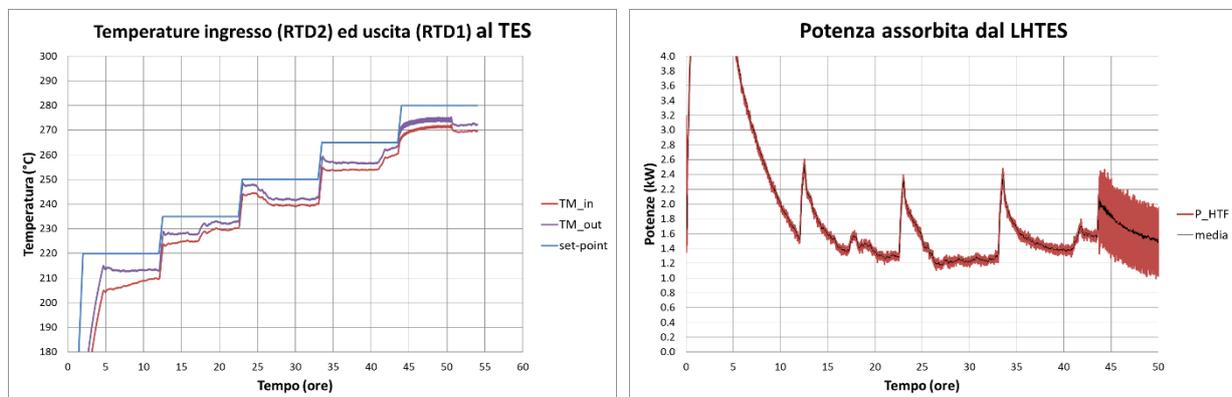
**Figura 6-2- Confronto tra la curva relativa ai dati misurati e quella interpolante (sinistra). Diagramma a barre dei valori misurati ed interpolati per le temperature di riferimento (destra).**

### 6.1.2 Provino con materiale tipo B

L'elemento di accumulo costituito da materiale di tipo B (con l'aggiunta del 5%wt di PCM) è stato sottoposto ad un transitorio identico a quello utilizzato per il materiale A. Anche in questo caso, al termine di ciascun stazionario è stata allora valutata la potenza fornita che dovrebbe, teoricamente, compensare le perdite termiche.

In **Figura 6-3** sono mostrati gli andamenti delle temperature di set-point e di mandata e ritorno del HTF oltre che quello della potenza fornita al sistema TES. Da quest'ultima si sono dedotti i valori i valori delle perdite alle temperature di funzionamento raggiunte durante gli stazionari programmati. Tali valori sono riassunti in **Tabella 6-2**.

Come si può vedere le perdite termiche rimangono abbastanza costanti e sono comprese tra gli 1.2 kW e gli 1.5 kW. I relativi flussi termici verso l'ambiente rimangono comunque elevati e compresi tra 70 e 90 W/m<sup>2</sup>.



**Figura 6-3- Andamento delle temperature di ingresso ed uscita HTF e di set-point (sinistra). Andamento della potenza fornita al sistema TES.**

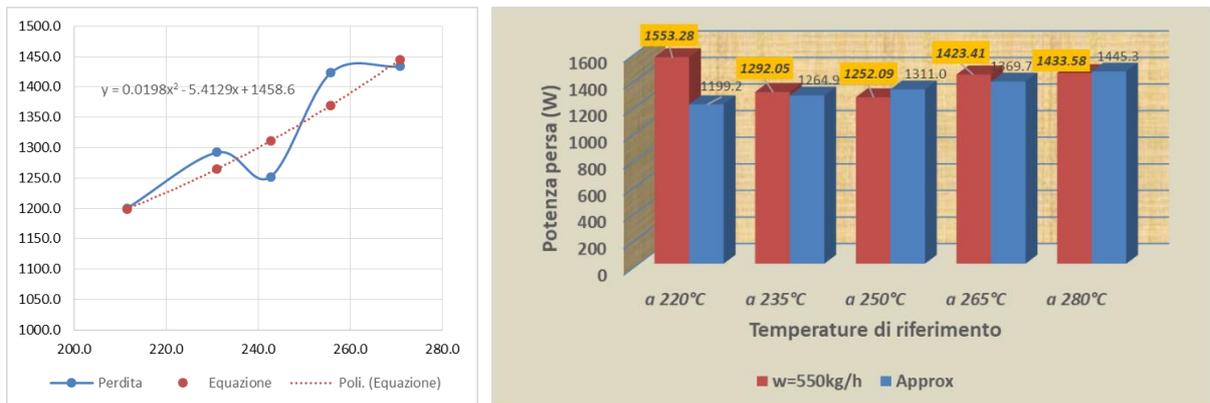
**Tabella 6-2 Perdite misurate in funzione della temperatura media operativa in SH02/B**

Temperatura nominale	P <sub>loss</sub> W	T <sub>m</sub> °C	Flusso W/m <sup>2</sup>
220°C	1553.28	211.39	88.33
235°C	1292.05	231.04	73.48
250°C	1252.09	242.67	71.20
265°C	1423.41	255.84	80.95
280°C	1433.58	270.89	81.52

Cerchiamo ora di interpolare i dati ottenuti attraverso una funzione della temperatura operativa che consenta di ottenere una previsione delle potenza termica persa. La funzione può essere:

$$P_{loss} = 0.0198 * T^2 - 5.4129 * T + 1458.6$$

In **Figura 6-4** è mostrato il confronto tra la curva relativa ai dati misurati e quella interpolante (sinistra) e le barre con i valori per i punti di misura (destra). Lo scostamento massimo tra le perdite misurate e la funzione interpolante è inferiore al 5%.



**Figura 6-4- Coefficiente di scambio termico h calcolato.**

### 6.1.3 Provino con materiale tipo C

L’elemento di accumulo costituito da materiale di tipo C (con l’aggiunta del 10%wt di PCM) è stato sottoposto ad un transitorio identico a quello utilizzato per il materiale A. Anche in questo caso, al termine di ciascun stazionario è stata allora valutata la potenza fornita che dovrebbe, teoricamente, compensare le perdite termiche.

In **Figura 6-5** sono mostrati gli andamenti delle temperature di set-point e di mandata e ritorno del HTF oltre che quello della potenza fornita al sistema TES. Da quest’ultima si sono dedotti i valori delle perdite alle temperature di funzionamento raggiunte durante gli stazionari programmati. Tali valori sono riassunti in **Tabella 6-3**.

Come si può vedere le perdite termiche rimangono abbastanza costanti e sono comprese tra gli 0.8 kW e gli 1.2 kW. I relativi flussi termici verso l’ambiente rimangono comunque elevati e compresi tra 50 ei 65 W/m<sup>2</sup>.

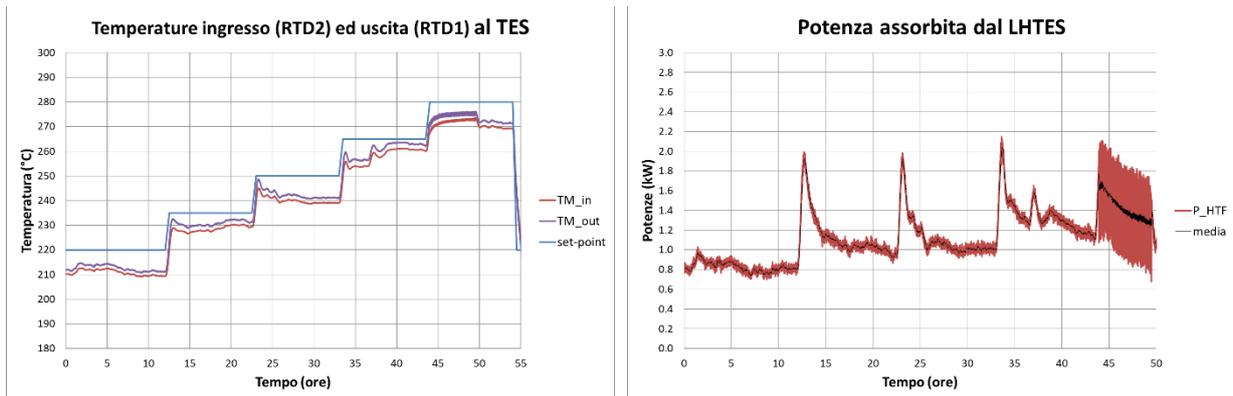


Figura 6-5- Andamento delle temperature di ingresso ed uscita HTF e di set-point (sinistra). Andamento della potenza fornita al sistema TES.

Tabella 6-3 Perdite misurate in funzione della temperatura media operativa in SH02/C

Temperatura nominale	$P_{loss}$ W	$T_m$ °C	Flusso $W/m^2$
220°C	815.67	210.48	46.38
235°C	1029.05	231.02	58.52
250°C	1009.37	240.09	57.40
265°C	1175.64	261.75	66.86
280°C	1150.32	270.40	65.42

Cerchiamo ora di interpolare i dati ottenuti attraverso una funzione della temperatura operativa che consenta di ottenere una previsione delle potenze termica persa. La funzione può essere:

$$P_{loss} = -0.00031118 * T^3 + 0.15203 * T^2 - 13.134 * T - 249.45$$

In Figura 6-6 è mostrato il confronto tra la curva relativa ai dati misurati e quella interpolante (sinistra) e le barre con i valori per i punti di misura (destra). Lo scostamento massimo tra le perdite misurate e la funzione interpolante è inferiore al 5%.

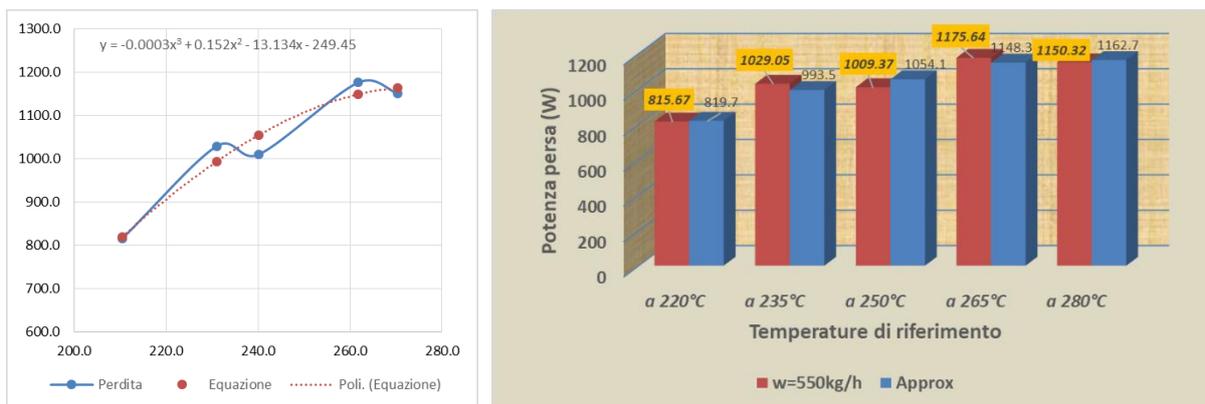


Figura 6-6- Coefficiente di scambio termico h calcolato.

## 6.2 Curve di potenza in carico/scarico

I risultati delle prove per l'analisi della curva di potenza in un ciclo carico/scarico (Test2), per ciascuno dei materiali utilizzati, sono sintetizzati in **Tabella 6-4**.

Di seguito questi risultati sono analizzati e commentati, ma prima si valuterà la capacità termica teorica del sistema SH02, utilizzata come riferimento nella valutazione dei risultati.

### 6.2.1 Capacità termica teorica

La capacità termica teorica del sistema SH02 è valutata sulla base delle dimensioni del prototipo e dei materiali che lo costituiscono. I dati di riferimento sono riportati nella seguente **Tabella 6-5**.

Come prima previsione teorica si può valutare la perdita stimata di calore a partire dalla superficie esterna del coibente, supposta ad una temperatura di 29°C, ipotizzando una temperatura ambiente di 20°C ed un coefficiente di scambio termico di 8 W/m<sup>2</sup>/°C. In tal caso, la perdita termica si attesterebbe intorno 1266 W, perfettamente in linea con le risultanze del Test01.

In **Tabella 6-6**, invece, sono riportate le valutazioni sulle capacità termiche dei singoli componenti che quelle complessive per il solo SH02 che per l'intero TES, coibentazione inclusa.

Da un punto di vista teorico, l'SH02, soggetto ad una variazione termica di circa 30°C tra carico e scarico, dovrebbe essere in grado di accumulare circa 1.7 o 2.3 kWh rispettivamente per il materiale A (senza PCM) e B (con il 5% di PCM). Inoltre, un grosso contributo arriva anche dal coibente presente: infatti, per il TES nel suo complesso la capacità di accumulo si incrementa a 3.7 e 4.2 kWh per i due materiali considerati.

Il contributo importante del coibente, insieme al livello abbastanza elevato delle perdite condizioneranno fortemente i risultati delle prove sperimentali, come illustrato qui di seguito.

Tabella 6-4 Riassunto dei principali risultati Test2 e Test3 del prototipo SH02.

Parameters	Units	Material A			Material B			Material C		
		Test2/a	Test2/b	Test3/b	Test2/a	Test2/b	Test3/b	Test2/a	Test2/b	Test3/b
Perdite misurate a 280 °C	W		1546	1558		1430	1362		1169	1179
Perdite misurate a 250 °C	W	1302	1182	1100	1287	1104	1178	1016	929	920
Perdite misurate a 220 °C	W	1113			983			781		
Capacità termica teorica del TES	kWh	3.70	3.71	3.71	4.22	4.22	4.22	4.97	4.97	4.97
Capacità termica teorica del HSM	kWh	1.74	1.75	1.75	2.26	2.26	2.26	3.00	3.01	3.01
Tempo di carico	h	6.00	6.84	6.37	6.17	6.98	6.50	8.00	6.02	5.72
Energia caricata	kWh	10.41	13.89	11.99	11.24	13.20	11.91	8.86	10.53	9.32
Exergia caricata	kWh	9.56	12.86	11.10	10.32	12.23	11.04	8.14	9.76	8.64
Energia accumulata	kWh	2.58	3.67	2.33	3.36	3.27	3.01	0.74	3.53	2.52
Energia persa	kWh	7.83	10.22	9.66	7.88	9.93	8.90	8.13	7.00	6.80
Energia accumulata nel HSM	kWh	1.25	1.37	1.09	2.24	1.38	1.34	0.23	0.69	1.43
Fattore di caricamento del HSM		71.7%	78.5%	62.4%	99.2%	61.0%	59.4%	7.7%	23.0%	47.7%
Tempo di scarico	h	0.65	0.20	0.00	0.84	0.20	0.00	1.27	0.65	0.16
Energia scaricata	kWh	-0.23	-0.13	0.00	-0.25	-0.12	0.00	-0.45	-0.29	-0.14
Exergia scaricata	kWh	-0.21	-0.12	0.00	-0.22	-0.11	0.00	-0.41	-0.26	-0.12
Energia accumulata	kWh	-0.96	-0.37	0.00	-1.08	-0.34	0.00	-1.46	-0.87	-0.28
Energia persa	kWh	-1.19	-0.50	0.00	-1.32	-0.46	0.00	-1.91	-1.16	-0.41
Energia accumulata nel HSM	kWh	-0.38	-0.10	0.00	-0.89	-0.11	0.00	-1.95	-0.55	-0.09
Fattore di caricamento del HSM		21.6%	5.6%	0.0%	39.5%	4.8%	0.0%	64.9%	18.4%	2.9%
Potenza media di carico	kW	1.74	2.03	1.88	1.82	1.89	1.83	1.11	1.75	1.63
Potenza media di scarico	kW	-0.35	-0.63	nd	-0.29	-0.62	nd	-0.36	-0.44	-0.84
Capacità di accumulo	kWh	0.23	0.13	0.00	0.25	0.12	0.00	0.45	0.29	0.14
Fattore di carico		69.57%	98.98%	62.84%	79.57%	77.54%	71.22%	14.85%	71.00%	50.75%
Fattore di utilizzo		6.20%	3.48%	0.00%	5.85%	2.88%	0.00%	9.08%	5.80%	2.72%
Efficienza energetica		2.21%	0.93%	0.00%	2.20%	0.92%	0.00%	5.09%	2.74%	1.45%
Efficienza exergetica		2.18%	0.92%	0.00%	2.17%	0.91%	0.00%	5.02%	2.71%	1.42%
Tempo attesa t* tra carico/scarico	h			1.5			1.5			1.5
Potenza persa durante t*	W			86			81			102
Energia persa durante t*	kWh			2.34			2.04			1.77

**Tabella 6-5 Dati di riferimento per la valutazione teorica della capacità termica del prototipo SH02**

<b>Componente</b>	Proprietà	Unità	Valore	Proprietà	Unità	Valore
<b>HSM tipo A</b>	cp	J/kg/C	631	k	W/m/C	1.69
	rho	Kg/m3	2250	lat	J/kg	0
<b>HSM tipo B</b>	cp	J/kg/C	637	k	W/m/C	1.6
	rho	Kg/m3	2263	lat	J/kg	5500
<b>HSM tipo C</b>	cp	J/kg/C	732	k	W/m/C	1.12
	rho	Kg/m3	2186	lat	J/kg	11000
<b>Elemento</b>	a	mm	220	Volume	m3	0.1427873
	b	mm	220	MHSM A	kg	319.43
	H	mm	3000	MHSM B	kg	321.27
	Superficie	m2	2.7368			
<b>Temp. Rifer.</b>	T,amb	°C	20	Temp 2	°C	250
	Temp 1	°C	220	Temp 3	°C	280
<b>Scambiatore</b>	de	mm	16	Voll	m3	0.00082
	sp	mm	1.5	Dens	kg/m3	8000.00
	L	m	12	Massa	kg	6.56
	Sez. tubo	m2	6.833E-05	cp	J/kg/°C	500
	Sez. interna	m3	0.0001327			
<b>HTF</b>	VHTF	m3	0.0015928	denHTF 1	kg/m3	858.5
	cp(T1)	J/kg/°C	2268	MHTF 1	kg	1.37
	cp(T2)	J/kg/°C	2380	denHTF 2	kg/m3	835.3
	cp(T3)	J/kg/°C	2494	MHTF 2	kg	1.33
	Tm HTF 1	°C	235			
	Tm HTF 2	°C	265			
<b>Coibente</b>	spessore	mm	400	dens	kg/m3	120
	Superficie	m2	17.6	cp	J/kg.C	1030
	V coibente	m3	3.8	massa	kg	457.0

**Tabella 6-6 Valutazione teorica della capacità termica del prototipo SH02**

**(\*) Per il coibente si sono considerate le temperature medie di 120, 135 e 150 °C**

**in corrispondenza di temperature operative di 220, 250 e 280 °C.)**

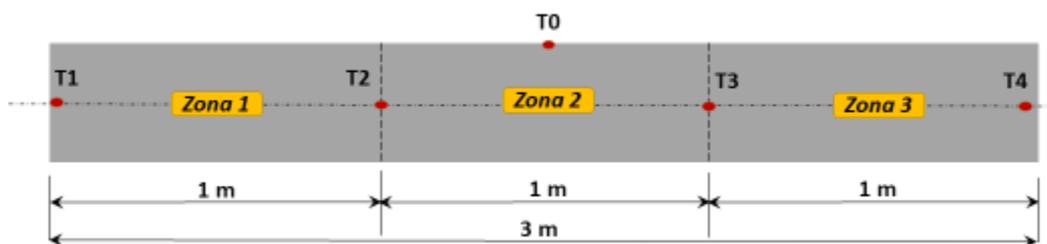
<i>Caratteristiche</i>	<i>Unità</i>	<i>Materiale A</i>		<i>Materiale B</i>		<i>Materiale C</i>	
		<i>T2/a</i>	<i>T2/b</i>	<i>T2/a</i>	<i>T2/b</i>	<i>T2/a</i>	<i>T2/b</i>
T,amb	°C	20	20	20	20	20	20
T,min	°C	220	250	220	250	220	250
T,max	°C	250	280	250	280	250	280
Capacità HSM	kWh	1.68 (45.3%)	1.68 (45.3 %)	2.20 (52.0%)	2.20 (52.0% )	2.94 (59.2%)	2.94 (59.2% )
Capacità scambiatore	kWh	0.03 (0.74%)	0.03 (0.74 %)	0.03 (0.65%)	0.03 (0.65% )	0.03 (0.55%)	0.03 (0.55% )
Capacità HTF	kWh	0.04 (0.98%)	0.04 (1.03 %)	0.04 (0.86%)	0.04 (0.90% )	0.04 (0.73%)	0.04 (0.77% )
Capacità Coibente (*)	kWh	1.96 (52.9%)	1.96 (52.9 %)	1.96 (46.5%)	1.96 (46.4% )	1.96 (39.5%)	1.96 (39.5% %)
<b>Capacità totale prototipo</b>	<b>kWh</b>	<b>3.70</b>	<b>3.71</b>	<b>4.22</b>	<b>4.22</b>	<b>4.97</b>	<b>4.97</b>
<b>Capacità solo SH02</b>	<b>kWh</b>	<b>1.74</b>	<b>1.75</b>	<b>2.26</b>	<b>2.26</b>	<b>3.00</b>	<b>3.01</b>

## 6.2.2 Prototipo con materiale tipo A

Il tempo di carico del prototipo A varia tra 6 e 7 ore in funzione dell'intervallo di temperature della prova (tempo maggiore per temperature più elevate). Ciò è chiaramente relazionato al livello di perdite termiche che, in linea con i risultati del Test1, vanno da 1.1 kW a 220°C fino a 1.5 kW a 280°C.

Durante la fase di carico del sistema si forniscono circa 10-14 kWh di cui, viste le elevate perdite (8-10 kWh), se ne accumulano circa 2.6 kWh nel sistema e solo 1.3 kWh nel SH02 (circa il 75% del teorico).

L'energia termica accumulata all'interno del calcestruzzo è stata stimata, per ogni istante temporale, a partire dalle temperature registrate nelle varie posizioni (T1, T2, T3 e T4) e dalle proprietà dei materiali. A tal fine si è ipotizzando che il prototipo sia costituito da tre diverse zone di identico volume e massa, come mostrato in [Figura 6-7](#).



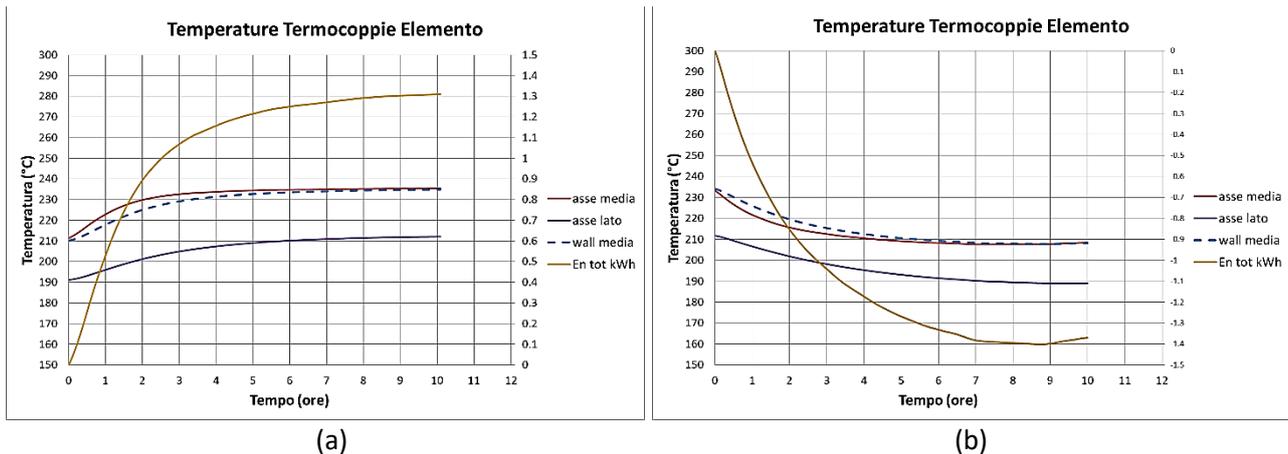
**Figura 6-7- Sezioni del prototipo in calcestruzzo utilizzate per la stima dell'energia accumulata**

Per ogni zona è stimata una temperatura media utilizzando i valori delle termocoppie prossime agli estremi e nota la variazione rispetto alla temperatura minima di partenza. L'energia termica accumulata nella zona stessa è calcolata tramite il contributo del calore sensibile e dell'eventuale calore latente, presente quando la temperatura supera quella di fusione del PCM. Sommando i contributi delle diverse zone è possibile stimare l'energia termica accumulata dal provino. Si trascurano i contributi dello scambiatore e del fluido termovettore.

Tale valutazione sarà tanto più vicino alla realtà quanto più la temperatura di una sezione trasversale del prototipo sarà uniforme. Per verificare tale condizione è possibile confrontare le temperature interne assiali con quella misurata al centro della parete esterna del prototipo (T0). Come si può notare bene, ad esempio, dagli andamenti di [Figura 6-8](#) la differenza tra T0 e T2 è molto simile e spesso dell'ordine di 1°C. Ciò è anche testimonianza della efficacia della coibentazione adottata. Dalla stessa figura traspare invece come la temperatura interna laterale (T1) sia invece inferiore alle altre due (di circa 10 °C) evidenziando un inferiore riscaldamento del materiale o la presenza di una perdita concentrata (presenza tubazioni di ingresso ed uscita dell'elemento).

Il tempo di scarico risulta essere, invece, molto più breve (tra i 12 ed i 40 minuti), poiché l'energia scaricata ha la concorrenza delle perdite termiche nello svuotare il sistema. Di conseguenza, l'energia scaricata varia tra 0.13 e 0.23 kWh e le perdite tra 0.5 e 1.9 kWh. L'energia estratta dal TES varia tra 0.37 e 0.96 kWh e dal solo HSM tra 0.1 e 0.4 kWh (solo circa il 5% del teorico).

Perciò, nel complesso, la potenza media va dai 350 ai 600 W con un fattore di utilizzo del 4-6% ed una capacità di accumulo di 130-230 Wh. Le efficienze energetica ed exergetica sono inferiori al 2%.



**Figura 6-8 Evoluzione delle temperature sia interne (mediane e laterali) che della parete dell'elemento di accumulo termico sia in fase di carico (a) che di scarico (b) per il materiale di tipo A tra 200 e 240°C**

### 6.2.3 Prototipo con materiale tipo B

Il tempo di carico del prototipo B varia sempre tra le 6 e 7 ore anche se leggermente superiore al caso precedente. Le perdite termiche. In questo caso, sono leggermente inferiori (maggiore resistenza termica del materiale) e vanno da 1 kW a 220°C fino a 1.4 kW a 280°C.

Durante la fase di carico del sistema si forniscono circa 11-13 kWh di cui, viste le elevate perdite (8-10 kWh), se ne accumulano circa 3.3 kWh nel sistema e solo 1.4-2.2 kWh nel SH02. Occorre qui osservare che il test condotto nell'intervallo di temperatura 220-250 °C accumula la quantità maggiore di calore nell'HSM (circa il 99% del teorico invece del 61%). Questo intervallo è pressoché coincidente con quello di cambio di fase del PCM contenuto nel materiale B, evento che favorisce lo sfruttamento del materiale di accumulo (accumulo calore sensibile e latente) e riduce il flusso di calore verso l'esterno. Per l'intervallo 250-280 °C ciò non avviene (si accumula solo calore sensibile) ed i risultati sono in linea con quello del materiale A.

Anche in questo caso il tempo di scarico risulta essere, invece, molto più breve (tra i 12 ed i 50 minuti). Di conseguenza, l'energia scaricata varia tra 0.12 e 0.25 kWh e le perdite tra 0.5 e 1.3 kWh. L'energia estratta dal TES varia tra 0.34 e 1.08 kWh e dal solo HSM tra 0.1 e 0.9 kWh (solo circa il 40% del teorico). Per la fase di scarico del Test2/b vale lo stesso discorso precedente che corrisponde ad un maggiore sfruttamento del materiale di accumulo. Nel complesso, la potenza media va dai 300 ai 620 W con un fattore di utilizzo del 3-6% ed una capacità di accumulo di 120-250 Wh. Le efficienze energetica ed exergetica sono inferiori al 2%.

### 6.2.4 Prototipo con materiale tipo C

Il tempo di carico del prototipo C risulta essere maggiore dei casi precedenti a bassa temperatura (8 ore) ma inferiore ad alta temperatura (5-6 ore). Le perdite termiche. In questo caso, sono leggermente inferiori a tutti i casi precedenti (maggiore resistenza termica del materiale) e vanno da 0.9 kW a 220°C fino a 1.1 kW a 280°C.

Durante la fase di carico del sistema si forniscono circa 9-10 kWh di cui, viste le elevate perdite (7-8 kWh), se ne accumulano circa 3 kWh nel sistema (ad alta temperatura) e solo 1. kWh nel SH02. Occorre qui osservare che il test condotto nell'intervallo di temperatura 220-250 °C accumula una quantità calore nell'HSM quasi nulla (circa il 7% del teorico). Questo intervallo è pressoché coincidente con quello di cambio di fase del PCM contenuto nel materiale C ma che, evidentemente, ostacola la trasmissione del calore a tutto il materiale, cosa evidenziata anche dal ridotto il flusso di calore verso l'esterno. Per l'intervallo 250-280 °C ciò avviene in modo ridotto (solo calore sensibile) anche se i risultati sono sempre inferiori a quelli dei materiali A e B.

Anche in questo caso il tempo di scarico risulta essere breve (tra gli 80 ed i 30 minuti). Di conseguenza, l'energia scaricata varia tra 0.14 e 0.45 kWh e le perdite tra 0.4 e 1.9 kWh. L'energia estratta dal TES varia tra 0.3 e 1.4 kWh e dal solo HSM tra 0.1 e 1.9 kWh (solo circa il 20% del teorico). Per la fase di scarico del

Test2/b si ravvisa un minore sfruttamento del materiale di accumulo. Nel complesso, la potenza media va dai 360 ai 440 W con un fattore di utilizzo del 3-6% ed una capacità di accumulo di 150-450 Wh. Le efficienze energetica ed exergetica sono inferiori al 5%.

### 6.3 Perdite termiche a sistema inattivo durante un intervallo temporale $t$

Vista la strutturazione del Test3 ed il livello delle perdite termiche stimate ( $>1$  kW) è evidente che con un tempo di attesa tra la fase di carico e quella di scarico  $t^*$  posto pari a 1.5 ore il risultato di questa prova è messo seriamente in dubbio. Infatti, nel tempo  $t^*$ , l'energia persa potrebbe essere superiore a 2 kWh, ovvero a quasi la totalità dell'energia accumulata.

Questo è esattamente ciò che accade ed è visibile nel Test03/b relativo ai tre materiali. In essi, la fase di carico è pressoché analogo a quella del Test02/b ma la fase di scarico è sostanzialmente mancante poiché il sistema si è eccessivamente raffreddato e non è in grado di restituire nulla di quanto accumulato. Di conseguenza, in queste condizioni, è impossibile avere una valutazione della potenza persa dal sistema attraverso un metodo di confronto.

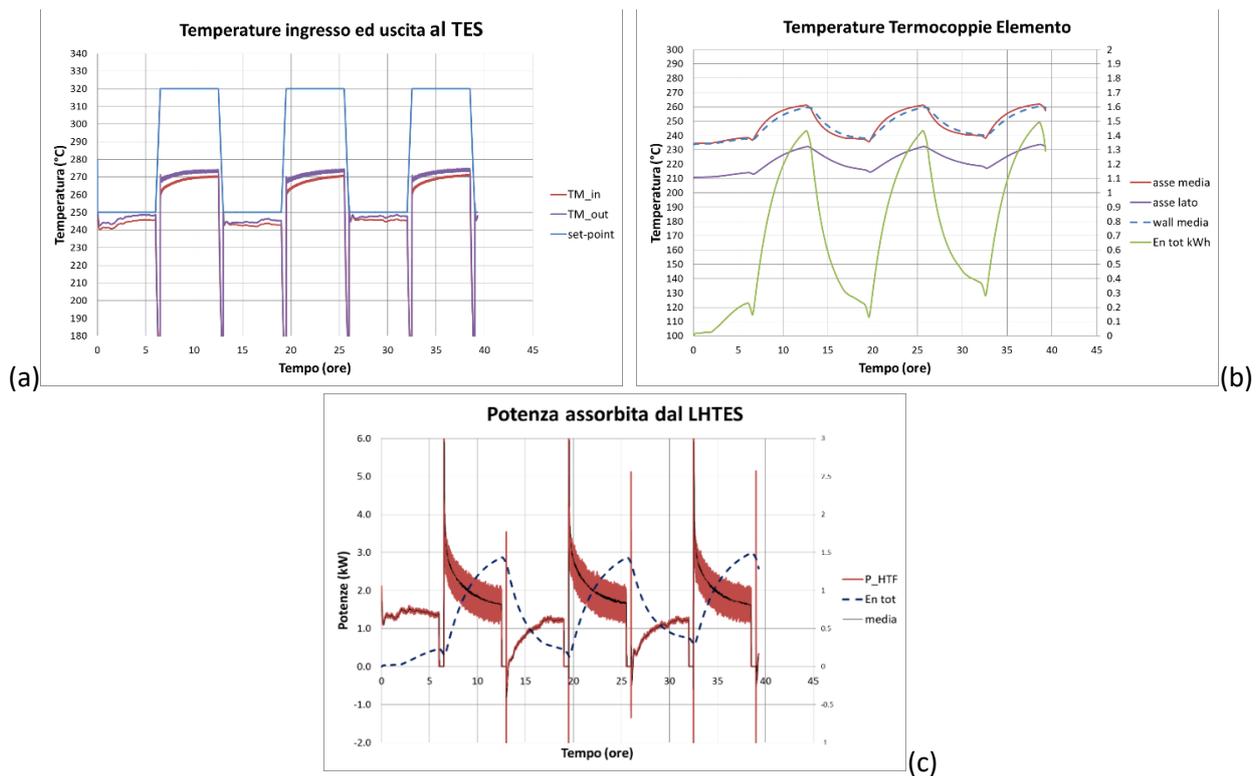
### 6.4 Analisi a 3 cicli

L'analisi di tre cicli di carico/scarico dei prototipi SH02 (Test04) ha come obiettivo quello di verificarne il comportamento termico nel tempo e le eventuali tendenze.

#### 6.4.1 Prototipo con materiale tipo A

In **Figura 6-9** sono riportate le evoluzioni dei principali parametri del Test04 per il materiale A. Da queste risulta che:

- Le temperature del HTF in ingresso ed uscita al prototipo rimangono tra i 240 e 250°C nella fase di scarico e raggiungono i 270 °C nella fase di carico in tutti i cicli esaminati;
- Le temperature delle termocoppie interne centrali e di quella superficiale dell'elemento seguono lo stesso andamento tra i 235 ed i 260 °C con una variazione più accentuata. Le termocoppie interne laterali evolvono con un intervallo di temperatura inferiore di circa 20°C. L'evoluzione dell'energia accumulata nel solo elemento evidenzia un valore massimo quasi costante per ogni ciclo, pari a 1.4-1.5 kWh con un minimo che però tende a crescere (da 0.2 a 0.4 kWh) tra il primo ed il secondo ciclo: la difficoltà di scaricare completamente l'energia accumulata in un ciclo riduce, di fatto, la capacità di accumulo del ciclo seguente;
- Tale comportamento è confermato anche dal confronto tra potenza fornita ed energia accumulata nel SH02. In fase di carico la potenza fornita al LHTES varia dai 3.5 kWh iniziali agli 1.5 kWh a fine fase. Invece, in fase di scarico (sostanzialmente inesistente) la potenza incrementa fino ad un massimo di 1.2 kWh. I valori di fine ciclo rappresentano abbastanza bene i livelli di perdite previsti. Detti valori rimangono sostanzialmente costanti in tutti i cicli.



**Figura 6-9** Evoluzione materiale di tipo A, tra 250 e 280°C, per tre cicli: (a) temperature del HTF di ingresso ed uscita elemento e del set-point; (b) temperature interne (mediane e laterali) e parete dell'elemento e energia accumulata nel solo elemento; (c) della potenza assorbita dal sistema LHTES e della energia accumulata nell'elemento.

#### 6.4.2 Prototipo con materiale tipo B

In **Figura 6-10** a) sono riportate le evoluzioni dei principali parametri del Test04 per il materiale B. Da queste risulta che:

- Le temperature del HTF, in analogia al materiale A, in ingresso ed uscita al prototipo rimangono tra i 240 e 250°C nella fase di scarico e raggiungono i 270 °C nella fase di carico in tutti i cicli esaminati;
- Le temperature delle termocoppie interne centrali e di quella superficiale dell'elemento seguono lo stesso andamento tra i 235 ed i 260 °C con una variazione più accentuata. Le termocoppie interne laterali evolvono con un intervallo di temperatura inferiore di circa 10°C. L'evoluzione dell'energia accumulata nel solo elemento evidenzia un valore massimo quasi costante per ogni ciclo, pari a 1.3 kWh con un minimo che però tende leggermente a crescere (da -0.2 a -0.1 kWh) tra il primo ed il secondo ciclo. Rispetto al caso precedente la capacità di accumulo del SH02 con materiale B risulta maggiore di quella con del materiale A (1.5 kWh contro 1.2 kWh, +20%) e più stabile durante il ciclaggio;
- In fase di carico la potenza fornita al LHTES varia dai 3.5 kWh iniziali agli 1.5 kWh a fine fase. Invece, in fase di scarico (anche qui praticamente inesistente) la potenza incrementa fino ad un massimo di 1 kWh. I valori di fine ciclo rappresentano abbastanza bene i livelli di perdite previsti. Detti valori rimangono sostanzialmente costati in tutti i cicli.

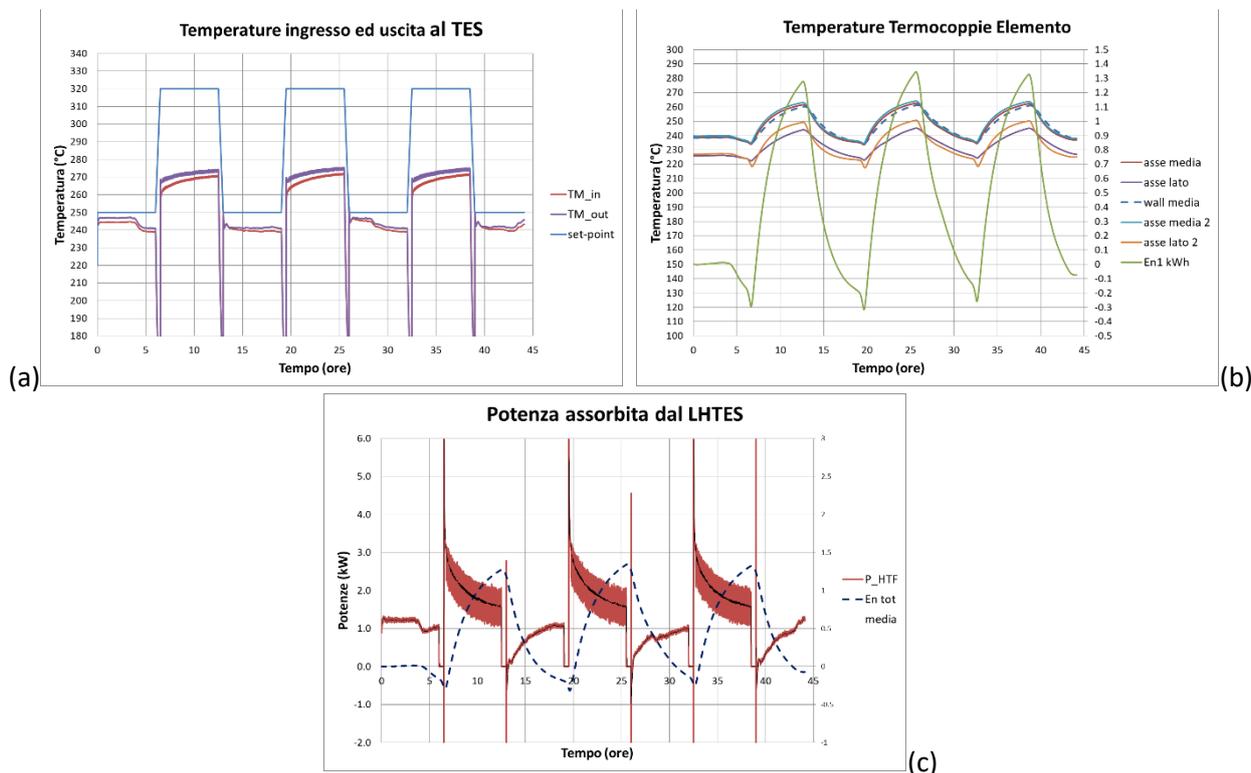
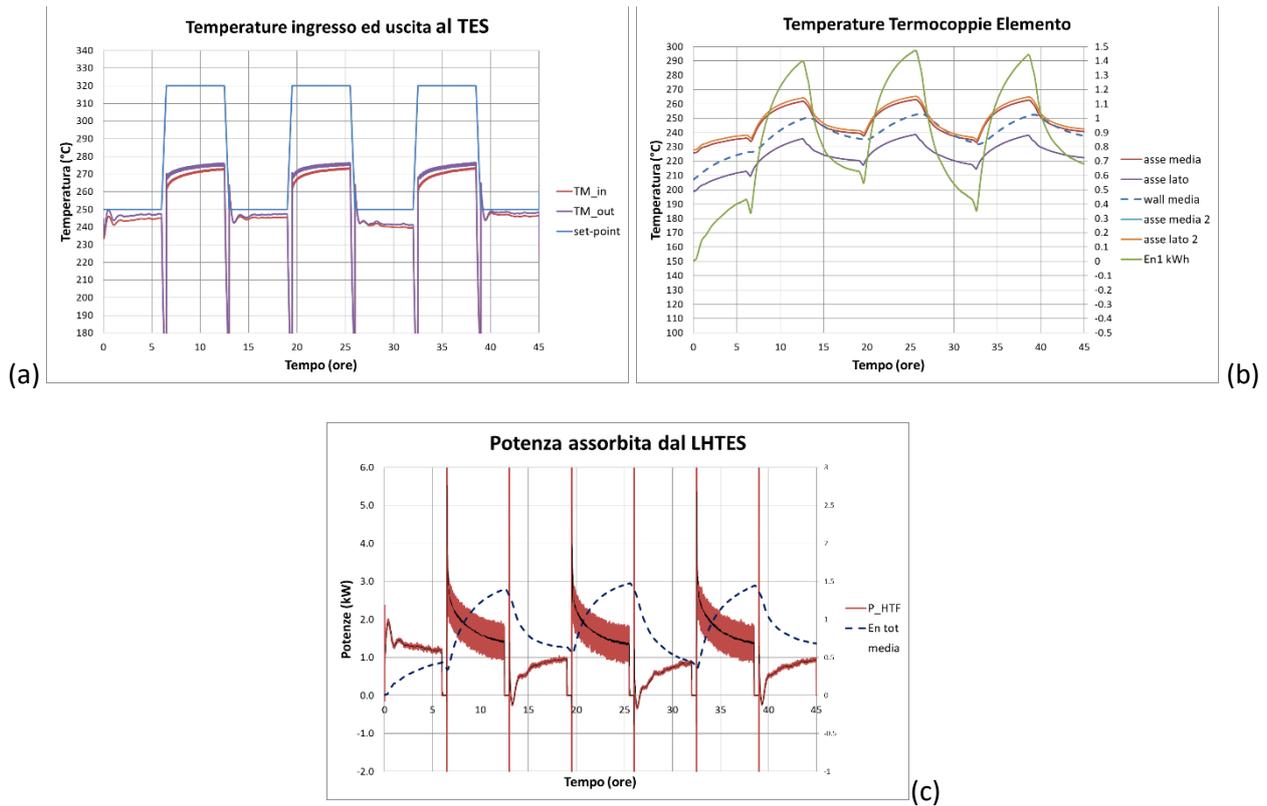


Figura 6-10 Evoluzione materiale di tipo B, tra 250 e 280°C, per tre cicli: (a) delle temperature del HTF di ingresso ed uscita elemento e del set-point; (b) delle temperature interne (mediane e laterali) e della parete dell'elemento e energia accumulata nel solo elemento; (c) della potenza assorbita dal sistema LHTES e della energia accumulata nell'elemento.

### 6.4.3 Prototipo con materiale tipo C

In Figura 6-11 sono riportate le evoluzioni dei principali parametri del Test04 per il materiale C. Da queste risulta che:

- Le temperature del HTF, in analogia al materiale A, in ingresso ed uscita al prototipo rimangono tra i 240 e 250°C nella fase di scarico e raggiungono i 270 °C nella fase di carico in tutti i cicli esaminati;
- Le temperature delle termocoppie interne centrali e di quella superficiale dell'elemento seguono lo stesso andamento tra i 235 ed i 260 °C con una variazione più accentuata. Le termocoppie interne laterali evolvono con un intervallo di temperatura inferiore di oltre 20°C. L'evoluzione dell'energia accumulata nel solo elemento evidenzia un valore massimo quasi costante per ogni ciclo, pari a 1.4 kWh con un minimo di circa 0.4 per il secondo ciclo. Rispetto al caso precedente la capacità di accumulo del SH02 con materiale C risulta inferiore agli altri materiali (1.0 kWh per C contro 1.5 kWh per B e 1.2 kWh);
- In fase di carico la potenza fornita al LHTES varia dai 3.5 kWh iniziali agli 1.5 kWh a fine fase. Invece, in fase di scarico (anche qui praticamente inesistente) la potenza incrementa fino ad un massimo di 1 kWh. I valori di fine ciclo rappresentano abbastanza bene i livelli di perdite previsti. Detti valori rimangono sostanzialmente costati in tutti i cicli.



**Figura 6-11** Evoluzione materiale di tipo C, tra 250 e 280°C, per tre cicli: (a) delle temperature del HTF di ingresso ed uscita elemento e del set-point; (b) delle temperature interne (mediane e laterali) e della parete dell'elemento e energia accumulata nel solo elemento; (c) della potenza assorbita dal sistema LHTES e della energia accumulata nell'elemento.

## 7 Discussione dei risultati

Nel capitolo precedente sono stati riportati i risultati ottenuti nelle quattro prove di caratterizzazione dei prototipi SH02 realizzati con i materiali cementizi di tipo A e B. Qui di seguito una breve discussione di questi risultati:

- Le perdite termiche del sistema di prova sono valutate dell'ordine di 1.2-1.5 kW, ovvero dell'ordine di grandezza della capacità di accumulo dell'elemento in fase di test, rendendone difficoltosa la stima delle prestazioni;
- Dette perdite sono elevate nonostante la coibentazione effettuata sia molto efficace, come testimoniano sia la temperatura misurata della parete esterna, che rimane sempre inferiore ai 30 °C, sia la differenza tra le termocoppie interne di mezzera e quella posta sulla parete dell'elemento stesso, che differiscono di circa un grado, evidenziando come la sezione sia a temperatura uniforme e l'elemento di accumulo in condizioni operative quasi adiabatiche;
- L'entità di tali perdite rimarrebbe sostanzialmente identica anche per un sistema di accumulo costituito da più elementi che però avrebbe una capacità di accumulo notevolmente superiore e quindi caratterizzabile in modo più accurato;
- L'SH02, soggetto ad una variazione termica di circa 30°C tra carico e scarico, dovrebbe essere teoricamente in grado di accumulare circa 1.7 o 2.3 kWh rispettivamente per il materiale A (senza PCM) e B (con il 5% di PCM). Se, invece, si considera anche il contributo, importante, del coibente, il TES nel suo complesso avrà una capacità di accumulo teorica di a 3.7 o 4.2 kWh per i due materiali considerati;
- Il contributo importante del coibente, insieme al livello abbastanza elevato delle perdite condizioneranno fortemente i risultati delle prove sperimentali, impedendo, di fatto, una qualsiasi valutazione delle prestazioni in fase di scarico;
- Il tempo di carico sia del prototipo A che di quello B varia tra 6 e 7 ore in funzione dell'intervallo di temperature della prova (tempo maggiore per temperature più elevate). Ciò è chiaramente relazionato al livello di perdite termiche;
- Durante la fase di carico del sistema si forniscono circa 10-14 kWh di cui, viste le elevate perdite (8-10 kWh), se ne accumulano circa 2.6 e 3.3 kWh, rispettivamente con il materiale A e B. Il solo SH02 ne accumulerà 1.3 kWh nel materiale A (circa il 75% del teorico) e 1.4-2.2 kWh nel materiale B (circa il 99% ed il 61% del teorico);
- Il test condotto sul materiale B, nell'intervallo di temperatura 220-250 °C accumula una quantità maggiore di calore nell'HSM. Questo intervallo è pressoché coincidente con quello di cambio di fase del PCM contenuto nel materiale B, evento che favorisce lo sfruttamento del materiale di accumulo (accumulo con calore sensibile e latente) e riduce il flusso di calore verso l'esterno. Per l'intervallo 250-280 °C ciò non avviene (si accumula solo calore sensibile) ed i risultati sono in linea con quello del materiale A;
- Per il materiale A, il tempo di scarico risulta essere molto breve (12-40 minuti), poiché l'energia scaricata ha la concorrenza delle perdite termiche nello svuotare il sistema. Di conseguenza, l'energia scaricata varia tra 0.13 e 0.23 kWh e le perdite tra 0.5 e 1.9 kWh. L'energia estratta dal TES varia tra 0.37 e 0.96 kWh e dal solo HSM tra 0.1 e 0.4 kWh. Anche per il materiale B, il tempo di scarico risulta essere molto breve (12-50 minuti). Di conseguenza, l'energia scaricata varia tra 0.12 e 0.25 kWh e le perdite tra 0.5 e 1.3 kWh. L'energia estratta dal TES varia tra 0.34 e 1.08 kWh e dal solo HSM tra 0.1 e 0.9 kWh;
- Perciò, nel complesso, per il materiale A la potenza media fornita va dai 350 ai 600 W con un fattore di utilizzo del 4-6% ed una capacità di accumulo di 130-230 Wh. Invece, per il materiale B, la potenza media fornita va dai 300 ai 620 W con un fattore di utilizzo del 3-6% ed una capacità di

accumulo di 120-250 Wh. In entrambi i casi, le efficienze energetica ed exergetica sono inferiori al 2%.

- Per quanto riguarda il Test03, relativo alla stima delle perdite termiche attraverso un metodo di confronto tra due casi che differiscono per un tempo di attesa tra la fase di carico e quella di scarico  $t^*$ , non si sono ottenuti dei dati significativi. Infatti, essendo il tempo di attesa di 1.5 ore ed il livello di perdite attorno ad 1 kW, l'energia persa durante l'attesa è comparabile con quella accumulata nel SH02 e, di conseguenza, il sistema si è eccessivamente raffreddato e non è in grado di restituire nulla di quanto accumulato;
- Nel caso, invece, dei Test04 di ciclaggio:
  - Le temperature del HTF in ingresso ed uscita al prototipo rimangono tra i 240 e 250°C nella fase di scarico e raggiungono i 270 °C nella fase di carico in tutti i cicli esaminati per entrambi i materiali;
  - Le temperature delle termocoppie interne centrali e di quella superficiale dell'elemento seguono lo stesso andamento tra i 235 ed i 260 °C con una variazione più accentuata.
  - Le termocoppie interne laterali evolvono con un intervallo di temperatura inferiori di circa 20°C per il materiale A e di soli 10°C per quello B. Ciò è indice di una maggiore diffusività assiale evidenziata da quest'ultimo;
  - L'evoluzione dell'energia accumulata nel solo elemento evidenzia tra il primo ed il secondo ciclo un valore massimo quasi costante per ogni ciclo, pari a 1.4-1.5 kWh per il materiale A e 1.3 kWh per il B, con un minimo che però tende a crescere (da 0.2 a 0.4 kWh per il materiale A e da -0.2 a -0.1 kWh per il B). La difficoltà di scaricare completamente l'energia accumulata in un ciclo riduce, di fatto, la capacità di accumulo del ciclo seguente. La capacità di accumulo del SH02 con materiale B risulta maggiore di quella con del materiale A (1.5 kWh contro 1.2 kWh, +20%) e più stabile durante il ciclaggio;
- In fase di carico la potenza fornita al LHTES varia dai 3.5 kWh iniziali agli 1.5 kWh a fine fase. Invece, in fase di scarico (sostanzialmente inesistente) la potenza incrementa fino ad un massimo di 1.2 kWh per il materiale A e 1 kWh per il B. I valori di fine ciclo rappresentano abbastanza bene i livelli di perdite previsti. Detti valori rimangono sostanzialmente costati in tutti i cicli.

In conclusione, si può affermare che il sistema LHTES costituito da un solo elemento di accumulo ed una importante coibentazione non si presta ad una rigorosa caratterizzazione delle prestazioni termiche (andrebbe impiegato un modulo a più elementi di capacità termica molto maggiore). Nonostante ciò alcune considerazioni si possono fare dal confronto dei due prototipi analizzati. I due materiali mostrano delle caratteristiche e delle dinamiche molto simili ma con alcuni tratti che li differenziano in modo evidente.

Il materiale B possiede sicuramente una maggiore capacità termica rispetto al materiale A, stimata del 15-20% in più. Questa deriva da due aspetti principali: uno è la presenza di un PCM, anche se solo al 2% in peso, che consente un accumulo di calore anche in forma latente oltre che sensibile. L'altro è una apparente, ed in qualche modo sorprendente, migliore diffusività termica che tende ad uniformare le temperature, soprattutto in direzione assiale, dell'elemento e, di conseguenza, avere un migliore sfruttamento del HSM.

Complessivamente il calcestruzzo additivato con il 5% di PCM stabilizzati in forma mostra delle prestazioni termiche migliori rispetto al calcestruzzo base: una sostanziale parità nei tempi di caricamento, un buon incremento della capacità di accumulo, soprattutto per intervalli operativi stretti ed intorno alla temperatura di fusione, ed un evidenziato incremento di resistenza termica che limita anche le perdite di calore.

## 8 Valutazione dei costi

Nelle precedenti fasi di questa attività si è sviluppato e caratterizzato un elemento di accumulo con materiali a base cementizia con aggiunta o meno di PCM micro-incapsulati. Tali elementi, nonché i moduli di accumulo (aggregati di elementi di accumulo) sono stati dimensionati e progettati in via preliminare.

A partire da questi dati, viene qui effettuata una valutazione dei costi associati alla realizzazione di un singolo elemento di accumulo e di un sistema modulare costituito da un insieme di elementi di accumulo posti in serie o in parallelo.

Un sistema completo di accumulo termico in calcestruzzo/SSPCM è immaginato essere costituito da una serie di moduli, di designata capacità termica, connessi in parallelo. Ogni modulo è a sua volta costituito da una serie di elementi base in calcestruzzo (Figura 8-1).

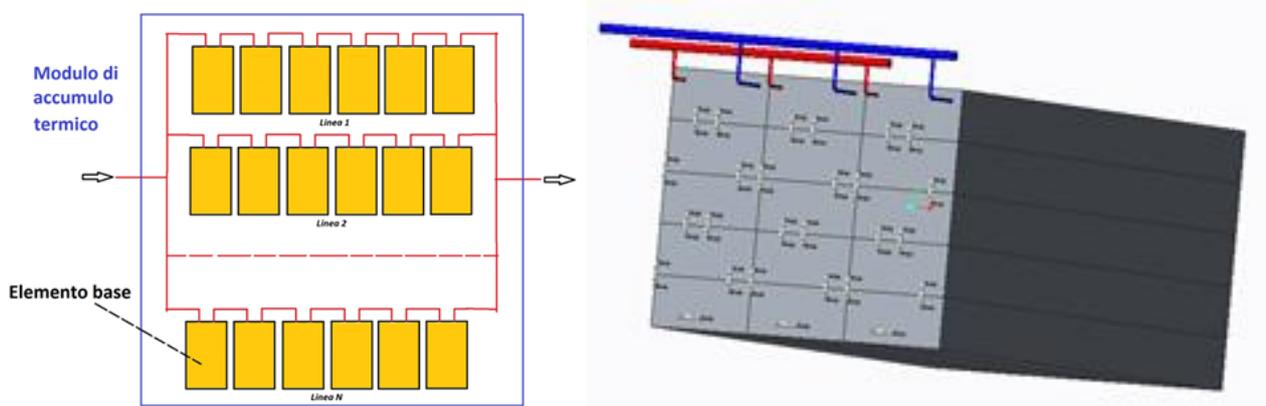


Figura 8-1 Schema di modulo di accumulo termico CLS/SS-CPCM con  $N_{lines}$  linee ad  $N_{ele}$  elementi

Le linee saranno tutte identiche tra loro e un elemento base avrà una capacità termica nominale  $C_i$ . In base a tale definizione, la capacità termica del modulo  $C_m$  sarà così determinata:

$$C_m = N_{lines} * \sum_{i=1}^{N_{ele}} C_i \quad \text{Equazione 8-1}$$

### 8.1 L'elemento base di accumulo

L'elemento base (Figura 8-2) è costituito principalmente da un tubo di scambio termico metallico ed un mezzo di accumulo termico, formato da un particolare mix di calcestruzzo ed, eventualmente, una piccola quantità di PCM stabilizzato in forma (micro-incapsulato). Per maggiori dettagli si veda [1].

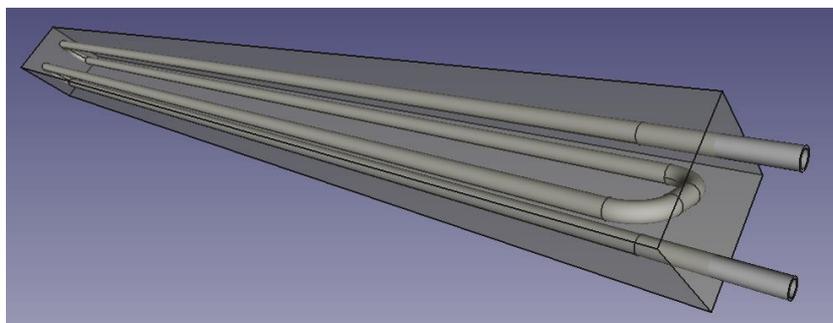


Figura 8-2 Schema di elemento di accumulo termico CLS/SS-CPCM.

## 8.2 IL modulo di accumulo

Il modulo, visto come insieme di elementi base di accumulo, può essere costituito in infiniti modi e dimensioni. Per poter effettuare una valutazione di costo si farà riferimento ad una soluzione particolare attualmente in studio. Affinché il modulo di accumulo termico possa essere dotato di opportuna flessibilità, sia a livello di composizione di un sistema di accumulo di grandi dimensioni che di utilizzo dell'energia termica accumulata (batteria termica), si è pensato di poterlo realizzare all'interno di un contenitore facilmente trasportabile.

### 8.2.1 Il "container"

Ad esempio, contenitori di questa tipologia sono gli attuali "container", utilizzati per il trasporto merci sia per gomma che per nave. I container sono di diverse tipologie e dimensioni.



**Figura 8-3 Singolo container (sinistra) e composizione di 12 container affiancati ed impilati (destra).**

Nel nostro caso, ci è sembrato adeguato l'utilizzo di un container da 20' le cui dimensioni interne sono dell'ordine di:

- Larghezza : 2310 mm
- Altezza : 2360 mm
- Lunghezza : 5860 mm

Dette dimensioni (in particolare l'altezza e la larghezza), insieme allo spessore necessario alla corretta coibentazione, determineranno il numero massimo di elementi di accumulo da utilizzare e quindi la capacità termica ottimale del modulo stesso.

### 8.2.2 Dimensionamento del coibente

All'interno del contenitore gli elementi base andranno a costituire una opportuna matrice costituita da  $n$  righe per  $m$  colonne, realizzando un parallelogramma con una serie di pareti piane da coibentare. Tali pareti, operanti ad una temperatura media ipotetica di 250 °C, dovranno essere coibentate per minimizzare le perdite termiche. Il tipo di coibente qui identificato è il ProRox SL 960 della Rockwool, un pannello rigido di spessore 100 mm e dimensioni 1000x600 mm. Questo pannello ha un costo di circa 28 €/m<sup>2</sup>, IVA inclusa (sito Rockprice [5]). Il ProRox SL 960 ha un valore di conducibilità nell'intervallo, di temperature considerato, abbastanza basso rispetto al costo e descritto dalla relazione:

$$k(T) = 2.8 * 10^{-7}T^2 + 6,5217 * 10^{-5} * G34 + 0.03594805 \quad \text{Equazione 8-2}$$

Per poter limitare la temperatura della parete esterna del coibente a valori inferiori ai 35 °C, come richiesto dalla normativa, e flussi di calore disperso inferiori a 50 W/m<sup>2</sup>, ovvero a circa il 20% della capacità termica in un giorno, è necessario avere uno spessore complessivo di circa 400 mm, corrispondenti a 4 strati di pannelli. Tale dato è stato ottenuto attraverso l'applicativo RockAssistant [6] della Rockwool e verificato attraverso un semplice bilancio termico con un foglio Excel, come illustrato in Tabella 8-1.

**Tabella 8-1 Bilancio termico di una coibentazione realizzata con ProRox SL 960**

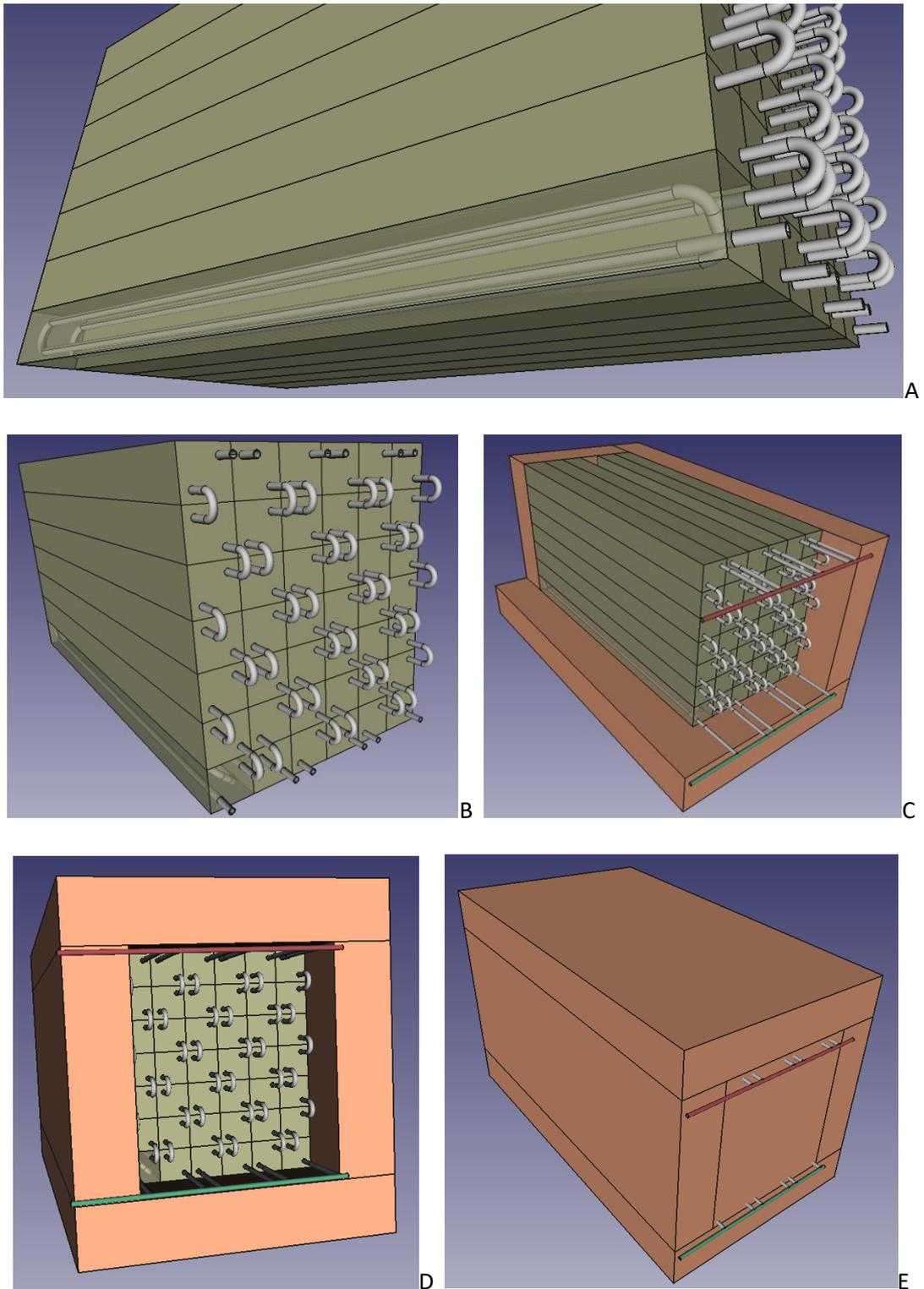
Strato	k (W/(m.C))	S (m)	R ((m <sup>2</sup> .C)/W)	T1 (°C)	T2 (°C)	Tmed (°C)
1	0.0654	0.1	1.529052	<b>250.00</b>	206.02	228.01
2	0.0568	0.1	1.760563	206.02	155.38	180.70
3	0.0485	0.1	2.061856	155.38	96.08	125.73
4	0.0409	0.1	2.444988	96.08	<b>25.75</b>	60.91
esterno h ((W/(m <sup>2</sup> .C))	5		0.2	25.75	<b>20.00</b>	
Spessore coibente		0.4				
R <sub>coib</sub>			7.796459			
R <sub>tot</sub>			7.996459			
flusso (W/m <sup>2</sup> )	28.76					

Come è facile vedere, avendo impostato una temperatura ambiente di 20 °C, si ottiene una temperatura di parete di circa 26 °C ed un flusso di calore verso l'esterno inferiore ai 29 W/m<sup>2</sup>.

### 8.2.3 Layout del modulo

Note, allora le sezioni disponibili nel container e gli spessori necessari per la coibentazione degli elementi di accumulo, questi ultimi potranno essere al massimo 42 disposti secondo una matrice di 7 righe e 6 colonne. L'ingombro complessivo di detto insieme di elementi base sarà allora di 3 m di profondità, 1.1 m di larghezza e 1.32 m di altezza ed avrà una superficie esterna di scambio termico pari a 17.4 m<sup>2</sup>. Gli elementi saranno connessi tra di loro sia in serie che in parallelo e, quindi, collegati alle tubazioni di ingresso ed uscita del fluido termovettore. La superficie esterna verrà, infine, coibentata con uno spessore di 400 mm di coibente. L'ingombro complessivo, escluse le tubazioni esterne alla coibentazione, sarà di 3.8 m di profondità, 1.9 m di larghezza e 2.12 m di altezza. Un modulo siffatto sarà caratterizzato da una capacità di accumulo di 183, 198 e 228 kWh termici rispettivamente per i materiali A, B e C e un livello di perdite termiche quantificate in 12.0 kWh/giorno, ovvero il 6.6%, 6.1% e 5.3% della capacità termica per gli stessi materiali.

In Figura 8-4 sono riportate alcune immagini relative al cuore di un modulo di accumulo termico in cls (parte di accumulo interna al container) in cui sono facilmente identificabili gli elementi base, disposti secondo una matrice 7x6 (in questo caso, 6 serie di 7 elementi base connesse in parallelo), le tubazioni di connessione tra loro e con le tubazioni in/out e, infine, la coibentazione.



**Figura 8-4** Immagini di un modulo di accumulo termico in cls: **A)** trasparenza di un elemento base; **B)** matrice 7x6 di elementi base con connessioni tra loro; **C)** matrice di elementi con coibentazione parziale e connessione con tubazioni in/out; **D)** matrice con coibentazione quasi completa; **E)** matrice con coibentazione completa

### 8.3 Analisi dei costi

Dopo aver descritto e dimensionato i vari componenti di un sistema di accumulo termico con materiali cementizi possiamo procedere a valutarne i costi relativi. Ovviamente, si procederà per passi successivi valutando prima i costi dei mezzi di accumulo, poi quelli dei singoli elementi e, infine dei moduli finali, base per la realizzazione di un sistema TES di grandi dimensioni. In tutti i casi, la manodopera non verrà valutata in dettaglio ma stimata essere paragonabile al costo dei materiali utilizzati, ovvero applicando un fattore 2 a questi ultimi.

#### 8.3.1 Costo di un mezzo di accumulo a base cementizia

Come visto in precedenza, i mix-design dei vari calcestruzzi di riferimento (A, B e C) differiscono principalmente dalla quantità di mEPCM utilizzato. Questo è composto da un sale solare e della diatomite calcinata in un rapporto 80/20. Il primo passo è, allora, quello di determinare il costo del mEPCM: il sale solare è spesso recuperabile ad un costo di circa 0.8 €/kg mentre la diatomite calcinata (la DIA2 fornita dalla Deref di Genova) è acquistabile a circa 0.9 €/kg. Quindi, il costo del mEPCM, tenendo conto della sua manipolazione e delle lavorazioni atte a far adsorbire il PCM nella diatomite (micro-incapsulamento), potrebbe essere:

$$\text{Costo mEPCM} = (0.8 * 80\% + 0.9 * 20\%) * 2 = 1.64 \text{ €/kg}$$

Quindi, il costo dei singoli mix-design sarà valutato sulla base delle loro composizioni e dei costi unitari indicati da Cipiccia Calcestruzzi [7], che ha messo a punto le composizioni.

In Tabella 8-2, Tabella 8-3 e Tabella 8-4 sono riportati, per ciascuno dei mix design prodotti le ripartizioni dei costi stimati in funzione della sua composizione in peso. Le ripartizioni percentuali dei pesi e dei costi sono invece mostrate in Figura 8-5 e Figura 8-6.

Da queste si ottiene che il costo di un m<sup>3</sup> di calcestruzzo è di 372 € per il mix A, 576 € per il mix B e 708 € per il mix C. Ciò equivale, rispettivamente, a circa 0.15, 0.25 e 0.32 €/kg.

Dalla analisi dei grafici si può notare come il maggiore peso sul costo è esercitato dalle fibre metalliche, per tutti i mix, e dal mEPCM per i mix B e C. Se da un lato è difficile agire sul costo del mEPCM si potrebbe, in future formulazioni, cercare di limare il costo delle fibre metalliche se non, addirittura, sostituirle con altre provenienti da materiali di riciclo.

I materiali "classici" del calcestruzzo (cemento, sabbia, breccia, breccino, acqua) contribuiscono tra l'88 ed il 98% al peso dei mix e per solo l'8-16% al loro costo finale.

Nei costi citati non è stata inclusa la manodopera e costi accessori poiché ciò verrà fatto per la realizzazione dell'elemento di accumulo.

**Tabella 8-2 Analisi dei costi per la realizzazione di 1 m3 di miscela di tipo A**

<b>Miscela A (per 1 m3)</b>	kg	Euro/kg	Euro	frazione
Acqua	117.00	0.001	0.12	0.03%
Cemento (CEM II 42.5R-A/LL)	360.00	0.100	36.00	9.66%
Sabbia (0-4)	929.00	0.013	12.08	3.24%
BRECCIOLINO 5-15	467.00	0.012	5.60	1.50%
BRECCIA 15-30	504.00	0.012	6.05	1.62%
Fibre Nylon (Meraflex)	1.00	4.000	4.00	1.07%
Fibra metallica (Fibercoll)	50.00	6.000	300.00	80.54%
Additivo Superfluidificante (HR350)	4.49	1.923	8.64	2.32%
mEPCM	0.00	1.640	0.00	0.00%
Peso totale del materiale	2432.49			
<i>Costo CLS al m3 (al kg)</i>			<b>372.49</b> (0.15)	

**Tabella 8-3 Analisi dei costi per la realizzazione di 1 m3 di miscela di tipo B**

<b>Miscela B (per 1 m3)</b>	kg	Euro/kg	Euro	frazione
Acqua	133.00	0.001	0.13	0.02%
Cemento (CEM II 42.5R-A/LL)	360.00	0.100	36.00	6.25%
Sabbia (0-4)	853.00	0.013	11.09	1.93%
BRECCIOLINO 5-15	371.00	0.012	4.45	0.77%
BRECCIA 15-30	407.00	0.012	4.88	0.85%
Fibre Nylon (Meraflex)	1.00	4.000	4.00	0.69%
Fibra metallica (Fibercoll)	50.00	6.000	300.00	52.10%
Additivo Superfluidificante (HR350)	4.49	1.923	8.64	1.50%
mEPCM	126.00	1.640	206.64	35.89%
Peso totale del materiale	2305.49			
<i>Costo CLS al m3 (al kg)</i>			<b>575.84</b> (0.25)	

**Tabella 8-4 Analisi dei costi per la realizzazione di 1 m3 di miscela di tipo C**

<b>Miscela C (per 1 m3)</b>	kg	Euro/kg	Euro	frazione
Acqua	148.00	0.001	0.15	0.02%
Cemento (CEM II 42.5R-A/LL)	360.00	0.100	36.00	5.09%
Sabbia (0-4)	822.00	0.013	10.69	1.51%
BRECCIOLINO 5-15	288.00	0.012	3.46	0.49%
BRECCIA 15-30	324.00	0.012	3.89	0.55%
Fibre Nylon (Meraflex)	1.00	4.000	4.00	0.57%
Fibra metallica (Fibercoll)	50.00	6.000	300.00	42.38%
Additivo Superfluidificante (HR350)	4.49	1.923	8.64	1.22%
mEPCM	208.00	1.640	341.12	48.19%
Peso totale del materiale	2205.49			
<i>Costo CLS al m3 (al kg)</i>			<b>707.94</b> (0.32)	

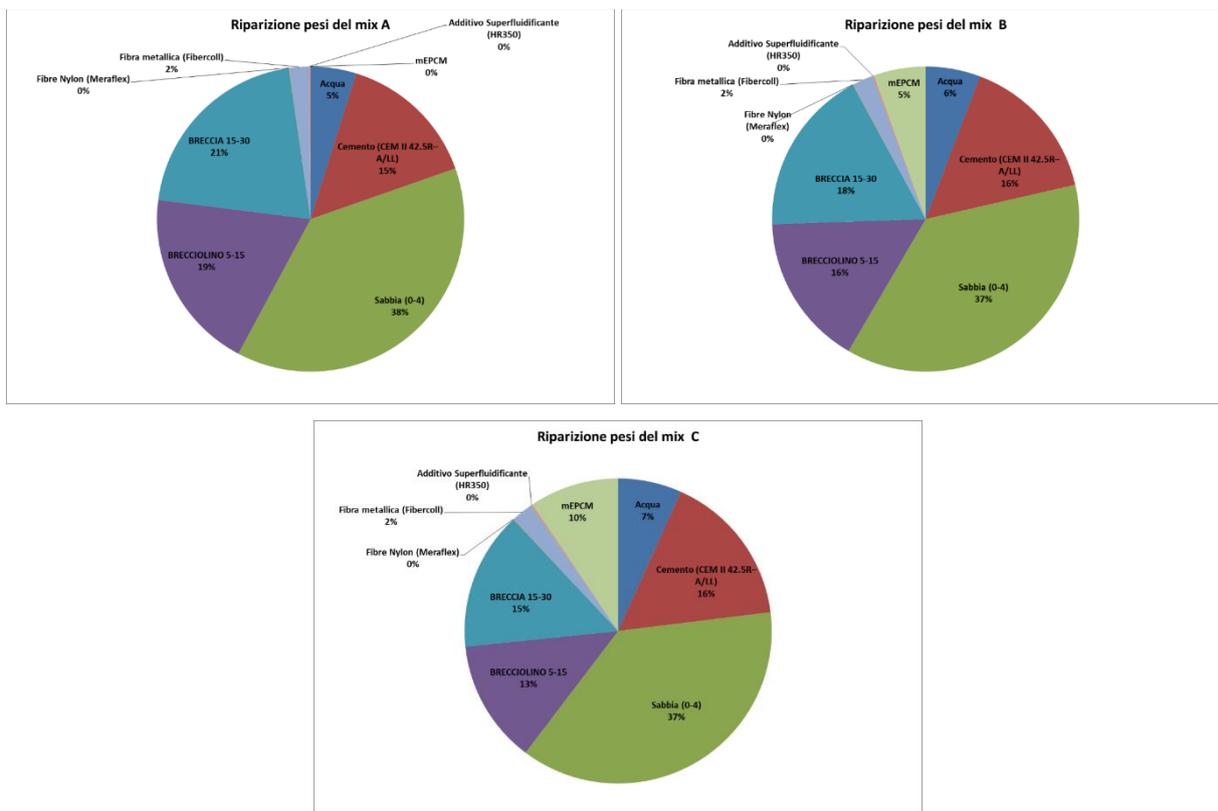


Figura 8-5 Torte di ripartizione dei pesi per i mix-design A, B e C del calcestruzzo.

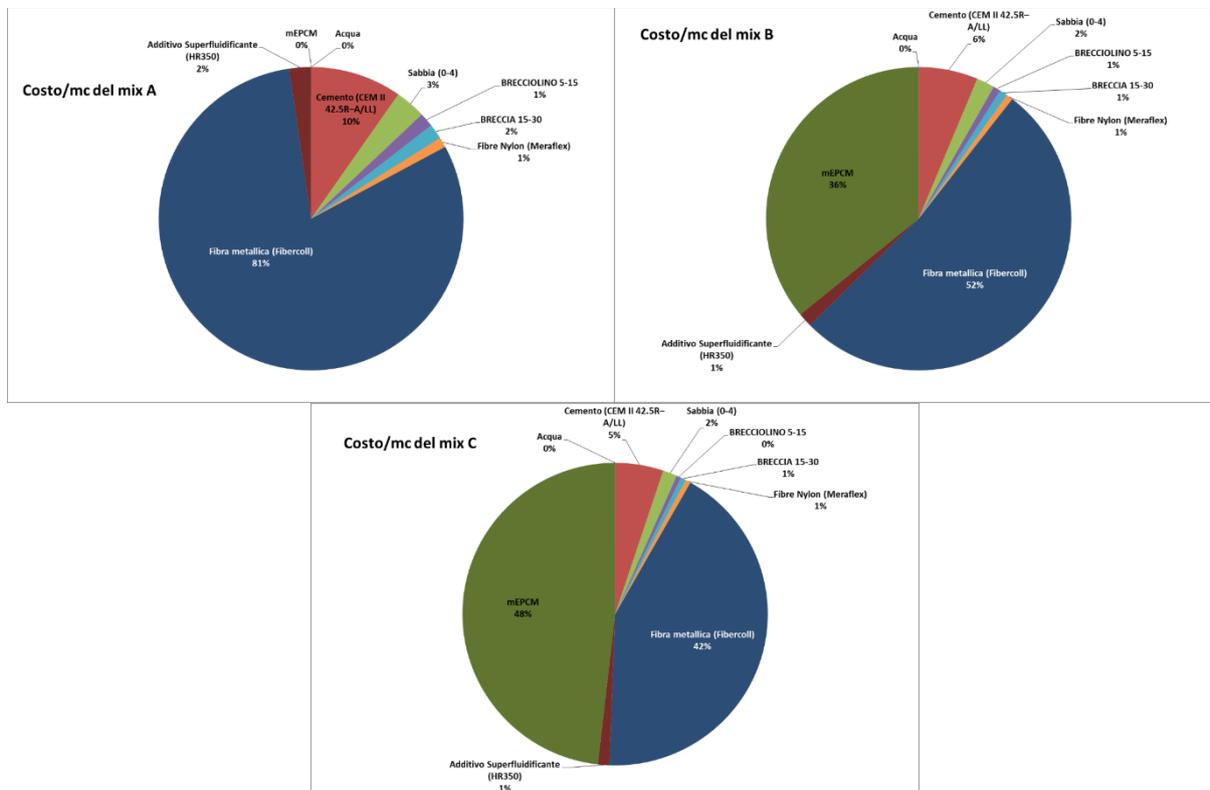


Figura 8-6 Torte di ripartizione dei costi al m3 per i mix-design A, B e C del calcestruzzo.

### 8.3.2 Costo di un elemento base di accumulo termico

Nel costo di un elemento base di accumulo entrano sostanzialmente tre elementi:

- Il tubo metallico a serpentina;
- Le staffe di rinforzo;
- Il calcestruzzo.

#### 8.3.2.1 Tubo metallico a serpentina

Lo scambiatore (tubo a serpentina) è realizzato in acciaio AISI304 ed ha una lunghezza complessiva di 12.15 m. Il tubo in acciaio, spazzolato o decapato, elettrounito TIG crudo e in barre da 3.0 m, è venduto su internet [8] ad un prezzo di circa 3.56 €/m. Tale scambiatore dovrà essere già fornito “lavorato”, ovvero piegato e/o saldato, e, quindi, il costo dovrà anche tener conto del fattore di lavorazione.

Di conseguenza:

$$\text{Costo scambiatore} = (12.15 * 3.56) * 2 = 86.4 \text{ €}$$

#### 8.3.2.2 Le staffe di rinforzo

Le staffe di rinforzo sono realizzate acciaio B450C per una lunghezza complessiva di circa 20.8 m. Lo stesso sito precedente [8] fornisce delle barre nervate INOX AISI 304 di lunghezza 3 m e diametro 8 mm ad un costo specifico di 2.99 €/m. Anche in questo caso, le barre dovranno essere piegate e saldate a formare una “gabbia” di rinforzo per il calcestruzzo e, perciò, è necessario introdurre un fattore di lavorazione.

Quindi:

$$\text{Costo staffe} = (20.8 * 2.99) * 2 = 124.5 \text{ €}$$

#### 8.3.2.3 Il calcestruzzo

Il volume di calcestruzzo in un elemento base è di circa 0.1417 m<sup>3</sup> e la quantità di materiale per i tre differenti mix è, rispettivamente, di 337.1 kg per il mix A, 336.4 kg per il mix B e 320.9 kg per il mix C.

Tenendo conto dei costi specifici valutati in 8.3.1 si ha:

$$\text{Costo cls mix A} = 337.1 * 0.153 = 51.57 \text{ €}$$

$$\text{Costo cls mix B} = 336.4 * 0.250 = 84.09 \text{ €}$$

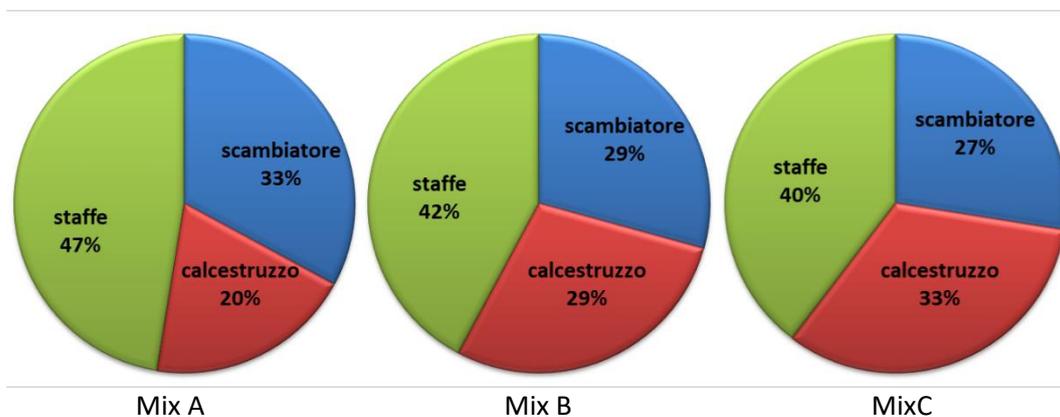
$$\text{Costo cls mix C} = 320.9 * 0.321 = 103.02 \text{ €}$$

#### 8.3.2.4 Costo elemento base

Sulla base di quanto appena illustrato e delle caratteristiche dei vari tipi di elemento di accumulo realizzati è possibile valutare i costi sia assoluti che specifici (per kWh accumulato). Caratteristiche e costi sono riportati in Tabella 8-5 mentre in Figura 8-7 è mostrata la ripartizione percentuale del costo dei vari componenti rispetto al costo totale dell'elemento base di accumulo. Anche in questo caso si è portato in conto il fattore di lavorazione del componente (assemblaggio, gettata, stagionatura, degassamento, etc.)

**Tabella 8-5 Analisi delle caratteristiche e dei costi di elementi base in calcestruzzo per accumulo termico in base ai tre mix-design sviluppati**

Voce	Elemento Mix A	Elemento Mix B	Elemento Mix C
Capacità termica (kWh)	6.1	6.6	7.6
Peso Elemento base (kg)	351.9	351.2	335.7
Densità Ener. Accum. (kWh/m <sup>3</sup> )	42.0	45.5	49.6
Costo scambiatore (€)	86.4	86.4	86.4
Costo staffe (€)	124.5	124.5	124.5
Costo calcestruzzo (€)	51.57	84.09	103.02
Costo soli materiali (€)	262.5	295.0	313.9
Fraz. Costo scambiatore	32.92%	29.29%	27.53%
Fraz. Costo staffe	19.65%	28.51%	32.82%
Fraz. Costo calcestruzzo	47.42%	42.20%	39.65%
<b>Costo Elemento base (€)</b>	<b>524.9</b>	<b>589.9</b>	<b>627.8</b>
<b>Costo Elemento base (€/kWh)</b>	<b>86.05</b>	<b>89.39</b>	<b>87.19</b>



**Figura 8-7 Torte di ripartizione dei costi per gli elementi base utilizzando i mix-design A, B e C del calcestruzzo.**

Il costo di un elemento base, in termini assoluti, varia tra i 525 € ed i 628 € mentre il costo per kWh accumulato è abbastanza costante intorno agli 86-89 €/kWh. Se escludessimo il contributo della lavorazione, il costo per kWh accumulato si dimezzerebbe (43-45 €/kWh). Quest’ultimo dato è sostanzialmente in linea con gli attuali sistemi TES oggi proposti. Il vantaggio principale dei sistemi con mEPCM non risiede quindi in un minore costo specifico ma in una maggiore densità di energia accumulata (kWh/m<sup>3</sup>) e quindi ridotti volumi e minori costi di installazione. Peraltro, la ripartizione dei costi evidenzia come il costo del calcestruzzo contribuisca solo per il 20-33% mentre il contributo maggiore lo danno lo scambiatore di calore e, soprattutto le staffe di rinforzo. In entrambi i casi si è utilizzato un acciaio inox (AISI 304) di per se abbastanza costoso: la possibilità, viste le non elevatissime temperature operative, di utilizzare normali e più economici acciai al carbonio andrebbe analizzata. Inoltre, le staffe da 8 mm, utilizzate in questo caso, hanno passato in modo estremamente agevole le verifiche meccaniche sia a taglio che a flessione (il componente è soggetto a carichi molto bassi, non essendo elemento portante). L’utilizzo di tondini da 6 mm ed una possibile riduzione della loro numerosità potrà sicuramente contribuire ad una forte riduzione del costo del componente.

### 8.3.3 Costo di un modulo di accumulo

Nel costo di un modulo di accumulo termico, del tipo descritto in precedenza, entrano sostanzialmente tre elementi:

- Gli elementi base di accumulo;
- Il piping di connessione tra moduli e con le tubazioni in/out;
- Container;
- La coibentazione.

#### 8.3.3.1 Gli elementi base

Gli elementi base, aggregati in una matrice 7x6, sono 42, hanno un costo unitario, un peso ed una capacità termica variabile a seconda del mix-design utilizzato (vedi Tabella 8-5).

Nel complesso, si ha quanto segue in Tabella 8-7:

**Tabella 8-6 Caratteristiche e dei costi di 42 elementi base in funzione dei tre mix-design sviluppati**

Voce	Elemento Mix A	Elemento Mix B	Elemento Mix C
Capacità termica 42 elementi i(kWh)	256.2	277.2	319.2
Costo di 42 elementi (€)	22046	24776	26368
Peso 42 elementi (ton)	14.78	14.75	14.10

\*escluso container ed accessori interni

#### Il piping di connessione

Le connessioni da considerare sono di due tipi: i) una serie di 36 curve a 180° con raggio di curvatura pari a 50 mm, che collegano tra loro i vari elementi; ii) un serie di tubi rettilinei di lunghezza 400 mm, che collegano alcuni elementi con le tubazioni di mandata e ritorno del fluido termovettore.

In totale ci sono circa 10.45 m di tubazione identica, per tipo, diametro, spessore e costo, a quella utilizzata per lo scambiatore dell'elemento base.

Il suo costo, incluse lavorazioni, è:

$$\text{Costo connessioni} = (10.45 * 3.56) * 2 = 74.4 \text{ €}$$

#### 8.3.3.2 La coibentazione

Come detto in precedenza, la coibentazione è pensata essere realizzata con pannelli Prorox SL 960 di spessore 100 mm e densità 100 kg/m<sup>3</sup>. La superficie di coibente complessivamente utilizzata è di 129.6 m<sup>2</sup> con un costo specifico di 27.94 Euro/m<sup>2</sup>.

Quindi:

$$\text{Costo coibentazione} = 129.6 * 27.94 = 3621 \text{ €}$$

#### Il container

Per il container si è estrapolato un costo ipotetico mediando i valori trovati su alcuni siti specializzati nella vendita di container commerciali da 20' per trasporto merci:

$$\text{Costo container} = 2200 \text{ €}$$

#### 8.3.3.3 Costo modulo

Il costo del modulo deriverà allora dalla somma degli elementi descritti e di altri contributi [9] quali:

- Il controllo, la strumentazione<sup>1</sup> ed i componenti elettrici<sup>2</sup>, valutati circa il 7% del costo dei materiali del sistema di accumulo esclusa la coibentazione;
- Le tubazioni, le valvole ed i raccordi valutati circa il 3% del costo dei materiali del sistema di accumulo esclusa la coibentazione;
- Costi accessori (contingency, quali ad esempio la progettazione, valutati circa di 7% del costo complessivo.

In tal modo si ottiene quanto riportato in Tabella 8-7.

**Tabella 8-7 Analisi delle caratteristiche e dei costi di un modulo di accumulo termico in funzione dei tre mix-design sviluppati**

<b>Voce</b>	<b>Modulo Mix A</b>	<b>Modulo Mix B</b>	<b>Modulo Mix C</b>
Capacità termica modulo (kWh)	256.2	277.2	319.2
Peso Modulo* (ton)	16.08	16.05	15.40
Costo container (€)	2200.00	2200.00	2200.00
Costo coibentazione (€)	3621.02	3621.02	3621.02
Costo elementi (€)	22045.80	24775.80	26367.60
Costo connessioni (€)	74.36	74.36	74.36
Costo controllo, strumentaz. , componenti elettrici (€)	1702.41	1893.51	2004.94
Costo tubazioni, valvole, raccordi (€)	729.60	811.50	859.26
<b>Costo materiali modulo (€)</b>	<b>30373.19</b>	<b>33376.19</b>	<b>35127.17</b>
<b>Costo materiali modulo (€/kWh)</b>	<b>118.55</b>	<b>120.40</b>	<b>110.05</b>
Contingency (€)	2126.12	2336.33	2458.90
Lavorazioni (€)	30373.19	33376.19	35127.17
<b>Costo modulo (€)</b>	<b>62991.07</b>	<b>69209.13</b>	<b>72823.30</b>
<b>Costo modulo (€/kWh)</b>	<b>245.87</b>	<b>249.67</b>	<b>228.14</b>

\*escluso container ed accessori

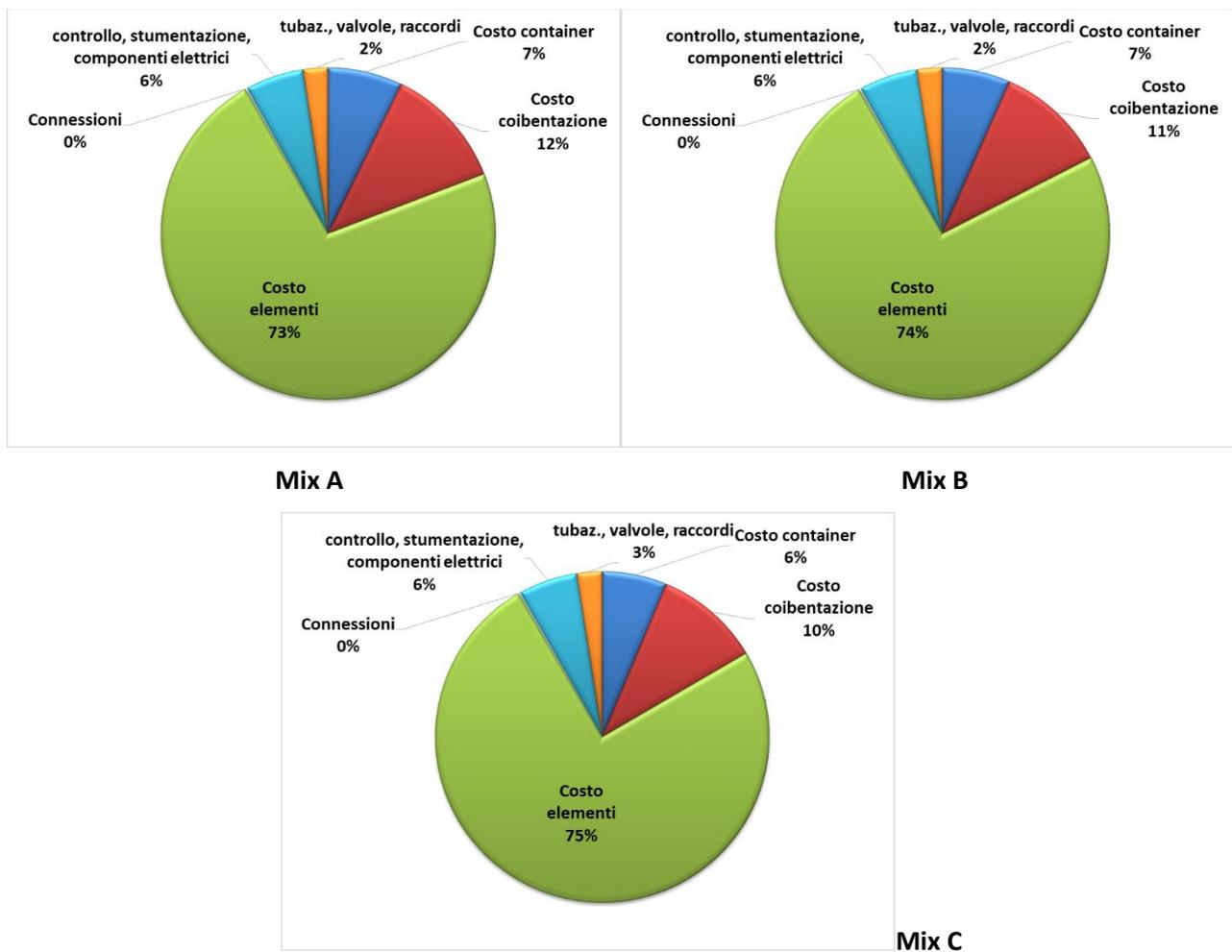
Il modulo di accumulo termico qui ipotizzato presenterà una capacità nominale di 250-300 kWh ed un costo dei soli materiali pari a circa 30-35 k€, ovvero 110-120 €/kWh. Se, invece, si portano in conto anche i costi accessori ed il contributo di installazione/lavorazione, il costo capitale è dell'ordine dei 63-73 k€, ovvero 228-250 €/kWh.

Per quanto concerne il contributo dei vari componenti al costo totale (vedi Figura 8-8) risulta evidente come gli elementi base di accumulo e la relativa coibentazione pesino, come giusto sia, per l'85% sul costo del modulo. Il 13% è il contributo quasi paritario del container e del controllo, strumentazione e componenti elettrici.

In apparenza, nonostante il costo degli elementi base più elevato, il modulo con gli elementi base realizzati con il mix C sembra essere quello più promettente sia in termini di densità di energia (compattezza) che di costi specifici, a causa della più elevata capacità nominale. Purtroppo, le prove di caratterizzazione dei materiali hanno evidenziato come le proprietà di resistenza a compressione ed a trazione indiretta siano molto inferiori ai mix B e C: ciò potrebbe inficiarne il possibile utilizzo.

<sup>1</sup> Controllo e strumentazione: sono gli strumenti (misuratori di temperatura, portata, pressione, livello, ...) e gli apparati (schede acquisizione, trasmissione dati, computer, SW, ..) atti al controllo del corretto funzionamento dell'intero sistema di accumulo

<sup>2</sup> Componenti elettrici: tutti quei componenti elettrici necessari ad alimentare il sistema TES (quadri elettrici, cavi, convertitori, batterie, ...)



**Figura 8-8 Torte di ripartizione delle principali voci di costo di moduli di accumulo termico utilizzando elementi base con i mix-design A, B e C del calcestruzzo.**

## 8.4 Discussione

Nel presente capitolo è stato valutato il costo associato alla realizzazione di un singolo elemento di accumulo utilizzando le tre miscele di calcestruzzo, contenute diverse quantità di mEPCM, sviluppate (denominate A, B e C) e di un sistema modulare costituito da un insieme di elementi di accumulo posti in serie o in parallelo.

L'analisi ha messo in evidenza che il costo di un elemento base di accumulo è crescente con la quantità di mEPCM utilizzato, variando tra i 525 € ed i 628 €, così come la loro capacità termica nominale (da 6.1 a 7.2 kWh). Ciò conduce a costi specifici, escludendo la manodopera, di 43-45 €/kWh, che sono in perfetta linea con quelli attuali di altre tipologie di TES.

Quindi, si deve sottolineare che il vantaggio principale dei sistemi con mEPCM non risiede in un minore costo specifico ma in una maggiore densità di energia accumulata (42-50 kWh/m<sup>3</sup>) e, di conseguenza, in volumi ridotti e minori costi di installazione.

Detti costi sono mostrano, peraltro, ampi margini di miglioramento sia lato miscela, dove le fibre metalliche utilizzate coprono oltre il 40% del costo del mix, sia lato componenti metallici (lo scambiatore e, soprattutto, staffe di rinforzo, che sembrano sovradimensionate), tutti in acciaio inox AISI304.

Il costo di un elemento base avrà anche una influenza diretta sul costo di un modulo di accumulo. Infatti, nel caso si utilizzino 42 elementi base, come in quello in esame, contribuiranno al costo del materiale per circa il 72-75%.

Un altro 10-12% sarà. Invece, dovuto al costo della coibentazione, che, a sua volta, dovrà essere opportunamente dimensionata per limitare sia i costi che le perdite di calore accumulato. Nel caso attuale, con uno spessore di 400 mm di Prorox SL 960, le perdite saranno inferiori ai  $29 \text{ W/m}^2$ , che, tenendo conto di una capacità nominale di 250-300 kWh, sarà pari a circa il 5% di perdita giornaliera (12 kWh/giorno). La temperatura di parete, avendo ipotizzato una temperatura ambiente di  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , sarà di circa  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Il modulo di accumulo termico, qui ipotizzato, presenterà un costo dei soli materiali pari a circa 30-35 k€, ovvero 110-120 €/kWh. Se, invece, si portano in conto anche i costi accessori ed il contributo di installazione/lavorazione, il costo capitale è dell'ordine dei 63-73 k€, ovvero 228-250 €/kWh.

## 9 Conclusioni

I risultati del lavoro presentato in questo documento hanno riguardato la completa caratterizzazione termica di singoli elementi di accumulo termico basati su nuove tipologie di calcestruzzi, cui possono essere aggiunte piccole quantità di materiale a cambiamento di fase stabilizzato in forma, e la valutazione dei costi associati realizzazione di questi e di un sistema modulare (insieme di più elementi di accumulo posti in serie o in parallelo in numero appropriato alle esigenze di una utenza).

I punti salienti relativi alla caratterizzazione termica di due prototipi SH02 realizzati con materiali cementizi di tipo A e B (rispettivamente di capacità teorica 1.7 e 2.3 kWh o 3.7 e 4.2 kWh se si include anche il contributo del coibente) sono illustrati qui di seguito:

- Le perdite termiche del sistema di prova completo, 1.2-1.5 kW, sono sicuramente elevate se raffrontate alla capacità termica del singolo elemento e ne rendono impossibile, unitamente al forte contributo all'accumulo, dovuto alla coibentazione, una caratterizzazione d'insieme;
- Una evidenza sicuramente positiva invece risiede nel buon dimensionamento della coibentazione che risulta dalla osservazione della differenza di temperatura tra l'asse del prototipo e la sua temperatura di superficie, che differiscono di pochissimi gradi (sinonimo di sezione quasi adiabatica), che dalla temperatura esterna al coibente, che rimane molto al di sotto dei  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- I tempi di carico di entrambi i prototipi sono di circa 6-7 ore a seconda dell'intervallo di temperatura della prova (tempo maggiore per temperature più elevate). Ciò è chiaramente relazionato al livello di perdite termiche;
- Il test condotto con il materiale B (contenente il 5% in peso di PCM), nell'intervallo di temperatura  $220\text{-}250 \text{ }^\circ\text{C}$ , ha evidenziato in fase di carico delle prestazioni migliori rispetto agli altri. Questo intervallo è pressoché coincidente con quello di cambio di fase del PCM contenuto nel materiale B, evento che favorisce lo sfruttamento del materiale di accumulo (accumulo con calore sensibile e latente) e riduce il flusso di calore verso l'esterno. Per l'intervallo  $250\text{-}280 \text{ }^\circ\text{C}$  ciò non avviene (si accumula solo calore sensibile) ed i risultati sono in linea con quelli del materiale A;
- La fase di scarico, in tutti i test, è stata fortemente penalizzata dall'alto livello delle perdite termiche. Essa è durata solo pochi minuti (12-50) fornendo una potenza media in uscita di 300-600W;
- Nei test di ciclaggio (3 cicli) tra  $250$  e  $270 \text{ }^\circ\text{C}$  si è osservato come l'evoluzione dell'energia accumulata nel solo elemento tra il primo ed il secondo ciclo abbia un valore massimo quasi costante per ogni ciclo con un minimo che però tende gradualmente ad aumentare. La difficoltà di scaricare completamente l'energia accumulata in un ciclo riduce, di fatto, la capacità di accumulo del ciclo seguente. La capacità di accumulo del SH02 con materiale B risulta comunque maggiore di quella con del materiale A e più stabile durante il ciclaggio.

In conclusione, si può affermare che il sistema LHTES costituito da un solo elemento di accumulo ed una importante coibentazione non si presta ad una rigorosa caratterizzazione delle prestazioni termiche (andrebbe impiegato un modulo a più elementi di capacità termica molto maggiore). I due materiali mostrano delle caratteristiche e delle dinamiche molto simili ma con alcuni tratti che li differenziano in modo evidente. Complessivamente il calcestruzzo additivato con il 5% di PCM stabilizzati in forma mostra

delle prestazioni termiche migliori rispetto al calcestruzzo base: una sostanziale parità nei tempi di caricamento, un buon incremento della capacità di accumulo, soprattutto per intervalli operativi stretti ed intorno alla temperatura di fusione, ed un evidenziato incremento di resistenza termica che limita anche le perdite di calore.

La seconda parte del presente lavoro è stata dedicata alla valutazione del costo associato alla realizzazione di un singolo elemento di accumulo utilizzando le miscele di calcestruzzo in esame e di un sistema modulare costituito da un insieme di elementi di accumulo posti in serie o in parallelo.

L'analisi ha evidenziato un costo per l'elemento base di accumulo crescente con la quantità di PCM utilizzato, tra 525€ e 628€. Ciò conduce, con una capacità termica nominale di 6.1-7.2kWh, a costi specifici, escludendo la manodopera, di 43-45 €/kWh, che sono in perfetta linea con quelli attuali di altre tipologie di TES. Quindi, si deve sottolineare che il vantaggio principale dei sistemi con mEPCM non risiede in un minore costo specifico ma in una maggiore densità di energia accumulata (42-50 kWh/m<sup>3</sup>) e, di conseguenza, in volumi ridotti e minori costi di installazione. Detti costi mostrano, peraltro, ampi margini di miglioramento sia lato miscela sia lato componenti metallici. Il modulo di accumulo termico, qui ipotizzato (container con 42 elementi base), presenterà un costo dei soli materiali pari a circa 30-35 k€, ovvero 110-120 €/kWh. Se, invece, si portano in conto anche i costi accessori ed il contributo di installazione/lavorazione, il costo capitale è dell'ordine dei 63-73 k€, ovvero 228-250 €/kWh.

## Riferimenti bibliografici

- 1 E. Veca, A. Miliozzi, G. Napoli, G. Giorgi, Realizzazione di un elemento di accumulo in calcestruzzo con PCM. Report RdS/PTR(2021)/261
- 2 R. Liberatore, A. Miliozzi, D. Nicolini, G. Napoli, G. Giorgi, Messa a punto impianto Solteca3, Report RdS\_PTR2020\_182.
- 3 D. Mazzei, G. Giorgi, R. Liberatore, G. Napoli, A. Miliozzi; Caratterizzazione termica di un elemento di accumulo termico realizzato con calcestruzzo base a temperature medio-alte a seguito di un ripetuto carico ciclico. Report RdS/PAR2019/118.
- 4 Data Sheet Terminol 66
- 5 Rockprice - <https://rockprice-rti.rockwool.com/>
- 6 Rockassist - <https://rockassist.com/>
- 7 Cipiccia Calcestruzzi. Comunicazioni private. Febbraio 2020
- 8 Inox Forniture <https://www.inoxforniture.it/tubo-tondo-aisi-304.html>
- 9 G. Glatzmaier, Developing a Cost Model and Methodology to Estimate Capital Costs for Thermal Energy Storage, Technical Report, NREL/TP-5500-53066, December 2011

## Abbreviazioni ed acronimi

CLS	Calcestruzzo
TES	Thermal Energy Storage (Accumulo termico)
LHTES	Latent Heat TES (Accumulo a calore latent)
PCM	Phase Change Material (Materiale a cambiamento di fase)
SS-PCM	Shape-Stabilized PCM (PCM stabilizzati in forma)
mEPCM	micro-Encapsuled PCM (PCM micro incapsulati)