



Ricerca di Sistema elettrico

Prove sperimentali del comportamento termico di un elemento base di accumulo

*T. Crescenzi, A. Miliozzi, G.M. Giannuzzi,
R. Liberatore, E. Giovannini,
G. Napoli, D. Mele*

PROVE SPERIMENTALI DEL COMPORTAMENTO TERMICO DI UN ELEMENTO BASE DI ACCUMULO

T. Crescenzi, A. Miliozzi, G.M. Giannuzzi, R. Liberatore, E. Giovannini, G. Napoli, D. Mele

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Energia elettrica da fonte solare

Obiettivo: Studio di configurazioni impiantistiche alternative

Responsabile del Progetto: Domenico Mazzei ENEA

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	7
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	9
2.1 CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DI ELEMENTI DI ACCUMULO A CALORE SENSIBILE IN CEMENTO	9
2.1.1 <i>Introduzione</i>	9
2.1.2 <i>Realizzazione degli accumulatori elementari e strumentazione</i>	10
2.1.3 <i>Realizzazione della sezione di prova</i>	11
2.1.4 <i>Caratterizzazione con ultrasuoni e sclerometro dei provini non trattati termicamente</i>	13
2.1.5 <i>Pianificazione delle prove sperimentali ed analisi dei risultati</i>	15
2.1.5.1 Test n. 1: Degasaggio 80°C – 160°C	15
2.1.5.2 Test n. 2: Cicli di carico e scarico 240°C e 180°C.....	19
2.1.6 <i>Risultati e conclusioni</i>	24
2.2 CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DI ELEMENTI DI ACCUMULO A CALORE LATENTE	25
2.2.1 <i>Introduzione</i>	25
2.2.2 <i>Realizzazione degli accumulatori elementari</i>	25
2.2.3 <i>Realizzazione della sezione di prova</i>	27
2.2.4 <i>Pianificazione delle prove sperimentali</i>	30
2.2.4.1 Test n. 1: Caricamento iniziale (20°C – 200°C).....	30
2.2.4.2 Test n. 2: Fase di carico (200°C – 260°C).....	30
2.2.4.3 Test n. 3: Fase di scarico (260°C – 200°C)	30
2.2.4.4 Test n. 4: Ciclo carico-scarico giornaliero.....	31
2.2.5 <i>Risultati</i>	32
3 DISCUSSIONE E CONCLUSIONI.....	38
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	39
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	40

Sommario

Nell'ambito dei sistemi di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, il solare termodinamico può dare, in una prospettiva di medio termine, un contributo significativo allo sviluppo di un sistema di produzione dell'energia elettrica sostenibile, sia attraverso l'impiego di impianti di diversa taglia nel sistema elettrico nazionale. L'attività di ricerca sul solare termodinamico si pone come obiettivo primario la riduzione i costi, rendendo gli impianti CSP, sia di grande che di piccola taglia, sempre più competitivi rispetto quelli tradizionali a combustibili fossili. In questa ottica, un ruolo determinante lo gioca la presenza di un sistema di accumulo con una elevata densità di energia termica ed alta efficienza di scambio termico. I tedeschi del DLR sono fortemente impegnati nella ricerca su sistemi di accumulo di energia sotto forma di calore sensibile in materiali cementizi. Tale soluzione sembra essere in grado di ridurre considerevolmente i costi del kWh immagazzinato, ma presenta alcune incertezze sulle modalità d'integrazione all'interno di un impianto solare a concentrazione e sulla durabilità dei moduli di accumulo. Nel giugno 2013, Università di Trento e Università di Padova ed ENEA hanno concluso il progetto di ricerca SOLTECA finanziato dalla Fondazione Cassa di Risparmio di Trento e Rovereto (CARITRO), mettendo a punto una prima ricetta per il materiale d'accumulo e individuando i parametri sia fisici che dimensionali che determinano dinamiche dell'accumulo. Altra soluzione che presenta buone prospettive in termini di riduzione dei costi è quella basata su sistemi di accumulo a calore latente utilizzando materiali a cambiamento di fase (PCM). Questa soluzione, a basso costo ed alta densità di energia, è però condizionata dalla ridotta capacità di trasporto del calore (diffusività termica) di questi materiali. Sulla base di recenti studi, miscele di PCM ed opportune nanoparticelle, detti nanoPCM, sembrano essere in grado di incrementare sia la capacità termica che la diffusività del mezzo di accumulo. Durante il Piano Annuale di Ricerca del 2012, si sono sviluppati e caratterizzati nuovi mezzi di accumulo termico con PCM e nanoparticelle e dimostrata la loro capacità di incremento della capacità e della diffusività termica. Le attività del PAR 2013 sono, invece, finalizzate alla selezione di un nanoPCM con temperatura di fusione prossima ai 200-250°C, allo studio e progettazione di un sistema di accumulo elementare e della relativa sezione di prova e, quindi, alla studio sperimentale dello scambio termico, confrontando i risultati con quelli ottenuti con un sistema di accumulo a calore sensibile utilizzando cementi appositamente sviluppati. Nel presente lavoro, si riportano le attività Enea relative alla realizzazione degli accumulatori elementari e della sezione di prova, alla pianificazione delle prove sperimentali da eseguire ed alla elaborazione, analisi e commento dei risultati ottenuti sia nel caso di accumulo termico a calore sensibile (cementi) che nel caso di accumulo a calore latente (materiale a cambiamento di fase).

1 Introduzione

Nell'ambito dei sistemi di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, il solare termodinamico può dare, in una prospettiva di medio termine, un contributo significativo allo sviluppo di un sistema di produzione dell'energia elettrica sostenibile, sia attraverso l'impiego di impianti di diversa taglia nel sistema elettrico nazionale, sia per gli sviluppi previsti per questa tipologia di impianti in aree più favorevoli dal punto di vista della radiazione solare diretta, come il Nord Africa, con trasmissione in Europa dell'energia elettrica prodotta.

Gli impianti solari termodinamici o **CSP** (Concentrated Solar Power) sfruttano l'energia solare come unica o principale fonte di calore per la produzione di energia elettrica. Essi utilizzano opportuni sistemi ottici (concentratori) per raccogliere e concentrare la radiazione solare diretta e inviarla su un ricevitore, dove viene assorbita e trasformata in calore ad alta temperatura, che, trasferito ad un fluido termovettore, può essere impiegato in un ciclo termico per la produzione di energia elettrica o come calore di processo in vari impianti industriali.

L'attività di ricerca sul solare termodinamico si pone come obiettivo primario la riduzione i costi, rendendo gli impianti CSP, sia di grande che di piccola taglia, sempre più competitivi rispetto quelli tradizionali a combustibili fossili, e dovrà essere finalizzata non solo al miglioramento dell'efficienza dei principali componenti e sistemi, ma anche alla semplificazione impiantistica e delle procedure di gestione e manutenzione.

Negli attuali impianti solari è quasi sempre presente un sistema di accumulo termico (**TES** – Thermal Energy Storage) che consente di migliorarne il funzionamento, aumentarne la capacità operativa e quindi ridurre il costo finale dell'energia prodotta. Sino ad oggi, il mezzo, migliore e meno costoso, per accumulare calore sensibile ad alta temperatura è stato individuato nei sali fusi. In genere tali mezzi di accumulo hanno una capacità termica piuttosto limitata e necessitano di grandi volumi. Le elevate dimensioni dei contenitori necessari ad ospitare i mezzi di accumulo e le elevate superfici di scambio degli stessi incrementano inevitabilmente sia il costo che le perdite del sistema.

Per ridurre il costo e le dimensioni del sistema sono state proposte diverse soluzioni, alternative all'accumulo a calore sensibile. Quelle che sembrano essere le più appetibili sono connesse all'uso di materiali solidi a basso costo, come ad esempio cementi speciali, materiali inerti, oppure sfruttando il calore latente (materiali a cambiamento di fase, **PCM**). Le principali problematiche connesse a queste soluzioni, e che sino ad oggi ne hanno ridotto le potenzialità, sono spesso correlate alla ridotta capacità di trasporto del calore (diffusività termica). La possibilità dell'uso di materiali a cambiamento di fase, miscelati con una opportuna quantità di nano particelle sembrerebbe, sulla base di alcuni recenti studi, poter incrementare sia la capacità termica del mezzo che la sua diffusività.

Scopo, allora, della Linea Progettuale 2 (Solare Termodinamico) del Progetto B.1.3 (Energia elettrica da fonte solare) è di studiare e sviluppare, nel triennio 2012-2014, nuovi sistemi di accumulo termico per impianti CSP di piccola e media taglia, ma estendibili a taglie maggiori, basati sull'utilizzo di mezzi a cambiamento di fase (sali fusi) miscelati con opportune nanoparticelle. Tali sistemi dovranno essere efficienti, compatti ed economici.

Durante il Piano Annuale di Ricerca del 2012 (**PAR 2012**) si sono sviluppati e caratterizzati nuovi mezzi di accumulo, da impiegare come sistemi alternativi di accumulo termico, costituiti da una miscela di PCM e nanoparticelle. In particolare, per diverse temperature di riferimento, sono stati individuati e caratterizzati sia i PCM che le nanoparticelle, compatibili con essi e potenzialmente in grado di incrementarne le caratteristiche di capacità e diffusività termiche, studiate le caratteristiche delle miscele e valutata l'influenza delle nanoparticelle sulle loro proprietà.

Per il PAR 2013, nell'ambito dello sviluppo di sistemi alternativi di accumulo termico, saranno, invece, condotte le seguenti attività.

Un mezzo di accumulo a calore latente con temperatura di fusione prossima ai 200-250°C verrà selezionato, prodotto nelle opportune quantità, e completamente caratterizzato, con particolare riferimento alla diffusività/conducibilità termica, alla sua stabilità nel tempo (durabilità) ed a tutte quelle proprietà fisiche e termo-meccaniche necessarie (es. densità, variazione di volume al cambio di fase, coefficiente di dilatazione termica, pressione di vapore) nonché alla sua compatibilità con i materiali di contenimento (corrosione). Particolare attenzione dovrà essere posta nella scelta di un metodo di produzione del nanoPCM, che sia in grado di fornire in tempi brevi le quantità richieste (semi-industriale) mantenendo inalterate le caratteristiche del prodotto (rispetto dei protocolli).

Tali caratteristiche permetteranno la concezione e lo sviluppo di un sistema di accumulo di dimensioni più compatte e con uno scambio termico efficiente. La progettazione di questo elemento base e la sua caratterizzazione sperimentale costituiranno i principali obiettivi della seconda fase di questa attività. Perciò, sarà scelta una tipologia di sistema di accumulo di riferimento e studiato il suo comportamento sia termico che termo-meccanico attraverso opportuni modelli di simulazione. Conseguentemente verrà progettato un sistema di accumulo elementare e, quindi, la relativa sezione di prova.

Per quanto riguarda l'accumulo di calore sensibile in materiali cementizi, l'ENEA ha svolto un'attività di coordinamento tecnico dell'intera ricerca ed in particolare ha condotto, presso i propri laboratori, la nuova campagna di sperimentazione su una miscela a caratteristiche termo-fisiche migliorate, sviluppata presso l'Università di Trento. Per l'esecuzione dei test si è proceduto al rifacimento della coibentazione del circuito di carico e scarico del calore, al ricablaggio dei punti di misura ed all'aggiornamento del programma di acquisizione e controllo. Sono state eseguite alcune analisi non distruttive mediante ultrasuoni, su gli elementi di accumulo vergini, che saranno poi ripetute a fine sperimentazione per la valutazione dell'eventuale degrado subito. I risultati acquisiti, nel test di degassaggio e nel test di carico e scarico, sono stati analizzati, elaborati e forniti all'Università di Padova per la successiva fase di interpretazione numerica.

In questo documento si riportano le attività svolte da Enea nell'ambito della caratterizzazione sperimentale del comportamento di sistemi elementari di accumulo termico sia a calore sensibile (cementi) che latente (PCM) durante le fasi di carico e scarico del sistema.

In entrambi i casi il lavoro fatto ha riguardato:

- La realizzazione dei sistemi elementari di accumulo
- La realizzazione della sezione di prova per l'analisi dei sistemi di accumulo
- La pianificazione delle prove da eseguire
- L'esecuzione delle prove
- L'elaborazione, l'analisi e la valutazione dei risultati sperimentali

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Caratterizzazione sperimentale di elementi di accumulo a calore sensibile in cemento

2.1.1 Introduzione

L'accumulo di energia sotto forma di calore sensibile in materiali cementizi, è tuttora sotto indagine presso i tedeschi del DLR. Tale soluzione sembra essere in grado di ridurre considerevolmente i costi del kWh immagazzinato. Va però rimarcata una criticità d'integrazione di questa tipologia di TES in un impianto solare. Occorre inoltre tenere in conto il comportamento del calcestruzzo durante la prima fase di preriscaldamento dei moduli d'accumulo, in cui la presenza di una rilevante quantità di acqua libera evaporabile nel calcestruzzo può produrre un danneggiamento dei moduli. Altro elemento da meglio indagare è le capacità di resistere negli anni ai cicli giornalieri di carico e scarico del calore, ai cui fanno seguito rilevanti sollecitazioni termomeccaniche. Negli anni passati sia ENEA che L'Università di Padova hanno lavorato sul comportamento termo-igro-meccanico dei calcestruzzi sottoposti ad elevate temperature (vessel e contenitori in cls in ambito nucleare, tunnel ed edifici sotto carico da incendio), maturando competenze e sviluppando software d'analisi specifici. A giugno 2013 si è concluso il progetto SOLTECA finanziato dalla Fondazione Cassa di Risparmio di Trento e Rovereto (CARITRO), che a visto il coinvolgimento Università di Trento in aggiunta a Università di Padova ed ENEA.



Figura 1- Circuito ad olio silconico SOLTECA, per il test degli accumulatori termici elementari, in fase di assemblaggio ed in esercizio.

Nel progetto sono state affrontate le problematiche relative alla produzione di un mix di calcestruzzo da impiegare negli elementi di accumulo, aspetti teorici connessi al dimensionamento termico e meccanico con sviluppo di metodi semplificati, la realizzazione e l'utilizzo di un circuito sperimentale per testare il comportamento degli elementi d'accumulo sviluppati.

Il circuito è costituito da:

- un circolatore-riscaldatore Julabo SE-6, impiegante olio silconico Alusil TR50 della Aluchem,
- flussimetro Rota della Yokogawa,
- un sistema di raffreddamento ad aria a tubo filettato per la rimozione del calore sottratto nella fase di scarico,
- un sistema di piping in grado di alimentare gli elementi di accumulo disposti in serie in circolazione oraria o antioraria, mediante l'azionamento manuale di 4 valvole.

Nella presente attività sono testati nuovi elementi d'accumulo, confezionati con una miscela a caratteristiche termo-fisiche migliorate, sviluppata presso l'Università di Trento. La revisione del circuito, delle sezioni di prova e delle modalità di test è sfruttata di una attività congiunta tra Università di Padova ed ENEA, ma condotta con compiti ben distinti e complementari.

Per elementi di dettaglio della progettazione del circuito SOLTECA e delle attività condotte su finanziamento CARITRO si rimanda ai documenti emessi e negli articoli pubblicati riportati nei riferimenti. Come già accennato le modalità operative del circuito sono:

- circolazione oraria in fase di carico con V1 e V2 aperte e V4 e V3 chiuse
- circolazione antioraria in fase di scarico con V3 e V4 aperte e V1 e V2 chiuse
- circolazione di raffreddamento olio V1 e V4 chiuse, V2 e V3 (non si ha circolazione negli elementi di accumulo).

La valvola VM di regolazione viene mantenuta sempre aperta per lavorare alla massima portata possibile.

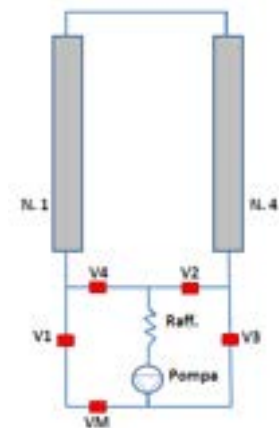


Figura 2- Schematico del circuito SOLTECA, nella configurazione a 2 elementi di accumulo.

2.1.2 Realizzazione degli accumulatori elementari e strumentazione

ENEA, sulla base di quanto elaborato da UNIPD, ha fornito a UNITN le indicazioni necessarie per la realizzazione degli accumulatori elementari su cui effettuare la campagna sperimentale. Si tratta di due provini cilindrici in cui la parte attiva in calcestruzzo lunga 1 m, con diametro esterno 10 cm, contenente sull'asse un tubo in AISI 316 DN 6-1/4" di lunghezza 1,10 m fornito da ENEA. L'ENEA ha inoltre fornito 16 termocoppie con caratteristiche sotto riportate:

- Tipo K, da 1 mm
- Materiale (Chromel (Ni-Cr) (+)/Alumel (Ni-Al) (-))
- Misura -200 °C a 1260 °C
- Sensibilità 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Classe 2

Dettagli sulla geometria dei provini e sul posizionamento delle termocoppie si rimanda al documento che verrà prodotto da UNIPD.

Il calcestruzzo impiegato nel confezionamento è il risultato dell'attività di ricerca a carico di UNITN, avente come obiettivo di migliorarne le caratteristiche termiche e meccaniche rispetto la precedente miscela sviluppata in ambito SOLTECA.

L'ENEA si è fatto carico di procedere alla scasseratura e al trasporto presso i propri laboratori di Casaccia. I provini all'atto della scasseratura hanno presentato una superficie non sufficientemente liscia, segno questo della necessità di incrementare la lavorabilità del calcestruzzo o/e il tempo di vibro-compattazione. Si è pertanto operata un'ulteriore stuccatura al fine di consentire una migliore aderenza delle 6 termocoppie da inserire in superficie (3 per elemento come da schema UNIPD). L'adesione delle

termocoppie superficiali è stata realizzata non più con un riporto di malta, che nella precedente campagna è stato soggetto a elevata fessurazione e distacchi, ma impiegando adesivo bi-componente in grado di resistere alle temperature attese in superficie.

2.1.3 Realizzazione della sezione di prova

Per garantire un più omogeneo isolamento termico, su tutto il piping è stata rimossa la coibentazione in treccia ceramica e sostituita con coibentazione a coppella in lana di roccia (conducibilità a 200 °C 0,061 W/m-k a) di diametro 114 mm, spessore 50 mm per il piping e diametro 273 mm, spessore rettificato 86 mm. Sono stati modificati gli afferraggi dei provini spostando il punto di sostegno direttamente sul calcestruzzo mediante fascette rivettate, in modo da ridurre il carico flessionale a mezzzeria. All'estremità del tubo convogliante il fluido termovettore sono stati saldati raccordi conici a compressione filettati ABF già precedentemente utilizzati e che hanno dimostrato un buon grado di tenuta.

Terminato l'assemblaggio ed il cablaggio delle termocoppie, si è proceduto alla sostituzione dell'olio siliconico, al lavaggio del circuito e del termo-circolatore ed al test di tenuta a 50°C.

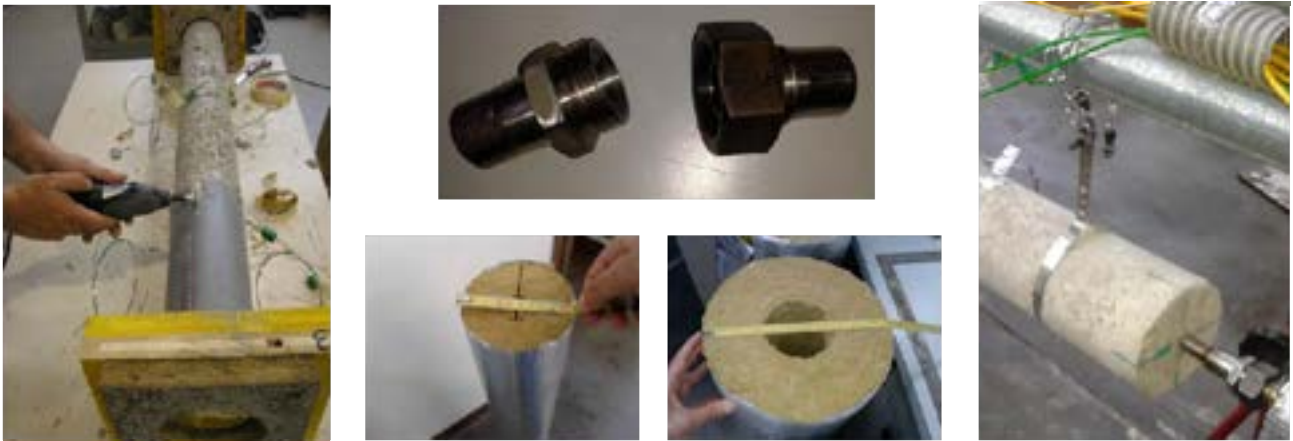


Figura 3- Scasseratura elementi di accumulo, particolare dei raccordi, dei supporti di ancoraggio e delle coppelle isolanti del piping e degli elementi di accumulo.

La coibentazione dei moduli di accumulo è stata effettuata dopo il primo ciclo di degasaggio per favorire l'eliminazione dell'acqua, rilasciata dal calcestruzzo, evitando l'impregnazione del coibente con alterazione delle sue capacità isolanti.



Figura 4- Assetto elementi di accumulo privi di coibentazione durante il test di degasaggio e coibentati pronti per i ciclaggi di carico e scarico.

Avendo portato i punti di misura 11 per elemento di accumulo, più 6 sul piping, più uno per la temperatura ambiente, per un totale di 29 termocoppie, si riprogrammata l'applicazione d'acquisizione realizzata in ambiente LABVIEW. Essendo disponibili 24 canali di collegamento al terminal block della National Instruments SCXI-1000/-1660/-1303, si è scelto di acquisire le termocoppie: 1E, 1Fi, 1Ai, 1Bi, 1Ci, 1Di, 1Fu, 1Au, 1Cu, 1Du, posizionate sull'elemento 1, 4E, 4Fi, 4Ai, 4Bi, 4Ci, 4Di, 4Fu, 4Au, 4Cu, 4Du, posizionate sull'elemento 4, T1, T2, T3 posizionate sul piping e Tamb per la temperatura ambiente. Le termocoppie, T1b, T2b, T4, 1Bu e 4Bu, che danno misure ridondanti rispetto le T1, T2, 1Au e 4Au, sono monitorate con lettori digitali attivati secondo necessità. La termocoppia T4 è posta a monte della serpentina di refrigerazione in una posizione in cui si ha un più completo miscelamento del fluido.

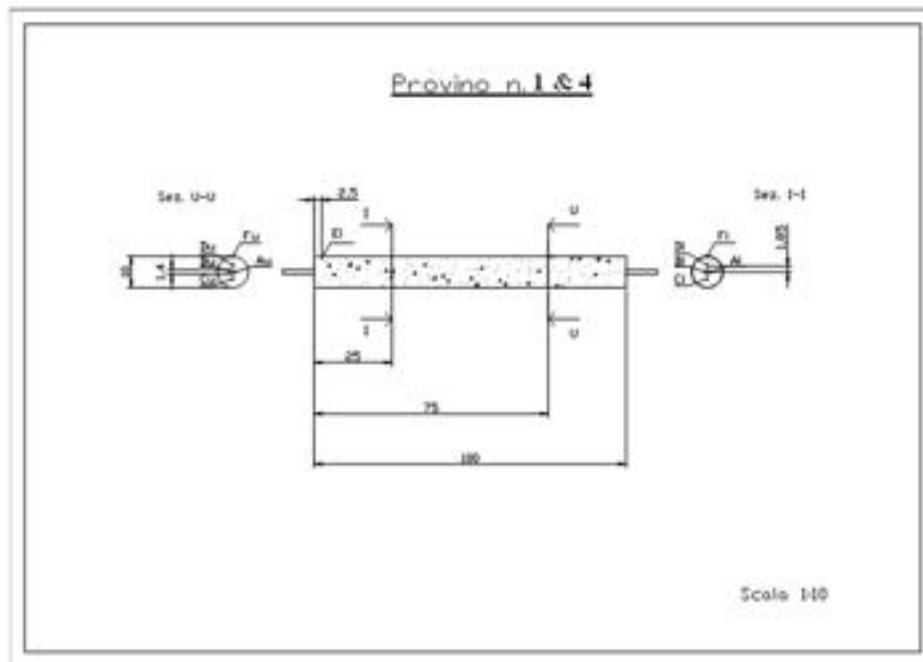


Figura 5- Disposizione longitudinale e radiale delle termocoppie sugli elementi di accumulo.

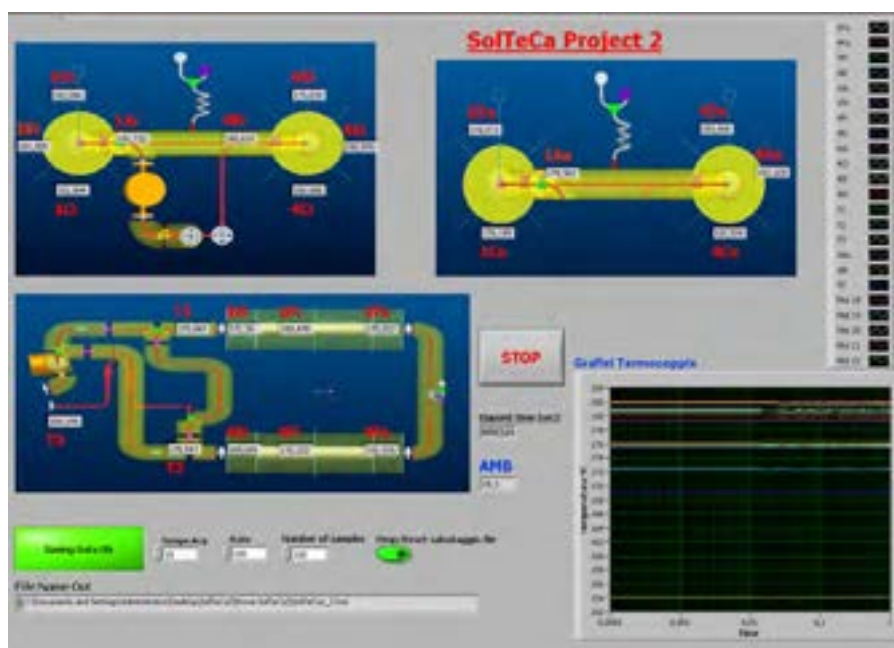


Figura 6- Schermata acquisizione e controllo in ambiente LabVIEW.

2.1.4 Caratterizzazione con ultrasuoni e sclerometro dei provini non trattati termicamente

Si sono valutate le caratteristiche meccaniche dei due elementi di accumulo e di due provini cilindrici aggiuntivi, forniti da UNITN, mediante l'impiego degli ultrasuoni e di un più convenzionale sclerometro. I test sono stati condotti con l'utilizzo di un apparecchio ultrasonoro Siro RP 5000 CSD, presso il Laboratorio di Analisi non Distruttive ENEA UTTMAT-DIAG, sul materiale non trattato termicamente. In [Tabella 1](#) si riportano i valori della velocità del suono, del modulo elastico e della resistenza cubica misurati. Tali analisi saranno ripetute sul materiale invecchiato con un più elevato numero di ciclaggi. I due provini cilindrici 10X20 cm saranno sottoposti a trattamenti termici il più possibile equivalenti a quelli ai due elementi di accumulo per avere riscontri aggiuntivi sulle caratteristiche del materiale.

In [Figura 7](#) si mostrano le attrezzature per i test agli ultrasuoni e i due provini cilindrici di riscontro.



Figura 7- Apparecchiature per test ad ultrasuoni Siro RP 5000 CSD e provini cilindrici di riscontro.

Tabella 1 – Quadro riassuntivo dei rilievi eseguiti con sclerometro ed apparecchio ad ultrasuoni.

Prove Ultrasonore e Sclerometriche prima dei test termici						
Parametri di misura						
spessore mm	100					
Strumento	Sirio 5000					
misura	al centro del campione cilindrico					
Accoppiante	acqua					
Sonde	170 KHz					Resistenza
						Cubica
Taratura	Velocità m/s	Amplificazione	Densità	Modulo E Gpa	Sclerometro B	N/mm2
Acciaio	5882	55	7860	181.29		
cemento	4926	70	2505	40.52	38	30
7/08/2014 ore 10.00						
Data						
m/s	Provino 34	Provino 35	Provino 1.1	Provino 1.2	Provino 4.1	Provino 4.2
a	4762	4878	4854	3322	4762	3300
	4785	4808	4878	3356	4739	3289
	4831	4831	4808	3356	4785	3300
Medie	4793	4839	4847	3345	4762	3296
b	4831	4950	4785	3155	4673	3300
	4765	4950	4739	3175	4651	3378
	4930	4878	4785	3165	4630	3378
Medie	4842	4926	4770	3165	4651	3352
Densità Kg/m3	2483	2483	2483	2483	2483	2483
Modulo E Gpa	41.69	43.35	39.74	17.50	37.79	19.63
Sclerometro	B = Hammer Rebound					
a	23	23.5				
b	23	23.5				
Media	23	24				
Resistenza N/mm2						
Cubica	19	20				

2.1.5 Pianificazione delle prove sperimentali ed analisi dei risultati

Di seguito si illustrano gli obiettivi della campagna sperimentale.

2.1.5.1 Test n. 1: Degasaggio 80°C – 160°C

Obiettivo: Favorire la migrazione dell'acqua libera presente nei provini, fenomeno noto come degasaggio, per evitare un problema che si presenta nella fase di start up di un sistema di accumulo in calcestruzzo, per le sovrappressioni locali dovute alla repentina vaporizzazione dell'acqua libera a causa delle elevate temperature di esercizio. Ovviamente il ciclo è stato effettuato a provini nudi, ossia privi di coibente. Ulteriore obiettivo è stata l'analisi visiva dei provini di calcestruzzo, al fine di rilevare la presenza di nuove cricche o l'incremento di quelle già esistenti al momento del primo riscaldamento.

Programma operativo: Temperature di esercizio dell'olio, da 80 °C, con distribuzione stazionaria per 10 ore, fino a 160 °C in 3 ore con rampa lineare. La temperatura è stata mantenuta costante per 34 ore a 160 °C. A seguire si è arrestata la circolazione e il circuito comprensivo dei provini si è raffreddato cedendo calore all'ambiente per convezione naturale; durante il test la temperatura ambiente è variata tra 22 °C e 27 °C. La circolazione del fluido per tutta la prova è stata oraria con velocità del fluido a 160 °C pari a 4.2 l/min ([Figura 8](#)).

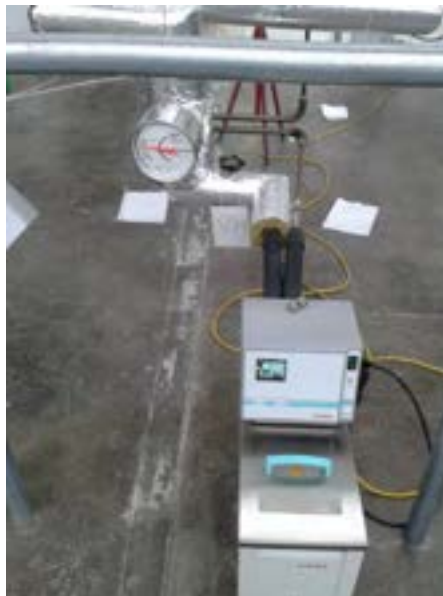


Figura 8- Rilievo valori della portata e temperatura dell'olio allo stazionario di degasaggio.

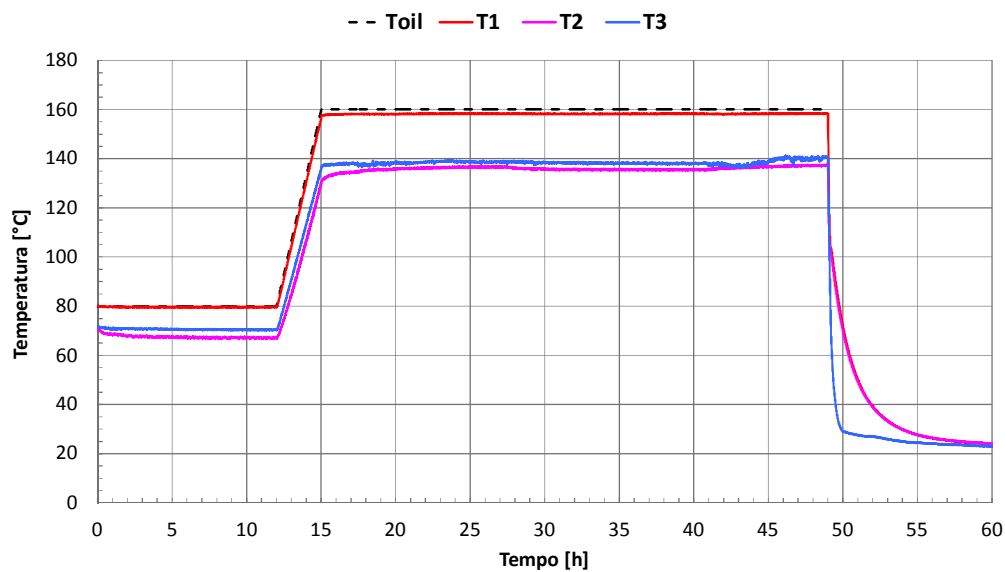


Figura 9- Evoluzione temporale delle temperature dell'olio in uscita dal riscaldatore, all'ingresso del modulo 1, in uscita del modulo 4 e al ritorno nel riscaldatore in Solteca-2.

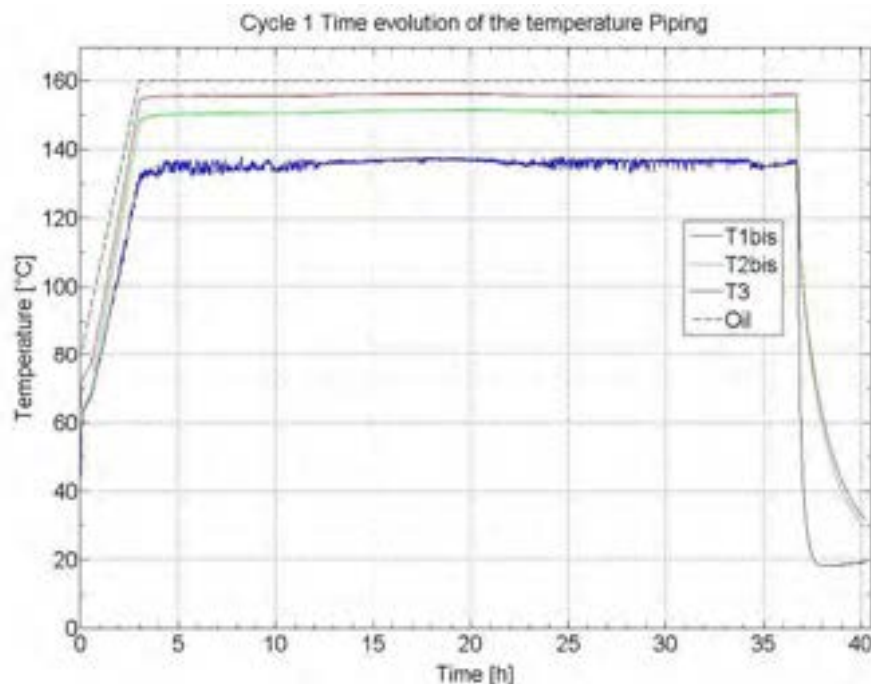


Figura 10- Involuppo temporale delle termocoppie su piping, relative al degasaggio Solteca-1.

Dal confronto di [Figura 9](#) e [Figura 10](#) si apprezza il miglioramento nella coibentazione del piping con la temperatura rilevata dalla termocoppia T1 coincidente quella letta sul riscaldatore. La temperatura T2 risulta più bassa di quanto precedentemente rilevato con la T2bis in Solteca-1 (150 °C contro 137 °C) ciò è indice di una maggior conducibilità del nuovo calcestruzzo prodotto, che comporta un incremento delle dispersioni verso l'ambiente. In [Figura 9](#) nota un'apparente anomalia nella termocoppia T3 che essendo posta a valle della serpentina refrigerazione dovrebbe dare un valore più basso della T2, a ciò si dà la giustificazione seguente: la temperatura del fluido più bassa dovuta alle maggiori dispersioni porta in condizioni laminari il deflusso, ne consegue che la temperatura di parete letta dalla T2 non rappresenta la

temperatura media del fluido come invece avviene per la T3, dove il fluido arriva mescolato ma non raffreddato eccessivamente essendo la ventilazione della serpentina non attiva.

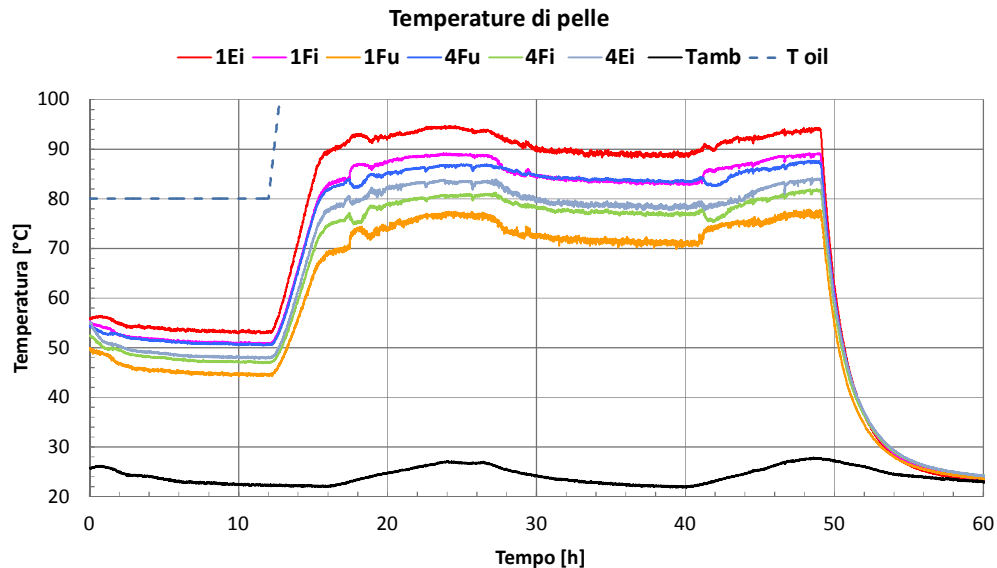


Figura 11- Involuppo temporale delle termocoppie di pelle agli elementi, relative al fase di degasaggio.

Dalla **Figura 11**, considerando la collocazione dei punti di misura in condizioni di circolazione oraria si dovrebbero avere temperature decrescenti dalla 1Ei alla 4Ei, mentre la 1Fu misura una temperatura nettamente più bassa delle altre. Analizzando le foto del punto di incollaggio della 1Fu, si nota che la termocoppia pur rimanendo inglobata nel collante si è leggermente distanziata dal calcestruzzo di 1. mm circa; ciò però non giustifica completamente una riduzione della temperatura registrata di 10 °C circa.

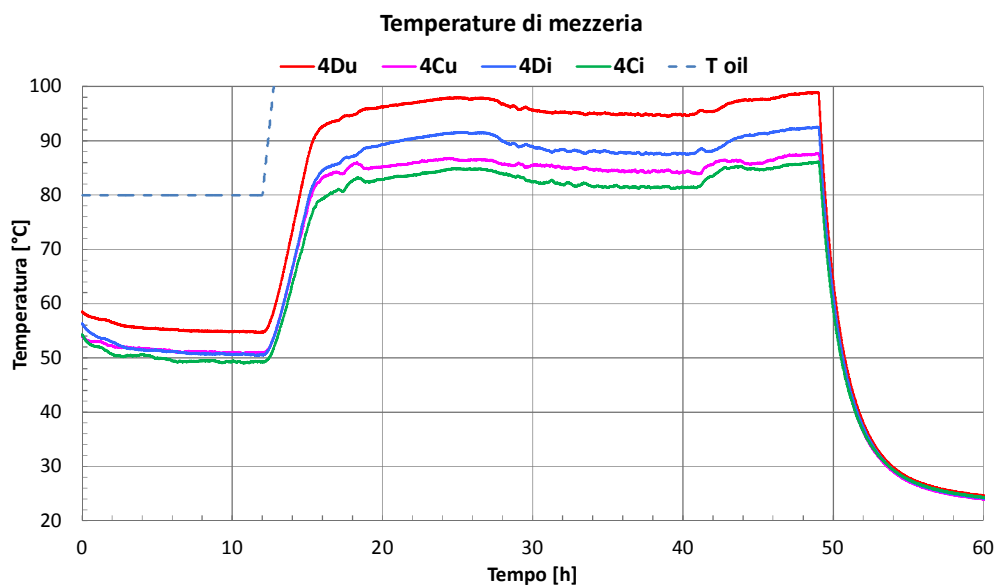


Figura 12- Involuppo temporale delle termocoppie inglobate di mezzeria dell'elemento 1, relative al fase di degasaggio.

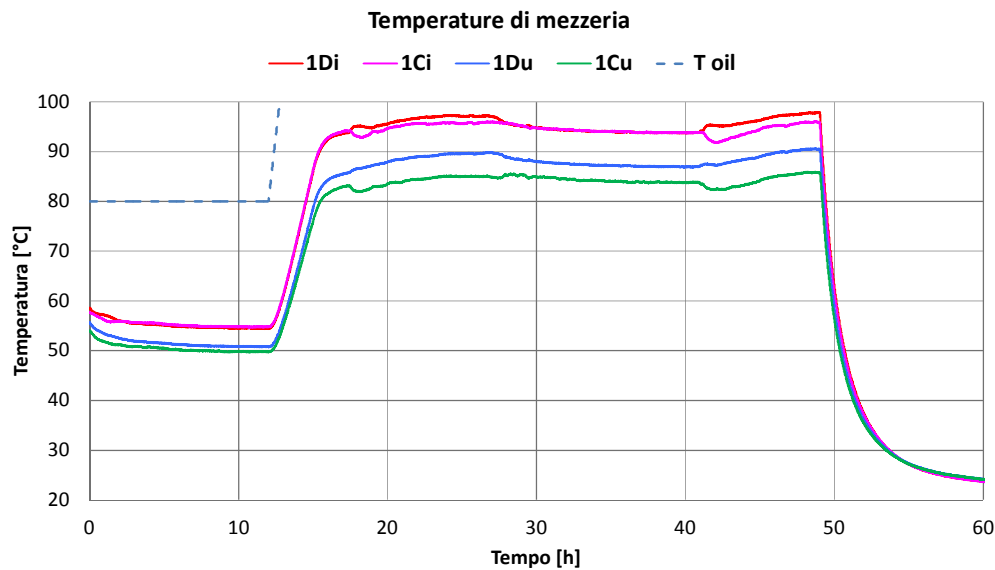


Figura 13- Involuppo temporale delle termocoppie inglobate di mezzeria dell'elemento 4, relative al fase di degasaggio.

L'analisi degli andamenti di **Figura 12** e **Figura 13** relativi alle termocoppie affogate in mezzeria sull'asse verticale della sezione mostra che la temperatura nella posizione D posta superiormente alla C mostra una temperatura sempre maggiore dell'omologa C, congruentemente con l'effetto legato alla convezione naturale. Si nota però che le temperature del calcestruzzo non superano i 100 °C, e quindi non si ha una completa evaporazione e fuoriuscita di tutta l'acqua libera. Va però considerato che se si fosse portata la temperatura di pelle a 100 °C, la temperatura della termocoppia più interna 1Ai sarebbe passata da 114 °C attuali a valori che avrebbero danneggiato gli elementi di accumulo.

Si è verificato che l'appiattimento (**Figura 11**) tra le 30 e 40 ore dal tempo di avvio della prova, risente oltre che delle minori temperature notturne, anche della presenza del personale nella hall.

Confrontando inoltre gli andamenti stazionari ottenuti nella fase di degasaggio Solteca-1 con gli attuali relativi a posizioni corrispondenti, si ha un'ulteriore conferma del forte incremento di conducibilità dell'attuale miscela. Infatti, essendo rimaste sostanzialmente inalterate le forzanti termiche ed i coefficienti di scambio lato olio ed aria, la riduzione di resistenza complessiva porta un incremento di flusso disperso e quindi una temperatura più bassa del interno del calcestruzzo ed un innalzamento della temperatura del lato in aria.

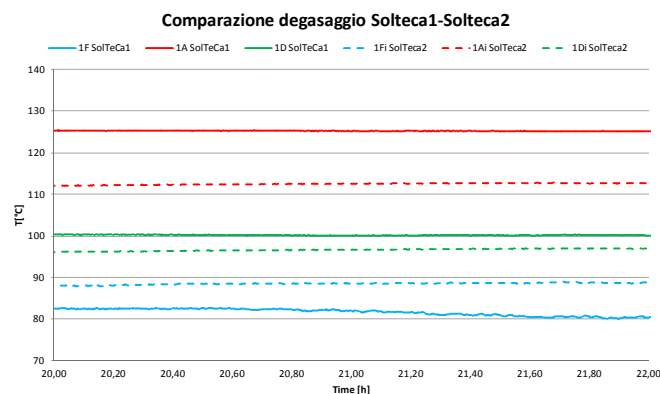


Figura 14- Confronto della distribuzione stazionaria delle temperature del calcestruzzo in punti corrispondenti nel test di degasaggio Solteca-1 ed attuale.

Dall'esame visivo elementi di accumulo a caldo durante la prova, sono state evidenziate alcune fessurazioni a 40 e 75 cm dal punto d'ingresso del fluido nell'elemento 1 (**Figura 15**). Entrambe le fessurazioni a elemento freddo risultano scarsamente visibili a seguito della richiusura dei lembi; va detto inoltre che quella posta a 75 cm oltre ad essere di modesta entità e posizionata su una ripresa del getto operata per il posizionamento delle termocoppie che può averne favorito l'insorgenza.



Figura 15- Quadro fessurativo elemento 1 a caldo durante test di degasaggio.

Nell'elemento 2 si hanno meno estese fessurazioni a centro elemento (a cm 53 e 58.5), in prossimità del punto di ripresa getto a 72 cm e lieve accenno di fessurazione intorno al punto di ripresa a 25 cm dall'uscita del fluido in circolazione oraria (**Figura 16**).



Figura 16- Quadro fessurativo elemento 2 a caldo durante test di degasaggio.

Il quadro fessurativo appare essere meno diffuso e con apertura dei lembi ridotta rispetto quanto rilevato nell'analogo degasaggio operato in Solteca-1.

2.1.5.2 Test n. 2: Cicli di carico e scarico 240°C e 180°C

Obiettivo: Analizzare il comportamento nelle fasi di carico e scarico, due cicli al giorno per due giorni.

Programma operativo: Le temperature di esercizio saranno ripetute per 2 cicli nel seguente modo:

- riscaldamento a circolazione oraria e temperatura che va da 180°C a 240°C in circa 26 minuti partendo da una distribuzione stazionaria delle temperature nel calcestruzzo raggiunte con fluido a 180 °C e circolazione oraria;
- mantenimento costante della temperatura a 240°C per 2 ore sempre mantenendo la circolazione oraria;
- arresto della circolazione e raffreddamento dell'olio nel termostato da 240°C a 180°C in circa 16 minuti;
- attivazione della circolazione antioraria con mantenimento costante della temperatura del fluido a 180 °C per 2 ore. (fine ciclo 1)
- (inizio ciclo 2) riscaldamento a circolazione oraria e temperatura che va da 180°C a 240°C in circa 26 minuti partendo da quanto raggiunto al punto 4;
- mantenimento costante della temperatura a 240°C per 2 ore sempre mantenendo la circolazione oraria;
- arresto della circolazione e raffreddamento dell'olio nel termostato da 240°C a 180°C in circa 16 minuti;
- attivazione della circolazione antioraria con mantenimento costante della temperatura del fluido a 180 °C per 2 ore. (fine ciclo 2)
- attivazione della circolazione oraria con mantenimento costante della temperatura del fluido a 180 °C fino alla mattina del giorno successivo per un totale di 14.5 ore.

Nel secondo giorno di test dopo aver replicato i punti dal 1 a 8 si è arrestato il circolatore, continuando l'acquisizione della fase di raffreddamento.

Tale programma nasce dall'esigenza di realizzare almeno 4 cicli in totale per verificare le dinamiche di carico e scarico del calore, valutare le distribuzioni di temperature nel calcestruzzo e mettere a punto modelli numerici predittivi da applicare in ulteriori fasi d'ottimizzazione del componente. Consente inoltre di verificare eventuali danneggiamenti istantanei dovuti al raggiungimento delle temperature operative sul materiale e gli effetti termomeccanici connessi ai gradienti termici, ma non consente di valutare effetti di deterioramento delle caratteristiche funzionali, tipici del lungo periodo, dovuti a ciclaggi ripetuti.

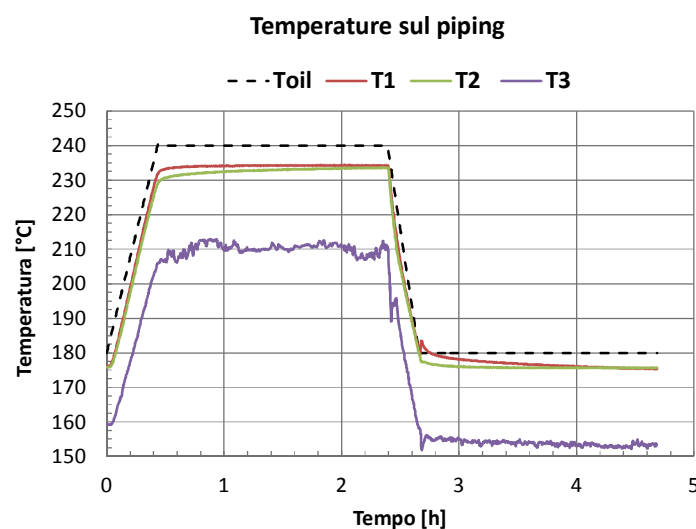


Figura 17- Ciclo-1 di carico e scarico 240-180 °C, evoluzione temporale delle temperature dell'olio in uscita dal riscaldatore e sul piping.

In **Figura 17** si riporta la temperatura dell'olio in uscita dal riscaldatore (Toil), la temperatura all'ingresso del elemento 1 di accumulo (T1), in uscita dall'elemento 4 (T2) e al ritorno nel riscaldatore (T3). La temperatura T2 durante la fase di carico con circolazione oraria, inizialmente più bassa, segnala che il fluido sta cedendo calore al calcestruzzo. Successivamente con l'inversione della circolazione correttamente il fluido in uscita dai moduli ha una temperatura rilevata dalla termocoppia T1 più alta della T2, avendo il fluido estratto calore dal calcestruzzo. Dopo la quarta ora si nota che la T1 ritorna ad essere più basse della T2 portandosi il sistema una condizione stazionaria governata dalle perdite verso l'ambiente, con forzante dell'olio costante a 180 °C.

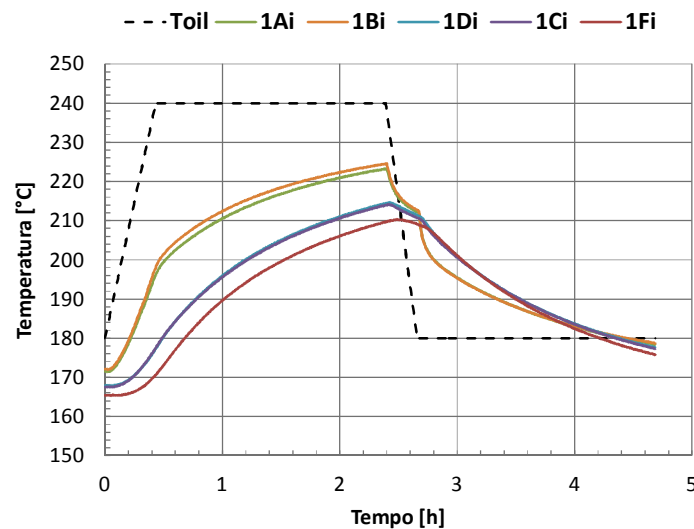


Figura 18- Ciclo-1 di carico e scarico 240-180 °C, evoluzione temporale delle temperature della sezione 1i.

Essendo le termocoppie T1Ai e T1Bi, poste in posizioni simmetriche, così come le T1Ci e T1Di, i valori letti, riportati in **Figura 18**, risultano correttamente sovrapposti segno che il loro posizionamento è corretto e che il materiale è omogeneo. Intorno alla quarta ora si conferma l'inversione della distribuzione delle temperature, portandosi il sistema verso uno regime stazionario con fluido a 180 °C.

Stesse considerazione valgono gli andamenti di **Figura 19** relativi la sezione di misura 4i.

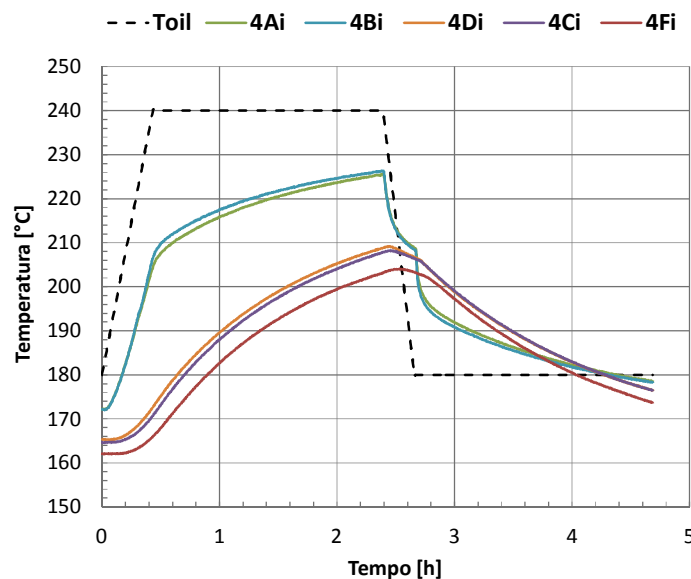


Figura 19- Ciclo-1 di carico e scarico 240-180 °C, evoluzione temporale delle temperature dell'olio in uscita dal riscaldatore e sul piping.

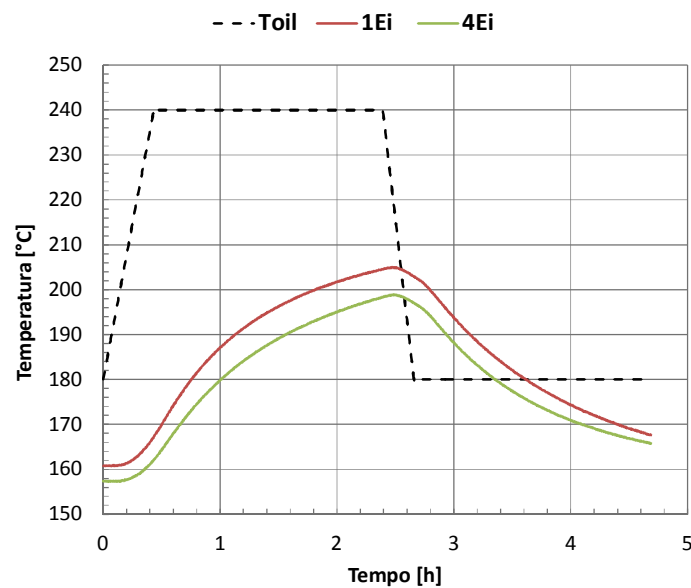


Figura 20- Ciclo-1 di carico e scarico 240-180 °C, evoluzione temporale delle temperature del corno caldo T1Ei e corno freddo T4Ei.

In **Figura 20** si riportano gli andamenti della temperatura di pelle in prossimità dell'ingresso del fluido (così detto corno caldo, termocoppia T1Ei) ed all'uscita (corno freddo, termocoppia T4Ei). Si nota che per le inerzie termiche in gioco la temperatura dopo 5 ore la temperatura in T4Ei è ancora inferiore a quella letta in T1Ei.

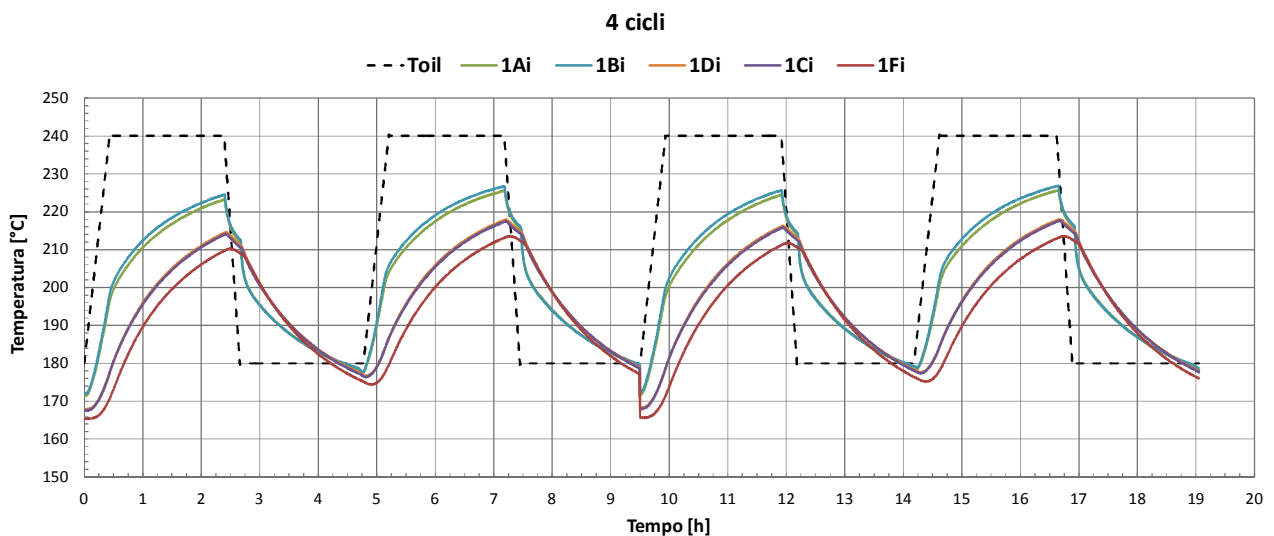


Figura 21- Involuppo dei quattro cicli carico e scarico 240-180 °C, per la sezione 1i.

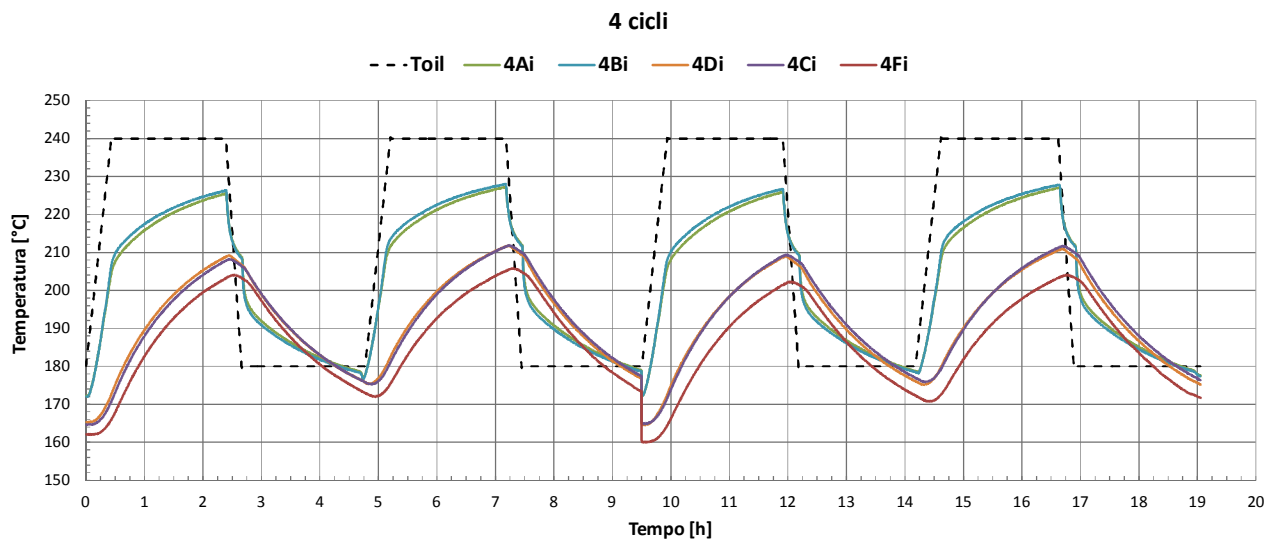


Figura 22- Involuppo dei quattro cicli carico e scarico 240-180 °C, per la sezione 4i.

Da **Figura 21** e **Figura 22** si conferma il corretto posizionamento delle termocoppie. Il picco relativo al secondo caricamento della giornata risulta leggermente più alto del primo non essendo ritornati completamente in condizioni stazionarie dopo il primo ciclo per poter effettuare due cicli al giorno. Non sono riscontrabili, dato il numero limitato di test al momento effettuati, variazioni nelle cinetiche di carico e scarico imputabili sia ad un degrado delle proprietà fisiche della miscela impiegata ne effetti di tipo termo-meccanico in grado di alterare la resistenza termica dell'elemento di accumulo

Raffreddamento senza circolazione olio degasaggio vs cicli

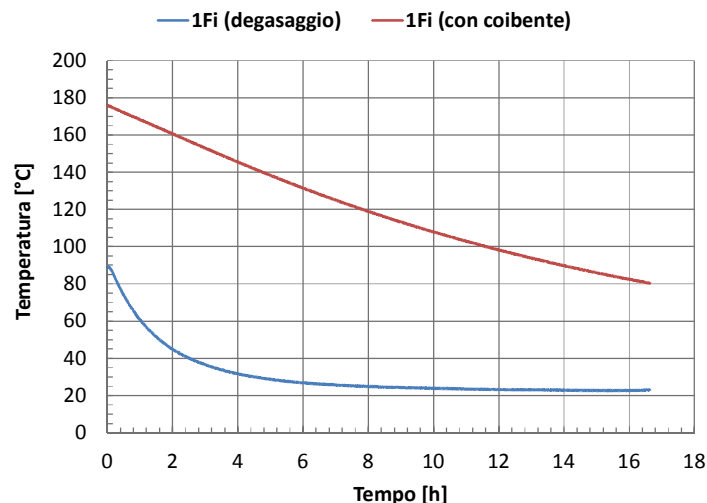


Figura 23- Comparazione degli andamenti di temperatura (T1Fi), a fine degasaggio e a fine ciclaggi.

Si riporta infine in **Figura 23** un confronto tra la dinamica di raffreddamento a elementi scoperti a fine test di degasaggio e a fine cicli di carico e scarico ad elementi coibentati, utile per la valutazione dei coefficienti di scambio equivalenti tra ambiente ed elementi di accumulo.

2.1.6 Risultati e conclusioni

Il comportamento termico rilevato dai profili di temperatura acquisiti e le indagini del quadro fessurativo rilevabile in superficie dopo il degasaggio, comparati con quanto ottenuto nella precedente campagna sperimentale (Solteca-1), mostrano l'efficacia della nuova miscela prodotta da UNITN. I test di ciclaggio dovranno però essere prolungati al fine di avere una maggior certezza nel comportamento di lungo periodo. Le tecniche di posizionamento delle termocoppie sono risultate più affidabili, così che i profili rilevati sono più correttamente interpretabili e confrontabili con i risultati provenienti da corrispondenti analisi condotte con strumenti numerici. La lavorabilità del calcestruzzo va migliorata, soprattutto nell'ottica di realizzare getti più massivi e complessi. Occorre considerare in parallelo ai test condotti con fluidi HTF, test con tecniche alternative di riscaldamento e refrigerazione (riscaldamento ad induzione e refrigerazione con aria compressa), al solo fine di consentire un invecchiamento accelerato degli elementi di accumulo. Occorre inoltre passare da test condotti su un singolo canale di accumulo, ad un modulo con capacità di accumulo più estese ed approfondire le modalità di integrazione di tali sistemi di accumulo all'interno di un impianto solare di piccola e media taglia.

2.2 Caratterizzazione sperimentale di elementi di accumulo a calore latente

2.2.1 Introduzione

La presente sezione è dedicata alla descrizione di tutte le fasi che sono necessarie al fine di arrivare alla caratterizzazione sperimentale degli elementi di accumulo a calore latente in studio all'interno del progetto B.1.3-L2 del PAR2013.

Qui di seguito sono descritte nel dettaglio le seguenti fasi:

- Realizzazione dei sistemi elementari di accumulo a calore latente del tipo “shell and tube” con e senza promozione della diffusività
- Realizzazione della sezione di prova per l'analisi dei sistemi elementari di accumulo realizzati
- Pianificazione delle prove da eseguire con riferimento alle operazioni di carico e scarico del sistema
- Esecuzione delle prove ed elaborazione, analisi e valutazione dei risultati sperimentali ottenuti

2.2.2 Realizzazione degli accumulatori elementari

I sistemi elementari di accumulo termico a calore latente sono stati analizzati, dimensionati e progettati in una fase precedente del lavoro, documentata in [2].

Sulla base di tali progetti è stata commissionata la loro realizzazione alla ditta Nuova Steim di Narni. Il numero complessivo di elementi di accumulo, di tipo “guscio e tubo”, è di 12 unità (Figura 24): 6 con tubo liscio e 6 con tubo alettati (Figura 25). Tutti gli elementi saranno opportunamente coibentati in modo da limitare al massimo le perdite di calore verso l'ambiente.



Figura 24- Accumulatori termici elementari prima della coibentazione



Figura 25- Tubo alettato utilizzato per la realizzazione degli elementi base di accumulo a calore latente

Due elementi per ciascuna tipologia presentano 9 ingressi per il posizionamento di altrettante termocoppie, suddivise su 3 piani (uno medio e due estremali) e 3 punti di misura (uno in prossimità del tubo, uno del guscio e uno intermedio).

Ad una estremità di ciascun elemento è stata realizzato un tappo rimovibile, attraverso il quale Enea provvederà ad inserire il mezzo di accumulo prescelto (Il PCM base – sali solari - o il PCM con nanoparticelle – NPs). In tal modo si realizzeranno quattro terne di elementi, da montare alternativamente sulla sezione di prova, secondo lo schema seguente:

Numero elementi di accumulo	Con PCM Base	Con PCM e NPS	Totale
Con tubo liscio	3	3	6
Con tubo alettato	3	3	6
Totale	6	6	12

Tabella 2 – Numero di elementi di accumulo realizzati suddivisi per tipologia

Tutti gli accumulatori saranno quindi opportunamente coibentati , secondo quanto previsto dalle specifiche di progetto, al fine di minimizzare la perdite di calore del sistema di accumulo.



Figura 26- Terza di accumulatori a calore latente con coibentazione e lamierino esterno

2.2.3 Realizzazione della sezione di prova

La sezione di prova per i sistemi elementari di accumulo termico a calore latente è stata anch'essa analizzata, dimensionata e progettata in una fase precedente, documentata in [2].

Sulla base di tale progetto sono stati acquistati, presso diversi fornitori, i componenti base necessari alla realizzazione della sezione di prova: tubazioni, valvole, connettori, flussimetro, gruppo di riscaldamento e raffreddamento, strutture di sostegno, coibente, etc. (Figura 27, Figura 28 e Figura 29).



Figura 27- Valvole (elettrovalvole, a globo, ..) e connessioni a compressione (tipo α -lock)



Figura 28- Gruppi di riscaldamento/raffreddamento e pompaggio dell'olio diatermico (Julabo)



Figura 29- Piping di connessione tra accumulatori con derivazione a T per valvole di sfiato e svuotamento

In una prima fase si è proceduto al riempimento degli accumulatori elementari con il mezzo di accumulo a cambiamento di fase (PCM) selezionato (Figura 30). Il PCM utilizzato è il “sale solare” ($\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ -67/33%wt) con un punto di inizio solidificazione di circa 239 °C (Tabella 3). Gli accumulatori elementari sono stati sottoposti a misura del peso sia prima che dopo il riempimento per determinare la quantità esatta di PCM da introdurre (Tabella 4): questa è risultata essere di circa 3 kg, come previsto dal progetto degli stessi.



Figura 30- Fasi di riempimento di due terne di accumulatori elementari coibentati contenenti PCM

Tabella 3 – Composizione del “sale solare” utilizzato per riempire gli accumulatori

	% peso	% mol	% peso equiv. come nitrati	% molare equiv. come nitrati	rapporto peso $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$
Na+	18.9	36.0	67.5	71.1	2.1
K+	13.0	14.6	32.5	28.9	
NO_2^-	1.5	1.4	-	-	-
NO_3^-	67.9	48.0	-	-	-

Tabella 4 – Misura del peso degli accumulatori

Peso (kg)	PCM base					
	Con tubo liscio			Con tubo alettato		
	AL01 *	AL02	AL03	AA01 *	AA02	AA03
A vuoto	11.0	8.7	8.8	11.5	9.8	10.0
Con Sali	13.9	11.7	11.8	14.0	12.7	12.8
Sali caricati	2.9	3.0	3.0	2.5	2.9	2.8

(*) il primo elemento (“01”) di ogni terna contiene dei pozzetti per termocoppie

Successivamente, si è proceduto al montaggio della sezione di prova ed alla verifica della sua funzionalità (prove di tenuta in aria e circolazione con olio). In Figura 31 sono mostrate, in sequenza, le varie fasi di assemblaggio.



Spazio vuoto destinato all'impianto



Montaggio della struttura di supporto



Montaggio degli accumulatori e delle tubazioni



Struttura completa

Figura 31- Fasi di assemblaggio della sezione di prova

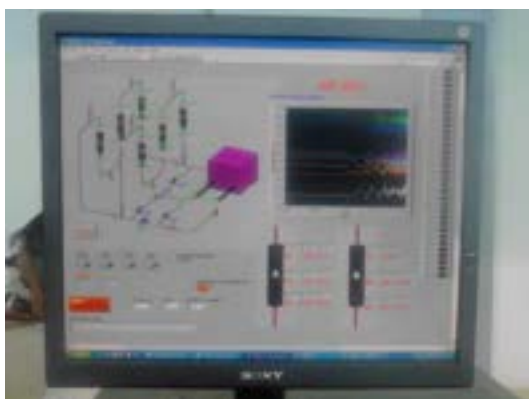


Figura 32- Predisposizione dell'interfaccia di controllo ed acquisizione dati (LabView).

2.2.4 Pianificazione delle prove sperimentali

2.2.4.1 Test n. 1: Caricamento iniziale (20°C – 200°C)

Obiettivo:

Portare il sistema a 3 elementi di accumulo (linea A o B) dalla temperatura ambiente a quella teorica di 200°C. Il calore trasmesso sarà accumulato come calore sensibile.

Programma operativo:

- Predisporre il sistema per la fase di “ricircolo”;
- Riscaldare l’olio a 200°C e circolare per 30 minuti al fine di pre-riscaldare la parte del circuito esterna alla sezione di prova;
- Predisporre il sistema per la fase di “carica”;
- Caricare il sistema, che inizialmente si trova a temperatura ambiente, utilizzando olio a circa 200°C per 5 ore.

2.2.4.2 Test n. 2: Fase di carico (200°C – 260°C)

Obiettivo:

Portare il sistema a 3 elementi di accumulo (linea A o B) dalla temperatura iniziale di 200°C a quella massima di 260°C. Il calore trasmesso sarà accumulato sia come calore sensibile che come calore latente.

Programma operativo:

- Predisporre il sistema per la fase di “ricircolo”;
- Riscaldare l’olio a 260°C e circolare per 30 minuti al fine di pre-riscaldare la parte del circuito esterna alla sezione di prova;
- Predisporre il sistema per la fase di “carica”;
- Caricare il sistema, che inizialmente si trova a 200°C, utilizzando olio a circa 260°C per 7 ore.

2.2.4.3 Test n. 3: Fase di scarico (260°C – 200°C)

Obiettivo:

Portare il sistema a 3 elementi di accumulo (linea A o B) dalla temperatura massima di 260°C iniziale a quella di 200°C. Il calore sarà recuperato sia come calore sensibile che come calore latente.

Programma operativo:

- Predisporre il sistema per la fase di “ricircolo”;
- Raffreddare l’olio a 200°C e circolare per 30 minuti al fine di pre-riscaldare la parte del circuito esterna alla sezione di prova;
- Predisporre il sistema per la fase di “scarica”;
- Scaricare il sistema, che inizialmente si trova a 260°C, utilizzando olio a circa 200°C per 7 ore.

2.2.4.4 Test n. 4: Ciclo carico-scarico giornaliero

Obiettivo:

Esecuzione di un ciclo completo giornaliero partendo dalla temperatura iniziale di 200°C, arrivando e mantenendo la temperatura massima di 260°C e ritornando alla temperatura iniziale.

Programma operativo:

- Predisporre il sistema per la fase di “ricircolo”;
- Riscaldare l’olio a 260°C e circolare per 30 minuti al fine di pre-riscaldare la parte del circuito esterna alla sezione di prova;
- Predisporre il sistema per la fase di “carica”;
- Caricare il sistema, che inizialmente si trova a 200°C, utilizzando olio a circa 260°C per 8 ore.
- Raffreddare l’olio a 200°C e circolare per 30 minuti al fine di pre-riscaldare la parte del circuito esterna alla sezione di prova;
- Predisporre il sistema per la fase di “scarica”;
- Scaricare il sistema, che inizialmente si trova a 260°C, utilizzando olio a circa 200°C per per 8 ore ore.

2.2.5 Risultati

Qui di seguito sono riportati la lista delle prove sperimentali eseguite e da eseguire nel prossimo futuro (Tabella 5) ed i relativi risultati.

Test nr.	PCM Base		PCM e nanoparticelle	
	Tubo liscio	Tubo alettato	Tubo liscio	Tubo alettato
1	Si	No	No	No
2	Si	No	No	No
3	No	No	No	No
4	No	No	No	No

Tabella 5 – Sommario delle prove eseguite

L'impianto è stato predisposto per la circolazione relativa alla linea A (Accumulatori a tubi lisci). E' stato programmato un unico test che, in sequenza esegue sia il riscaldamento iniziale (Test nr. 1) che la fase di carica del sistema di accumulo (Test nr. 2). Il test è stato effettuato sostituendo le previste fasi di riscaldamento in ricircolo con un riscaldamento con circolazione attiva sul sistema di accumulo. Ciò per evitare, in questa prima esperienza, un possibile shock termico dei componenti.

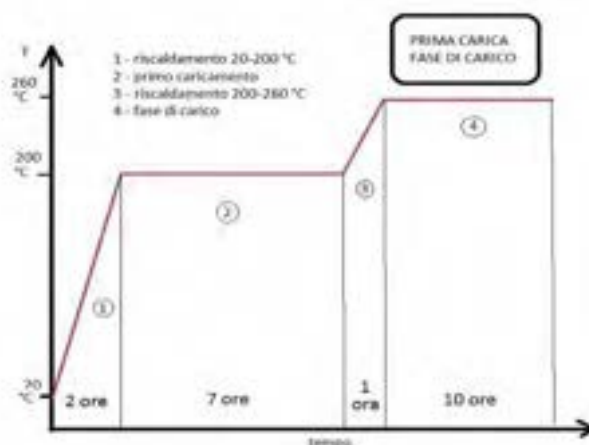


Figura 33- Predisposizione dell'interfaccia di controllo ed acquisizione dati (LabView).

Per il test di caricamento iniziale (20°C – 200°C) è prevista una durata complessiva di 9 ore mentre quello relativo alla fase di carico (200°C – 260°C) di 11 ore.

La prova reale effettuata ha avuto una durata di circa 18.5 ore come mostrato in [Figura 34](#), dove sono mostrate le temperatura di mandata (C2) e di ritorno (C1) dell'olio e la potenza termica calcolata fornita dal termo-criostato. Naturalmente, il calcolo della potenza riportata è funzione della portata in massa del sistema. Questo dato purtroppo non è al momento disponibile in quanto il flussimetro installato, per motivi tecnici, non ha potuto fornire detta misura.

Per poter comunque fare delle valutazioni, si è tenuto conto che il termo-criostato dovrebbe fornire una portata volumetrica sostanzialmente costante, negli intervalli di temperatura considerati, e pari a circa 10 litri/min. Con le caratteristiche della nostra sezione di prova ciò dovrebbe corrispondere ad una velocità dell'olio di circa 1.08 m/s. La portata in massa sarà allora calcolata conoscendo la densità dell'olio diatermico in funzione della temperatura dello stesso (vedi [Figura 35](#)).

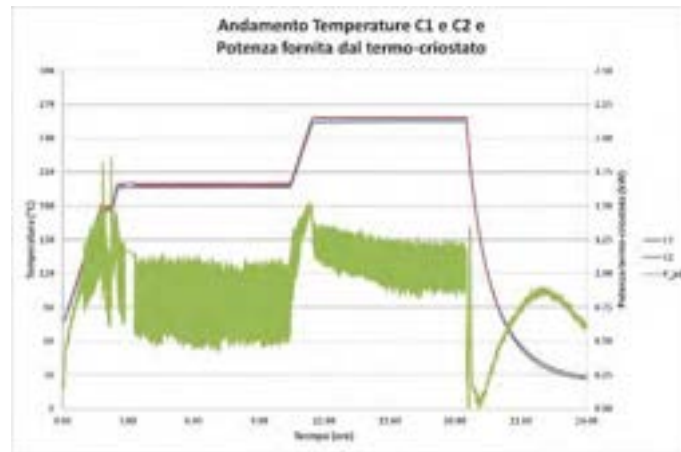


Figura 34- Andamento delle temperature di mandata e ritorno dal tremo-criostato e potenza fornita dallo stesso.

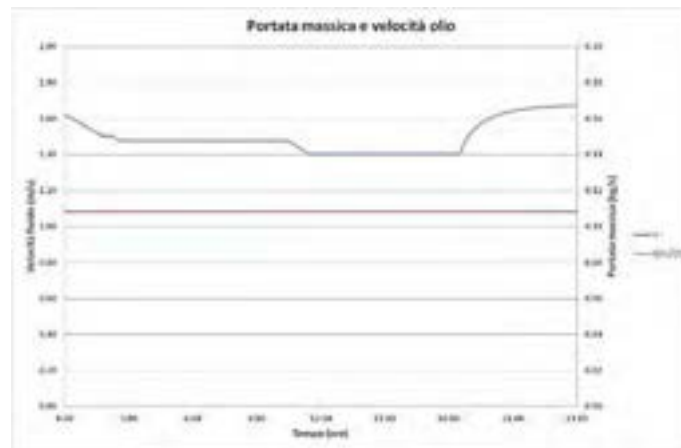


Figura 35- Andamento velocità dell'olio diatermico e della portata massica del sistema.

A partire da questo dato è allora possibile valutare i parametri principali che governano il flusso del fluido termovettore (numero di Reynolds - Re) e lo scambio termico tra olio e accumulatore (coefficiente di scambio - h) (Figura 36).

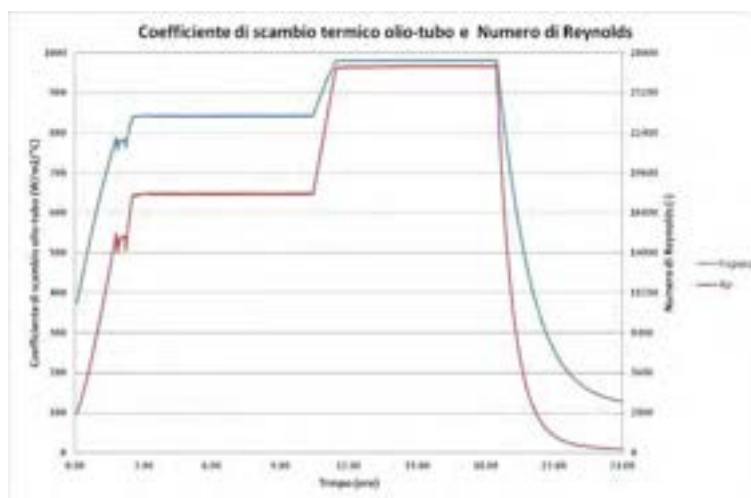


Figura 36- Andamento del numero di Reynolds e del coefficiente di scambio termico olio-tubo

Tali valori mostrano che, ad eccezione dei primi istanti di riscaldamento, il flusso dell'olio ha un Reynolds superiore a 18000 e quindi il flusso è completamente turbolento. Di conseguenza, anche lo scambio termico è buono, con un coefficiente compreso tra 850 e 100 $W/m^2/^\circ C$.

In Figura 37 è riportato l'andamento della temperatura sulla parete esterna del sistema di accumulo coibentato, la temperatura ambiente e l'energia termica dispersa verso l'ambiente (perdite). Non essendo, al momento, disponibile una misura diretta della T_{ambiente} , questa è stata supposta uguale e pari a circa 25°C. Le perdite riscontrate sono modeste e si attestano su valori inferiori ai 70 W per elemento (circa 0.2 kW totali).

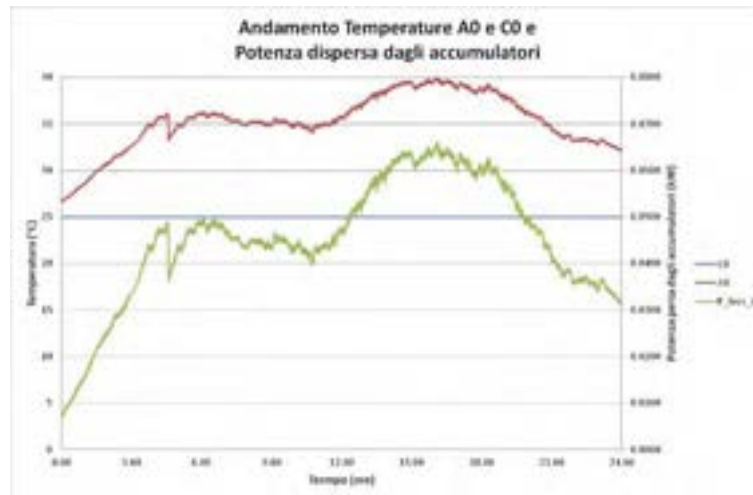


Figura 37- Andamento della temperatura ambiente (C0), di quella esterna agli accumulatori (A0) e delle perdite verso l'ambiente.

La Figura 38 riporta l'andamento delle temperature di ingresso ed uscita dai tre accumulatori. Rispettivamente: A1 e A4 per il primo, A5 e A2 per il secondo e A3 ed A6 per il terzo. I salti termici che si evidenziano sono minimi (inferiori al grado) e quindi difficilmente visualizzabili. E', invece, più visibile la riduzione delle temperature nel passaggio tra un accumulatore e l'altro.

Le temperature misurate all'interno del primo accumulatore sono riportate in Figura 39. Queste sono suddivise su tre livelli nel modo seguente: A7, A8 e A9 in vicinanza del tubo, A13, A14 e A15 in vicinanza del guscio e A10, A11 ed A12 in una posizione intermedia.

In Figura 40 è possibile notare come la temperatura media misurata nel PCM sia molto inferiore rispetto quella dell'olio. Ciò testimonia una certa difficoltà nel trasporto del calore verso l'interno del sistema di accumulo. Ulteriore testimonianza di ciò è l'andamento del salto termico dell'olio agli accumulatori che risulta essere di circa 1.5°C (ovvero 0.5 °C per accumulatore).

Stesso tipo di valutazione si ottiene analizzando la Figura 41 dove sono mostrati gli andamenti della temperatura all'ingresso degli accumulatori e della temperatura media del PCM. Da questi dati si evidenzia come la temperatura del PCM salga oltre la soglia di fusione (circa 240°C) solo di poco e, quindi, non riesca a sfruttare completamente il materiale a disposizione.

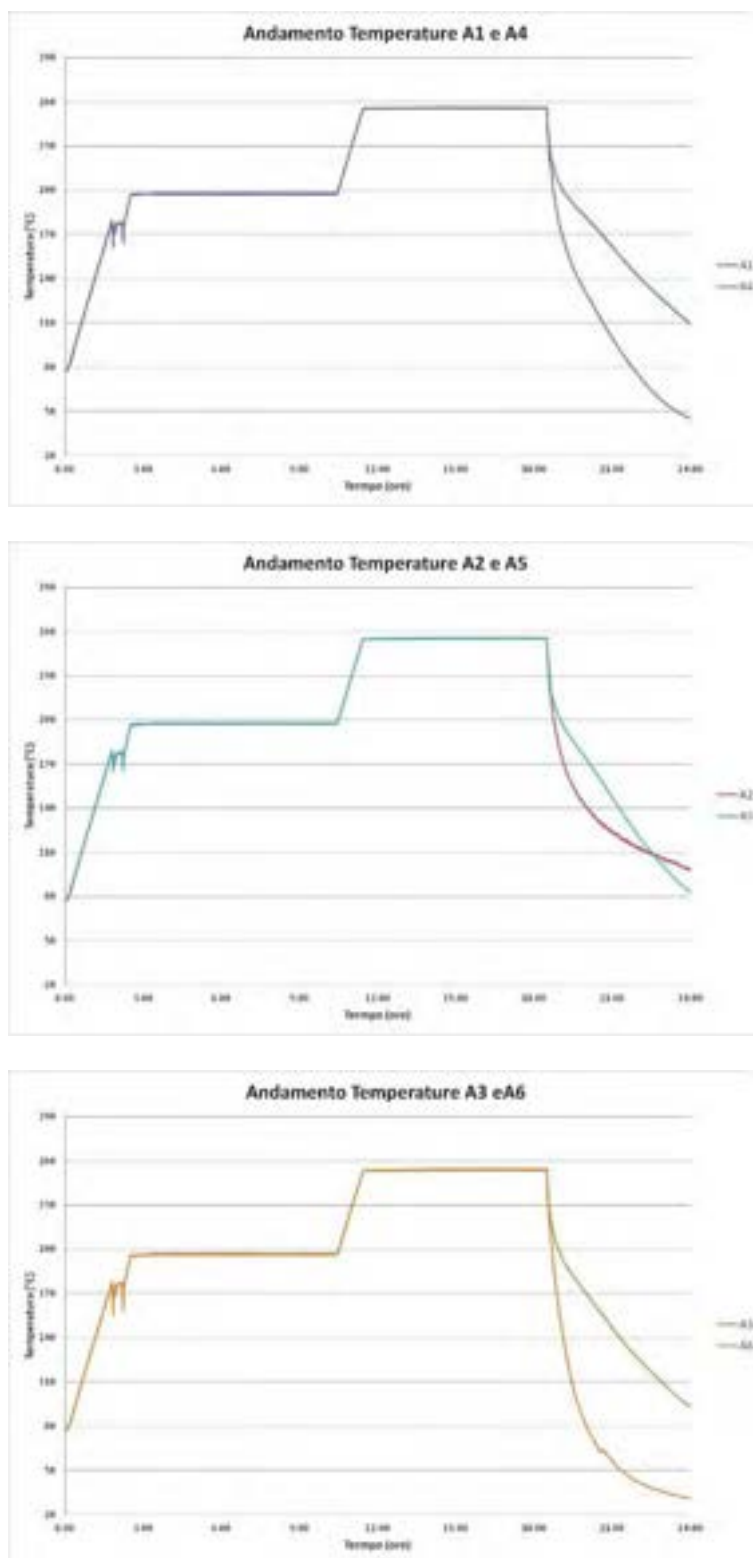


Figura 38- Andamento delle temperature di ingresso ed uscita dai tre accumulatori (rispettivamente A1 e A4 per il primo, A5 e A2 per il secondo e A3 ed A6 per il terzo)

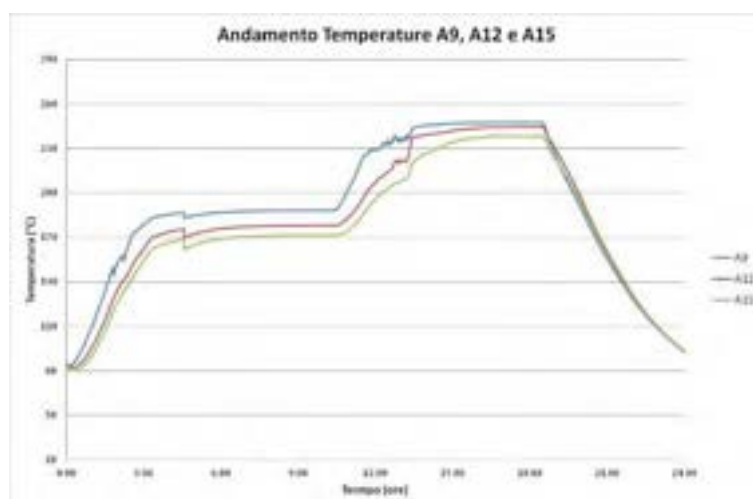
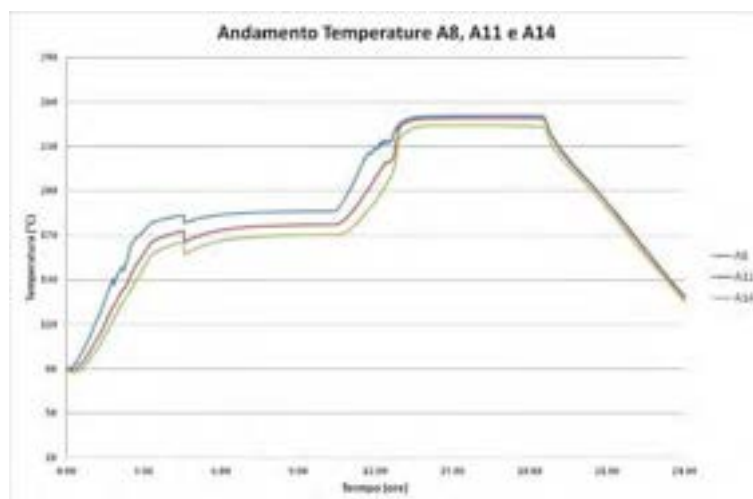
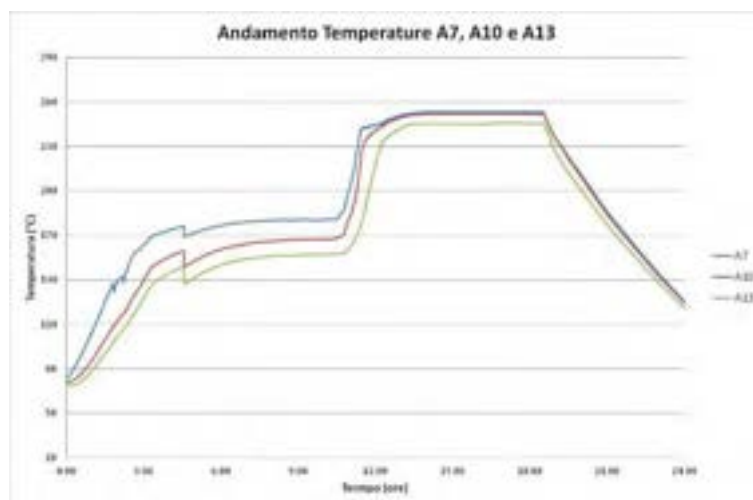


Figura 39- Andamento delle temperature su tre livelli di misura per il primo accumulatore (A7, A8 e A9 vicino al tubo, A13 e A44 e A15 vicino al guscio e A10, A11 ed A12 in posizione intermedia)

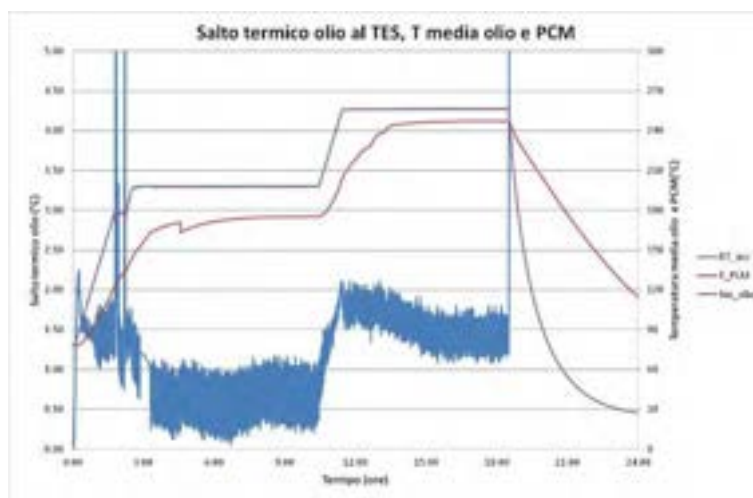


Figura 40- Andamento del salto termico dell'olio agli accumulatori, della sua temperatura media e della temperatura media del PCM

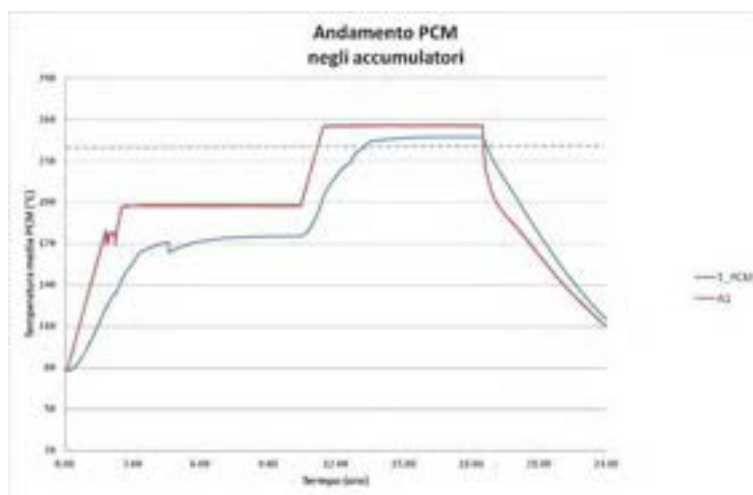


Figura 41- Andamento della temperatura all'ingresso degli accumulatori e della temperatura media del PCM

3 Discussione e conclusioni

Scopo del presente lavoro era quello di analizzare per via sperimentale una serie di elementi base di accumuli sia a calore sensibile (cementi) che a calore latente (PCM) utili per temperature operative di circa 200-250°C.

In entrambi i casi il lavoro fatto ha riguardato: la realizzazione dei sistemi elementari di accumulo, la realizzazione o adeguamento della sezione di prova per l'analisi dei sistemi di accumulo, la pianificazione delle prove da eseguire, l'esecuzione delle prove e l'elaborazione, l'analisi e la valutazione dei risultati sperimentali.

Per quanto riguarda l'accumulo termico a calore sensibile in cementi appositamente sviluppati si è utilizzato un impianto sperimentale (Solteca) già presente in Enea ed opportunamente modificato per accettare degli elementi di accumulo prodotti da UNITN con una nuova miscola di cemento. Il comportamento termico rilevato dai profili di temperatura acquisiti e le indagini del quadro fessurativo rilevabile in superficie dopo il degasaggio, comparati con quanto ottenuto nella precedente campagna sperimentale (Solteca-1), mostrano l'efficacia della nuova miscola prodotta. I test di ciclaggio dovranno però essere prolungati al fine di avere una maggior certezza nel comportamento di lungo periodo.

Nel caso, invece, dell'accumulo termico a calore latente è stato necessario realizzare ex-novo sia gli elementi di accumulo, utilizzando i "sali solari" come mezzo di accumulo (PCM), sia la sezione di prova. Ciò, purtroppo, ha portato ad una serie di ritardi, legati alla formulazione delle offerte, alla fornitura dei materiali ed alle limitate risorse economiche e di personale, che hanno di fatto impedito la completa conduzione della campagna sperimentale nei tempi previsti.

Gli elementi di accumulo sono stati realizzati e riempiti (i primi 6) con il PCM base. La sezione di prova è stata installata, attrezzata con gli strumenti di misura e controllo necessari, sottoposta a prove di tenuta in aria a 3 bar, riempita con olio diatermico che è stato fatto circolare a bassa temperatura (100°C) per verificare la funzionalità dell'impianto.

Una prima fase di prova, dedicata principalmente alla verifica funzionale dell'impianto ed alla analisi del comportamento del sistema di accumulo attraverso i suoi principali parametri, è stata condotta utilizzando la terna di accumulatori a tubo liscio e eseguendo i test relativi al primo riscaldamento e alla fase di carico.

I risultati ottenuti sono sostanzialmente in linea con quelli attesi. Per poter arrivare a dati più completi e per poter eseguire dei bilanci energetici più attendibile è necessario completare l'acquisizione con le misure di portata e temperatura ambiente.

Una volta messa a punto la campagna sperimentale con gli accumulatori a tubi lisci, si potrà valutare l'influenza di eventuali alettature e dell'inserimenti di nanocariche nel PCM sulle prestazioni del sistema provando le altre tre terne di accumulatori a disposizione. Questa sarà la principale attività che sarà svolta nel PAR2015.

4 Riferimenti bibliografici

1. ENEA – Report RdS/PAR2013/226 – “Selezione e caratterizzazione di una miscela di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle per lo sviluppo di un sistema di accumulo termico nell’intervallo di temperatura 200-250°C”, A. Miliozzi, E. Veca
2. ENEA – Report RdS/PAR2013/228 – “Simulazione del comportamento termo-dinamico di un elemento base di accumulo a calore latente e sua progettazione”, A. Miliozzi, G.M. Giannuzzi, R. Liberatore, E. Giovannini A. Miliozzi, E. Veca
3. ENEA – Report RdS/2013/079 – “Individuazione e caratterizzazione di miscele di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle, da impiegare come sistemi alternativi di accumulo termico”, A. Miliozzi, E. Veca, S. Sau
4. Università di Perugia – Report RdS/2013/081 – “Studio e sviluppo di un mezzo di accumulo termico a calore latente a media temperatura costituito da una miscela di sali e nanoparticelle”, Josè Maria Kenny, Manila Chieruzzi
5. ENEA – Report UTRINN/2012/14 - “Realizzazione di un impianto da laboratorio per valutare l’accumulo termico e la resistenza termo-meccanica di materiali in calcestruzzo”, G.M. Giannuzzi, R. Liberatore, D. Mele.
6. ENEA – Report UTRINN/2012/17 - “Studio ed analisi di sistemi di accumulo termico in materiali cementizi per impianti solari a concentrazione di piccola taglia”, G.M. Giannuzzi, D. Mele.
7. ENEA – Report UTRINN/2013/09 - “Analisi delle prove sperimentali atte a valutare l’accumulo termico e la resistenza termo-macchanica di materiali in calcestruzzo”, G.M. Giannuzzi, T. Crescenzi, R. Liberatore, A. Tati, D. Mele.
8. Materials and Design 51 (2013) 989-997 – “Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems”, O. B. Ozger, F. Girardi, G.M. Giannuzzi, V.A. Salomoni, C. E. Majorana, L. Fambri, N. Baldassino, R. Di Maggio.
9. Solar Energy 103 (2014) 303-315 – “Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants. V.A. Salomoni, C. E. Majorana, G.M. Giannuzzi, A. Miliozzi, R. Di Maggio, F. Girardi, D. Mele, M. Lucentini.

5 Abbreviazioni ed acronimi

CSP	Potenza solare concentrata (Concentrating Solar Power)
TES	Accumulo energia termica (Thermal Energy Storage)
PCM	Materiali a cambiamento di fase (Phase Change Materials)
PAR	Piano Annuale di Ricerca
FEM	Metodo agli elementi Finiti (Finite Element Method)
CFD	Fluido-dinamica Computazionale (Computational Fluid Dynamics)
LCOE	Costo livellato dell'energia (Levelized Cost Of Energy)
LHTES	Accumulo energia termica a calore latente (Latent Heat Thermal Energy Storage)