



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi sperimentale e numerica del comportamento termodinamico di sistemi di accumulo a calore sensibile in materiali cementizi

G.M. Giannuzzi, E. Giovannini, R. Liberatore, D. Mazzei, D. Mele,
T. Crescenzi

Report RdS/PAR2014/118

PROVE SPERIMENTALI E SIMULAZIONE DEL COMPORTAMENTO TERMO-DINAMICO DI UN SISTEMA DI
ACCUMULO TERMICO A CALORE SENSIBILE IN CEMENTO

G.M. Giannuzzi, E. Giovannini, R. Liberatore, D. Mazzei, D. Mele, T. Crescenzi (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Energia elettrica da fonte solare

Obiettivo: Studio di configurazioni impiantistiche alternative

Responsabile del Progetto: Domenico Mazzei, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 DESCRIZIONE DEI MATERIALI UTILIZZATI.....	6
2.1.1 <i>Fluido termovettore</i>	6
2.1.2 <i>Materiale cementizio del modulo UNITN-CESTARO</i>	8
2.1.3 <i>Materiale cementizio del modulo UNIPD- ITALCEMENTI</i>	8
2.2 PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO SOLTECA3	8
2.3 SISTEMA DI ACQUISIZIONE.....	12
2.4 PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DEI MODULI DI ACCUMULO.....	14
2.5 SVILUPPO E APPLICAZIONE DI UN MODELLO NUMERICO DEL COMPORTAMENTO TERMODINAMICO DEL MODULO DI ACCUMULO. .	18
2.6 ANALISI SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO TERMODINAMICO DEI SISTEMI DI ACCUMULO CEMENTIZI	20
2.6.1 <i>Degasaggio dei campioni di materiale cementizio</i>	20
2.6.2 <i>Degasaggio modulo UNIPD-ITALCEMENTI</i>	20
2.6.3 <i>Degasaggio modulo UNITN-CESTARO</i>	25
2.7 CONFRONTO COMPORTAMENTO DEI DUE MODULI NEL TEST DI DEGASAGGIO	29
2.8 PROVA DI RISCALDAMENTO E GRADUALE RAFFREDDAMENTO DEL MODULO ITALCEMENTI-UNIPD	35
2.9 CONFRONTO COMPORTAMENTO DEI DUE MODULI NEL TEST DI RISCALDAMENTO E GRADUALE RAFFREDDAMENTO.....	41
3 CONCLUSIONI	42
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	44

Sommario

Nell'ambito del PAR 2013 è stata condotta una campagna di ricerca su semplici elementi di accumulo in calcestruzzo a scala di laboratorio. Utilizzando i risultati ottenuti, è stato sviluppato e testato un nuovo prototipo di modulo di accumulo di calore di maggiori dimensioni e con struttura simile a quella prevista per applicazioni industriali. In particolare sono stati realizzati due moduli impiegando per ciascuno miscele differenti di calcestruzzo, uno sviluppato autonomamente da CTG Italcementi Group in precedenti proprie attività di ricerca, l'altro sviluppato dall'Università di Trento (UNITN) nell'ambito del PAR 2013. I due moduli sono stati rispettivamente realizzati presso lo stabilimento CTG Italcementi Group di Calusco d'Adda (BG) in collaborazione con l'Università di Padova (UNIPD) () e presso lo stabilimento della ditta Cestaro a Preganziol (TV). Essi hanno stesse dimensioni geometriche ed identico layout del piping. Quest'ultimo è stato inserito all'interno della matrice cementizia che funge da scambiatore per il trasferimento del calore nella fase di caricamento e per la sua asportazione nella fase di scaricamento. Il piping convoglia un fluido termovettore con caratteristiche ecocompatibili ed adatto a temperature di esercizio fino a 300 °C. Per la sperimentazione è stato realizzato un circuito apposito in grado di operare alle temperature attese, completo dei sistemi necessari alla circolazione, al riscaldamento ed alla refrigerazione del fluido termovettore con potenza termica massima di circa 25 kW. Tutta l'attività sperimentale è stata effettuata direttamente dall'ENEA presso i propri laboratori del C.R. Casaccia.

La sperimentazione è stata altresì affiancata da un'attività di simulazione numerica, svolta prevalentemente dall'Università di Padova, mediante la quale sono stati messi a punto opportuni modelli di calcolo al fine di analizzare il comportamento termico del modulo e di evidenziare eventuali criticità e degrado funzionale e/o strutturale dei moduli stessi. Questo documento riporta l'analisi sperimentale del comportamento dei due materiali cementizi e una descrizione della progettazione e realizzazione dell'impianto, denominato Solteca3, che è stato ideato per effettuare la sperimentazione stessa. La sperimentazione della fase di degasaggio non ha evidenziato scostamenti significativi nelle temperature rilevate dalle termocoppie, tuttavia quelle sul modulo UNIPD-ITALCEMENTI risultano più basse e ciò in concomitanza con l'incremento del gocciolamento a seguito della fuoriuscita dell'acqua libera presente nel calcestruzzo.

In ogni caso, assumendo che in entrambe i casi la portata massica sia eguale, ciò è indice di una maggior dispersione.

Alla fine della fase di mantenimento a 280 °C, il modulo UNIPD-ITALCEMENTI ha evidenziato una maggiore differenza tra le temperature delle termocoppie interne e quelle più esterne di circa 4 °C rispetto al modulo UNITN-CESTARO, che può imputarsi alla maggiore conducibilità termica del calcestruzzo a parità di flusso termico.

L'olio diatermico utilizzato (Paratherm NF) si è rivelato adatto agli scopi della sperimentazione, per le sue caratteristiche di non tossicità e bassa tensione di vapore, anche alle più alte temperature operative; occorre tuttavia sottolineare la marcata variazione di viscosità che avviene intorno ai 60 °C, per poi continuare a diminuire in maniera graduale e meno ingente. Quest'aspetto, unito alla variazione di densità, determina un cambiamento di velocità a parità di portata massica, della quale occorre tener conto nelle simulazioni.

Si sono infine valutate le caratteristiche meccaniche dei due elementi di accumulo e di due provini cilindrici aggiuntivi, forniti da UNITN, mediante l'impiego degli ultrasuoni. I test sono stati condotti con l'utilizzo di un apparecchio ultrasonoro Siro RP 5000 CSD, presso il Laboratorio di Analisi non Distruttive, SSPT-USER-SITEC, dell'ENEA, sul materiale non trattato termicamente.

Il comportamento termico meccanico di entrambi i moduli si è rivelato più che soddisfacente confrontato con quanto sperimentato in altre ricerche a livello internazionale ([R 1], [R 2], [R 3]). Allo stato attuale la miscela prodotta da UNITN presenta una maggior capacità termica e resistenza meccanica. Va altresì detto che la miscela CTG-Italcementi Group, è stata realizzata adattando un prodotto commerciale per la realizzazione di massetti per pavimenti radianti e quindi presenta ampi margini di miglioramento. La miscela sviluppata da UNITN invece è frutto di tre anni di sperimentazione mirata.

1 Introduzione

Nell'ambito dello sviluppo di soluzioni alternative di accumulo termico, l'attività di ricerca è stata orientata allo studio di soluzioni più compatte a calore sensibile che utilizzano come mezzo di accumulo un materiale inerte (es. cementi o materiale ceramico).

L'utilizzo del calcestruzzo come mezzo di accumulo termico è nato dall'esperienza che l'ENEA ha maturato negli anni in attività di ricerca sul comportamento strutturale del calcestruzzo sottoposto ad elevate temperature in condizioni incidentali sia in ambito nucleare che civile. La scelta di questo materiale nasce inoltre da una somma di considerazioni: è un materiale a basso costo, facilmente reperibile, facile da produrre, durevole, i suoi ingredienti principali sono disponibili ovunque, e i suoi componenti non pongono problemi critici dal punto di vista ambientale. Inoltre grazie al suo calore specifico, alle proprietà meccaniche, quali la resistenza a compressione e ad un coefficiente di espansione termica simile a quello dei tubi d'acciaio dello scambiatore, garantisce un'elevata resistenza meccanica alle sollecitazioni termiche cicliche già nella formulazione ordinaria.

Attività preliminari sull'utilizzo del calcestruzzo come mezzo di accumulo termico sono state già condotte da ENEA insieme ad altri partner, all'interno di un progetto finanziato dalla Cassa di Risparmio di Trento e Rovereto [R 7] e [R 8].

Per quanto riguarda l'utilizzo del calcestruzzo come mezzo di accumulo termico e la sua integrazione in impianti solari a concentrazione molti studi sperimentali e valutazioni sono stati condotti presso il DLR ([R 1], [R 4]), il NEST SA [R 5] e l'Università dell'Arkansas [R 6].

In Figura 1 è mostrata una possibile integrazione di un sistema di accumulo in materiale cementizio, TES (Thermal Energy Storage) in un impianto CSP per la produzione di energia elettrica tramite un'unità ORC (Organic Rankine Cycle).

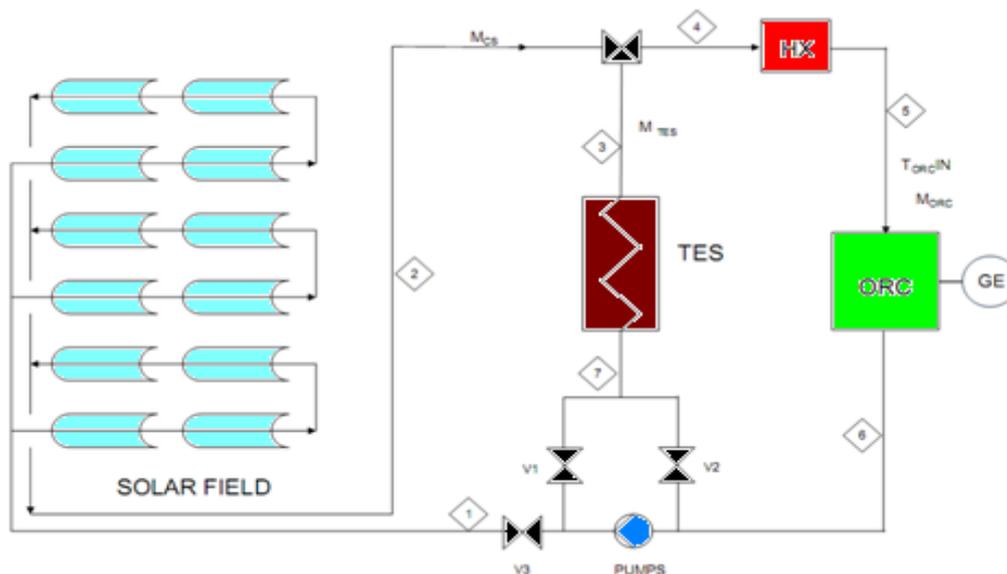


Figura 1: Schema di integrazione del sistema di accumulo con materiale cementizio in un impianto CSP.

Il TES si può immaginare costituito da più linee in parallelo, ciascuna delle quali racchiude moduli cementizi disposti in serie (Figura 2). Il numero delle unità in serie ed in parallelo è funzione della capacità di accumulo richiesta.

Obiettivo principale del presente lavoro è stata la verifica sperimentale del comportamento termodinamico di diversi tipi di materiali cementizi utilizzati come sistemi di accumulo a calore sensibile.

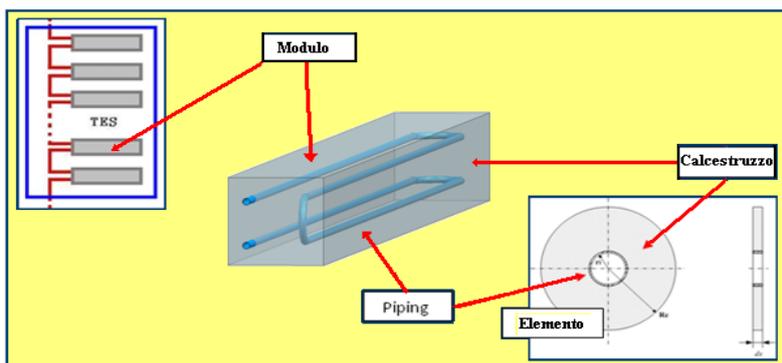


Figura 2: layout dei costituenti di base del sistema di accumulo con materiale cementizio per CSP.

In particolare sono stati realizzati due moduli impiegando per ciascuno miscele differenti di calcestruzzo, uno sviluppato dall'Università di Trento (RdS/PAR2014/119) nell'ambito del PAR 2013, l'altro sviluppato dall'Italcementi (RdS/PAR2014/120) in precedenti proprie attività di ricerca. I due moduli hanno stesse dimensioni geometriche ed identico layout delle tubazioni che sono state inserite all'interno della matrice cementizia e che fungono da scambiatore per il trasferimento del calore nella fase di caricamento e per la sua asportazione nella fase di scaricamento.

Ogni blocco cementizio è un parallelepipedo avente una sezione quadrata (200x200 mm) ed una lunghezza di 3 m. I blocchi di calcestruzzo (Figura 1) sono stati ricoperti di materiale isolante, lana ceramica+lana di roccia, in modo da limitare le perdite di calore. Il coibente è stato poi rivestito di alluminio per evitare spargimenti di coibente nell'ambiente. Per l'effettuazione delle prove è stato progettato e realizzato un circuito sperimentale

Per la sperimentazione è stato realizzato un apposito circuito, denominato Solteca3, in grado di operare alle temperature attese, completo dei sistemi necessari alla circolazione, al riscaldamento ed alla refrigerazione del fluido termo-vettore con potenza termica massima di circa 25 kW.

Tutta l'attività sperimentale è stata effettuata dai tecnici ENEA presso i laboratori del C.R. Casaccia. Essa è stata altresì affiancata da un'attività di simulazione numerica, svolta prevalentemente dall'Università di Padova (RdS/PAR2014/120), mediante la quale sono stati messi a punto opportuni modelli di calcolo al fine di analizzare il comportamento termico del modulo e di evidenziare eventuali criticità e degrado funzionale e/o strutturale dei moduli stessi.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Descrizione dei materiali utilizzati

2.1.1 Fluido termovettore

Allo scopo di riscaldare il materiale di accumulo cementizio in fase di caricamento e di raffreddarlo in fase di scaricamento è stato scelto come fluido termovettore il Paratherm NF, per le seguenti caratteristiche:

- ✓ range di temperatura operativo adeguato agli scopi: 36-316 °C, con temperatura di ebollizione a 371 °C.
- ✓ bassa viscosità alle temperature di interesse: 44 cP a temperatura ambiente, 3 cP a 100 °C, 1,6 cP a 300 °C (Figura 6). Questi valori di viscosità hanno permesso il regolare avviamento del sistema di circolazione anche a temperatura ambiente e il raggiungimento delle condizioni di moto turbolento anche a basse velocità (a 300 °C anche < 0,5 m/s).
- ✓ tensione di vapore molto bassa anche a 300 °C (0,11 bar), mentre è trascurabile sotto i 200 °C. In questo modo è stato possibile progettare l'impianto di circolazione senza la necessità di dover svolgere le prove in pressione, garantendo una maggiore sicurezza per l'utente.
- ✓ caratteristiche di scarsa tossicità, è infatti indicato nell'industria alimentare.

Di seguito sono riportati i grafici delle principali proprietà termofisiche: conducibilità termica (Figura 3), capacità termica (Figura 4), densità (Figura 5) e viscosità (Figura 6).

Tali caratteristiche hanno permesso anche il degasaggio dei materiali cementizi, durante il quale i materiali di accumulo termico sono stati portati a temperature superiori a 100 °C, facendo circolare il fluido da 20 a 160 °C (par. 2.6.1).

Conducibilità termica

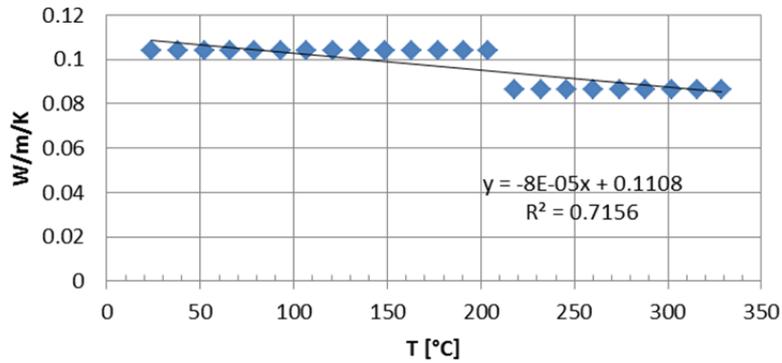


Figura 3: grafico della conducibilità termica in funzione della temperatura.

Capacità termica

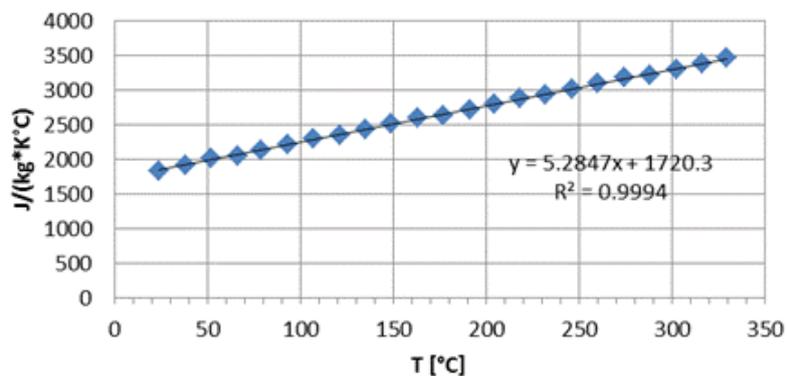


Figura 4: grafico della capacità termica in funzione della temperatura.

Densità

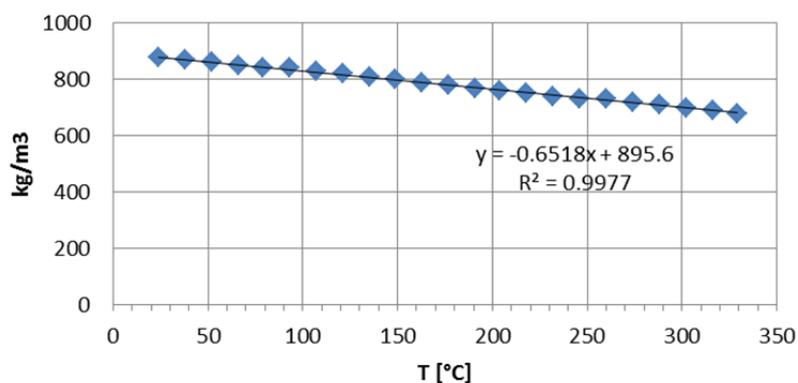


Figura 5: grafico della densità in funzione della temperatura.

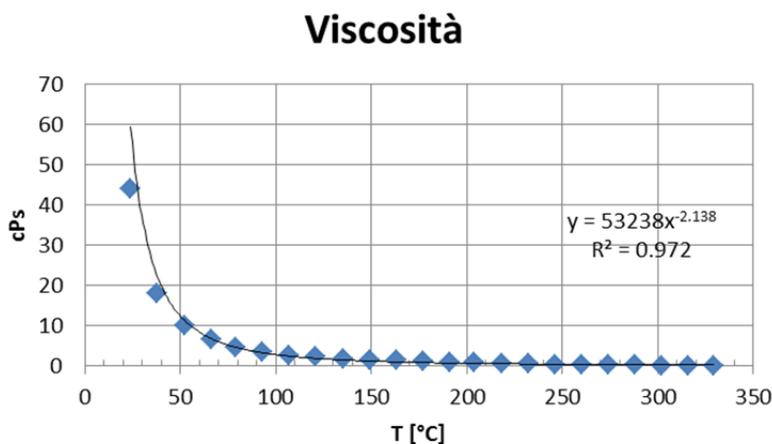


Figura 6: grafico della viscosità in funzione della temperatura.

2.1.2 Materiale cementizio del modulo UNITN-CESTARO

Le caratteristiche termiche e meccanica del calcestruzzo impiegato nel modulo UNITN-CESTARO sono descritte in RdS/PAR2014/119.

2.1.3 Materiale cementizio del modulo UNIPD- ITALCEMENTI

Le caratteristiche termiche e meccanica del calcestruzzo impiegato nel modulo UNIPD-ITALCEMENTI sono descritte in RdS/PAR2014/120.

2.2 Progettazione e realizzazione dell'impianto Solteca3

Per la sperimentazione è stato realizzato un apposito circuito, denominato Solteca3, in grado di operare alle temperature attese, completo dei sistemi necessari alla circolazione, al riscaldamento ed alla refrigerazione del fluido termo-vettore con potenza termica massima di circa 25 kW.

L'impianto è stato concepito per riscaldare e raffreddare un'unità di accumulo (o più di una in serie) alle temperature e alle portate richieste dall'utente.

Il circuito è stato progettato per operare con un fluido diatermico alle temperature operative di 120 °C e 300°C e alla pressione massima di 1,45 ata ed è stato realizzato in acciaio.

Nell'impianto sono presenti due circuiti separati, relativi rispettivamente al riscaldamento e al raffreddamento del fluido termovettore.

Il circuito di riscaldamento comprende:

- riscaldatore (R1) con resistenze elettriche corazzate controllate mediante termoregolatore PID di tipo "in linea" con potenza nominale di 25 kW ed in grado di riscaldare il fluido fino a 315 °C. Esso è posto a valle della pompa di circolazione del fluido termico e a monte del flussimetro. Il valore della temperatura di set-point è fornito in input sia in locale che in remoto mediante SW LabView;
- serbatoio (S1) in acciaio al carbonio del volume di 50 litri operante alla pressione massima di 1,45 ata con controllo di livello e valvola di sicurezza per alta pressione e di indicatore di pressione (PI1). S1 ha nella parte superiore una tubazione dotata di valvola di intercettazione per consentire il caricamento dell'olio. Tale serbatoio funge anche da vaso di espansione;
- pompa di circolazione, in acciaio AISI 316, azionata da inverter comandato da loop PID per il controllo della portata; sul circuito, a valle della pompa è presente un manometro di indicazione della pressione in mandata (PI2).

- Misuratore/indicatore di portata per il controllo della portata stessa, adatto per olio diatermico, con segnale in uscita 4..20 mA;
- valvola manuale (V1) per il controllo della portata e misuratore/indicatore di portata (F1) adatto per l'olio diatermico;
- strumentazione necessaria al monitoraggio e al funzionamento del sistema con quadro in locale (Figura 7) e in remoto (Figura 8).
- tubazione dell'olio diatermico in acciaio al carbonio con coibentazione.



Figura 7: particolare dell'impianto Solteca3, nel quale è possibile vedere il quadro di comando in locale.

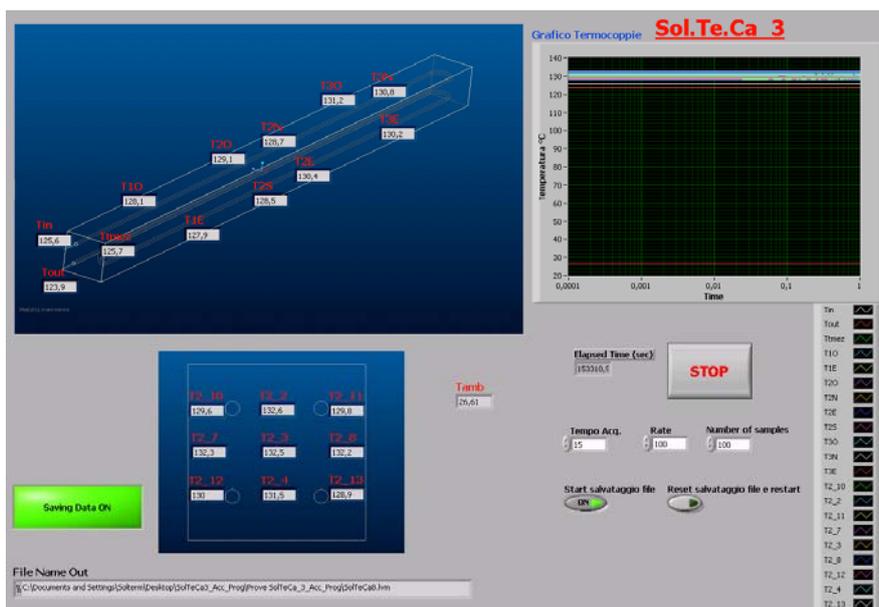


Figura 8: immagine del sistema di acquisizione di Solteca3.

Mediante 4 valvole con attuatore elettrico, EV1...EV4, (Figura 9), il sistema è in grado di modificare la direzione del flusso dell'olio all'utenza (a valle e a monte di T1 e T2), infatti, con:
 EV1-EV4 aperte ed EV2-EV3 chiuse, la circolazione è orario e non scorre nel circuito di raffreddamento;
 EV2-EV3 aperte ed EV1-EV4 chiuse, la circolazione è antioraria e transita nel circuito di raffreddamento;
 EV1-EV2 aperte ed EV3-EV4 chiuse, la circolazione avviene nel circuito di raffreddamento, ma non nelle utenze.



Figura 9: particolare dell'impianto Solteca3, nel quale sono visibili le valvole con attuatore elettrico e i tubi di collegamento con il sistema di accumulo.

Il circuito di raffreddamento, comprende invece:

- scambiatore olio/acqua (R1)
- pompa per la circolazione del circuito del fluido di raffreddamento (acqua), valvola di sicurezza coordinata e manometro di indicazione della pressione;
- aeroterma per la dissipazione del calore accumulato dal fluido di raffreddamento (acqua). Tale aeroterma è stato collocato esternamente al laboratorio in modo da dissipare il calore verso l'esterno evitando di surriscaldare gli ambienti di lavoro.
- vaso di espansione.

In Figura 10 è mostrato lo scema dell'impianto, i principali componenti con le relative specifiche sono:

- Tubazioni da 1" da S1 a P1, tutte le altre da 3/8" sch 10, tranne quelle per il drenaggio e il rimbocco che sono di minor diametro nominale.
- TIC1 e TIC2 indicatori e controlli della temperatura, che agiscono rispettivamente sulla potenza elettrica di riscaldamento (R1) e sulla pompa del circuito di raffreddamento (P2).
- FIC indicatore e controllo della portata del fluido termico che va ad agire sull'inverter della pompa di movimentazione dello stesso fluido.

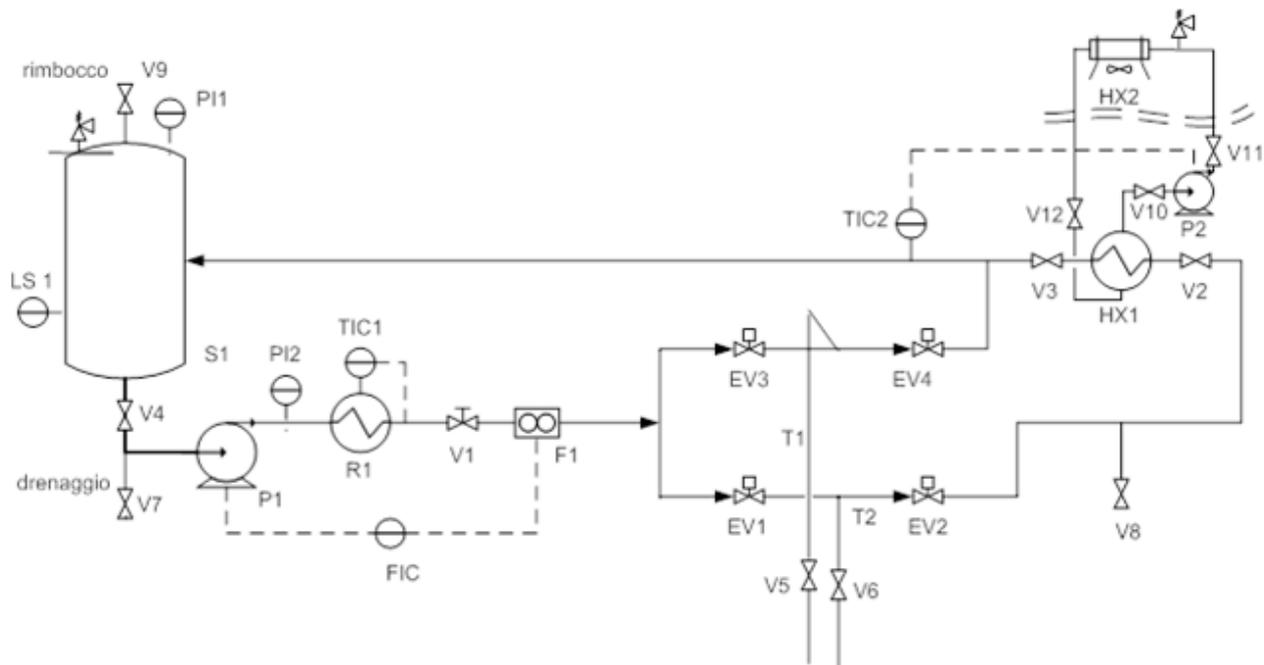


Figura 10: schema indicativo dell'impianto Solteca3.

- LIC ed LS1 indicatori e controlli del livello di S1.
- HX1 scambiatore di calore per il raffreddamento olio/fluido refrigerante.
- HX2 aerotermo, con potenza di raffreddamento pari a circa 25 kW.
- S1 Vessel da 50 l.
- R1 riscaldatore elettrico di potenza nominale pari a 25 kW per il riscaldamento dell'olio a temperatura controllata.
- PI1 e PI2 indicatori della pressione.
- P1 pompa per la circolazione dell'olio.
- EV1...EV4 valvole con attuatore elettrico comandabili da remoto (3/8"), anche mediante SW LabView. Le elettrovalvole dovranno essere di tipo normalmente chiuse.
- V1 valvola manuale di regolazione (3/8").
- V2, V3, V5 e V6 valvole di intercettazione.
- V4 valvola di intercettazione (1").
- V7...V9 valvole per drenaggio o rimbocco manuale (< 3/8").
- V10...V12 valvole di intercettazione del circuito di raffreddamento.
- F1 flussometro (3/8") con uscita analogica del segnale, tale da permettere l'acquisizione in remoto, mediante SW LabView, del valore della portata di olio.
- RV1 e RV2 valvole di sicurezza.
- L'intera struttura, interna al laboratorio, è dotata di ruote per garantirne la mobilità.



Figura 11: vista della sezione di riscaldamento dell'impianto Solteca3.

2.3 Sistema di acquisizione

Il sistema di acquisizione, sviluppato in ambiente LabView, permette di visualizzare e registrare tutte le grandezze di misura in particolare le temperature rilevate dalle 22 termocoppie poste nei vari punti del sistema utili per calcolare in maniera opportuna gli scambi termici che avvengono durante la sperimentazione. In particolare queste rilevano la temperatura in ingresso, nella mezzeria e all'uscita del circuito di accumulo e nella sezione iniziale, mediana e finale del blocco cementizio andando ad analizzare le temperature in superficie, mediane ed interne del modulo stesso oltre che la temperatura ambiente (Figura 4).

Il sistema di acquisizione prevede la possibilità di comandare in remoto e visualizzare la portata del fluido termico, del sistema di raffreddamento e delle 4 valvole ad attuatore elettrico in modo tale che la circolazione sia oraria, antioraria o in by-pass, cioè eviti di passare nell'elemento di accumulo. Quest'ultimo accorgimento è utile quando si voglia immettere negli accumulatori un fluido già alla temperatura di set-point; per esempio se il sistema di accumulo si trova a 280 °C è possibile immettere olio diatermico, in fase di scarico, alla temperatura di 120°C, senza far avvenire il raffreddamento, a rampa, del fluido diatermico all'interno del materiale cementizio. Il sistema di acquisizione permette la possibilità di impostare, in automatico, cicli di riscaldamento e/o raffreddamento alle temperature, tempi e verso di circolazione impostati dall'utente.

Il sistema permette altresì di visualizzare e registrare le temperature rilevate dalle termocoppie (Figura 8) che si riferiscono ai seguenti punti del sistema di accumulo oltre che alla temperatura ambiente T_{amb} :

- T_{in} : temperatura sulla superficie del tubo rilevata all'ingresso del materiale cementizio di accumulo termico;
- T_{out} : temperatura sulla superficie del tubo rilevata all'uscita del materiale cementizio di accumulo termico;

- Tmez: temperatura sulla superficie del tubo rilevata a metà del percorso del fluido diatermico all'interno del materiale cementizio di accumulo termico;
- T10: temperatura sulla superficie del blocco cementizio nella parte anteriore posta ad ovest del tubo ove circola il fluido termico all'interno del materiale di accumulo;
- T1E: temperatura sulla superficie del blocco cementizio nella parte anteriore posta ad est del tubo ove circola il fluido termico all'interno del materiale di accumulo;
- T1N: temperatura sulla superficie del blocco cementizio nella parte anteriore posta a nord (parte superiore) del tubo ove circola il fluido termico all'interno del materiale di accumulo;
- T20: temperatura sulla superficie del blocco cementizio nella parte mediana posta ad ovest del tubo ove circola il fluido termico all'interno del materiale di accumulo;
- T2E: temperatura sulla superficie del blocco cementizio nella parte mediana posta ad est del tubo ove circola il fluido termico all'interno del materiale di accumulo;
- T2N: temperatura sulla superficie del blocco cementizio nella parte mediana posta a nord (parte superiore) del tubo ove circola il fluido termico all'interno del materiale di accumulo;
- T2S: temperatura sulla superficie del blocco cementizio nella parte mediana posta a sud (parte inferiore) del tubo ove circola il fluido termico all'interno del materiale di accumulo;
- T30: temperatura sulla superficie del blocco cementizio nella parte finale posta ad ovest del tubo ove circola il fluido termico all'interno del materiale di accumulo;
- T3E: temperatura sulla superficie del blocco cementizio nella parte finale posta ad est del tubo ove circola il fluido termico all'interno del materiale di accumulo;
- T3N: temperatura sulla superficie del blocco cementizio nella parte finale posta a nord (parte superiore) del tubo ove circola il fluido termico all'interno del materiale di accumulo;
- T2_2: temperatura della parte superiore della sezione mediana all'interno del blocco cementizio, tra la parte di ingresso e di uscita dei tubi del fluido termico;
- T2_3: temperatura della parte centrale della sezione mediana all'interno del blocco cementizio;
- T2_4: temperatura della parte inferiore della sezione mediana all'interno del blocco cementizio, tra la parte di ingresso e di uscita dei tubi del fluido termico;
- T2_7: temperatura della parte ovest della sezione mediana all'interno del blocco cementizio, tra la parte di ingresso e di uscita dei tubi del fluido termico;
- T2_8: temperatura della parte est della sezione mediana all'interno del blocco cementizio, tra la parte di ingresso e di uscita dei tubi del fluido termico;
- T2_10: temperatura sulla parte di superficie del tubo immersa nella sezione mediana del blocco cementizio nella parte superiore ad ovest;
- T2_11: temperatura sulla parte di superficie del tubo immersa nella sezione mediana del blocco cementizio nella parte superiore ad est;
- T2_12: temperatura sulla parte di superficie del tubo immersa nella sezione mediana del blocco cementizio nella parte inferiore ad ovest;
- T2_13: temperatura sulla parte di superficie del tubo immersa nella sezione mediana del blocco cementizio nella parte inferiore ad est.
- La Figura 12 mostra il posizionamento delle termocoppie nella sezione mediana e sulla superficie del blocco cementizio.
- La Figura 13: posizionamento delle termocoppie poste sulla superficie del tubo ove scorre il fluido termico all'interno del materiale di accumulo.

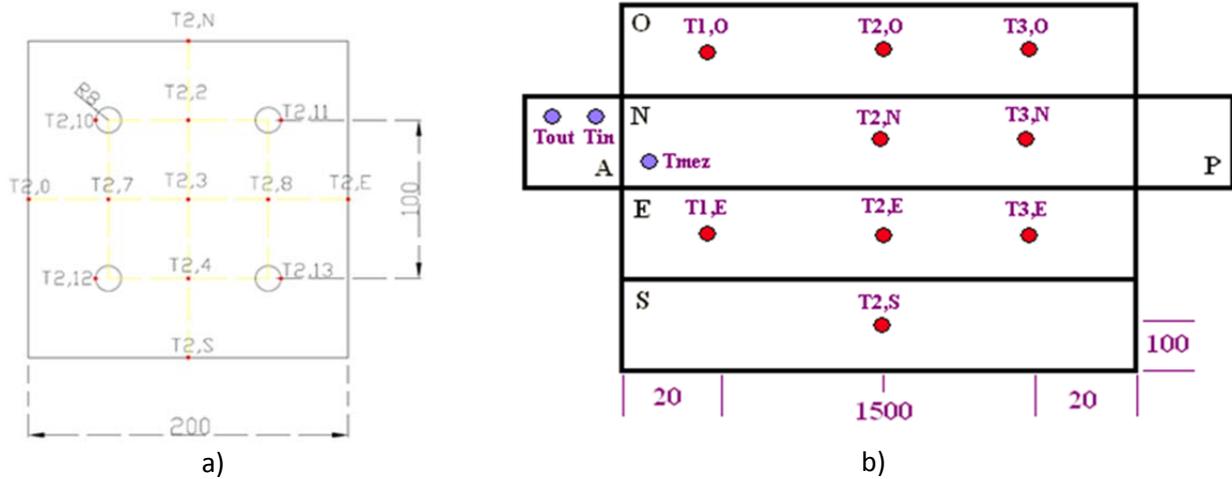


Figura 12: posizionamento delle termocoppie: a) nella sezione mediana verticale del blocco cementizio; b) sulla superficie del blocco cementizio

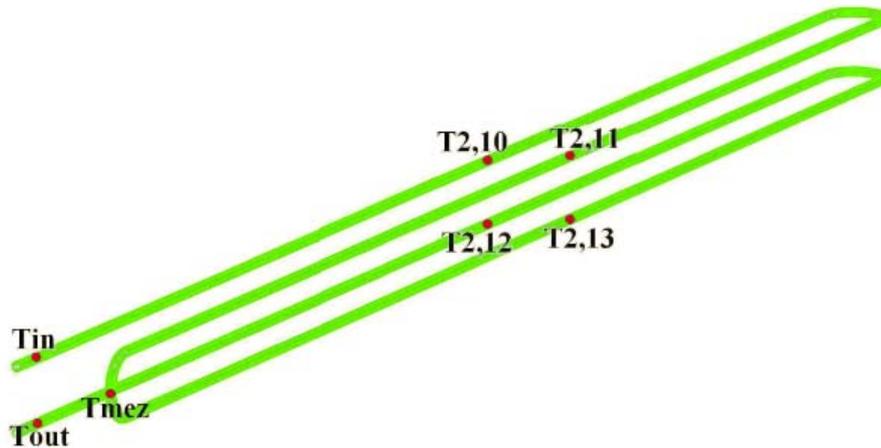


Figura 13: posizionamento delle termocoppie poste sulla superficie del tubo ove scorre il fluido termico all'interno del materiale di accumulo.

2.4 Progettazione e realizzazione dei moduli di accumulo

In Figura 14 e in Figura 15 sono mostrati alcuni particolari progettuali del tubo ove scorre il fluido termico. Questo tubo è stato realizzato in acciaio AISI 316 di DN16 con diametro interno pari a 14 mm. Possiede una lunghezza totale all'interno di ognuno dei blocchi cementizi pari a 12 m e si sviluppa nella parte alta per 3 metri prima di una curva ad U, tale che il tubo proceda in parallelo con una distanza di 10 cm tra le mezzerie, proseguendo per altri 3 m ha un'altra curva ad U verso il basso delle stesse specifiche della precedente. Il tubo prosegue quindi per altri 3 m sulla parte bassa prima di svilupparsi con un'altra curva ad U identica e parallela alla prima, che gli sta sopra di 10 cm (calcolati alla mezzeria del tubo) e quindi esce dal blocco cementizio dopo altri 3 m nella parte sottostante l'ingresso, distante 10 cm. In Figura 13 è possibile vedere tale sviluppo.

Ogni blocco cementizio è un parallelepipedo avente una sezione quadrata (200x200 mm) ed una lunghezza di 3 m; per quanto riguarda le armature di rinforzo si rimanda a RdS/PAR2014/120.

Sono state calcolate le perdite di carico e la velocità che deve avere il fluido termico affinché si insaturi un moto turbolento completo.

Tale moto è preferibile perché, avendo un profilo piatto all'interno del tubo consente di approssimare, in maniera abbastanza precisa, la temperatura del fluido con quella che è rilevata dalle termocoppie sulla superficie del tubo stesso.

Come si vede dal par. 2.1.1 le caratteristiche del fluido (Paratherm NF) variano molto con la temperatura ed in particolare la viscosità, così per raggiungere il moto turbolento pienamente sviluppato ($Re > 10000$) sono necessarie, alle temperature operative del sistema, 120° e 300°C , almeno le velocità di $1,41\text{ m/s}$ e $0,25\text{ m/s}$ rispettivamente che corrispondono ad una portata di 13 e $3,5\text{ l/min}$ e alle perdite di carico di circa $0,5$ e $0,02\text{ bar}$, perfettamente raggiungibili con la pompa in dotazione.

I blocchi di calcestruzzo (Figura 16) sono stati ricoperti da due tipi sovrapposti di materiale isolante.

Nello strato esterno tale coibentazione è costituita pannelli semirigidi da lana di roccia (IsoverN della Saint-Gobain) per uno spessore di 100 mm ($\lambda = 0,035\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $R = 2,75\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$), al di sotto di essa sono stati posti due strati, di 25 mm ciascuno, di fibre ceramica SuperWool plus della Morgan Advanced ($\lambda \sim 0,06\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) (Figura 17). Il coibente a contatto con il blocco cementizio pur avendo una conduttività termica più elevata è maggiormente resistente alle alte temperature previste durante la sperimentazione. Il coibente è stato poi rivestito di alluminio per evitare spargimenti di coibente nell'ambiente (Figura 18).

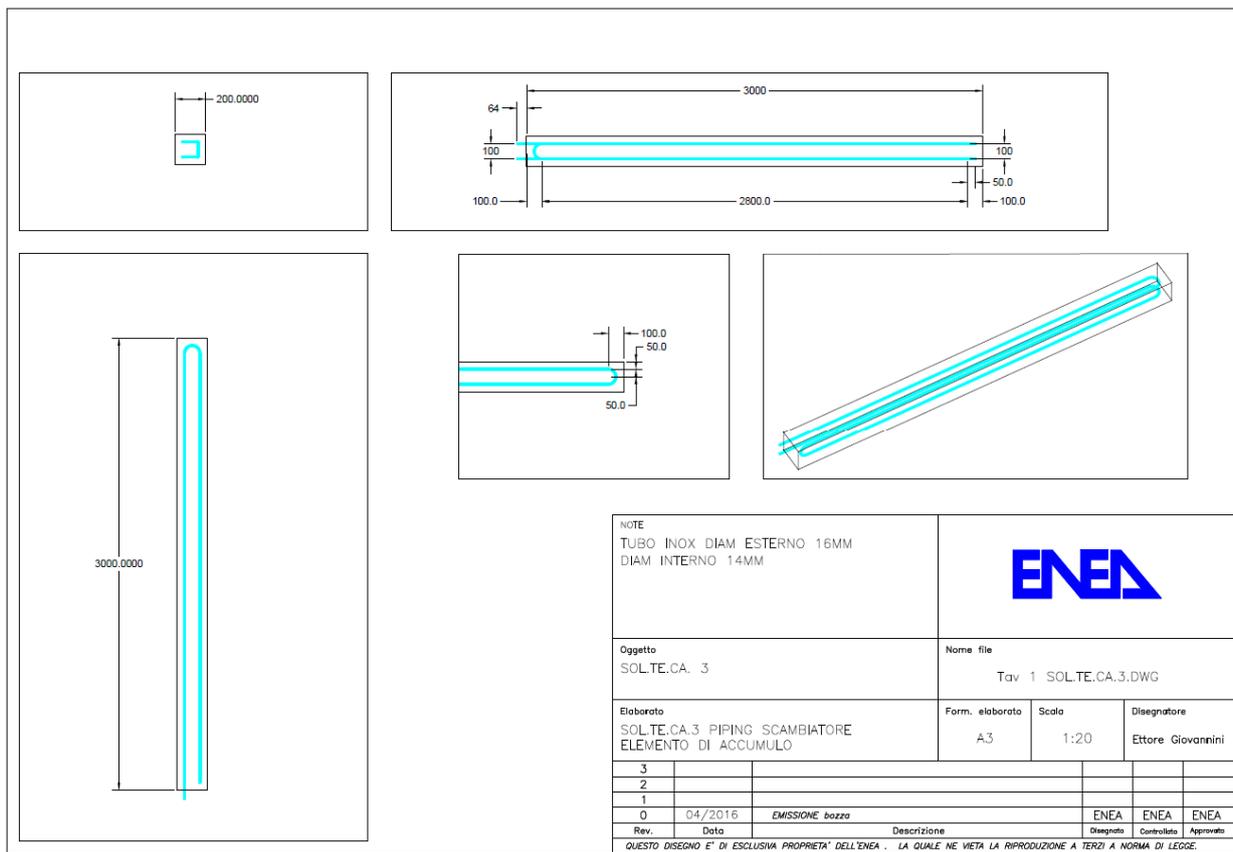


Figura 14: schema del tubo ove scorre il fluido termico interno ai blocchi cementizi.

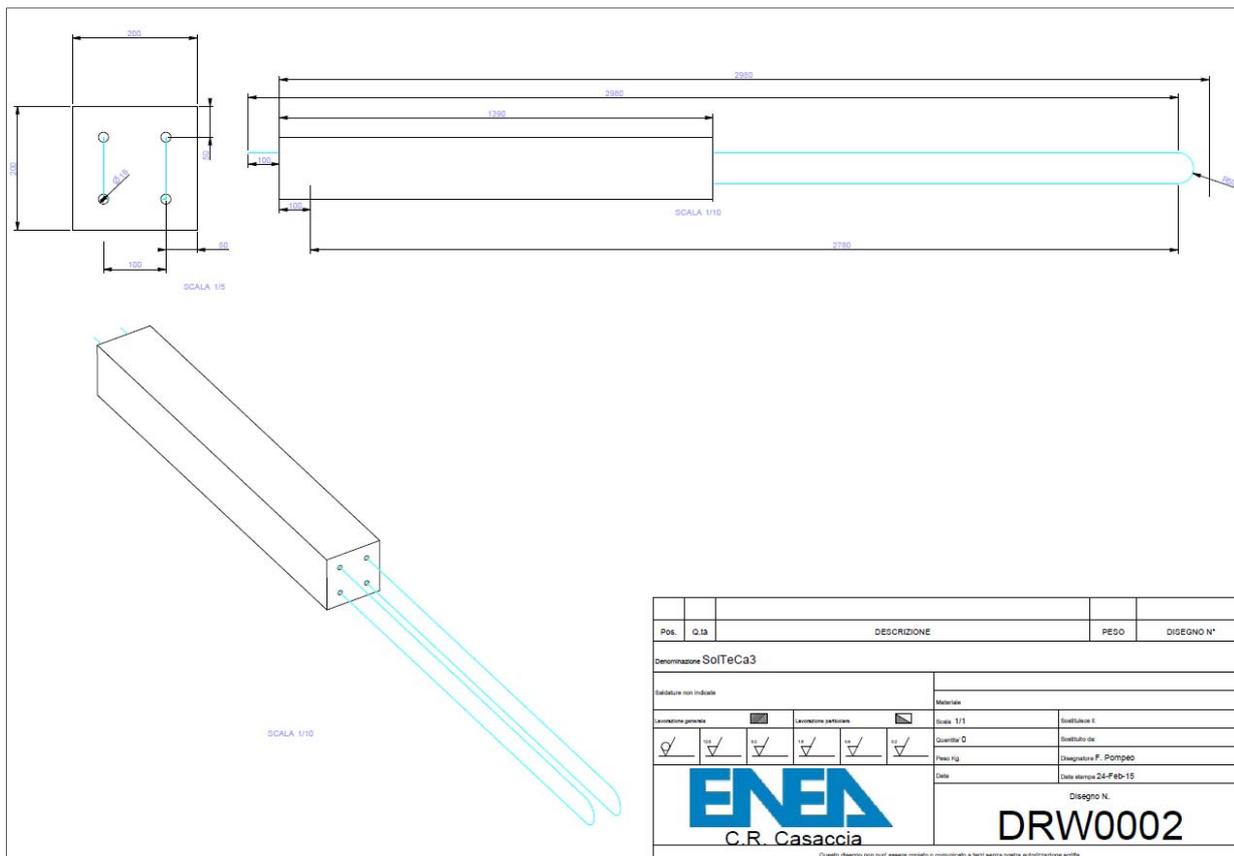


Figura 15: particolare di inserimento del tubo ove scorre il fluido vettore all'interno dei blocchi cementizi.



Figura 16: particolare del sistema di accumulo, nel quale si vedono i materiali cementizi utilizzati, il sistema di rilevazione della temperatura mediante termocoppie e le strutture di sostegno.



Figura 17: particolare del sistema di accumulo, nel quale si vedono gli strati di coibentazione.



Figura 18: particolare del sistema di accumulo con coibente e lamierino.

2.5 Sviluppo e applicazione di un modello numerico del comportamento termodinamico del modulo di accumulo.

Pur essendo l'attività di simulazione dei transitori sperimentali condotti nel presente PAR a carico di UNIPD con strumenti presso di loro disponibili, l'ENEA ha sviluppato in modo autonomo un modello del modulo di accumulo oggetto dello studio all'interno del codice CAST3M [R 9].

E' stata effettuata un'estensione 3D del modello 2D realizzato nell'ambito del PAR 2013. Ciò ha comportato una serie di difficoltà nella discretizzazione della maglia soprattutto nelle curve del piping.

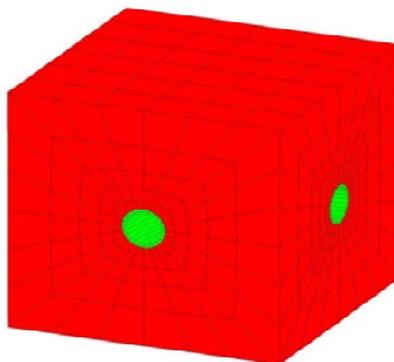


Figura 19: particolare della discretizzazione di una curva del piping all'interno del calcestruzzo.

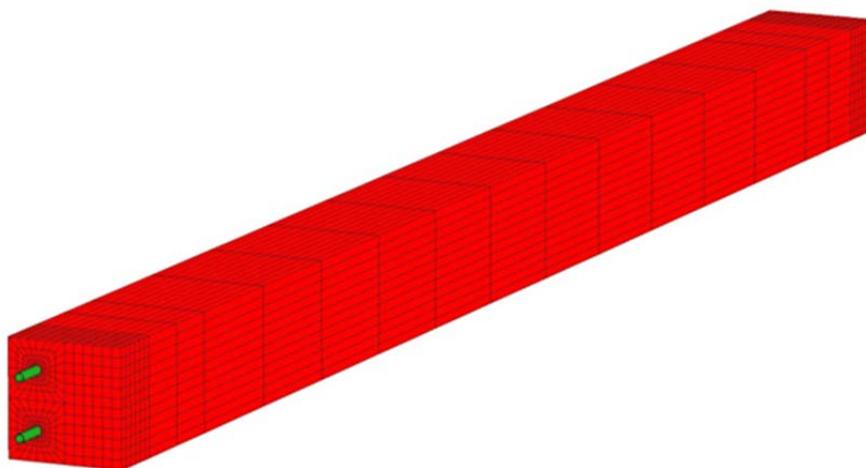


Figura 20: discretizzazione completa dell'elemento di accumulo.

La discretizzazione completa dell'elemento di accumulo riportata in Figura 20, ha richiesto 25446 elementi isoparametrici massivi e 74016 nodi.

E' stato condotto, su questa geometria, un calcolo di benchmark, concordato e condotto in collaborazione con UNIPD e riportato in RdS/PAR2014/120.

Partendo da uno stato stazionario con fluido in ingresso a 200 °C e temperatura ambiente a 20 °C, in 30 minuti si è fatta variare la temperatura linearmente dai 200 ai 300 °C. Successivamente, il calcolo si protrae per altre 3 ore e 30 minuti mantenendo la temperatura dell'olio a 300 °C fino al raggiungimento del corrispondente stato stazionario.

Le proprietà del materiale utilizzate come input nei calcoli sono conformi a quelle della miscela sviluppata da UNITN (RdS/PAR2014/119).

Vista l'onerosità del calcolo, non è stato possibile far uso di un Personal Computer con prestazioni standard, pertanto si è installato il codice CAST3M sulla piattaforma parallela CRESCO2, in dotazione all'ENEA. Ciononostante, a causa del suddetto transitorio, per eseguire 4 h di simulazione, sono state necessarie circa 20 h di tempo di calcolo.

Si riportano qui alcuni andamenti della distribuzione di temperatura (Figura 25) a fine transitorio per le sezioni longitudinali verticali e orizzontali (Figura 26).

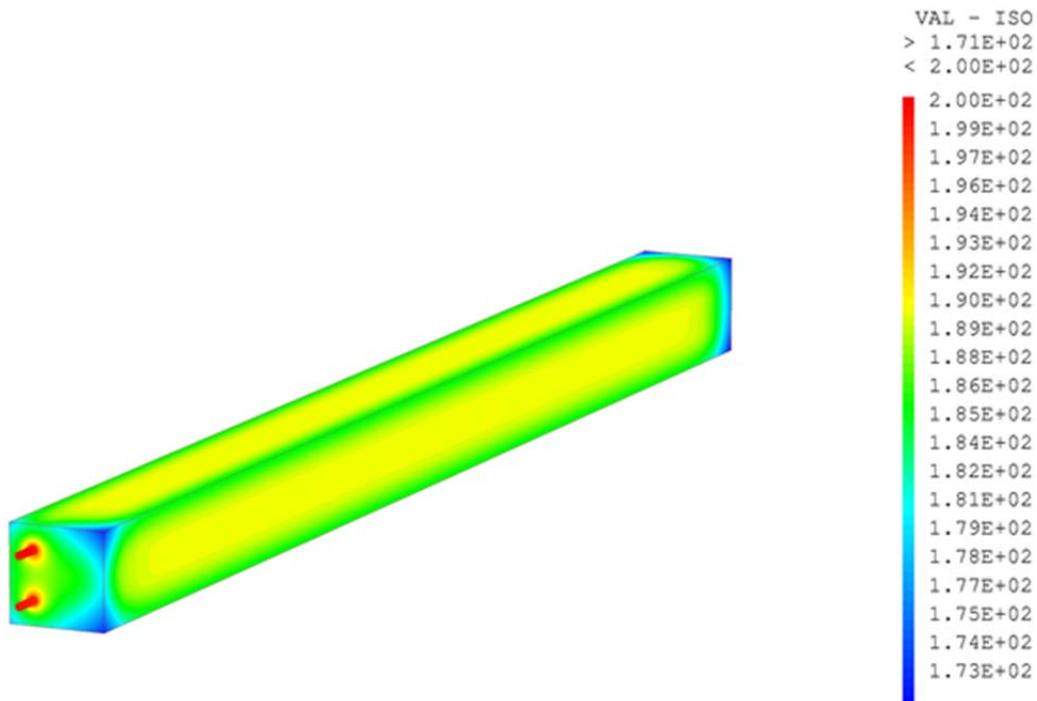


Figura 21: distribuzione delle temperature sulla superficie esterna a fine transitorio.

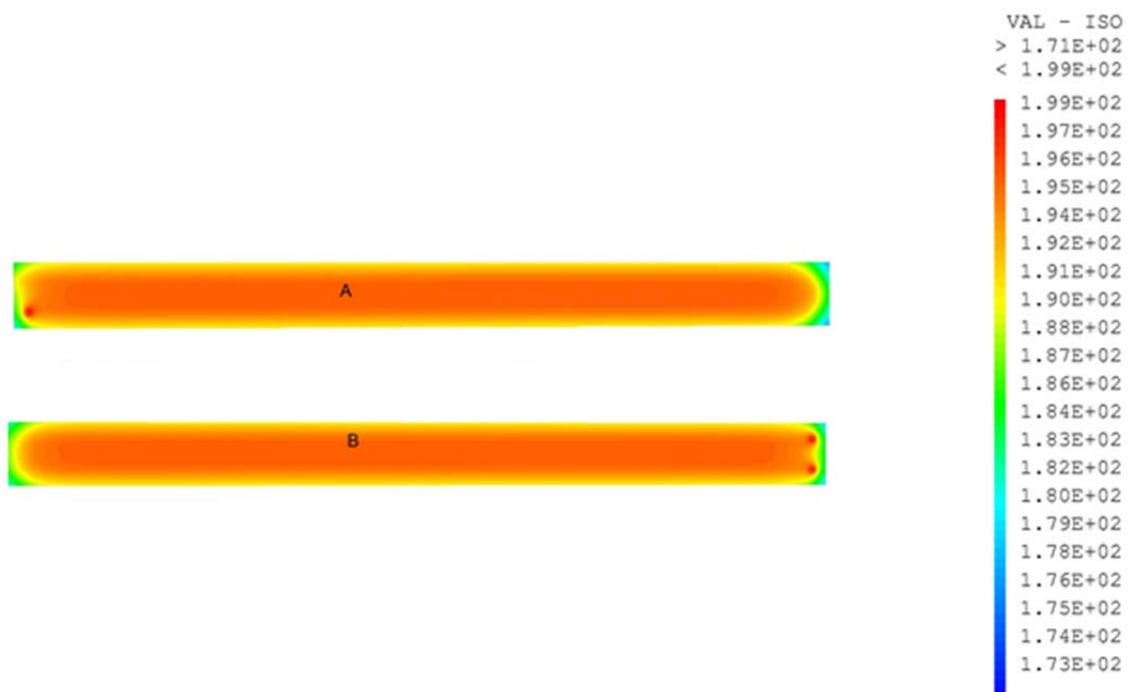


Figura 22: distribuzione delle temperature sulle sezioni longitudinali orizzontali (A) e verticali (B) a fine transitorio.

2.6 Analisi sperimentale del comportamento termodinamico dei sistemi di accumulo cementizi

2.6.1 Degasaggio dei campioni di materiale cementizio

I due campioni sono stati sottoposti, senza coibentazione, ad un riscaldamento controllato in grado di togliere, il più possibile l'acqua libera residua (cioè non idratata) dall'interno del materiale stesso. Ciò va fatto per evitare che l'acqua libera, sottoposta alle temperature spinte delle prove e in presenza di coibentazione, possa vaporizzare e far salire la pressione interna al calcestruzzo, a causa della ridotta permeabilità del calcestruzzo, col rischio rompere il materiale cementizio anche in forma esplosiva, invalidando le prove e danneggiando seriamente il sistema di accumulo. Le modalità di esecuzione della prova per i due moduli sono state condotte in modo simile, con differenze che saranno illustrate di seguito.

2.6.2 Degasaggio modulo UNIPD-ITALCEMENTI

Per ottenere le temperature necessarie a favorire il processo di degasaggio, tenuto conto delle caratteristiche del circuito, del circolatore e del fluido è stata impostata una portata volumetrica media di circa 10 l/min a cui corrisponde una velocità media del fluido all'interno del tubo di scambio di 1,1 m/s.

I valori dei set-point del circolatore sono stati fissati come segue:

Nel primo step si è fatto circolare il fluido per un'ora alla velocità stimata e a temperatura ambiente, per consentire al circuito di stabilizzarsi spurgando l'aria in esso contenuta.

1. Si è quindi avviato il riscaldatore portando la temperatura del set-point a 100 °C in 7 ore (ovviamente la reale temperatura del fluido in ingresso al modulo dipende dalle caratteristiche dinamiche del modulo di accumulo e della potenza massima erogabile dal circolatore).
2. Step di mantenimento del set-point a 100 °C per 10 h.
3. Salita del set-point a 160 °C in 6h.
4. Mantenimento del set-point a 160°C per 4 h.
5. Arresto del circolatore e raffreddamento del modulo per convezione naturale fino a temperatura ambiente.

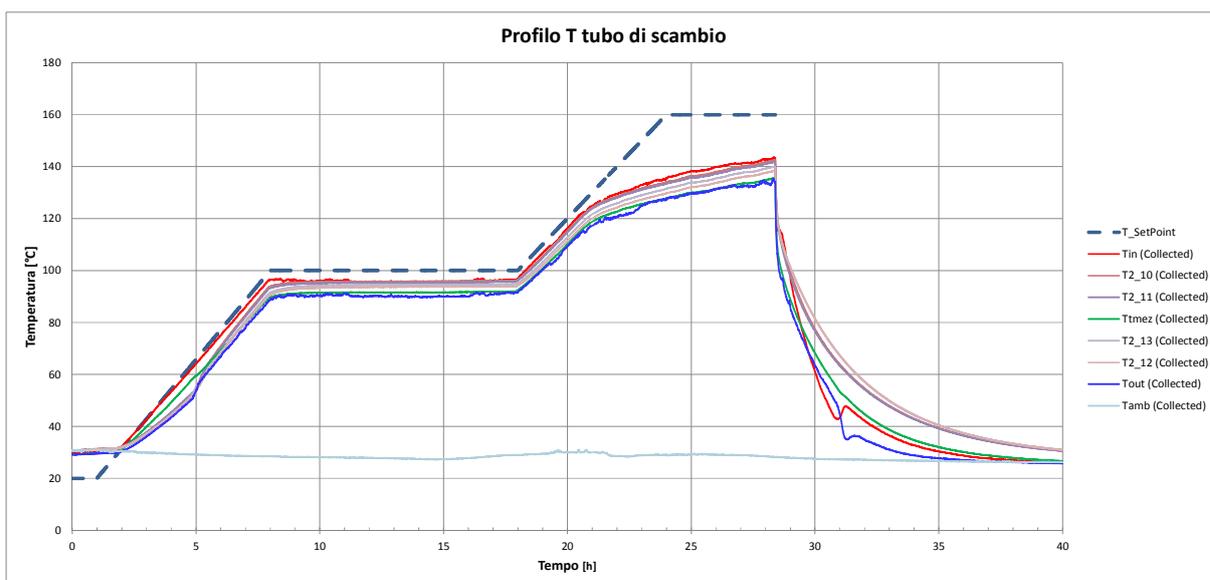


Figura 23: Andamento temporale delle temperature lungo il tubo di scambio nel test di degasaggio del modulo UNIPD-ITALCEMENTI.

In Figura 23 si riporta l'andamento temporale delle temperature rilevate dalle termocoppie fissate sulla parete esterna del tubo secondo lo schema riportato nel par. 2.3. La temperatura del fluido in ingresso al modulo (termocoppia Tin), segue bene fino a 75400 s la temperatura di set-point. Successivamente, a causa dell'aumento delle dispersioni legate a fenomeni evaporativi le condizioni imposte sulla portata volumetrica non sono state più in grado di erogare la potenza richiesta. Si ha pertanto uno scostamento tra la temperatura di set-point e quella effettivamente misurate in ingresso al modulo. All'approssimarsi delle condizioni stazionarie tale scostamento si attenua.

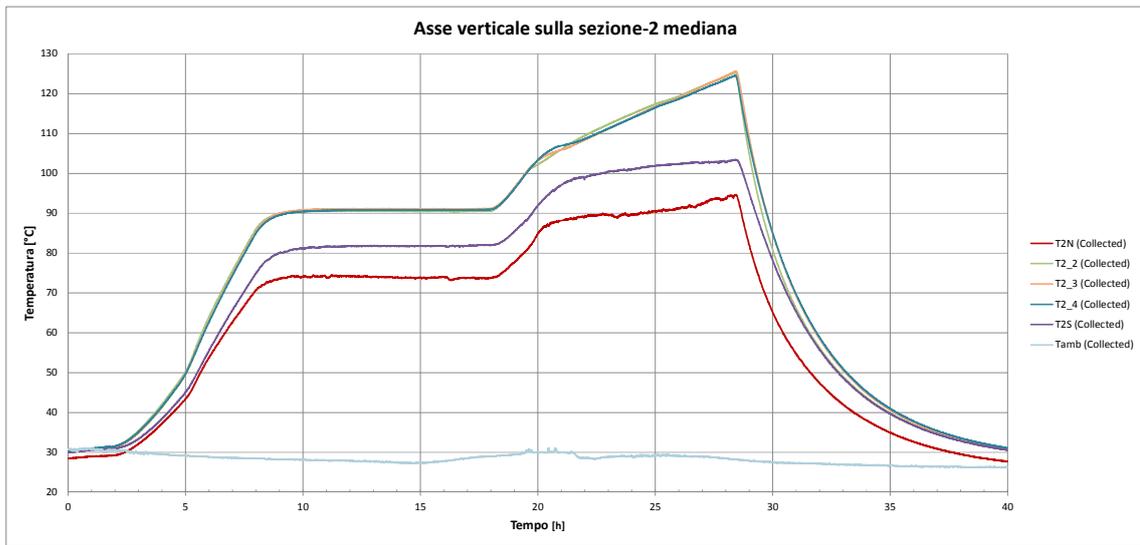


Figura 24: Andamento temporale delle temperature lungo l'asse verticale della sezione 2 mediana del modulo UNIPD-ITALCEMENTI.

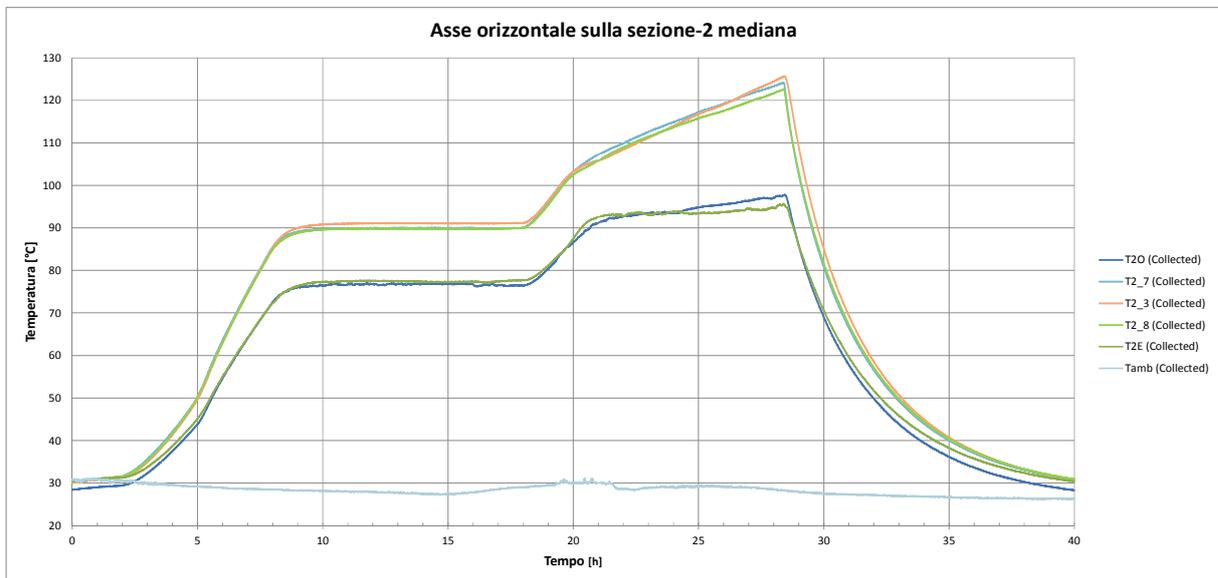


Figura 25: Andamento temporale delle temperature lungo l'asse orizzontale della sezione 2 mediana del modulo UNIPD-ITALCEMENTI.

Le temperature rilevate delle termocoppie interne poste nella sezione mediana (T2,2 T2,4) sull'asse verticale, sull'asse orizzontale (T2,7 T2,8) e quella posta al centro (T2,3), mostrano una temperatura piuttosto omogenea e quindi assenza di gradienti termici. Le temperature poste sui lati Ovest ed Est (T2,O T2_E) risultano simmetriche, ciò indica che non si hanno differenti condizioni di scambio sui due lati e errato centraggio dei tubi scaldanti affogati all'interno e delle armature di rinforzo. La

temperatura posta in zona sud (T2,S) risulta più elevata rispetto a quella rilevata della termocoppie posta a Nord (T2,N), essendo più protetta tra le due zone di appoggio del modulo. La temperatura massima raggiunta al centro della sezione mediana è di 125°C (T2,3).

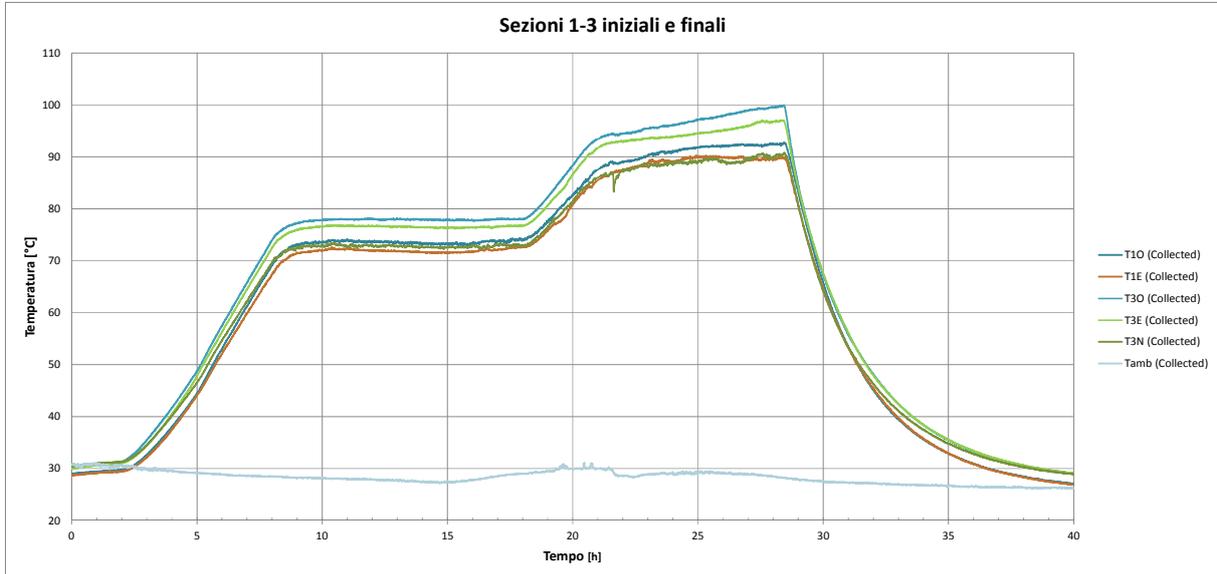


Figura 26: Andamento delle temperature sulle zone estreme del modulo UNIPD-ITALCEMENTI (sezioni 1 e 3).

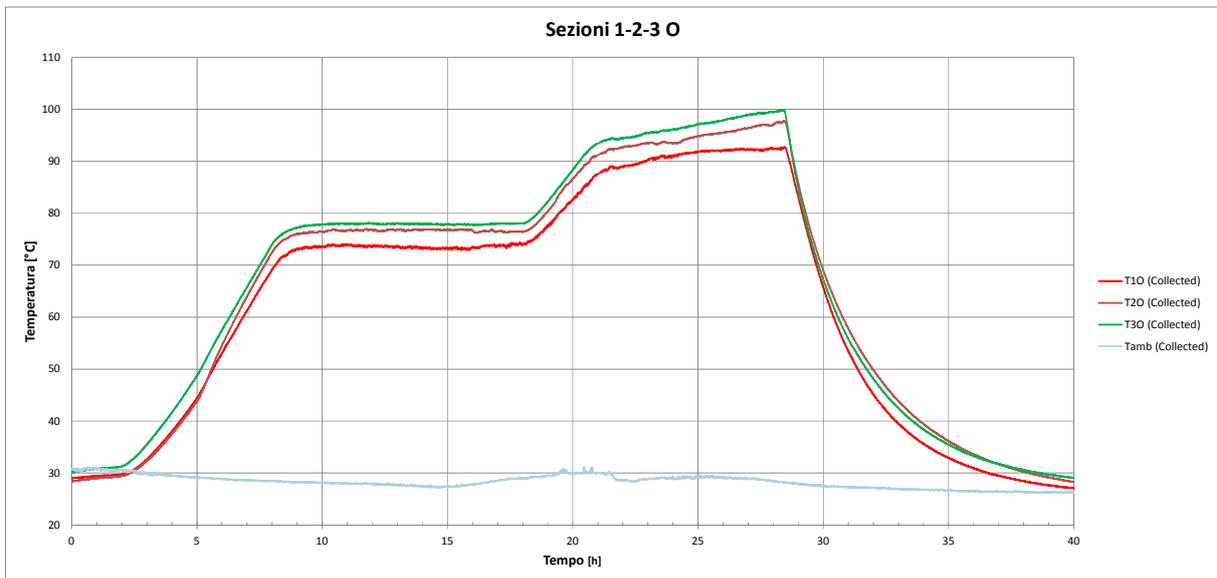


Figura 27: Andamento delle temperature sul lato Ovest del modulo UNIPD-ITALCEMENTI.

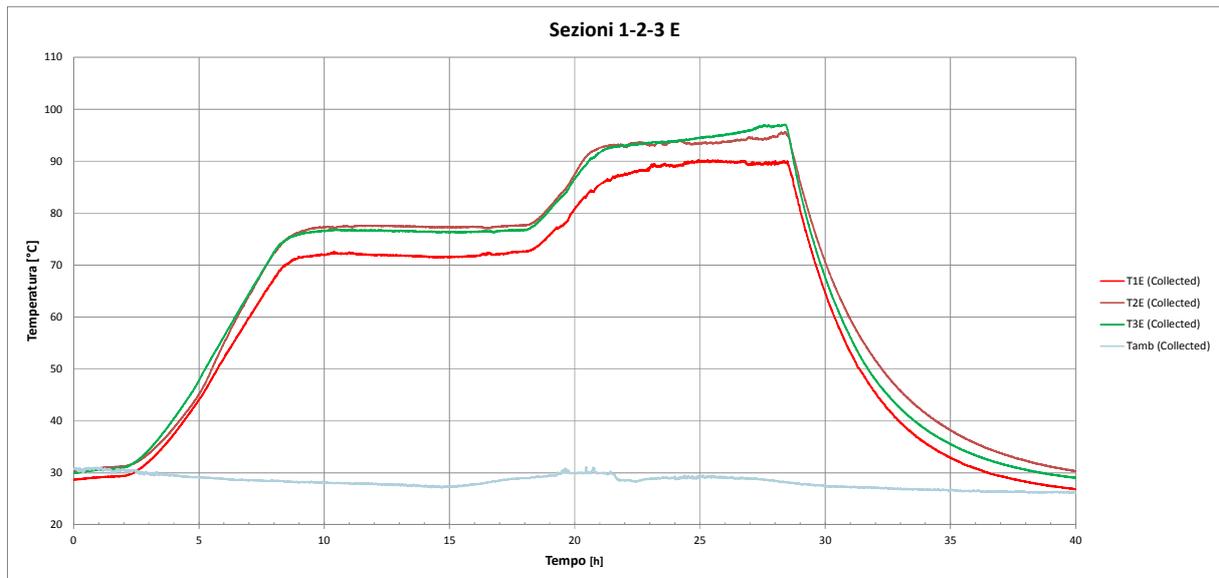


Figura 28: Andamento delle temperature sul lato Est del modulo UNIPD-ITALCEMENTI.

Le temperature delle termocoppie poste sulla superficie esterna mostrano valori massimi variabili tra 100 e 90 °C. Si notano temperature più basse nella zona 1 rispetto alla 3 e nel lato Ovest rispetto al lato Est. Tale effetto può esser dovuto come già accennato al posizionamento del modulo nel micro clima della hall o al posizionamenti dei ferri e del tubo di scambio. Un rilievo delle temperature acquisite a circa 75380 s è riportato in Figura 31 e Figura 32 .

L'intenso degasaggio a circa 75400 s è visualizzato in Figura 29 e in Figura 30 dove si nota la ricondensazione del vapore sul supporto in alluminio, più freddo perché isolato termicamente con pyrogel dal calcestruzzo.

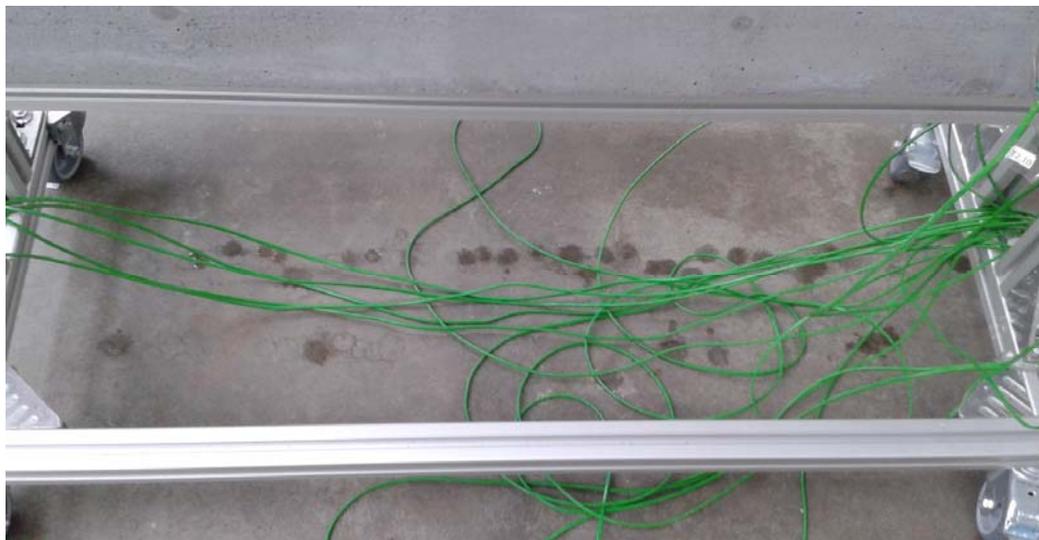


Figura 29: Gocciolamento della condensa al raggiungimento dei 120°C nel modulo UNIPD-ITALCEMENTI.



Figura 30: Condensazione del vapore acqueo sulla barra di sostegno.

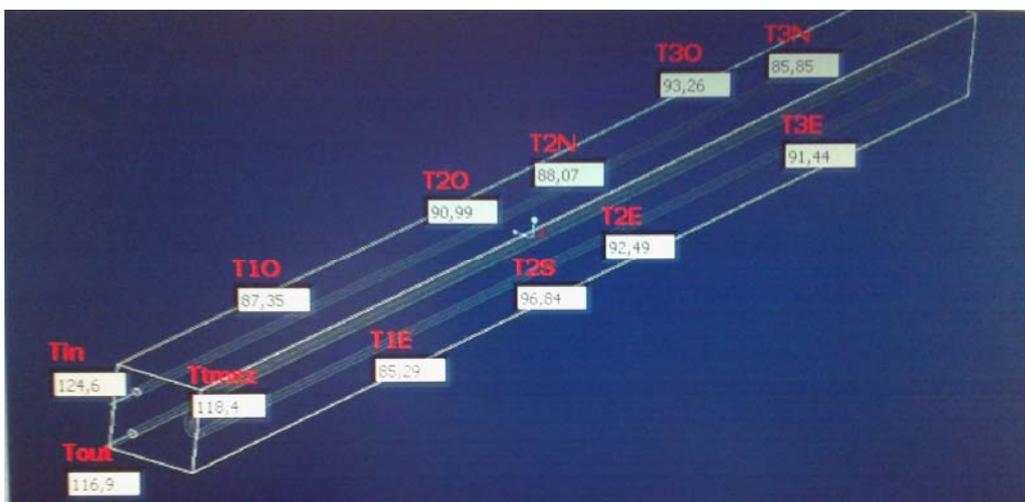


Figura 31: Rilievo temperature termocoppie esterne, ingresso, uscita e mezzeria del tubo di scambio a 75380s.

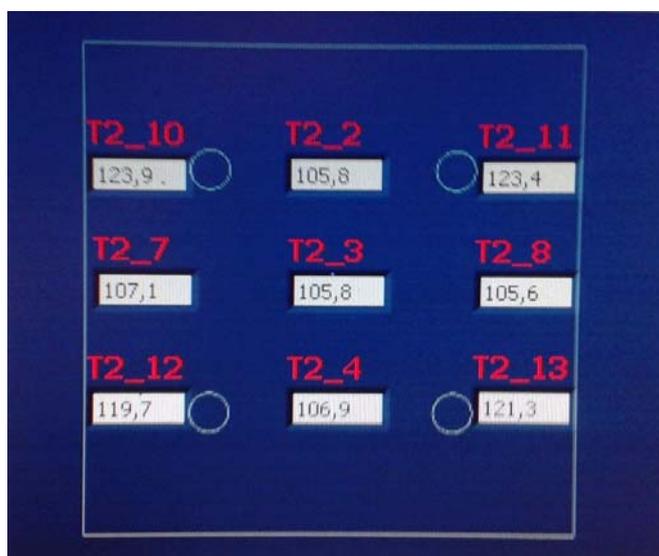


Figura 32: Rilievo temperature termocoppie su sezione 2 mediana su tubo di scambio e nel calcestruzzo a 75380 s.

In

Figura 33 si nota un picco di 12 °C nel salto di temperatura ingresso uscita a circa 4.87 h rilevato dalle termocoppie Tin eTout; tale picco è presente anche nel test sul modulo UNITN-CESTARO. Ciò è imputabile al repentino cambio di viscosità del fluido (evidenziato in Figura 6) intorno ai 60°C; infatti intorno ai 4.72 h la temperatura erogata dal circolatore è di circa 60°C.

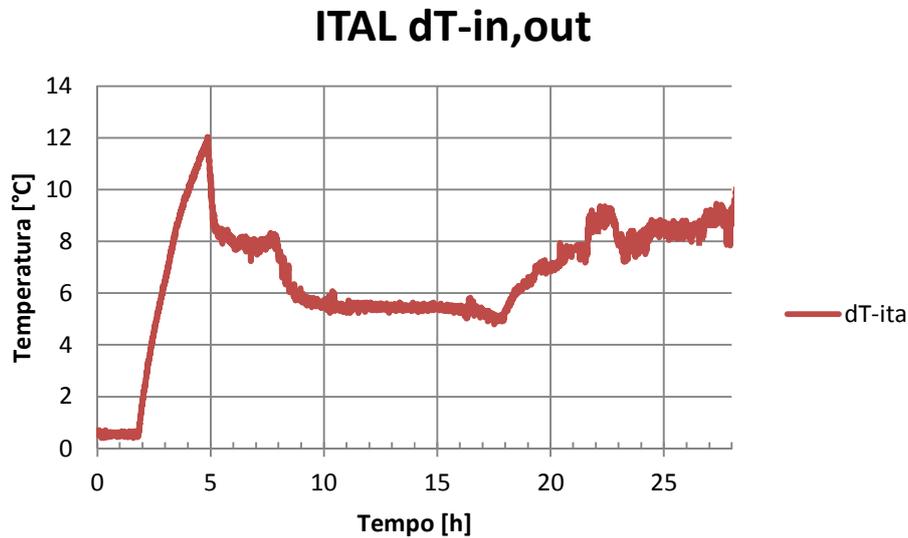


Figura 33: Andamento del salto di temperatura ingresso uscita (Tin-Tout).

2.6.3 Degasaggio modulo UNITN-CESTARO

Si può assumere anche in questo test una portata media volumica di 10,1 l/min e una velocità del fluido pari a 1,1 m/s, all'interno del tubo di scambio.

Per consentire una maggior perdita di acqua, si è eseguito un ciclo di degasaggio supplementare. Pertanto i valori dei set-point del circolatore sono stati modificati come segue:

- 1 Nel primo step si è fatto circolare il fluido per un'ora alla velocità stimata e a temperatura ambiente.
- 2 Si è avviato il riscaldatore portando la temperatura del set-point a 100 °C in 7 ore .
- 3 Step di mantenimento del set-point a 100 °C per 10 h.
- 4 Salita del set-point a 160 °C in 6h.
- 5 Mantenimento del set-point a 160°C per 4 h.
- 6 Ripetizione degli step da 1 a 5
- 7 Arresto del circolatore e raffreddamento del modulo per convezione naturale fino a temperatura ambiente.

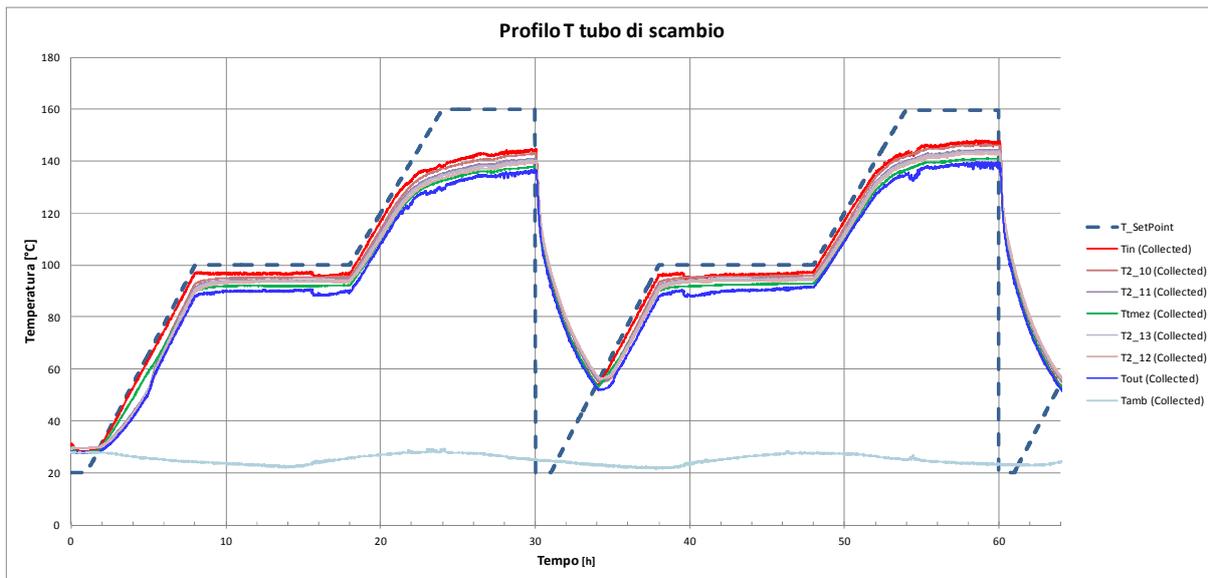


Figura 34: Andamento temporale delle temperature lungo il tubo di scambio nel test di degasaggio del modulo UNITN-CESTARO.

In Figura 34 si riporta l'andamento temporale delle temperature rilevate dalle termocoppie fissate sulla parete esterna del tubo con in tratteggiato il set-point richiesto ma non erogato al circolatore. Infatti come nel test precedente, la temperatura del fluido in ingresso al modulo (termocoppia Tin), segue bene fino a circa 21 h la temperatura di set-point, poi se ne discosta. Va rilevato che a fine nel secondo ciclo si hanno temperature lievemente più elevate, non imputabili alla variazione della temperatura ambiente. Ciò è indice di una diminuzione della conducibilità termica che comporta a parità di potenza erogata temperature maggiori in tutto il sistema modulo+circolatore.

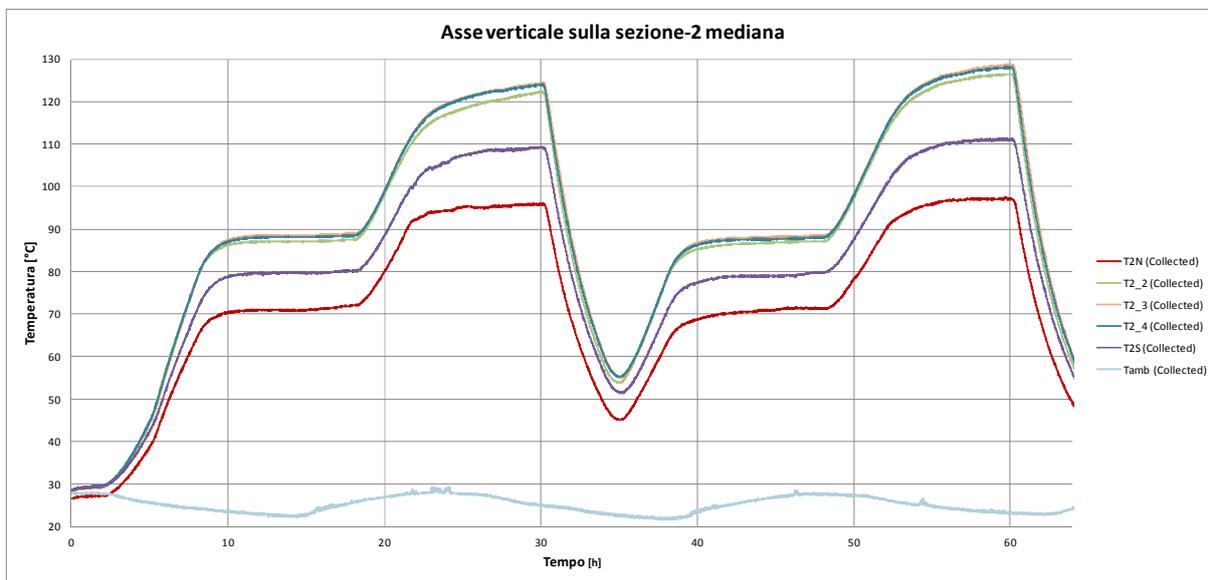


Figura 35: Andamento temporale delle temperature lungo l'asse verticale della sezione 2 mediana del modulo UNITN-CESTARO.

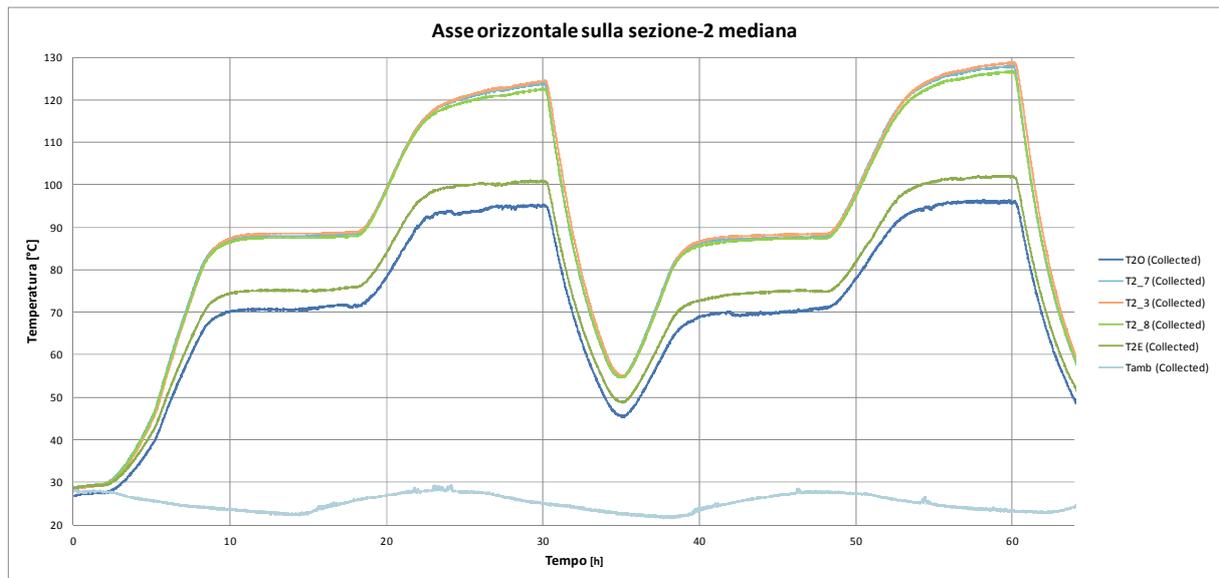


Figura 36: Andamento temporale delle temperature lungo l'asse orizzontale della sezione 2 mediana del modulo UNITN-CESTARO.

Anche in questo caso le termocoppie interne poste sulla sezione mediana (T2,2, T2,4, T2,7, T2,8 e T2,3), mostrano una temperatura piuttosto omogenea. Le temperature rilevate dalle termocoppie poste sui lati Ovest (T1,O, T2,O, T3,O) risultano più basse delle omologhe sul lato Est, che per il posizionamento del modulo era più protetto. La temperatura posta in zona sud (T2,S) risulta anche qui più elevata rispetto a quella rilevata della termocoppie posta a Nord (T2,N). La temperatura massima raggiunta al centro della sezione mediana nel secondo ciclo è di circa 130°C (T2,3).

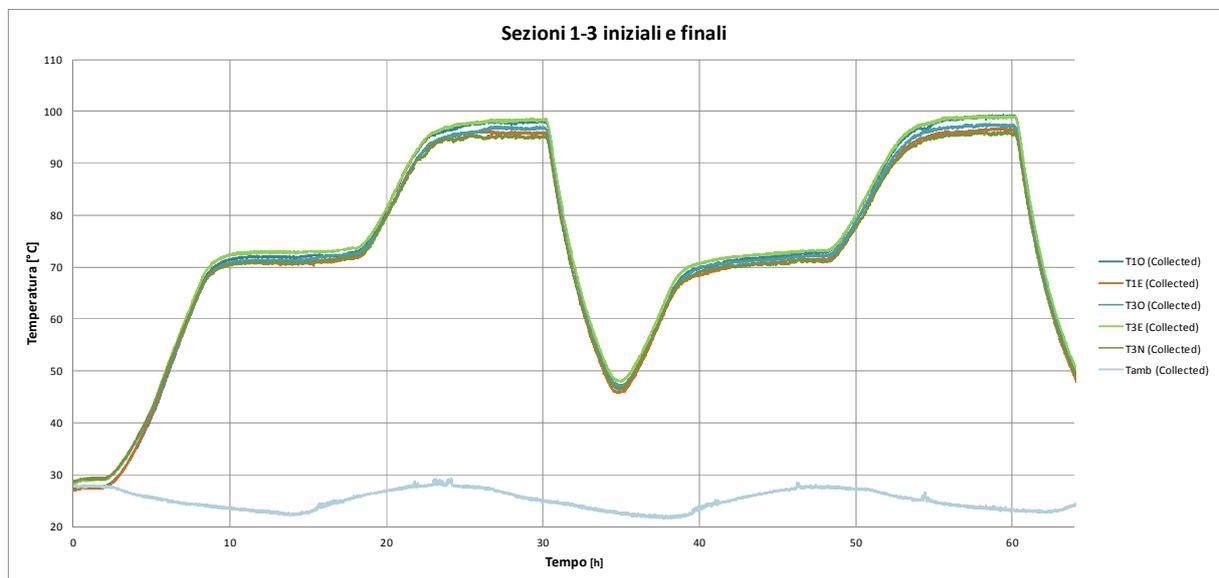


Figura 37: Andamento delle temperature sulle zone estreme del modulo UNITN-CESTARO (sezioni 1 e 3).

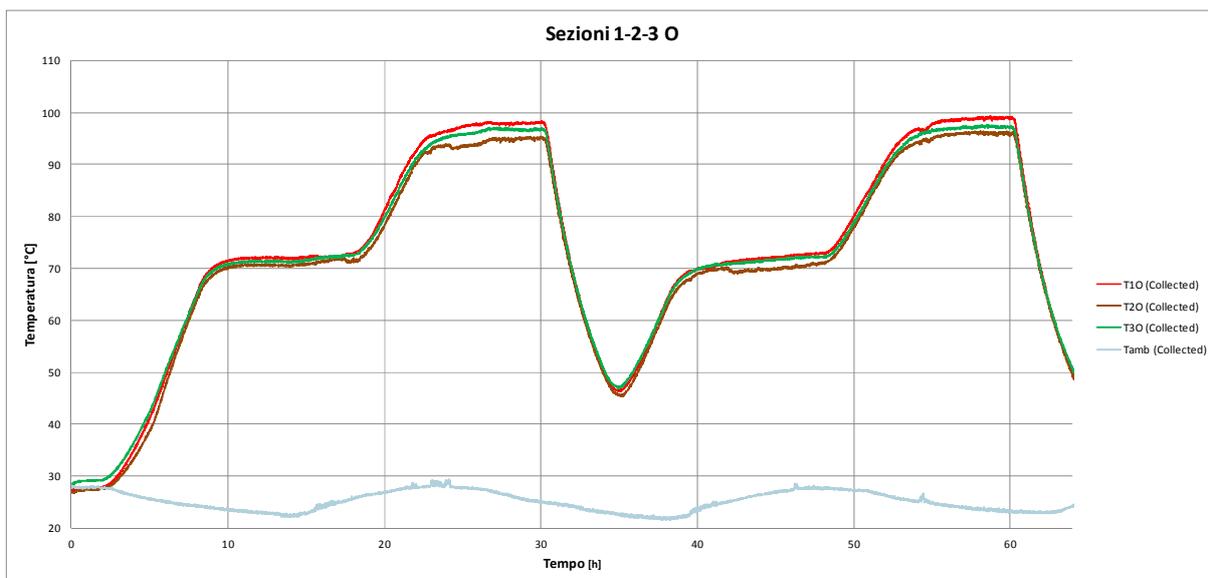


Figura 38: Andamento delle temperature sul lato Ovest del modulo UNITN-CESTARO.

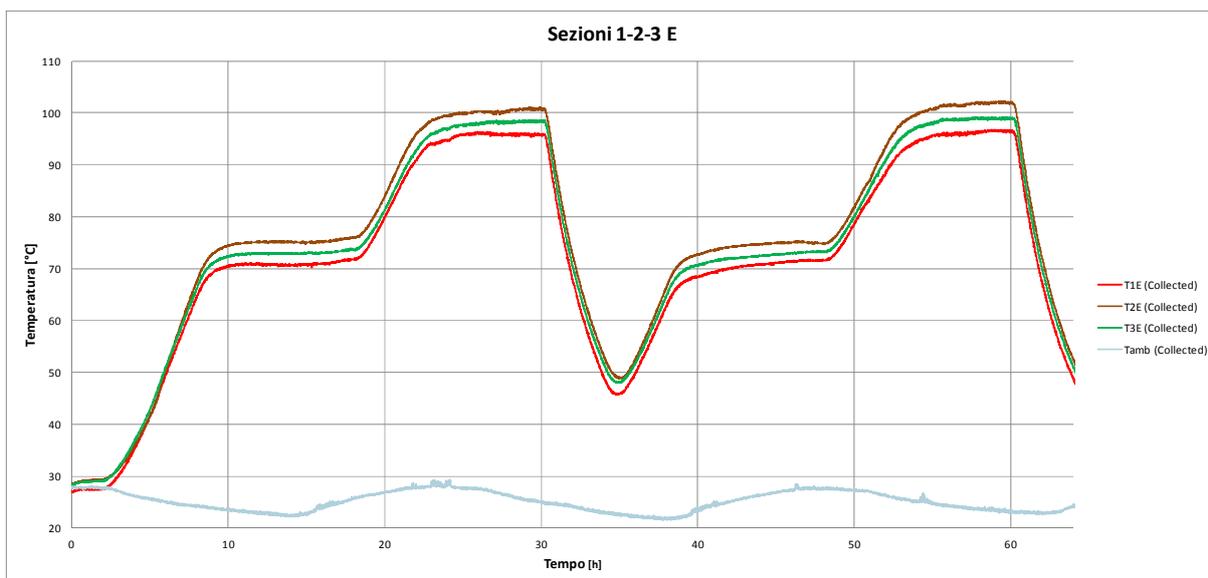


Figura 39: Andamento delle temperature sul lato Est del modulo UNITN-CESTARO.

In tutti gli andamenti riportati in Figura 37 ,Figura 38 e Figura 39 non si hanno comunque grosse variazioni di temperatura, ma viene confermato il lato Ovest come più freddo e le temperature del secondo ciclo più elevate.

Superati i 120°C si manifestato anche in questo caso il fenomeno della condensazione e del gocciolamento dalla barra di supporto, ma in quantità più contenuta come da Figura 40.



Figura 40: Condensazione e gocciolamento del modulo UNITN-CESTARO.

In Figura 41 si nota durante il primo ciclo un analogo picco di 13,2 °C nel salto di temperatura ingresso uscita a circa 17700 s rilevato dalle termocoppie Tin e Tout; mentre nel secondo ciclo non essendo scesa la temperatura sotto i 60 °C in picco è assente a conferma di quanto già detto.

CEST dT-in,out

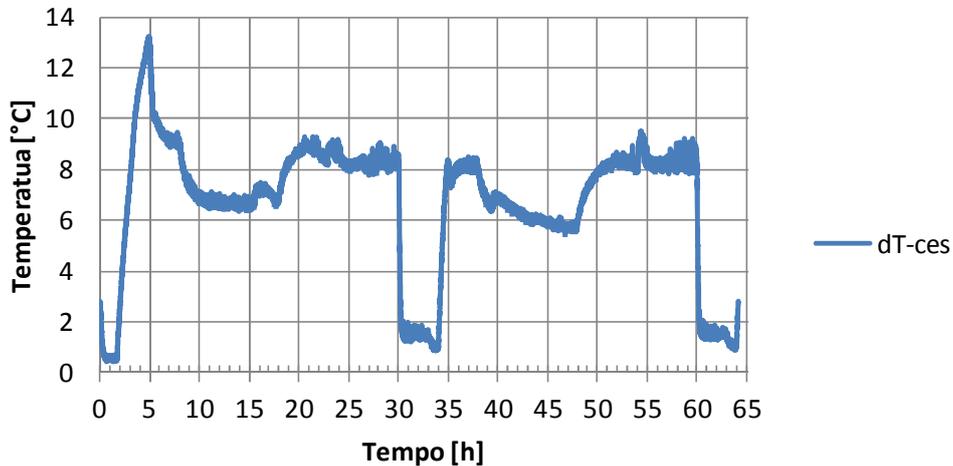


Figura 41: Andamento del salto di temperatura ingresso uscita (Tin-Tout), modulo UNITN-CESTARO.

2.7 Confronto comportamento dei due moduli nel test di degasaggio

Nel paragrafo è riportata un'analisi di confronto dei risultati sperimentali sui due moduli.

In particolare si sono confrontati:

- gli andamenti della temperatura d'ingresso e di uscita dell'olio, ed il salto di temperatura ingresso-uscita,
- l'andamento della temperatura del calcestruzzo del punto centrale del modulo (T2,3)
- la valutazione del degrado delle caratteristiche meccaniche, mediate tecnica ad ultrasuoni (UT)
- il rilievo visivo del grado di fessurazione superficiale

Figura 42 e Figura 43 non evidenziano scostamenti significativi nelle temperature rilevate dalle termocoppie Tin e Tout.

Solo intorno alla 21-esima ora le temperature rilevate sul modulo UNIPD-ITALCEMENTI risultano più basse e ciò in concomitanza con l'incremento del gocciolamento a seguito della condensazione dell'acqua dal provino, questo effetto ha presumibilmente comportato una variazione sia della conducibilità termica del materiale che del coefficiente di scambio tra calcestruzzo e ambiente.

Intorno alla quinta ora in entrambi i test si nota una variazione di pendenza nell'andamento della Tout dovuto alla variazione di viscosità dell'olio. Fra le 10 e le 15 ore corrispondenti allo stazionario con il set-point dell'olio a 100. si vede (Figura 45) che il modulo UNITN-CESTARO presenta un dT maggiore. Assumendo che in entrambi i casi la portata massica sia eguale ciò è indice di una maggior dispersione.

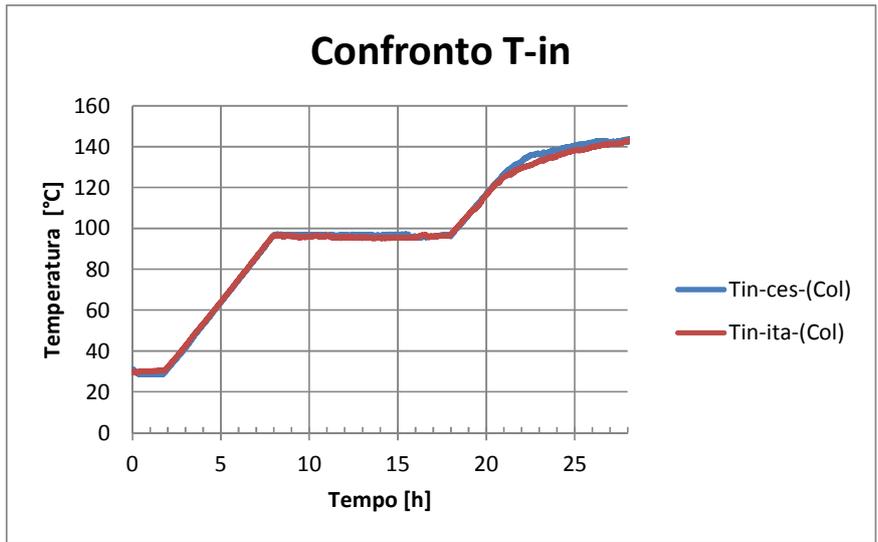


Figura 42: Confronto andamenti temperatura olio in ingresso (Tin).

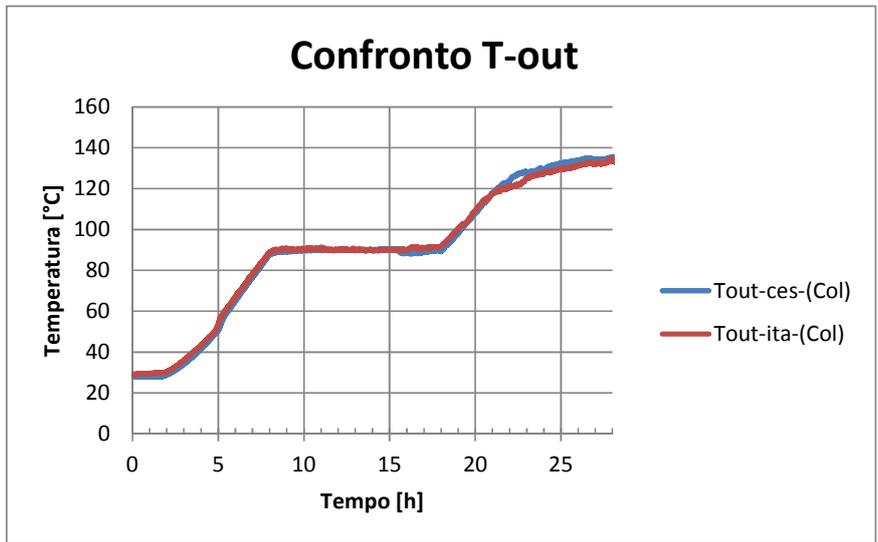


Figura 43: Confronto andamenti temperatura olio in uscita (Tout).

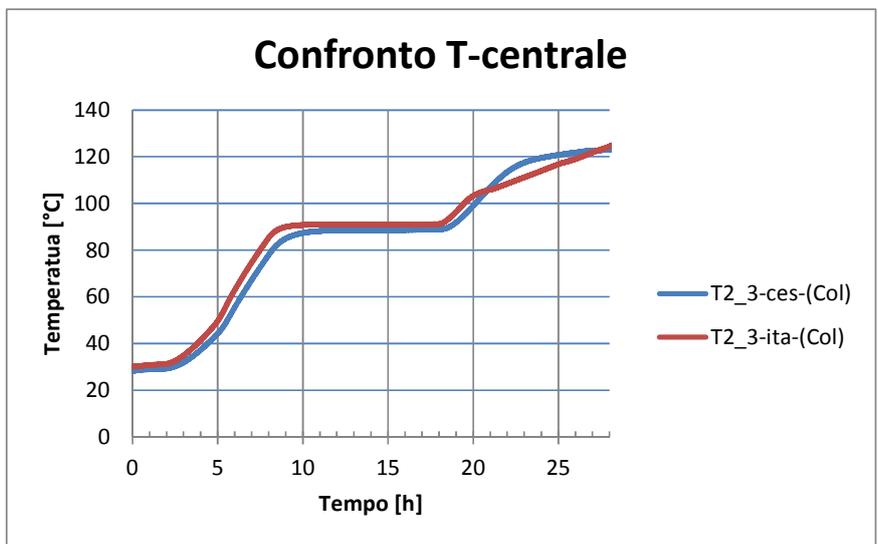


Figura 44: Confronto andamenti temperatura del calcestruzzo nel punto centrale della sezione 2 (T2,3).

Confronto dT-in,out

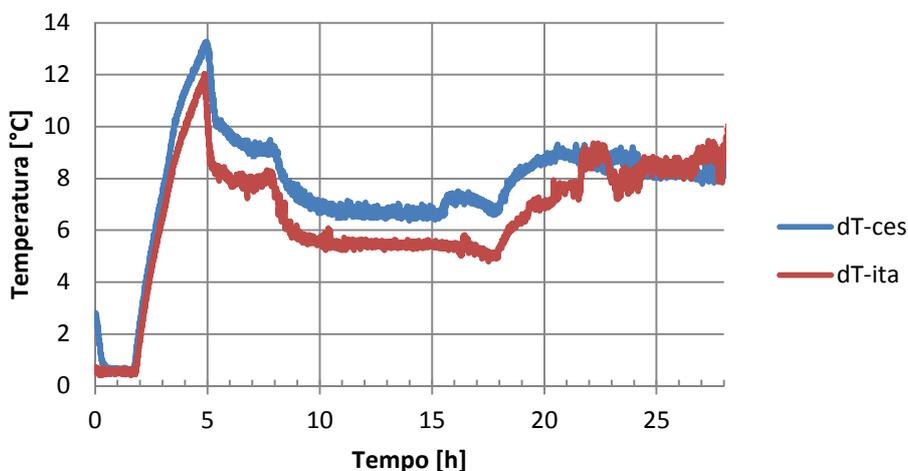


Figura 45: Confronto andamento del salto di temperatura ingresso uscita (Tin-Tout).

Per valutare le variazioni delle caratteristiche meccaniche dei due moduli indotte dai ciclaggi termici è stata condotta coll'impiego della tecnica degli ultrasuoni. I test sono stati condotti dal Laboratorio di Analisi non Distruttive SSPT-USER-SITEC dell'ENEA, utilizzando di un apparecchio ultrasonoro Siro RP 5000 CSD Figura 46. Gli ultrasuoni applicati sono onde meccaniche smorzate di frequenza maggiore di 20 KHz, generate da una sonda piezo-elettrica applicate sui lati Ovest ed Est a circa 20 cm dalle sezioni estremali come da Figura 46. Tali misure saranno ripetute al termine della campagna sperimentale relativa ai cicli di carico e scarico da condurre coll'impianto Solteca-3, previa rimozione della coibentazione delle parti interessate.

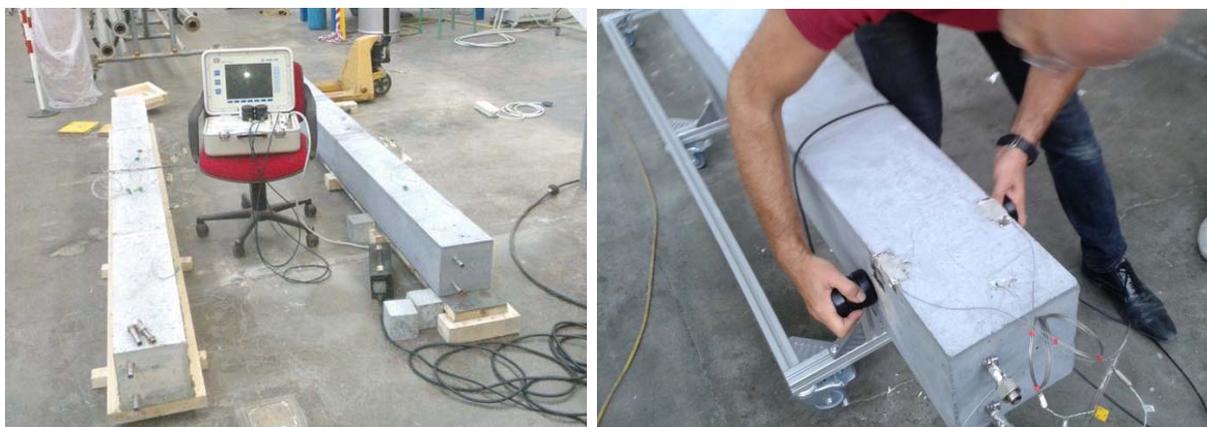


Figura 46: Misura delle caratteristiche meccaniche con tecnica ad ultrasuoni dopo lo scassero dei muduli e dopo ciclo di degasaggio.

I risultati delle misure dopo lo scassero e dopo il ciclo termico di degasaggio sono riportati in tabella 1 . La notevole minor velocità rilevata nel modulo a UNIPD-ITALCEMENTI 2826 m/s media rispetto a quella del modulo UNITN-CESTARO è dovuta alla differenza del modulo di Young dei due materiali non ciclati: 8 GPa contro 41 GPa. La variazione percentuale di velocità dopo il ciclo il degasaggio è del 15% per UNIPD-ITALCEMENTI e del 7,5% per UNITN-CESTARO. Va considerato che le variazioni della velocità suddette non sono da imputare completamente ad un degrado delle caratteristiche meccaniche essendo legate soprattutto alla perdita di acqua libera che si produce durante il ciclo di degasaggio; mentre la variazione che si avrà dopo i cicli di carico e scarico sarà interamente correlabile al degrado meccanico.

Tabella 1: Confronto misure UT

Dopo scassero				
Modulo	UNIPD-ITALCEMENTI		UNITN-CESTARO	
Misura	Sezione-1 m/s	Sezione -3 m/s	Sezione-1 m/s	Sezione -3 m/s
1	2849	2745	4246	4278
2	2841	2817	4283	4283
3	2874	2833	4274	4292
4	2865	2782	4292	4301
5	2865	2793	4319	4310
Valore medio	2858	2794	4282	4292
Dopo ciclo termico di degasaggio				
Modulo	UNIPD-ITALCEMENTI		UNITN-CESTARO	
Misura	Sezione-1 m/s	Sezione -3 m/s	Sezione-1 m/s	Sezione -3 m/s
1	2433	2395	3968	3960
2	2398	2345	3976	3976
3	2381	2347	3953	3984
4	2401	2342	3953	3992
5	2395	2350	3960	4000
Valore medio	2401	2355	3962	3982
Variazione UT (m/s)				
	457,2	438,2	320,8	310,4

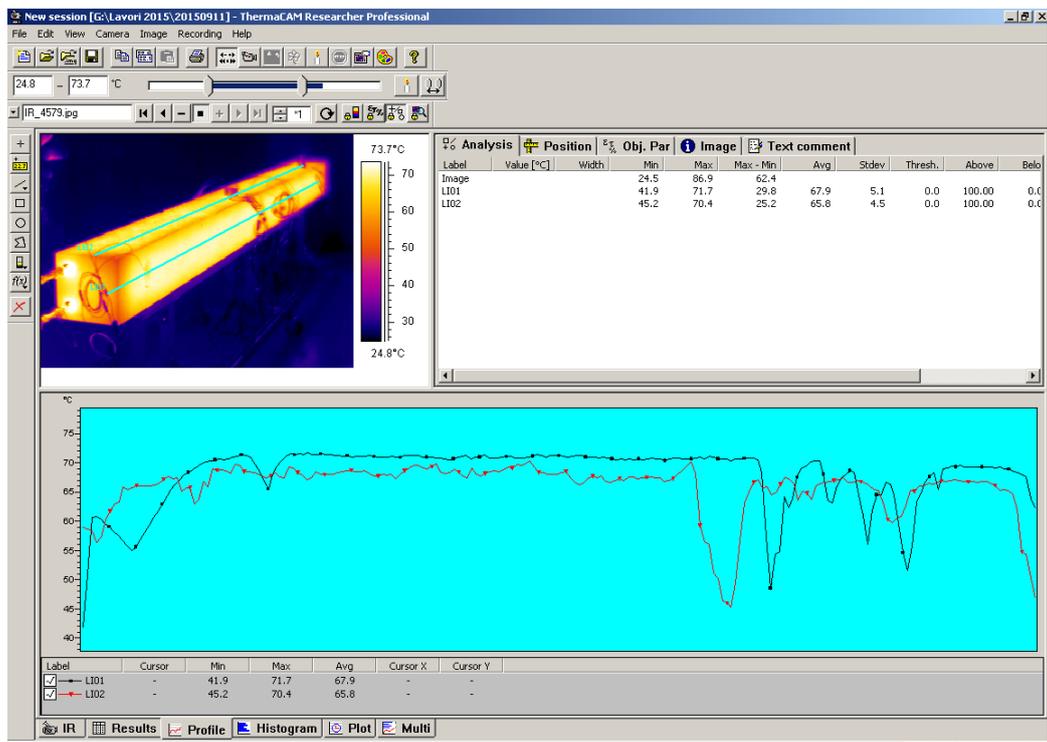


Figura 47: Rilievo termografico del campo di temperatura di modulo UNITN-CESTARO durante stazionario con set-point a 100°C.

Sono stati inoltre effettuati, da personale appartenente al Laboratorio di Analisi non Distruttive SSPT-USER-SITEC, dell'ENEA, rilievi con termocamera ThermaCAM S60 FLIR SYSTEM, dotata di rivelatore microbolometrico sensibile all'infrarosso con lunghezza d'onda tra gli 7,5-13 μm , intervallo che permette di limitare le interferenze dovute all'atmosfera. Le distribuzioni rilevate con la termo camera (Figura 47) sul modulo UNITN-CESTARO sono lievemente inferiori a quanto rilevato dalla termocoppie poste in superficie (Figura 39).

I due moduli sono stati sottoposti ad un esame visuale per evidenziare lo stato fessurativo dopo le varie fasi di maturazione, scasseramento e posizionamento sui supporti e conseguente al riscaldamento di degasaggio. Entrambi i moduli non hanno evidenziato fessurazioni durante la fase di maturazione, così come durante le operazioni di scasseramenti e posizionamento sugli elementi di supporto, mostrando quindi l'efficacia dei ferri di rinforzo impiegati. Si è però manifestata l'esigenza di realizzare dei sistemi di afferraggio posti sul dorso superiore in modo da facilitare la posa in opera di moduli sovrapposti, evitando l'impiego di fasce passanti al disotto del modulo.



Figura 48: Modulo UNIPD-ITALCEMENTI, fessurazioni a circa 90 cm durante lo stazionario con set-point a 160°C.



Figura 49: Modulo UNIPD-ITALCEMENTI, fessurazioni a circa 232 cm durante lo stazionario con set-point a 160°C.

In Figura 48 e in Figura 49 si riportano le fessurazioni rilevate sul lato Nord del modulo UNIPD-ITALCEMENTI, a caldo durante lo stazionario con set-point a 160°C. Durante il rilievo fotografico la temperatura media di superficie era di circa 90°C e quella media interna di circa 120°C. Tali fessurazioni sono però presenti oltre che nei punti qui riportati, in quasi tutte le posizioni interessate dalla presenza di una staffa e si propagano per un breve tratto in alcuni casi anche sulle pareti Est ed Ovest.

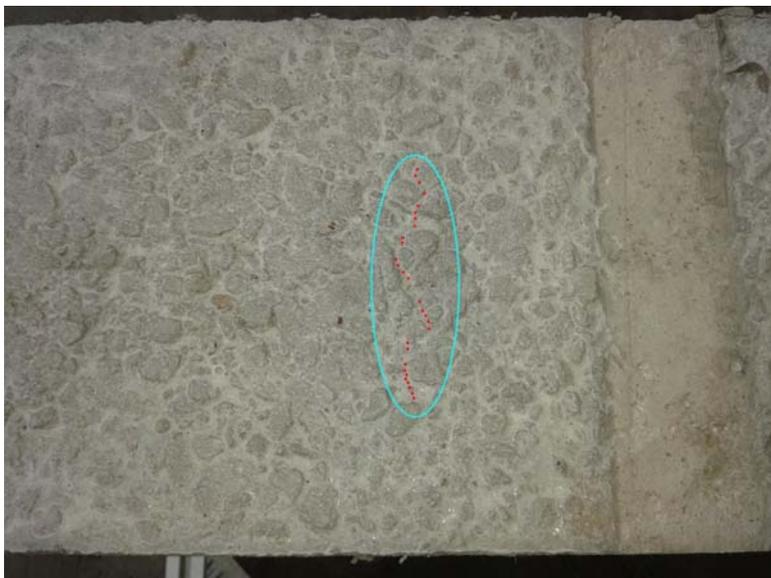


Figura 50: Modulo UNITN-CESTARO, fessurazioni a circa 70 cm dopo il ciclo di degasaggio.



Figura 51: Modulo UNITN-CESTARO, fessurazioni a circa 1993 cm dopo il ciclo di degasaggio.

Il modulo UNITN-CESTARO ha mostrato fessurazioni meno diffuse, limitate a due soli sezioni poste a 70 cm e 1993 cm circa (Figura 50 e Figura 51). I rilievi sono stati fatti con modulo freddo dopo ciclo di degasaggio; ciò rende meno evidenti le fessure e conferma come già evidenziato in precedenti campagne sperimentali che le fessurazioni sono prodotte dalla dilatazione differenziale tra calcestruzzo e armature più tubo di scambio. Un ulteriore conferma di ciò è data dalla disposizione delle fessure su direzioni prevalentemente trasversali.

2.8 Prova di riscaldamento e graduale raffreddamento del modulo ITALCEMENTI-UNIPD

Obiettivo della prova è l'effettuazione di un primo ciclaggio di riscaldamento a 280°C con moduli coibentati e moderato rateo di riscaldamento e raffreddamento. Dalle caratteristiche del circuito, del circolatore e del fluido si è impostata, per questo tipo di prova, una portata media volumetrica di circa 11 l/min, a cui corrisponde una velocità del fluido all'interno del tubo di scambio di 1,2 m/s.

I valori dei set-point del circolatore sono stati fissati come segue:

1. Si è avviato il riscaldatore portando la temperatura del set-point a 280 °C in 16 ore, partendo da temperatura ambiente.
2. Step di mantenimento del set-point a 280 °C per 5 h.
3. Discesa del set-point a 20 °C in 1h.
4. Mantenimento del set-point a 20°C per 24 h.
5. Ripetizione dei punti 1 e 2.
6. Arresto del circolatore e raffreddamento del modulo per convezione naturale fino a temperatura ambiente.

La Figura 52 e la Figura 53 mostrano i profili delle temperature sul tubo di scambio, rispettivamente nel modulo UNIPD-ITALCEMENTI e UNITN-CESTARO. Anche in questa prova si conferma l'effetto della rapida riduzione della viscosità dell'olio intorno ai 60 °C. L'adeguata coibentazione dei moduli ha permesso il raggiungimento delle temperature volute in fase di riscaldamento, mentre ha rallentato la fase di raffreddamento. A seguito della fermata del circolatore (step-6), la temperatura in uscita dai moduli (Tout) risulta scendere rapidamente a causa del parziale drenaggio dell'olio, contrariamente a quanto verificato in tutte le altre posizioni di acquisizione.

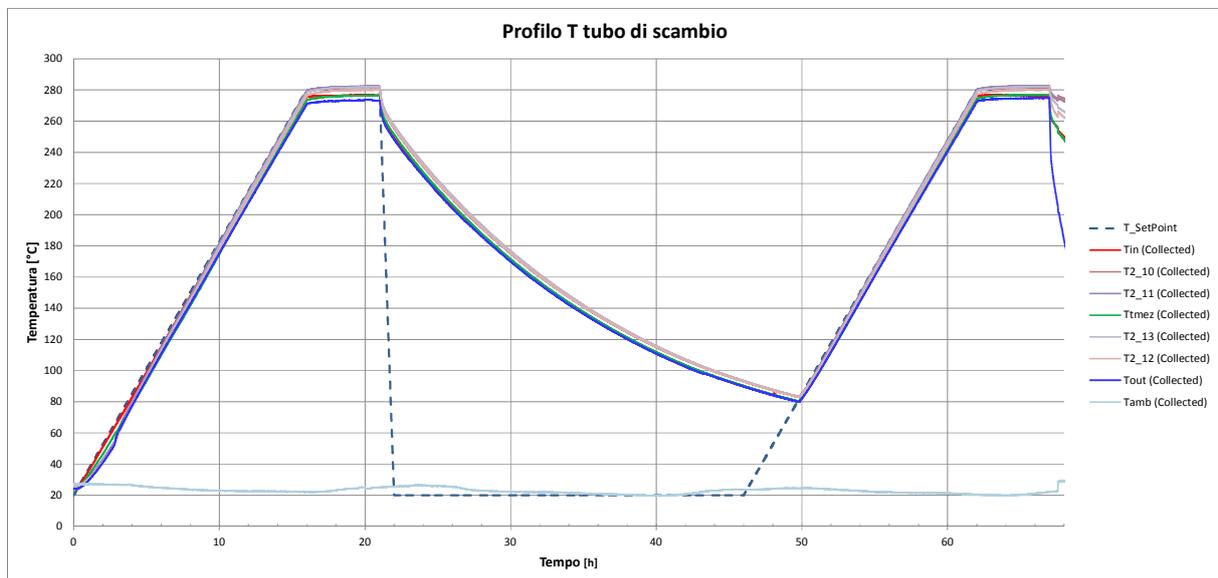


Figura 52: Andamento temporale delle temperature lungo il tubo di scambio nel test di riscaldamento del modulo UNIPD-ITALCEMENTI.

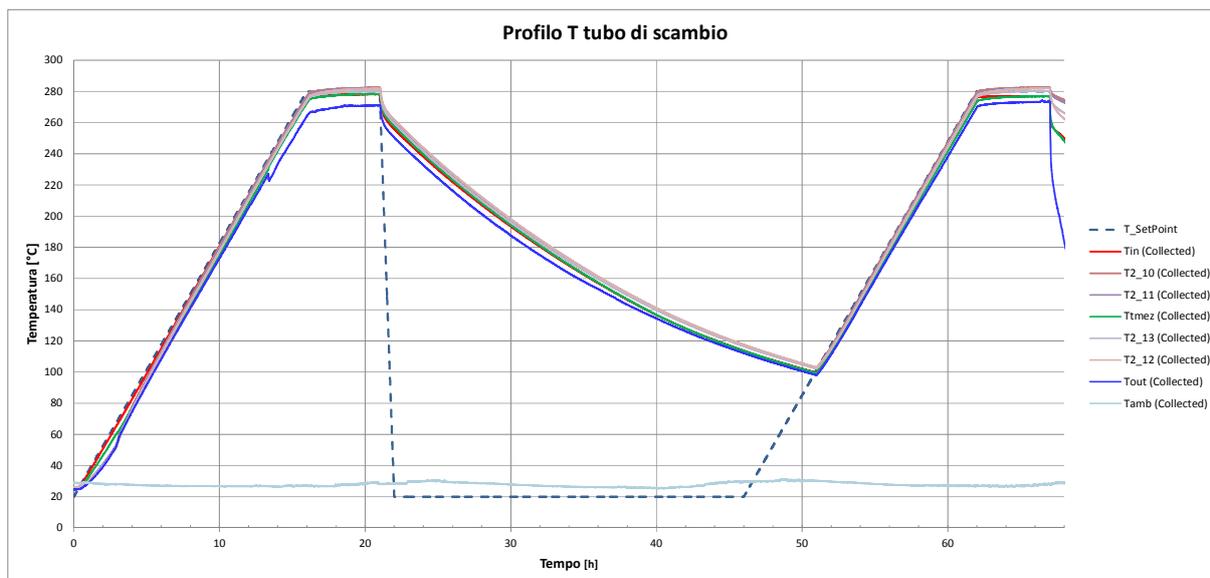


Figura 53: Andamento temporale delle temperature lungo il tubo di scambio nel test di riscaldamento del modulo UNITN-CESTARO.

Dall’esame degli andamenti di Figura 54, Figura 55, Figura 56 e Figura 57, relative alle temperature rilevate sulla sezione mediana di entrambi i moduli si nota quanto segue:

- Intorno alla settima - decima ora si ha un marcato aumento della differenza tra le temperature interne e di parete, non presente nel secondo ciclo, che è imputabile ad un secondo ed inaspettato rilascio di acqua libera, che ha prodotto un evidente ed intenso gocciolamento.
- Alla fine degli step di mantenimento a 280 °C, in UNIPD-ITALCEMENTI si ha un dT tra le temperature delle termocoppie T2,2 e T2,S di 18,5 °C, mentre in UNITN-CESTARO tale dT è di 14,1. Ciò conferma la maggiore conducibilità termica del calcestruzzo UNITN-CESTARO a parità di flusso termico.
- Per lo stesso motivo precedente, la temperatura massima nel modulo UNIPD-ITALCEMENTI è livemente maggiore dell’altra (279,5 contro 279,1 °C).

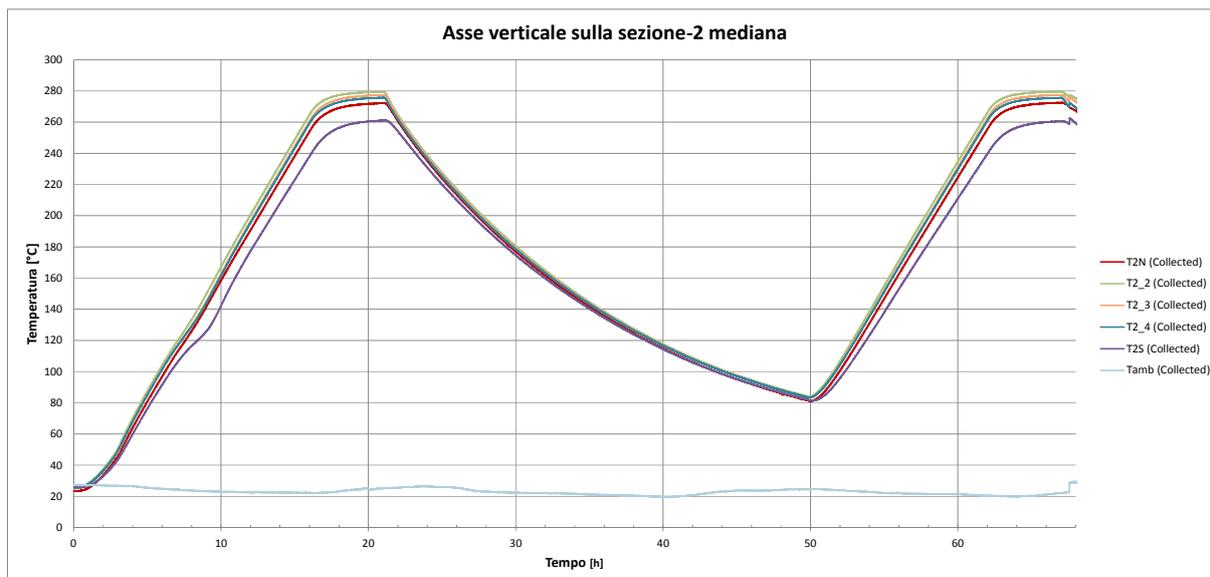


Figura 54: Andamento temporale delle temperature lungo l’asse verticale della sezione 2 mediana del modulo UNIPD-ITALCEMENTI.

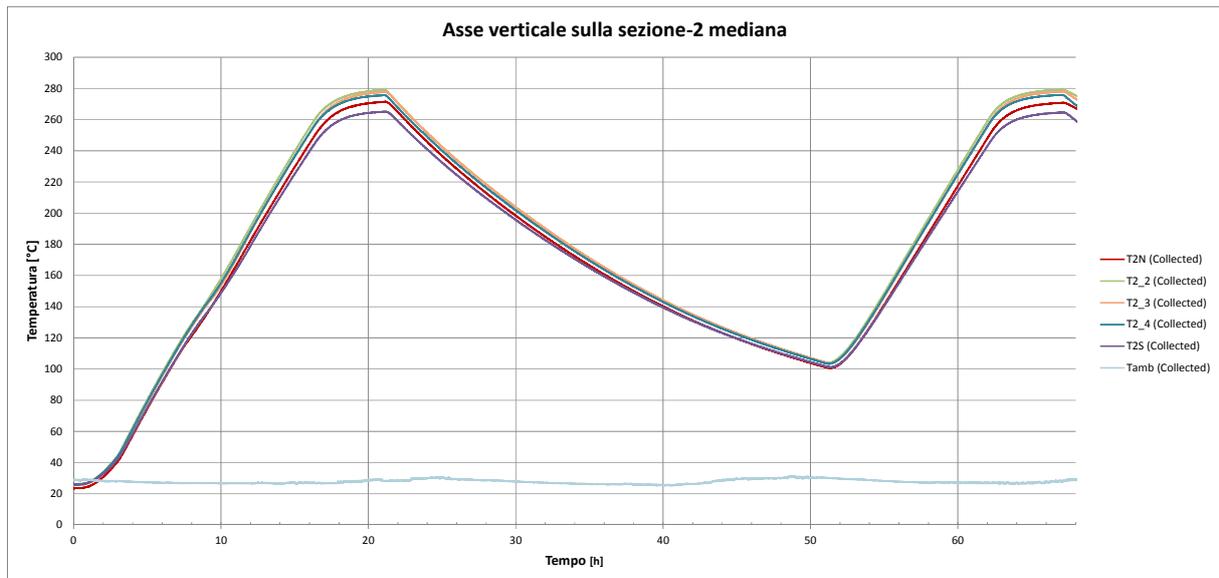


Figura 55: Andamento temporale delle temperature lungo l'asse verticale della sezione 2 mediana del modulo UNITN-CESTARO.

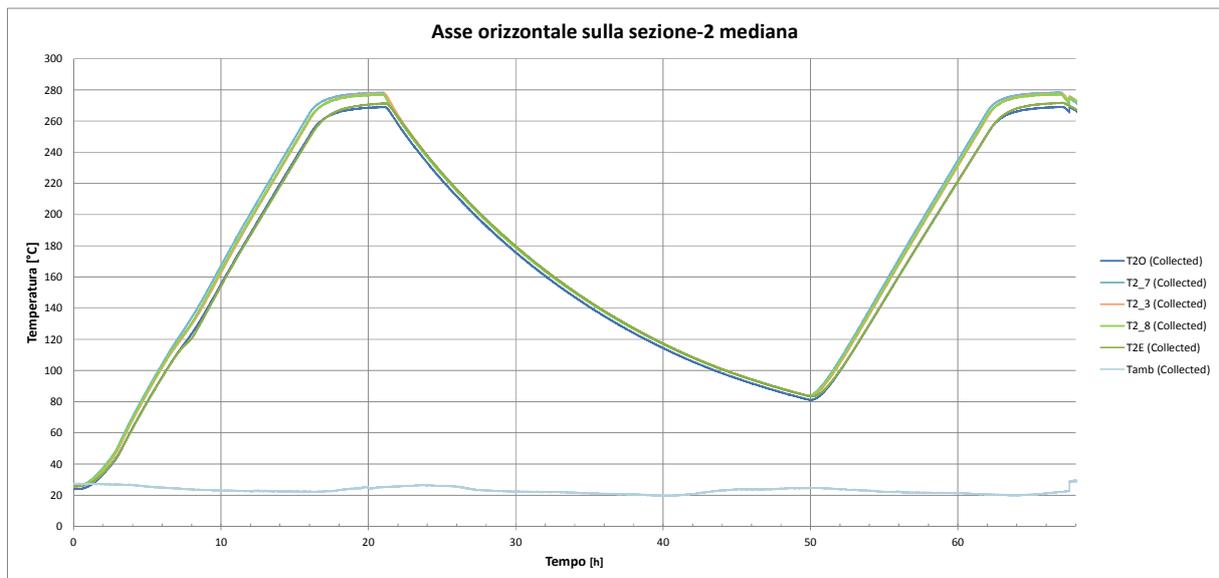


Figura 56: Andamento temporale delle temperature lungo l'asse orizzontale della sezione 2 mediana del modulo UNIPD-ITALCEMENTI.

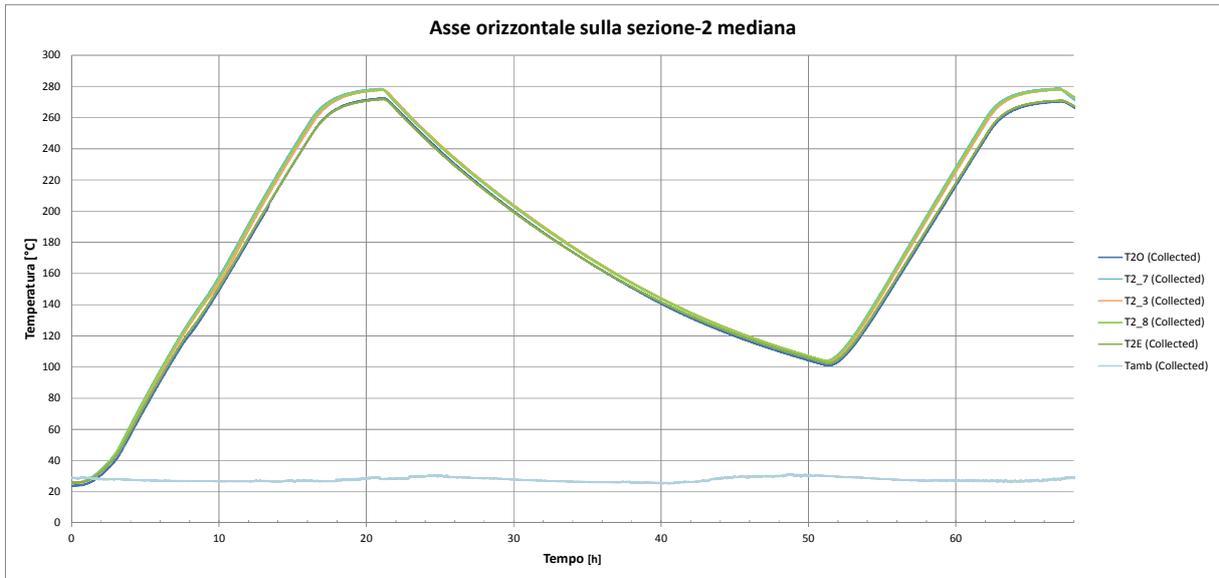


Figura 57: Andamento temporale delle temperature lungo l'asse orizzontale della sezione 2 mediana del modulo UNITN-CESTARO.

Analoghe considerazioni possono esser fatte per le sezioni iniziali e finali (Figura 58 Figura 59), oltre che per i lati Est ed Ovest (Figura 60, Figura 61, Figura 62 e Figura 63). Tutte le temperature esterne risultano piuttosto omogenee.

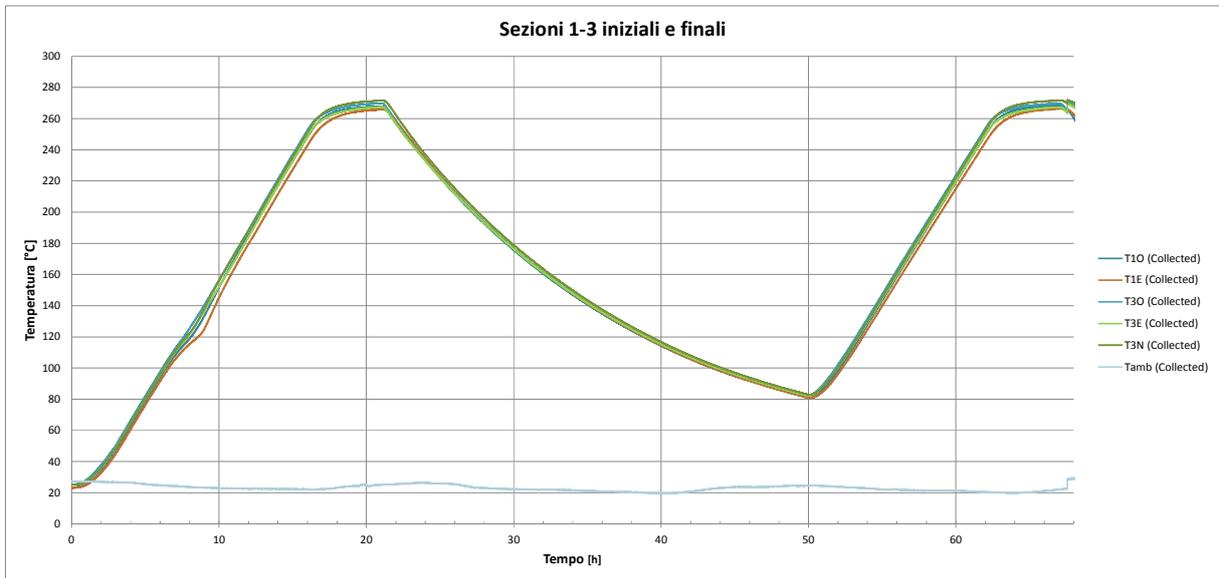


Figura 58: Andamento delle temperature sulle zone estreme del modulo UNIPD-ITALCEMENTI (sezioni 1 e 3).

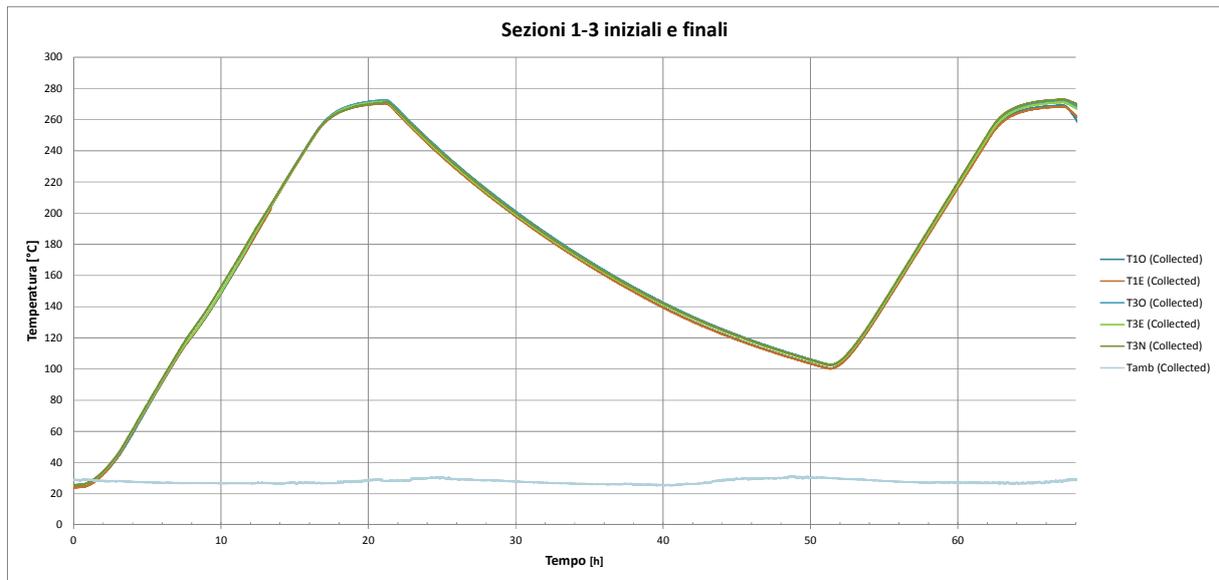


Figura 59: Andamento delle temperature sulle zone estreme del modulo UNITN-CESTARO (sezioni 1 e 3).

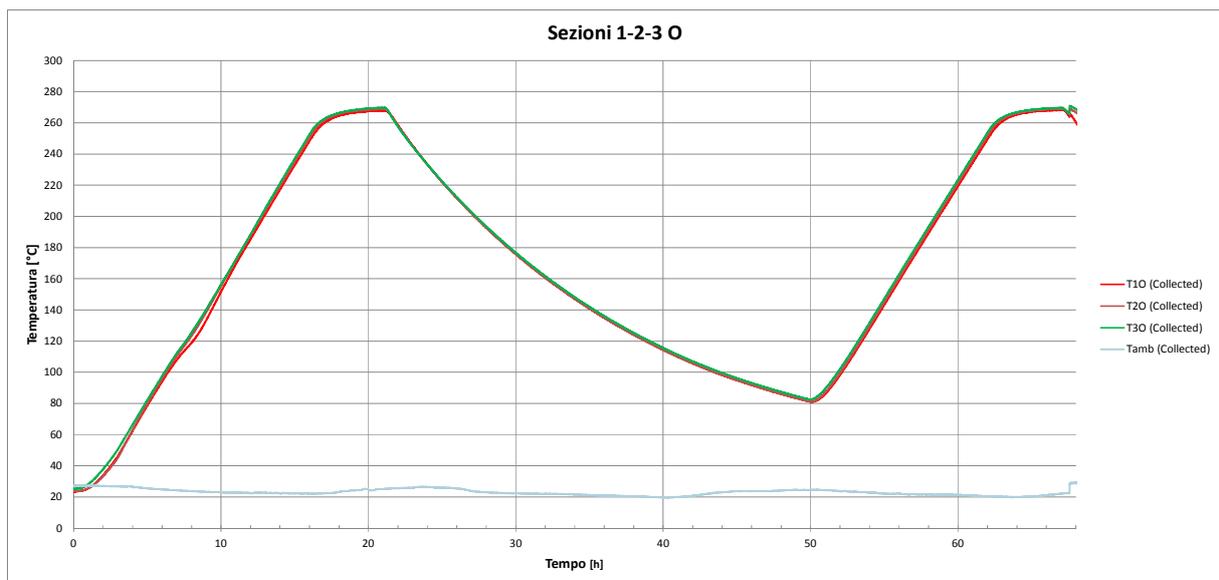


Figura 60: Andamento delle temperature sul lato Ovest del modulo UNIPD-ITALCEMENTI.

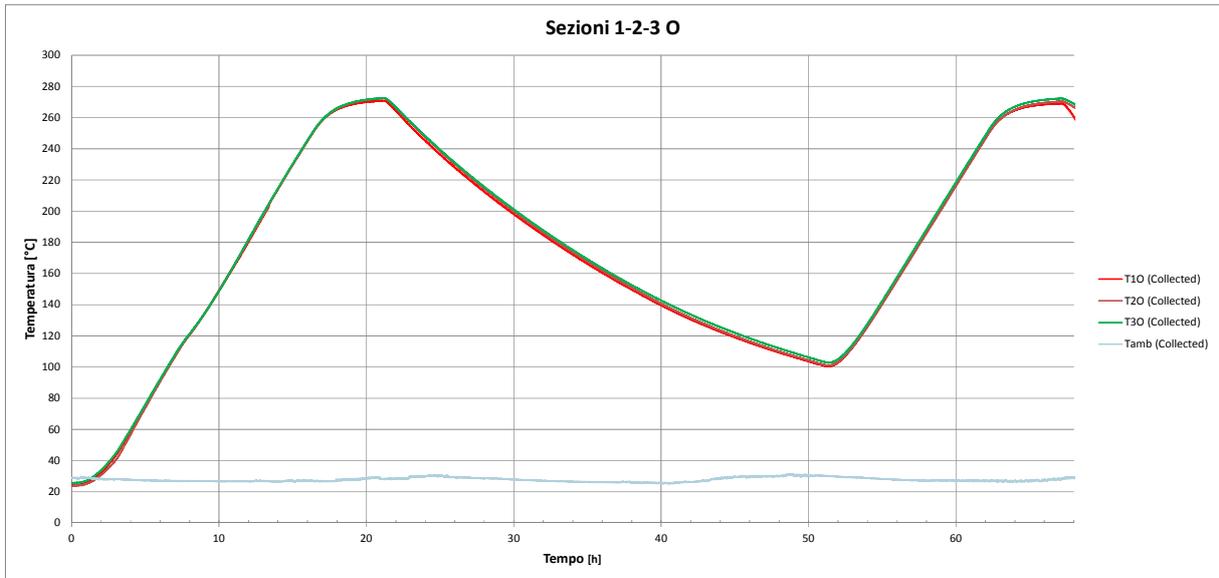


Figura 61: Andamento delle temperature sul lato Ovest del modulo UNITN-CESTARO.

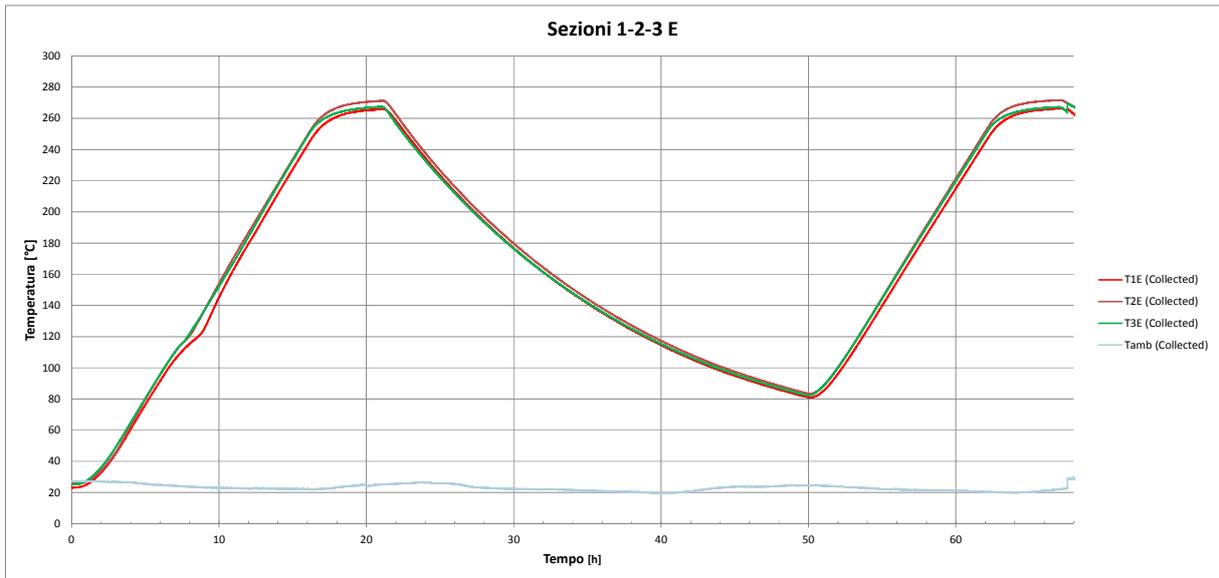


Figura 62: Andamento delle temperature sul lato Est del modulo UNIPD-ITALCEMENTI.

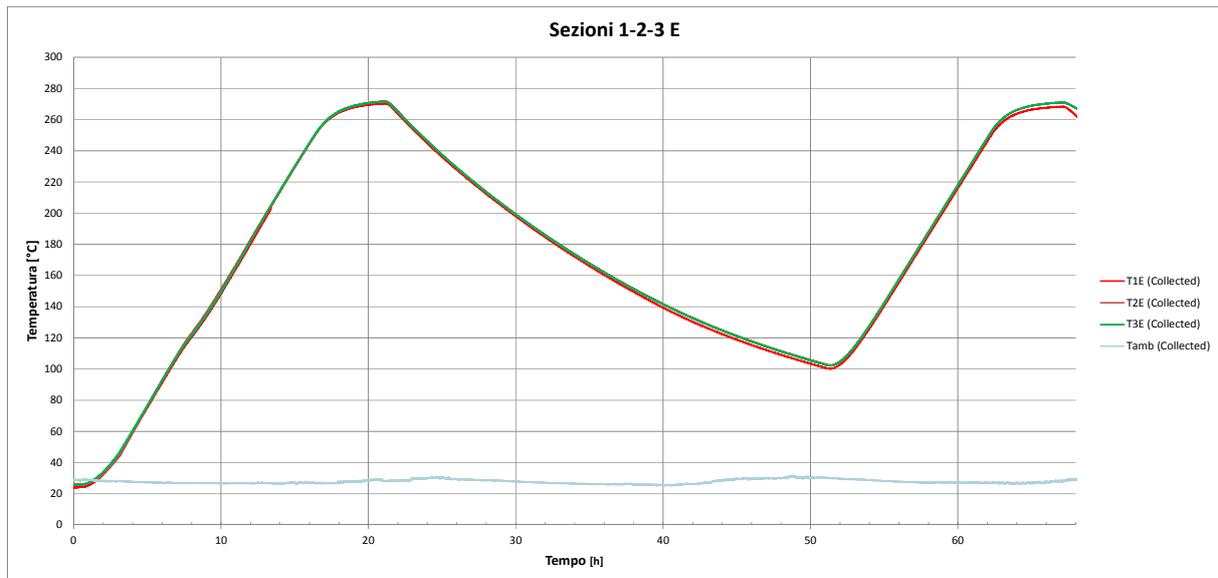


Figura 63: Andamento delle temperature sul lato Est del modulo UNITN-CESTARO.

2.9 Confronto comportamento dei due moduli nel test di riscaldamento e graduale raffreddamento

La figura 60 mostra il confronto degli andamenti della temperature centrale dei due moduli. Nella fase di raffreddamento in convezione naturale con circolazione dell'olio attiva, senza erogazione di potenza riscaldante, si evidenzia un maggior raffreddamento del modulo UNIPD-ITALCEMENTI, dovuto alla minor inerzia termica (ρc_p) di quest'ultimo (1752 contro $1968 \text{ kJ/m}^3\text{-K}$).

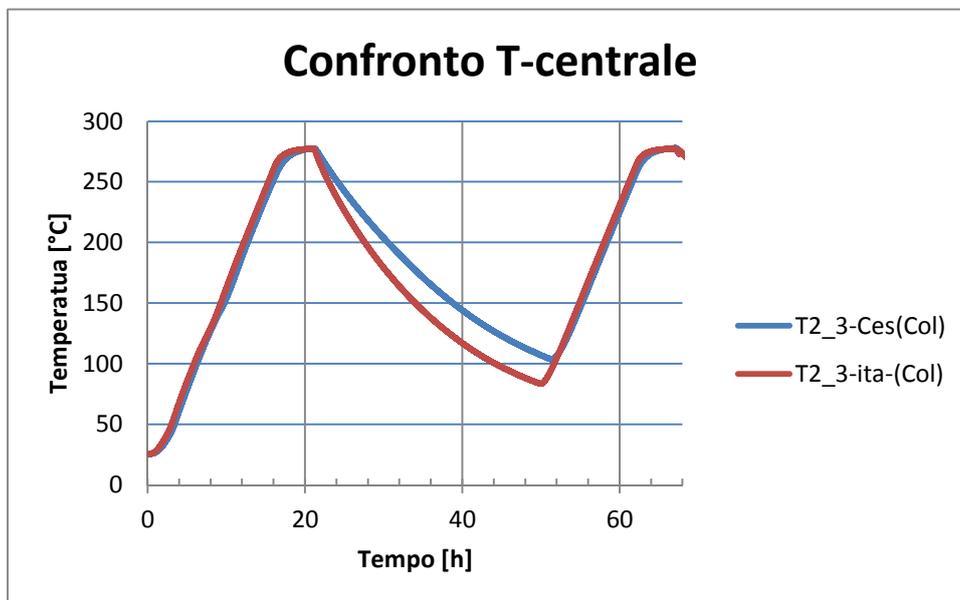


Figura 64: Confronto andamenti temperatura del calcestruzzo nel punto centrale della sezione 2 (T2,3).

Il confronto tra le temperature di ingresso (T_{in}) conferma quanto sopra detto (Figura 65), ed in più evidenzia la loro perfetta corrispondenza con il set-point in fase di riscaldamento. Il differente tempo di attacco del riscaldamento nel secondo ciclo è dovuto al raggiungimento della temperatura di set-point con quella effettiva del fluido nel serbatoio del circolatore.

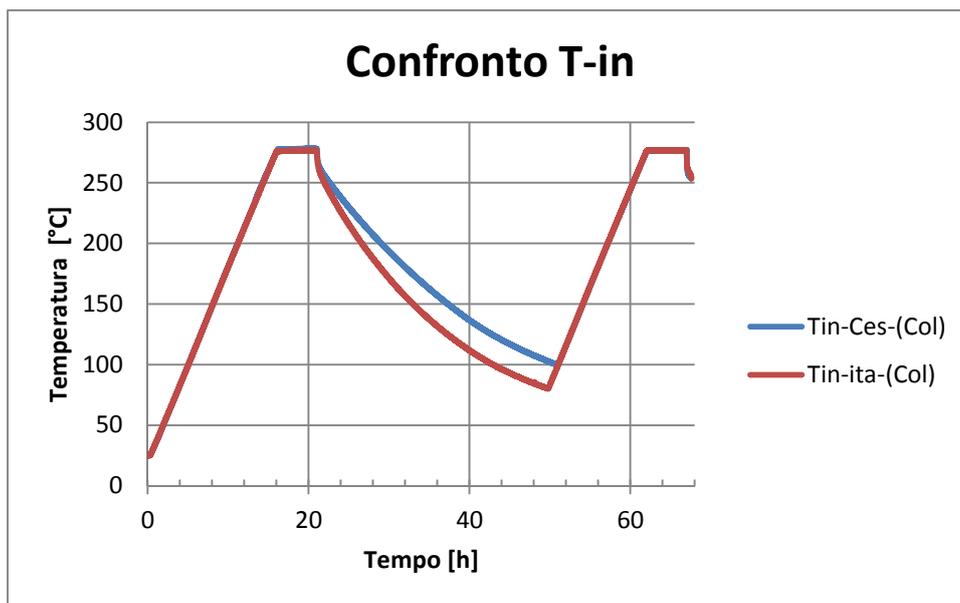


Figura 65: Confronto andamenti temperatura olio in ingresso (Tin).

3 Conclusioni

Il presente lavoro è stato finalizzato allo studio e alla sperimentazione di un sistema di accumulo termico a calore sensibile in matrice cementizia integrabile in un impianto solare a concentrazione a media temperatura, adatto in particolare alla produzione di energia elettrica mediante un sistema ORC, che richiede temperature di accumulo nel range dei 200-300 °C.

Per sperimentare il sistema di accumulo è stato progettato e realizzato un apposito impianto in grado di simulare le diverse fasi operative: di caricamento e di scaricamento dell'energia, operando fino ad una temperatura massima di 315 °C con una potenza termica di 25 kW.

La sperimentazione è stata effettuata su due distinti elementi di accumulo in calcestruzzo del peso di circa 280 kg, costituiti da un parallelepipedo 200x200x3000 mm realizzati uno dall'Università di Trento con il supporto della ditta Cestaro per la manifattura, l'altro realizzato da CTG Italcementi Group con la collaborazione dell'Università di Padova.

I moduli, dopo un sufficiente periodo di maturazione, sono stati trasportati nei laboratori dell'ENEA CR-Casaccia, dove sono state allestite le due sezioni di prova, comprensive di supporti per il sostegno e la movimentazione. E' stato inoltre realizzato il sistema acquisizione, in ambiente LabView, in grado non solo di registrare le grandezze di interesse per la sperimentazione (temperature, portata, pressione...), ma anche di impostare in maniera automatizzata le condizioni operative (set-point di temperatura e stato di apertura delle elettrovalvole).

Dopo la prima fase di degasaggio si è proceduto alla coibentazione dei moduli.

Allo stato attuale è stata completata la sperimentazione relativamente alla fase di degasaggio e sono state effettuate le prove preliminari per le fasi di caricamento e scaricamento ad alta temperatura.

In ogni caso la sperimentazione effettuata ha fornito risultati sufficienti a verificare le caratteristiche principali sia del materiale di accumulo che del fluido termico utilizzato e sono state di ausilio all'Università di Padova per realizzare la messa a punto dei modelli di simulazione (RdS/PAR2014/120).

Il comportamento termico-meccanico di entrambi i moduli si è rivelato più che soddisfacente confrontato con quanto sperimentato in altre ricerche a livello internazionale. La miscela prodotta da UNITN presenta una maggior capacità termica e resistenza meccanica. La miscela realizzata da CTG-Italcementi Group,

anche se ottenuta modificando un prodotto commerciale, finalizzato alla realizzazione di massetti per pavimenti radianti, ha mostrato nella sua attuale formulazione buone caratteristiche che con piccole modifiche mirate possono essere ulteriormente incrementate.

Non si può tuttavia ritenere esaustiva la campagna sperimentale svolta, che andrebbe completata in modo da ottenere le informazioni sulle prestazioni e della durabilità del componente sottoposto ad un numero adeguato di ciclaggi, necessarie per la futura industrializzazione del prodotto.

Una valutazione preliminare delle prestazioni del modulo di accumulo sviluppato ha evidenziato una capacità di accumulo di circa 6,4 kWh (con un delta T operativo di 100°C, tipica di unità ORC), con una stima del costo unitario dell'energia termica accumulata di circa 18 €/kWh. Questi dati andrebbero verificati analizzando in maniera più dettagliata il comportamento del componente inserito in un impianto reale. In ogni caso questi valori sono incoraggianti e spingono a continuare l'attività sia teorica che sperimentale sul materiale, sul lay-out del componente sulle tecniche di produzione industriale e sulla sua integrazione in un impianto CSP.

4 Riferimenti bibliografici

- R 1. D. Laing, WD. Steinmann, M. Fiß, R. Tamme, T. Brand, C. Bahl," Solid Media Thermal Storage Development and Analysis of Modular Storage Operation Concepts for Parabolic Trough Power Plants", Solar Energy Engineering, December 28, 2007.
- R 2. Y. Xu, DDL. Chung, "Cement of high specific heat and high thermal conductivity, obtained by using silane and silica fume as admixtures", Cement and Concrete Research 30 (2000) 1175-78.
- R 3. G. Chengzhou, Z. Jiaoqun, Z. Weibing, C. Wen, "Fabrication and Thermal Properties of a New Heat Storage Concrete Material", Journal of Wuhan University of Technology-Mater. August 2010.
- R 4. D. Laing, D. Lehmann, M. Fiß, C. Bahl," Test Results of Concrete Thermal Energy Storage for ParabolicTrough Power Plants", Solar Energy Engineering, vol. 131, November , 2009.
- R 5. PG. Bergan, CJ. Greiner, "A new type of large scale thermal energy storage", Energy Procedia 58 (2014) 152 – 159.
- R 6. JE. Skinner, BM. Brown, RP. Selvam, "Testing Of High Performance Concrete As A Thermal Energy Storage Medium At High Temperatures", Proceedings of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability ES2011 August 7-10, 2011, Washington, DC, USA.
- R 7. OB. Ozger, R. Di Maggio, GM. Giannuzzi, VA. Salomoni, CE. Majorana, et al.2013. "Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for Energy storage systems". Mater. Des. 51, 989–997.
- R 8. VA Salomoni, CE. Majorana, GM. Giannuzzi, R. Di Maggio, A. Miliozzi, et al. "Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants", Solar Energy 103 (2014) 303–315.
- R 9. CAST3M Users' Manual, 2013. <<http://www.cast3m.cea.fr/>>.