



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione termica di piccoli elementi di accumulo con calcestruzzi e SS-CPCM

A. Miliozzi, D. Mele, E. Veca, R. Liberatore, G. Napoli, G. Giorgi

Report RdS/PTR2019/120

CARATTERIZZAZIONE TERMICA DI PICCOLI ELEMENTI DI ACCUMULO CON CALCESTRUZZI E SS-CPCM.

A. Miliozzi, D. Mele, E. Veca, R. Liberatore, G. Napoli, G. Giorgi (ENEA)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2019-21

Obiettivo: 1

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

Pacco di lavoro: 2 Accumulo termico

Linea di attività: LA1 Test su accumulo termico in materiali cementizi compatti e con diatomite e con aggiunta di materiale a cambiamento di fase (SS-PCM)

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Pacco di Lavoro: Raffaele Liberatore, ENEA

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	7
2.1 IL MATERIALE E I PROVINI	7
2.2 L' APPARATO SPERIMENTALE	9
2.2.1 <i>La struttura</i>	9
2.2.2 <i>Il sistema di riscaldamento</i>	10
2.2.3 <i>Il sistema di raffreddamento</i>	10
2.2.4 <i>Il sistema di acquisizione</i>	11
2.3 LE PROVE SPERIMENTALI	13
2.4 RISULTATI SPERIMENTALI	14
2.5 DISCUSSIONE E CONFRONTO	17
3 CONCLUSIONI	21
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	22
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	22
APPENDICE A: RISULTATI PROVINO B1	23
<i>RISULTATI TEST B1-T1-R_1</i>	23
<i>RISULTATI TEST B1-T1-C_1</i>	25
<i>RISULTATI TEST B1-T1-R_2</i>	27
<i>RISULTATI TEST B1-T1-C_2</i>	29
<i>RISULTATI TEST B1-T2-R</i>	31
<i>RISULTATI TEST B1-T2-C</i>	33
<i>RISULTATI TEST B1-T3-R</i>	35
<i>RISULTATI TEST B1-T3-C</i>	37
<i>RISULTATI TEST B1-T4-R</i>	39
<i>RISULTATI TEST B1-T4-C</i>	41
APPENDICE B: RISULTATI PROVINO BP1	43
<i>RISULTATI TEST BP1-T1-R</i>	43
<i>RISULTATI TEST BP1-T1-C</i>	45
<i>RISULTATI TEST BP1-T2-R</i>	47
<i>RISULTATI TEST BP1-T2-C</i>	49
<i>RISULTATI TEST BP1-T3-R</i>	51
<i>RISULTATI TEST BP1-T3-C</i>	53
<i>RISULTATI TEST BP1-T4-R</i>	55
<i>RISULTATI TEST BP1-T4-C</i>	57

Sommario

Il presente studio è parte integrante del lavoro previsto nell'ambito della Linea di Attività LA1, relativa all'analisi della tecnologia di accumulo termico a calore sensibile e latente basata su materiali cementizi con PCM stabilizzato in forma e diatomite.

I sistemi di accumulo termico, oltre a fornire indubbi vantaggi nell'efficientamento dei processi produttivi industriali, possono favorire la decarbonizzazione del settore energetico supportando una crescente penetrazione delle fonti rinnovabili discontinue nel mix energetico. Ad oggi sono state sviluppate diverse soluzioni di accumulo termico, basate sia sul calore sensibile, sia sul calore latente, sia su sistemi combinati di calore sensibile/latente. La scelta della soluzione più idonea dipende ovviamente dalla specifica applicazione, ma l'obiettivo generale che guida lo sviluppo della tecnologia è il raggiungimento di una elevata densità di energia immagazzinata e la riduzione dei costi. Tra i mezzi di accumulo termico, il calcestruzzo è un materiale a basso costo, durevole e facile da produrre. I suoi costituenti sono largamente reperibili e non pongono criticità dal punto di vista ambientale. Se, ad oggi, le applicazioni principali del calcestruzzo, rinforzato con acciaio, sono state di tipo strutturale, recentemente si stanno prospettando altri campi di utilizzo, tra i quali l'accumulo dell'energia termica.

In particolare ENEA ha di recente proposto e analizzato un calcestruzzo con inclusioni di materiali compositi a cambiamento di fase (PCM), stabilizzati in forma (SS-CPCM). L'uso dei PCM aggiunti al calcestruzzo consente di ridurre le dimensioni dell'accumulo termico e contenere i costi grazie all'incremento della densità di energia associata al calore latente del cambiamento di fase. Al fine di limitare eventuali problemi di "leakage" del PCM dal calcestruzzo, si è stabilizzato il PCM facendolo assorbire da un materiale poroso, quale la diatomite.

Scopo specifico del presente lavoro, che si configura come la prosecuzione delle attività descritte nei Rapporti D1.1 e D1.2, relativi allo studio sperimentale di un modulo di calcestruzzo base e alla caratterizzazione di una miscela innovativa di calcestruzzo contenente anche sali nitrati micro-incapsulati in materiali fossili, è l'interpretazione del comportamento termico di piccoli elementi di accumulo termico costituiti da un tubo centrale in acciaio e da un guscio in calcestruzzo. In particolare il calcestruzzo utilizzato è stato precedentemente sviluppato da ENEA per applicazioni fino a 400°C, ed è stato additivato con piccole quantità di materiale composito a cambiamento di fase stabilizzato in forma, costituito da una miscela di nitrati di sodio e potassio assorbita in un mezzo poroso (diatomite). I provini, opportunamente coibentati per limitare le perdite termiche, sono stati testati sia in fase di carica che di scarica termica. La carica termica dei moduli in calcestruzzo è stata realizzata attraverso il riscaldamento delle pareti del tubo centrale per effetto joule, mentre il raffreddamento è stato effettuato attraverso il passaggio di aria compressa all'interno del tubo. I principali risultati ottenuti dalle prove sperimentali hanno evidenziato, come atteso, un buon incremento della capacità termica dei provini in calcestruzzo contenenti SS-CPCM e un inaspettato incremento della diffusività e conducibilità termica "apparenti", che rimangono inalterate anche dopo un numero significativo di cicli di carica/scarica; ciò dimostra la buona durabilità dell'elemento di accumulo. Tali caratteristiche dovranno essere confermate in futuro attraverso la realizzazione e caratterizzazione di elementi di accumulo termico in calcestruzzo/SS-CPCM di maggiori dimensioni.

1 Introduzione

I sistemi di accumulo dell'energia termica (TES) hanno la capacità di rendere più flessibile l'uso di risorse rinnovabili e più efficienti i sistemi produttivi industriali, attraverso il recupero e l'accumulo del calore di scarto che può essere riutilizzato a richiesta.

La scelta di un sistema TES per una particolare applicazione è guidata da diverse fattori, tra cui il costo, le prestazioni e l'integrabilità dell'accumulo con i processi considerati. Le prestazioni dei TES dipendono dalle caratteristiche termo-fisiche dei materiali di accumulo di calore (HSM), quali il calore specifico e la conduttività termica. In particolare la densità di energia immagazzinata è un parametro fondamentale nella valutazione delle prestazioni delle tecnologie di accumulo.

I materiali di accumulo a calore sensibile, sia solidi che liquidi, sono la soluzione di riferimento per i sistemi attualmente in commercio ma il limite della bassa densità di energia stoccata si traduce in grandi volumi impegnati e, di conseguenza, elevati costi di realizzazione. La ricerca sui sistemi a calore sensibile si sta pertanto muovendo su due traiettorie complementari: sviluppare materiali di accumulo con buone caratteristiche termiche ma a basso costo, e incrementare la capacità di accumulo specifica attraverso l'inclusione di opportune quantità di materiale a cambiamento di fase, che forniscano un contributo energetico aggiuntivo associato al calore latente.

A questo proposito, di recente è stato proposto e analizzato un nuovo HSM basato sul calcestruzzo con inclusioni di materiali compositi a cambiamento di fase stabilizzati in forma [1]. L'uso dei materiali a cambiamento di fase (PCM) sta guadagnando importanza in molti settori, come il teleriscaldamento, i sistemi di raffreddamento e l'edilizia. Al momento, però, questi nuovi materiali sono utilizzati a basse temperature e sviluppati prevalentemente per applicazioni di tipo residenziale..

Il calcestruzzo è un materiale fondamentale per lo sviluppo dell'ingegneria moderna e continua ad essere oggetto di studi e ottimizzazioni, sia per effetto del cambiamento delle fonti delle materie prime utilizzate, sia per le nuove possibili applicazioni legate al cambiamento della composizione e della microstruttura; l'evoluzione tecnologica di tale materiale è in parte guidata dalle nuove conoscenze sulle relazioni esistenti tra proprietà e microstruttura. Se, ad oggi, le applicazioni principali del calcestruzzo, rinforzato con acciaio, sono state di tipo strutturale, recentemente si stanno prospettando altri campi di utilizzo, tra i quali l'accumulo dell'energia termica. Il calcestruzzo è un promettente HSM solido perché ha un basso costo, una buona conduttività termica, non richiede un sistema di contenimento, è facile da produrre e durevole, i suoi principali costituenti sono largamente disponibili e non pongono criticità dal punto di vista ambientale.

Il suo principale limite è la bassa densità di accumulo termico, e pertanto i grandi volumi di stoccaggio termico. L'aggiunta di PCM nel calcestruzzo può consentire di ridurre le dimensioni dell'accumulo termico e contenere i costi, grazie all'incremento della capacità termica globale del sistema per effetto del calore latente associato al cambiamento di fase. Chiaramente la temperatura ottimale di funzionamento del sistema TES è il punto (o l'intervallo) di fusione del PCM, mentre la capacità termica del sistema TES è determinata principalmente dal calore latente del PCM. Al fine di limitare eventuali problemi di dispersione e fuoriuscita del PCM dal calcestruzzo, è possibile stabilizzare il PCM facendolo assorbire da un materiale poroso. Ad oggi non sono disponibili in letteratura lavori sperimentali sull'uso degli SS-CPCM ad alta temperatura, potenzialmente applicabili all'accumulo di calore per il recupero dei cascami termici industriali e la generazione di energia elettrica da fonte rinnovabile.

Lo scopo del presente lavoro, che si configura come la prosecuzione delle attività descritte nei Rapporti D1.1 [2] e D1.2 [3], è la caratterizzazione termica di un modulo costituito da un nuovo composito a base di calcestruzzo e SS-CPCM, sviluppato da ENEA ai fini dell'accumulo termico per applicazioni a medio/alta temperatura (<400°C).

In particolare è stata utilizzata una miscela di calcestruzzo identificata da ENEA in un precedente lavoro [4-6], a cui è stata aggiunta una piccola quantità (5% in peso) di "Sali Solari", una miscela di nitrato di sodio (60% in peso) e di nitrato di potassio (40% in peso), la cui fusione avviene nell'intervallo di temperatura 219-240°C. Per confinare il PCM all'interno del calcestruzzo, i sali sono stati impregnati nella diatomite

[7,8], una farina di origine fossile. In una precedente fase di questa attività, sono state determinate le proprietà termiche e meccaniche del calcestruzzo semplice e di quello additivato con SS-PCM [3] in funzione della temperatura operativa (fino a 400°C). In questo lavoro si è proceduto alla caratterizzazione ed interpretazione del comportamento termico di piccoli elementi di accumulo formati da un tubo di scambio termico centrale in acciaio e da un guscio di materiale di accumulo termico.

I provini, opportunamente coibentati per limitare le perdite termiche, sono stati testati sia in fase di carica che di scarica termica. La carica termica dei moduli in calcestruzzo è stata realizzata attraverso il riscaldamento delle pareti del tubo centrale per effetto joule, mentre il raffreddamento è stato effettuato attraverso il passaggio di aria compressa all'interno del tubo. I risultati ottenuti per i due materiali (calcestruzzo con e senza SS-CPCM) sono stati messi a confronto.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Il materiale e i provini

Il mezzo di accumulo termico oggetto della presente investigazione sperimentale è costituito da una matrice di calcestruzzo “base” in cui è stata dispersa una piccola quantità di PCM (nel caso specifico Sale Solare) stabilizzato in forma tramite assorbimento in un mezzo poroso (diatomite) [6].

Le caratteristiche dei materiali utilizzati e dei provini realizzati sono descritte nel dettaglio in [3].

In particolare con il nuovo calcestruzzo ed il composto PCM/diatomite sono stati realizzati una serie di provini cilindrici pieni, sia lunghi ($De=10\text{cm}$ e $H=20\text{cm}$) che corti ($De=10\text{cm}$ e $H=10\text{cm}$), e una serie di provini cilindrici con tubo di scambio immerso ($L=50\text{cm}$ e $De=10\text{cm}$), mostrati in Figura 1.



Figura 1- I provini realizzati, liberati dai casseri e pronti per la caratterizzazione.

Come evidenziato in [3], tutti i provini sono stati sottoposti a degassaggio, per estrarne l’acqua libera presente al loro interno. Questa, se non eliminata, potrebbe infatti condurre, a causa di sovrappressioni interne, al danneggiamento dei provini a temperature elevate, se non addirittura a fenomeni di esplosione (spalling). I provini cilindrici pieni sono stati trattati termicamente a 200°C , 300°C e 400°C per poter poi essere caratterizzati in funzione del trattamento subito. I risultati ottenuti sono descritti dettagliatamente in [3] e sinteticamente riportati in Tabella 1.

Tabella 1 – Principali proprietà medie misurate tra 200 e 400°C del calcestruzzo con o senza PCM.

Proprietà media	Calcestruzzo Base (CLSB)	Calcestruzzo con PCM/diatomite (CLSP)	Variazione
Densità (kg/m^3)	2398	2404	0.22%
Conducibilità ($\text{W}/\text{m}/\text{K}$)	1.77	1.82	2.64%
Calore specifico ($\text{J}/\text{kg}/\text{K}$)	607	683	12.62%
Capacità volumetrica ($\text{J}/\text{m}^3/\text{K}$)* 10^6	1.43	1.58	10.26%
Diffusività (m^2/s)* 10^{-6}	1.14	1.16	1.76%
Effusività ($\text{J}^*\text{s}^{0.5}/\text{m}^2/\text{K}$)	1584	1691	6.77%
Calore latente effettivo (J/kg)	0	5800	--

Invece, i provini cilindrici con tubo di scambio immerso, le cui caratteristiche geometriche sono riportate in Tabella 2, sono stati conservati per essere sottoposti ad una caratterizzazione termica a differenti livelli di

temperatura, utilizzando l'impianto sperimentale denominato Solteca-Air, dopo essere stati opportunamente coibentati con lana di roccia (Figura 2). La caratterizzazione termica di tali provini è oggetto specifico del presente lavoro e viene descritta nei seguenti paragrafi.

Tabella 2 – Dimensioni dei provini cilindrici con tubo di scambio immerso.

Dimensioni		
Tubo AISI 316		
Lunghezza	700	mm
Diametro esterno	19.05	mm
Spessore	1.65	mm
Calcestruzzo		
Lunghezza	500	mm
Diametro esterno	100	mm
Diametro interno	19.05	mm
Coibentazione(Rockwool)		
Spessore	90	mm
Diametro interno	100	mm
Lunghezza	550	mm

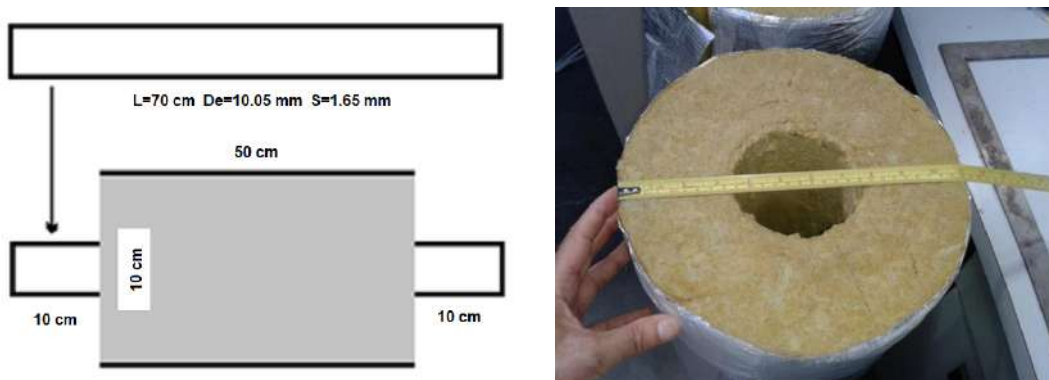


Figura 2- Layout provino e immagine coibentazione circonferenziale.

Le facce laterali sono coibentate con un disco dello stesso materiale isolante utilizzato radialmente, dallo spessore di 25 mm.

2.2 L'apparato sperimentale

L'apparato sperimentale utilizzato, denominato SoltecaAir, è stato progettato e realizzato durante il PAR2013 della ricerca di Sistema Elettrico 2012-2014 [9] per la caratterizzazione di moduli di accumulo termico a medio alta temperatura (<400°C).

2.2.1 La struttura

L'apparecchiatura sperimentale è costituita da un'incastellatura, realizzata in tubolari a sezione rettangolare, al cui interno vengono allocati i provini soggetti a ciclaggi termici. All'occorrenza, possono essere presenti due lamiere laterali per garantire sicurezza nel caso di spalling del materiale. L'incastellatura tiene sospeso il provino tramite catene metalliche o appositi afferraggi. La sospensione del provino permette che le dilatazioni termiche avvengano liberamente. Nella presente campagna sperimentale il provino è costituito da un tubo di acciaio dal diametro esterno di circa 14-20 mm, affogato all'interno di un cilindro di calcestruzzo di lunghezza variabile tra 50 cm e 1 m e dal diametro esterno di circa 10 cm, opportunamente coibentato.

In Figura 3 è mostrata una vista isometrica dell'apparecchiatura sperimentale, ottenuta utilizzando un CAD 3D parametrizzato. Inoltre, sono mostrate anche una vista frontale e una vista dall'alto, in cui sono visibili i componenti del provino e il sistema di afferraggio dello stesso all'incastellatura. Sulla parte superiore dell'incastellatura è stata prevista la realizzazione di due profilati a L, per permettere di testare provini di diverse lunghezze.

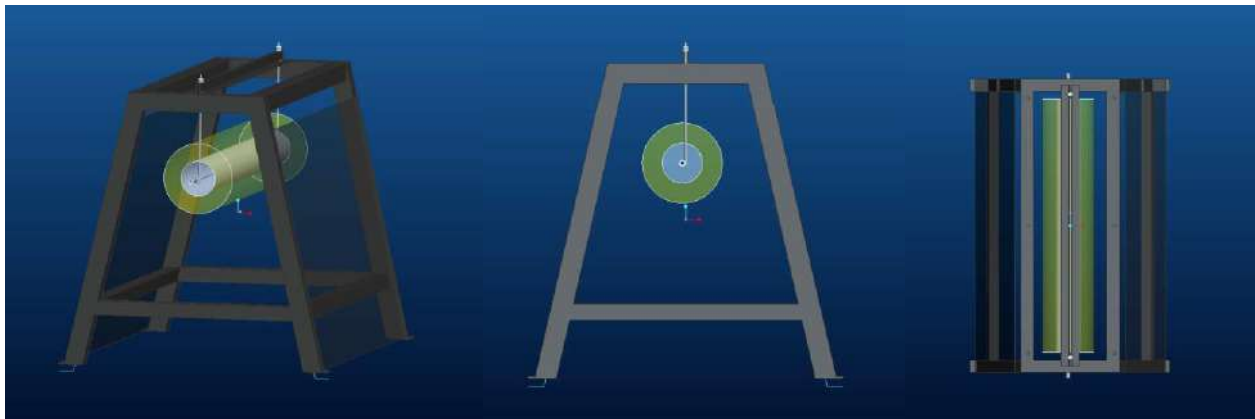


Figura 3- Vista isometrica, frontale e dall'alto dell'apparecchiatura sperimentale

Infine, in Figura 4 si può notare l'apposizione di lamiere laterali, per limitare, qualora si dovessero verificare, gli effetti dell'esplosione del calcestruzzo in presenza di un primo gravoso e rapido riscaldamento (spalling).

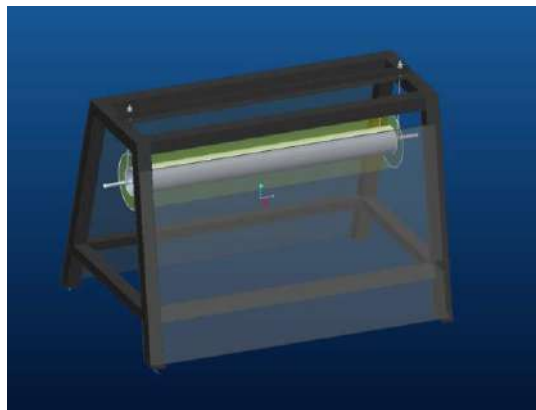


Figura 4- Vista isometrica dell'apparecchiatura sperimentale con lamiere protettive

In Figura 5 è mostrata una immagine dell'apparecchiatura sperimentale su cui è installato un provino di calcestruzzo di lunghezza pari a 50 cm. Nella Figura è anche visibile la strumentazione collegata, descritta in seguito nel dettaglio.

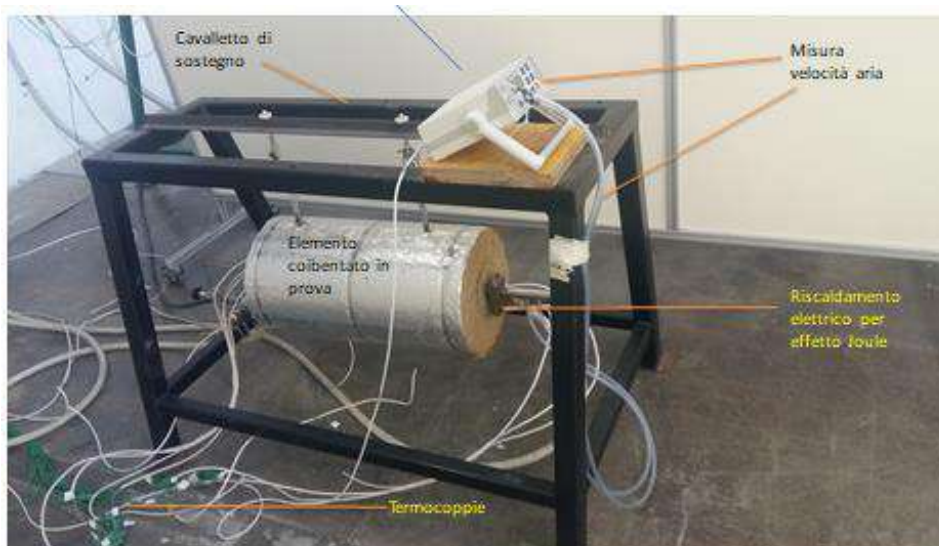


Figura 5- Foto dell'apparecchiatura sperimentale realizzata con installato un provino di calcestruzzo da 50 cm opportunamente strumentato

2.2.2 Il sistema di riscaldamento

Il riscaldamento del provino avviene per effetto Joule, facendo passare corrente nel tubo centrale, e il controllo viene effettuato tramite un trasformatore. Infatti, agli estremi del tubo di acciaio vengono connessi due morsetti per indurre il passaggio di una corrente elevata, in bassa tensione, regolabile per ottenere la temperatura di set del tubo, comunque inferiore a 400°C. L'acquisizione e il controllo della temperatura è effettuato attraverso il programma LabVIEW.

Le specifiche tecniche massime del trasformatore adottato sono le seguenti: potenza pari a 5 kVA e corrente pari a 1000 A. Queste specifiche consentono di raggiungere una temperatura media del tubo pari a 400 °C in un tempo accettabile. Infatti, considerando la resistività dell'acciaio e una temperatura ambiente di 25°C, la temperatura media di target (400°C) è ottenuta in breve tempo tramite l'impiego di una corrente nell'intervallo 150-200 A e una tensione dell'ordine di 1÷3 V.

2.2.3 Il sistema di raffreddamento

Il raffreddamento del sistema è effettuato tramite l'insufflaggio di aria compressa all'interno del tubo di acciaio. Un'elettrovalvola comandata dal sistema di controllo LabVIEW apre e chiude il sistema di aria compressa, sino al raggiungimento della temperatura desiderata.

La velocità dell'aria è variabile nell'intervallo operativo 10-12 m/s.

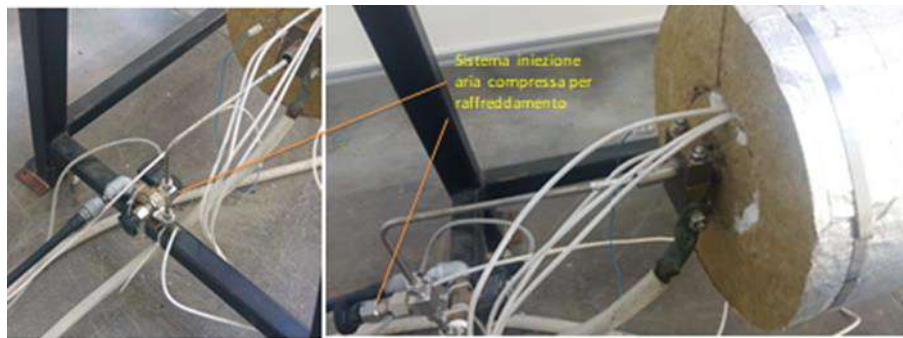


Figura 6- Foto con particolari del dispositivo di raffreddamento dell'apparecchiatura sperimentale

2.2.4 Il sistema di acquisizione

L'acquisizione dei dati e il controllo della strumentazione sono effettuati attraverso un programma ad-hoc sviluppato su piattaforma LabVIEW.

In Figura 7 si riporta lo schema semplificato del sistema di acquisizione e controllo dell'apparecchiatura, e la corrispondente finestra utente di LabVIEW.

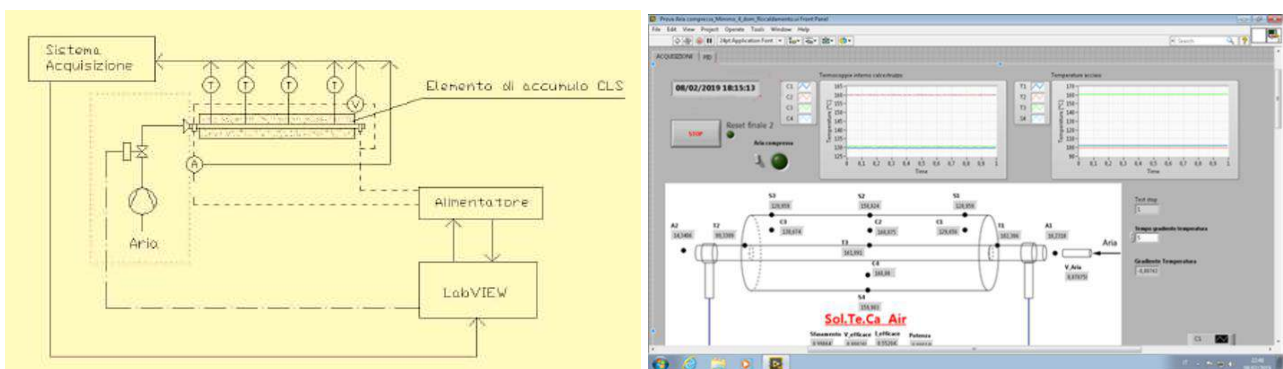


Figura 7- a) Schema di controllo ed acquisizione in LabVIEW per l'apparecchiatura sperimentale SoltecaAir; b) Finestra utente LabVIEW

Per l'acquisizione della temperatura del tubo in acciaio e della temperatura in diversi punti e sezioni del provino in calcestruzzo sono utilizzate termocoppie di tipo K.

Vengono utilizzate in totale 13 termocoppie, così identificate:

- A1 e A2: temperatura dell'aria in ingresso e in uscita dal tubo di scambio;
- T1 e T2: temperatura all'esterno del tubo di acciaio, in prossimità della zona di contatto acciaio-calcestruzzo;
- T3: temperatura al centro del provino, nella zona di contatto acciaio-calcestruzzo;
- S1 e S3: temperatura sulla superficie esterna del calcestruzzo, a 2.5 cm dai bordi laterali;
- S2 e S4: temperatura sulla superficie esterna del calcestruzzo, al centro del provino;
- C1 e C3: temperatura nel calcestruzzo, a 2.5 cm dai bordi e a circa 2 cm di profondità dalla superficie esterna;
- C2 e C4 misurano la temperatura nel calcestruzzo, al centro del provino e a circa 2 cm di profondità dalla sup. esterna.

Nella Figura 8 sono indicati i punti di acquisizione delle temperature e in **Tabella 3** le corrispondenti coordinate.

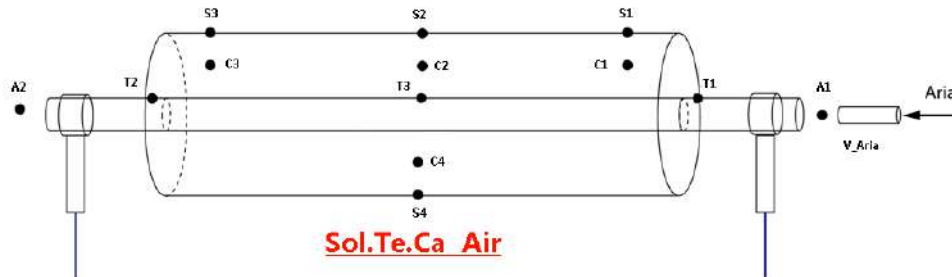


Figura 8- Disposizione dei punti di acquisizione delle temperature per SoltecaAir

Tabella 3 – Coordinate della posizione delle termocoppie dei provini in calcestruzzo con o senza PCM (con x coordinata assiale da T2 a T1 ed r coordinata radiale)

Posizione Termocoppie		
TC	x(cm)	r(cm)
S1	47.5	5.1
S2	25	5.1
S3	2.5	5.1
S4	25	-5.1
C1	47.5	3.1
C2	25	3.1
C3	2.5	3.1
C4	25	-3.1
T1	50	0.95
T2	0	0.95
T3	25	0.95

L'elettrovalvola che attiva l'aria compressa per il raffreddamento del sistema è azionata da un'apposita scheda di comando LabVIEW con una funzione on/off (Figura 9).



Figura 9- Sistema di acquisizione della velocità dell'aria e cavi di misura

Anche l'attivazione del regolatore di tensione del trasformatore avviene tramite un'apposita scheda di comando di LabVIEW, con una logica di controllo del tipo P.I.D. (Proporzionale-Integrale-Derivativo). Il raggiungimento e il mantenimento della temperatura di target (corrispondente alla termocoppia T3) per tutta la durata dell'esperimento è garantita attraverso la modulazione continua della tensione del trasformatore.

2.3 Le prove sperimentali

Lo scopo della sperimentazione è la valutazione del comportamento termico di un materiale cementizio, appositamente studiato per lavorare a temperature medio-alte e con eventuale presenza di PCM stabilizzato in forma, quando è soggetto a ripetuti cicli termici.

I provini utilizzati sono di due tipi, uno realizzato con il solo calcestruzzo base e l'altro con lo stesso calcestruzzo e l'aggiunta del 5% in peso di PCM (Sale Solare). Entrambi i provini sono stati sottoposti alla sola fase di degassamento a 105°C, senza altri trattamenti termici preliminari, e sono stati identificati rispettivamente con le sigle B1 e BP1.

Ciascuno dei test eseguiti sui due provini è costituito da due fasi distinte:

1. Riscaldamento del provino fino al raggiungimento dello stato stazionario relativo alla temperatura minima di prova;
2. Ciclaggio termico del provino tra una temperatura minima e una temperatura massima (6 o 12 cicli).

Il ciclaggio termico prevede l'esecuzione di 6 cicli in sequenza. Solo nel caso del test di durabilità i cicli sono incrementati a 12. Ciascun ciclo è pertanto costituito dai seguenti step:

- Rampa di salita della temperatura target dalla temperatura minima alla temperatura massima;
- Temperatura target costante e pari alla temperatura massima per un certo intervallo temporale, fino alla stabilizzazione della temperatura del provino;
- Rampa di discesa della temperatura target dalla temperatura massima alla temperatura minima;
- Temperatura target costante e pari alla temperatura minima per un certo intervallo temporale, fino alla stabilizzazione della temperatura del provino.

In Tabella 4 è riportato l'elenco delle prove e il loro identificativo.

Tabella 4 – Elenco prove eseguite per ciascun provino

ID prova	Temperatura Minima (°C)	Temperatura Massima (°C)	Nr cicli
T1	200	240	6
T2	260	300	6
T3	360	400	6
T4	200	240	12 o più

In Tabella 5 è riportato l'elenco delle prove svolte e le date in cui sono avvenute.

Tabella 5 – Elenco e data prove eseguite

ID prova	Provino B1	Provino BP1
T1	12/2/2019 14/2/2019	3/5/2019
T2	28/2/2019	7/5/2019
T3	6/3/2019	9/5/2019
T4	12/3/2019	29/5/2019

2.4 Risultati sperimentali

I risultati dei test eseguiti sono classificati sulla base dell'identificativo del provino, della prova e della fase di riscaldamento (R) o ciclaggio (C): ad esempio B1-T1-R riguarda la fase di riscaldamento della prova T1 relativa al provino B1. In caso di iterazione della prova, viene aggiunta una cifra ulteriore aggiornata in ordine cronologico: ad esempio, B1-T1-C_2 si riferisce alla fase di ciclaggio della prova T1 su B1, avvenuta il 14/2/2019 .

In Appendice (A-R) sono riportati i risultati dei test in termini di grafici rappresentativi dei cicli termici e degli andamenti delle grandezze misurate.

In particolare nei grafici sono evidenziati gli andamenti delle seguenti grandezze:

- temperature registrate dalle termocoppie posizionate sul tubo di acciaio (T1, T2, T3) oltre che la temperatura di setpoint;
- temperature registrate dalle termocoppie posizionate sulla sezione centrale del provino in calcestruzzo (T3, C2, S2);
- temperature registrate dalle termocoppie posizionate a metà dello spessore del provino in calcestruzzo (C1, C2, C3, C4);
- temperature registrate dalle termocoppie posizionate sulla superficie esterna del provino in calcestruzzo (S1, S2, S3, S4);
- velocità dell'aria compressa durante il raffreddamento (per alcuni casi della fase di ciclaggio).
- tensione elettrica misurata agli estremi del provini (prossimi a T1 e T2).

Oltre a queste grandezze sono riportati i parametri dedotti o calcolati a partire dai dati sperimentali, quali:

- energia termica accumulata all'interno del calcestruzzo;
- potenza termica trasmessa attraverso il calcestruzzo;
- corrente elettrica che attraversa il tubo in acciaio;
- potenza termica generata per effetto Joule nel tubo in acciaio;
- potenza termica volumetrica generata per effetto Joule nel tubo in acciaio.

L'energia termica accumulata all'interno del calcestruzzo è stata stimata, per ogni istante temporale, a partire dalle temperature registrate nelle varie posizioni (Tabella 3) e dalle proprietà dei materiali, ipotizzando che il provino in calcestruzzo sia costituito da 6 diverse zone cilindriche, come mostrato in Figura 10.

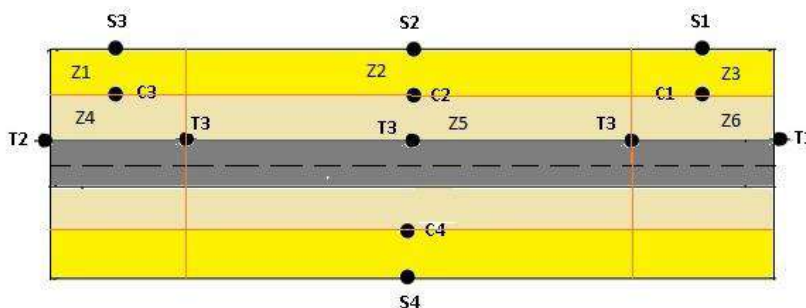


Figura 10- Sezioni del provino di calcestruzzo per la stima dell'energia accumulata

Per ogni zona è stimata una temperatura media utilizzando i valori delle termocoppie prossime ad essa e quindi, nota la variazione rispetto alla temperatura minima di partenza, l'energia termica accumulata nella zona stessa, che include anche l'eventuale calore latente accumulato quando la temperatura supera quella di fusione del PCM. Sommando i contributi delle diverse zone è possibile stimare l'energia termica accumulata dal provino.

La potenza termica trasmessa attraverso il calcestruzzo è invece stimata considerando le zone esterne definite in precedenza (Z1, Z2 e Z3) e le relative coppie di temperature registrate (C1-S1, C2-S2, C3-S3). Per ogni zona è valutata la resistenza termica teorica sulla base della classica relazione:

$$R = \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_m}\right)}{2\pi lk} \quad (1)$$

e quindi la potenza termica trasmessa:

$$P = \frac{\Delta T}{R} \quad (2)$$

La somma dei tre termini fornisce la potenza termica trasmessa, che, in condizioni di raggiunta stazionarietà (fase R), rappresenta la potenza dispersa verso l'ambiente.

La stima della corrente elettrica che attraversa il tubo in acciaio e della potenza termica generata per effetto Joule è stata effettuata tenendo conto della misura della tensione efficace, del valore di sfasamento SF tra corrente e tensione pari a 0.99864 (valore standard di rete), e della resistenza elettrica teorica del tubo in acciaio. La resistenza elettrica del tubo di sezione A_{sez} e lunghezza L è data dalla relazione $R_{el}=r_{el} \cdot L/A_{sez}$, in cui r_{el} è la resistività elettrica dell'acciaio considerata pari a 0.714 Ohm·m. Nel caso in esame si ottiene $R_{el}=3.97e^{-3}$ Ohm. La corrente efficace è pari a $I_{eff} = V_{eff} / R_{el}$ mentre la potenza termica generata per effetto Joule è data da $P=I_{eff} \cdot V_{eff} \cdot SF$.

I due provini, ossia quello in calcestruzzo base (CLSB) e quello con l'aggiunta di diatomite/PCM (CLSP), hanno un peso del solo mezzo di accumulo pari a 9.077 e 9.099 kg rispettivamente. Tenendo conto che in tutte le prove di ciclaggio si effettua un salto termico di circa 40°C, la stima dell'energia termica massima accumulabile da ciascun provino è rispettivamente pari a circa 61.22 Wh e 83.72 Wh. Il provino con il PCM dovrebbe presentare una capacità di accumulo superiore del 36.7% rispetto al modulo base.

In Tabella 6 sono riportati alcuni dei principali risultati ottenuti dalle prove eseguite sulle due tipologie di provini.

Per ogni tipologia di prova sono riportati i risultati relativi sia alla fase di riscaldamento che a quella di ciclaggio. In particolare sono evidenziate le temperature di riferimento della prova: temperatura minima, massima e temperatura ambiente. Sulla base di queste temperature e delle caratteristiche del materiale è stata valutata l'energia massima accumulabile. Invece l'energia massima accumulata è stata calcolata come descritto in precedenza.

Inoltre, sulla base dei dati relativi alla fase di riscaldamento, è stata ricavata una indicazione sulla conducibilità efficace del materiale (comprensiva di eventuale degrado o danneggiamento) per confrontarla con i valori trovati in origine. A tale scopo è stata determinata, in condizioni quasi stazionarie (fine della fase di riscaldamento) la potenza termica che attraversa il materiale (P_{loss}). Dividendo tale parametro per la superficie esterna del calcestruzzo è stato possibile ottenere il flusso termico uscente (flux). Noto il flusso termico e le temperature della sezione intermedia (T3, C2 e S2) per il caso stazionario, è stato possibile valutare il coefficiente di scambio termico equivalente h ($h=flux/(TS2-T_{amb})$), i salti termici relativi al guscio di calcestruzzo interno (ΔT_{int}) e a quello esterno (ΔT_{est}) e quindi le relative resistenze termiche:

$$R_{int} = P_{loss} / \Delta T_{int} \quad (3)$$

$$R_{est} = P_{loss} / \Delta T_{est} \quad (4)$$

$$R_{tot} = R_{int} + R_{int} \quad (5)$$

Infine i valori apparenti di conducibilità termica sono stati ottenuti sulla base delle seguenti relazioni:

$$k1_{app} = 1 / R_{int} * \ln(Dm/Di) / (2 * \pi * L) \quad (6)$$

$$k2_{app} = 1 / R_{est} * \ln(De/Dm) / (2 * \pi * L) \quad (7)$$

$$k_{app} = 1 / R_{tot} * \ln(De/Di) / (2 * \pi * L) \quad (8)$$

Tabella 6 – Principali risultati delle prove eseguite

Parametro	Unità di misura	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
		CLSB					CLSP			
Fase Riscaldamento										
Tmin	°C	15	12	15	15	14	19	18	20	19
Tmax	°C	200	200	260	360	200	200	260	360	200
Tamb	°C	15	14	17	17	16	27	26	30	21
E max	Wh	283.14	287.73	374.97	528.02	280.08	327.14	432.45	601.64	327.14
E stored	Wh	257.75	223.55	343.14	468.75	261.14	293.84	397.60	497.18	280.44
	kJ/kg	102.22	88.66	136.09	185.91	103.57	116.54	157.69	197.19	111.23
Perc. Carico	%	91.03	77.70	91.51	88.78	91.73	89.82	91.94	82.64	85.73
Stazionario										
T3 staz	°C	200.03	200.06	252.64	359.65	200.02	200.00	258.77	360.02	200.00
C2 staz	°C	188.70	188.88	243.77	329.47	188.38	193.75	249.03	339.44	191.61
S2 staz	°C	186.09	186.22	239.66	322.23	185.66	189.50	243.11	330.48	187.64
Ploss staz	W	43.56	39.57	53.36	141.11	41.43	39.64	72.00	117.65	42.21
flux staz	W/m2	277.28	251.90	339.70	898.31	263.74	252.37	458.37	748.98	268.69
heq_est	W/m2/C	1.62	1.46	1.53	2.94	1.55	1.55	2.11	2.49	1.61
DT_int	°C	11.33	11.18	8.86	30.19	11.64	6.26	9.74	20.58	8.39
DT_est	°C	2.60	2.67	4.11	7.23	2.72	4.24	5.92	8.96	3.97
DT_tot	°C	13.93	13.85	12.97	37.42	14.36	10.50	15.66	29.54	12.36
R_int	C/W	0.26	0.28	0.17	0.21	0.28	0.16	0.14	0.17	0.20
R_est	C/W	0.06	0.07	0.08	0.05	0.07	0.11	0.08	0.08	0.09
R_tot	C/W	0.32	0.35	0.24	0.27	0.35	0.26	0.22	0.25	0.29
k1_app	W/m/C	1.41	1.30	2.20	1.71	1.30	2.32	2.71	2.09	1.84
k2_app	W/m/C	2.72	2.41	2.11	3.17	2.48	1.52	1.98	2.13	1.73
k_app	W/m/C	1.65	1.51	2.17	1.99	1.53	2.00	2.43	2.11	1.80
Fase Ciclaggio										
Tmin	°C	200	200	260	360	200	200	260	360	200
Tmax	°C	240	240	300	400	240	240	300	400	240
Tamb	°C	15	15	15	14	15	22	20	27	20
E max	Wh	61.22	61.22	61.22	61.22	61.22	83.72	83.72	83.72	83.72
E max stored	Wh	51.60	50.00	50.78	48.59	59.78	66.00	61.40	57.50	62.00
	kJ/kg	20.46	19.83	20.14	19.27	23.71	26.18	24.35	22.80	24.59
Perc. Carico	%	84.29	81.67	82.95	79.37	97.65	78.84	73.34	68.68	74.06

2.5 *Discussione e confronto*

Sulla base dei risultati ottenuti nell'ambito della caratterizzazione termica dei moduli di accumulo è possibile fare le seguenti considerazioni:

- La temperatura mediana del provino all'interfaccia acciaio-calcestruzzo (T3) segue molto bene la temperatura di setpoint, a eccezione della rampa di salita, dove si evidenzia un certo ritardo, e nella fase di scarico, in cui il raffreddamento con aria compressa è molto più rapido del setpoint;
- Il raffreddamento ad aria compressa, con velocità attorno ai 12 m/s, sembra partire in anticipo rispetto ai tempi previsti e produce una variazione di temperatura importante;
- Le temperature misurate dalle termocoppie T1 e T2, agli estremi del tubo in acciaio, nella fase iniziale di riscaldamento sono superiori di circa 50°C rispetto alla temperatura massima di setpoint, prima di ridursi e tornare a valori inferiori alla T3;
- I valori delle termocoppie C2 ed S2 sono generalmente sovrapponibili a quelli di C4 ed S4, simmetriche all'asse del cilindro. Ciò consente di ipotizzare una completa simmetria assiale;
- Durante le fasi di riscaldamento anche i valori delle termocoppie C1 e C3, così come S1 ed S3, sono sovrapponibili, consentendo di ipotizzare, in queste condizioni, una simmetria rispetto alla sezione media del provino;
- Contrariamente al punto precedente, durante le fasi di ciclaggio i valori delle termocoppie C1 e C3, così come S1 ed S3, perdono la caratteristica di simmetria. Ciò è dovuto al fatto che il raffreddamento è effettuato immettendo aria compressa a temperatura ambiente dal lato delle termocoppie S1 e C1, rendendo questa zona più fredda rispetto a quella di uscita;
- I dati relativi alla tensione e corrente elettrica e alla potenza dissipata per effetto Joule non sono stati utilizzati, in quanto per farne uso occorrerebbero dati relativi sia alla variazione della resistenza elettrica con la temperatura che alle condizioni di scambio termico convettivo tra tubo e aria. Nell'analisi termica si è assunto di lavorare a temperatura di parete interna imposta.

Inoltre, esaminando anche i dati riportati in Tabella 6, si evidenzia quanto segue:

- Nella fase di riscaldamento, l'energia accumulata nei provini contenenti PCM (CLSP) è ovviamente superiore a quella degli altri (CLSB), a parità di temperatura, anche se leggermente inferiore a quella massima stimata;
- Identico discorso può essere fatto per quanto concerne la fase di ciclaggio, dove, a causa della limitata durata temporale dei cicli, il materiale di accumulo non raggiunge il completo equilibrio;
- Per quanto concerne la durabilità del materiale, sulla base del limitato numero di cicli effettuato (circa 30 complessivi, a varie temperature), è solo possibile osservare come il comportamento dei due materiali rimanga sostanzialmente identico nel tempo, fatta eccezione per i primi due cicli di assestamento. Ciò è chiaramente visibile per le prove a numero elevato di cicli (B1-T4-C e BP1-T4-C).

Osservando invece l'andamento delle temperature sia in fase di riscaldamento che di ciclaggio, è possibile notare un comportamento inatteso. Le temperature nei provini CLSP sembrano crescere, a parità di condizioni, più rapidamente di quelle del CLSB, evidenziando una maggiore facilità nella trasmissione del calore (diffusività termica). In Figura 11 e Figura 12, rispettivamente per i test T1 e T2, è mostrato il confronto tra l'andamento delle temperature radiali sia in fase di riscaldamento che di ciclaggio per i due materiali considerati (CLSB e CLSP). È facile osservare come inizialmente la temperatura T3 del materiale CLSP tenda a raggiungere il set-point più lentamente in ragione probabilmente di un maggiore trasferimento di calore verso l'interno. Ciò potrebbe giustificare il fatto che le temperature medie ed esterne del CLSP, in prossimità della fine del transitorio, raggiungano temperature sicuramente maggiori rispetto a quelle del CLSB. Tutto ciò in condizioni di generazione di potenza per effetto joule molto simili (vedi l'andamento delle tensioni applicate al provino).

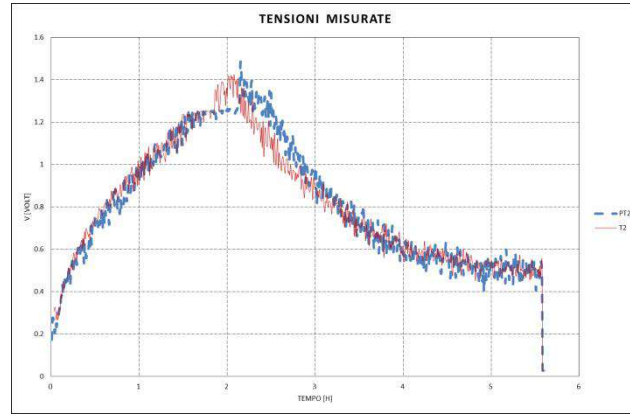
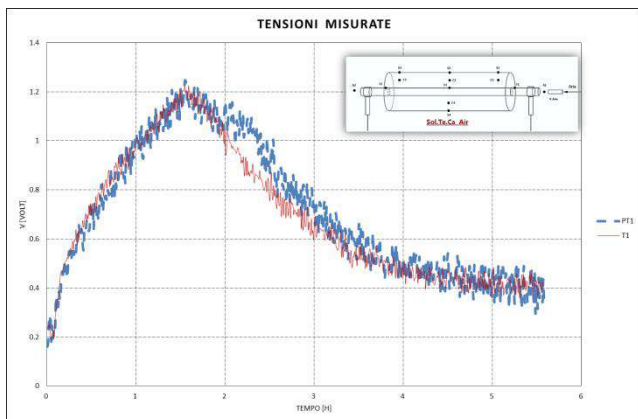
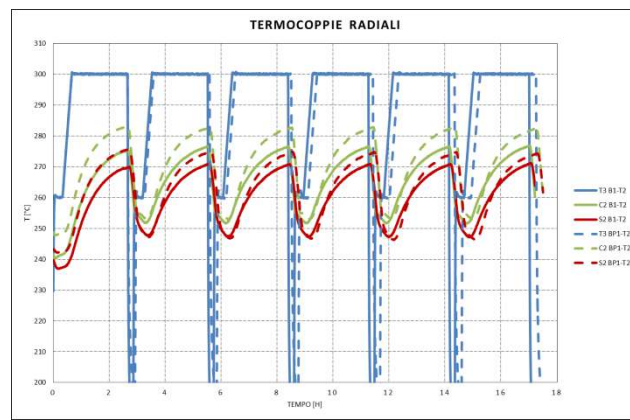
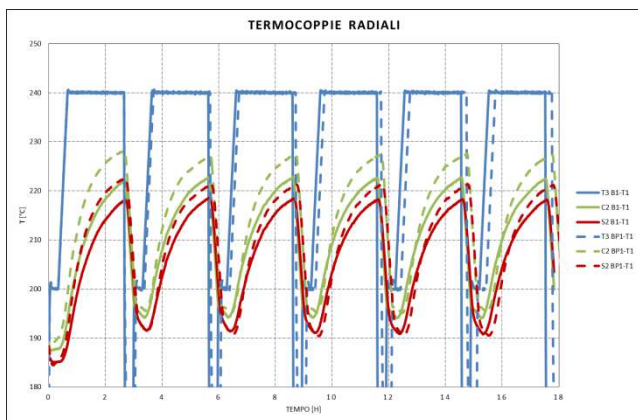
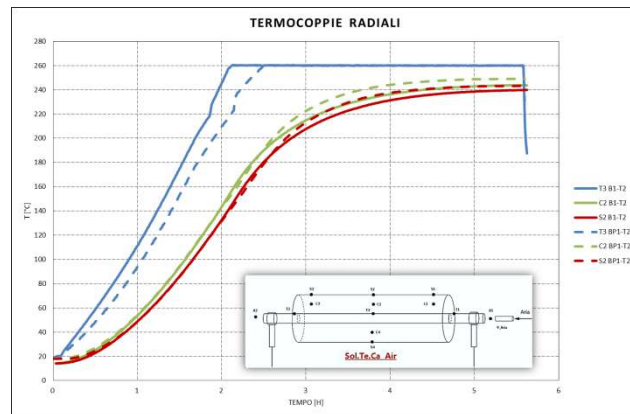
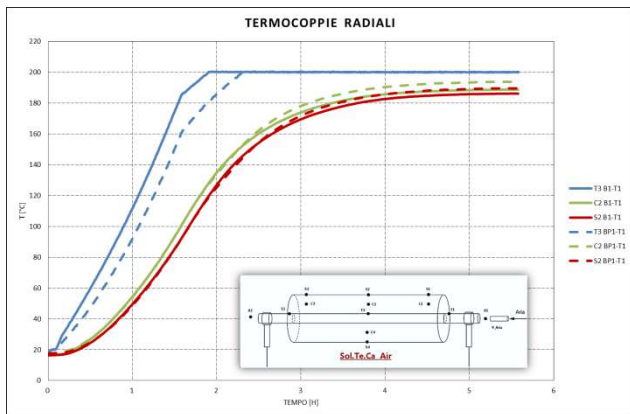


Figura 11 - Test T1: Andamento delle temperature radiali per i materiali CLSB e CLSP in fase di riscaldamento e di ciclaggio. Andamento della tensione applicata durante la fase di riscaldamento.

Figura 12 - Test T2: Andamento delle temperature radiali per i materiali CLSB e CLSP in fase di riscaldamento e di ciclaggio. Andamento della tensione applicata durante la fase di riscaldamento.

Ciò farebbe pensare a una maggiore diffusività termica presente nel materiale con diatomite e PCM rispetto al materiale base. Poiché l'aggiunta del PCM dovrebbe aver incrementato il termine capacitivo del calcestruzzo, se ne deduce, per la definizione di diffusività termica, che dovrebbe essere stata incrementata anche la conducibilità termica del materiale.

Sulla base delle informazioni raccolte in Tabella 6 e, in particolare, dei dati ricavati al raggiungimento di uno stato quasi stazionario al termine della fase di riscaldamento, è possibile verificare quanto segue:

- nei diversi test, a fronte di una T3 ben controllata e uguale, le temperature centrali ed esterne per il materiale CLSP sono circa 5-10°C maggiori delle altre;
- anche la potenza termica o il flusso termico perso sono equiparabili (circa 250 W/m² a 200°C) così come il coefficiente equivalente (coibentazione e ambiente) di scambio convettivo (che è circa 1.5-2 W/m²/°C). Questo indica che la coibentazione e le condizioni ambientali sono molto simili per i vari casi e i vari materiali;
- i salti termici nella zona interna e in quella esterna del guscio di calcestruzzo risultano essere alquanto diversi per i due materiali. Nel caso del CLSB si ha un salto termico molto importante nella zona interna e uno più attenuato in quella esterna. Invece, nel caso CLSP tali salti sono più equilibrati e uniformi. Il salto termico complessivo è inferiore nel caso CLSP;
- chiaramente le resistenze termiche risultano proporzionali ai salti termici misurati. Il provino in CLSP mostra complessivamente una resistenza termica inferiore al provino in CLSB. Per quest'ultimo risulta fortemente penalizzante la resistenza termica della zona interna al calcestruzzo in prossimità del tubo di scambio.

Ne consegue che, nelle condizioni di prova utilizzate, il materiale CLSB presenta una conducibilità apparente media valutabile attorno a 1.6 W/m/C mentre il materiale CLSP si attesta a circa 2 W/m/C, mostrando un significativo incremento (+25%).

Si usa il termine "apparente" poiché la conducibilità misurata in questo modo potrebbe essere alterata da eventuali situazioni di danno, non riconducibili a proprietà effettive del materiale, che potrebbero incrementare il termine di resistenza. Riferendosi poi alla resistenza della zona interna, occorre tener conto anche dell'accoppiamento termico tra tubo di scambio e calcestruzzo (resistenza di contatto).

Anche il posizionamento della termocoppia C2 potrebbe alterare la valutazione delle resistenze. Infatti, considerando il caso T1 per i due materiali e calcolando, nell'ipotesi di affidabilità delle temperature relative a T3 ed S2, l'andamento teorico della temperatura in funzione del raggio del cilindro di calcestruzzo, attraverso la formula di seguito riportata, si ottiene quanto mostrato in Figura 13.

$$T(r) = T_{S2} + \frac{(T_{T3} - T_{S2})}{\ln\left(\frac{r_{T3}}{r_{S2}}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_{S2}}\right) \quad (8)$$

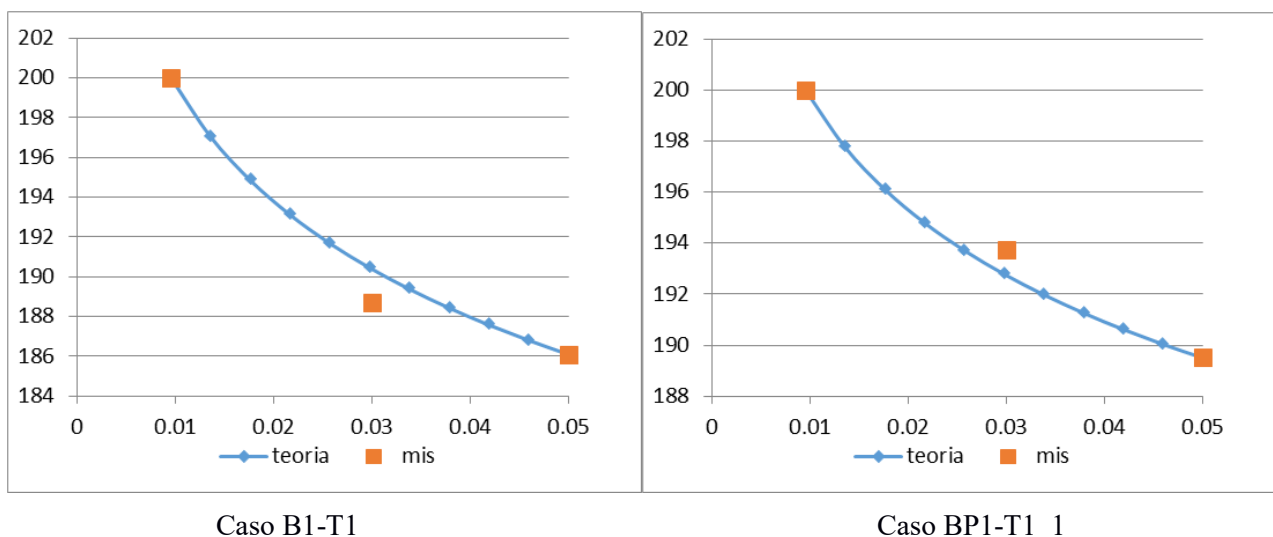


Figura 13- Test T1. Andamento previsto delle temperature radiali per i materiali CLSB e CLSP in regime stazionario durante la fase di riscaldamento e valori misurati.

Lo scostamento del punto C2 sembra evidenziare un differente comportamento termico delle zone a monte e a valle dello stesso, ovvero una resistenza termica maggiore nella zona interna nel caso B1 (temperatura di C2 inferiore a quella attesa) ed esterna nel caso BP1 (temperatura di C2 superiore a quella attesa).

Escludendo la termocoppia C2, si può ricavare la relazione che lega il valore di conducibilità termica k previsto per il mezzo di accumulo al coefficiente di scambio termico convettivo con l'ambiente h :

$$k(h) = 2\pi L \frac{\ln\left(\frac{r_{S2}}{r_{T3}}\right)}{(T_{T3} - T_{S2})} P_{loss} \quad (9)$$

Dove:

$$P_{loss} = \frac{(T_{coib} - T_{amb})}{R_{amb}} \quad (10)$$

$$R_{amb} = \frac{1}{2\pi r_{coib} L h} \quad (11)$$

$$R_{coib} = \frac{\ln\left(\frac{r_{coib}}{r_{S2}}\right)}{2\pi L k_{coib}} \quad (12)$$

$$T_{coib} = \frac{R_{amb} T_{S2} + R_{coib} T_{amb}}{R_{coib} + R_{amb}} \quad (13)$$

Ipotizzando per il coibente (tipo rockwool) $k_{coib} = 5 \cdot 10^{-7} T^2 + 3 \cdot 10^{-5} T + 0.0374$, per i due casi in esame si ottiene quanto mostrato in Figura 14. Per un intervallo plausibile di h compreso tra 5 e 10 $W/m^2/^\circ C$ si ricavano valori di conducibilità compresi tra 1.6 e 1.75 $W/m/^\circ C$ nel caso con CLSB e tra 2 e 2.2 $W/m/^\circ C$ nel caso con CLSP. Il primo dato è perfettamente in linea con quanto ricavato dai test sul materiale (1.77 $W/m^2/^\circ C$) mentre il secondo risulterebbe anche superiore (1.82 $W/m^2/^\circ C$).

In ogni caso rimarrebbe confermata l'ipotesi di un incremento della conducibilità termica e della diffusività termica nel SS-CPCM.

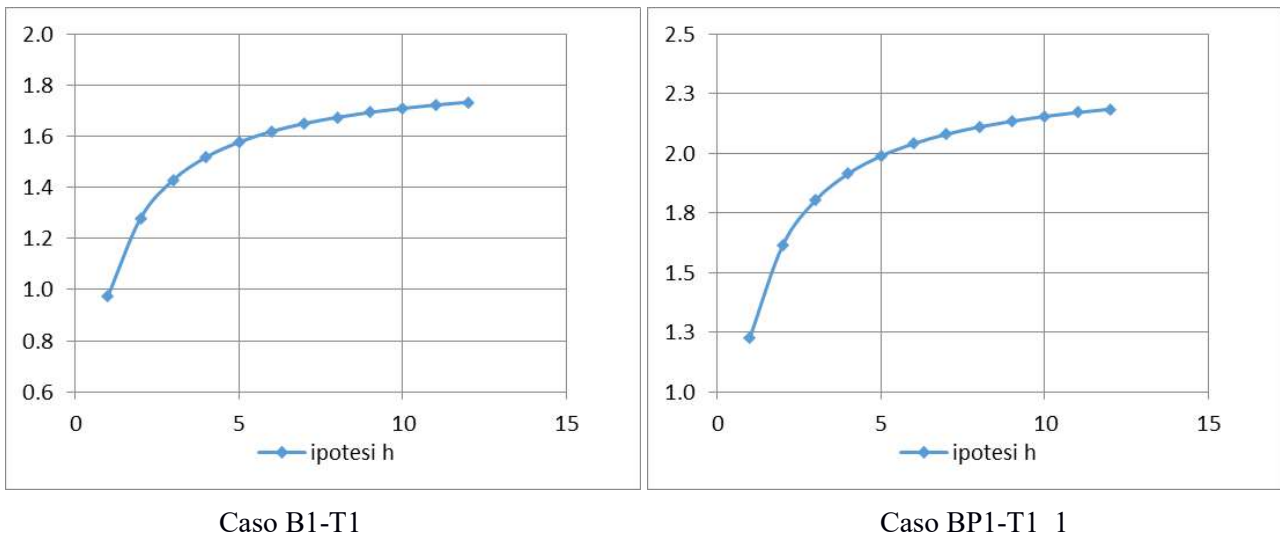


Figura 14 - Test T1. Stima della conducibilità termica del provino, per i materiali CLSB e CLSP, in funzione del coefficiente di scambio termico convettivo h con l'ambiente.

3 Conclusioni

Nel presente lavoro è stata effettuata la caratterizzazione sperimentale e l'interpretazione del comportamento termico di piccoli elementi di accumulo termico, formati da un tubo centrale in acciaio e un guscio di materiale di accumulo, costituito da calcestruzzo, con e senza l'aggiunta di una piccola quantità di materiali compositi a cambiamento di fase stabilizzati in forma (Stabilized Shape Composite Phase Change Materials, SS-CPCM). La miscela del calcestruzzo utilizzato è stata sviluppata in un precedente lavoro per applicazioni fino a 400°C mentre l'SS-CPCM è stato realizzato includendo una piccola quantità (5% in peso rispetto al calcestruzzo) di Sali Solari (intervallo di fusione: 219-240°C) assorbiti in un mezzo poroso stabilizzante (diatomite). I provini, opportunamente coibentati per limitare le perdite termiche, sono stati testati sia in fase di carica che di scarica termica. La carica termica dei moduli in calcestruzzo è stata realizzata attraverso il riscaldamento delle pareti del tubo centrale per effetto joule, mentre il raffreddamento è stato effettuato attraverso il passaggio di aria compressa all'interno del tubo. I risultati ottenuti hanno fornito le seguenti indicazioni:

- Le prove sperimentali sono state ben progettate: la temperatura mediana del provino all'interfaccia acciaio-calcestruzzo (T3) segue bene la temperatura di *setpoint*, mentre il raffreddamento ad aria compressa (con velocità attorno ai 12 m/s) consente rapide riduzioni di temperatura;
- Il comportamento termico del cilindro è perfettamente simmetrico rispetto all'asse dello stesso, mentre si riscontra simmetria rispetto alla sezione media del provino solo nella fase iniziale di riscaldamento; la simmetria si perde durante il ciclaggio a causa dell'azione direzionale del raffreddamento, che rende la sezione di ingresso dell'aria leggermente più fredda della sezione di uscita;
- A parità di temperatura l'energia accumulata nei provini contenenti PCM (CLSP) è ovviamente superiore a quella degli altri (CLSB), anche se leggermente inferiore rispetto al valore massimo atteso;
- Il comportamento termico dei provini durante le fasi di ciclaggio rimane sostanzialmente identico. Ciò lascia presupporre buone caratteristiche di durabilità del materiale, almeno relativamente al numero di cicli considerato (circa 30 complessivi, a varie temperature);
- Le temperature nei provini con PCM (CLSP) sembrano crescere, a parità di condizioni, più rapidamente di quelle del CLSB, evidenziando una maggiore facilità nella trasmissione del calore (diffusività termica). Una maggiore diffusività termica nel materiale con diatomite e PCM, rispetto al materiale base, sembra implicare anche una maggiore conducibilità termica, essendo incrementato con l'aggiunta del PCM il termine capacitivo del calcestruzzo;
- La valutazione di un eventuale incremento della conducibilità "apparente" nel SS-CPCM deve comunque tenere in conto anche eventuali situazioni di danno non derivanti da proprietà effettive del materiale, che potrebbero incrementare la resistenza termica del materiale. Riferendosi poi alla resistenza della zona interna, un ruolo importante potrebbe essere attribuito all'accoppiamento termico tra tubo di scambio e calcestruzzo (parziale distacco dei due mezzi con sviluppo di una resistenza di contatto).

In conclusione, le prove effettuate hanno evidenziato, come atteso, la maggiore capacità termica dei provini in calcestruzzo contenenti SS-CPCM, e un inaspettato incremento "apparente" della diffusività e della conducibilità termica. Tali caratteristiche rimangono inalterate anche dopo un discreto numero di cicli di carico/scarico (buona durabilità).

In futuro sarà necessario verificare le caratteristiche sopra evidenziate attraverso la realizzazione e la caratterizzazione di elementi di accumulo termico in calcestruzzo/SS-CPCM di maggiori dimensioni, più rappresentativi del comportamento di sistemi reali.

4 Riferimenti bibliografici

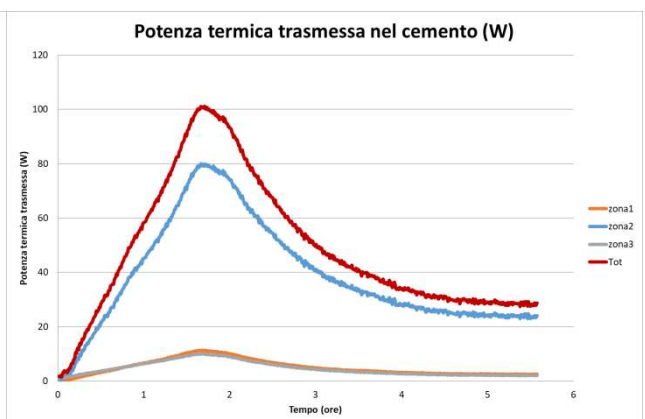
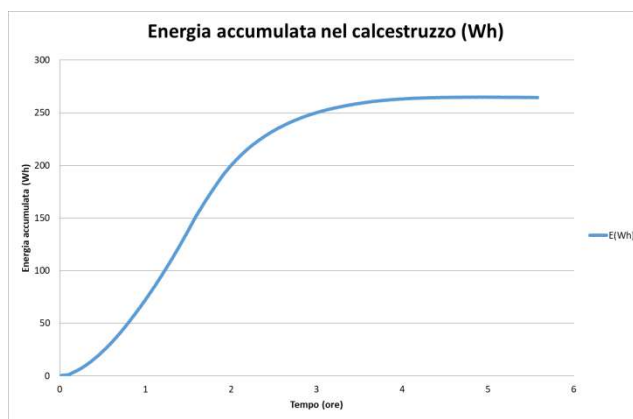
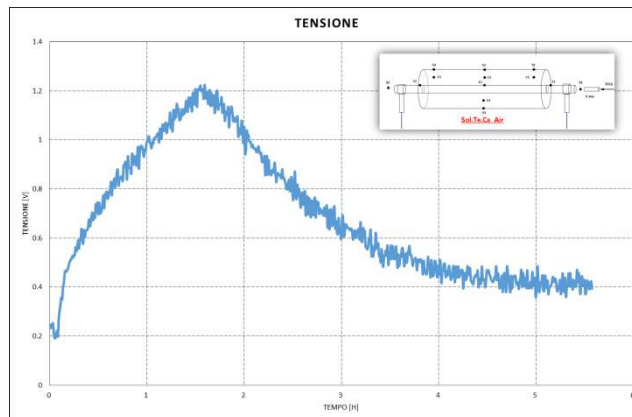
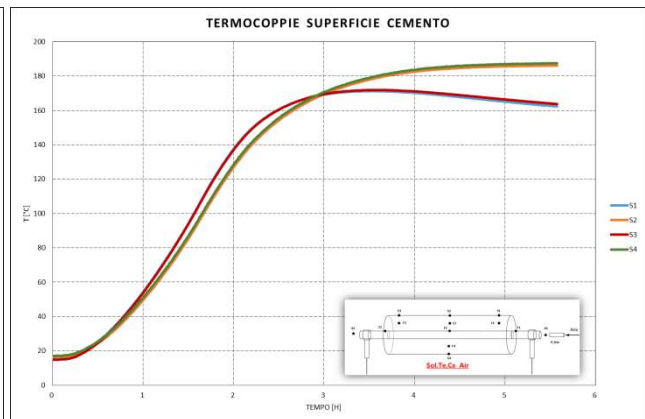
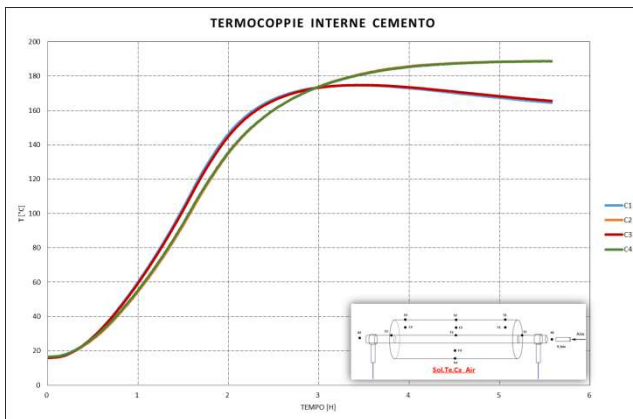
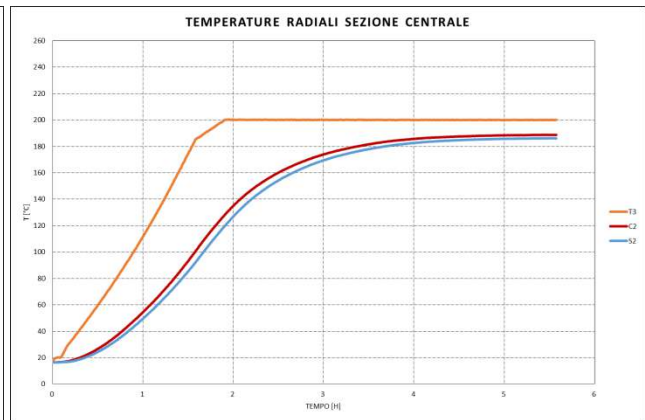
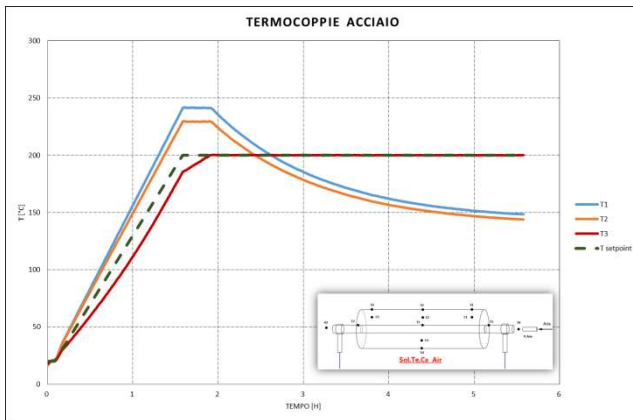
1. A. Miliozzi, M. Chieruzzi, L. Torre, Experimental investigation of a cementitious heat storage medium incorporating a solar salt/diatomite composite phase change material, *Applied Energy* (2019), 250, 1023–1035
2. D. Mazzei, G. Giorgi, R. Liberatore, G. Napoli, A. Miliozzi, “Caratterizzazione termica di un elemento di accumulo termico realizzato con calcestruzzo base a temperature medio-alte a seguito di un ripetuto carico ciclico”, Report RdS/PTR2019-2021/WP2/D1.1
3. A. Miliozzi, D. Mele, D. Nicolini, R. Liberatore, E. Veca, G. Napoli, “Caratterizzazione termica e meccanica di miscele di calcestruzzi per accumulo termico a temperature medio-alte con aggiunta di una piccola quantità di materiale a cambiamento di fase stabilizzato in forma WP”, Report RdS/PTR2019-2021/WP2/D1.2
4. V. A. Salomoni, C. E. Majorana, G. M. Giannuzzi, A. Miliozzi, R. Di Maggio, F. Girardi, D. Mele, M. Lucentini, “Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants”, *Solar Energy* (2014), 103, 303–315
5. F. Girardi, G.M. Giannuzzi, D. Mazzei, V. Salomoni, C. Majorana, R. Di Maggio, “Recycled additions for improving the thermal conductivity of concrete in preparing energy storage systems”, *Construction and Building Materials* (2017), 135, 565–579.
6. Fabrizio Girardi, Rosa Di Maggio, “Realizzazione e caratterizzazione di un modulo di accumulo basata su miscela sviluppata da UNITN”, RdS/PAR2014/119
7. M. Chieruzzi, J.M. Kenny, L. Torre, “Studio di nuovi materiali avanzati di accumulo termico a cambiamento di fase con proprietà termiche incrementate”, Rapporto RdS/PAR2014/115
8. A. Miliozzi, M. Chieruzzi, L. Torre, “Experimental investigation of a cementitious heat storage medium incorporating a solar salt/diatomite composite phase change material”, *Applied Energy* (2019), 250, 1023–1035
9. G. Mazzucco, G. Xotta, V. Salomoni, C. Majorana, “Progettazione campagna sperimentale su elementi di accumulo termico in calcestruzzo ed analisi dei risultati”, Rapporto RdS/PAR2013/231

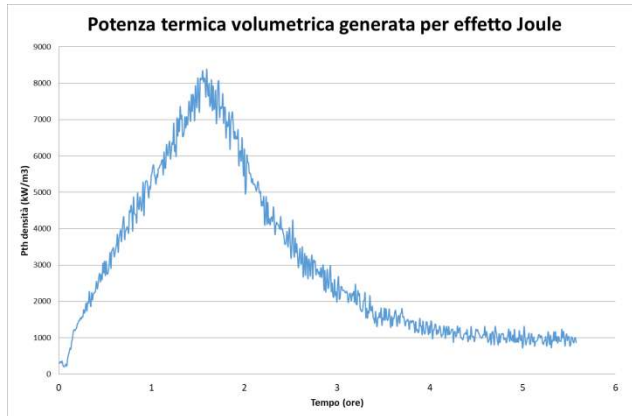
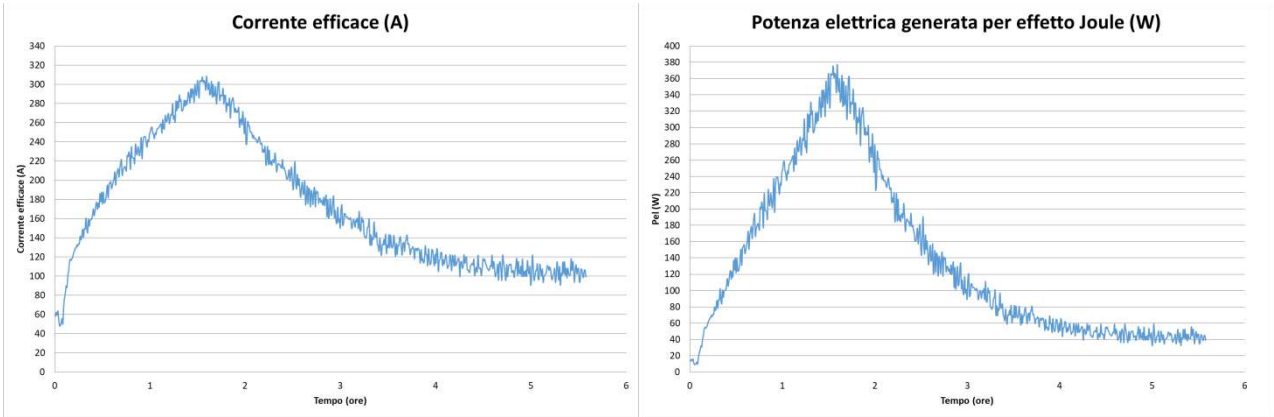
5 Abbreviazioni ed acronimi

CFD	Computational Fluid Mechanics
HTF	Heat Transfer Fluid
LHTES	Latent Heat Thermal Energy Storage
PAR	Piano Annuale di Ricerca
PCM	Phase Change Material
Re	Numero di Reynolds.

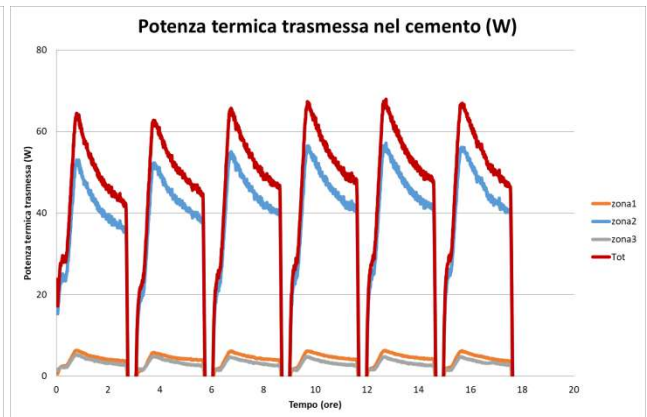
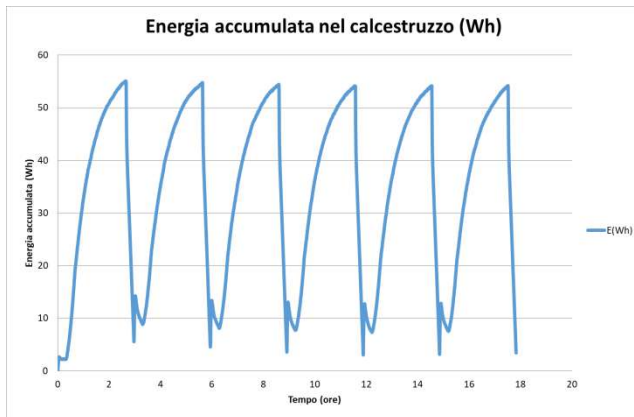
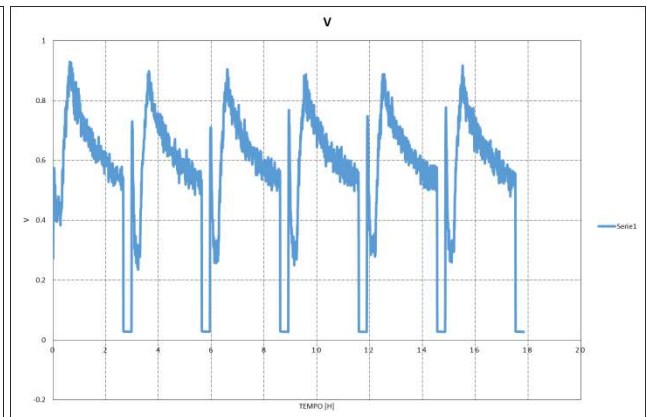
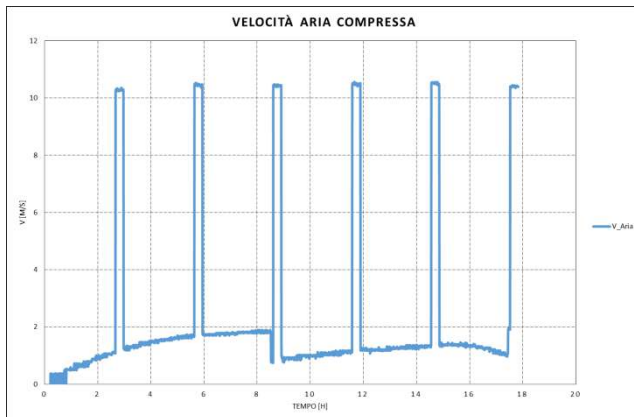
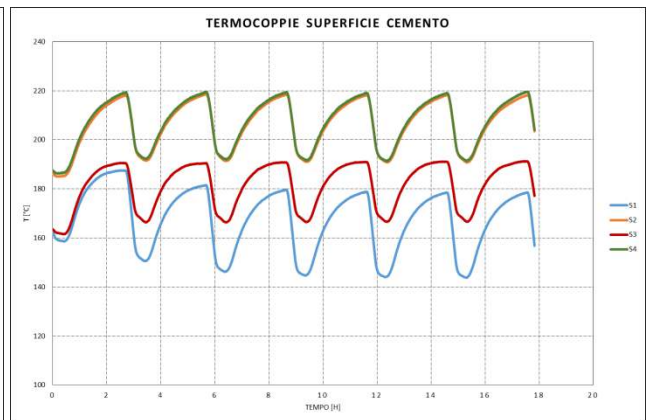
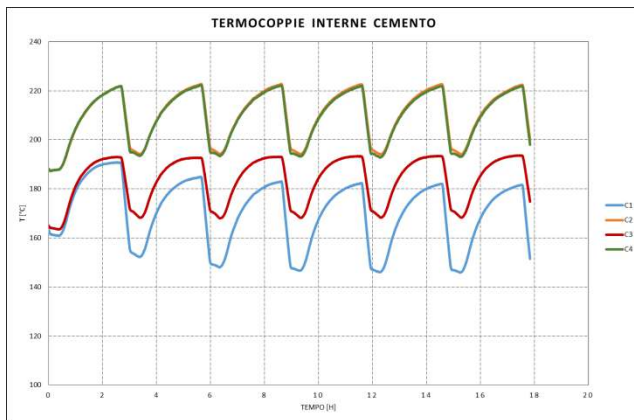
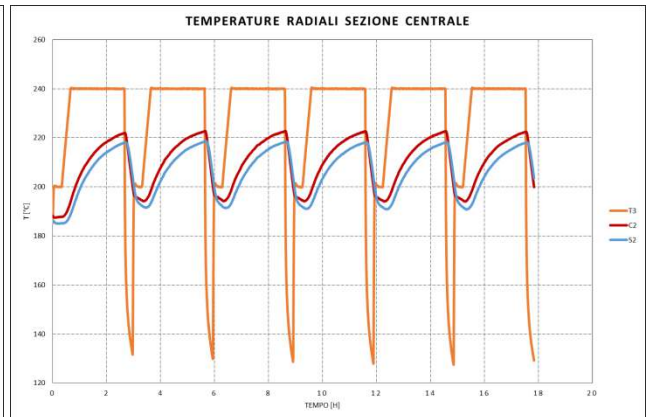
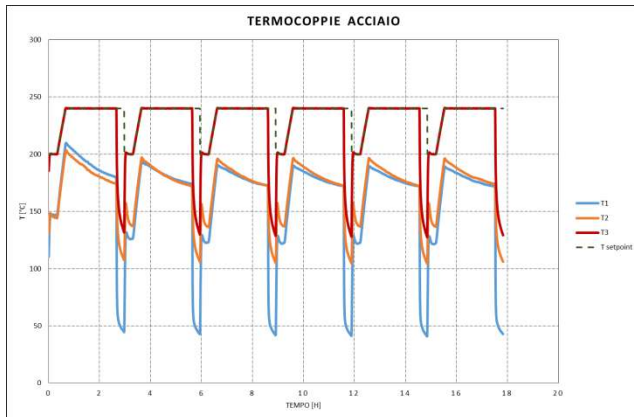
Appendice A: Risultati provino B1

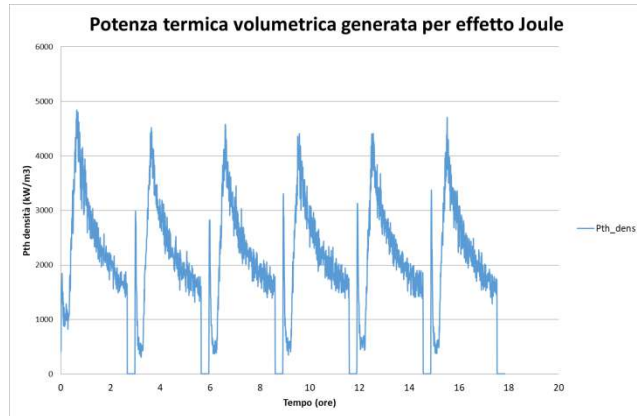
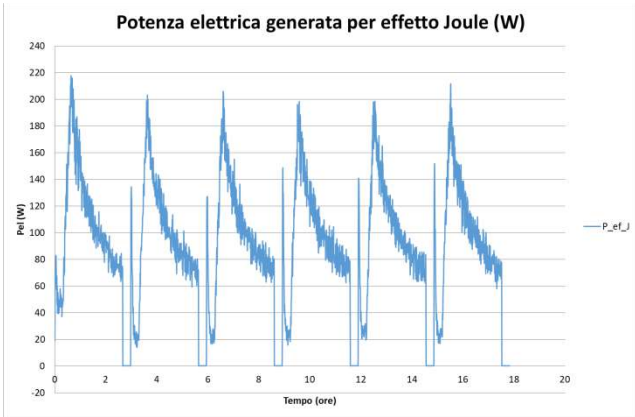
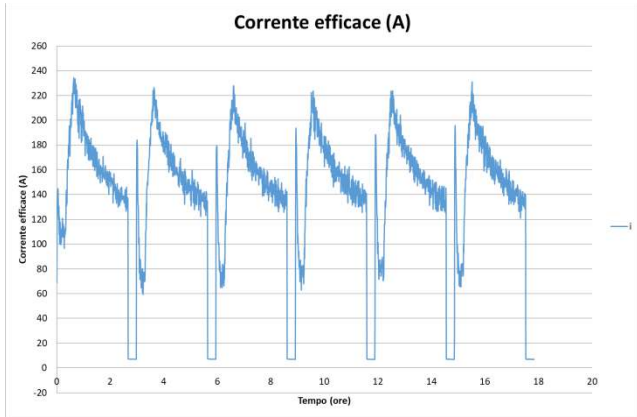
Risultati test B1-T1-R_1



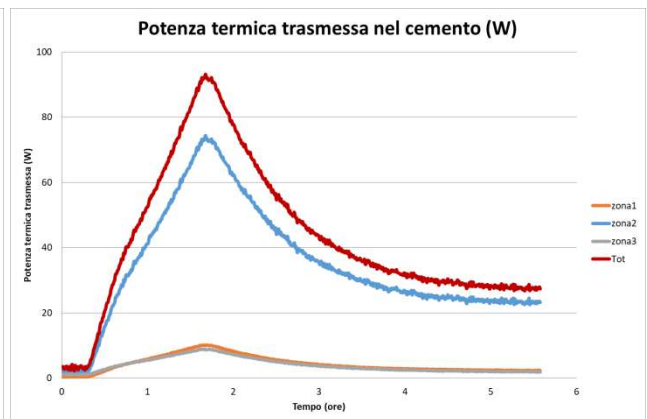
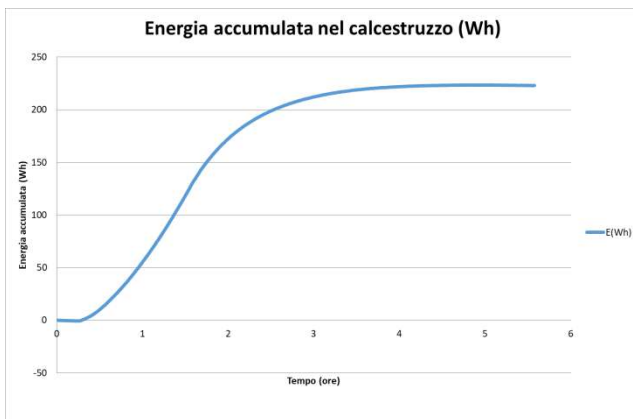
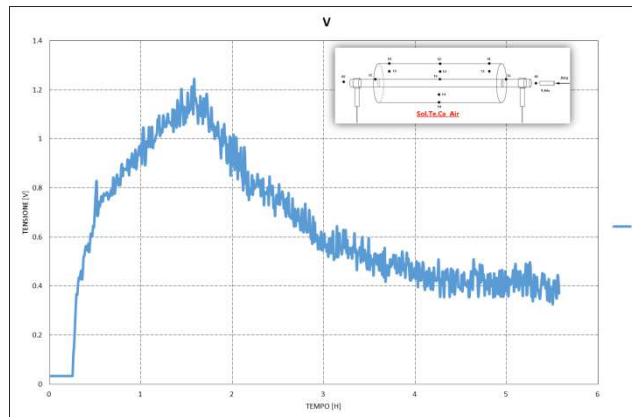
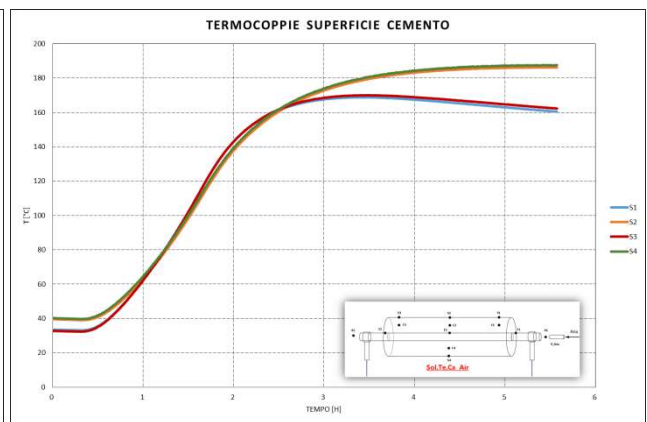
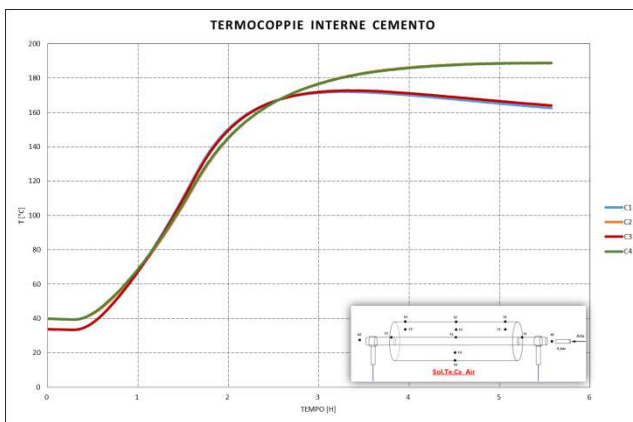
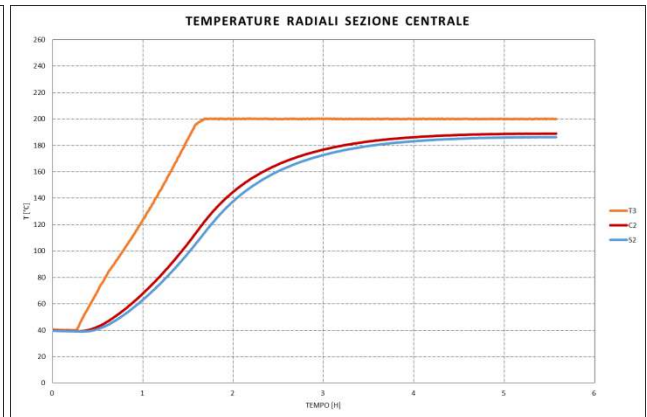
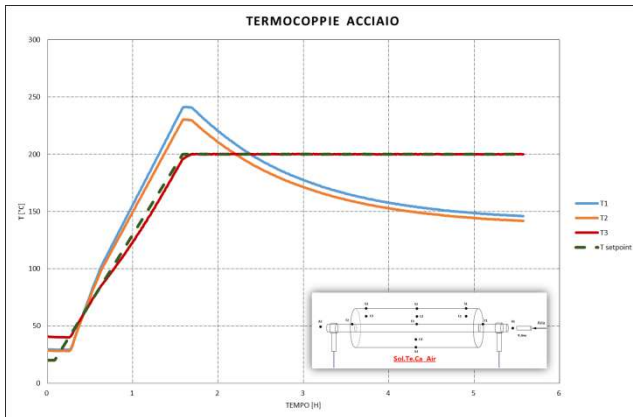


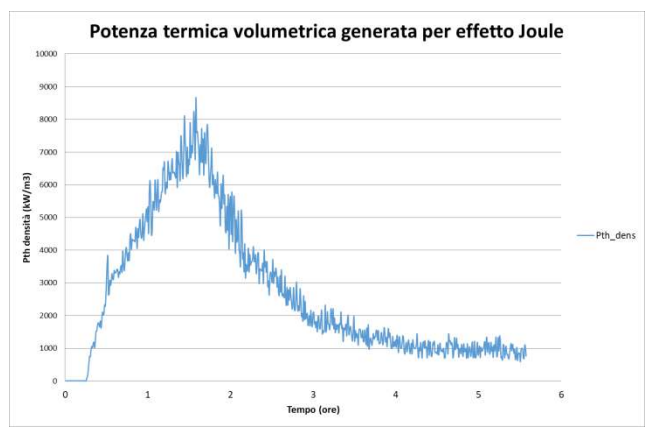
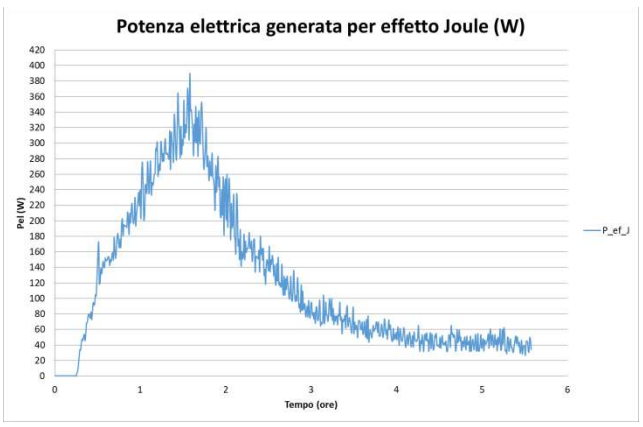
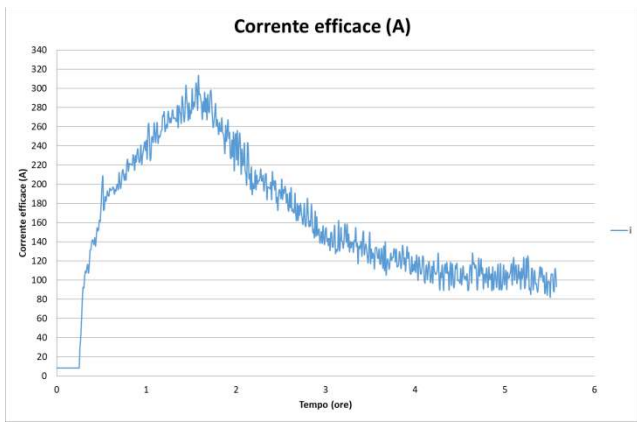
Risultati test B1-T1-C_1



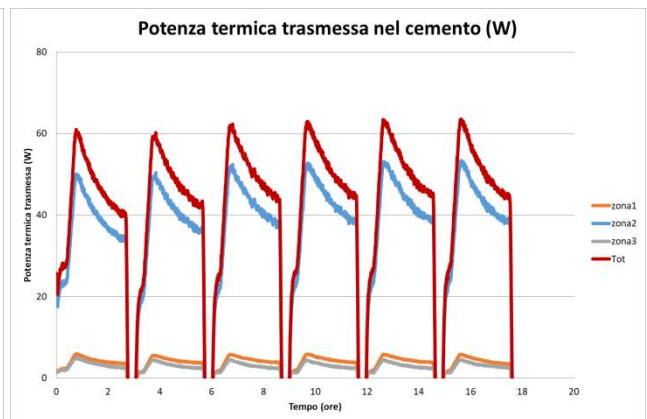
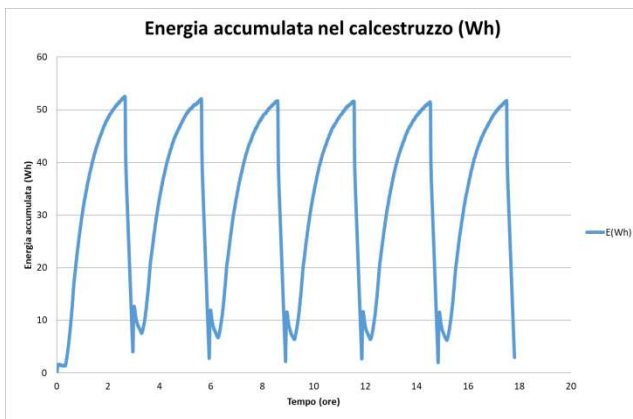
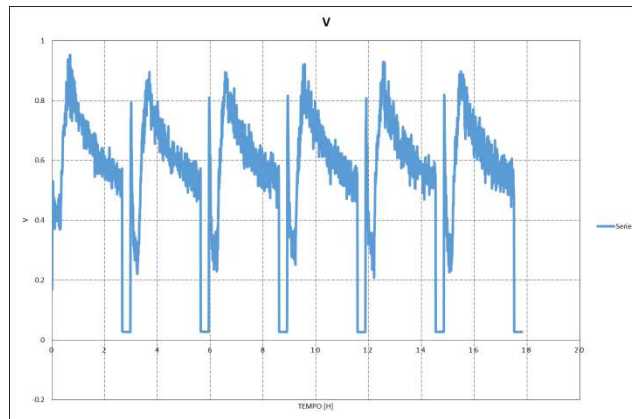
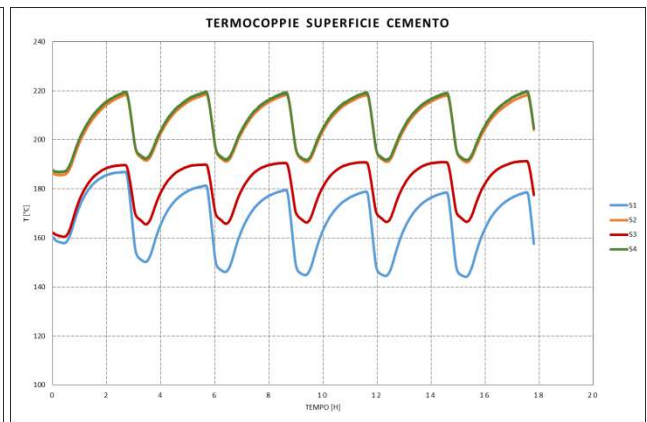
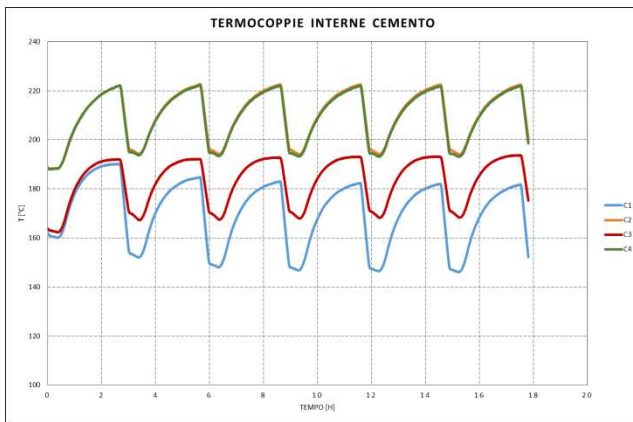
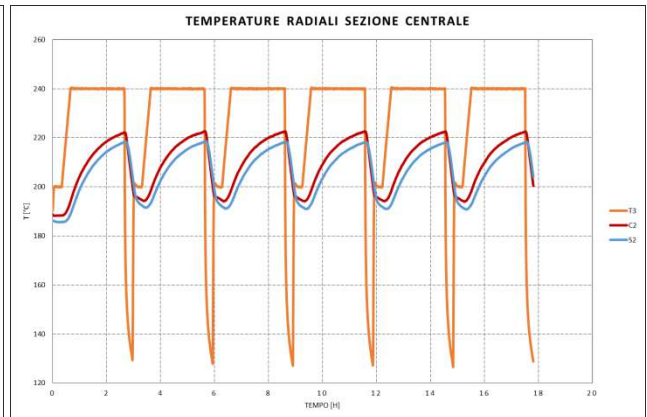
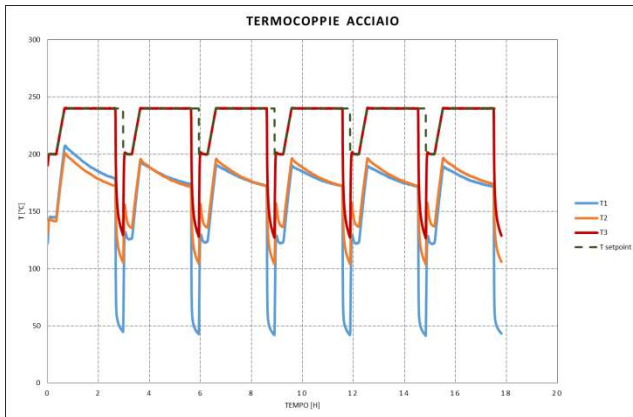


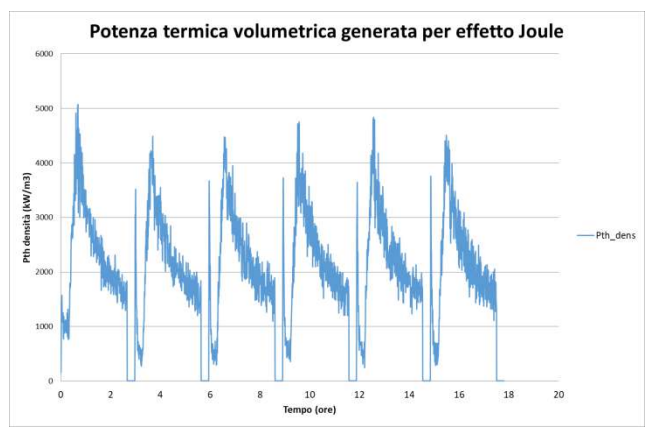
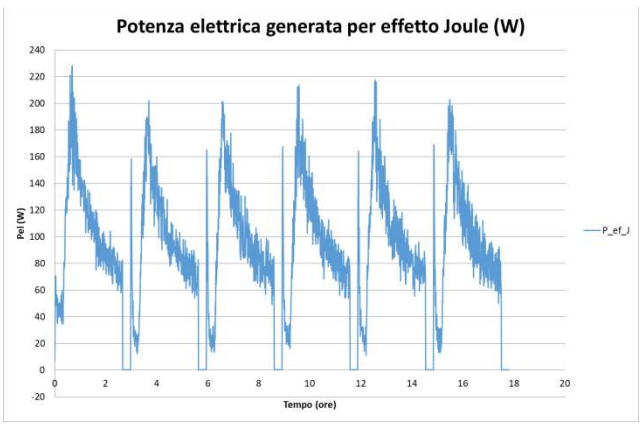
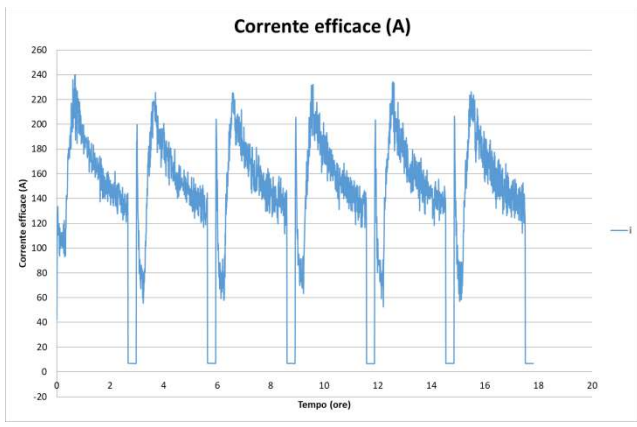
Risultati test B1-T1-R_2



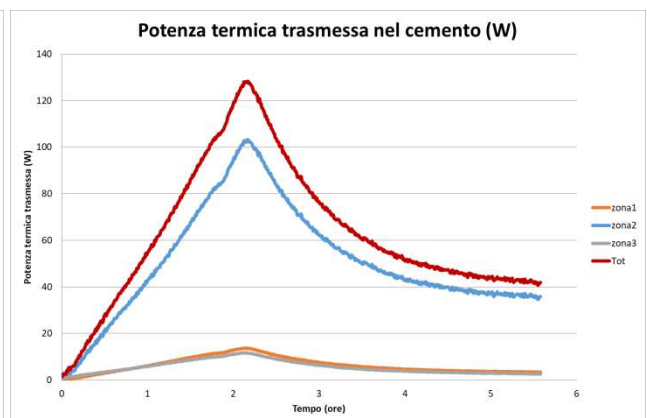
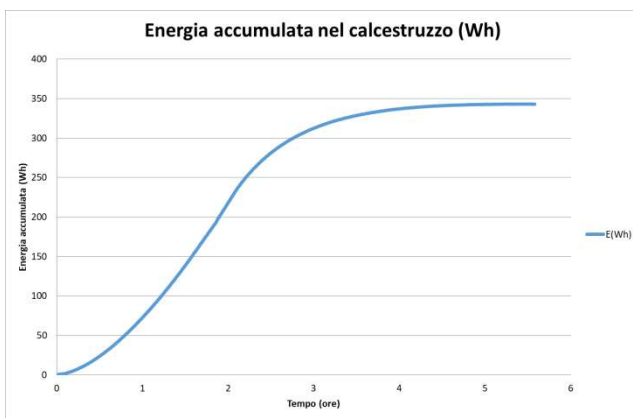
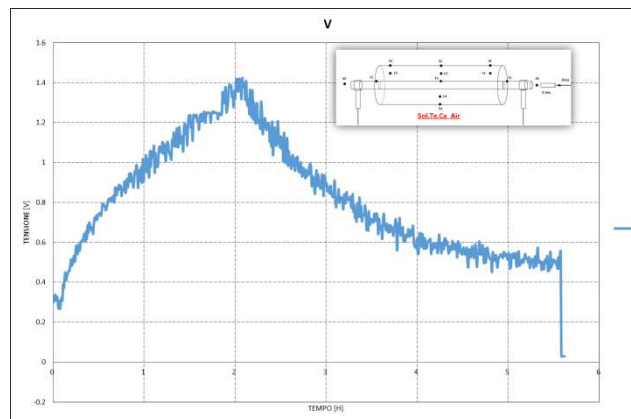
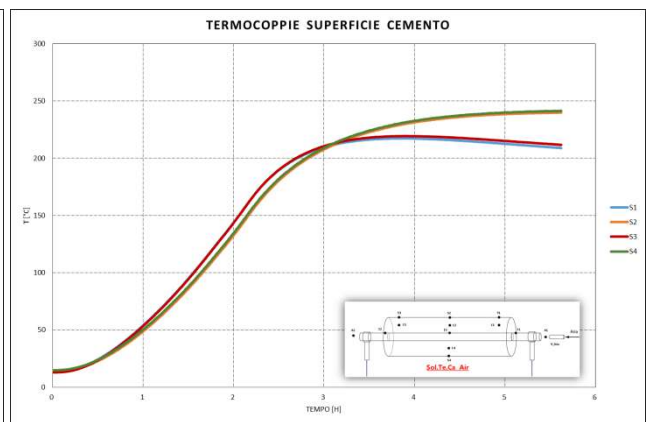
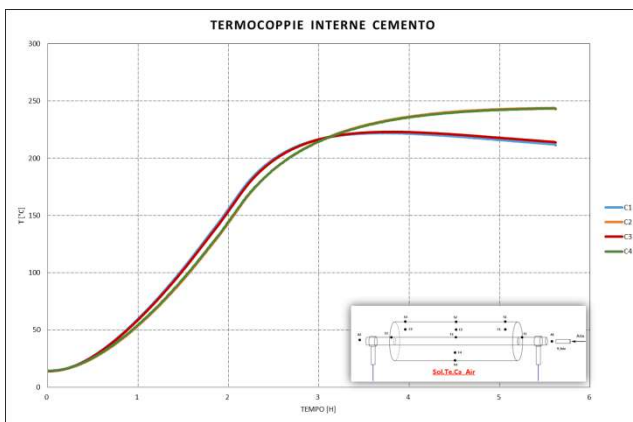
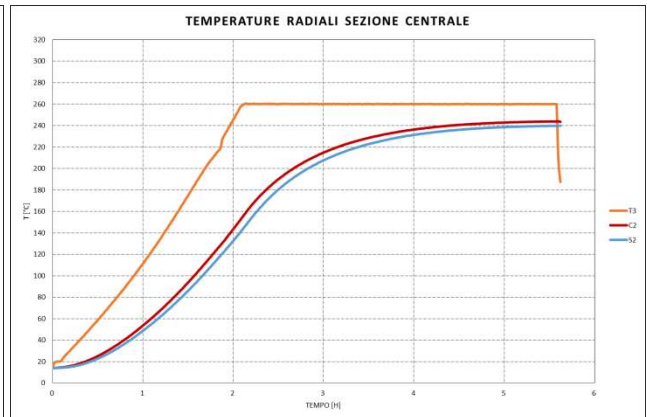
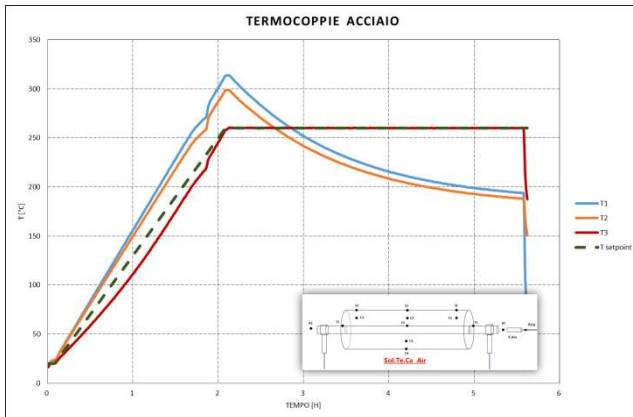


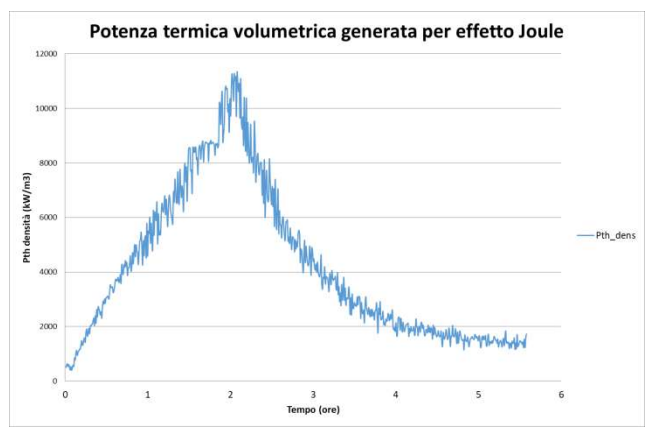
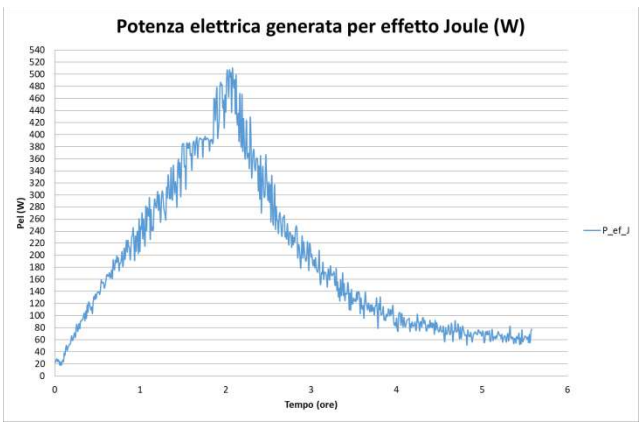
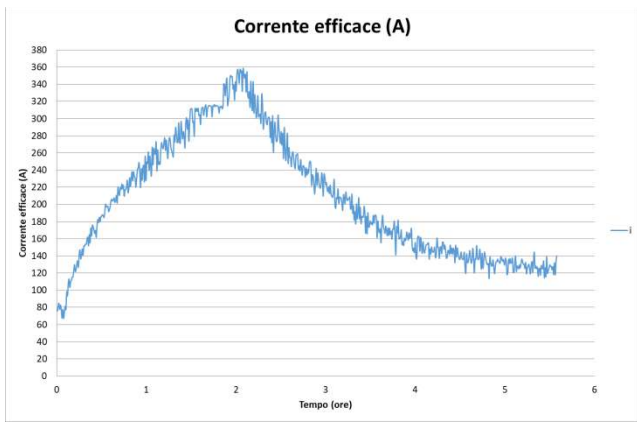
Risultati test B1-T1-C_2



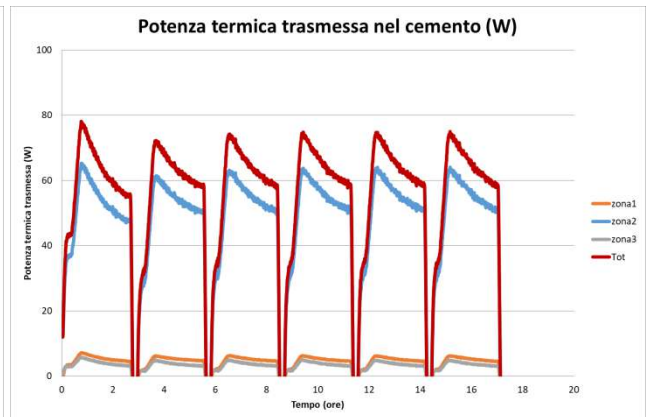
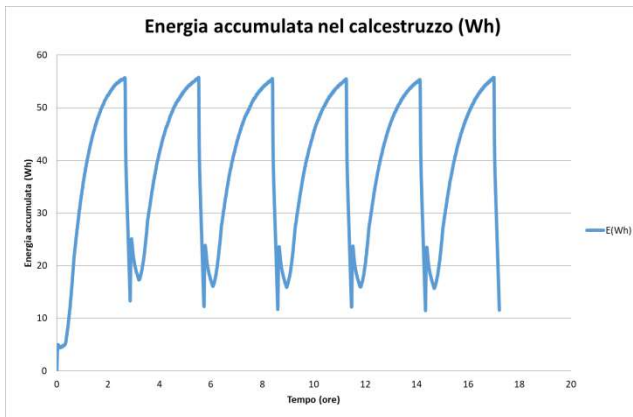
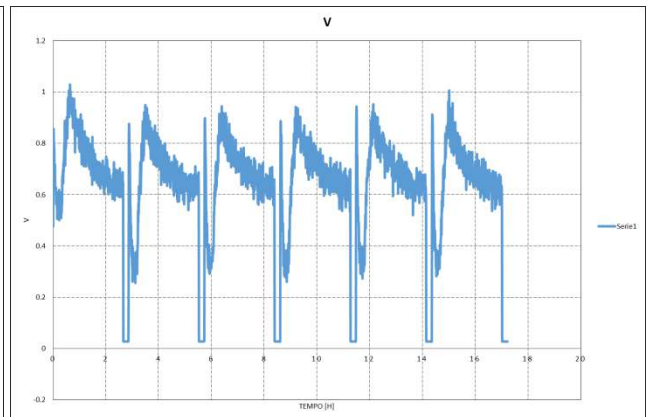
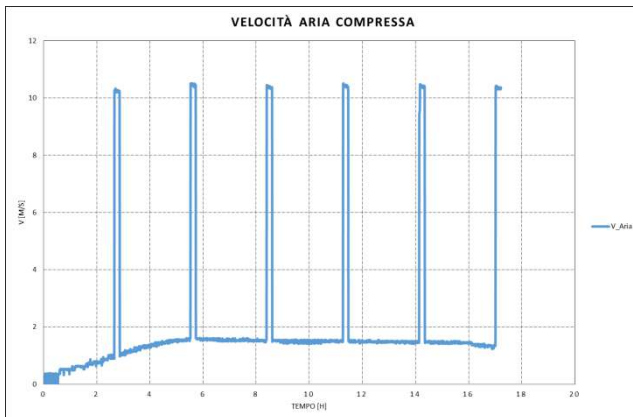
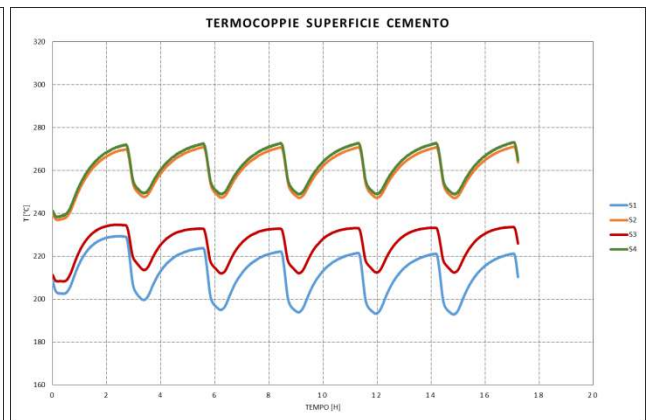
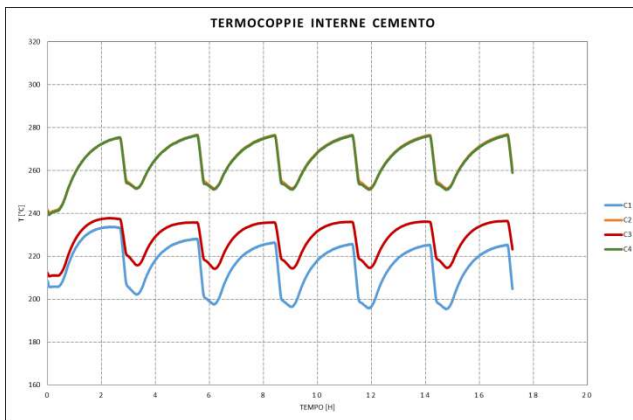
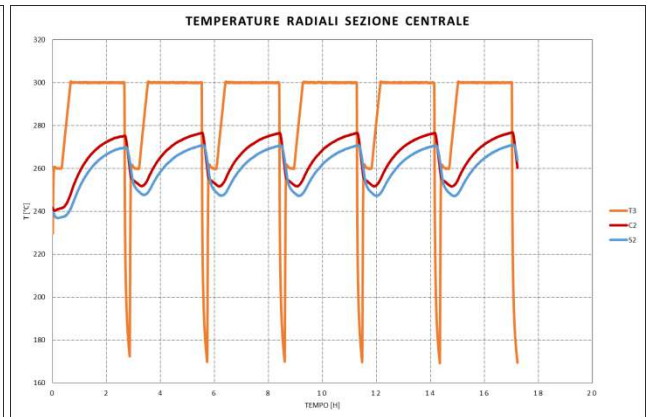
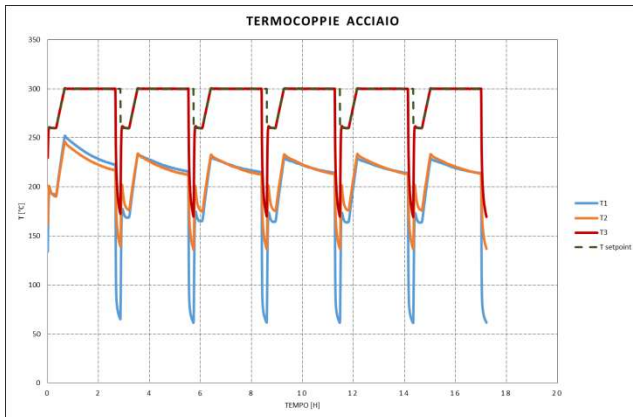


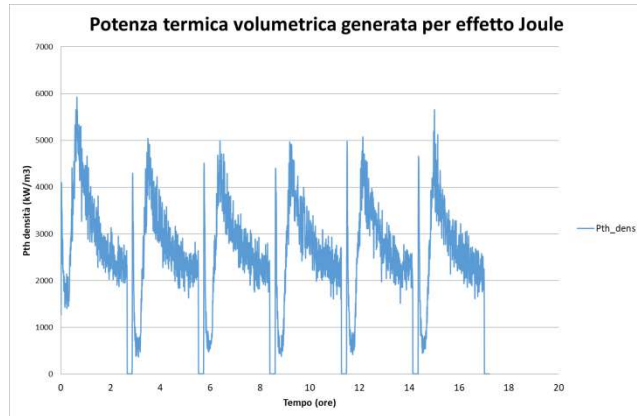
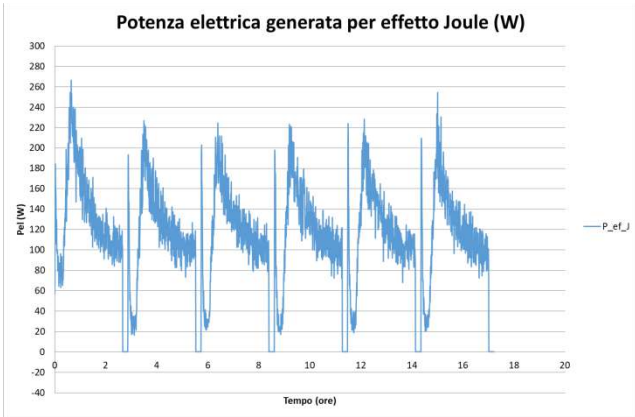
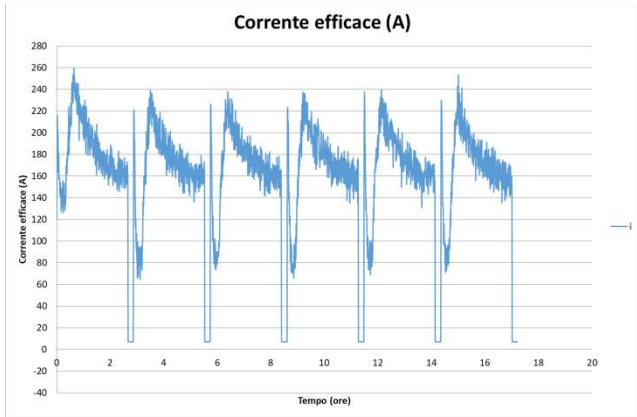
Risultati test B1-T2-R



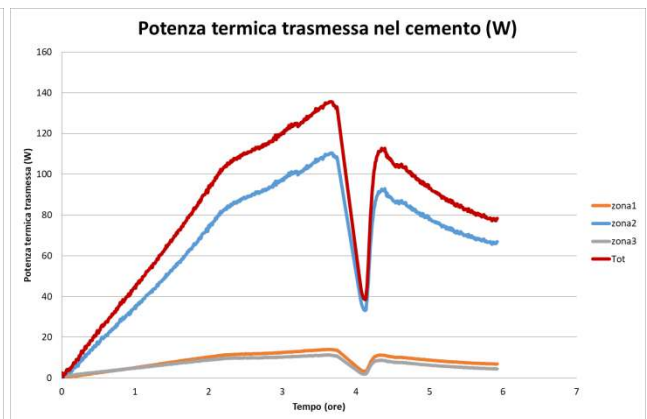
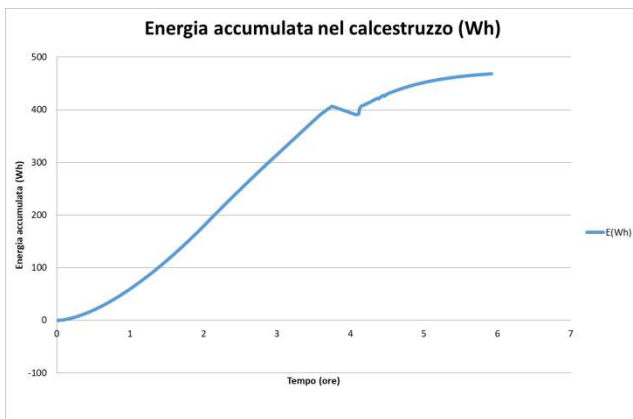
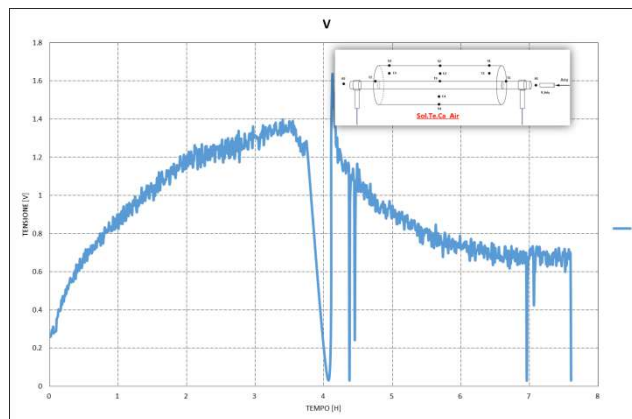
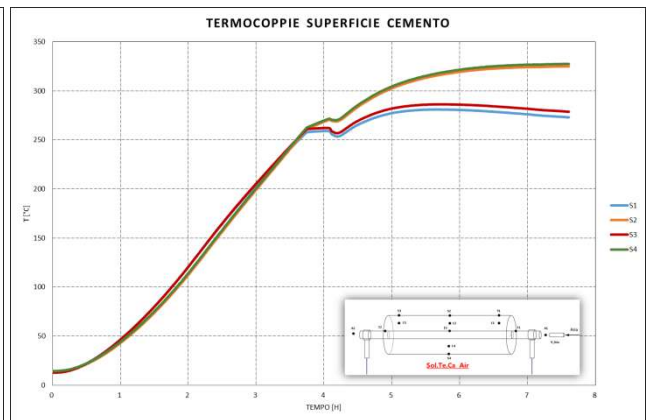
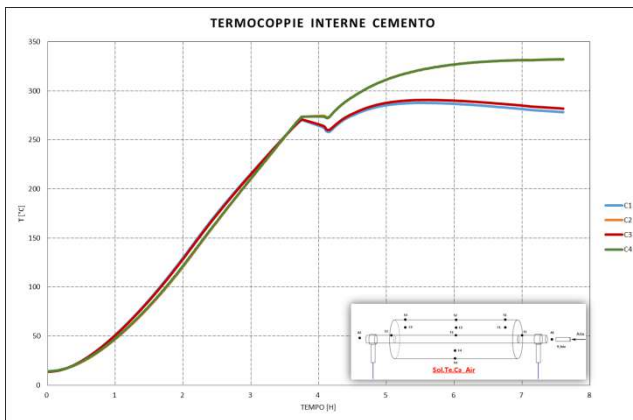
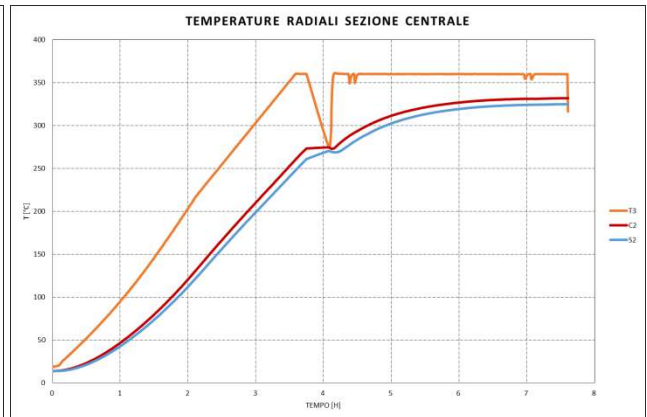
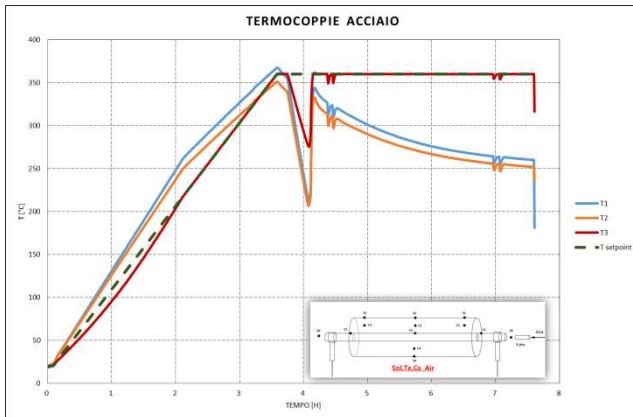


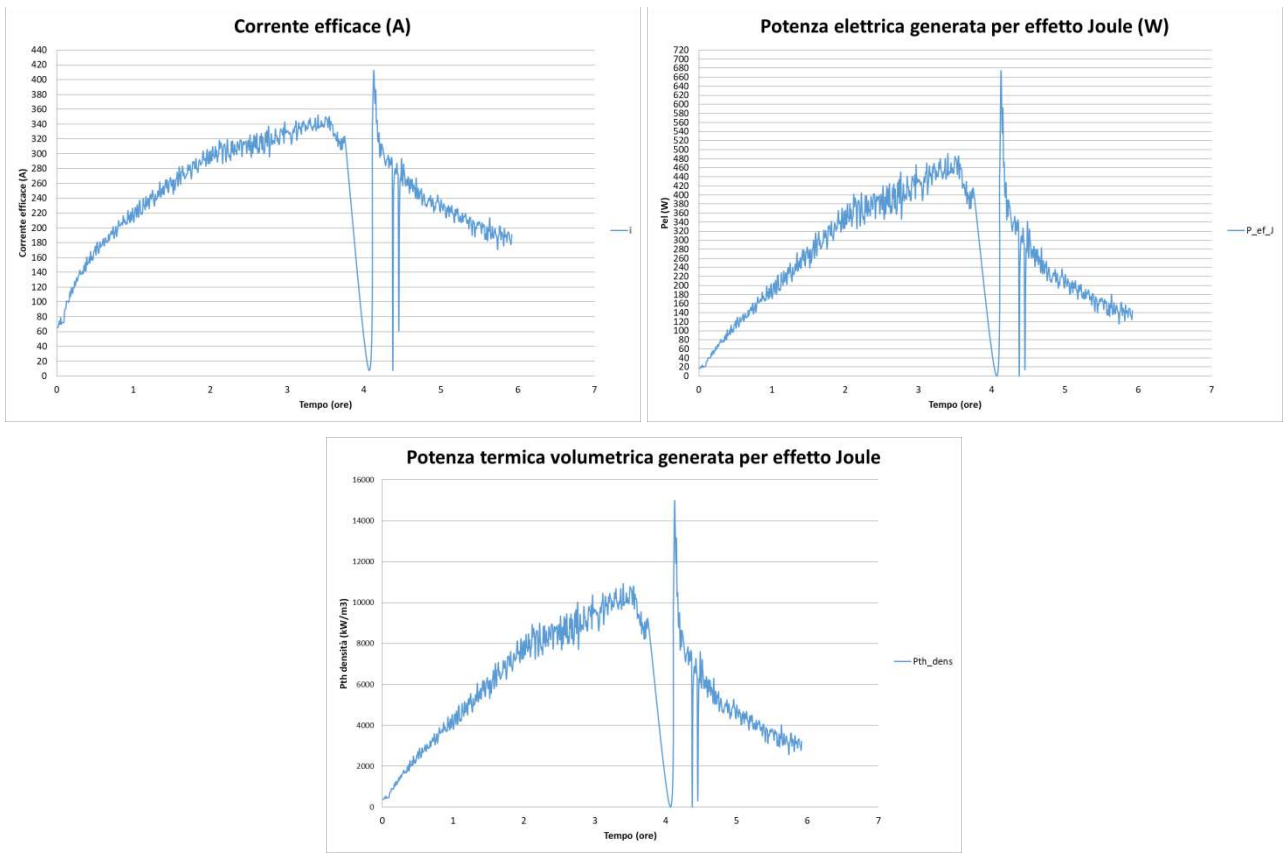
Risultati test B1-T2-C



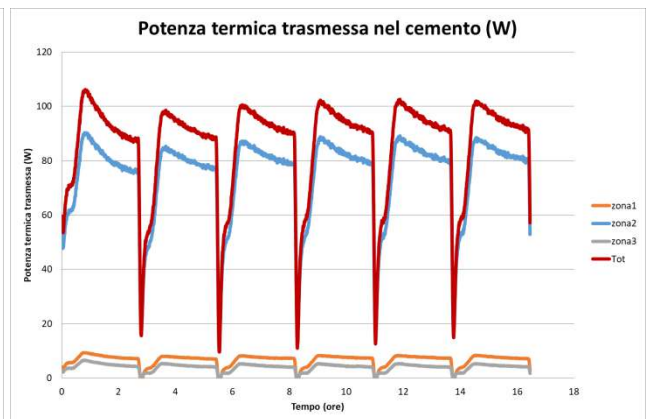
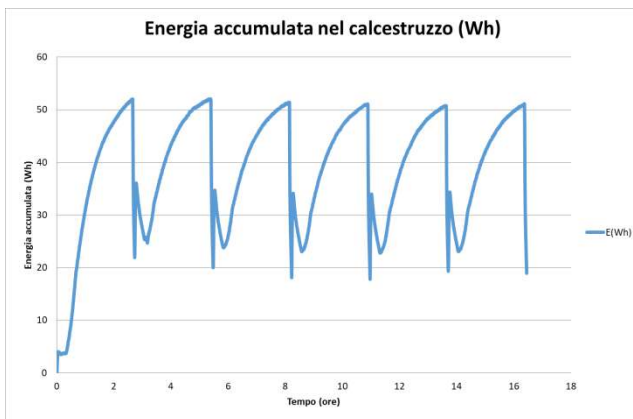
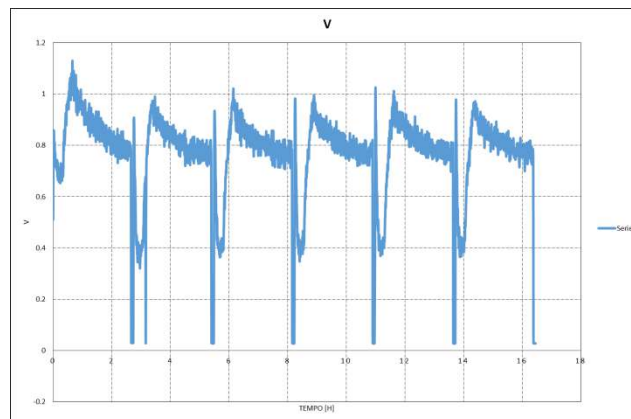
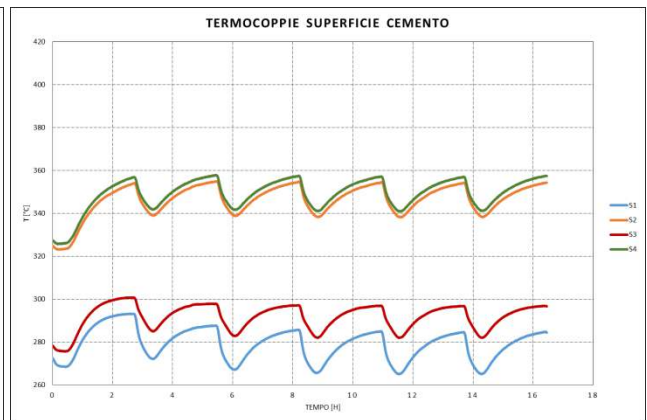
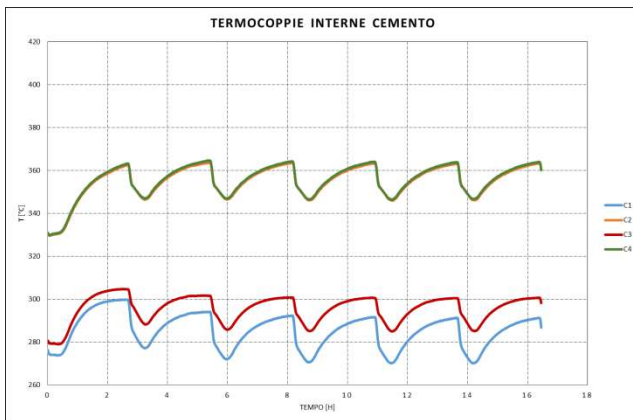
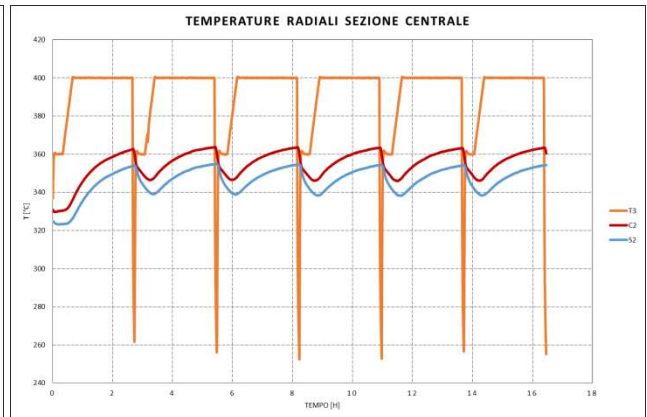
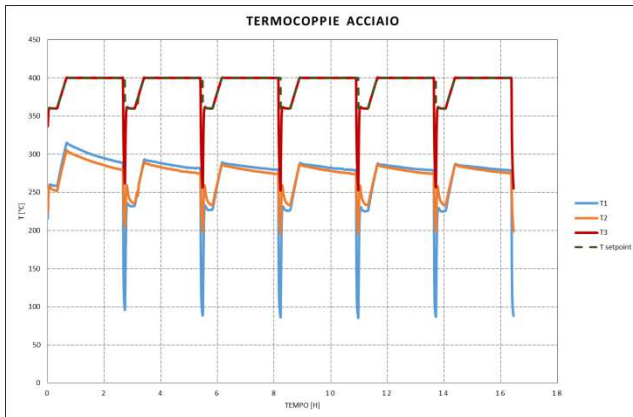


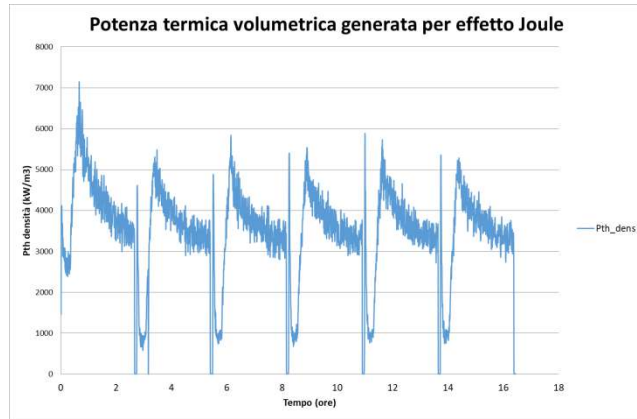
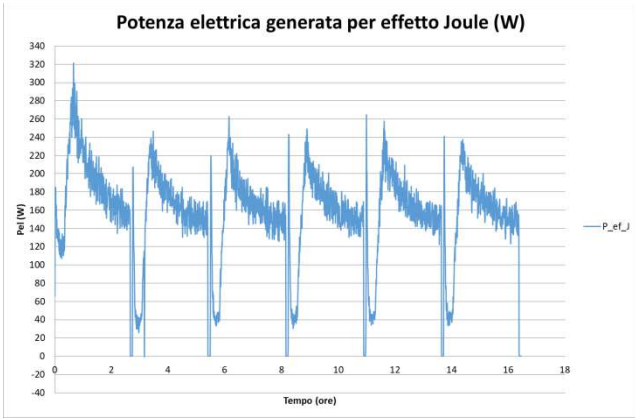
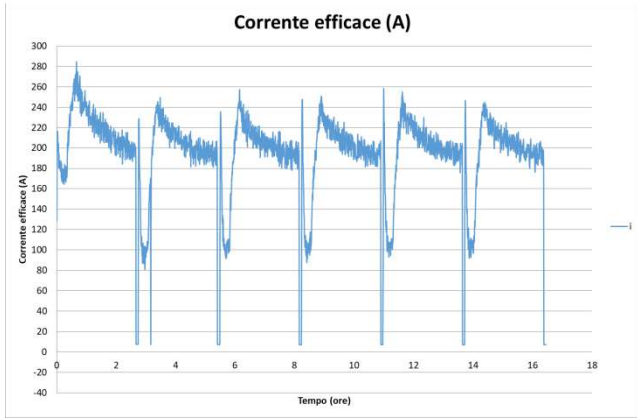
Risultati test B1-T3-R



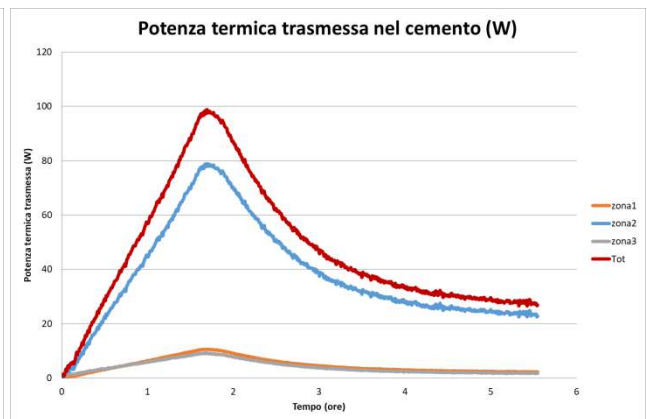
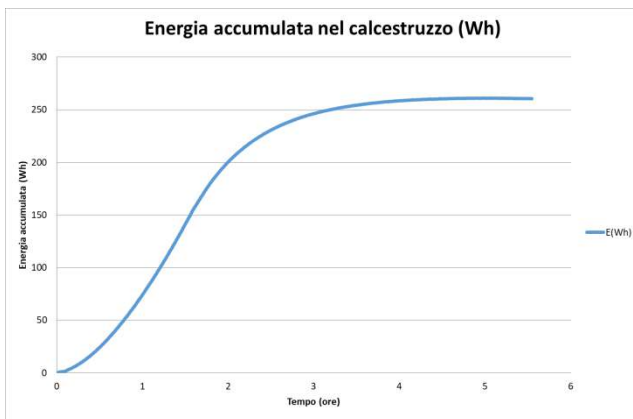
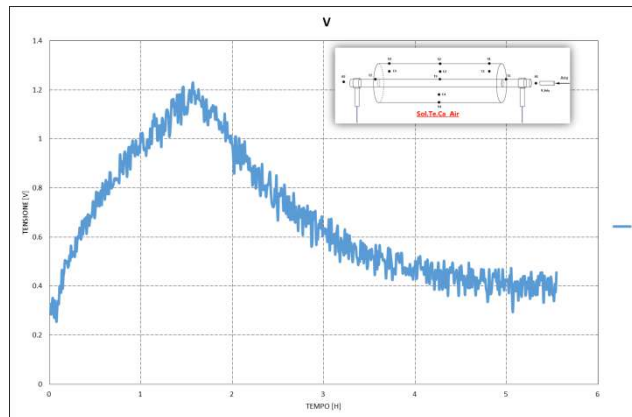
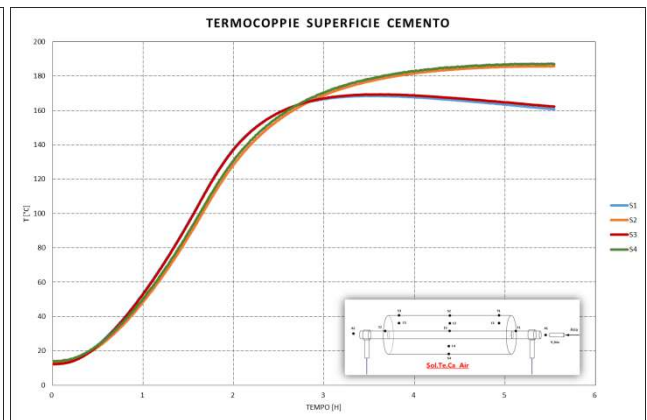
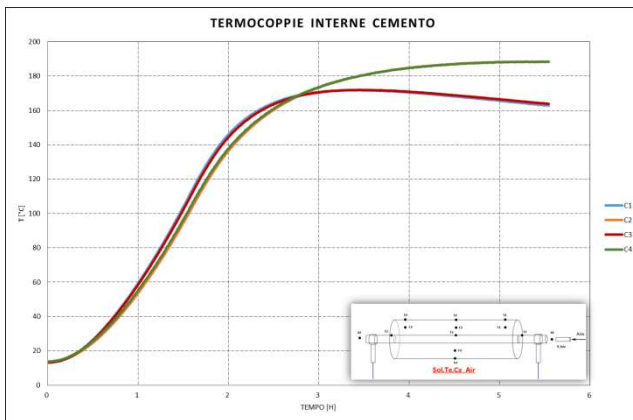
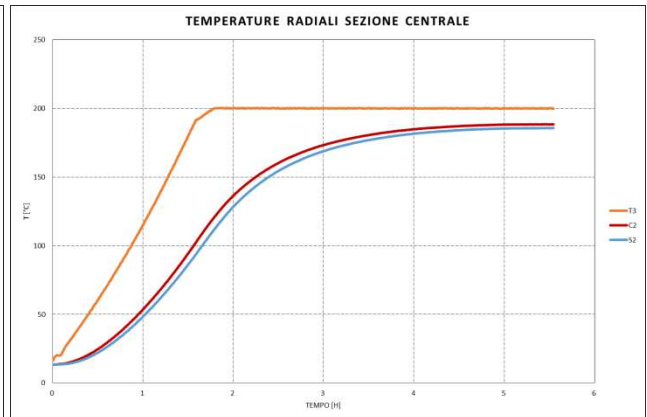
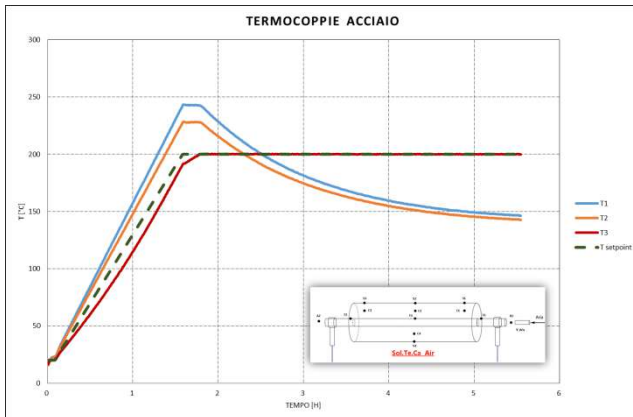


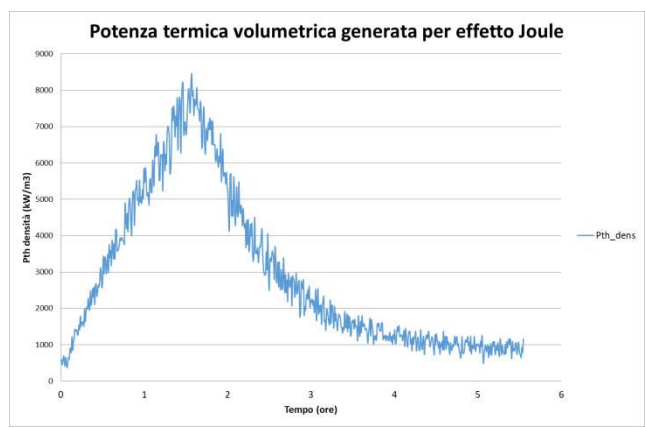
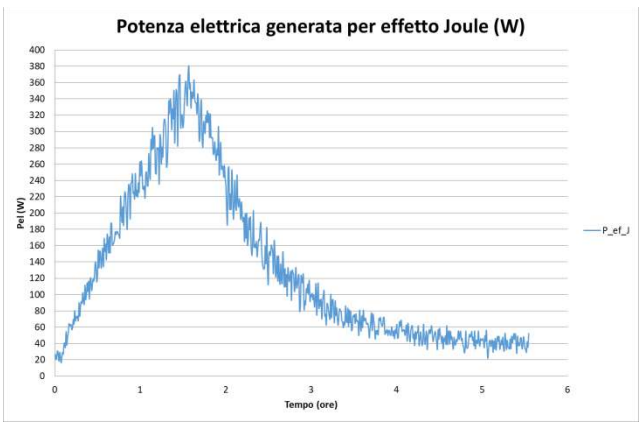
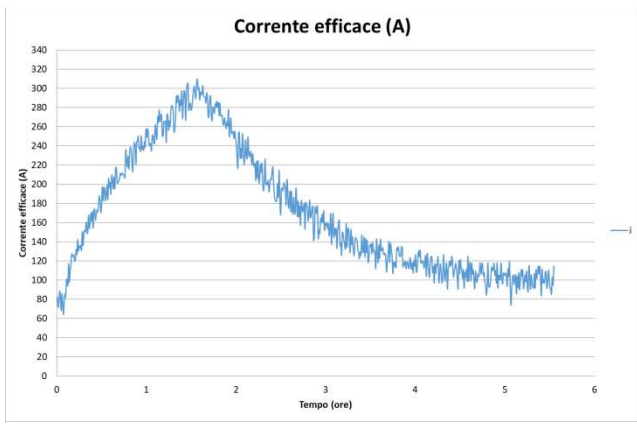
Risultati test B1-T3-C



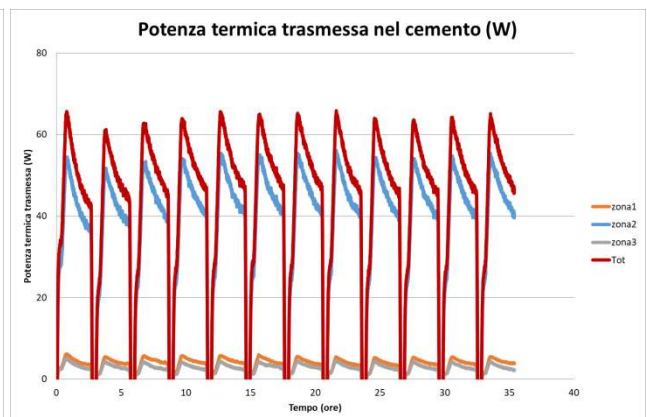
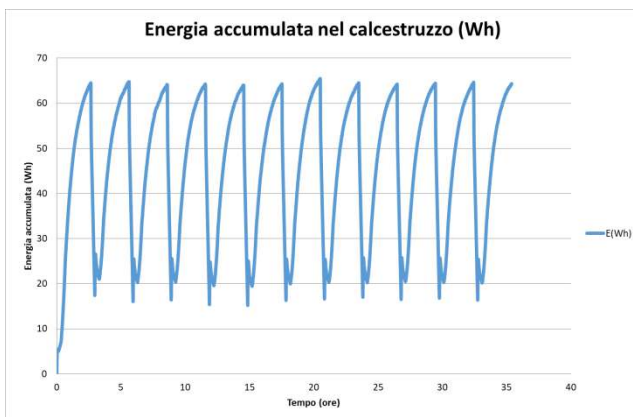
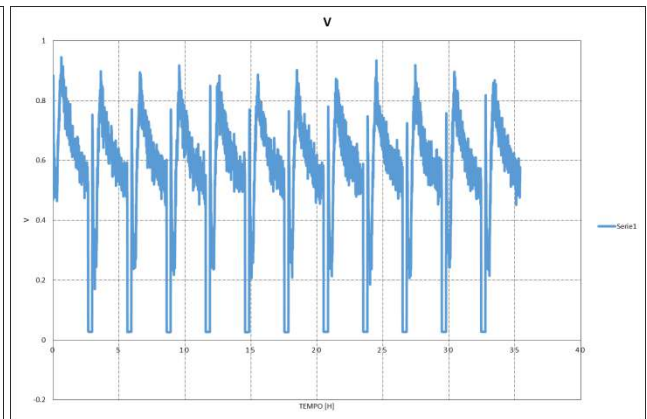
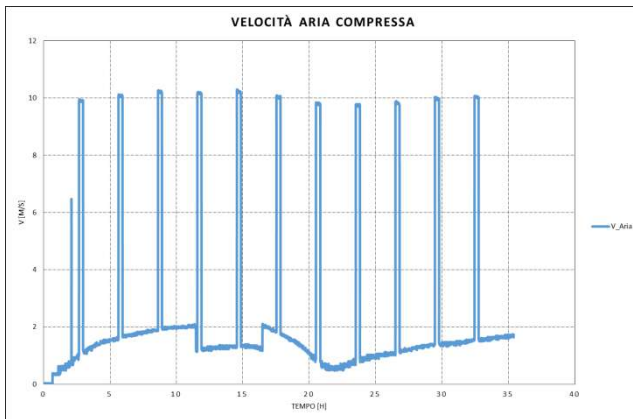
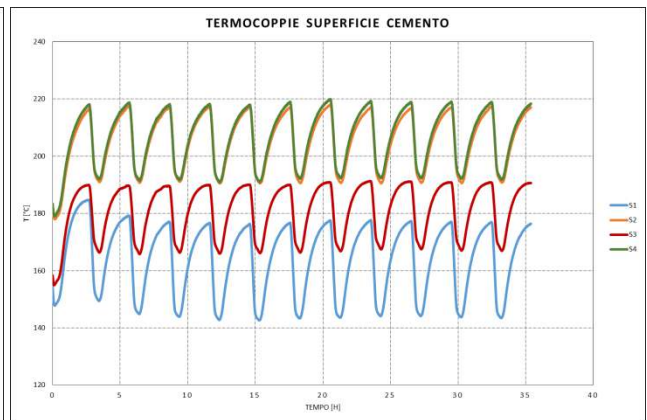
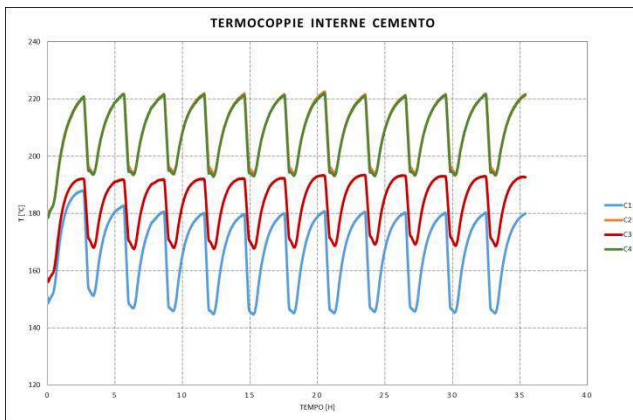
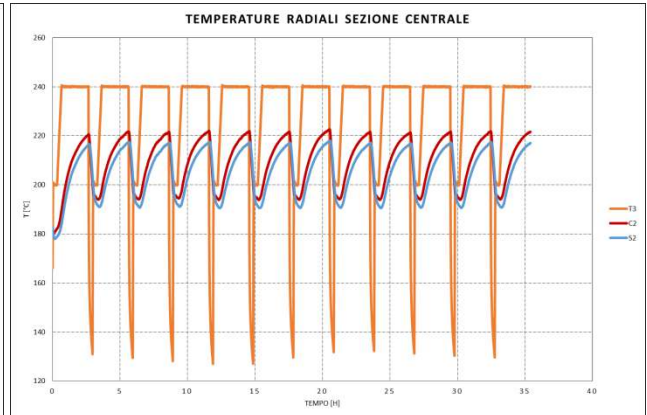
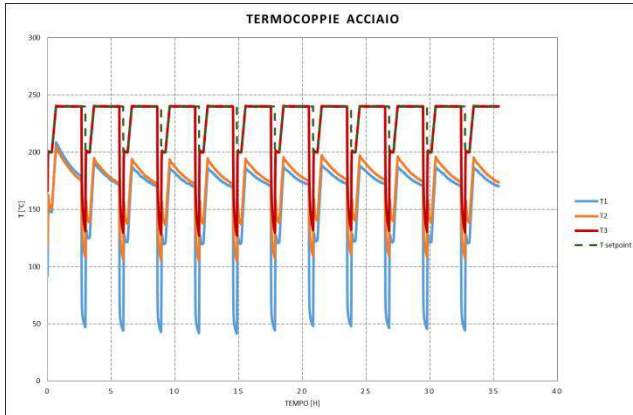


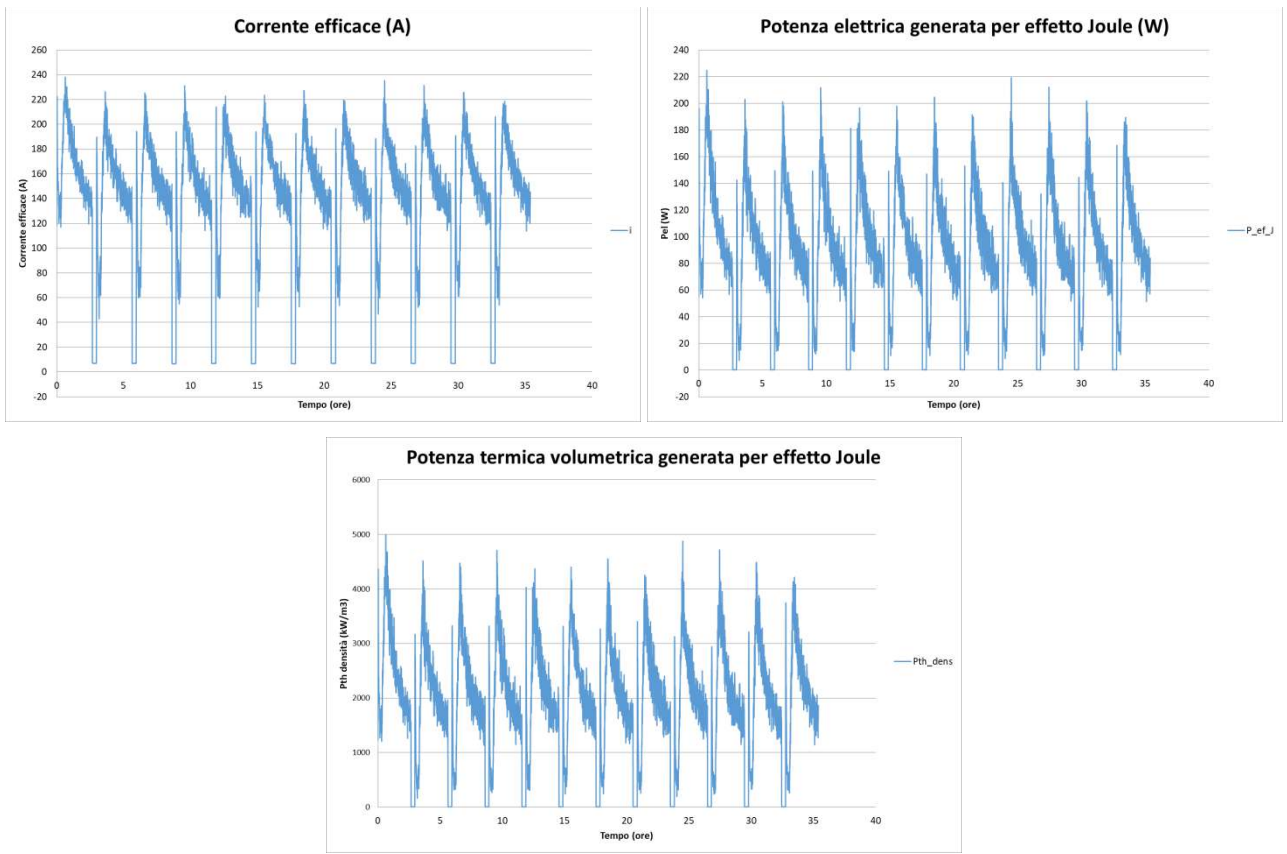
Risultati test B1-T4-R





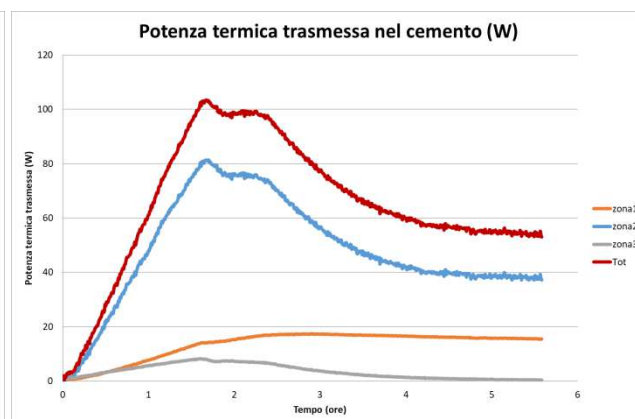
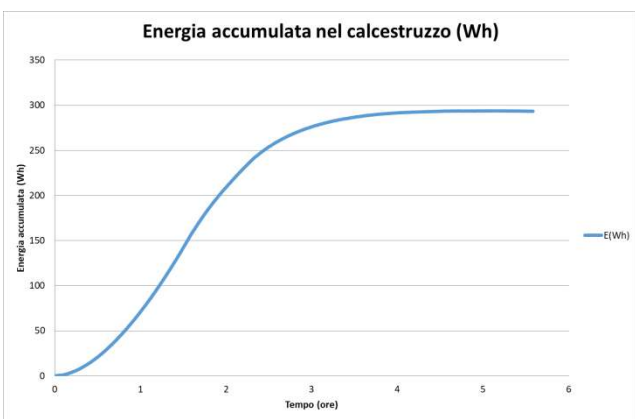
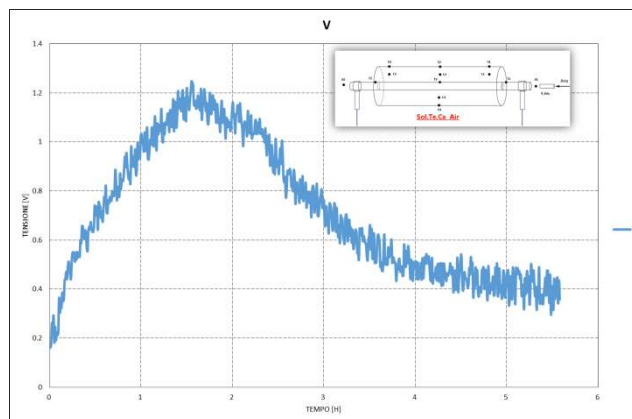
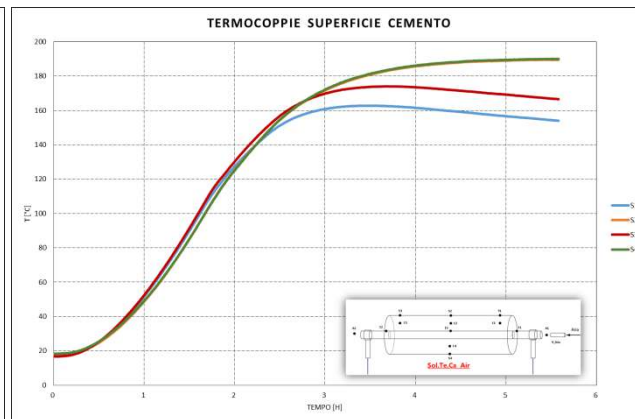
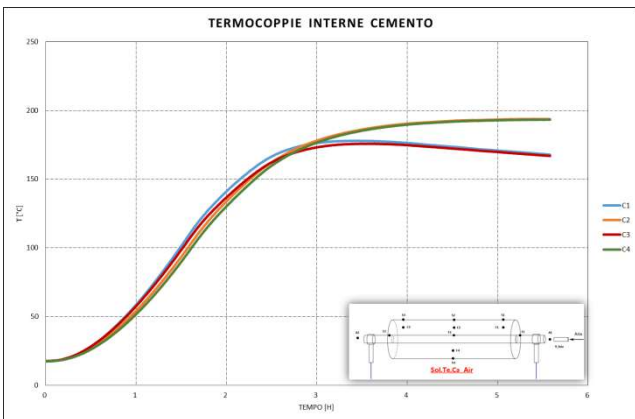
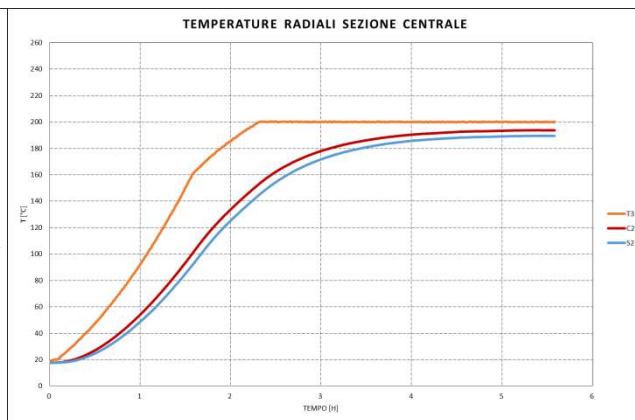
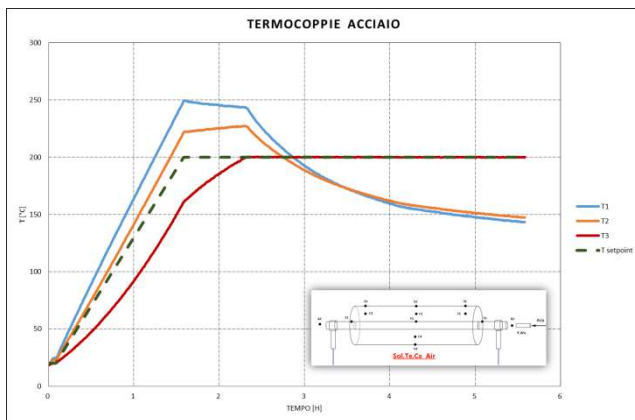
Risultati test B1-T4-C

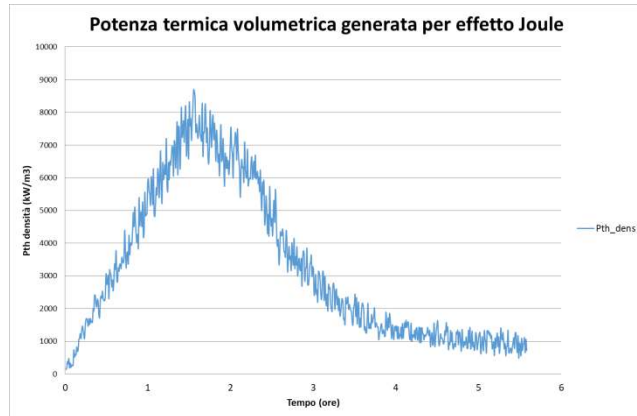
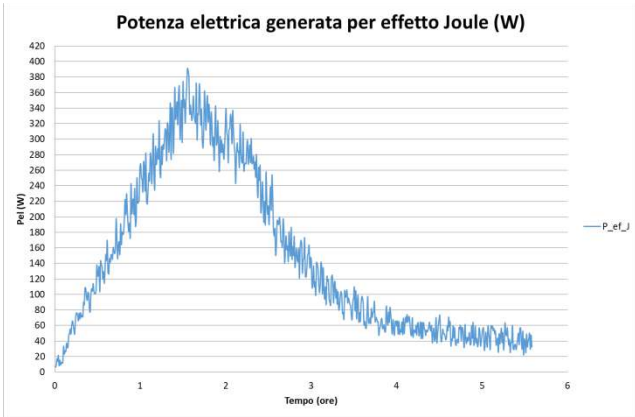
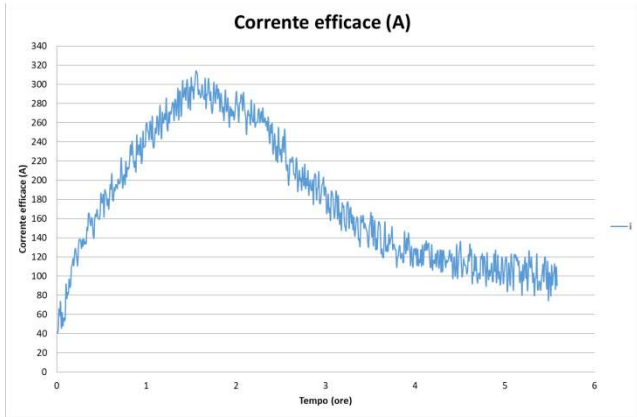




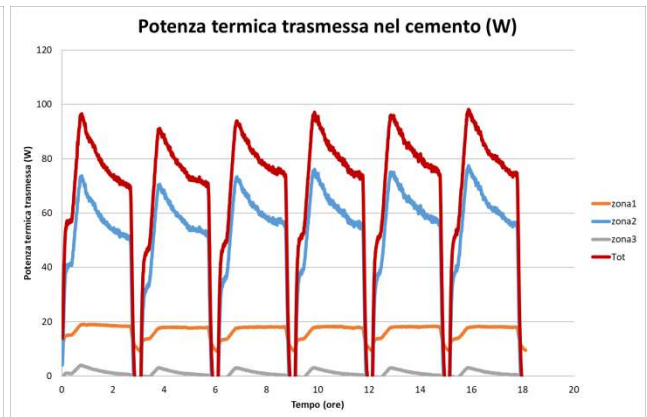
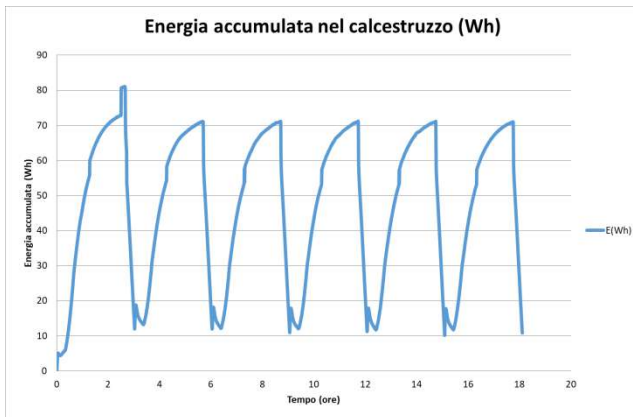
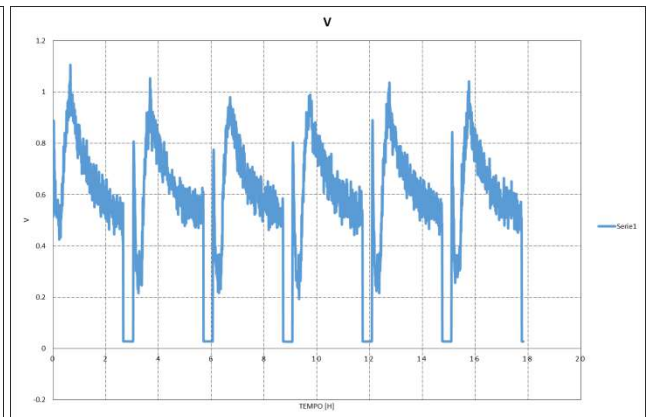
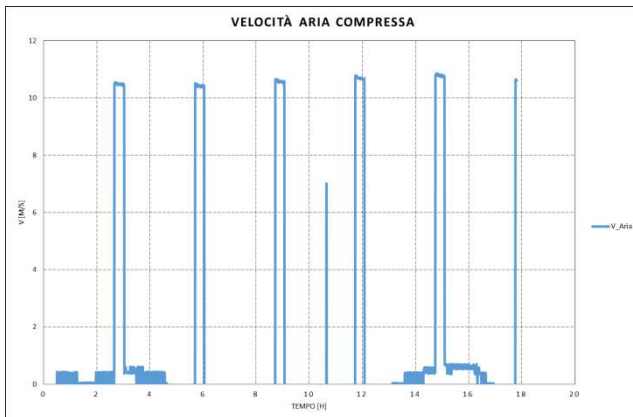
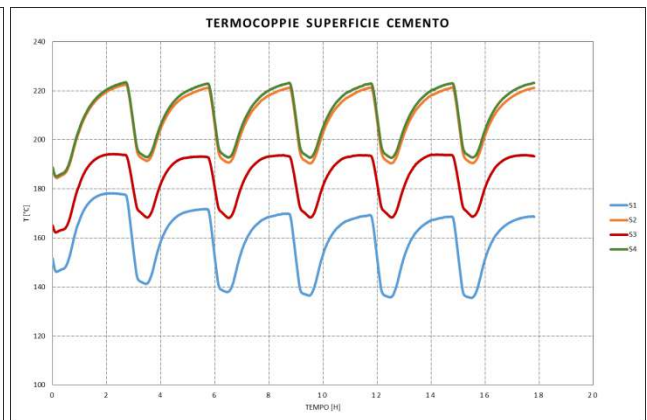
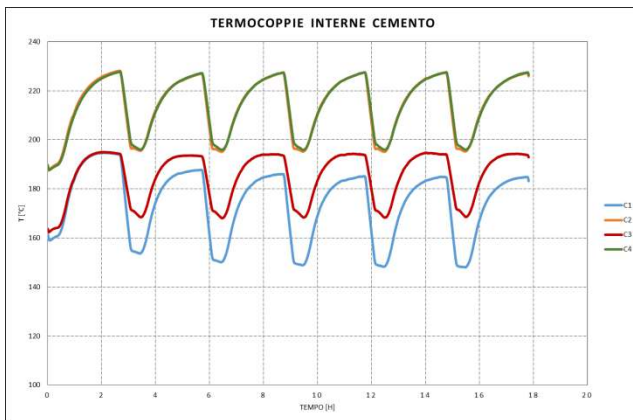
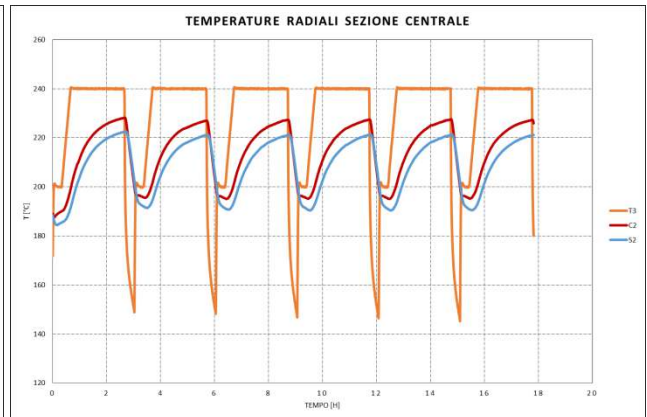
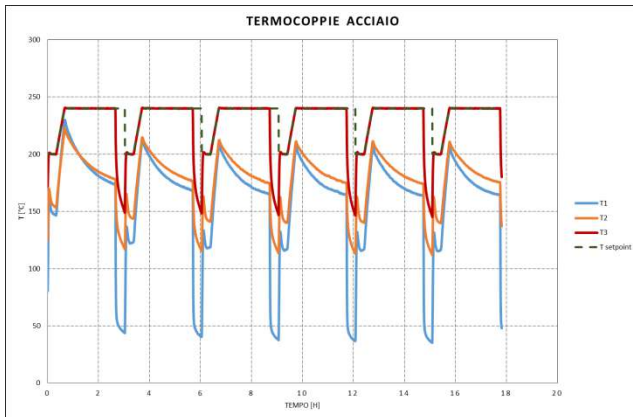
Appendice B: Risultati provino BP1

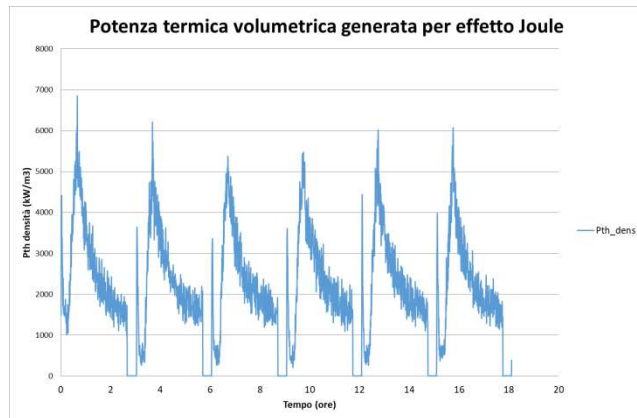
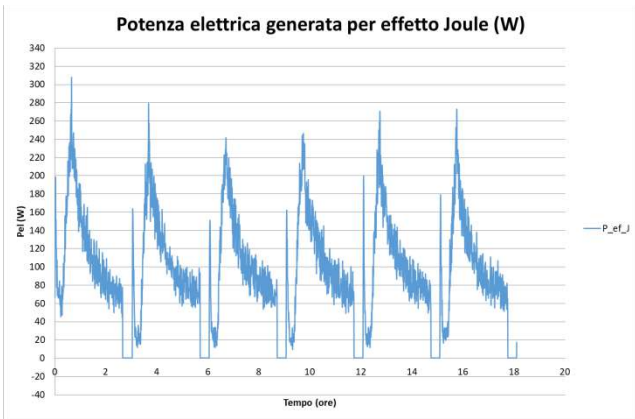
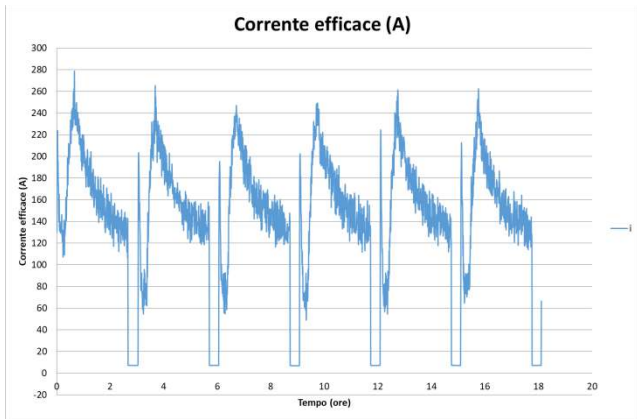
Risultati test BP1-T1-R



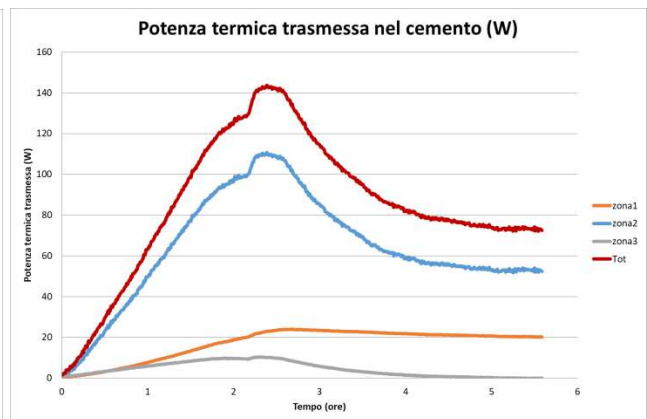
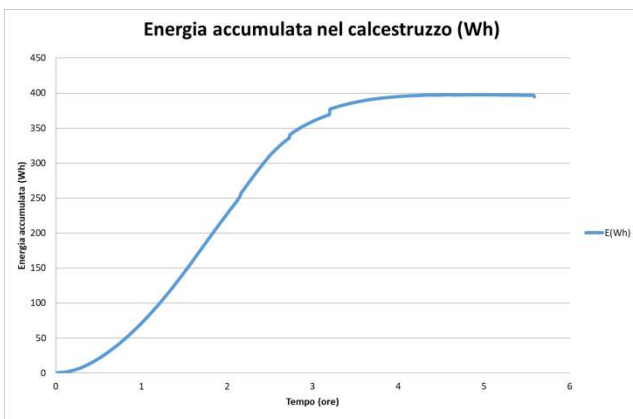
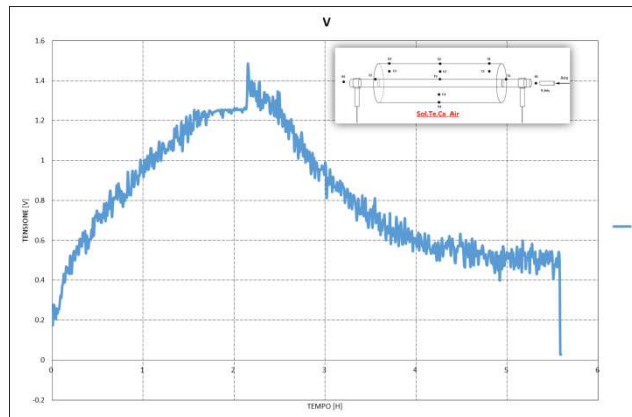
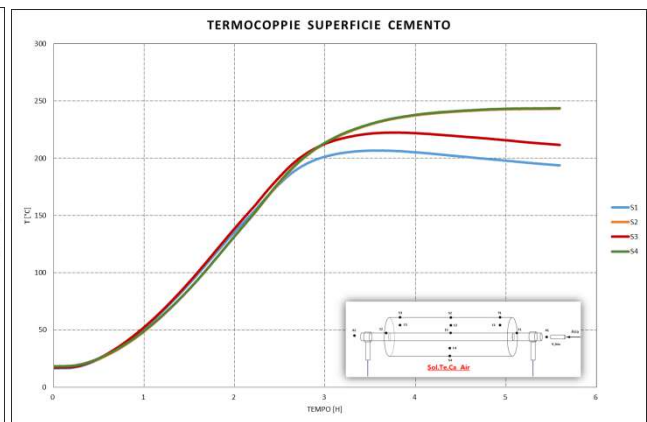
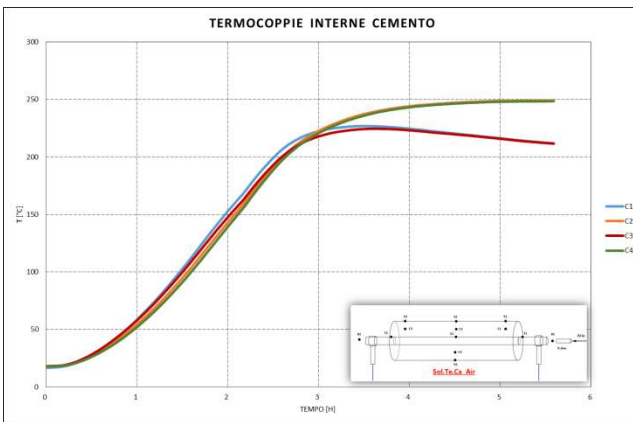
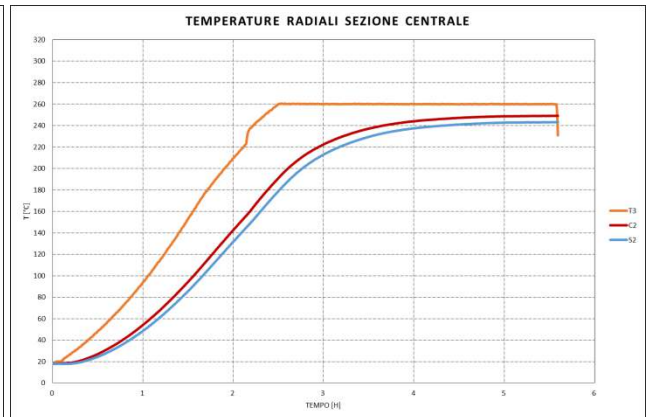
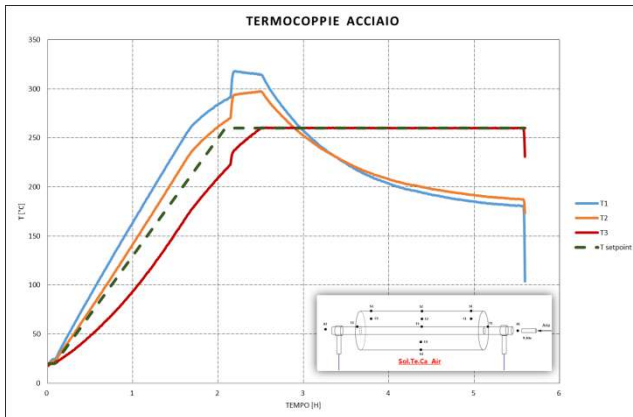


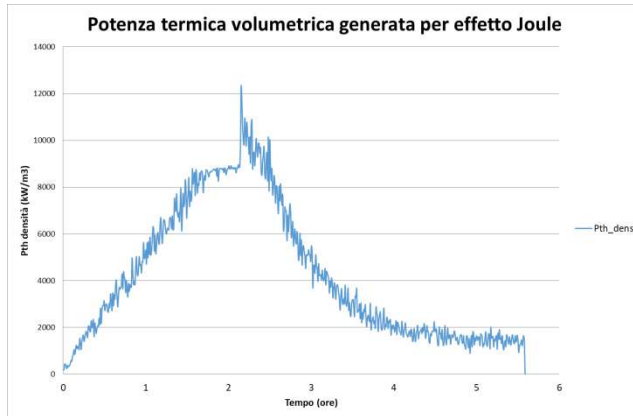
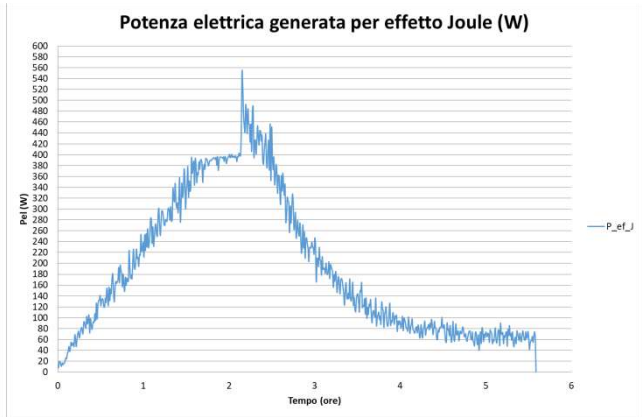
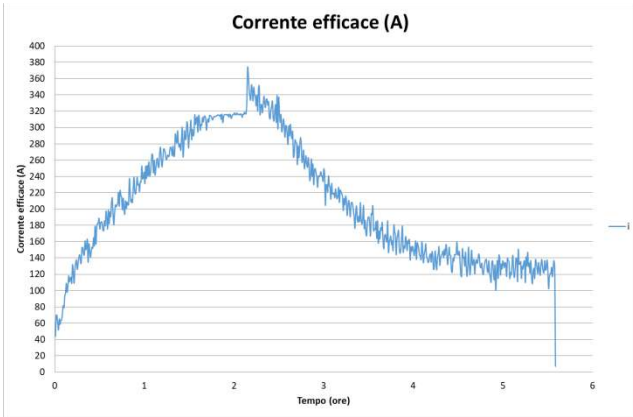
Risultati test BP1-T1-C



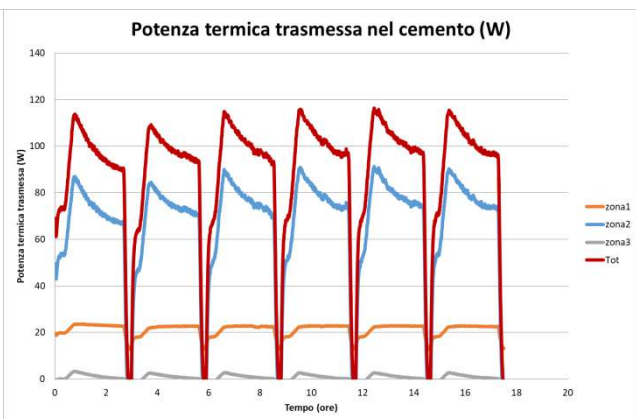
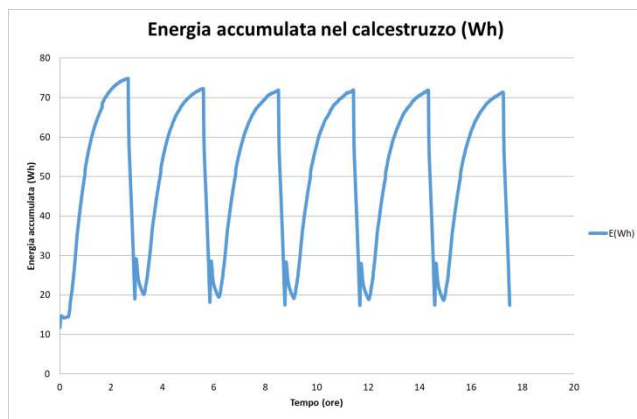
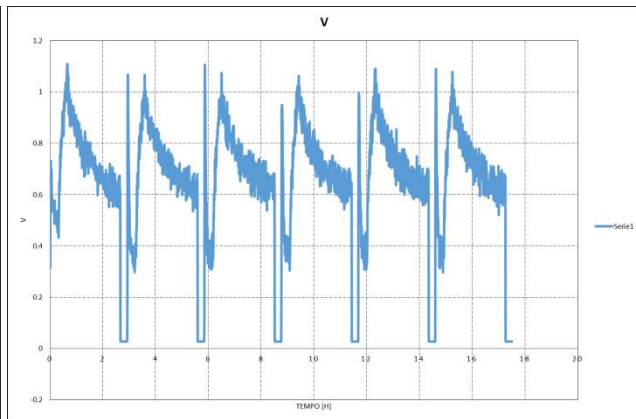
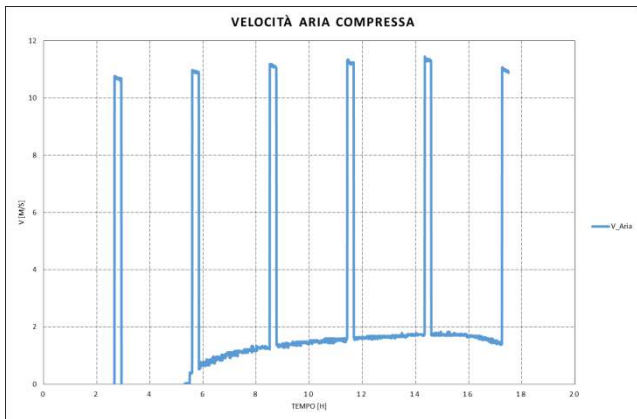
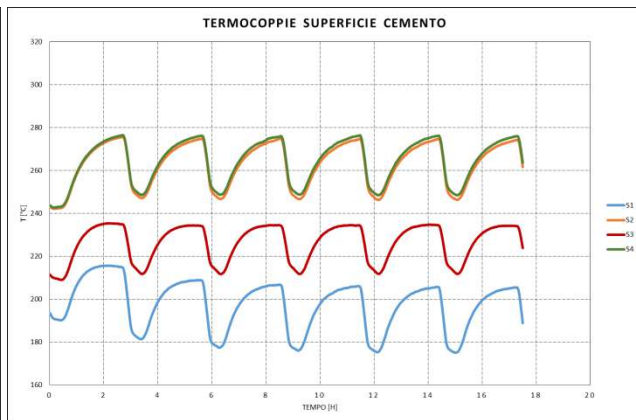
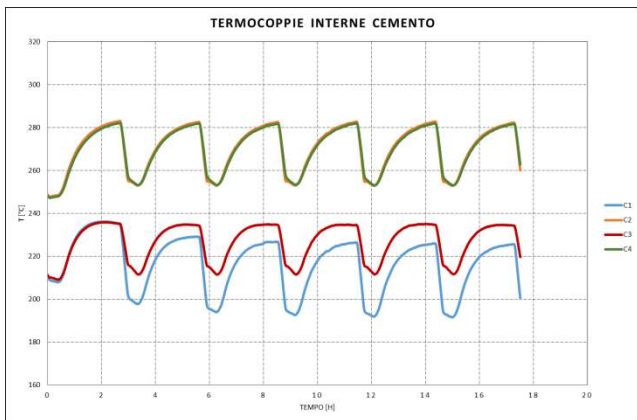
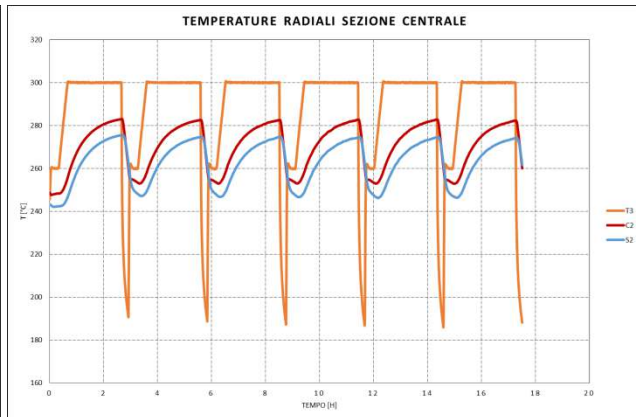
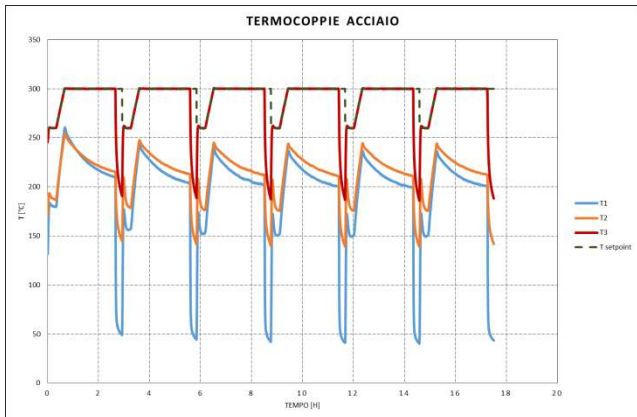


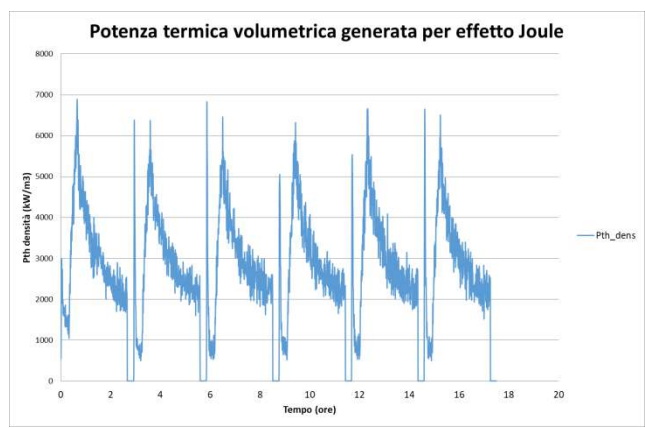
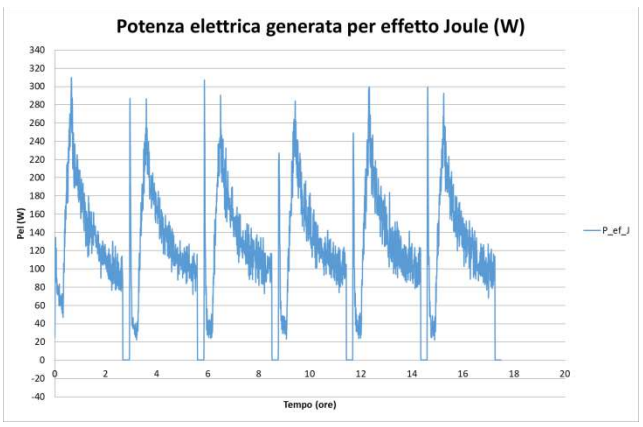
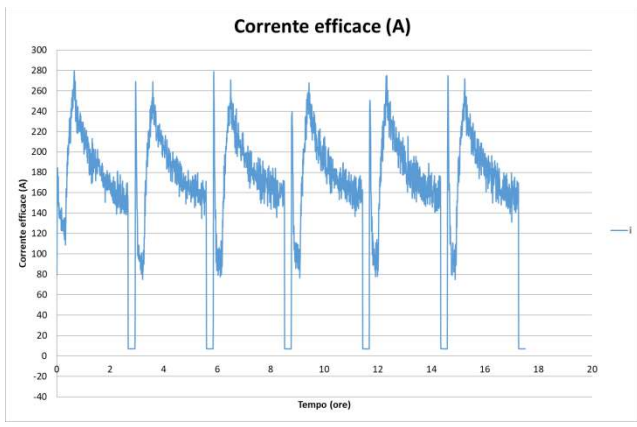
Risultati test BP1-T2-R



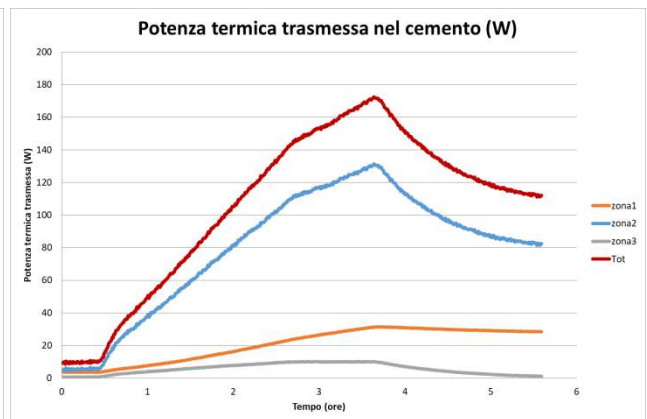
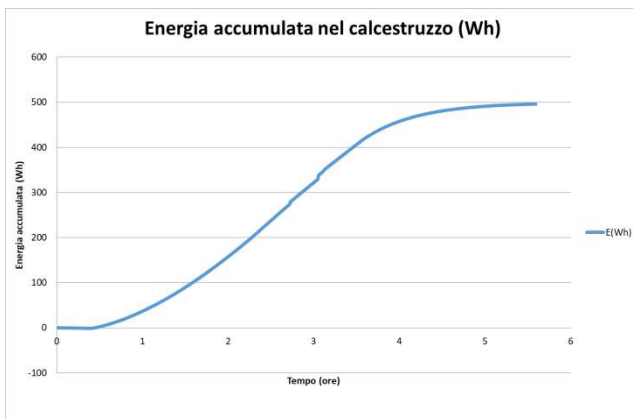
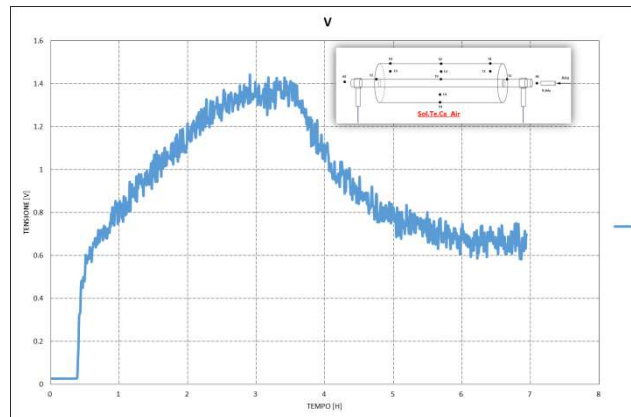
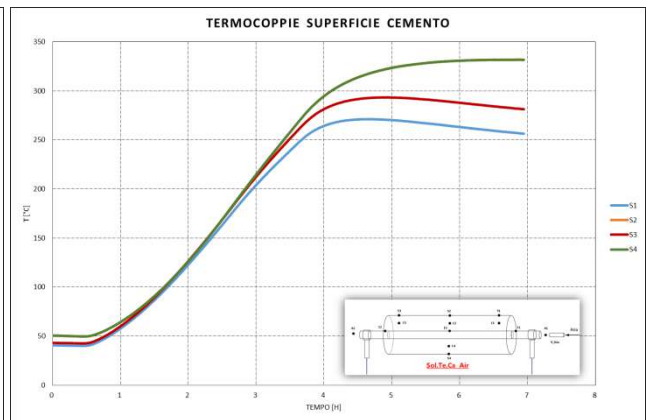
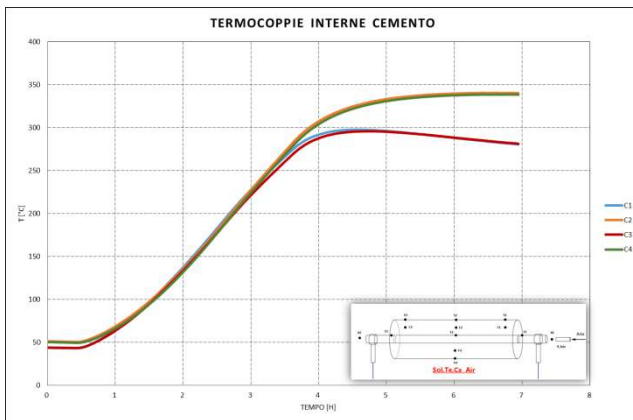
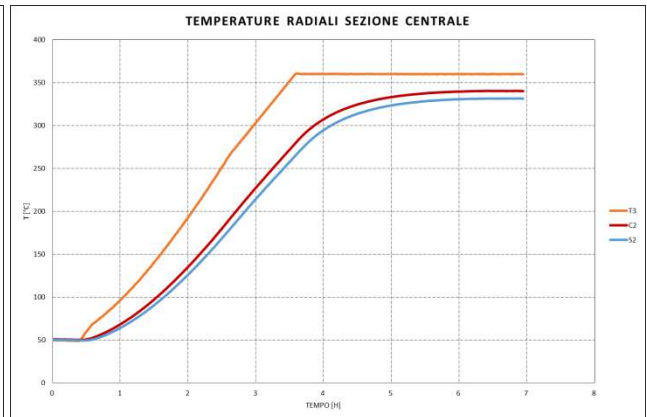
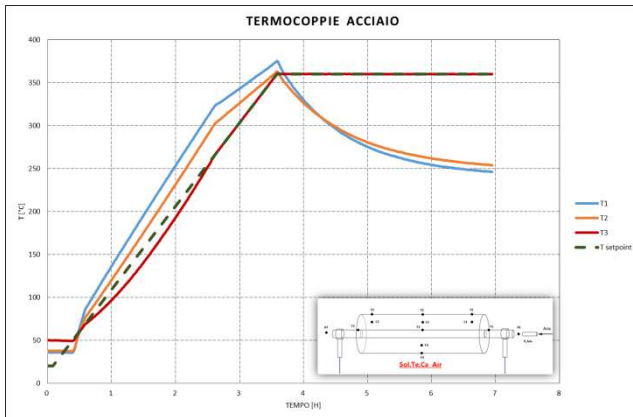


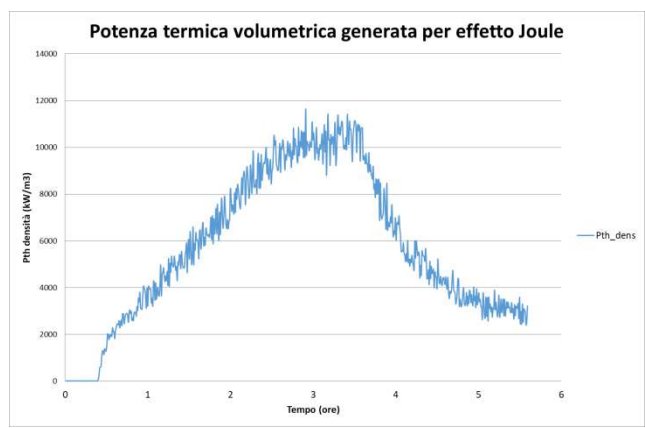
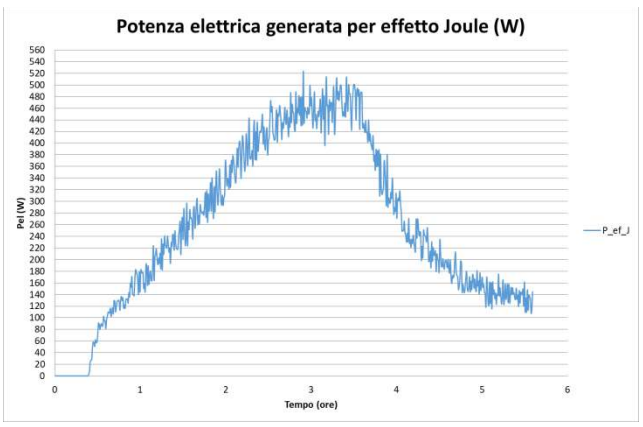
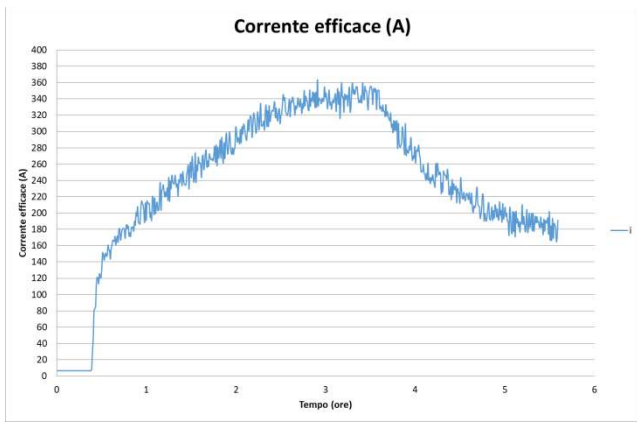
Risultati test BP1-T2-C



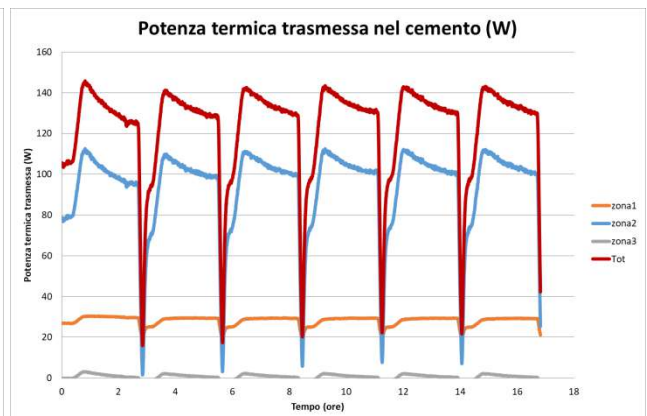
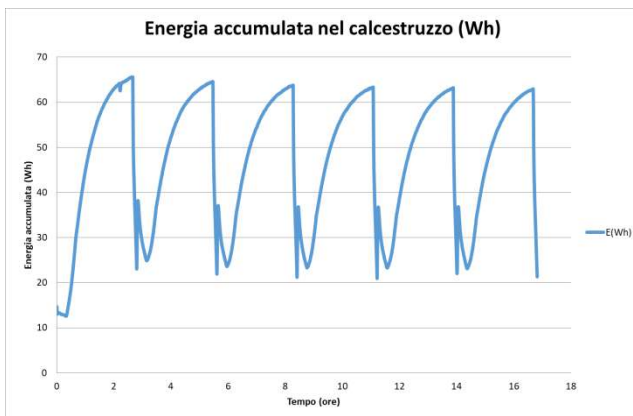
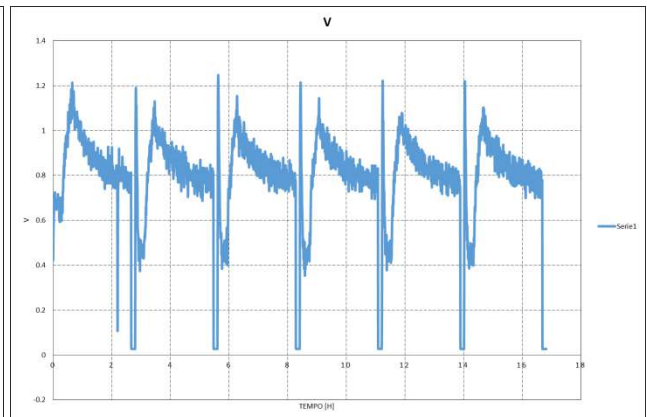
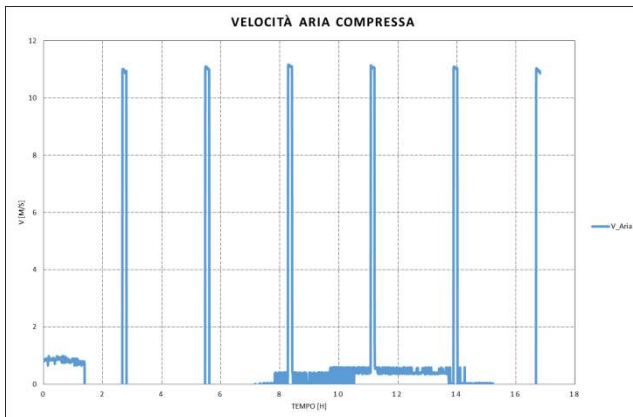
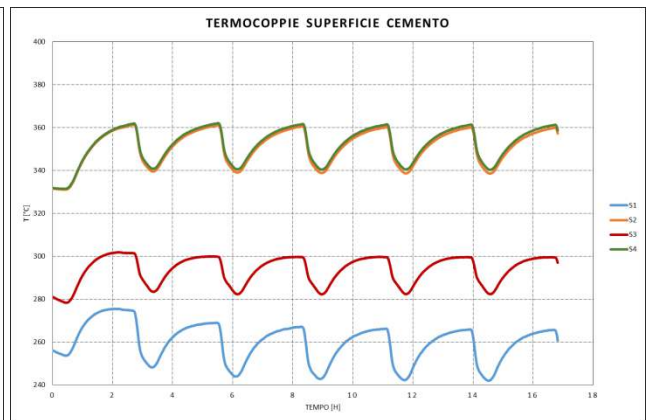
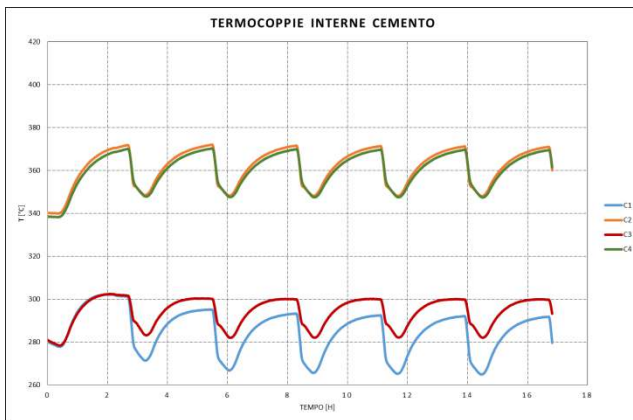
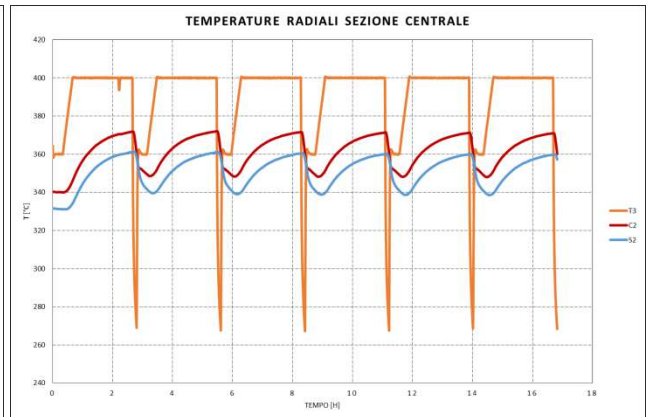
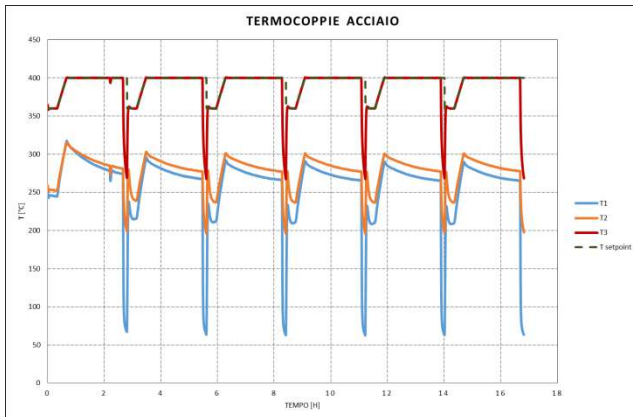


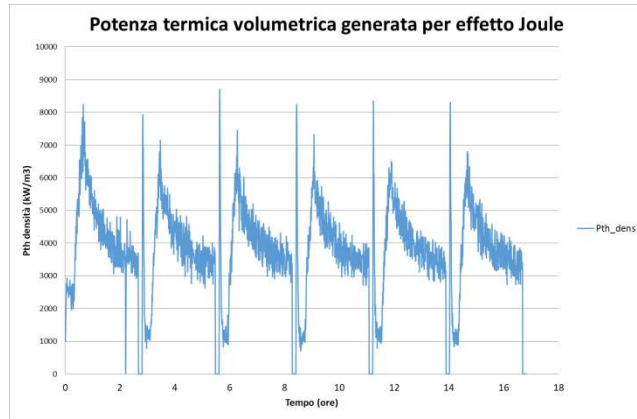
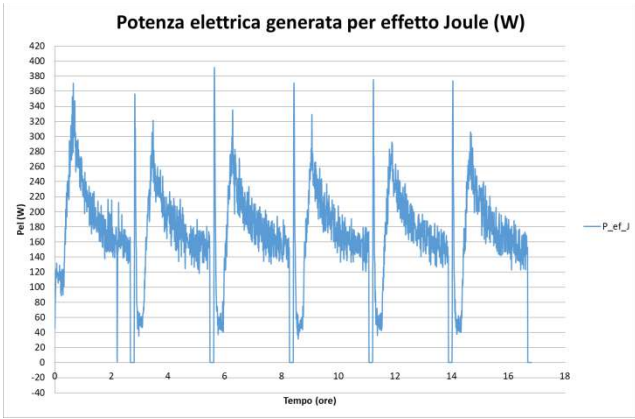
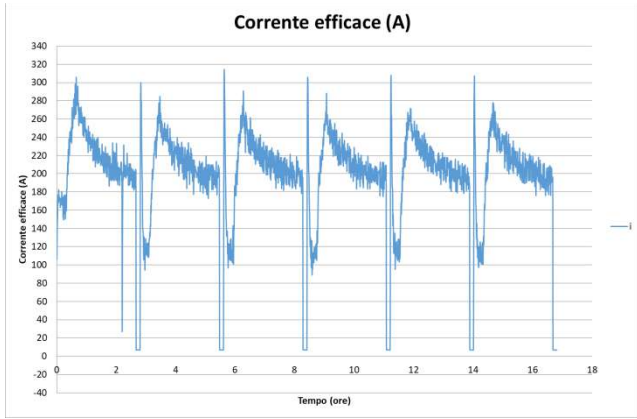
Risultati test BP1-T3-R



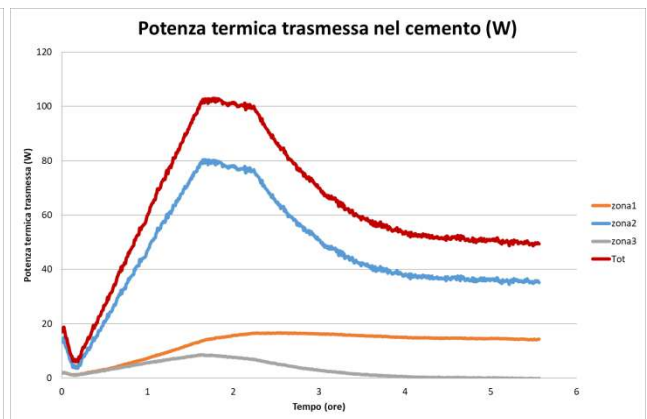
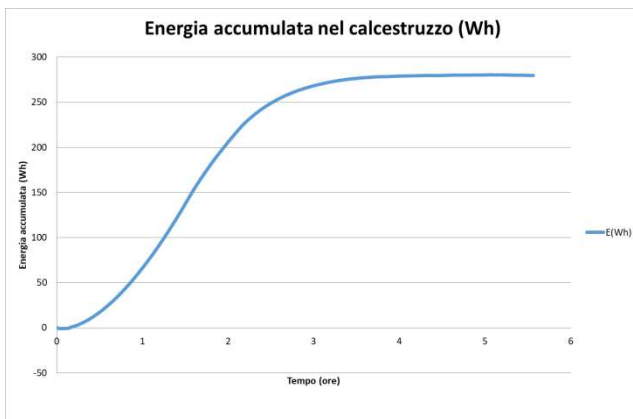
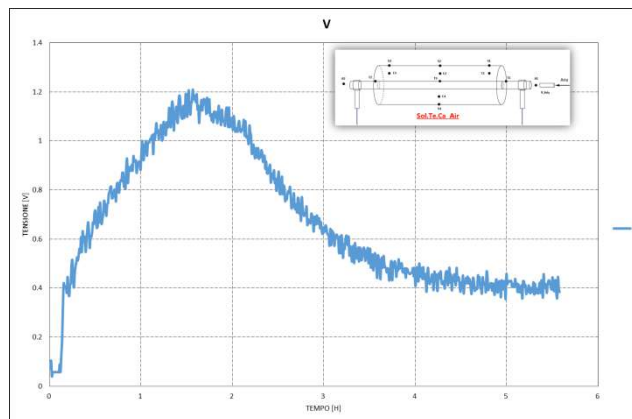
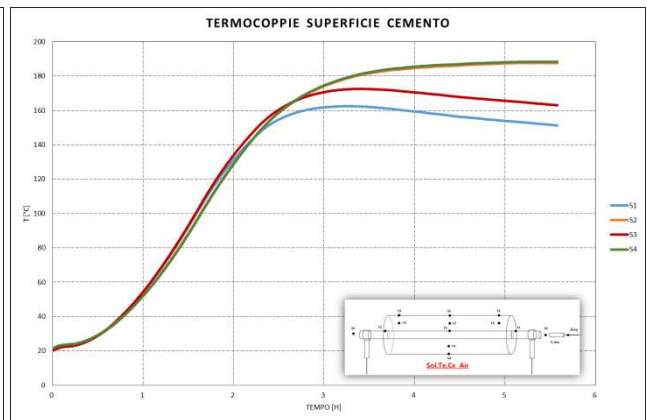
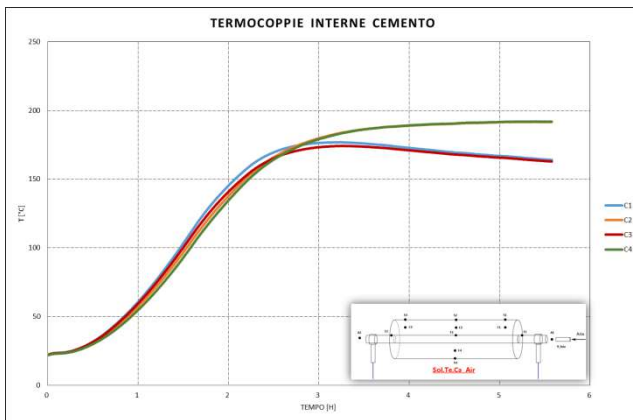
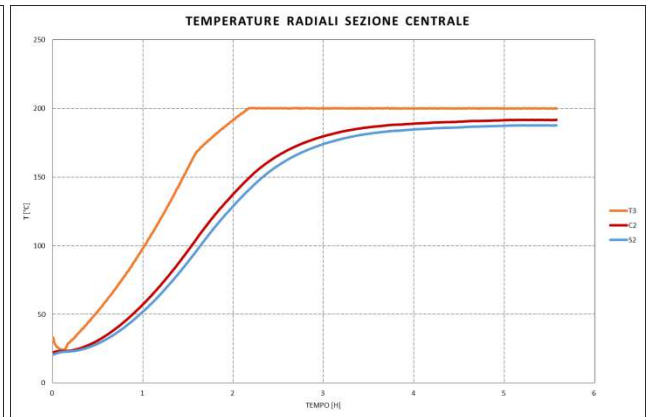
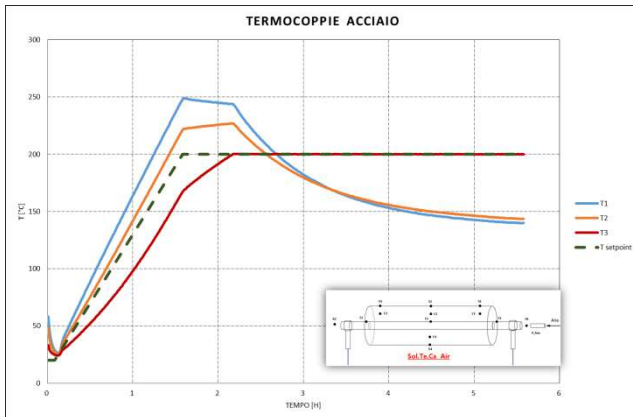


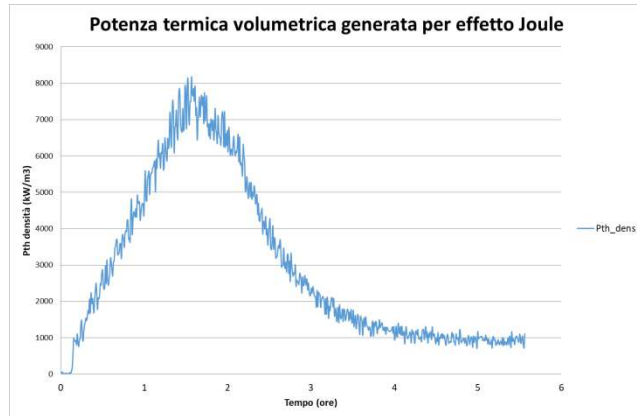
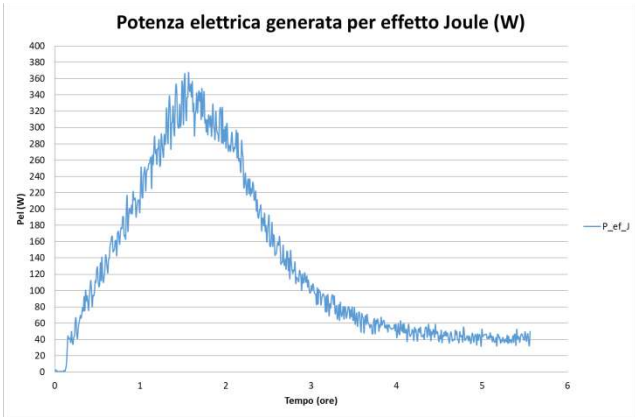
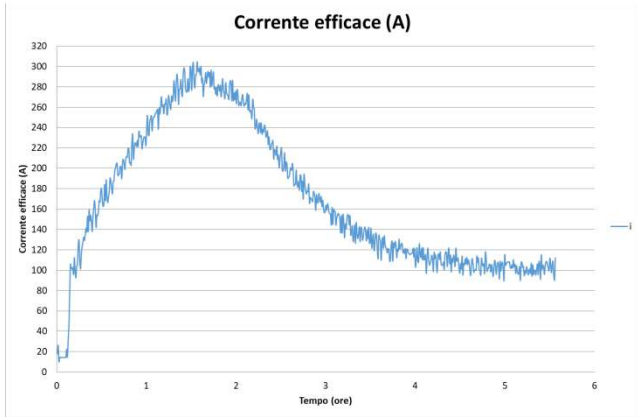
Risultati test BP1-T3-C





Risultati test BP1-T4-R





Risultati test BP1-T4-C

