



Ricerca di Sistema elettrico

Progettazione campagna sperimentale su elementi di accumulo termico in calcestruzzo ed analisi dei risultati

G. Mazzucco, G. Xotta, V. Salomoni, C. Majorana

PROGETTAZIONE CAMPAGNA SPERIMENTALE SU ELEMENTI DI ACCUMULO TERMICO IN CALCESTRUZZO ED
ANALISI DEI RISULTATI

G. Mazzucco G. Xotta, V. Salomoni, C. Majorana (Università degli Studi di Padova)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2013
Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente
Progetto: Energia elettrica da fonte solare
Obiettivo: Studio di configurazioni impiantistiche alternative
Responsabile del Progetto: Domenico Mazzei, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 IMPOSTAZIONE CAMPAGNA SPERIMENTALE SU MESCOLA A CONDUCIBILITÀ MIGLIORATA SU CIRCUITO AD OLIO SILICONICO	5
2.1 DESCRIZIONE DEL CIRCUITO SPERIMENTALE SOLTeCA	5
2.2 DEFINIZIONE DELLE SEZIONI DI PROVA E PUNTI DI ACQUISIZIONE DATI	6
2.3 RANGE DI TEMPERATURA E DURATA DELLA PROVA.....	10
3 ANALISI ED INTERPRETAZIONE DELLE PROVE SPERIMENTALI	11
3.1 TEST2 – CICLI DI CARICO E SCARICO.....	11
4 PROGETTAZIONE DI UN’APPARECCHIATURA DI CICLAGGIO TERMICO PER TEMPERATURE FINO A 400 °C	14
4.1 LAYOUT DELL’APPARECCHIATURA.....	14
4.2 SISTEMA DI RISCALDAMENTO E RAFFREDDAMENTO.....	16
4.3 SCHEMA DI ACQUISIZIONE DATI E CONTROLLO	16
4.4 SIMULAZIONI TERMOMECCANICHE MEDIANTE CODICE FEM	17
4.4.1 <i>Simulazione del transitorio termico relativo alle fasi di riscaldamento e di raffreddamento.</i>	18
4.4.2 <i>Stato tensionale a fine riscaldamento</i>	21
5 CONCLUSIONI.....	24
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	25

Sommario

Le attività relazionate nel presente report sono a supporto della ricerca sul comportamento di sistemi di accumulo impieganti calcestruzzi con migliorate caratteristiche termo-meccaniche.

Il report è articolato in tre fasi. La prima fase riguarda l'impostazione della campagna sperimentale su mescola a conducibilità migliorata, sviluppata dall'Università di Trento, impiegando il circuito sperimentale SolTeCa, con revisione delle geometrie degli elementi d'accumulo, della disposizione delle termocoppie in essi inserite, e delle procedure di ciclaggio. Si è successivamente affrontata l'interpretazione delle registrazioni sperimentali effettuate da ENEA, mediante confronto con calcoli numerici appositamente predisposti impiegando il codice FEM CAST3M. Infine si fornisce il progetto di una nuova apparecchiatura di ciclaggio termico degli elementi di accumulo per temperature intorno ai 400 °C, basata sul riscaldamento ad effetto Joule. Si riportano le simulazioni FEM effettuate, finalizzate alla comprensione delle dinamiche termiche e agli effetti termo meccanici indotti negli elementi di accumulo in calcestruzzo, con tale modalità di ciclaggio termico.

1 Introduzione

La nuova campagna sperimentale per la valutazione delle prestazioni di elementi di accumulo in calcestruzzo, realizzati con apposita mescola sviluppata dall'università di Trento, ha richiesto una revisione delle dimensioni geometriche degli elementi di accumulo e della strumentazione di misura ad essi applicata. I dati sperimentali acquisiti dall'ENEA sono confrontati con quelli prodotti da simulazioni numeriche FEM ed interpretati al fine di comprendere i limiti di applicabilità di tali strumenti e parallelamente evidenziare sempre possibili anomalie nei rilievi sperimentali. Si è inoltre progettata un'apparecchiatura per il ciclaggio termico per temperature che potrebbero all'occorrenza superare i 400 °C, svincolandosi dai limiti imposti dall'olio silconico e da alcune difficoltà di conduzione emerse nella precedente campagna sperimentale. Per tale tecnica si è adottata una modalità di riscaldamento ad effetto Joule con successivo raffreddamento con aria compressa, facilmente automatizzabile senza richiedere particolari attenzioni per la sicurezza di esercizio.

2 Impostazione campagna sperimentale su mescola a conducibilità migliorata su circuito ad olio silconico

2.1 Descrizione del circuito sperimentale SolTeCa

L'impianto sperimentale presente in ENEA Casaccia (**Figura 1**) denominato SolTeCa1 è adibito allo studio dell'accumulo del calcestruzzo che riceverà e cederà calore attraverso un fluido termovettore Alusil TR 50. Il calore è fornito al fluido per mezzo di un termostato di circolazione, che è in grado di mantenere una temperatura di mandata costante e regolare la velocità del fluido a vari valori definiti.

Il calcestruzzo nella fase di scarico cederà il calore al fluido termovettore, dopo che questo sarà fatto raffreddare fino ad una temperatura idonea.

Per monitorare gli scambi di calore del sistema, la portata del fluido termovettore è regolata mediante valvole e monitorata attraverso un flussimetro. Le temperature del circuito sono rilevate mediante termocoppie e controllate dal termostato stesso.

La movimentazione del fluido è garantita da una pompa centrifuga integrata nel termostato di circolazione.



Figura 1 Impianto prova elementi di accumulo SolTeCa 1.

Tale impianto sarà implementato con n. 2 nuovi provini da testare in calcestruzzo con mescola migliorata di lunghezza pari a 1000 mm e che andranno a sostituire i quattro provini esistenti.

Inoltre i nuovi provini saranno opportunamente strumentati, come riportato nel prossimo paragrafo, nell'ottica di produrre dati confrontabili con quelli ottenuti con i vecchi provini. Il sistema di riscaldamento e di raffreddamento sarà lo stesso, come pure i componenti quali il flussimetro ed il termostato con pompa. Infine la coibentazione del piping e dei nuovi provini sarà migliorata per limitare ulteriormente le perdite.

2.2 Definizione delle sezioni di prova e punti di acquisizione dati

Nell'esperimento precedente i provini erano quattro e posti in serie, come mostrato nello schema funzionale di [Figura 2](#), e solo il primo e il quarto erano strumentati in mezzeria, come mostrato nella [Figura 3](#).

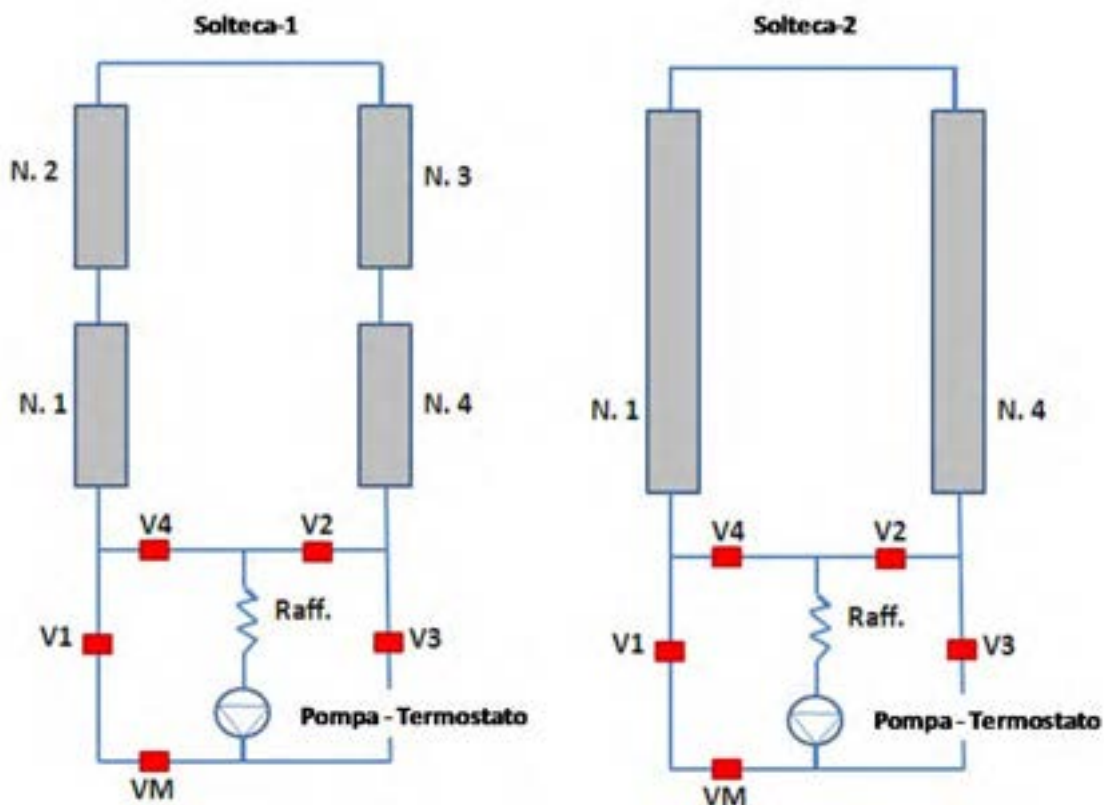


Figura 2 Schema funzionale dell'impianto SolTeCa in configurazione 1 e 2.

Per i nuovi provini si è deciso di strumentarli nelle sezioni a 250 mm e a 750 mm, come mostrato in [Figura 4](#) e [Figura 5](#). Questo perché così è come se si fossero strumentati tutti e quattro i provini del precedente esperimento in mezzeria.

Infatti le sezioni a 250 mm dei due nuovi provini corrispondono geometricamente alle sezioni in mezzeria del primo e quarto provino del precedente esperimento. Mentre le sezioni a 750 mm sempre dei nuovi provini corrisponderanno alla mezzeria dei provini secondo e terzo del precedente esperimento.

Si avrà così un duplice vantaggio; quello di poter confrontare i valori di temperatura nelle sezioni a 250 mm con quelle di mezzeria del primo e quarto provino del precedente esperimento e quello di andare ad indagare il comportamento del calcestruzzo nelle sezioni a 750 mm. L'aver portato la lunghezza ad 1 m renderà più critica l'interazione tra tubo e calcestruzzo, a seguito delle dilatazioni termiche longitudinali.

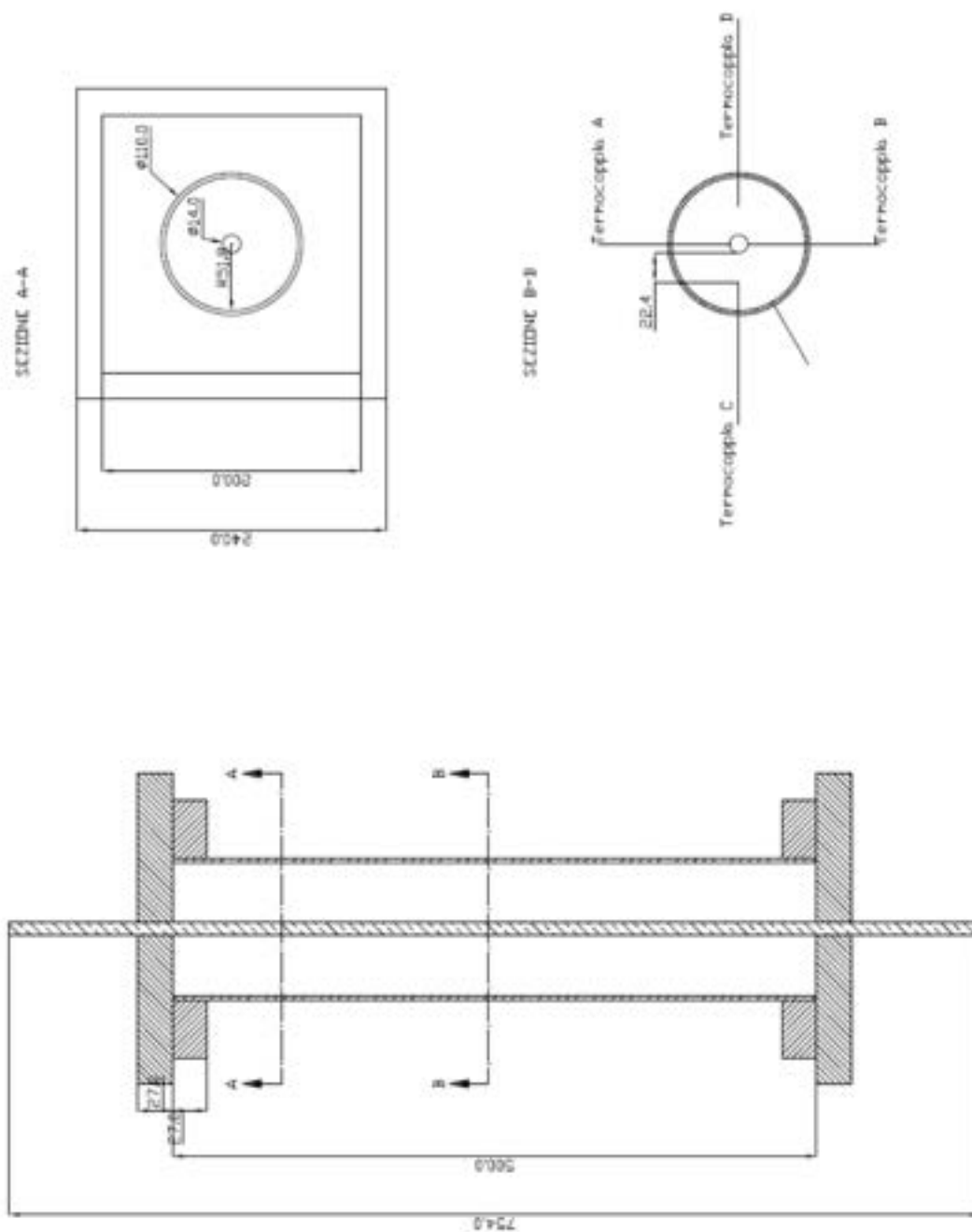


Figura 3 Strumentazione pregressa del provino SolTeCa-1.

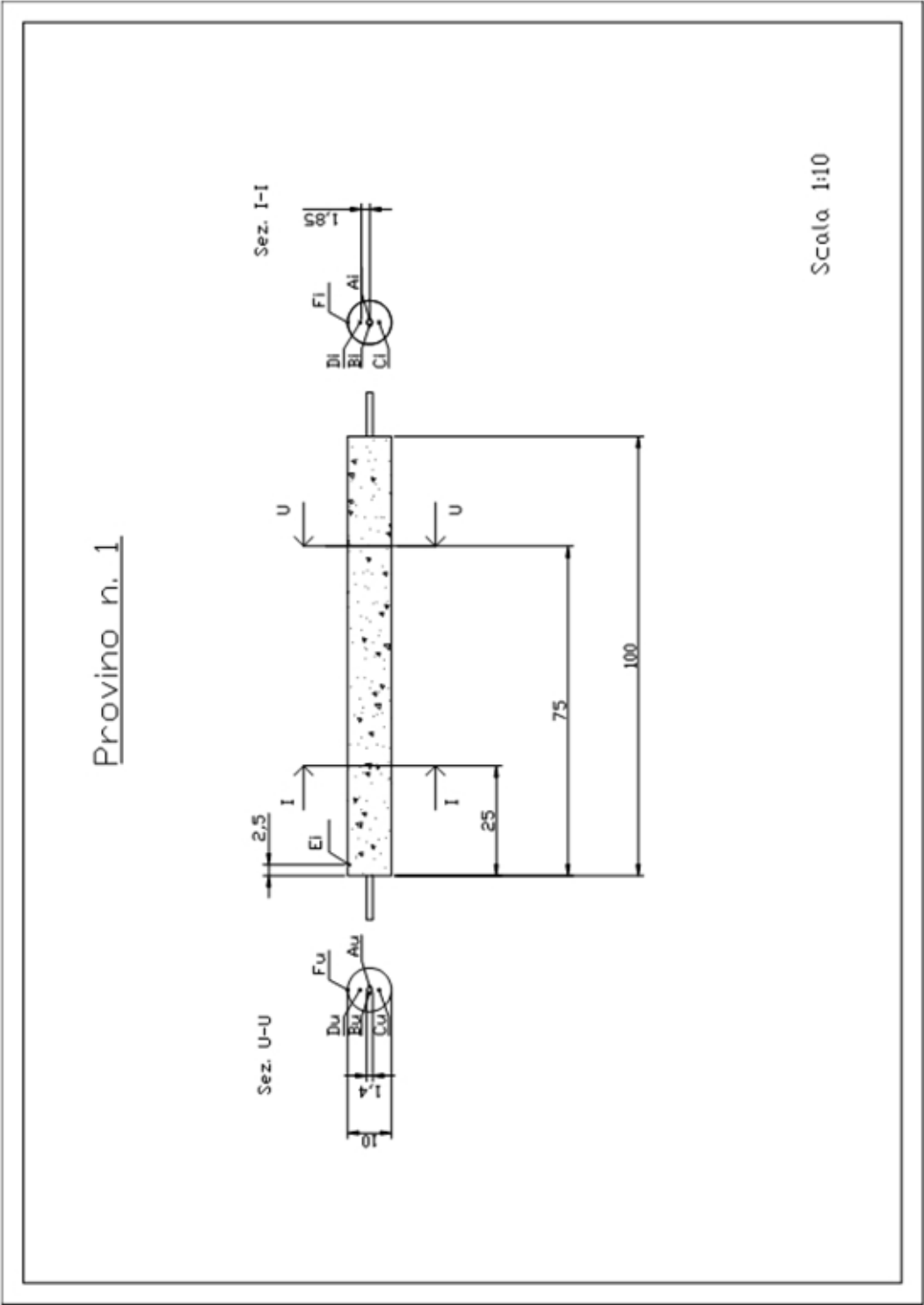


Figura 4 Nuova disposizione della strumentazione nell'elemento n.1.

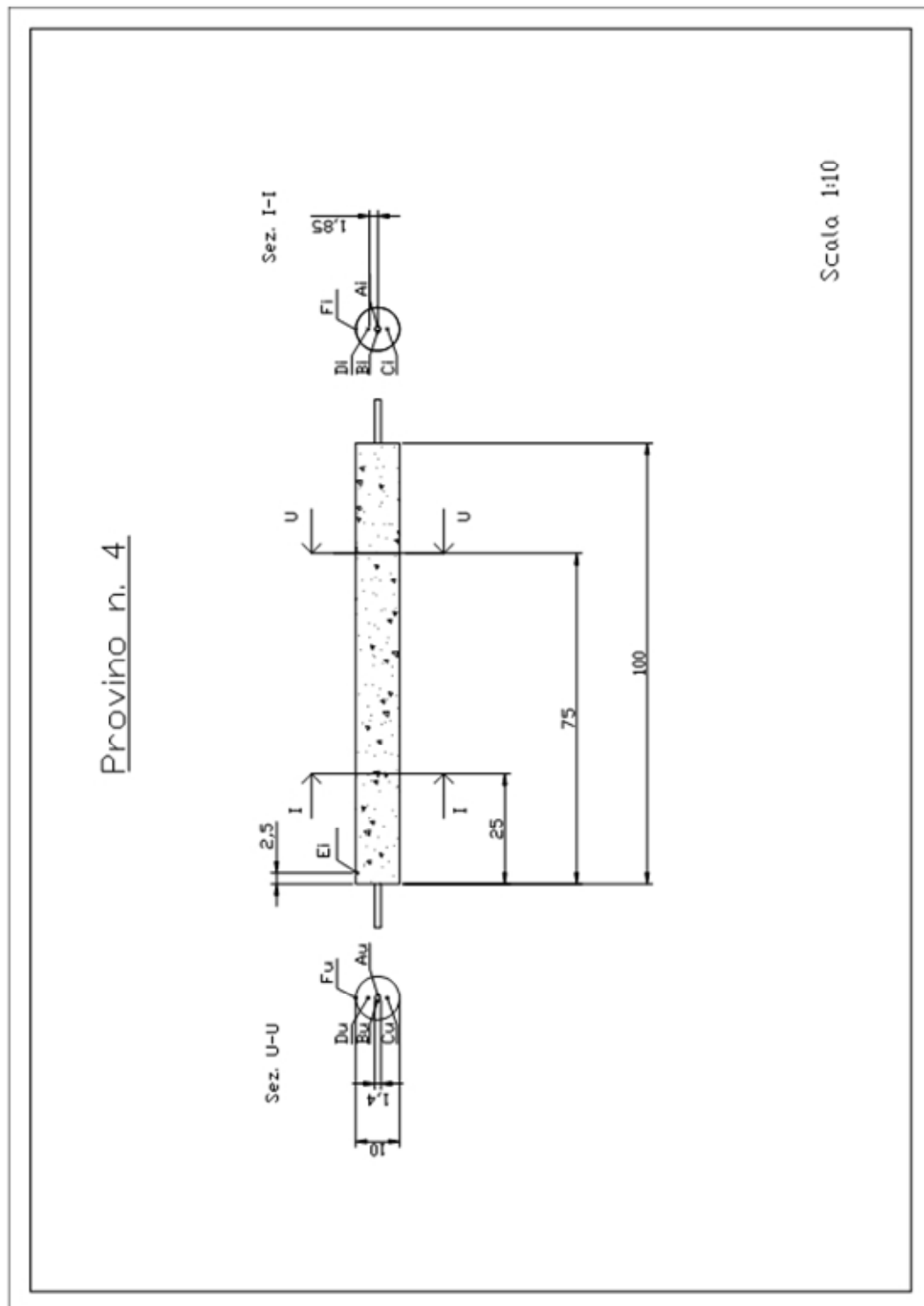


Figura 5 Nuova disposizione della strumentazione nell'elemento n.4.

2.3 Range di temperatura e durata della prova

Sulla base dell'esperienza maturata nella precedente campagna sperimentale, tenendo conto delle caratteristiche fisiche della nuova miscela impiegata e prodotta da UNITN, nonché di esigenze ENEA legate alla conduzione delle prove, le temperature erogate nel Test-1 di degasaggio e nel Test-2 di carico e scarico sono riprodotte in [Figura 6](#) e [Figura 7](#).



Figura 6 Andamento della temperatura erogata dal riscaldatore nel Test-1 di degasaggio.

La salita in temperatura nel test di degasaggio è realizzata in due step (80 e 160 °C) in modo da ridurre il rischio di danneggiare il calcestruzzo.

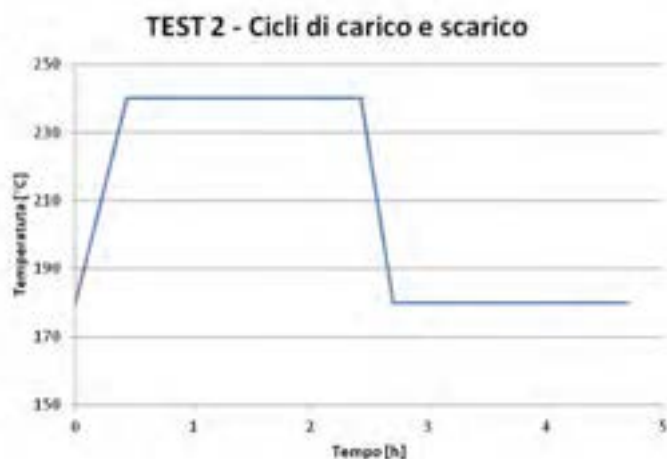


Figura 7 Andamento della temperatura erogata dal riscaldatore nel Test-2 di carico e scarico.

Per i cicli di carico e scarico si è scelto di variare la temperatura dell'olio tra 180 e 240°C, come nell'ultima serie di test effettuati nella campagna sperimentale SolTeCa1, avendo verificato l'assenza di degrado dell'olio silconico.

3 Analisi ed interpretazione delle prove sperimentali

In accordo con ENEA si è scelto di simulare numericamente il primo ciclo del Test-2 di carico e scarico, per la sua maggior complessità rispetto al più semplice test di degasaggio. Tale test infatti, partendo dallo stazionario a 180 °C, comprende un transitorio di riscaldamento, in cui l'olio passa in 26 minuti a 240°C, con circolazione oraria negli elementi di accumulo. Dopo due ore si arresta la circolazione dell'olio negli elementi di accumulo, che si raffreddano per convezione naturale per 16 minuti. La circolazione dell'olio resta attiva nella serpentina in modo da riportarlo a 180°C. Il calcolo è stato eseguito impiegando il codice CAST3M (sviluppato presso il CEA francese). Per la modellizzazione dello scambio di calore tra tubo e fluido si è attivato l'operatore ADVE che costruisce la matrice di rigidità associata all'equazione di bilancio che governa l'advezione. La risoluzione del problema passa attraverso l'accoppiamento dell'equazione di bilancio che governa la conduzione nei solidi con quella advettiva; le due equazioni sono riportate di seguito:

$$(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \text{div}(k_s \text{grad } T_s) + Q \quad (\text{parte solida})$$

$$(\rho c)_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \text{div}(k_l \text{grad } T_l) - (\rho c)_l u \text{grad } T_l - Q \quad (\text{parte liquida})$$

3.1 Test2 – Cicli di carico e scarico

Per il calcestruzzo si sono impiegati i risultati della caratterizzazione condotta da UNITN su provini di stessa composizione degli elementi di accumulo testati: conducibilità termica 2,1 W/m°C, densità 2483 Kg/m³, calore specifico 800 J/Kg°C. Per l'acciaio si è posta una conducibilità termica di 20 W/m°C, una densità di 7800 Kg/m³ e un calore specifico di 500 J/Kg°C.

Tutte le grandezze sono considerate non variabili con la temperatura nell'intervallo di escursione della stessa nelle varie parti del circuito e del mezzo di accumulo.

Si è scelto di simulare, il primo ciclo dei due cicli della prima giornata di test.

Il transitorio parte da uno stazionario, con temperatura del fluido in ingresso al modulo 1 di 179 °C (ridotto per tener in conto le perdite tra riscaldatore e punto di ingresso), portata in circolazione oraria di 5,3 l/min. La densità del fluido è posta pari a 848 Kg/m³, la conducibilità a 0,167 W/m-K e il calore specifico a 1450 J/Kg-K. La temperatura sale a 239°C in 1560 s linearmente, mentre le caratteristiche del fluido diventano pari a: densità 810 Kg/m³, conducibilità 0,162 W/m-K, calore specifico 1520 J/Kg-K. La portata del fluido passa a 5,4 l/min, come rilevato sperimentalmente da ENEA. Le variazioni di portata nei calcoli numerici vengono assunte istantanee, mentre nella realtà ciò avviene in un tempo finito a seguito dell'apertura manuale delle valvole.

Ad 8760 s si arresta la circolazione per 960 s ed il coefficiente di scambio fluido-tubo viene posto ridotto a 10 W/m²-K, per continuare a garantire lo scambio di calore per conduzione tra fluido e parete del tubo. A 9720 s viene riattivata la circolazione in senso antiorario (ingresso dal modulo 4) con portata di 4,3 l/min e temperatura di 180 °C fino ad all'istante 16920 s, tempo dopo il quale, nella sperimentazione, viene fatto partire il secondo ciclo della giornata.

La temperatura ambiente è stata posta pari a 26 °C ed i coefficienti di scambio equivalenti applicati sia al piping che agli elementi di accumulo pari 0,9 W/m²-K. Il coefficiente di scambio tra fluido e parete è posto pari a 160 W/m²-K nello stazionario a 180 °C, passa a 180 W/m²-K nella fase riscaldamento a 240 °C, a 10 W/m²-K come già detto a circolazione ferma, a 160 W/m²-K nella fase di ritorno a 180 °C.

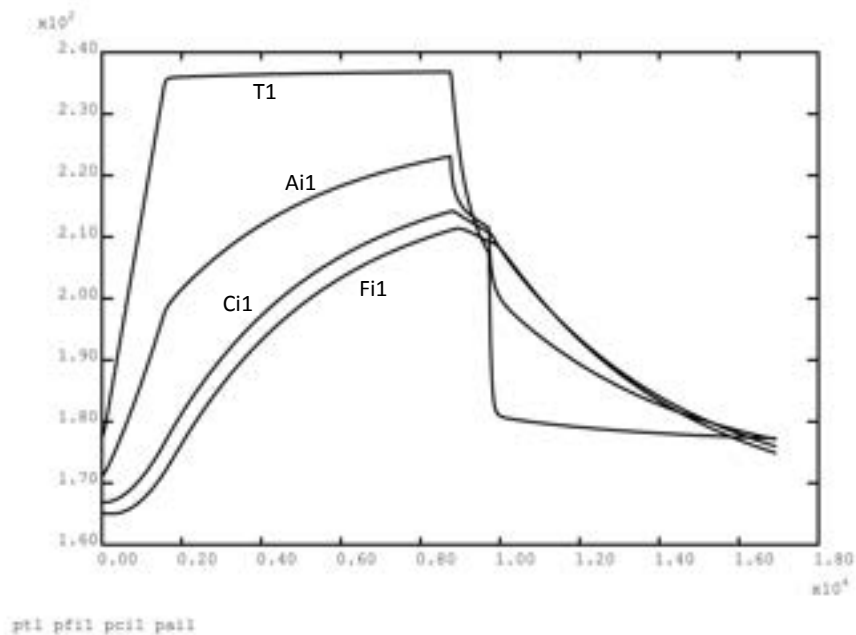


Figura 8 Andamenti di temperatura calcolati in corrispondenza alle termocoppie T1, Ai1, Ci1 e Fi1.

In Figura 8 si riporta l'involuppo degli andamenti di temperatura calcolati, corrispondenti ai punti di posizionamento delle termocoppie T1 (ingresso fluido) e Fi1, Ci1 e Ai1 (come da schema precedentemente riportato in Figura 4. Si notano chiaramente le fasi di inversione dei gradienti; la temperatura all'interfaccia calcestruzzo-tubo (Ai1), nella fase di carico, risulta ovviamente maggiore che in mezzeria ed in superficie dell'elemento. Attivata la fase di scarico la temperatura in Ai1 passa bruscamente al di sotto delle altre per poi ritornare maggiore (seconda inversione) nella fase di ristabilizzazione dello stazionario a 180 °C.

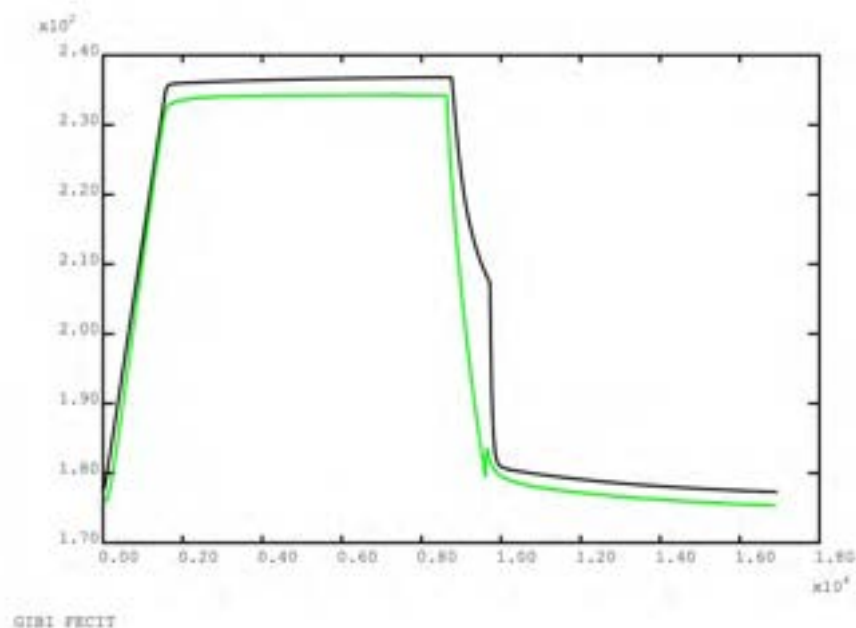


Figura 9 Confronto andamenti di temperatura calcolato e sperimentale (curva verde) in T1 (tempo in s).

Nella fase di carico e scarico (**Figura 9**) si ha una differenza di temperatura di circa 2,5 K, dovuta alle maggiori perdite del tratto che congiunge il riscaldatore all'elemento 1, su cui sono presenti le valvole V1 e VM che aumentano le dispersioni. Nell'intervallo tra 8720 s - 9720 s (fase di raffreddamento dell'olio), le differenze sono ancor più evidenti in quanto nel test sperimentale il punto a monte della posizione T1 risente delle dispersioni prodotte dalle valvole V1 e V4, mentre nel modello numerico il punto T1 risulta isolato dalla parte a monte. Il disturbo a fine raffreddamento dell'olio è dovuto alla non contemporaneità nell'apertura manuale delle valvole.

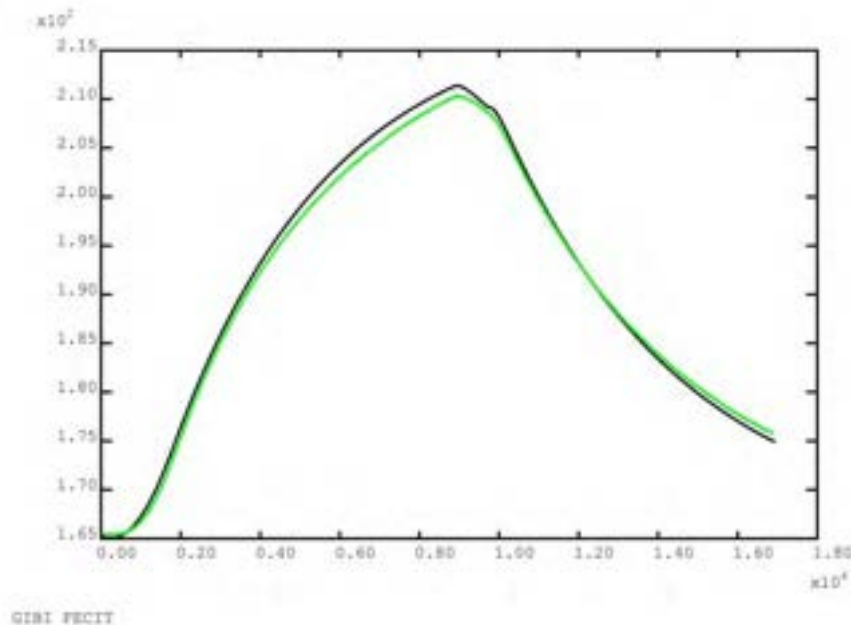


Figura 10 Confronto andamenti di temperatura calcolato e sperimentale (curva verde) in Fi1 (tempo in s).

Gli andamenti sperimentali e calcolati relativi al punto Fi1 (**Figura 10**), posto sulla superficie dell'elemento 1, a 25 cm dal punto d'ingresso dal fluido, sono perfettamente sovrapposti. Si nota però un'asimmetria di comportamento tra la fase di carico (il calcolo sovrastima leggermente le temperature) e di scarico. Ciò potrebbe essere il segno di una piccola resistenza che si viene a realizzare nella fase di scarico all'interfaccia tra calcestruzzo e tubo a seguito di una maggiore contrazione radiale di quest'ultimo.

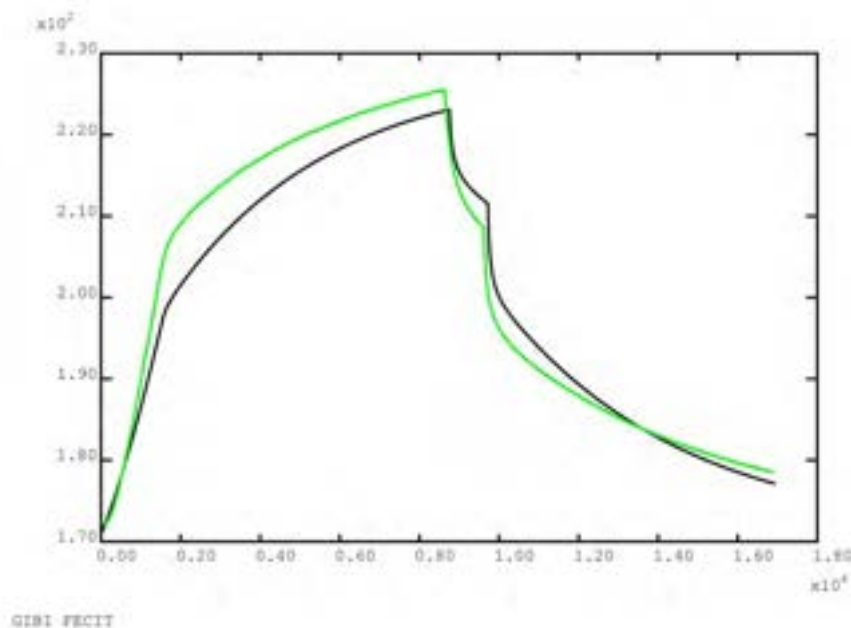


Figura 11 Confronto andamenti di temperatura calcolato e sperimentale (curva verde) in Ai1 (tempo in s).

Per gli andamenti di **Figura 11** si ipotizza che i maggiori scostamenti, che si hanno intorno a 2000 s, sono legati ad inerzie termiche o parametri capacitivi non correttamente colti nel modello; infatti avvicinandosi alle condizioni stazionarie le differenze si attenuano.

4 Progettazione di un'apparecchiatura di ciclaggio termico per temperature fino a 400 °C

4.1 Layout dell'apparecchiatura

Nell'ambito di un lavoro di gruppo si è progettato l'impianto sperimentale tramite un cad 3-D parametrizzato affinché le modifiche geometriche possano essere apportate iterativamente con le decisioni prese.

L'apparecchiatura sperimentale è costituita data da un'incastellatura, realizzata in tubolari a sezione rettangolare, da un provino in calcestruzzo da testare e dall'apposizione di due lamiere per questioni di sicurezza.

L'incastellatura serve a tenere sospeso in aria il provino di calcestruzzo, tramite catene metalliche o afferraggi di aste metalliche con uncini agli estremi. La sospensione del provino permette che le dilatazioni termiche avvengano liberamente.

Il provino è costituito da un tubo di acciaio di diametro esterno di 14 mm, affogato all'interno di un cilindro di calcestruzzo di lunghezza di 1000 mm e diametro di 100 mm opportunamente coibentato.

In **Figura 12** si riporta una vista isometrica dell'apparecchiatura sperimentale che si intende realizzare.

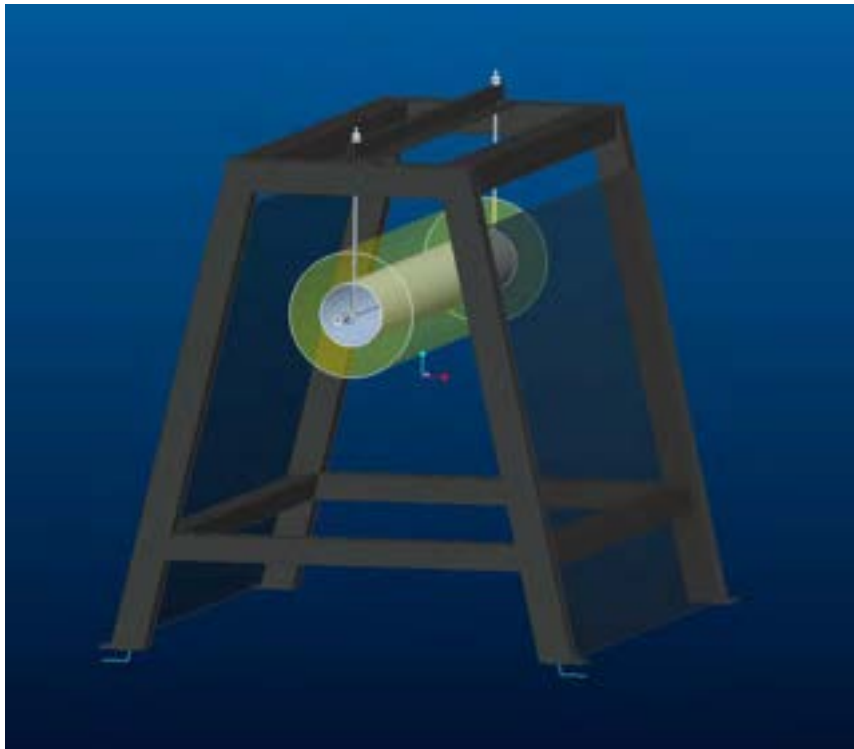


Figura 12 Vista isometrica dell'apparecchiatura sperimentale.

Inoltre in **Figura 13** si riporta una vista frontale ed una vista dall'alto, da dove si possono vedere i componenti del provino ed il sistema di afferraggio dello stesso all'incastellatura. Si può notare come sulla parte superiore dell'incastellatura si sia prevista la realizzazione di due profilati ad elle per permettere di testare provini di diverse lunghezze.

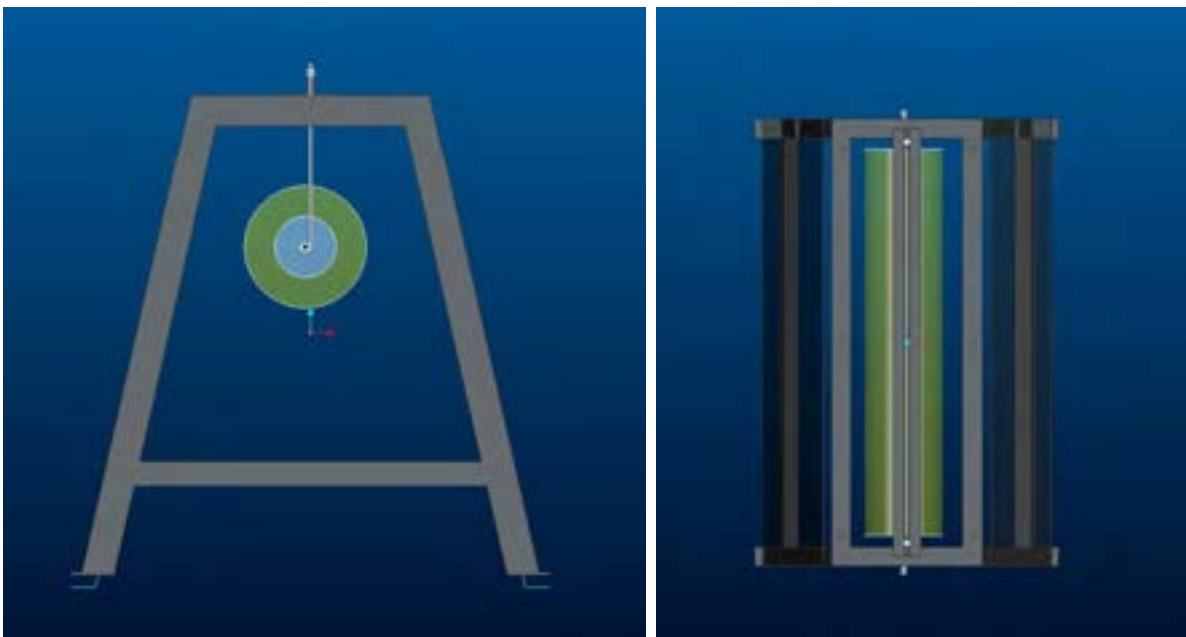


Figura 13 Vista frontale e dall'alto dell'apparecchiatura sperimentale.

Infine in **Figura 14** si può vedere l'apposizione di lamiera, longitudinalmente, per limitare, qualora si dovessero verificare, gli effetti dell'esplosione del calcestruzzo in presenza di un primo gravoso e rapido riscaldamento (spalling).

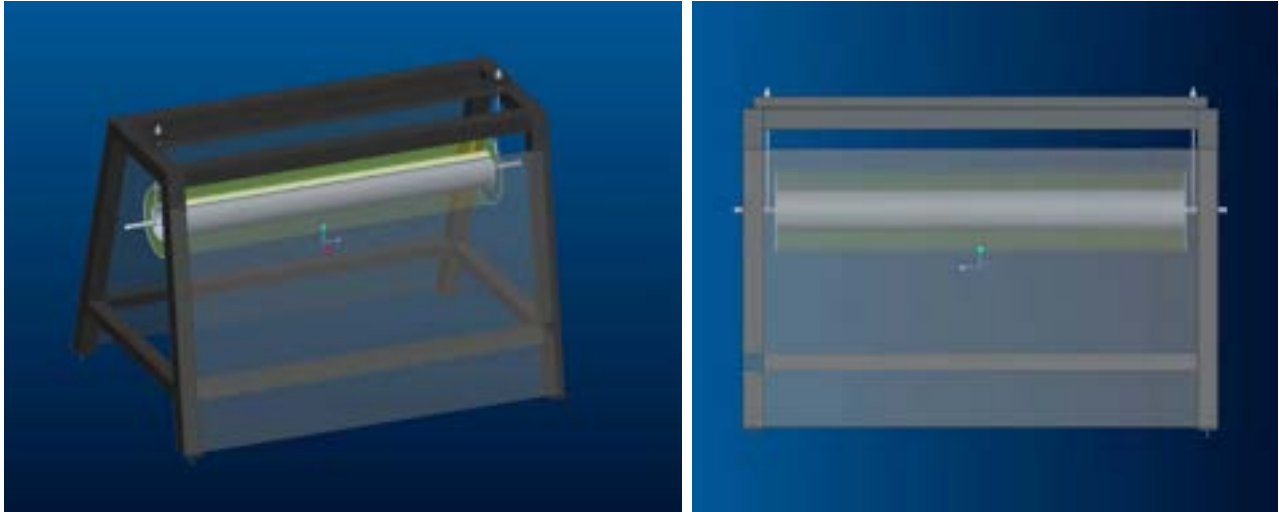


Figura 14 Inserimento lamiera per la sicurezza.

4.2 Sistema di riscaldamento e raffreddamento

Il sistema di riscaldamento sarà effettuato tramite un trasformatore. Alimentando il tubo di acciaio con una corrente elevata, in bassa tensione, e sfruttando l'effetto Joule si imporrà una temperatura media di 400 °C. Tramite opportuno controllo con LabVIEW si terrà poi pressoché costante tale temperatura media. Le specifiche tecniche del trasformatore presente in ENEA sono: potenza pari a 5 kVA e corrente pari a 1000 A; queste caratteristiche sono più che sufficienti per avere una temperatura media di 400 °C in un tempo accettabile.

Infatti considerando la resistività dell'acciaio ed una temperatura ambiente di 25 °C, si raggiungerà la temperatura media di target di 400 °C in un tempo utile, impiegando una corrente dell'ordine dei 150-200 A ed una tensione dell'ordine di 1÷3 V.

Il sistema di raffreddamento invece, sarà effettuato tramite l'insufflaggio di aria compressa all'interno del tubo di acciaio. Un'elettrovalvola comandata da LabVIEW aprirà e chiuderà il sistema di aria compressa, sino al raggiungimento della temperatura desiderata.

4.3 Schema di acquisizione dati e controllo

L'acquisizione dei dati, il comando degli strumenti ed il controllo degli stessi saranno effettuati implementando in LabVIEW un opportuno programma. L'acquisizione dei dati riguarderà essenzialmente l'acquisizione delle temperature in diversi punti e sezioni e del provino in calcestruzzo e del tubo in acciaio. Si utilizzeranno termocoppie di tipo K.

L'elettrovalvola che attiverà l'aria compressa per il raffreddamento, sarà comandata da un'apposita scheda di comando di LabVIEW e controllata semplicemente tramite una funzione on/off.

Pure l'attivazione della tensione del trasformatore avverrà tramite apposita scheda di comando di LabVIEW, mentre il controllo avverrà invece implementando un P.I.D. all'interno del programma stesso di LabVIEW.

Quindi Il raggiungimento ed il mantenimento della temperatura di target di 400 °C per tutta la durata dell'esperimento sarà garantita attraverso una modulazione continua della tensione del trasformatore.

In **Figura 15** si riporta uno schema di massima dell'acquisizione e del controllo dell'esperimento.

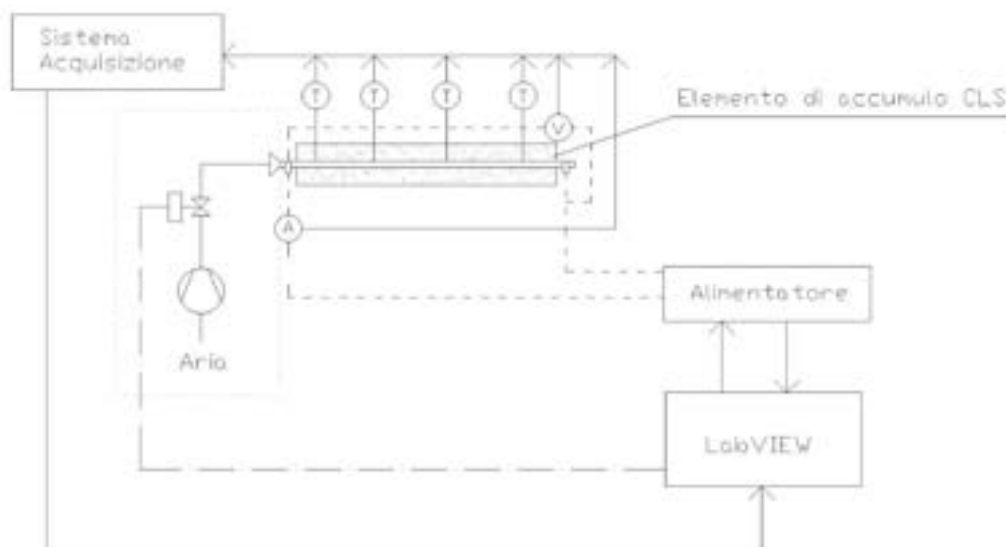


Figura 15 Schema di acquisizione e controllo con LabVIEW.

Si segnala inoltre la possibilità di realizzare una modalità di riscaldamento simile a quella realizzata con un fluido, modulando il voltaggio imposto ai morsetti nel modo seguente:

$$V(t) = \sqrt{(T_f - T_p(t)) H 2\pi r_i L R_{el}}$$

In cui L è la lunghezza del tubo attraversato dalla corrente e r_i il raggio interno. H è il coefficiente di scambio atteso tra fluido e tubo, T_f la temperatura del fluido, T_p la temperatura di parete (acquisita da LabVIEW da apposita termocoppia), R_{el} la resistenza elettrica. $V(t)$ è il voltaggio da applicare all'istante t .

4.4 Simulazioni termomeccaniche mediante codice FEM

Sono state effettuate una serie di simulazioni numeriche impiegando il codice FEM CAST3M, al fine di valutare l'entità del carico elettrico da fornire, i tempi necessari al raggiungimento del profilo di temperatura richiesto e la durata della successiva fase di raffreddamento. L'evoluzione delle temperature è stata quindi registrata per consentire l'esecuzione del calcolo termo-meccanico nella condizione di massimo carico termico e per l'esecuzione dei post-trattamenti necessari. Le dimensioni geometriche e le proprietà termiche e meccaniche impiegate nella simulazione sono relative all'elemento di accumulo sviluppato, già disponibile da una precedente fase della ricerca (SolTeCa 1), come richiesto da ENEA.

Le dimensioni del tubo sono le seguenti:

- Lunghezza 60 cm
- Diametro esterno 14 mm
- Spessore 1.5 mm

Le dimensioni della parte in calcestruzzo sono:

- Lunghezza 50 cm
- Diametro esterno 100 mm
- Diametro interno 14 mm

Le proprietà termiche e meccaniche del calcestruzzo sono:

- Conducibilità termica 1.1 W/m-K
- Densità 2620 kg/m³
- Calore specifico efficace 650 J/kg-K
- Modulo elastico 37 GPa
- Modulo di Poisson 0.25
- Coefficiente di dilatazione termica 12.E-6 1/K

Le proprietà termiche e meccaniche dell'acciaio (AISI 316) sono:

- Conducibilità termica 20. W/m-K
- Densità 7800 kg/m³
- Calore specifico 500 J/kg-K
- Modulo elastico 160 GPa
- Modulo di Poisson 0.3
- Coefficiente di dilatazione termica 17.E-6 1/ K

Tutte le grandezze sono state assunte non dipendenti dalla temperatura, nel rispetto delle finalità dell'analisi. Le analisi termiche sono state condotte considerando la sola conduzione termica nel calcestruzzo, trascurando quindi tutti i fenomeni connessi con la migrazione del vapore e gli effetti di deidratazione del calcestruzzo indotti dalle elevate temperature. Ciò è giustificato dalle finalità del calcolo e dall'estrema onerosità nell'identificazione dei parametri delle leggi costitutive del materiale necessarie per un più completa analisi termo-igro-meccanica. Conseguentemente le valutazioni meccaniche sono condotte su base elastica, assumendo come carico quello legato alle sole dilatazioni termiche.

4.4.1 Simulazione del transitorio termico relativo alle fasi di riscaldamento e di raffreddamento.

Avendo una resistenza elettrica del tubo in acciaio pari a 9.47 E-03 Ohm ed applicando ai morsetti un voltaggio pari a 1.7 V, a cui segue un corrente pari a 180 A (in continuo), si ottengono i seguenti valori della potenza termica sviluppata da impiegare come carico termico:

- Potenza totale 0.30692 kW
- Potenza lineica 0.51154 kW/m
- Potenza volumetrica 8684.1 kW/m³

Come condizione al contorno calcestruzzo-ambiente si è imposto:

- Coefficiente di scambio equivalente comprensivo dell'isolamento pari a 1. W/m²-K
- Temperatura ambiente 20 °C

La condizione al contorno tubo-ambiente è:

- Coefficiente di scambio equivalente comprensivo dell'isolamento pari a 30. W/m²-K
- Temperatura ambiente 20 °C

La condizione al contorno aria forzata di raffreddamento-tubo è:

- Coefficiente di scambio 80. W/m²-K
- Temperatura aria di refrigerazione 20 °C

L'elemento di accumulo inizialmente è in equilibrio con l'ambiente.

La magliatura, riportata in [Figura 16](#), composta da elementi lineari quadrangolari QUA4 è formata da:

- 800 elementi e 909 nodi per l'elemento in calcestruzzo
- 240 elementi e 306 nodi per il tubo in acciaio.



Figura 16 Magliatura dell'elemento di accumulo.

La fase di riscaldamento dura 8200 s. Ad essa segue la fase di raffreddamento, di durata pari 8200 s, a convezione forzata ad aria circolante all'interno del tubo e convezione naturale tra la superficie esterna e l'aria ambiente.

Lavorando a flusso costante radiale, dopo una prima fase di stabilizzazione dei gradienti termici, l'evoluzione delle temperature prosegue con andamento lineare fino a che la temperatura massima del calcestruzzo al termine del riscaldamento raggiunge 404 °C (Figura 17). La fase di raffreddamento di durata 8200 s, riporta a circa 150°C l'elemento. Ciò costituirà il punto di ripartenza per un nuovo ciclo di riscaldamento di durata ridotta rispetto al precedente, che partiva da 20°C.

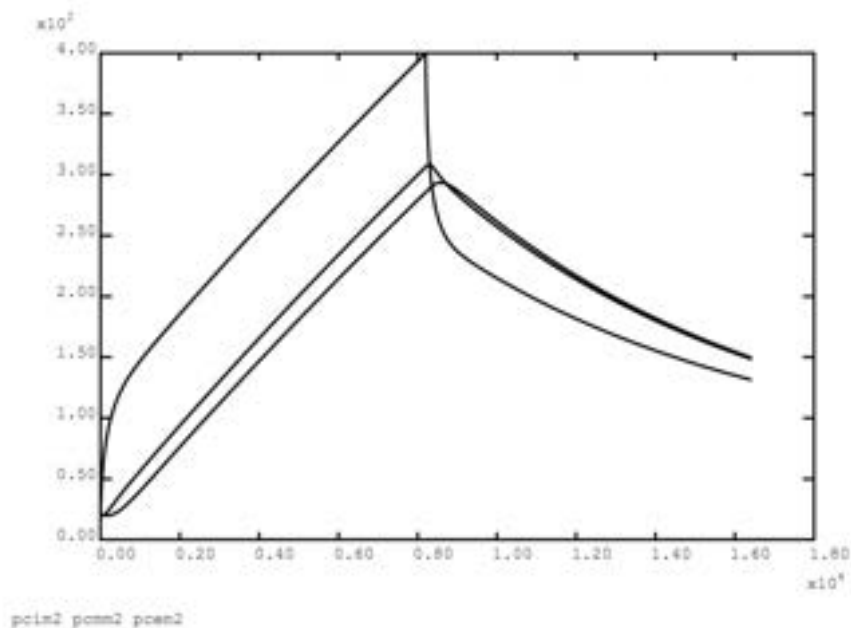


Figura 17 Evoluzione della temperatura nella sezione centrale dell'elemento d'accumulo, nei punti: interno, mezzeria ed esterno.

Dal confronto degli andamenti di temperatura tra la parte in mezzeria affogata nel calcestruzzo e le due zone esterne in aria del tubo, si nota un rapido innalzamento della temperatura in queste ultime (curva in verde di [Figura 18](#)); ciò suggerisce di non operare la coibentazione di tali zone. Tale effetto è dovuto al maggior assorbimento di calore operato dal calcestruzzo rispetto a quello estratto dall'aria.

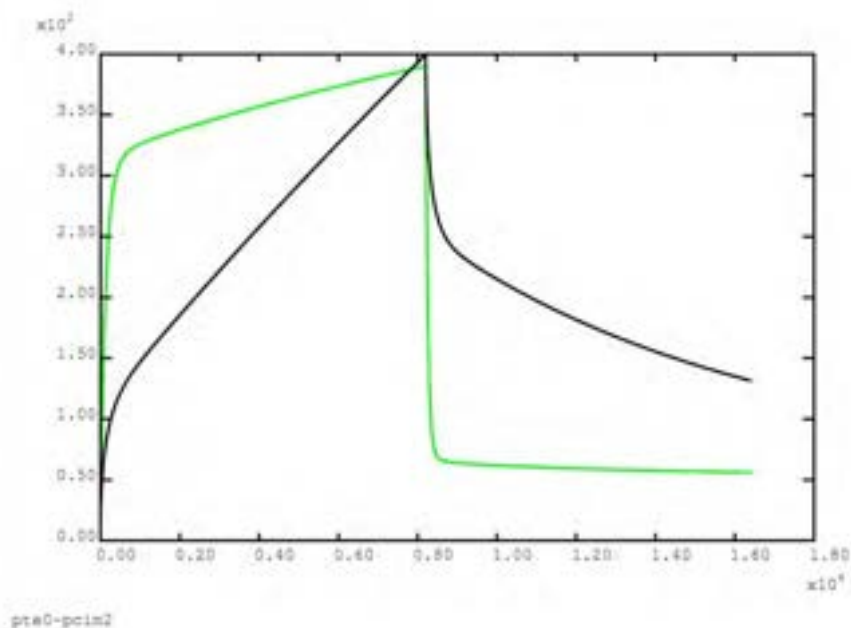


Figura 18 Evoluzione della temperatura del tubo, in corrispondenza delle sezioni iniziale e centrale.

Un dettaglio della distribuzione delle temperature a fine riscaldamento è riportato in [Figura 19](#); si rivela un delta di temperatura di 115 °C che all'occorrenza può essere ridotto, riducendo il voltaggio e conseguentemente il flusso radiale nel calcestruzzo, ma aumentando però il tempo di riscaldamento per raggiungere la temperatura desiderata.

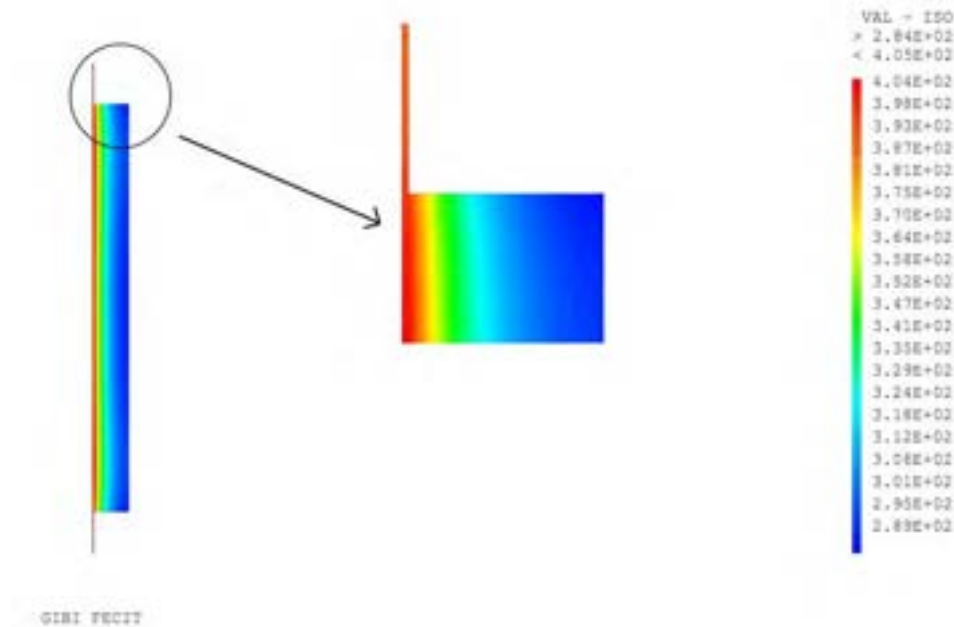


Figura 19 Distribuzione della temperatura nel tubo e nell'elemento d'accumulo a fine riscaldamento.

4.4.2 Stato tensionale a fine riscaldamento

Ben consapevoli dei limiti di un'analisi lineare elastica, con un materiale cementizio a comportamento fortemente asimmetrico in trazione e compressione e che presenta inoltre un comportamento post-picco di tipo degradante (softening), si è prodotta una prima valutazione del comportamento meccanico dell'insieme tubo-calcestruzzo, modellando elasticamente entrambi i materiali. L'analisi si è condotta recuperando la distribuzione delle temperature nodali a 8200 s, istante di fine riscaldamento, ed impostando a 20 °C la temperatura di riferimento. In [Figura 20](#) si riporta il confronto tra configurazione iniziale e deformata, con un fattore di amplificazione pari a 20.

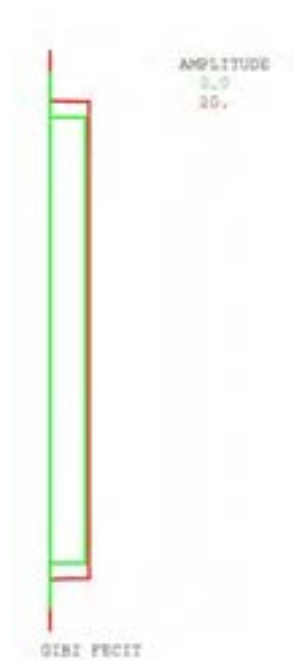


Figura 20 Deformata amplificata tubo ed elemento d'accumulo a fine riscaldamento.

Si riportano di seguito in [Figura 21](#), [Figura 22](#) e [Figura 23](#), rispettivamente, gli andamenti delle tensioni radiali, tangenziali ed assiali calcolate.

La distribuzione della tensione radiale presenta picchi di trazione piuttosto limitati nelle sole zone apicali a contatto del tubo, mentre lo stato di compressione risulta elevato.



Figura 21 Isovalori della tensione radiale in MPa nel tubo ed elemento d'accumulo a fine riscaldamento.



Figura 22 Isovalori della tensione tangenziale in MPa nel tubo ed elemento d'accumulo a fine riscaldamento.

La tensione tangenziale ha picchi di trazione sempre limitati alle zone apicali e contenuti nelle altre zone.



Figura 23 Isovalori della tensione assiale in MPa nel tubo ed elemento d'accumulo a fine riscaldamento.

La distribuzione delle tensioni assiali, come atteso, presenta zone in trazione più estese su tutta l'estensione longitudinale dell'elemento, che sono all'origine dello stato fessurativo sui piani trasversali, già notati nella precedente campagna sperimentale. Lo stato di compressione che si rileva a ridosso del tubo centrale, prodotto dall'impedimento a dilatarsi, indotto dal calcestruzzo esterno più freddo, dovrebbe essere ancor più ridotto nella realtà a seguito della fessurazione degli strati esterni.

5 Conclusioni

Le attività svolte sono a supporto della ricerca sul comportamento di sistemi di accumulo impieganti calcestruzzi con migliorate caratteristiche termo-meccaniche.

Si sono ridefinite le procedure per l'esecuzione dei test di degasaggio e dei test di carico e scarico della nuova campagna sperimentale su mescola a conducibilità migliorata, sviluppata dall'Università di Trento, impiegando il circuito sperimentale SolTeCa. Sono state modificate le geometrie degli elementi d'accumulo e la disposizione delle termocoppie in essi inserite. Si è successivamente affrontata l'interpretazione delle registrazioni sperimentali condotte presso i laboratori dell'ENEA, mediante confronto con calcoli numerici appositamente predisposti impiegando il codice FEM CAST3M. Il buon accordo tra i risultati sperimentali e le modellizzazioni numeriche conferma le capacità predittive degli strumenti software impiegati. Infine si è sviluppato il progetto di una nuova apparecchiatura di ciclaggio termico degli elementi di accumulo per temperature intorno a 400 °C, basata sul riscaldamento ad effetto Joule. Le simulazioni FEM effettuate, finalizzate alla comprensione delle dinamiche termiche e agli effetti termo meccanici indotti negli elementi di accumulo in calcestruzzo, con tale modalità di ciclaggio termico, ne hanno dimostrato le potenzialità.

Va però rilevato che le analisi termiche, qui condotte considerando la sola conduzione termica nel calcestruzzo, dovrebbero e potrebbero essere ricondotte non trascurando tutti i fenomeni connessi con la migrazione del vapore e gli effetti di deidratazione del calcestruzzo indotti dalle elevate temperature. La semplificazione operata è stata giustificata dalle finalità dei calcoli effettuati e dall'estrema onerosità delle caratterizzazioni necessarie all'identificazione dei parametri delle leggi costitutive del materiale, richieste per analisi termo-igro-meccaniche, da effettuare con gli specifici strumenti software appositamente sviluppati dall'Università di Padova e dall'ENEA.

6 Riferimenti bibliografici

1. ENEA – Report UTRINN/2012/14 - “Realizzazione di un impianto da laboratorio per valutare l’accumulo termico e la resistenza termo-meccanica di materiali in calcestruzzo”, G.M. Giannuzzi, R. Liberatore, D. Mele.
2. ENEA – Report UTRINN/2012/17 - “Studio ed analisi di sistemi di accumulo termico in materiali cementizi per impianti solari a concentrazione di piccola taglia”, G.M. Giannuzzi, D. Mele.
3. ENEA – Report UTRINN/2013/09 - “Analisi delle prove sperimentali atte a valutare l’accumulo termico e la resistenza termo-macchanica di materiali in calcestruzzo”, G.M. Giannuzzi, T. Crescenzi, R. Liberatore, A. Tati, D. Mele.
4. Materials and Design 51 (2013) 989-997 – “Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems”, O. B. Ozger, F. Girardi, G.M. Giannuzzi, V.A. Salomoni, C. E. Majorana, L. Fambri, N. Baldassino, R. Di Maggio.
5. Solar Energy 103 (2014) 303-315 – “Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants. V.A. Salomoni, C. E. Majorana, G.M. Giannuzzi, A. Miliozzi, R. Di Maggio, F. Girardi, D. Mele, M. Lucentini.
6. G. Mazzucco, V. A. Salomoni, C. Majorana Mesoscale modelling of concrete material with polypropylene fibres inclusion under high temperature, WCCM XI 11th World Congress on Computational Mechanics, 20-25 july, Barcelona, Spain, (2014).
7. Z. P. Bazant, M. F. Kaplan, "Concrete at High Temperature", (1996), Burnt Mill, Longman.
8. A.M. Neville, "Properties of concrete", (1963), London, Pitman.

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

The Department Civil, Environmental and Architectural Engineering (DICEA, ex-DCT) of the University of Padova, born in 1996 from three institutes, Structural Mechanics and Engineering, Roads and Transportation Engineering, Topography, carries on the tradition of the ancient Royal School of Application for Engineers, founded in 1876 and has its origins from the technical-scientific investigations of the Paduan scientists of the eighteenth century.

The general objectives of the research of the DCT involve different sectors of the Solid and Material Mechanics, Structural Mechanics, Biomechanics and the disciplines of the transport and road sectors. However, the Department of Structural and Transportation Engineering is distinguished in the national and international context in view of the research developed in the Computational Mechanics field, with particular reference to the field of Mechanics of saturated and partially saturated porous materials.

The following Laboratories are annexed to the Department: the Scientific Computing Laboratory, the Transportation Laboratory, the Laboratory for Structural Material Testing and the Road Materials Laboratory. Particularly, the scientific computing laboratory is devoted to the High Performance Scientific Computing and Computer Simulation of structures and materials.

The Department is involved in the Doctorate School of Engineering Faculty at Padua University, named Doctorate of Civil and Environmental Engineering Science, as well as in the Doctorate of Biomechanics. It has been also involved in research doctorates, in consortium with other Universities, such as the University of Trento and the University of Trieste.

More than 40 courses are offered at the Department, among which Solid Mechanics, Structural Mechanics, Structural Dynamics, Theory and Design of Bridges.

The Research Unit of Padua has acquired in the last years a wide experience concentrated on the elaboration of the following activities:

- a) Definition of innovative mathematical-numerical models to simulate, in two- and three-dimensions, normal/high strength/performance concretes as well as cemented materials subjected to a variety of actions. Among these, mechanical actions in static and dynamic fields, including thermal loads, with specific reference to fire.
- b) Formulation of constitutive models and computational algorithms in plasticity, damage, viscosity and fracture of normal as well as HPC and HS concretes. The formulations are general and are based on the thermodynamics of irreversible processes, in order to describe the behaviour of materials which undergo plastic deformations and degradation of the constitutive properties up to the fracture - description of the nucleation, coalescence and fracture propagation – development. The behaviour in compression and tension, shear band localization of the deformation and transition to from plastic/damage behaviour to fracture are taken into account.
- c) Development of new three-dimensional numerical models (by extension and enrichment of the already available two- and three- dimensional ones), able to describe the phenomena occurring in normal and high performance concretes and in cemented materials subjected to different aggressions. Setting of the phenomenological and mechanistic versions of the adopted models.
- d) Validation and calibration of the FE models. The models validation and calibration is carried out by means of experiments carried out both in well known European laboratories, whose results are known to the proponents from reports and published papers, and through international collaborations developed within previous projects.