



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi numerica del comportamento termico della interazione tra PCM stabilizzato e calcestruzzo in meso-scala.

G. Mazzucco, S. Michieletto, V. Salomoni, C. Majorana



Report RdS/PTR2020/186

Analisi numerica del comportamento termico della interazione
tra PCM stabilizzato e calcestruzzo in meso-scala.

G. Mazzucco, S. Michieletto, V. Salomoni, C. Majorana (Università di Padova)

Dicembre 2020

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: tecnologie: presidiare e sviluppare tecnologie di prodotto e di processo essenziali per la transizione energetica.

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

Work package: 2 Accumulo termico

Linea di attività: LA2.6 - Analisi numerica dalla meso-scala alla macro-scala di elementi di accumulo termico realizzati con calcestruzzo e PCM stabilizzato

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Work package: Raffaele Liberatore, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi numerica dalla meso-scala alla macro-scala di elementi di accumulo termico realizzati con calcestruzzo e PCM stabilizzato"

Responsabile scientifico ENEA : Adio Miliozzi.

Responsabile scientifico UniPd : Gianluca Mazzucco.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI (CAMPAGNA SPERIMENTALE ENEA).....	6
2.1 GEOMETRIA DEI PROVINI.....	6
2.2 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI.....	7
2.3 PUNTI TARGET.....	8
3 MODELLAZIONE IN MACRO-SCALA.....	10
3.1 DEFINIZIONE DELLA GEOMETRIA.....	10
3.2 CONDIZIONI AL CONTORNO.....	11
3.3 RISULTATI NUMERICI.....	11
4 MODELLAZIONE IN MESO-SCALA.....	21
4.1 ANALISI EFFETTUATE.....	22
4.2 GEOMETRIA DEL MODELLO IN MESO-SCALA.....	23
4.3 MODELLAZIONE COSTITUTIVA DEL CALCESTRUZZO.....	25
4.3.1 <i>Caratteristiche costitutive della matrice e degli inerti</i>	26
4.4 CARATTERISTICHE COSTITUTIVE PER L'ACCIAIO.....	28
4.5 CARATTERISTICHE COSTITUTIVE PER IL COIBENTE.....	28
4.6 CONDIZIONI AL CONTORNO.....	28
4.7 RISULTATI NUMERICI.....	29
4.7.1 <i>Scenario 01: Perfetta coesione</i>	30
4.7.2 <i>Scenario 02: Completa decoesione</i>	33
5 CONCLUSIONI.....	36
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	37
7 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	37
CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	38

Sommario

Le analisi numeriche effettuate in questo rapporto, è parte del lavoro di ricerca nell'ambito della Linea di Attività LA1, riguardante test su accumulo termico in materiali cementizi compatti e con aggiunta di materiale a cambiamento di fase.

Lo scopo del presente lavoro è stato quello di realizzare modelli numerici in grado di simulare il comportamento di elementi di accumulo termico in materiale cementizio considerando la macro e la meso-scala.

In particolare, sono stati sviluppati modelli in macro-scala atti a rappresentare provini cilindrici, usati da ENEA per la caratterizzazione termica del materiale, ottenuti con un tubo in acciaio (tubo scambiatore) e da un cilindro in calcestruzzo, realizzato con due diverse miscele ed opportunamente coibentato.

I test e le relative analisi numeriche sono state condotte mediante cicli di carico e scarico termico, andando a misurare le temperature raggiunte in differenti posizioni all'interno della matrice cementizia.

Nello specifico, due mix design sono stati studiati: il primo denominato calcestruzzo di base che presenta, al suo interno, specifiche componenti in grado di migliorare le condizioni di accumulo rispetto alle normali miscele di calcestruzzo utilizzato in ambito civile. Il secondo mix è stato realizzato partendo dalla miscela di base arricchita con materiali a cambiamento di fase PCM (phase change material) denominati "Sale Solare". Il PCM risulta essere in grado di aumentare le caratteristiche di accumulo termico del modulo, durante la trasformazione di fase: da solido a liquido. Per eliminare le problematiche relative alle deformazioni differite e incompatibili tra PCM e matrice cementizia, il materiale a cambiamento di fase è stato "stabilizzato" tramite diatomite.

Sulla base dei risultati termici ottenuti in macro-scala, si è investigato, successivamente, il comportamento meccanico del materiale considerando la meso-scala per poter andare a valutare l'interazione tra aggregati e matrice cementizia durante il processo di riscaldamento e raffreddamento del provino, andando inoltre a valutare l'interazione tra tubo in acciaio e cilindro in calcestruzzo.

1 Introduzione

Nell'ambito della ricerca ENEA, per l'ottimizzazione dei processi produttivi nel campo delle fonti di energia rinnovabili, in particolare nel caso di impianti solari a concentrazione (CSP), l'impiego di elementi di accumulo solido realizzati con matrici cementizie è una delle innovazioni in fase di sviluppo negli ultimi anni.

Questi moduli, realizzati con opportuni mix-design di calcestruzzo, caratterizzano il TES (Sistema di accumulo dell'Energia Termica) e grazie alla loro modularità permettono una maggiore flessibilità nell'uso delle risorse rinnovabili ed una maggiore efficienza dei sistemi produttivi industriali, rispetto a sistemi più consolidati quali l'impiego di serbatoi con mezzo di accumulo liquido (che generalmente presentano una bassa densità di energia stoccata e quindi la necessità di immagazzinare grandi volumi di materiale [1]).

Partendo dai risultati delle analisi in assialsimmetria sviluppati in [2] si sono sviluppati dei modelli numerici tridimensionali in macro-scala atti a simulare i test eseguiti per la caratterizzazione termica dei materiali [3]. Il test consiste nel sottoporre a diversi cicli di carico scarico termico cilindri in calcestruzzo riscaldati attraverso il tubo scambiatore in acciaio, posto in asse con il guscio cilindrico in materiale cementizio, riscaldato mediante effetto Joule facendo passare corrente nel tubo centrale.

I modelli numerici sono stati calibrati in modo da cogliere il comportamento termico in diversi punti di controllo (punti target), posizionati nell'esperimento in diverse posizioni all'interno del calcestruzzo, in cui la temperatura è stata rilevata mediante termocoppie.

Successivamente si è indagato il comportamento meccanico del sistema di accumulo andando ad eseguire analisi transitorie termo-meccaniche non lineari in meso-scala. Per meso-scala si intende un'esplicita rappresentazione degli aggregati grossolani del calcestruzzo, con diametro maggiore di 5 mm. A questa scala il calcestruzzo è rappresentato come un materiale composito definito da due componenti: inerti e matrice. Numericamente gli aggregati sono stati rappresentati con geometria sferica e collocati all'interno del volume di calcestruzzo mediante un opportuno algoritmo di randomizzazione [4] in grado di seguire la curva granulometrica del mix-design utilizzato. Si definisce matrice la pasta di cemento e gli inerti fini non rappresentati in modo esplicito.

A questo livello di scala è possibile valutare l'interazione tra aggregati e matrice, dovuta al diverso comportamento meccanico dei materiali e ai diversi gradienti di temperatura presenti tra i due; nonché l'interazione dovuta alla coesione tra calcestruzzo e tubo scambiatore. Da un punto di vista meccanico l'analisi risulta non lineare in quanto si è adottato un modello costitutivo elasto-plasto danneggiante [5], in grado di valutare il deterioramento del calcestruzzo durante i cicli termici a causa dell'interazione con i vari materiali.

In queste analisi, si è valutata la possibilità che durante i cicli termici, il calcestruzzo possa danneggiare a causa di queste interazioni tra le diverse componenti causandone una riduzione di vita utile (problematiche di fatica termica); nonché la possibilità che il tubo in acciaio possa delaminare creando una discontinuità con il modulo di accumulo.

2 Caratterizzazione dei materiali (Campagna sperimentale ENEA)

La caratterizzazione termo-meccanica dei materiali per la realizzazione dei moduli è stata realizzata andando a studiare opportune miscele di calcestruzzo atte a massimizzare l'accumulo termico (come descritto in [3]).

In questa sezione sono stati riportati alcuni dati relativi alla sperimentazione, per una maggiore comprensione delle scelte adottate durante la realizzazione dei modelli numerici. La completa descrizione della campagna sperimentale è stata presentata in [1, 3].

Sono stati studiati principalmente i mix-design di calcestruzzi con e senza materiali a cambiamento di fase.

Le miscele oggetto di indagine sono:

- CLSB Calcestruzzo di base;
- CLSP Calcestruzzo con PCM (costituito da una matrice di calcestruzzo "base" in cui è stato aggiunto il 5% in peso di "Sale Solare" stabilizzato mediante diatomite).

La campagna sperimentale eseguita sui moduli è stata realizzata sottoponendo i cilindri in calcestruzzo a prove cicliche di temperatura mediante un impianto sperimentale denominato Solteca-Air.

I provini sono stati riscaldati fino al raggiungimento dello stato stazionario relativo alla temperatura minima di prova e successivamente è stato realizzato un ciclaggio termico del provino tra una temperatura minima e una temperatura massima (240 o 300°C) per 6 cicli.

2.1 Geometria dei provini

I provini realizzati sono di tipo cilindrico con immerso il tubo di scambio come mostrato in [Figura 1](#).

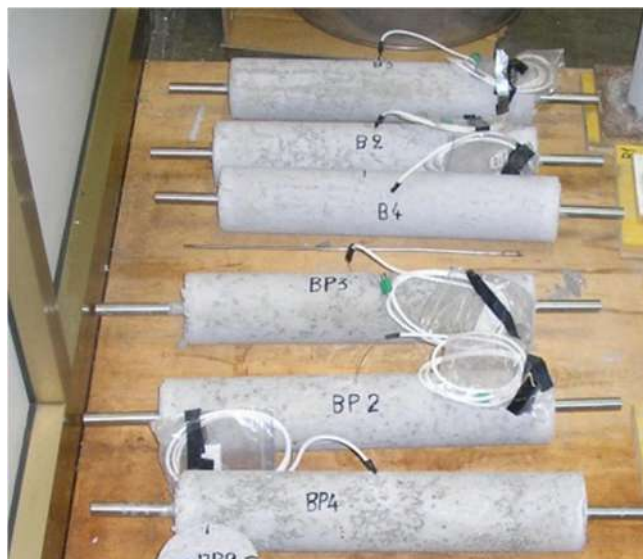


Figura 1- Provini oggetto dei test.

Nella [Tabella 1](#) sono state riportate le principali dimensioni dei provini schematizzati in [Figura 2 a](#)). La preparazione dei provini è avvenuta in due fasi: inizialmente i provini sono stati sottoposti a procedura di degassaggio per estrarne l'acqua libera presente al loro interno e minimizzare la formazione di sovrappressioni interne che potrebbero esporre il modulo a fenomeni di spalling, portando il cilindro a 105°C. Successivamente i cilindro sono stati opportunamente coibentati (v. [Figura 2 b](#)).

Tabella 1- 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

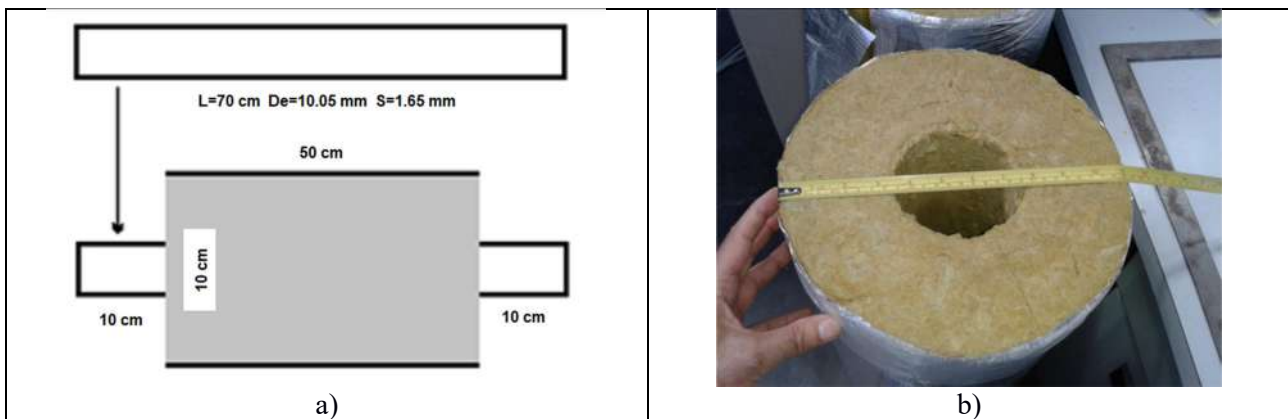


Figura 2- Schematizzazione del provino a), coibentazione b).

2.2 Caratteristiche dei materiali

Le proprietà termiche e meccaniche dei materiali sono state descritte nel dettaglio in [3] e riportate sinteticamente in **Tabella 2**. Si distinguono le proprietà della miscela di calcestruzzo rispetto a quella di calcestruzzo con PCM/diatomite nell'intervallo di temperature 200-400°C.

Tabella 2- 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)
Densità (kg/m ³)	2398	2404
Conducibilità (W/m/K)	1.77	1.82
Calore specifico (J/kg/K)	607	683
Capacità volumetrica (J/m ³ /K) *10 ⁶	1.43	1.58
Diffusività (m ² /s) *10 ⁻⁶	1.14	1.16
Effusività ((J*s ^{0.5} /m ² /K)	1584	1691
Calore latente effettivo (J/kg)	0	5800
Resistenza a compressione [MPa]	38	38
Resistenza a trazione [MPa]	3.9	2.9

Il PCM è stato inserito preventivamente nella diatomite (stabilizzazione) per migliorare la lavorabilità del mix garantendo una distribuzione omogenea del materiale a cambiamento di fase all'interno dell'impasto, nonché, grazie all'elevata porosità della diatomite, l'assorbimento delle deformazioni termiche del PCM che altrimenti non sarebbero compatibili con le deformazioni del calcestruzzo.

Il tubo di scambio immerso è stato realizzato con acciaio AISI 316. Le proprietà termiche e meccaniche sono state estratte dall'ASME Code Case N47 e valutate ad una temperatura operativa di 300°C. Vengono in seguito riportate in **Tabella 3**.

Tabella 3- Proprietà dell'acciaio AISI 316 (da ASME Code Case N47) a 300°C.

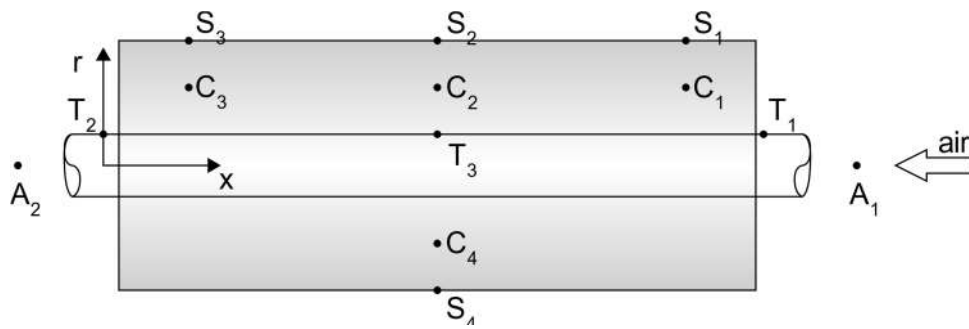
Proprietà	Valore
Densità (kg/m ³)	7782
Conducibilità (W/m/K)	18.2
Calore specifico (J/kg/K)	529.5
Tensione di snervamento [MPa]	290

2.3 Punti Target

I punti di riferimento tra risultati sperimentali e numerici sono indicati le seguenti sigle:

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

Nella **Figura 3** sono indicati i punti di acquisizione delle temperature e in **Tabella 4** le corrispondenti coordinate.



• Figura 3- Disposizione dei punti di acquisizione delle temperature per SoltecaAir.

Tabella 4 – Coordinate della posizione delle termocoppie dei provini in calcestruzzo con o senza PCM.

Posizione Termocoppie		
TC	$x(cm)$	$r(cm)$
S1	47.5	5
S2	25	5
S3	2.5	5
S4	25	-5
C1	47.5	3
C2	25	3
C3	2.5	3
C4	25	-3
T1	50	0.95
T2	0	0.95
T3	25	0.95

3 Modellazione in macro-scala

3.1 Definizione della geometria

La calibrazione del comportamento termico dei modelli è avvenuta tramite lo sviluppo di modelli numerici tridimensionali atti a risolvere analisi di tipo transitorio termico.

La rappresentazione geometria dei modelli tiene conto di tutti gli elementi principali che compongono il provino; nello specifico:

- tubazione in acciaio;
- cilindro in calcestruzzo;
- strato di coibente.

Le caratteristiche fisiche dei materiali sono state assunte in accordo con la [Tabella 2](#) e [Tabella 3](#).

Il modello tiene conto di una doppia simmetria presente nella geometria come visibile in [Figura 4 a\)](#) potendo, grazie a questo è stato possibile sviluppare solo un quarto della geometria reale, come riportato in [Figura 4 b\)](#).

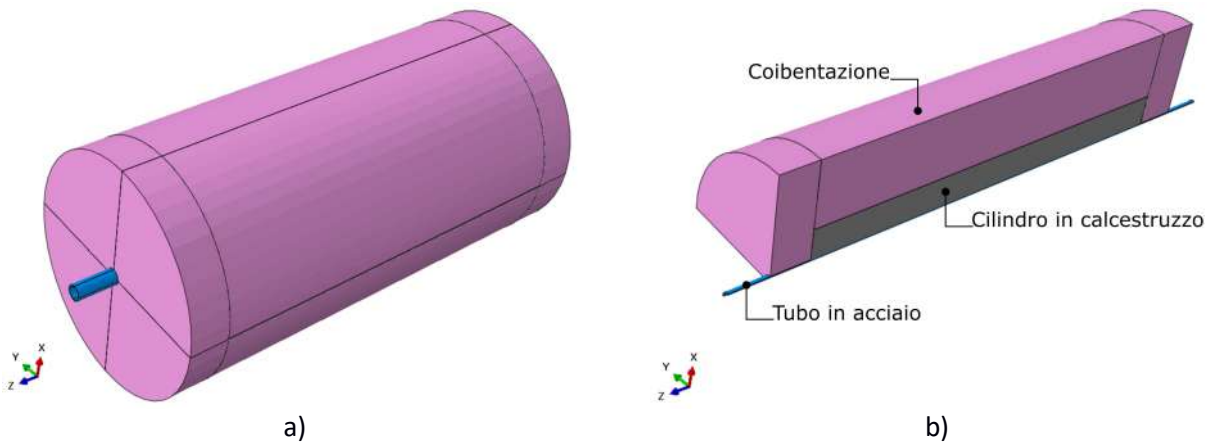


Figura 4 Geometria intera del provino coibentato a); geometria effettivamente realizzata b).

Sono state applicate condizioni al contorno di flusso alla superficie esterna del coibente, come indicato in [Figura 5 a\)](#), mentre la discretizzazione è stata realizzata mediante elementi finiti isoparametrici di tipo esaedrico, con funzioni di forma lineari ad integrazione completa. La continuità tra i vari materiali è stata realizzata tramite una formulazione di contatto denominata “tie” permettendo in questo modo di realizzare mesh non congruenti riducendo il numero di gradi di libertà del sistema (v [Figura 5 b\)](#) e c).

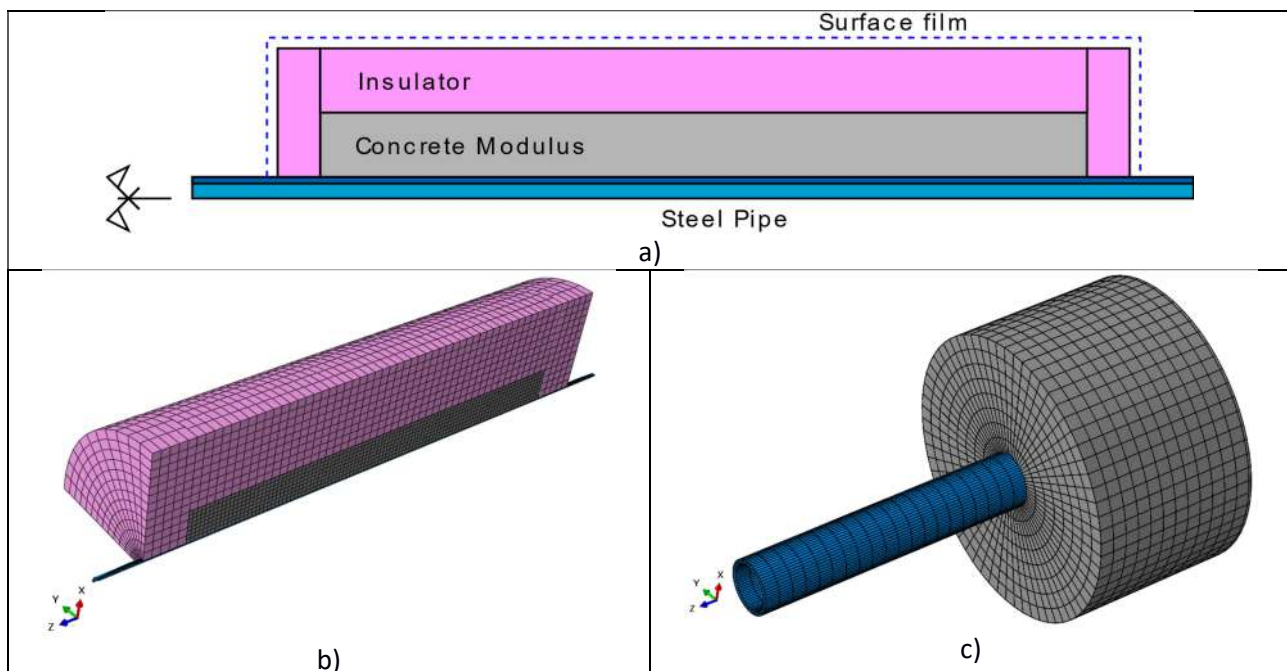


Figura 5- Modello FEM schematizzato a); Discretizzazione spaziale del provino b); dettaglio del nodo di connessione tra calcestruzzo e tubazione in acciaio c).

3.2 Condizioni al contorno

Dai dati sperimentali si è visto come la distribuzione del calore in entrata (applicata nella tubazione in acciaio) risulta avere un comportamento non lineare lungo l'asse del provino. Per poter ricreare un analogo comportamento nei modelli numerici è stata sviluppata un'opportuna legge in grado di far variare le condizioni al contorno termiche del modello in accordo con le curve sperimentali.

E' stata quindi sviluppata una subroutine (implementata all'interno del codice Abaqus utilizzato per le analisi) in grado di interpolare i valori di temperatura letti sperimentalmente nelle termocoppie T_1 , T_2 , T_3 , per assegnare la temperatura in ingresso a tutta la superficie interna della tubazione in acciaio.

Fissati i parametri dei materiali in accordo con quanto rilevato da ENEA, nelle passate campagne sperimentali, la calibrazione dei modelli è avvenuta andando a valutare i coefficienti di scambio termico k per la definizione dei flussi in uscita tra coibente ed ambiente circostante, calcolati tramite la legge:

$$q = k (T - T_{\infty}) \quad (1)$$

Essendo q il flusso in uscita; T la temperatura di superficie del provino T_{∞} la temperatura ambientale.

3.3 Risultati numerici

I risultati ottenuti sono illustrati qui di seguito suddivisi per tipologia di calcestruzzo. I risultati riportati, corrispondono con le fasi di ciclaggio termico successive alla fase di riscaldamento iniziale.

Provini con calcestruzzo base (CLSB)

È stato utilizzato il provino con miscela base di calcestruzzo sottoposto ad un carico ciclico con $T_s = 200^{\circ}\text{C}$ e $T_{max} = 240^{\circ}\text{C}$ (essendo T_s la temperatura stazionarie e T_{max} quella massima) in riferimento alla prova B1T1.

L'andamento della temperatura misurata all'interno del tubo scambiatore è stato riportato in **Figura 6**, assunto come valore di input per il modello.

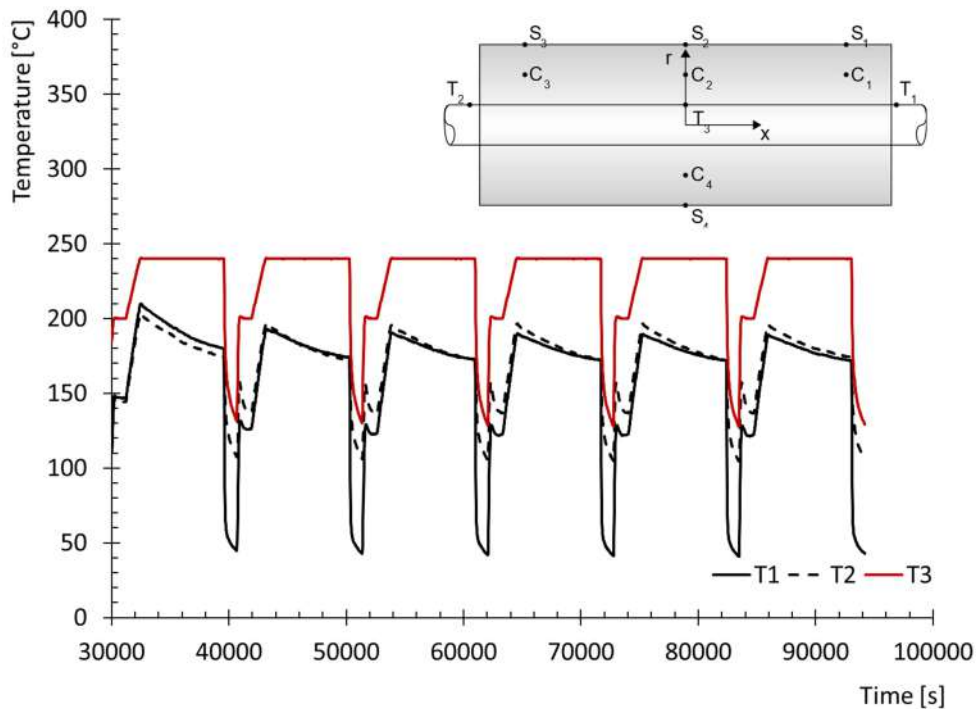


Figura 6 Andamento delle temperature nelle termocoppie T1, T2, T3 (Calcestruzzo di Base).

In **Figura 7** è stato riportato l'andamento della temperatura in un intervallo temporale durante il processo di carico, dove è possibile vedere che il riscaldamento del provino avviene in accordo con le temperature in input dal centro del provino verso l'esterno, essendo il valore massimo presente nella termocoppia T_3 . In **Figura 8** è stata riportata la mappa di temperatura all'interno del provino in corrispondenza della temperatura massima raggiunta nel test; mentre in **Figura 9** è visibile la fase di raffreddamento.

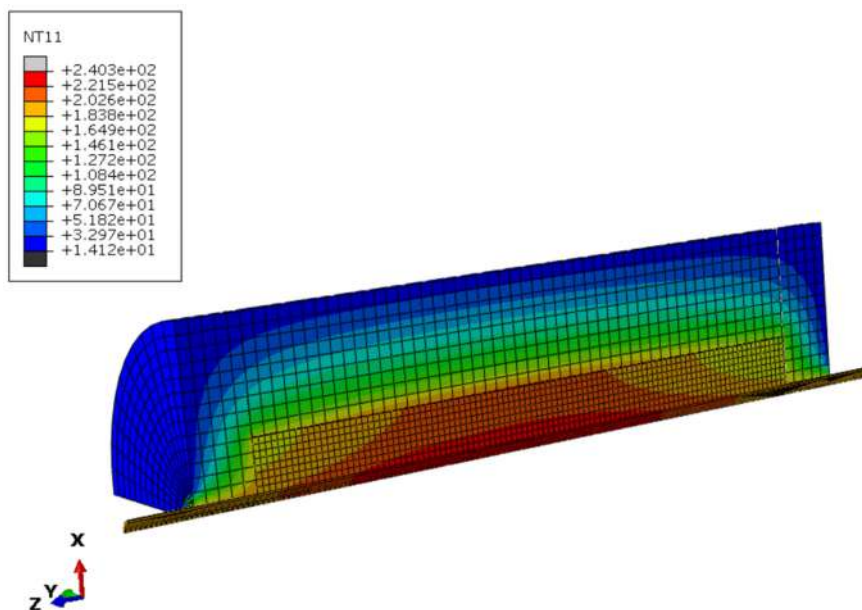


Figura 7 Risultati analisi agli elementi finiti, fase di riscaldamento a $t=52674s$

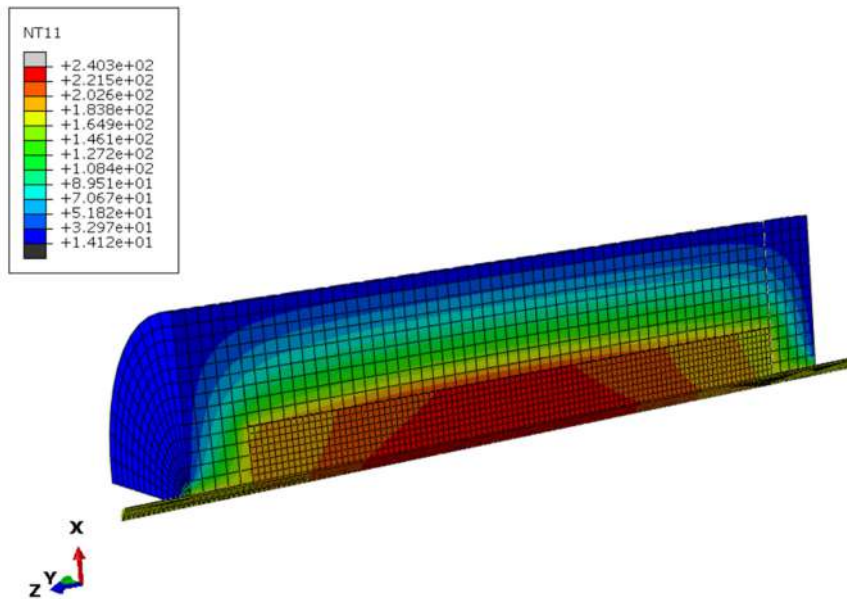


Figura 8 Risultati analisi agli elementi finiti, fase massima di carico a t=60474s

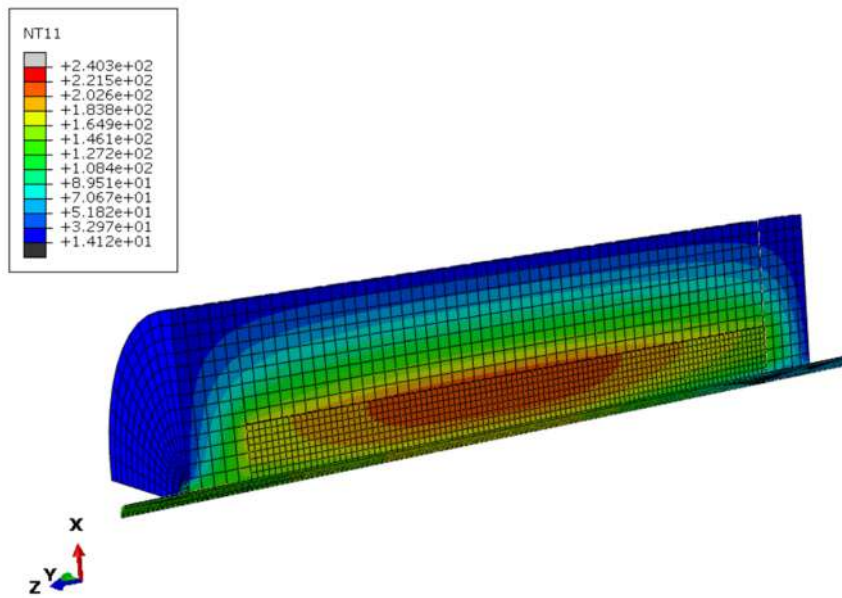
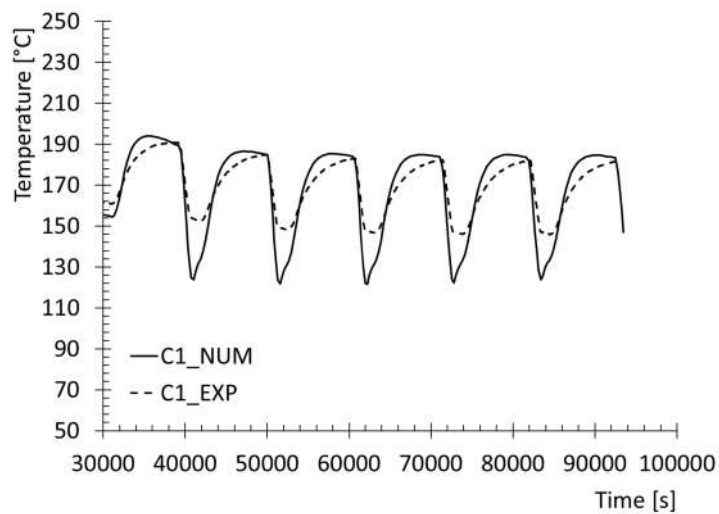
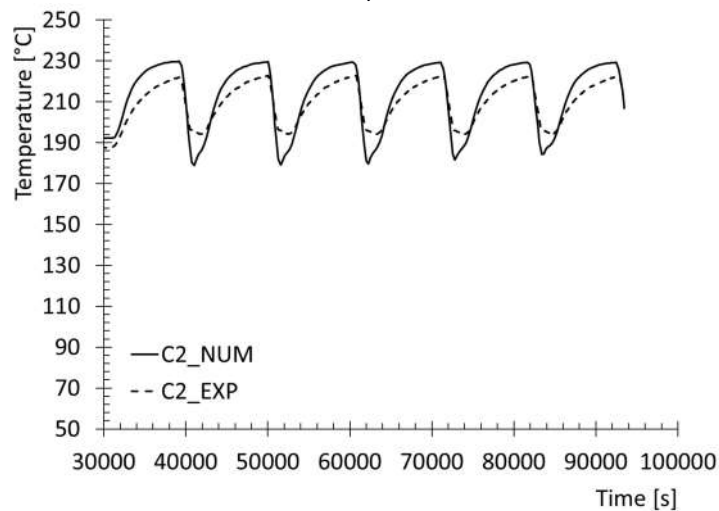


Figura 9 Risultati analisi agli elementi finiti, fase di raffreddamento a t=61832s

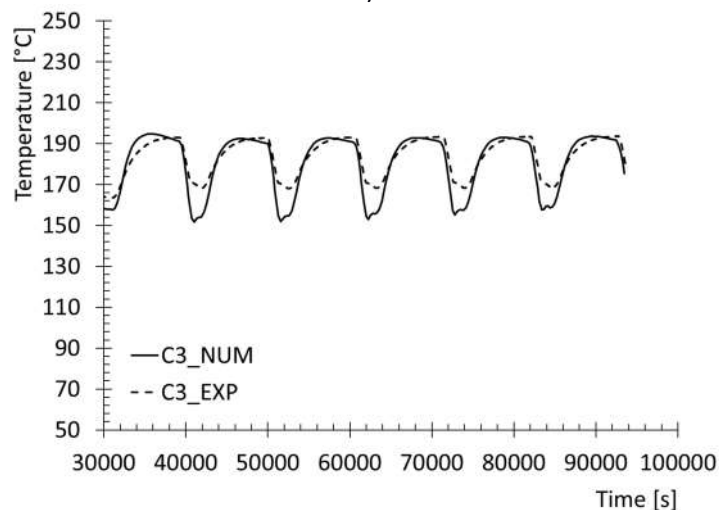
I confronti numerico sperimentali relativi ai punti di controllo C, interni al provino sono stati riportati in **Figura 10**. Si può notare come le analisi numeriche sono in grado di cogliere il comportamento ciclico visto sperimentalmente. Le analisi numeriche mostrano che in corrispondenza della termocoppia C_1 il modello numerico ha un raffreddamento più veloce rispetto al dato sperimentale. Questo comportamento è da imputare alla termocoppia T_1 assunta come valore di input che molto velocemente arriva a 50°C durante la fase di riscaldamento.



a)



b)



c)

Figura 10 Grafici di confronto Temperatura vs Tempo, per il calcestruzzo di base, nei punti C1 a), C2 b) e C3 c).

Analogamente in Figura 11 sono state riportati i confronti numerico sperimentali nelle termocoppie S_i (con $i = 1, 2, 3$) applicate sulla superficie esterna del provino.

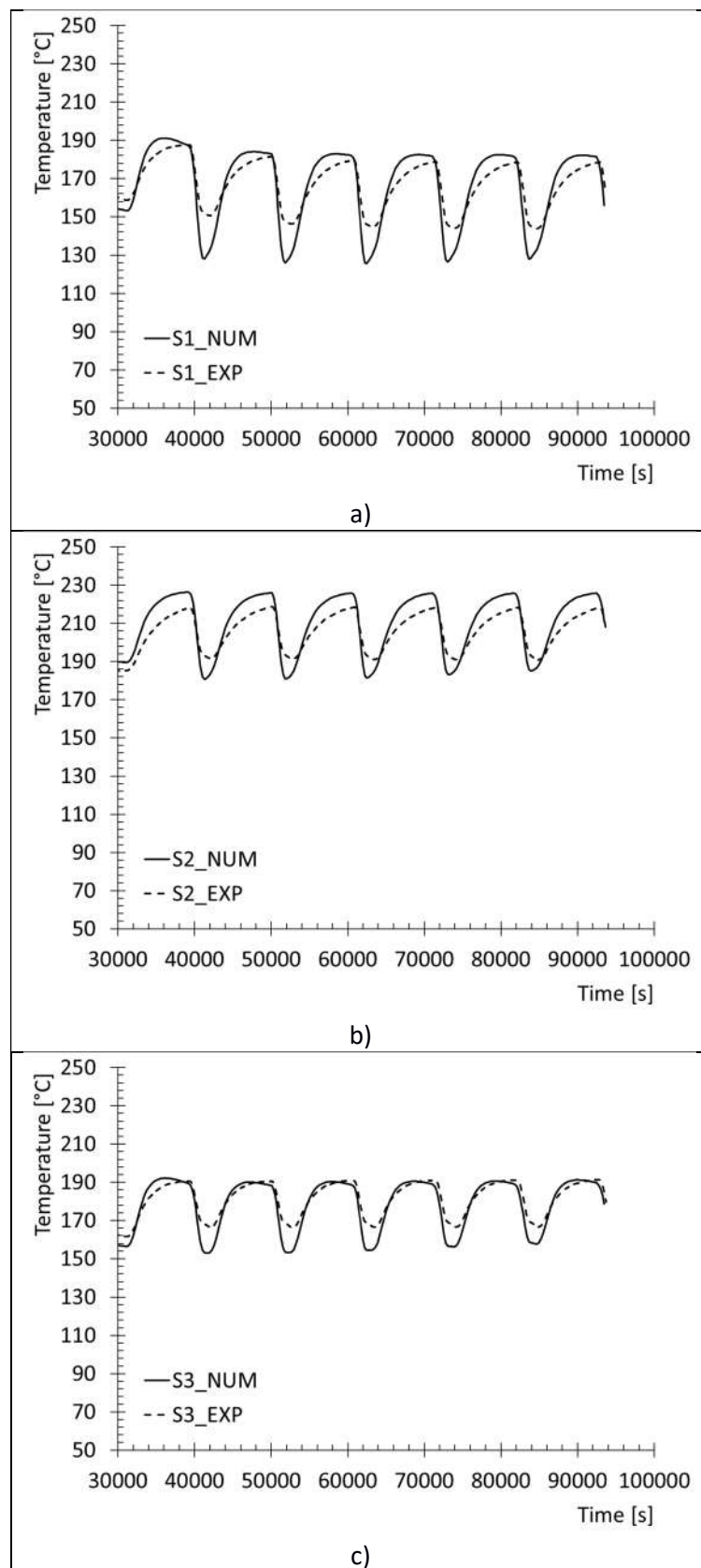


Figura 11 Grafici di confronto Temperatura vs Tempo, per il calcestruzzo di base, nei punti S1 a), S2 b) e S3 c).

I coefficienti di scambio termico tra i diversi componenti sono dipendenti da diversi fattori: temperatura, umidità, presenza di acqua libera ecc... Per questo motivo si è scelto di mantenere, nei modelli sviluppati, i

parametri fisici del materiale in accordo con valori indicati da ENEA e riassunti nei precedenti paragrafi, andando poi a calibrare il modello variando solo i coefficienti di scambio termico tra isolamento ed ambiente. In **Tabella 5** sono stati indicati i coefficienti di scambio termico impiegati nella calibrazione nelle varie superfici esposte all'ambiente.

Tabella 5 Coefficiente di scambio termico

Lato	Coefficiente di scambio termico [W/m ² °C]
Superiore esterno	5
Laterale destro	20
Laterale sinistro	20
Tubo in acciaio	20

Provini con calcestruzzo base e SS-CPCM (CLSP)

Analogamente a quanto fatto per l'analisi sul calcestruzzo di base, si è indagato il comportamento del calcestruzzo arricchito con PCM. Per questa tipologia di provini il test presenta cicli di carico con T_s = 360°C e T_{max} = 400°C e temperatura ambiente pari a 30 °C (v. **Figura 12**).

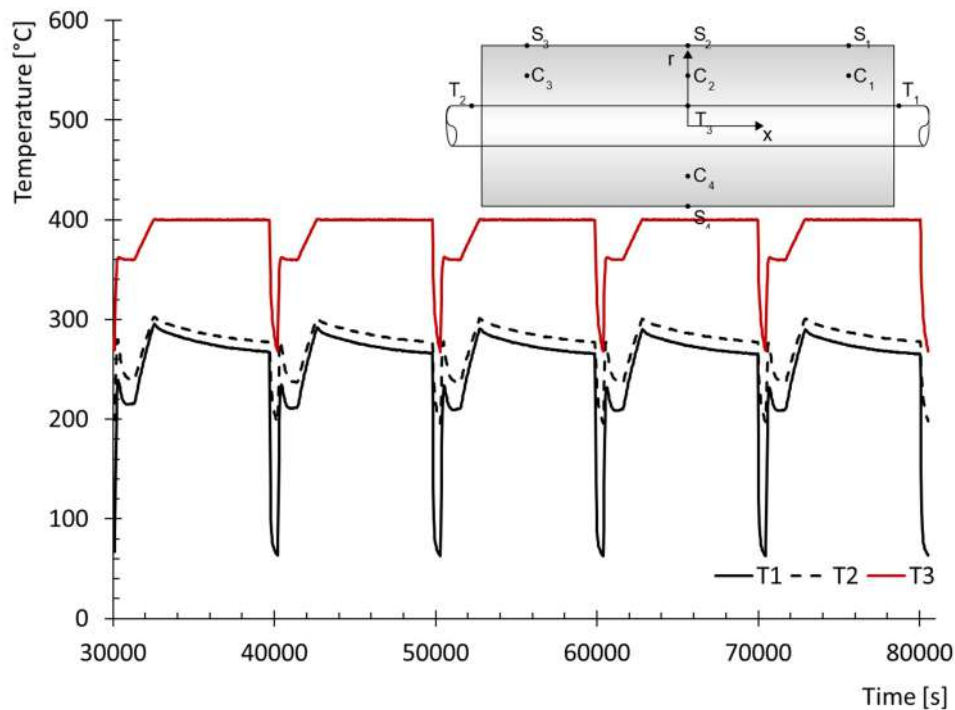


Figura 12 Andamento delle temperature nelle termocoppie T1, T2, T3 (Calcestruzzo con PCM).

In **Figura 13** è stato riportato l'andamento della temperatura relativo alla fase di riscaldamento. la **Figura 14** mostra la mappa di temperatura all'interno del provino in corrispondenza della temperatura massima raggiunta nel test; mentre in **Figura 15** è visibile la fase di raffreddamento.

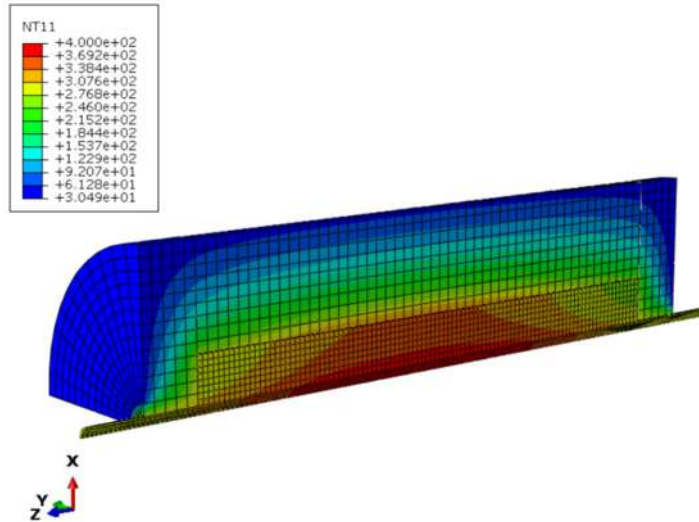


Figura 13 Risultati analisi agli elementi finiti, fase di riscaldamento a t=50106 s

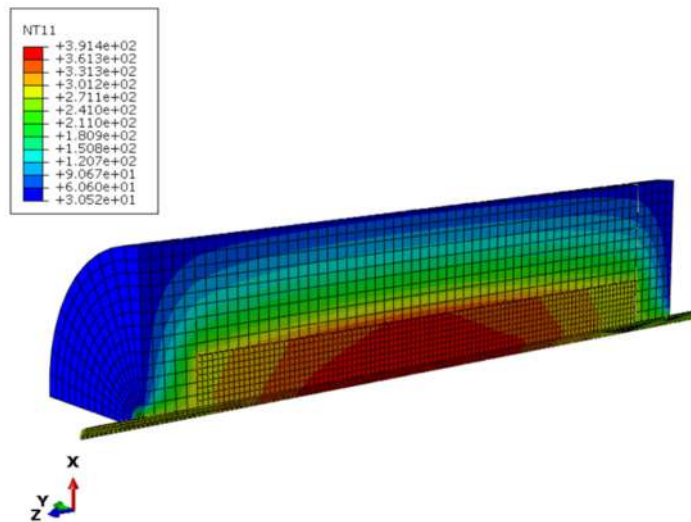


Figura 14 Risultati analisi agli elementi finiti, fase massima di carico a t=595255s

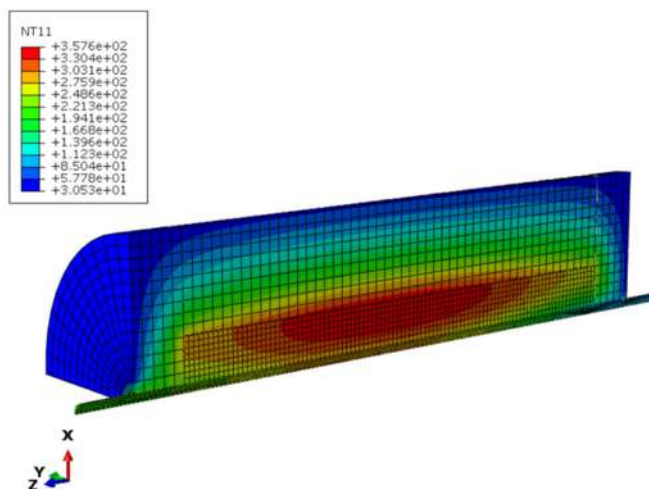


Figura 15 Risultati analisi agli elementi finiti, fase di raffreddamento a t=55340s

In **Figura 16** sono stati riportati i confronti numerico sperimentali relativi ai punti di controllo C_i (con $i = 1, 2, 3$). Anche per la miscela con PCM si può notare come le analisi numeriche sono in grado di cogliere il comportamento ciclico visto sperimentalmente. Le analisi numeriche mostrano che in corrispondenza della termocoppia C_1 lo scostamento massimo dei risultati durante la fase di raffreddamento del provino.

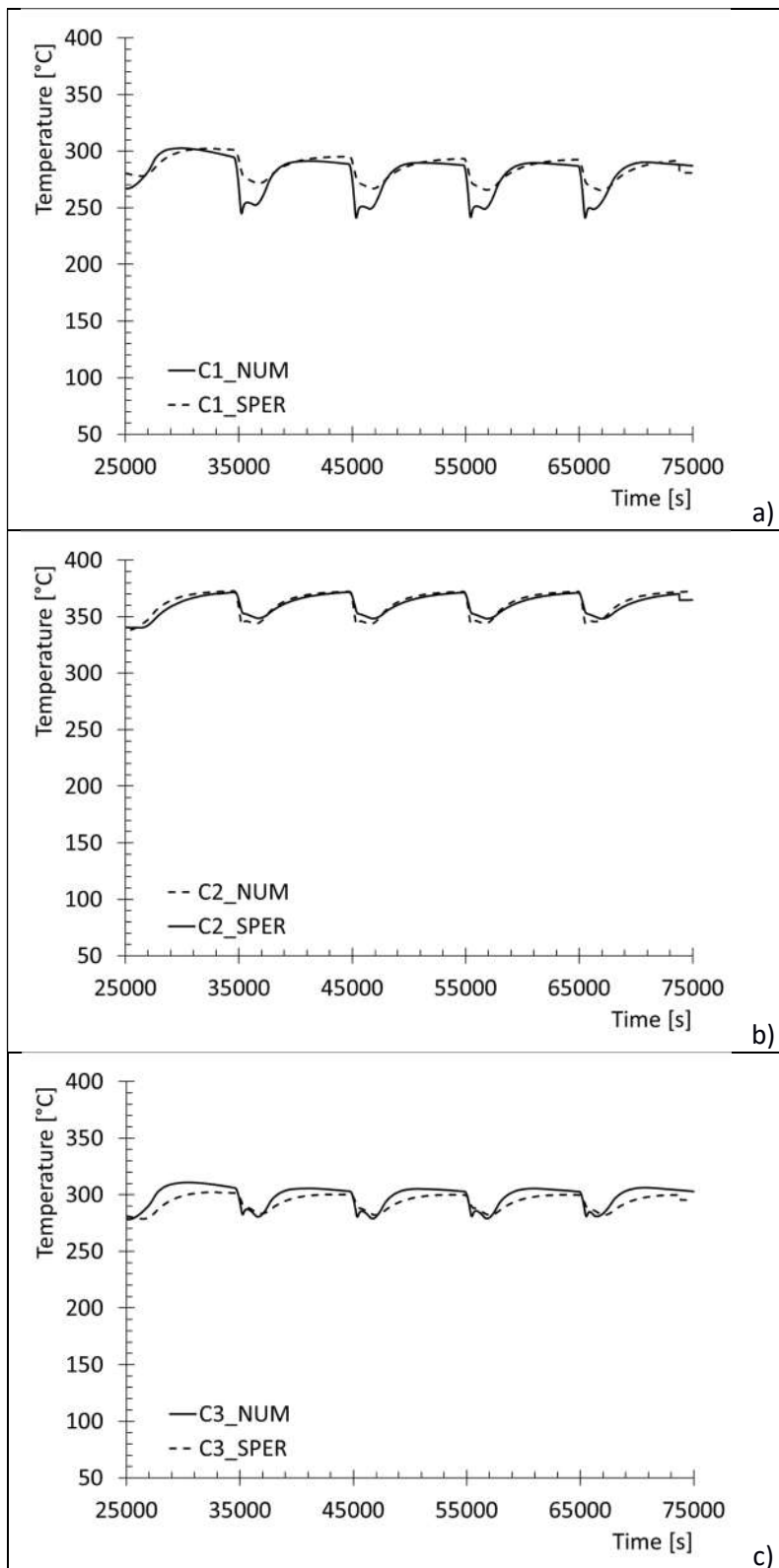


Figura 16 Grafici di confronto Temperatura vs Tempo, per la miscela con PCM, nei punti C1 a), C2 b) e C3 c).

Analogamente in

Figura 17 sono state riportati i confronti numerico sperimentali nelle termocoppie S_i (con $i = 1, 2, 3$) applicate sulla superficie esterna del provino.

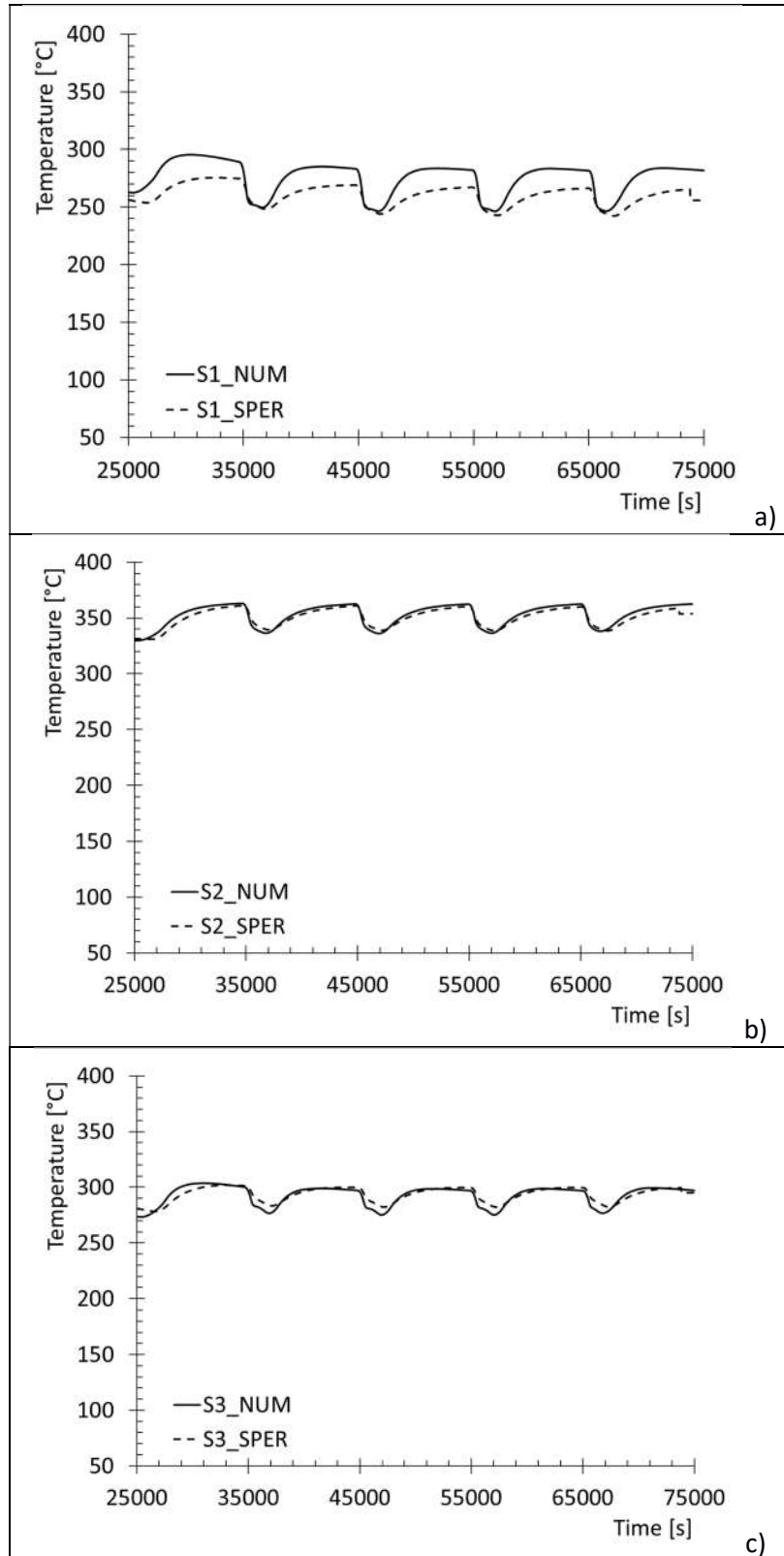


Figura 17 Grafici di confronto Temperatura vs Tempo, per la miscela con PCM, nei punti S1 a), S2 b) e S3 c).

I coefficienti di scambio termico utilizzati nel seguente modello sono riportati in **Tabella 6**:

Tabella 6 Coefficienti di scambio termico

Lato	Coefficiente di scambio termico [W/m ² °C]
Superiore esterno	5
Laterale destro	20
Laterale sinistro	20
Tubo in acciaio	20

4 Modellazione in meso-scala

Il calcestruzzo, comunemente, viene rappresentato come un materiale omogeneo isotropo assumendo una cella di riferimento REV (Rappresentative Element Volume) per la caratterizzazione del materiale, sufficientemente grande per poter ottenere un comportamento meccanico medio (v. **Figura 18 a**). Questa configurazione viene chiamata macro-scala. Andando ad osservare più nel dettaglio questo materiale, lo si può intendere come materiale composito le cui principali componenti sono: gli inerti, suddivisi a loro volta tra grossolani e fini, la pasta di cemento, nonché un particolare layer che si può formare attorno agli aggregati durante la fase di presa denominato ITZ (Interfacial transition zone). La macro-scala nel caso di materiali cementizi consiste nella rappresentazione di questo materiale tenendo conto degli inerti grossolani (generalmente con diametro minimo pari a 5 mm) e della matrice (v. **Figura 18 b**). Per matrice si intende la pasta di cemento, gli inerti fini e tutte le componenti sufficientemente piccole che non possono essere rappresentate in modo esplicito tra cui le particelle di PCM assorbite all'interno della diatomite.

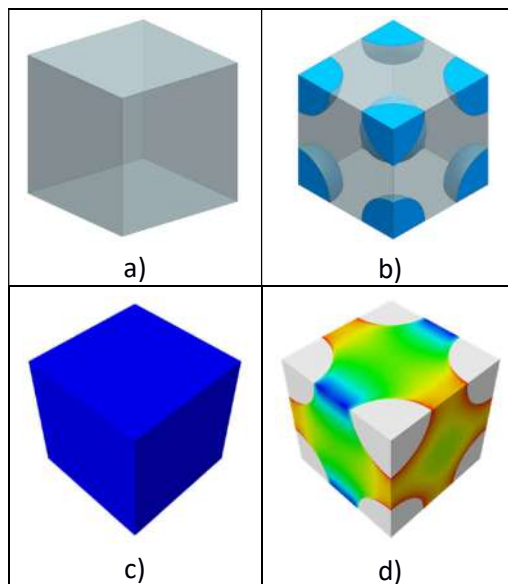


Figura 18 Cubo in macro-scala a); cubo in meso-scala b) stato tensionale uniforme in macro-scala c); stato tensionale non uniforme in meso-scala d).

Se con un modello in macro-scala un cubo di calcestruzzo soggetto ad una compressione assiale e vincolato isostaticamente presenta uno stato tensionale costante (v. **Figura 18 c**); alla meso-scala è possibile andare ad indagare l'interazione tra gli inerti e la matrice per tener conto sia degli effetti di confinamento locali che la matrice subisce in conseguenza della variazione di rigidità dei materiali, nonché del danneggiamento che intercorre tra le varie componenti a causa delle concentrazioni tensionali presenti derivanti dalla disposizione geometrica casuale degli aggregati all'interno del volume di calcestruzzo studiato (v. **Figura 18 d**).

In questo lavoro sono state sviluppate analisi in meso-scala con lo scopo di andare a valutare se la miscela di calcestruzzo con PCM, soggetta a cicli termici, possa evidenziare problematiche di danneggiamento e di degrado (fatica dovuta a carichi termici), che potrebbero ridurre la vita utile del modulo durante il suo funzionamento. Le analisi meccaniche svolte hanno avuto lo scopo anche di andare a realizzare inoltre, una prima stima dell'interazione tra tubo scambiatore e modulo in calcestruzzo per valutare possibili problematiche di delaminazione.

4.1 Analisi Effettuate

Per rappresentare il comportamento meccanico del provino durante i cicli termici, sono state sviluppate analisi di tipo termo-meccanico accoppiate.

Solo una porzione del cilindro in calcestruzzo è stato realizzato in meso-scala, questo per ridurre l'onere computazionale necessario per risolvere problematiche di questo tipo. L'elemento in calcestruzzo è stato quindi suddiviso in tre porzioni rispetto all'asse longitudinale andando ad esplicitare gli inerti nella zona centrale, essendo la zona che raggiunge le temperature massime durante la prova. Gli elementi di calcestruzzo laterali sono stati assunti come calcestruzzo in macro-scala andando, in questo modo, a definire le corrette condizioni al contorno per la zona centrale (v. [Figura 19](#)).

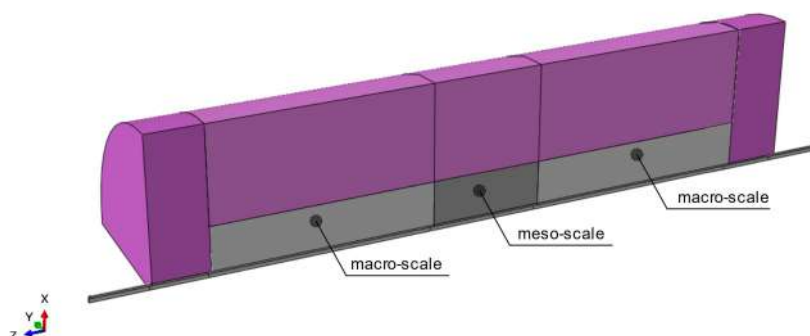


Figura 19 Suddivisione del modello.

Il comportamento meccanico dei diversi materiali è stato preso in accordo con le sperimentazioni ENEA assumendo diverse leggi costitutive:

- **Isolante:** legge costitutiva elastica;
- **Tubo in acciaio:** legge costitutiva elasto-plastica funzione dalla temperatura
- **Calcestruzzo** (macro-scala): legge costitutiva elasto-plastico danneggiante funzione dalla temperatura;
- **Matrice** (meso-scala): legge costitutiva elasto-plastica danneggiante funzione dalla temperatura;
- **Inerti** (meso-scala): legge costitutiva elastica funzione dalla temperatura.

Solo la miscela con PCM è stata presa in considerazione per questa tipologia di analisi, in quanto le caratteristiche meccaniche di questa miscela non sono molto diverse dal calcestruzzo base, ma i test effettuati prevedevano una rampa termica più penalizzante per il modulo.

Le analisi sono state condotte andando a percorrere uno dei cicli termici visti in [Figura 12](#), considerando il modulo pre-riscaldato e opportunamente degassato in modo da evitare problematiche di spalling.

Per valutare l'effetto dato dall'interazione acciaio-calcestruzzo sono stati realizzati diversi scenari per la modellazione del provino cilindrico in meso-scala:

- Perfetta adesione tra tubo in acciaio e calcestruzzo.
- Decoesione meccanica tra tubo e provino in calcestruzzo, mantenendo inalterato (rispetto alla prima analisi) il trasferimento del calore nella superficie di contatto.

Le due configurazioni sono state realizzate per verificare se la presenza o meno di una coesione tra il tubo in acciaio e il modulo in calcestruzzo possa modificare la mappa delle fessurazioni del provino.

4.2 Geometria del modello in meso-scala

La ricostruzione di un modello in meso-scala può avvenire in diversi modi in funzione delle informazioni derivanti dal provino [6, 7]. Per questo studio si è scelto di andare ad effettuare una distribuzione random degli aggregati, rappresentati con forma sferica, all'interno di un volume rappresentativo di calcestruzzo. La determinazione dei diametri degli inerti e la frazione volumetrica è avvenuta andando a ricostruire l'andamento dell'assortimento degli inerti tramite la Curva granulometrica di Bolomey:

$$p = k + (100 - k) \left(\frac{d}{D} \right)^c \quad (2)$$

Essendo: p il passante (in frazione) dell'aggregato miscela al vaglio di apertura d; k coefficiente che è funzione dello slump del cls (k = 8 - 14); D diametro massimo dell'aggregato miscela; c coefficiente pari a 0.5. In **Tabella 7** è stato riportato il mix design utilizzato, ossia le pesate reali per il confezionamento di 60 l di calcestruzzo "BASE + PCM".

Tabella 7 Composizione del calcestruzzo con PCM

Quantitativi	[kg] x 60 l
Sabbia (0-4 mm)	47
Ghiaino (0-7 mm)	23
Ghiaino (7-12 mm)	47
Cemento (CEM II 42.5 R - A/LL)	20.4
Acqua	7.6
Carica metallica	4.7
Fibre di Nylon PA 66	0.3
PCM	4.96
Diatomite	1.24

Assumendo che il "ghiaino" risulta essere l'inerte grossolano e che il 50% della frazione (0 - 7 mm) sia con diametro 7 mm, (essendo il diametro minimo assunto nel modello in meso-scala). Il peso complessivo risulta pari a $(47 + 23/2) = 58.5$ kg (ogni 60 l di calcestruzzo) pari a 0.36kg/l. Assumendo una densità dell'inerte pari a 2700kg/m³ la % volumetrica di inerte grossolano al m³ risulta di circa il 36%. Per il calcolo della curva teorica alla Bolomey si è scelto un coefficiente k = 12 (consistenza plastica) ottenendo la curva granulometrica riportata in **Figura 20**, essendo le curve "min" e "max" le curve limiti del fuso, ottenute considerando il coefficiente c dell'eq. (2) pari rispettivamente a 0.65 e 0.4.

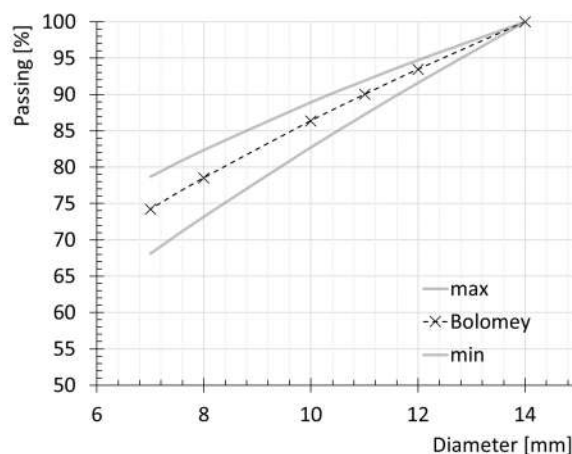


Figura 20 Curva granulometrica

Tenendo conto della curva granulometrica teorica e della % volumetrica di inerti in un volume unitario di calcestruzzo, nell’algoritmo di randomizzazione sono stati inseriti i seguenti diametri possibili espressi in mm: [12, 11, 10, 8, 7]. Il confronto tra la curva teorica e quella ottenuta è stata riportata in **Figura 21**.

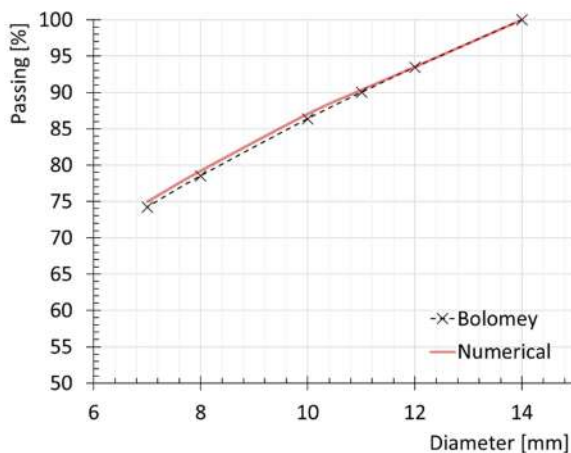


Figura 21 Confronto curva granulometrica teorica con quella ottenuta tramite algoritmo di randomizzazione.

Ottenuta la distribuzione random degli aggregati è stato possibile ricostruire un volume di calcestruzzo in meso-scala andando a suddividere gli inerti dalla matrice come visibile in **Figura 22**.

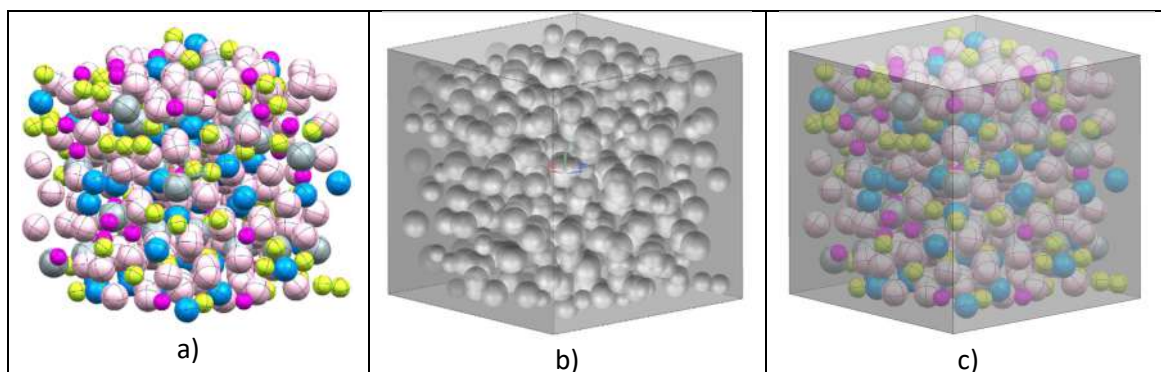


Figura 22 Distribuzione random degli aggregati a) geometria della matrice b) provino in meso-scala c).

In seguito, partendo dal volume cubico studiato (v. **Figura 22** c) è stata ricavata la porzione di provino cilindrico come visibile in **Figura 23** a) e successivamente il solido è stato discretizzato **Figura 23** b) mediante elementi tetraedrici con funzioni di forma lineari.

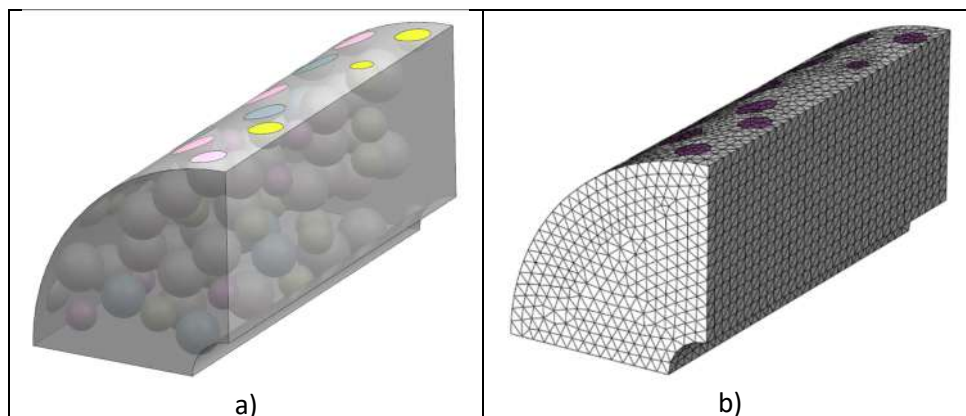


Figura 23 Geometria cilindrica a); Modello FEM b).

4.3 Modellazione costitutiva del calcestruzzo

La caratterizzazione numerica del calcestruzzo è stata sviluppata attraverso un modello elasto-plastico danneggiante in grado di cogliere il diverso comportamento a trazione e a compressione del materiale, nonché aspetti quali:

- La dipendenza del dominio elastico con la pressione idrostatica (effetto di confinamento)
- Una variazione di resistenza nel piano deviatorico di stress, (una variazione del campo elastico in funzione con l'angolo di Lode).

Questi aspetti sono fondamentali in particolare in meso-scala in quando le concentrazioni tensionali locali, causate dalla presenza degli aggregati, possono comportare notevoli variazioni di resistenza localizzate all'interno della matrice ottenibili solo con questa tipologia di modelli costitutivi.

Una delle principali teorie costitutive impiegate per la simulazione di calcestruzzi è denominata "concrete damage plasticity" sviluppata in [5], che utilizza una funzione di plasticità f di tipo J_3 (cioè dipendente dal terzo invariante del tensore deviatorico che definisce la dipendenza di f dall'angolo di Lode), ed un flusso plastico "non associato", in grado di valutare l'evoluzione delle deformazioni plastiche in accordo con il comportamento di materiali quali malte e calcestruzzi.

La funzione di plasticità espressa nello spazio delle tensioni è descritta come:

$$f(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}^p) = \frac{1}{1-\alpha} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\boldsymbol{\varepsilon}^p) \langle \hat{\sigma}_{\max} \rangle - \gamma \langle \hat{\sigma}_{\max} \rangle) - \sigma_c(\boldsymbol{\varepsilon}^p) \leq 0 \quad (3)$$

essendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{\sigma_{b0} / \sigma_{c0} - 1}{2\sigma_{b0} / \sigma_{c0} - 1} \\ \beta = \frac{\sigma_c(\boldsymbol{\varepsilon}_c^p)}{\sigma_t(\boldsymbol{\varepsilon}_t^p)} (1-\alpha) - (1+\alpha) \\ \gamma = \frac{3(1-K_c)}{2K_c - 1} \end{array} \right. \quad (4)$$

$\hat{\sigma}_{\max}$ è la massima tensione equivalente; $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$ è il rapporto tra la tensione iniziale di compressione a snervamento e la tensione iniziale di compressione uniaassiale a snervamento; K_c è il rapporto tra il secondo invariante di tensione; $\sigma_t(\boldsymbol{\varepsilon}_t^p)$ è lo stress effettivo a trazione; $\sigma_c(\boldsymbol{\varepsilon}_c^p)$ è lo stress effettivo a compressione funzioni delle deformazioni equivalenti plastiche di trazione e compressione.

Il dominio elastico assume diversi comportamenti a trazione e a compressione come riportati in **Figura 24**, nel caso di comportamento monodimensionale.

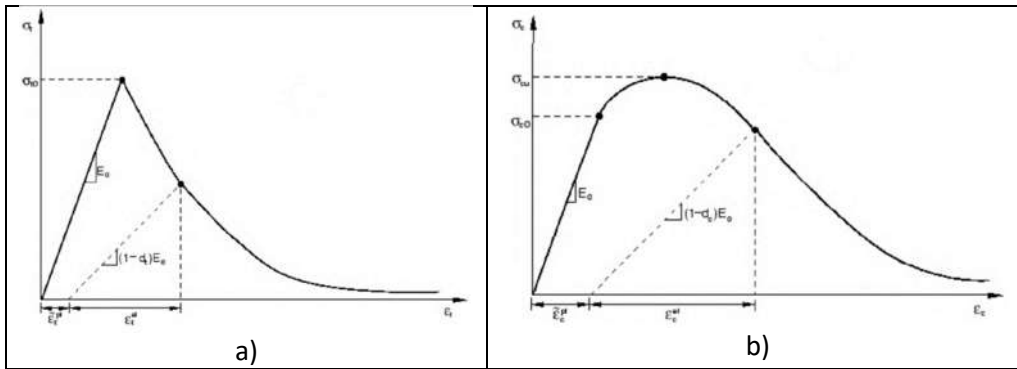


Figura 24 Diagramma tensione deformazione a trazione a) a compressione b) [Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.]

Il rateo di deformazione plastica (la legge di flusso) è definito dalla legge:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \gamma^p \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (5)$$

Essa individua la direzione delle deformazioni inelastiche, durante il deterioramento del materiale, viene definita di tipo “non associata”. Ciò implica la definizione di uno specifico potenziale plastico g , funzione definita nello spazio delle tensioni, atto a valutare la dissipazione del sistema elastoplastico, nonché di un moltiplicatore plastico γ^p .

Il modello utilizzato, assume come potenziale plastico la funzione di Drucker-Prager così definita:

$$g = \sqrt{(\varepsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi \quad (6)$$

Dove:

$$\bar{p} = -\frac{1}{3} Tr \bar{\boldsymbol{\sigma}} \text{ è la pressione idrostatica;}$$

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2} (\bar{\boldsymbol{S}} : \bar{\boldsymbol{S}})} \text{ è la tensione equivalente alla Von Mises;}$$

$$\bar{\boldsymbol{S}} = \bar{\boldsymbol{\sigma}} + \bar{p} \mathbf{I} \text{ è la parte deviatorica del tensore delle tensioni effettive;}$$

Ψ è l'angolo di dilatazione, definito come angolo di inclinazione della superficie di snervamento rispetto all'asse idrostatico in un piano meridiano; σ_{t0} è la tensione uniassiale a rottura del calcestruzzo; ε è un parametro che indica l'eccentricità $\frac{\sigma_t}{\sigma_c}$.

La legge di danno scalare è decomposta in due componenti a trazione ω_t e a compressione ω_c nel seguente modo:

$$\begin{cases} \sigma_t = (1 - \omega_t) E (\varepsilon_t - \varepsilon_t^p) \\ \sigma_c = (1 - \omega_c) E (\varepsilon_c - \varepsilon_c^p) \end{cases} \quad (7)$$

4.3.1 Caratteristiche costitutive della matrice e degli inerti

Si è assunto un modulo elastico dipendente con la temperatura in accordo con le prescrizioni dell'Eurocodice 2 Part 1-2 [9], (v. Figura 25 a)

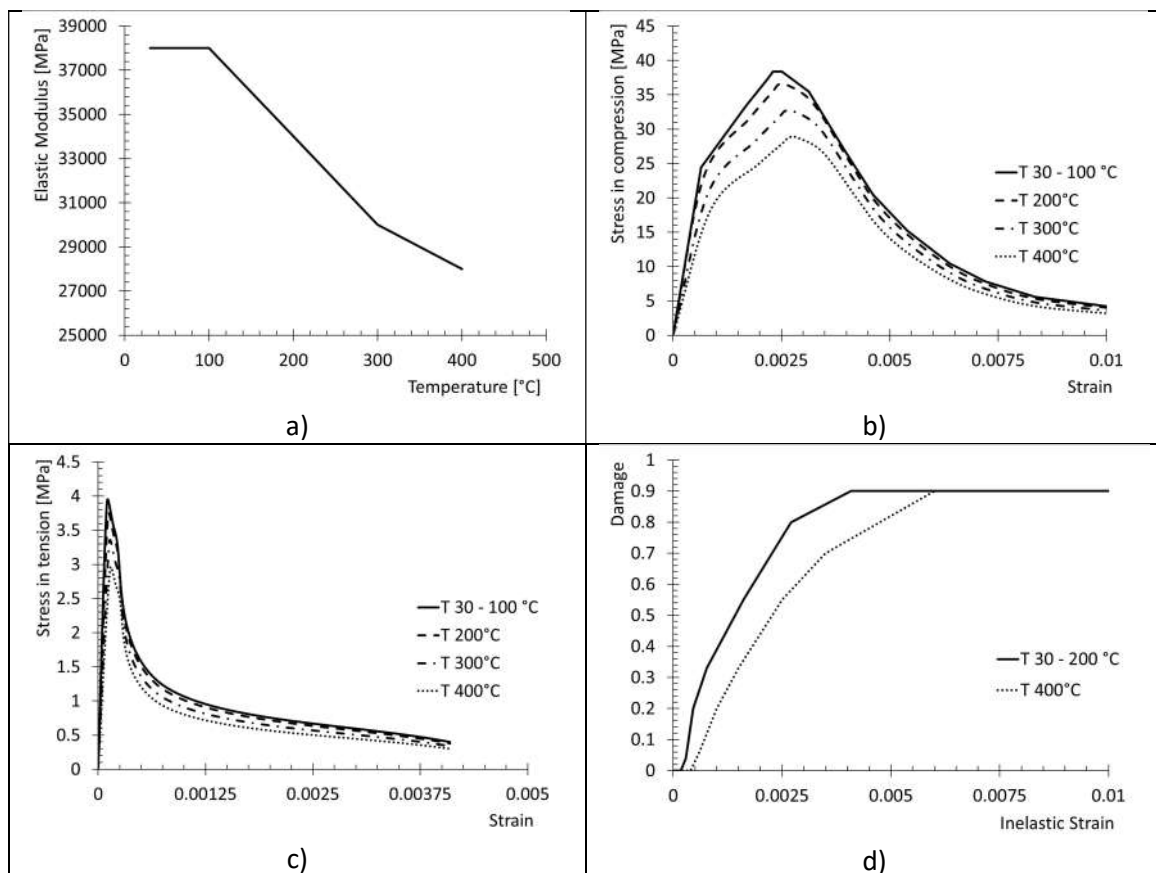


Figura 25 Caratteristiche della matrice: variazione del modulo elastico con la temperatura a); stress di compressione vs deformazioni totali a differenti temperature b); stress di trazione vs deformazioni totali a differenti temperature c); danno al variare della temperatura d).

L'andamento tensione-deformazione mono-assiale per le varie temperature è stato riportato rispettivamente in **Figura 25** b) e c) mentre l'andamento della variabile di danno al variare della temperatura è stata mantenuta al massimo al 90% per migliorare la convergenza del modello come visibile in **Figura 25** d).

In questo studio si è assunto un comportamento di danno solo a trazione essendo questo il principale meccanismo di rottura nelle analisi effettuate.

La variazione di resistenza del materiale, funzione della temperatura, risulta essere in accordo con quanto osservato nella campagna sperimentale riportata in [3].

Il dominio elastico tridimensionale è stato definito utilizzando valori di letteratura compatibili con questa tipologia di materiali [10] riportati in **Tabella 8**.

Tabella 8 Caratteristiche della funzione di plasticità

Dilation angle	32°
Eccentricity	0.2
σ_{b0}/σ_{c0}	1.15

Si è assunto un coefficiente di espansione termica $k = 1.0 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Le caratteristiche termiche sono state assunte in accordo con i precedenti modelli, sviluppati per le analisi transitorie termiche, assumendo una miscela base arricchita con PCM.

In queste prime analisi si è assunto che il comportamento del calcestruzzo rappresentato in macro-scala presentasse le stesse caratteristiche meccaniche assunte per la matrice nella parte in meso-scala.

In questa tipologia di analisi gli inerti non sono soggetti ad elevati stati tensionali e si è scelto di rappresentare il loro comportamento meccanico tramite un modello elastico lineare variabile con la temperatura.

Il modulo elastico da temperatura ambiente fino a 100 °C è stato assunto pari a $E_{100} = 40000$ MPa, assegnando, per temperature superiori, una variazione lineare con la temperatura fino a 400°C con un valore minimo pari a $E_{400} = 34000$ MPa.

4.4 Caratteristiche costitutive per l'acciaio

L'acciaio, per la rappresentazione della tubazione, è stato assunto con un modulo elastico a temperatura ambiente di $E_0 = 210000$ MPa ed una tensione di snervamento $f_y = 290$ MPa. La variazione con la temperatura assunta in accordo con l'Eurocodice 3 Part 1-2 [11] è stata riportata in **Figura 26**.

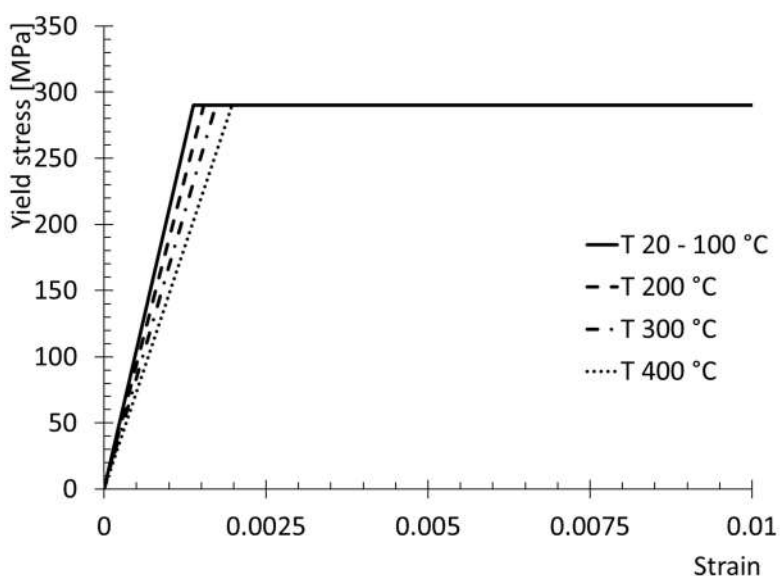


Figura 26 Variazione della legge costitutiva mono assiale dell'acciaio in funzione della temperatura.

Si è assunto un coefficiente di espansione termica $k = 1.15 \times 10^{-5}$ 1/°C.

Le caratteristiche termiche sono state assunte in accordo con i precedenti modelli, sviluppati per le analisi transitorie termiche.

4.5 Caratteristiche costitutive per il coibente

Il coibente non ha funzione strutturale si è quindi assunto un modulo elastico costante pari a $E = 100$ MPa costante per tutta l'analisi. Le caratteristiche termiche sono state assunte in accordo con i precedenti modelli, sviluppati per le analisi transitorie termiche.

4.6 Condizioni al contorno

Sono state assunte le condizioni al contorno impiegate per la calibrazione delle analisi termiche precedentemente descritte, in questo caso, per limitare i tempi di elaborazione del modello è stato scelto di studiare un solo ciclo di carico scarico come mostrato in **Figura 27**.

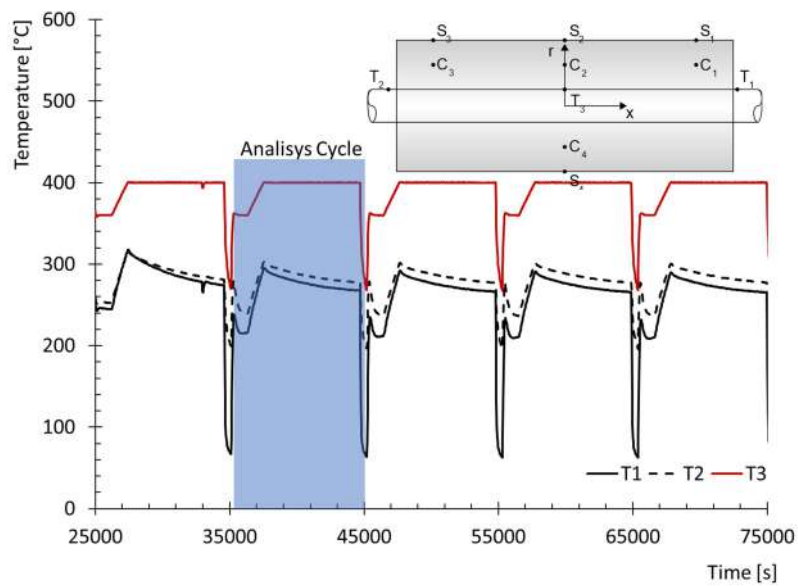


Figura 27 Ciclo studiato nelle analisi termo-meccaniche.

I vincoli meccanici hanno tenuto conto di una condizione isostatica sfruttando la doppia simmetria del modello (v. **Figura 28**).

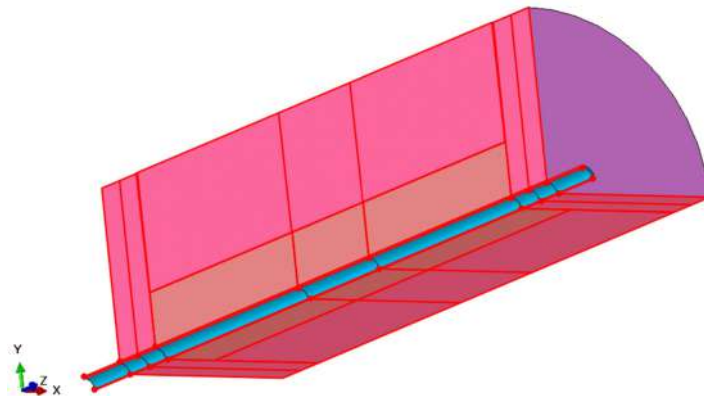


Figura 28 Vincoli di simmetria del modello.

4.7 Risultati Numerici

Come detto precedentemente, non avendo informazioni relativamente alla coesione tra calcestruzzo e tubo in acciaio, sono stati sviluppati due scenari:

- Perfetta coesione tra i materiali
- Completa decoesione meccanica tra i materiali

Il primo scenario comporta che la variazione di espansione termica tra calcestruzzo e acciaio possa influire nella rottura del modulo; mentre nel secondo scenario questo effetto non si verifica. In entrambe le configurazioni si è assunto che il trasferimento della temperatura tra i due materiali rimanga invariato.

4.7.1 Scenario 01: Perfetta coesione

Dalle analisi termo-meccaniche effettuate, il provino non presenta problematiche meccaniche fino al raggiungimento di circa 350 °C (v. Figura 29 a) in cui iniziano a verificarsi fessurazioni assiali come mostrato in Figura 29 b).

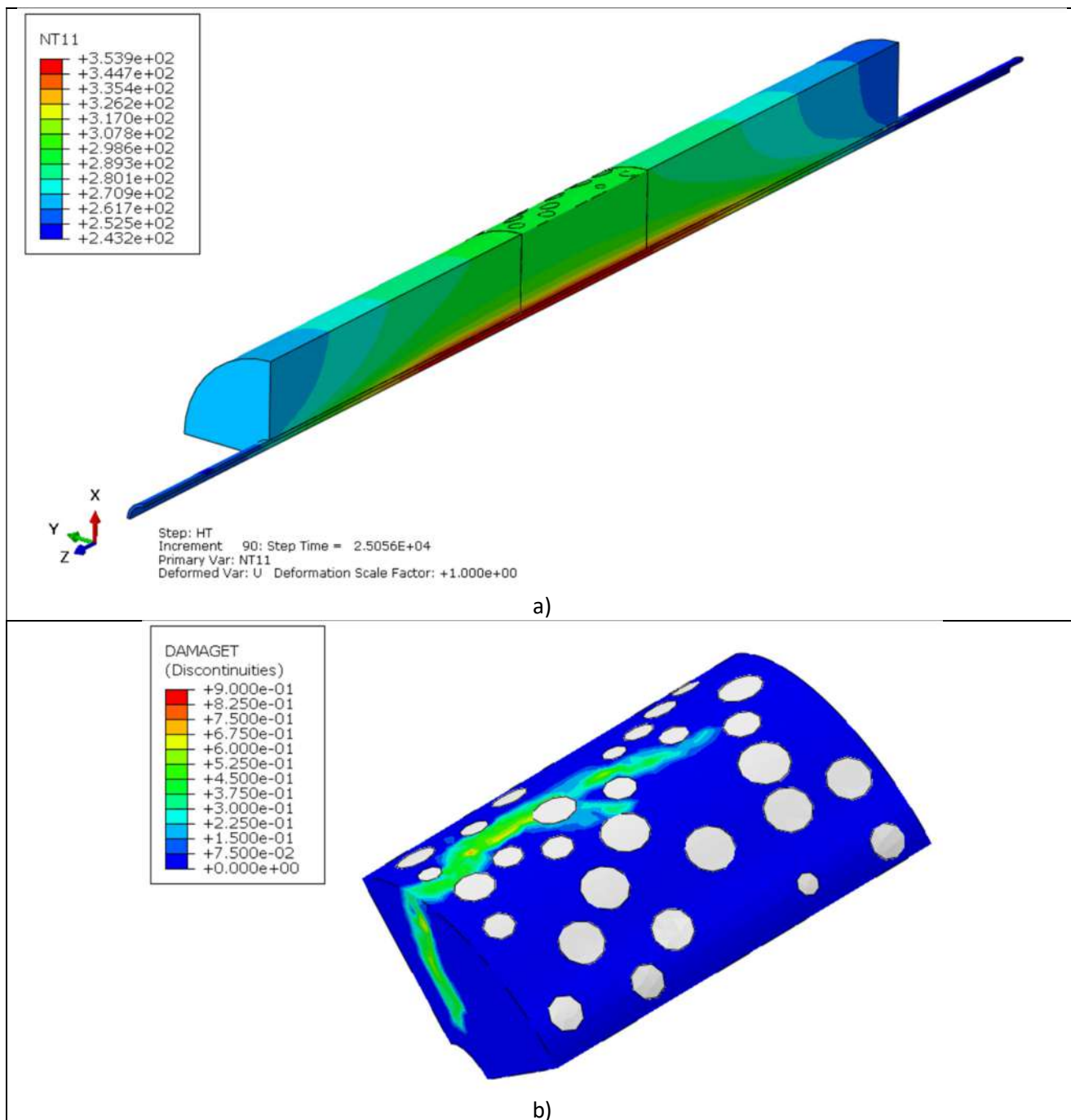


Figura 29 Mappa di temperatura con il picco a circa 350 °C a); mappa di danno b).

Superato questo valore si ha una rapida crescita delle fessure, che iniziano a formarsi anche circonferenzialmente fino al loro completo sviluppo al raggiungimento della temperatura massima di 400 °C:

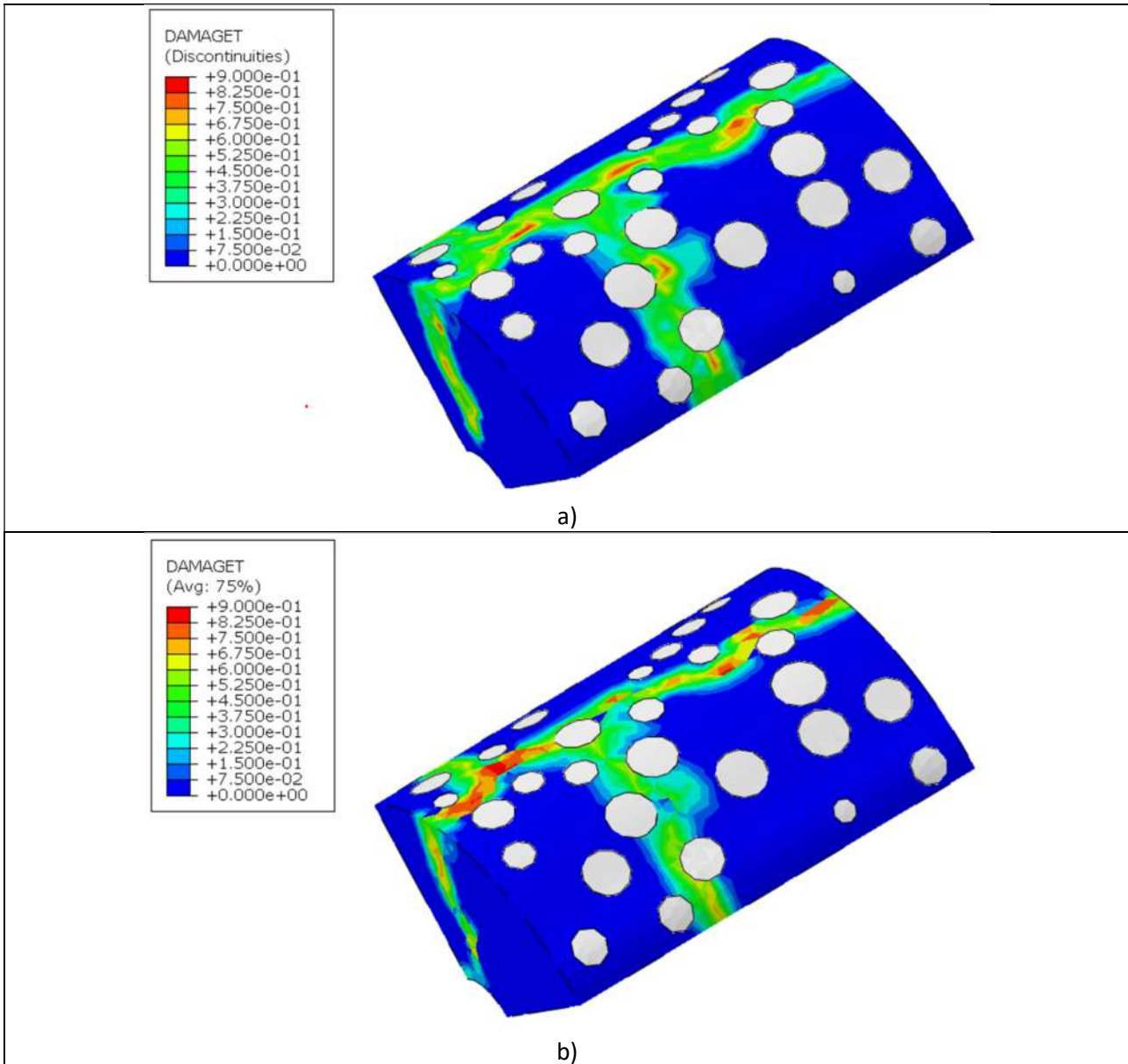


Figura 30 Sviluppo de

A fine analisi si può notare la completa decoesione del tubo in acciaio dal modulo in calcestruzzo (v. [Figura 31](#)).

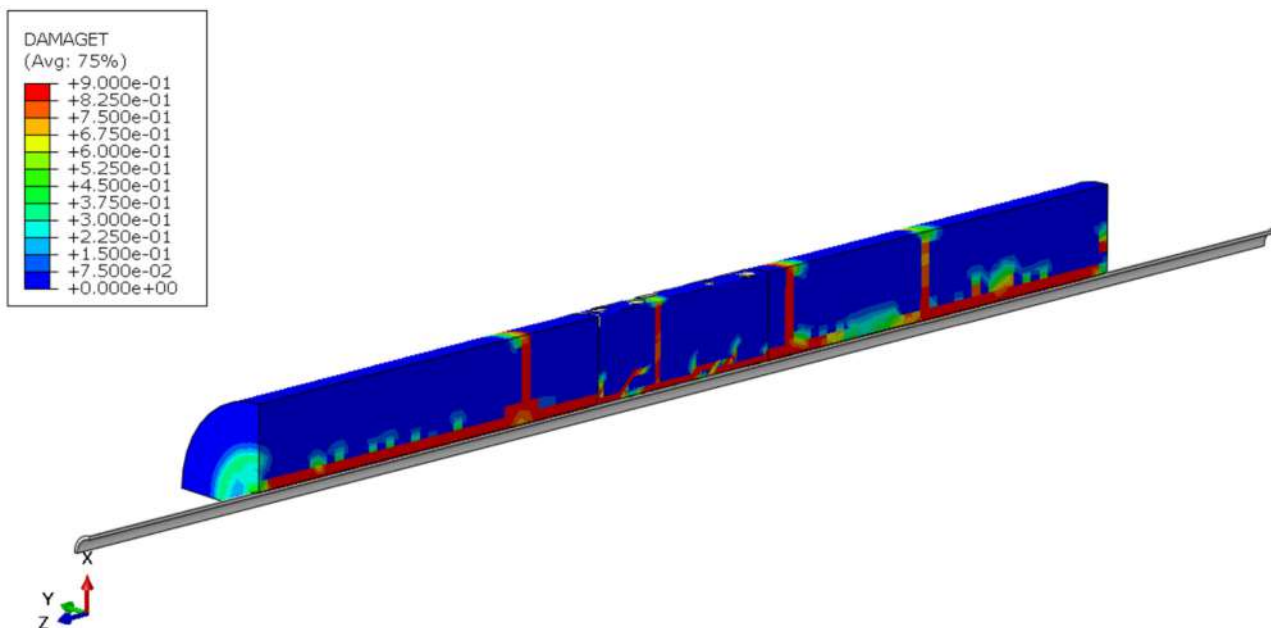


Figura 31 Modello con perfetta coesione a fine analisi (scarico termico).

Le fessurazioni sono sia circonferenziali che longitudinali come è possibile vedere nella parte in meso-scala del modello. Esse percorrono tutto lo spessore del provino fino a comparire nella superficie esterna come visibile in [Figura 32](#).

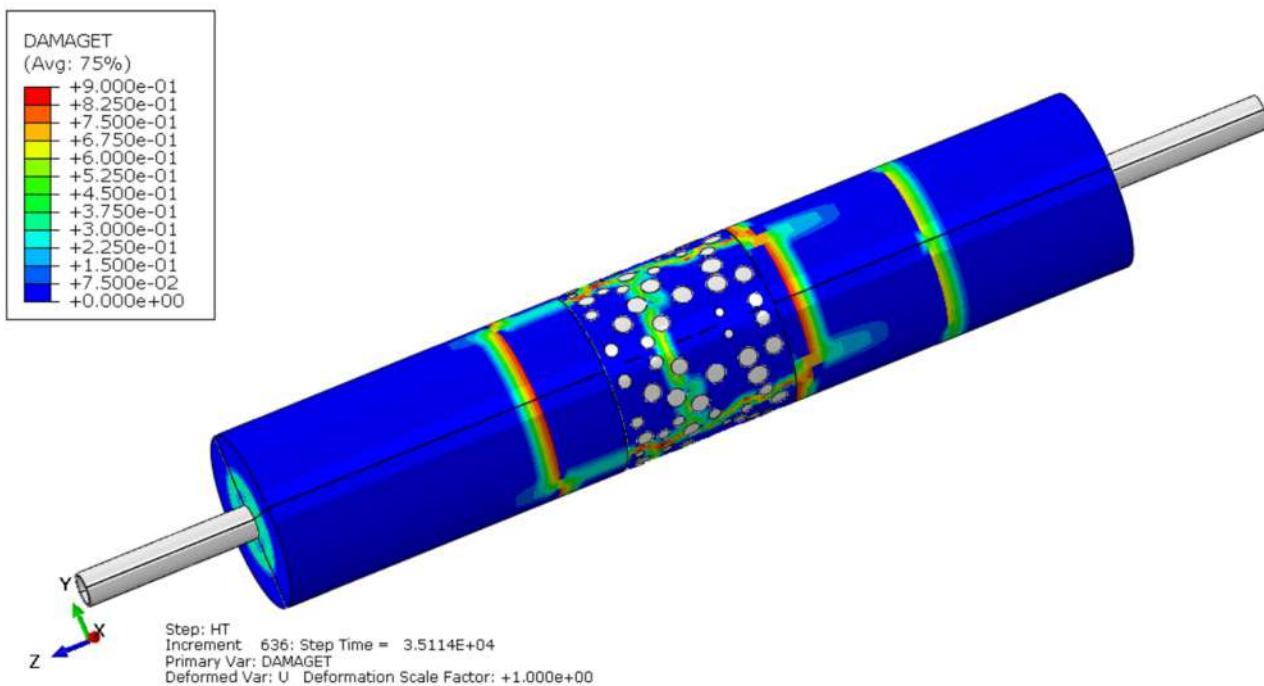


Figura 32 Fessurazioni longitudinali e circonferenziali.

In **Figura 33** è possibile vedere l'andamento del danno all'interno dell'elemento in meso-scala a diversi piani di taglio. Da questa figura è possibile vedere come il danno sia piuttosto diffuso e vada ad occupare l'intera sezione sia longitudinale che circonferenziale.

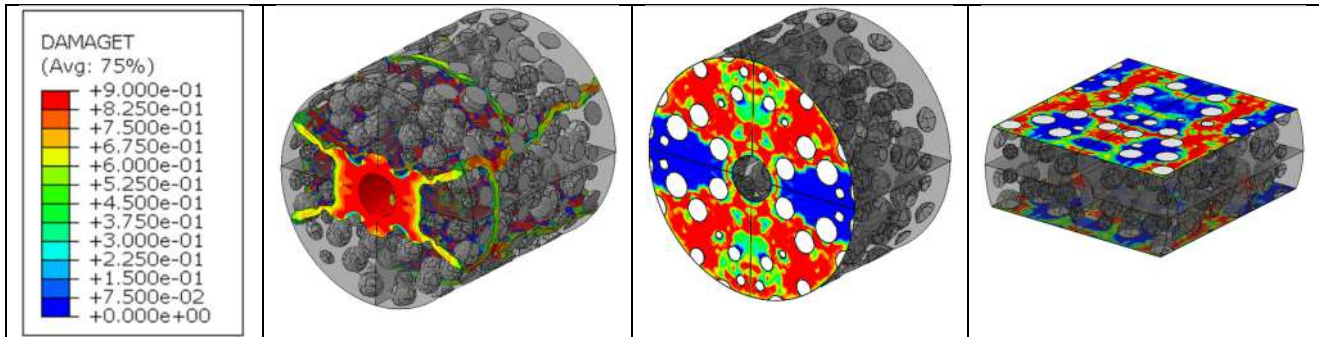


Figura 33 Andamento del danno all'interno del modello in meso-scala con diversi piani di taglio

4.7.2 Scenario 02: Completa decoesione

La completa coesione assunta nel primo scenario può essere una condizione di vincolo troppo selettiva per il modulo studiato, per questo motivo non essendoci studi specifici del contatto tra modulo in calcestruzzo e tubo scambiatore al variare della temperatura, si è preferito studiare un secondo scenario mantenendo tutto invariato a parte la condizione di contatto che risulta essere solo di tipo normale, per il modello meccanico, in modo da impedire eventuali compenetrazioni, ma lasciando invariata la conduzione di temperatura nell'interfaccia. In questa nuova configurazione il cilindro in calcestruzzo ed il tubo in acciaio possono scorrere assialmente in modo indipendente.

Analogamente allo "Scenario 01" la fessurazione parte superati i 350°C (v. **Figura 34 a**), in questo caso le fessure iniziano a formarsi a 359 °C (v. **Figura 34 b**) in modo molto più limitato del precedente modello.

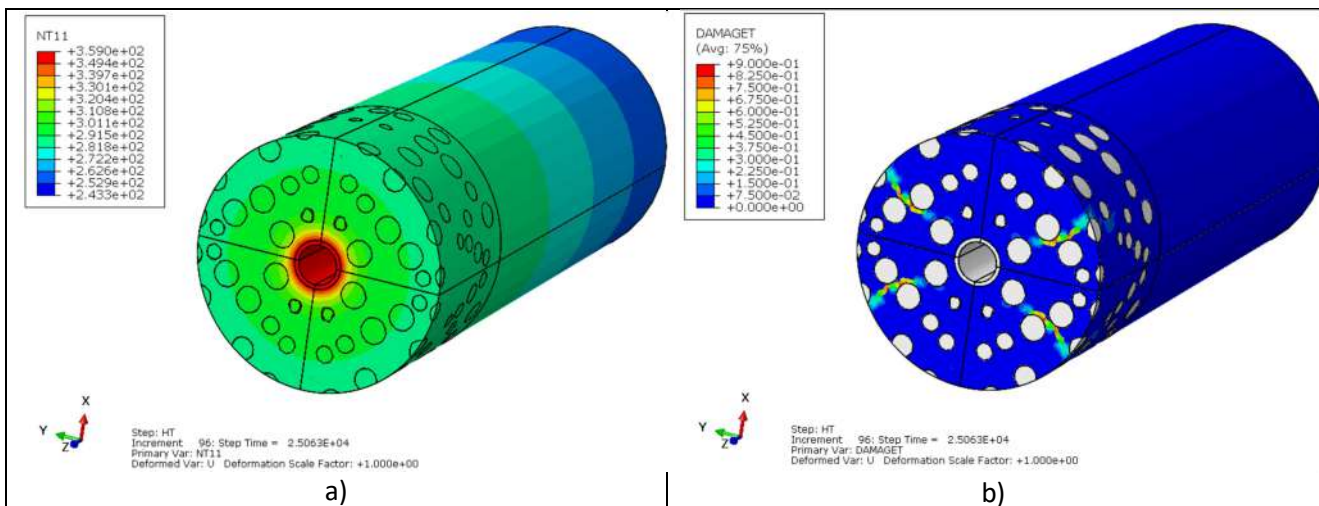


Figura 34 Mappa di temperatura a inizio fessurazione a); configurazione fessurata b).

Per tutta l'analisi l'evoluzione delle fessure risulta essere sempre molto contenuta (v. Figura 35) senza presentare una diffusione della mappa di danno come si verifica nel caso di completa coesione del tubo scambiatore.

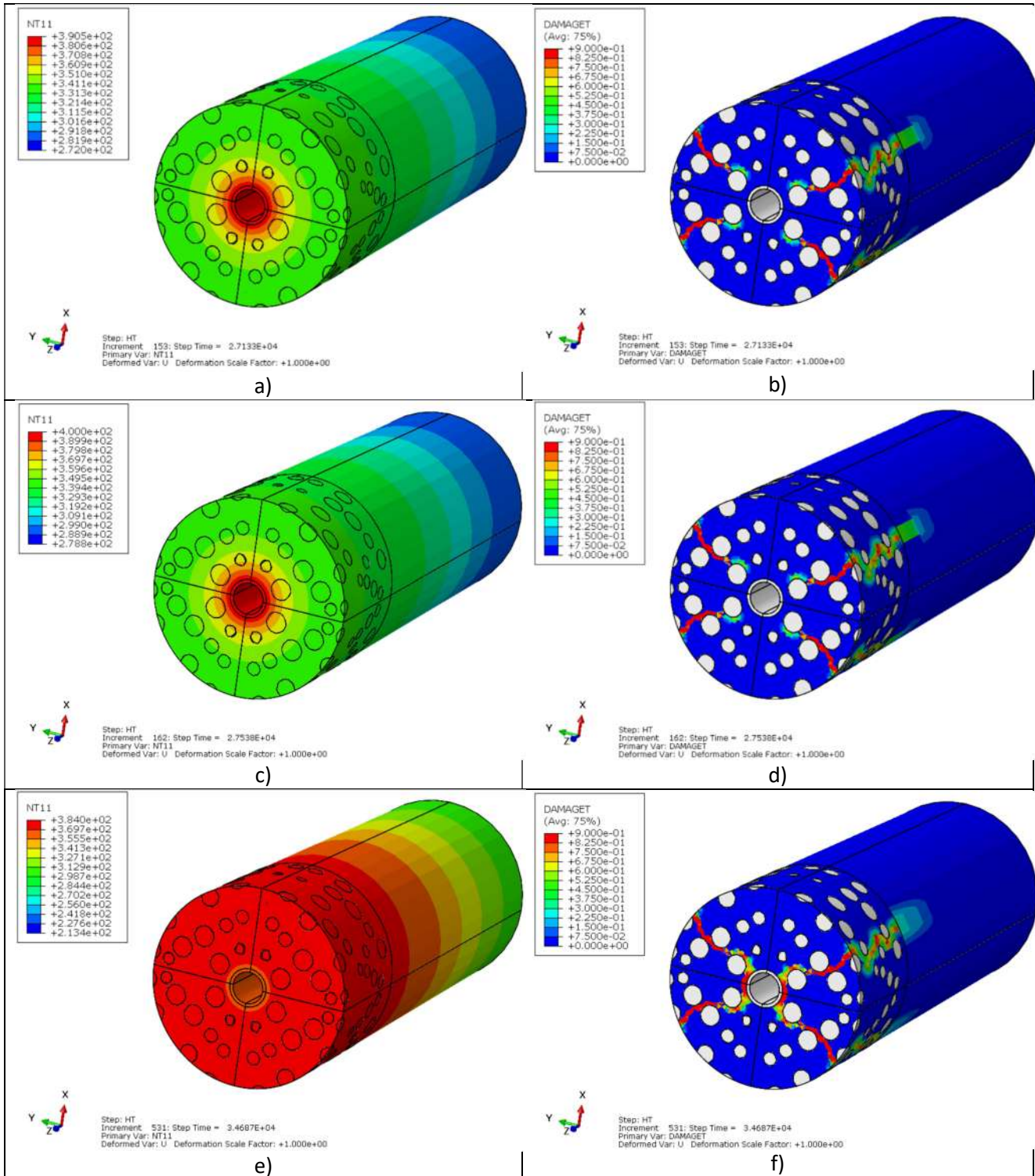


Figura 35 Evoluzione di temperatura e danno: a 390 °C a), b); a 400 °C c), d) e durante lo scarico termico a 380 °C e), f).

In queste analisi l'andamento del danno a fine analisi risulta essere molto più contenuto, rispetto allo "Scenario 01", presentando solo alcune fessure assiali come visibili in **Figura 36**.

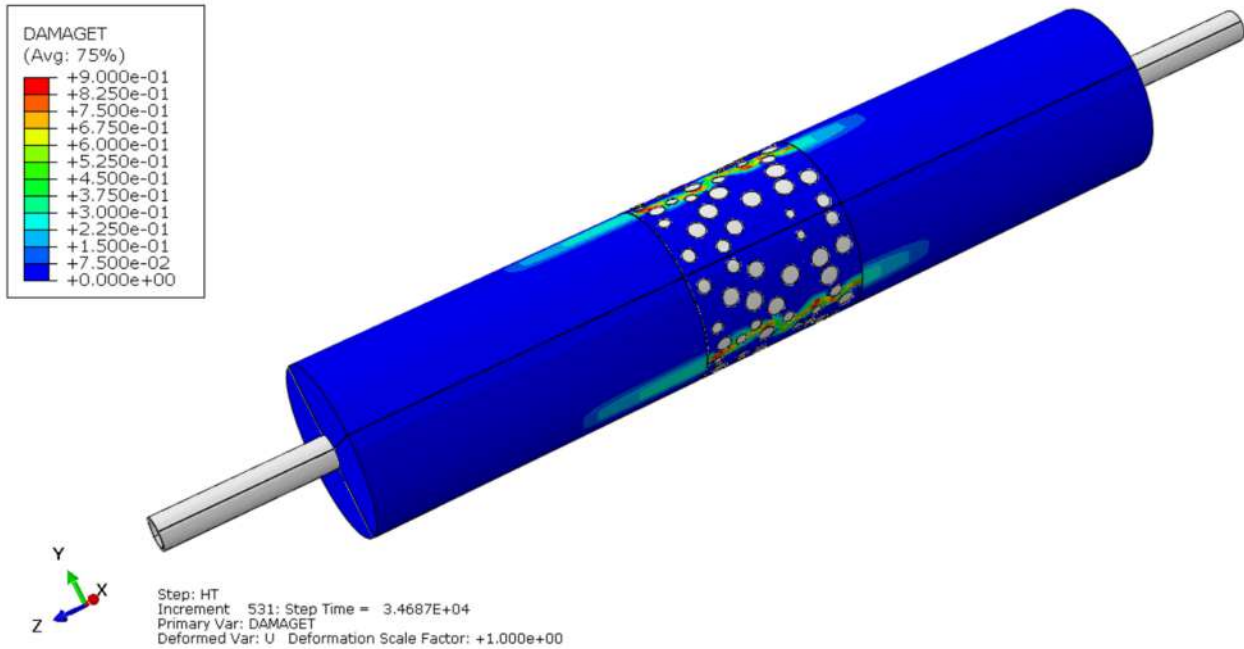


Figura 36 Fessurazioni longitudinali a fine ciclo.

Considerando una sezione trasversale del provino (v. **Figura 37**) si può notare come lo stato fessurativo sia più contenuto e compatibile con quanto riscontrato sperimentalmente, in quanto fessurazioni di questo tipo a modulo raffreddato potrebbero essere difficilmente osservabili.

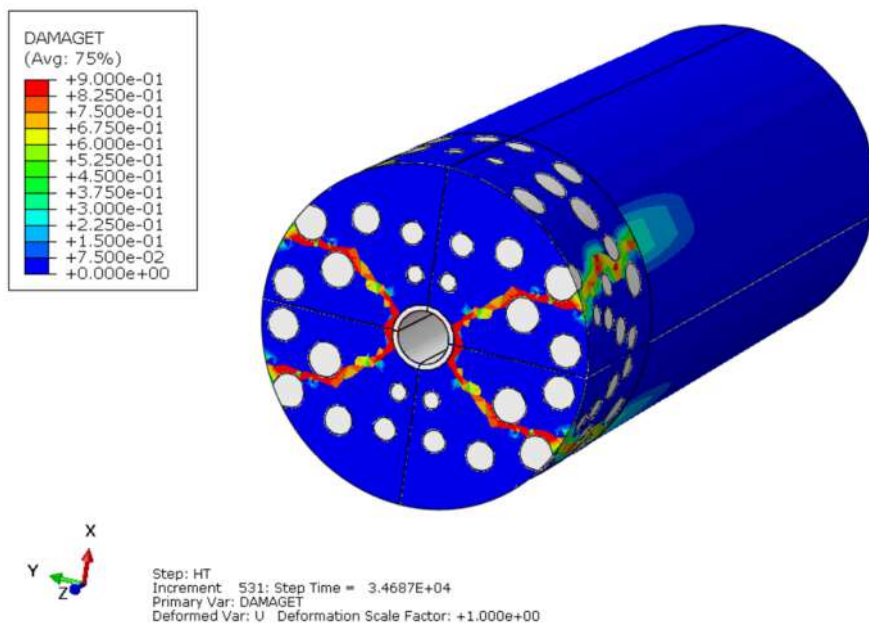


Figura 37 Configurazione dello stato fessurativo a fine ciclo.

5 Conclusioni

In questo lavoro sono stati sviluppati dei modelli numerici atti a simulare il comportamento di due miscele di calcestruzzo denominato “calcestruzzo di base” e “calcestruzzo con PCM” appositamente sviluppate per migliorare le prestazioni termiche dei moduli di accumulo a stato solido.

Sono stati studiati provini cilindrici riscaldati per effetto Joule con due soglie di temperatura massima pari a: 240 °C per il calcestruzzo di base e 400 °C per il calcestruzzo arricchito con materiale a cambiamento di fase.

I test sperimentali dopo una fase di degassaggio prevedevano una serie di cicli di carico scarico termico dei moduli fino a temperatura massima mantenendo la temperatura per un tempo controllato.

Le prime tipologie di analisi sono state di tipo transitorio termico, atte a calibrare il modello costitutivo da un punto di vista termico. Partendo dai dati sperimentali delle termocoppie applicate nel tubo scambiatore è stata realizzata una subroutine in grado di applicare una mappa termica a tutta la superficie interna del tubo creando le condizioni di input per i modelli. La calibrazione dei modelli è avvenuta andando a confrontare il risultato numerico per tutto il tempo dei test con opportuni punti di controllo misurati sperimentalmente.

Dai risultati riportati si può notare come i modelli sviluppati siano in grado di rappresentare correttamente il comportamento del modulo di accumulo soggetto ai cicli imposti durante la fase sperimentale.

Calibrato il modello del modulo da un punto di vista termico, si è andato ad indagare il comportamento accoppiato termo-meccanico per capire se le miscele candidate per l'impiego nei moduli di accumulo possono avere problematiche di “fatica termica”, un deterioramento del materiale, causato da fessurazioni innescate durante i cicli termici, che possono ridurre la vita utile dell'elemento di accumulo.

Per studiare questo aspetto nel dettaglio si è passati alla meso-scala; in questo modo è stato possibile studiare le problematiche di interazione tra aggregati grossolani e matrice cementizia che, a causa della distribuzione casuale degli inerti immersi nella matrice e della diversa rigidità, durante il processo di riscaldamento innescano concentrazioni tensionali localizzate che possono comportare l'innescarsi di una fessurazione/danneggiamento del modulo.

Il modello termo-meccanico è stato inoltre in grado di dare informazioni relative all'interazione tra tubo scambiatore e cilindro in calcestruzzo. Dalle analisi effettuate si può vedere come, in presenza di una perfetta coesione tra calcestruzzo ed acciaio, durante i cicli termici generi una fessurazione diffusa del modulo sia longitudinalmente che assialmente (superati i 350 °C), nonché a fine di un ciclo termico, si verifica una pressoché completa delaminazione del tubo. Il livello di danno ottenuto numericamente con questa configurazione non rispecchia il comportamento reale del modulo, questo ha fatto pensare che durante i primi cicli termici i provini reali abbia delaminato o completamente o parzialmente riducendo o annullando la coazione che l'acciaio provoca nell'elemento in calcestruzzo a causa della diversa espansione termica dei due materiali.

Si è quindi studiato il caso di tubo completamente delaminato meccanicamente, mantenendo intatta la condizione termica tra i materiali, raggiungendo uno stato fessurativo del modulo di accumulo congruente con quanto osservato sperimentalmente.

6 Riferimenti bibliografici

1. A. Miliozzi, D. Mele, E. Veca, R. Liberatore, G. Napoli, G. Giorgi, “Caratterizzazione termica di piccoli elementi di accumulo con calcestruzzi e PCM stabilizzati in forma”, Report RdS/PTR2019.
2. A. Miliozzi, D. Nicolini, “Analisi numerica del comportamento termico di piccoli elementi di accumulo con calcestruzzi e PCM stabilizzati in forma”, Report RdS/PTR2019-2021/WP2/D1.4
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. Mazzucco, G., Pomaro, B., Salomoni, V., and Maiorana, C., Numerical Modelling of Ellipsoidal Inclusions, *Construct. Build. Mater.*, vol. 167, pp. 317-324, 2018a.
5. Lee, J., & Fenves, G. (1998). Plastic-damage model for cyclic loading concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No. 8, 892-900.
6. Mazzucco, G., Xotta, Pomaro B., Salomoni V.A., Faleschini F. (2018) “Elastoplastic-damaged meso-scale modelling of concrete with recycled aggregates”, *COMPOSITES PART B: Engineering*.(doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.018).
7. Mazzucco, G., Pomaro, B., Xotta, G., Salomoni, V.A. and Majorana, C.E., (2020) “Tomography Reconstruction of Concrete Materials for Mesoscale Modelling”, *Engineering Computations*.
8. Dassault Systèmes. (2014). ABAQUS 6.14 analysis user’s manual.
9. EN 1992-1-2. Eurocode 2: Design of Concrete Structures: General Rules and Rules for Buildings and Structural Fire Design.
10. Jankowiak, T., & Lodygowski, T. (2005). Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. *Foundations of civil and environmental engineering*, 6(1), 53-69.
11. UNI EN 1993-1-2. Eurocode 3: Design of steel structures: General rules - Structural fire design.

7 Abbreviazioni ed acronimi

PCM	Phase Change Material
SS-PCM	Phase Change Material realizzato con Sale Solare
FEM	Finite Element Method
CLSB	CaLceStruzzo Base
CLSP	CaLceStruzzo con PCM

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Carmelo Majorana è Professore Ordinario di Scienza delle Costruzioni presso la Scuola di Ingegneria dell'Università degli Studi di Padova e Membro dell'Accademia Galileiana delle Scienze di Padova. E' coordinatore del nuovo Corso di Dottorato di Ricerca di Ingegneria Civile, Ambientale e dell'Architettura. E' stato il primo Direttore del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università degli Studi di Padova dove è attualmente Direttore del Laboratorio di Prove sui Materiali da Costruzione. E' stato Senatore dell'Ateneo. E' stato anche uno dei cinque membri della Commissione Nazionale per l'Abilitazione a Professore di I e II Fascia dell'Area 08/B2 Scienza delle Costruzioni, Direttore del Dipartimento di Costruzioni e Trasporti presso la medesima Università, nonché Direttore della SSIS (Scuola Interateneo di Specializzazione per la Formazione degli Insegnanti della Secondaria) del Veneto e Presidente del Centro Interateneo per la ricerca didattica e la formazione avanzata con sede presso l'Università di Ca' Foscari a Venezia. L'attività di ricerca è ampia e diversificata e si è concretizzata nella realizzazione di una produzione scientifica consistente in oltre 383 memorie così suddivise: 75 su riviste internazionali, 14 capitoli di libri, 20 su riviste nazionali, 238 su atti di congressi internazionali (di cui 80 su invito/keynote o speciali) e 36 su atti di convegni nazionali. I temi trattati dal ricercatore riguardano essenzialmente la meccanica computazionale dei materiali e delle strutture. E' stato ed è ricercatore in vari progetti internazionali.

Valentina Salomoni è Professore Ordinario di Scienza delle Costruzioni presso il Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali - DTG, Università degli Studi di Padova, autrice di 173 pubblicazioni di cui 52 in riviste internazionali. Il principale tema di Ricerca riguarda la modellazione costitutiva di geomateriali, in non-linearità per materiale e geometria in condizioni stazionarie, transitorie e dinamiche nonché in regimi non-isotermi. Ha acquisito il titolo di Dottore di Ricerca in Meccanica delle Strutture nel 1999 e Marie Curie Fellow nel 2003. E' Revisore per numerose riviste internazionali, membro del Collegio Docenti del corso di Dottorato in Scienze dell'Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dal 2010 e Responsabile di Unità del Progetto PRIN 2017 "Modelling of constitutive laws for traditional and innovative building materials". Attualmente titolare dei corsi di Meccanica dei Solidi, Laurea triennale in Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto (dal 2018), Dinamica delle Strutture, Laurea Magistrale in Ingegneria Civile (dal 2009), Scienza delle Costruzioni e Laboratorio, Laurea a ciclo unico in Ingegneria Edile-Architettura (co-titolare, dal 2019) e Scienza delle Costruzioni, Laurea triennale in Ingegneria Civile (co-titolare, dal 2021).

Mazzucco Gianluca è Professore Associato di Scienza delle Costruzioni presso la Scuola di Ingegneria dell'Università degli Studi di Padova, autore di 77 pubblicazioni di cui 22 su rivista internazionale. Le principali tematiche di Ricerca riguardano: la modellazione costitutiva di materiali da costruzione in campo non-lineare nonché lo sviluppo di leggi coesive per la definizione delle interazioni tra corpi. Revisore per numerose riviste internazionali, membro del Collegio Docenti del corso di Dottorato in Scienze dell'Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dal 2018. Attualmente titolare dei corsi di Meccanica Computazionale (laurea magistrale in Ingegneria Civile) e del corso di Advanced Solid Mechanics (laurea magistrale in Mathematical Engineering).