



Ricerca di Sistema elettrico

Progettazione termomeccanica,
realizzazione e caratterizzazione di un
modulo di accumulo in materiale
cementizio. Simulazioni ed analisi dei dati
sperimentali.

G. Mazzucco, G. Xotta, C.E. Majorana

PROGETTAZIONE TERMOMECCANICA, REALIZZAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI UN MODULO DI ACCUMULO IN MATERIALE CEMENTIZIO. SIMULAZIONI ED ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI.

G. Mazzucco, G. Mazzucco, G. Xotta, C.E. Majorana

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: ENERGIA ELETTRICA DA FONTE SOLARE

Obiettivo: Studio di configurazioni impiantistiche alternative

Responsabile del Progetto: Domenico Mazzei, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione:

“Realizzazione e caratterizzazione di un modulo di accumulo realizzato su mescola sviluppata da ITALCEMENTI” e

“Progettazione termomeccanica del modulo di accumulo. Simulazioni ed analisi dei dati sperimentali.”

Responsabile scientifico ENEA: Mauro GIANNUZZI.

Responsabile scientifico UNIPD – Dip. ICEA: Valentina SALOMONI

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE DEI PROVINI.....	6
2.1 CONDIZIONI DI CARICO.....	6
2.2 MATERIALE.....	7
2.2.1 Calcestruzzo.....	7
2.2.2 Acciaio tubazione.....	7
2.2.3 Acciaio armature.....	8
2.3 ANALISI DEI CARICHI E SOLLECITAZIONI.....	8
2.4 PROGETTO E VERIFICHE.....	8
2.4.1 Geometria.....	8
2.4.2 Verifica a flessione.....	9
2.4.3 Verifica a fessurazione (SLE).....	9
2.4.4 Freccia massima.....	10
2.4.5 Verifica a taglio.....	11
2.5 SCHEMA DI DISPOSIZIONE DELLE ARMATURE.....	12
3 CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI IMPIEGATI.....	13
3.1 CALCESTRUZZO UNIPD-ITALCEMENTI.....	13
3.2 CALCESTRUZZO UNITN-CESTARO [1].....	14
4 PRODUZIONE DELL'ELEMENTO DI ACCUMULO CON MISCELA UNIPD-ITALCEMENTI.....	16
5 SETUP DI PROVA.....	17
5.1 DEGASSAGGIO DEL CALCESTRUZZO.....	18
5.2 VALUTAZIONE DELLA TEMPERATURA.....	19
6 MODELLO MATEMATICO.....	19
6.1 CONDIZIONI DI PARETE.....	20
6.1.1 Coefficiente di scambio tra fluido e tubo.....	20
6.1.2 Coefficiente di scambio con l'ambiente.....	20
7 MODELLO NUMERICO.....	20
7.1 CALCESTRUZZO.....	22
7.2 TUBO DI SCAMBIO.....	22
7.3 FLUIDO TERMOVETTORE.....	22
7.4 COEFFICIENTE DI SCAMBIO TRA FLUIDO E TUBO.....	22
7.5 COEFFICIENTE DI SCAMBIO CON L'AMBIENTE.....	23
7.6 ANALISI TEST (CONFRONTO CON MODELLO ENEA).....	23
8 ANALISI E RISULTATI.....	25
8.1 ASSEGNAZIONE DELLE FORZANTI TERMICHE.....	25
8.2 MODULO DI ACCUMULO UNIPD-ITALCEMENTI.....	25
8.3 MODULO UNITN-CESTARO.....	29
9 STUDIO TERMO-MECCANICO DI PCM INCAPSULATO ED INGLOBATO NEL MATERIALE CEMENTIZIO.....	33
9.1 RAPPRESENTAZIONE IN MESOSCALA.....	34
9.1.1 Distribuzione random degli aggregati e del PCM.....	34
9.1.2 Modello costitutivo dei PCM.....	35
9.2 MODELLO NUMERICO CELLA BASE.....	37
10 CONCLUSIONI.....	40
11 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	41

Sommario

In questo report è stata descritta l'attività di ricerca relativa allo sviluppo di sistemi di accumulo solido a calore sensibile, impiegando materiali cementizi da adottare come TES (Thermal Energy Storage) nelle centrali a concentrazione solare.

In particolare è stata eseguita la progettazione di elementi in calcestruzzo con diversi mix design, sviluppati presso l'Università di Trento e dalla società CTG-Italcementi Group, con lo scopo di effettuare una sperimentazione atta ad individuare la miscela che massimizzasse l'effetto di accumulo termico.

Sono stati inoltre sviluppati modelli ad elementi finiti tridimensionali in grado di simulare il funzionamento del TES durante i cicli transitori dell'impianto; capaci di riprodurre il processo di scambio termico tra il fluido termovettore e l'elemento di accumulo sia in fase di carica (assorbimento di calore da parte dell'elemento di accumulo grazie alla presenza del fluido termovettore caldo circolante al suo interno) che in fase di scarica (fluido freddo e cessione di calore da parte dell'elemento di accumulo), avendo come dati di input la velocità del fluido e la sua temperatura in ingresso.

Le analisi condotte sono state di tipo transitorie non lineari tenendo in considerazione, oltre all'effetto di conduzione del calore tra gli elementi solidi e liquidi, anche l'effetto di convezione termica generato dalla presenza di un fluido in movimento.

Il modello è stato inoltre verificato utilizzando la sperimentazione effettuata presso i laboratori ENEA, con un ottimo accordo con i risultati sperimentali.

Si è inoltre iniziato ad indagare numericamente il possibile impiego di materiali a cambiamento di fase all'interno della miscela di calcestruzzo per incrementare ulteriormente le performance termiche di questa tipologia di materiali.

1 Introduzione

Negli ultimi anni la presa d'atto che lo sfruttamento delle fonti non rinnovabili di energia (quali i combustibili fossili) potrà essere sostenuto ancora per un tempo limitato a causa dell'inesorabile esaurimento delle materie prime e che i cambiamenti climatici presenti nel pianeta sembrano essere fortemente dipendenti dall'inquinamento prodotto dall'uomo, ha reso necessario orientare la produzione dell'energia su fonti pulite e rinnovabili, ed uno dei principali settori di punta per la produzione di energia pulita è quello solare. Il costante aumento di interesse scientifico sull'utilizzo di energie rinnovabili, al fine di un progressivo aumento del loro utilizzo e di una conseguente sostituzione di quelle di derivazione fossile, ha consentito una sempre maggior ottimizzazione dei processi produttivi di energia riducendone i costi di produzione. L'ENEA da anni si occupa della ricerca del solare a concentrazione (CSP) sviluppando, nell'ambito della tecnologia dei collettori parabolici lineari, una originale linea ad alta temperatura che prevede l'utilizzo di una miscela di sali fusi sia come fluido termovettore che come mezzo di accumulo termico. Gli impianti CSP utilizzano come unica o prevalente fonte di energia la radiazione solare e quindi sono soggetti alla sua naturale variabilità. Per sopperire a questo problema è necessario o utilizzare una fonte esterna di energia, con riduzione della frazione solare, oppure inserire un sistema di accumulo termico. L'accumulo termico consente quindi di migliorare il funzionamento dell'impianto, aumentare non solo la sua capacità operativa ma anche di dispacciamento con una migliore integrazione con la rete elettrica.

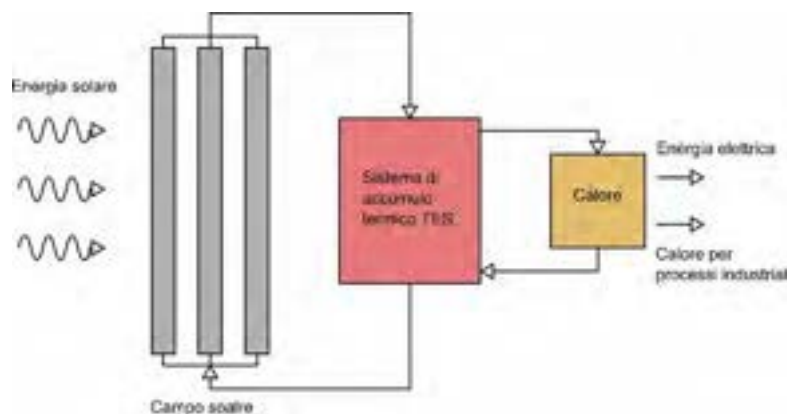


Fig. 1 Schema di un impianto solare a concentrazione

Questo sistema rappresenta quindi uno degli elementi base per ottenere una riduzione del costo di produzione dell'energia. Attualmente si utilizza un sistema di accumulo a calore sensibile tramite miscele di sali fusi stoccati in due serbatoi (caldo e freddo), a temperature che dipendono dai parametri operativi dell'impianto (campo solare e ciclo termico).

L'attività di ricerca si è orientata anche allo studio di soluzioni più compatte a calore sensibile e/o latente che utilizzano come mezzo di accumulo un materiale inerte (es. cementi o materiale ceramico) e/o un materiale a cambiamento di fase (PCM). Tale sistema dovrebbe ridurre i costi e gli ingombri dell'accumulo termico rendendolo particolarmente adatto negli impianti di piccola/media taglia.

L'obiettivo di questa attività di ricerca è stato quello di testare sia sperimentalmente che numericamente nuovi materiali compositi sviluppati dalla società Italcementi CTG Group e dall'Università di Trento con lo scopo di massimizzare l'accumulo termico nel TES. I materiali utilizzati nel mix design per l'incremento delle prestazioni termiche sono di tipo riciclato con l'ulteriore scopo di ridurre i costi di produzione per questa tipologia di elementi di accumulo.

I risultati dei test sperimentali sono stati successivamente ricostruiti attraverso una modellazione numerica tridimensionale, ottenendo una caratterizzazione dei materiali impiegati da un punto di vista matematico,

sviluppando così una procedura di calcolo atta ad ottenere uno strumento di previsione del comportamento degli elementi di accumulo termico durante i cicli transitori di utilizzo di un impianto elettrico.

A questo livello di analisi gli elementi di accumulo non presentano fini strutturali; questo ha permesso nella prima fase di studi di trascurare la parte meccanica del problema, andando a concentrarsi sulla parte termica e tenendo così in considerazione non solo l'effetto di conduzione termica presente tra i diversi materiali a contatto che costituiscono il TES (fluido termovettore, tubo di contenimento e materiale di accumulo) ma anche l'effetto di convezione presente a causa del moto del fluido all'interno del tubo di contenimento.

2 Dimensionamento strutturale dei provini

L'elemento dimensionato è un dispositivo di accumulo termico sperimentale realizzato in calcestruzzo armato di lunghezza 3000mm e sezione trasversale quadrata di dimensioni 200×200mm (v. Fig. 2).

All'interno dell'elemento in calcestruzzo è stato annegato il tubo di scambio termico in acciaio, di diametro esterno $D_e = 16\text{mm}$ e diametro interno $D_i = 14\text{mm}$ (v. Fig. 2).

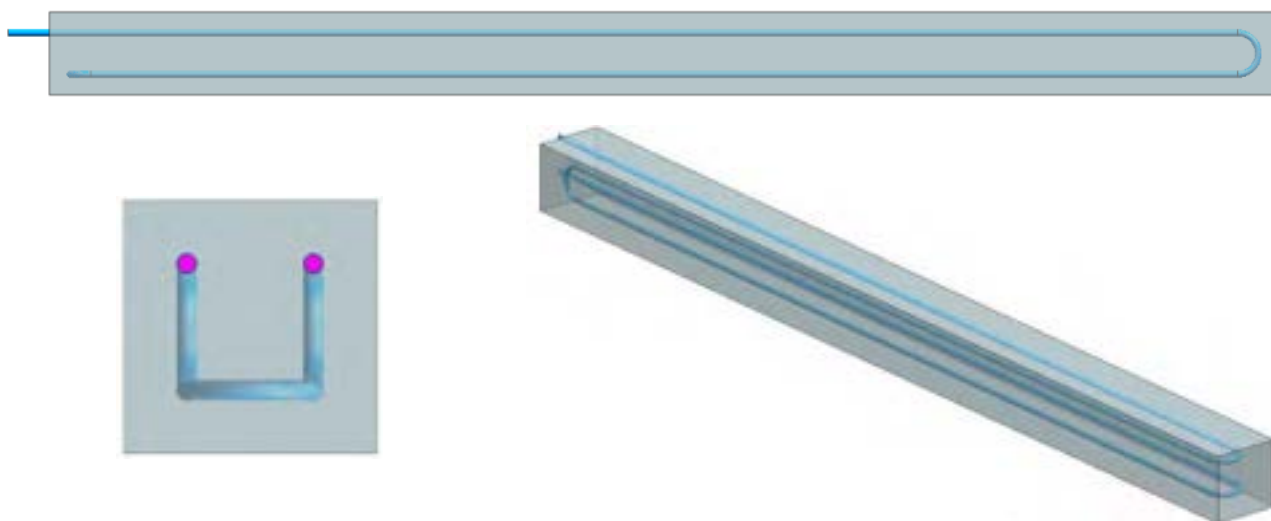


Fig. 2 Schema elemento di accumulo.

L'elemento non ha scopi strutturali ma è stato progettato per resistere alle operazioni di messa in opera.

2.1 Condizioni di carico

Il progetto dell'armatura è stato eseguito per una condizione termica "a freddo" (una generica condizione ambientale con $T < 100^\circ\text{C}$); non viene quindi considerata la condizione "a caldo" (temperature superiori ai 100°C), presente durante le fasi di utilizzo del provino nell'impianto test.

L'elemento dovrà quindi resistere al solo peso proprio durante le fasi di movimentazione. Si prevede inoltre che l'elemento dovrà essere spostato, utilizzando sempre almeno due punti di appoggio con una distanza massima pari alla lunghezza dell'elemento stesso come visibile in Fig. 3.

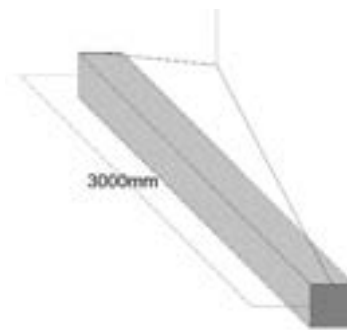


Fig. 3 Massima distanza degli elementi di appoggio.

In presenza di più elementi di accumulo la movimentazione dovrà essere effettuata spostando uno o più elementi alla volta, garantendo comunque che lo schema statico non risulti peggiorativo rispetto a quello di calcolo.

2.2 Materiale

Durante le fasi di progetto dei provini, non essendo ancora note le caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi impiegati, sono stati utilizzati valori medi di resistenza; rivelatesi poi congruenti con i valori dei materiali impiegati nelle sperimentazioni.

2.2.1 Calcestruzzo

$f_{cm} = 34.0 \pm 2.0$ MPa (*resistenza caratteristica media*)

$E_m = 38.0 \pm 3.0$ GPa (*modulo elastico*)

$\rho = 2483.0 \pm 22.0$ kg/m³ (*densità*)

$f_{ck} = f_{cm} - 8 = 32 - 8 = 24$ MPa (v. NTC2008 §11.2.10.1)

$f_{ctm} = 0.3f_{cm}^{2/3} = 2.5$ MPa (*resistenza media a trazione*)

$f_{cd} = \alpha_{cc}f_{ck}/\gamma_c = 13.6$ MPa (*resistenza di progetto NTC2008 §4.1.2.1.1.1*)

2.2.2 Acciaio tubazione

Le tubazioni di diametro esterno $D_e = 16$ mm e diametro interno $D_i = 14$ mm sono realizzate in acciaio inossidabile AISI316 con le seguenti caratteristiche meccaniche:

$f_{yk} = 280$ MPa *tensione di snervamento caratteristica*

$f_{tk} = 320$ MPa *tensione di rottura caratteristica*

$\gamma_s = 1.15$ *coefficiente di materiale*

$f_{yd} = 243.5$ MPa *tensione di snervamento di progetto*

$f_{td} = 278.3$ MPa *tensione di rottura di progetto*

$E = 200000$ MPa *modulo elastico*

$\rho_s = 7.90E+03$ kg/m³ *densità*

2.2.3 Acciaio armature

Sono previste armature in acciaio classe B450C ad aderenza migliorata:

Classe acciaio	f_{yk}	γ_s	f_{tk}	E_s	f_{yd}	ϵ_{yd}	ϵ_{uk}	$(f_y/f_{y,nom})_k$	ϵ_{ud}	$\sigma_{s,Rara}$
	[MPa]		[MPa]	[GPa]	[MPa]					[MPa]
B450C	450	1.15	540	210	391.3	0.00186	0.075	≤ 1.25	0.0675	360

2.3 Analisi dei carichi e Sollecitazioni

Si considera, come carico agente, il solo peso proprio dell'elemento applicando una densità totale (calcestruzzo e acciaio) di $\rho=25kN/m^3$. È stata assunta come luce di calcolo L per lo schema statico di trave in semplice appoggio un valore pari a $3.0m$.

Il carico permanente strutturale risulta:

$$G_1 = 25 \times (0.2^2) = 1.0kN/m$$

Lo schema statico risulta di trave in semplice appoggio considerando due combinazioni di carico, una agli SLU ed una agli SLE.

La combinazione di agli SLU tiene conto di un coefficiente di combinazione $\gamma_{G1} = 1.4$

$$F_{SLU} = \gamma_{G1} \times G_1 = 1.4kN/m$$

La combinazione di agli SLE tiene conto di un coefficiente di combinazione $\gamma_{G1} = 1.0$

$$F_{SLE} = \gamma_{G1} \times G_1 = 1.0kN/m.$$

Le sollecitazioni massime sono:

$$\text{Momento } M_{Ed,SLE} = 1.125kNm \quad \text{Taglio } V_{Ed,SLE} = 1.50kN$$

$$\text{Momento } M_{Ed,SLU} = 1.58kNm \quad \text{Taglio } V_{Ed,SLU} = 2.10kN$$

2.4 Progetto e Verifiche

2.4.1 Geometria

È stata considerata una sezione rettangolare $200 \times 200mm$ in cui il tubo di scambio, realizzato con acciaio AISI316, funge da armatura per la sezione in calcestruzzo (v. Fig. 4).



Fig. 4 Sezione trasversale dell'elemento strutturale.

2.4.2 Verifica a flessione

La verifica a flessione viene eseguita considerando il momento allo SLU e l'armatura data dai soli tubi ricevitori:

N°	x [cm]	y [cm]
1	0	0
2	20	0
3	20	20
4	0	20

N°	Ar [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	0.47	5	5
2	0.47	15	5
3	0.47	15	15
4	0.47	5	15

Sollecitazioni: S.L.U. Metodo n
P.to applicazione N: Centro
Materiali: AUG21G (C_{cu} 24.5, f_{yk} 450, E_s 200000), SulTeCa (E_{cu} 2, f_{ctm} 2.5, E_{cm} 38000)
Risultati: M_{Rd} 4.181 kNm, ρ 2.07%, α/d 0.1384, λ 0.7

Il momento resistente risulta pari a $M_{Rd} = 4.18 \text{ kNm} > M_{Ed,SLU}$.

Vengono comunque previste 4 barre longitudinali $\varnothing 6$ disposte negli spigoli della sezione con un copriferro di 3cm per il posizionamento dell'armatura a taglio (v. Fig. 4).

2.4.3 Verifica a fessurazione (SLE)

La fessurazione massima, considerando la combinazione agli SLE, risulta pari a $w = 0.08 \text{ mm} < w_{k,lim} = 0.2 \text{ mm}$. La sezione risulta quindi verificata.

Altezza della sezione	h	200	[mm]
Larghezza della sezione	b	200	[mm]
Altezza utile della sezione	d	170	[mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d'	30	[mm]
Ricoprimento dell'armatura	c	30	[mm]
<u>Armatura tesa ordinaria</u>			
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n _{f,1}	2	
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	ϕ _{f,1}	6	[mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A _{sf,1}	57	[mm ²]

Caratteristiche dei materiali

Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	f _{ck}	24	[MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f _{ctm}	2.5	[MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E _{cm}	38000	[MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f _{yk}	450	[MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E _s	200000	[MPa]

DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE

Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ _s	95	[MPa]
Asse neutro della sezione	x	40	[mm]

Tipo e durata dei carichi applicati

Coefficiente di omogeneizzazione	α_e	6.41	[-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	A_s	57	[mm ²]
Area efficace tesa di calcestruzzo	$A_{c,eff.1}$	15000	[mm ²]
	$A_{c,eff.2}$	10667	[mm ²]
	$A_{c,eff.3}$	20000	[mm ²]
	$A_{c,eff.min}$	10667	[mm ²]
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	$\rho_{p,eff}$	0.00530	
Resistenza efficace media del calcestruzzo	$f_{ct,eff}$	2.5	MPa
Fattore di durata del carico	k_t	0.4	
<u>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</u>	$[\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}]_{min}$	0.000285	
	$[\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}]_{calc.}$	-0.000499	
	$[\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}]$	0.000285	
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s	140	mm
Diametro equivalente delle barre	ϕ_{eq}	6.00	mm
Spaziatura massima di riferimento	$s_{max,rif}$	165	mm
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	k_1	0.800	
	k_2	0.500	
	k_3	3.400	
	k_4	0.425	
<u>Distanza massima tra le fessure</u>	$s_{r,max.1}$	294	mm
	$s_{r,max.2}$	208	mm
	$s_{r,max}$	294	mm
Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente	$w_{k,lim}$	0.20	mm
Ampiezza delle fessure (di calcolo)	w_k	0.08	mm

2.4.4 Freccia massima

La freccia massima risulta pari a $f_{max} = 0.2\text{mm}$ (v. Fig. 5), inferiore a $L/250 = 12\text{mm}$, come riportato in Fig. 5.

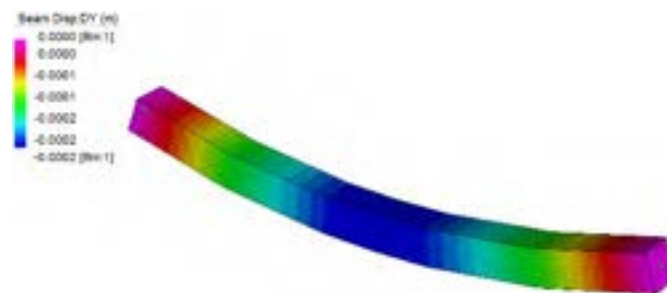


Fig. 5 Freccia massima.

2.4.5 Verifica a taglio

A favore di sicurezza per la verifica a taglio non si considera il tubo di scambio termico come armatura longitudinale della sezione.

VERIFICA A TAGLIO

Sollecitazione

$V_{Ed} =$	2.10	kN	<i>taglio sollecitante</i>
$N_{Ed} =$	0.00	kN	<i>sforzo normale (+ compressione; - trazione)</i>

Geometria

$d =$	170.00	mm	<i>altezza utile della sezione</i>
$b_w =$	200.00	mm	<i>larghezza minima della sezione</i>
$A_c =$	34000.00	mm ²	<i>area sezione in c.a.</i>

Materiali

$f_{ck} =$	24.00	MPa	<i>resistenza caratteristica del cls</i>
$\gamma_c =$	1.5		<i>coefficiente di sicurezza sul cls</i>
$f_{cd} =$	13.60	MPa	<i>resistenza di progetto del cls</i>
$f'_{cd} =$	6.80	MPa	<i>resistenza a compressione d'anima (DM2008 4.1.2.1.3.2)</i>
$f_{yk} =$	430	MPa	<i>resistenza caratteristica dell'acciaio</i>
$\gamma_s =$	1.15		<i>coefficiente di sicurezza sull'acciaio</i>
$f_{yd} =$	373.9	MPa	<i>resistenza di progetto dell'acciaio</i>

Armatura

$A_s =$	56.50	mm ²	<i>armatura longitudinale a trazione</i>
$A'_s =$	56.50	mm ²	<i>armatura longitudinale a compressione</i>
$A_{sl} =$	113.00	mm ²	<i>armatura longitudinale totale</i>
$A_{sw} =$	0.00	mm ²	<i>armatura a taglio</i>
$s =$	300.00	mm	<i>passo armatura a taglio</i>
$\alpha =$	45.00	deg	<i>inclinazione dell'armatura a taglio (inclinazione massima 45°)</i>

ELEMENTI SENZA ARMATURA TRASVERSALE RESISTENTE A TAGLIO

$k =$	2.00		<i>coefficiente (DM2008 4.1.2.1.3.1)</i>
$\rho_1 =$	3.32E-03		<i>rapporto geometrico di armatura longitudinale</i>
$\sigma_{cp} =$	0.00E+00	MPa	<i>tensione media di compressione</i>
$v_{min} =$	0.48		<i>coefficiente (DM2008 4.1.2.1.3.1)</i>

$V_{Rd} =$	16.49	kN	<i>taglio resistente senza armatura specifica</i>
$V_{Ed}/V_{Rd} =$	0.13		<i>check ok</i>

Si deve comunque inserire un'armatura trasversale minima (v. NTC2008 §4.1.6.1.1).

È stata considerata l'armatura minima in accordo con le norme tecniche italiane $A_{st} > A_{st,min}$, ma per l'elemento studiato, non avendo scopi strutturali, il passo minimo è stato incrementato rispetto al minimo richiesto di $0.8 d$, rimanendo comunque al di sopra delle 3 staffe a metro come richiesto dalla normativa nel punto 4.1.6.1.1.

3 Caratterizzazione dei materiali impiegati

Sono stati condotti test di accumulo termico su differenti mix design di calcestruzzo. Il primo mix è stato fornito da Italcementi ed è denominato UNIPD-Italcementi; mentre la seconda miscela di calcestruzzo è stata fornita dall'Università di Trento [1], denominata da qui in avanti UNITN-Cestaro. La realizzazione del tubo accumulatore per entrambi i provini è stata eseguita impiegando un acciaio di tipo AISI 316; in questa indagine sperimentale si è inoltre impiegato come fluido termovettore olio diatermico (OIL), in grado di raggiungere le temperature massime previste (300°C).

Le principali caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali impiegati sono state riassunte in Tab. 1, dove è possibile vedere come i materiali cementizi impiegati presentino migliori caratteristiche termiche rispetto a materiali cementizi tradizionali.

	UNIPD-Italcementi		UNITN-Cestaro		AISI316	Oil
	T > 100C	T ≤ 100C	T > 100C	T ≤ 100C		
ρ [kg/m ³]	1837	1955	2400	2450	8341	760
c_p [J/kgC]	930.0	954.0	820.0	830.0	378.0	280.5
k [W/mC]	1.80	2.50	2.21	2.68	20.00	0.10
E [MPa]	8000		41000		210000	-
f_{ck} [MPa]	8.0		36.0		280.0	-

Tab. 1 Caratteristiche fisiche dei materiali impiegati.

Essendo: ρ la densità del materiale, c_p il calore specifico e k la conducibilità termica. In Tab. 1 sono stati ancora riportati i valori di modulo elastico E dei materiali e la resistenza a compressione f_{ck} . Maggiori dettagli sui materiali impiegati saranno descritti nei paragrafi successivi.

È stato previsto, al fine di minimizzare lo scambio termico con l'ambiente e accumulare calore che i moduli in calcestruzzo fossero avvolti da strati isolanti (v. Fig. 7).

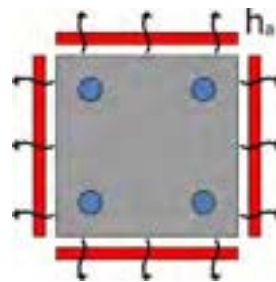


Fig. 7 Scambio termico con l'ambiente.

In questa fase di ricerca però si è investigata maggiormente la fase di degassaggio portando quindi a realizzare modelli numerici che non tenessero conto della coibentazione esterna dei provini.

3.1 Calcestruzzo UNIPD-Italcementi

Il calcestruzzo denominato UNIPD-Italcementi è una miscela sviluppata da CTG-Italcementi Group. Va precisato che tale miscela è di proprietà esclusiva di GTC-Italcementi Group, in quanto sviluppata in autonomia nell'ambito di proprie attività di ricerca. La miscela risulta, infatti, un adattamento di un prodotto finalizzato alla realizzazione di massetti per la realizzazione di sistemi di riscaldamento radiante a pavimento. Si presenta quindi come un conglomerato autolivellante in grado di aderire perfettamente ai

tubi di scambio affogati nella pavimentazione, con conducibilità termica maggiorata con l'aggiunta di adeguate quantità di grafite ed additivi.

Al momento CTG-Italcementi Group non ritiene divulgabili ulteriori dettagli sulla miscela essendo in corso una procedura brevettuale sulla stessa. Al fine comunque di garantire lo sviluppo di un adeguato modello numerico del modulo di accumulo, CTG-Italcementi Group ha fornito le caratteristiche meccaniche e termiche di base del calcestruzzo indurito riportate in Tab. 2:

Caratteristiche fisiche		
Resistenza a compressione 7 g	5.30	MPa
Resistenza a compressione 28 g	8.00	MPa
Slump	0.00	mm
Densità allo stato fresco	1965.00	kg/m ³
Densità allo stato indurito TQ	1970.00	kg/m ³
Densità allo stato indurito residua 100°C	1837.00	kg/m ³
Modulo elastico TQ	≈ 8000.00	MPa
Conducibilità termica TQ	2.50	W/mK
Conducibilità termica residua 100°C	1.80	W/mK
Calore specifico TQ	954.00	J/kgK
Calore specifico residuo 100°C	930.00	J/kgK

Tab. 2 Caratteristiche fisico-meccaniche del calcestruzzo UNIPD-Italcementi.

La ridotta resistenza rispetto ad un calcestruzzo ordinario al momento non costituisce un limite, non avendo il modulo di accumulo particolari esigenze se non nelle fasi di movimentazione che possono però essere condotte con adeguati margini di sicurezza. La conducibilità termica risulta già essere doppia rispetto ad un calcestruzzo ordinario sottoposto a trattamento termico; parimenti elevato risulta essere il calore specifico residuo. Le prestazioni rilevate nella sperimentazione suggeriranno le opportune variazioni da apportare alla miscela.

3.2 Calcestruzzo UNITN-Cestaro [1]

Il calcestruzzo denominato UNITN-Cestaro è stato fornito dall'Università di Trento in collaborazione con Cestaro s.r.l. [1], realizzato con materiali riciclati quali fibre di nylon e trucioli in acciaio. La granulometria impiegata è stata riportata in Tab. 3:

Quantitativi per m ³ (SSD)	[kg/m ³]
Sand (0-4 mm)	780
Coarse (4-8 mm)	380
Coarse (7-15 mm)	780
Cement (CEM 42.5 ALL R)	340
Water	120
Straws	77
Nylon fibers PA 66	5
w/c	0.35

Tab. 3 Composizione del provino UNITN-Cestaro.

Il cemento utilizzato è un portland tipo II.

Le fibre di nylon impiegate sono del tipo PA66 (v. Fig. 8), aggiunte all'impasto con un quantitativo dello 0.5% (circa 5kg/m³).

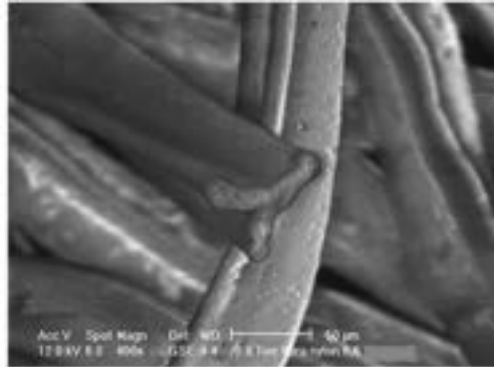


Fig. 8 Fibre di nylon PA66 [1].

Le fibre sono derivanti dal recupero di rivestimenti da interni, quali moquette, e presentano le caratteristiche meccaniche riportate in Tab. 4.

Lenght	8 ± 3 mm
Diameter	38-41 μm
Aspect Ratio	122-289
σ _u	286 ± 38 MPa
ε _u	19 ± 3 %
E	5.0 ± 0.4 GPa
T _m	268°C
Linear density	13-15 dtex

Tab. 4 Caratteristiche meccaniche delle fibre di nylon PA66.

Dalla Fig. 8 si può notare come le fibre risultino avere una forma allungata (elementi monodimensionali) ed una lunghezza media di 80mm. La sezione trasversale risulta trilobata, con un diametro equivalente medio di 38-41μm.



Fig. 9 Trucioli di acciaio impiegati nel mix design (UNITN-Cestaro) [1].

I trucioli di acciaio impiegati (v. Fig. 9) sono ottenuti da polveri residue di acciaio con un leggero quantitativo di manganese [1].

Dopo la stagionatura il calcestruzzo ottenuto presentava una resistenza a compressione cilindrica media $f_{cm}=36\text{ MPa}$, un modulo elastico $E=41000\text{ MPa}$ ed una densità $\rho=2449\text{ kg/m}^3$.

Il calcestruzzo presenta quindi una buona resistenza a compressione, compatibile anche per scopi strutturali.

4 Produzione dell'elemento di accumulo con miscela UNIPD-Italcementi

La realizzazione del modulo è stata effettuata presso lo stabilimento di Calusco d'Adda. Il cassero (Fig. 10) è stato prodotto tenendo conto le seguenti esigenze: facilità di estrazione del modulo, riusabilità, rispetto delle specifiche geometriche e salvaguardia del getto durante le operazioni di movimentazione e trasporto.



Fig. 10 Cassero in legno impiegato per la realizzazione del getto.

Le armature di rinforzo, rispetto a quanto previsto da valutazioni condotte per un calcestruzzo di caratteristiche meccaniche ordinarie, sono state realizzate con barre ad aderenza migliorata $\varnothing 8$ invece di $\varnothing 6$; il conglomerato in oggetto, infatti, ha resistenze, come verrà riportato in seguito, tipiche dei massetti per pavimentazione e non di un utilizzo prevalentemente strutturale. Ciò ha comportato alcune difficoltà nel posizionamento del tubo di scambio all'interno dell'armatura, che vanno tenute in conto in realizzazioni future (Fig. 11).



Fig. 11 Posizionamento del tubo di scambio all'interno della struttura di rinforzo.

Successivamente si sono inseriti gli elementi metallici nel cassero curandone il corretto posizionamento e procedendo all'istallazione delle termocoppie poste sulla sezione 2 mediana secondo quanto predisposto da ENEA.



Fig. 12 Fasi del posizionamento finale dei ferri di rinforzo, del tubo di scambio e delle termocoppie da affogare nel getto.

Il getto è stato quindi conservato in ambienti ad umidità controllata per assicurare un'adeguata stagionatura, alla fine della quale si è predisposto il tutto per il trasporto finale verso i laboratori dell'ENEA.

5 Setup di prova

Come descritto in [2] i test di accumulo termico sono stati condotti facendo scorrere all'interno di un tubo di scambio immerso nel calcestruzzo un fluido termovettore (in questo caso olio diatermico) a velocità e temperatura controllata. L'olio caldo, scorrendo all'interno del tubo, inizialmente cede calore al calcestruzzo che incrementa la sua temperatura immagazzinando calore. Successivamente il ciclo è stato invertito facendo raffreddare il sistema o per convezione naturale o facendo circolare olio freddo, riscaldato dal calcestruzzo caldo, durante la circolazione.



a)



b)

Fig. 13 Setup di prova prima della coibentazione del provino a); dopo la coibentazione b).

Sono stati eseguiti due tipologie di test [2]; il primo denominato degassaggio, oggetto delle simulazioni numeriche di questo report, ha avuto una temperatura di picco pari a 140°C ed una prova di riscaldamento e graduale raffreddamento con temperatura massima pari a 300°C.

5.1 Degassaggio del calcestruzzo

La procedura di degassaggio ha come scopo quello di togliere l'acqua libera presente all'interno del calcestruzzo per impedire o limitare il più possibile che quest'acqua vaporizzi quando il calcestruzzo supera la temperatura di ebollizione. La vaporizzazione dell'acqua all'interno della matrice cementizia comporterebbe un incremento della pressione interna del materiale che potrebbe portare al suo danneggiamento o nei casi più gravi a fenomeni di spalling esplosivi.

Questa procedura deve garantire all'acqua la possibilità di poter fuoriuscire dal materiale che quindi non può essere coibentato.

Il test consiste nel far salire molto lentamente la temperatura fino a 100°C (per un tempo di 7 ore). Successivamente la temperatura è stata mantenuta per le successive 10 ore. Per monitorare se il degassaggio fosse avvenuto correttamente è stato effettuato un incremento di temperatura fino a 160°C in 6 ore ed una fase di mantenimento di altre 4 ore. Alla fine dell'ultima fase di mantenimento è stato spento l'impianto e il suo raffreddamento è stato effettuato per convezione naturale (v. Fig. 14).

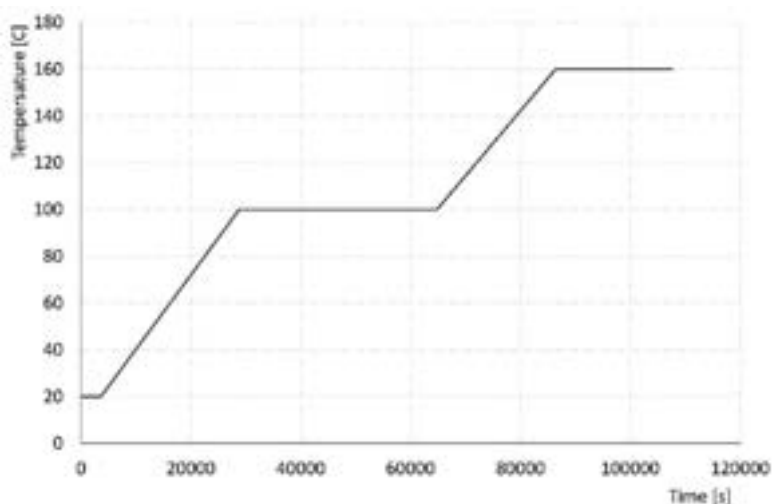


Fig. 14 Storia termica applicata.

Le temperature dichiarate sono quelle di impostazione dell'impianto (v. Fig. 14). La temperatura del fluido (impiegata come dato di input nei modelli numerici) risulta più bassa a causa delle perdite termiche dell'impianto. La temperatura massima nell'olio è risultata pari a circa 140°C (v. [2]).

5.2 Valutazione della temperatura

La temperatura nel provino è stata monitorata mediante l'utilizzo di termocoppie applicate sia sulle facce esterne che annegate internamente al getto di calcestruzzo (Fig. 15).

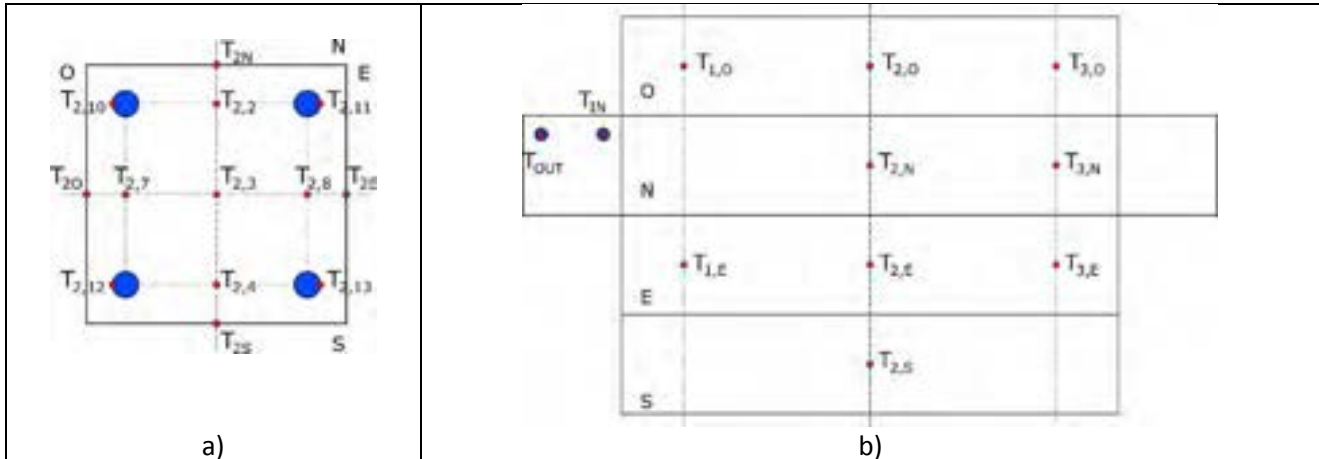


Fig. 15 Distribuzione delle termocoppie nella sezione trasversale di mezzeria dei provini a); termocoppie di pelle b).

Questa distribuzione di punti di misura ha permesso di avere notevoli informazioni sulla distribuzione tridimensionale della temperatura nel sistema di accumulo.

6 Modello Matematico

L'equazione di equilibrio nel continuo di volume V e superficie S , considerando l'effetto di un flusso di massa con velocità \mathbf{v} , è data dalla relazione (conduzione e convezione termica):

$$\int_V \partial T \left[\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} \right) - \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \left(\mathbf{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} \right) - q \right] \partial V + \int_S \partial T \left[\mathbf{n} \cdot \mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} - q_s \right] \partial S = 0 \quad (1)$$

essendo T la temperatura, t il tempo, \mathbf{x} il vettore posizione; c_p il calore specifico del materiale; \mathbf{k} la matrice di conducibilità del materiale (assunta isotropa $\mathbf{k}=k\mathbf{I}$, essendo k il coefficiente di conducibilità), \mathbf{n} è la normale alla superficie; mentre q e q_s sono i possibili flussi di calore nel volume e nella superficie presenti. La discretizzazione del problema e risoluzione del sistema è stata realizzata utilizzando un modello "semplificato" che impone nota la velocità del fluido, assunta costante su tutta la sezione del tubo scambiatore. Con questa semplificazione è stato possibile impiegare classiche analisi transitorie termiche senza sviluppare modelli più complessi di tipo fluidodinamici a vantaggio delle tempistiche di elaborazione e potendo sfruttare solutori di tipo implicito.

L'impiego del modello di convezione comporta due principali problematiche risolutive:

- la matrice risolutiva del problema risulta non simmetrica.
- la dipendenza tra velocità, incremento temporale e dimensione della mesh viene correlata con il numero di Courant C definito come:

$$C = |\mathbf{v}| \frac{\Delta t}{h} \quad (2)$$

essendo \mathbf{v} la velocità del fluido; Δt l'incremento temporale e h la lunghezza caratteristica dell'elemento. Durante l'analisi per non incorrere in problemi di stabilità dell'analisi C deve risultare < 1 .

In questo caso il problema può essere risolto andando a suddividere il problema in due sottodomini, la parte solida e la parte liquida (l'olio), assegnando ancora la legge di scambio termico tra queste due parti.

6.1 Condizioni di parete

Come visibile in eq (1) lo scambio termico tra gli elementi che costituiscono il provino avviene sia per conduzione che per convezione, nel caso di interazione fluido-struttura (v. Fig. 16-1). Si devono inoltre considerare le condizioni di bordo, che nel caso specifico sono rappresentate dalla superficie tra fluido e tubo scambiatore e le superfici del calcestruzzo direttamente a contatto con gli strati isolanti (v. Fig. 16-2).

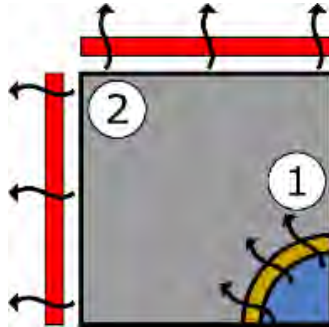


Fig. 16 Schema delle superfici di scambio: fluido-tubo 1); calcestruzzo-ambiente 2).

6.1.1 Coefficiente di scambio tra fluido e tubo

L'equazione di scambio termico fluido-struttura è del tipo:

$$q = h(T_B - T_A) \quad (3)$$

essendo h il coefficiente di scambio termico e T_i la temperatura in cui il pedice $i=A,B$ indica la temperatura del fluido e del solido.

Si devono inserire almeno due valori: ($k=k_0$, $g_f=0.0$); ($k=0.0$; $g_f=\text{max_val}$) cioè il valore di h quando $g_f = 0.0$ e il valore di g_f quando $k=0.0$.

6.1.2 Coefficiente di scambio con l'ambiente

Si considera che il provino abbia una perdita di calore con l'ambiente a causa dell'interazione con l'isolante termico (le facce del provino non sono quindi completamente adiabatiche). Per simulare questo effetto si utilizza un'INTERACTION di tipo "Film condition" in cui si devono inserire i parametri k e T_∞ , essendo:

$$q = k(T - T_\infty) \quad (4)$$

dove h è il coefficiente di scambio con l'ambiente e T_∞ la temperatura a tempo infinito.

7 Modello Numerico

I modelli numerici, realizzati con il codice commerciale ad elementi finiti ABAQUS, considerano una geometria tridimensionale per la rappresentazione del comportamento termico del calcestruzzo, del tubo in acciaio e del fluido termovettore (v. Fig. 17).

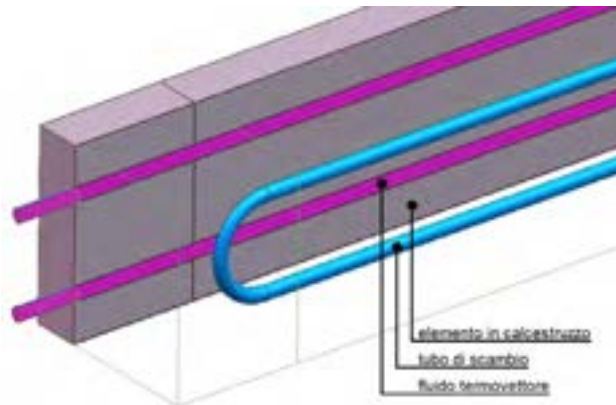


Fig. 17 Sezione modello 3D.

L'elemento in calcestruzzo è stato realizzato mediante elementi tetraedrici e prismatici (a base triangolare) con funzioni di forma lineari. Il calcestruzzo è forato internamente, per contenere il tubo di scambio in acciaio rappresentato nel modello mediante elementi brick ad 8 nodi, mentre il fluido è stato discretizzato impiegando elementi tetraedrici a quattro nodi. Le superfici di interazione calcestruzzo-acciaio e acciaio-fluido sono state rese congruenti mediante opportuni algoritmi di contatto di tipo "mortar" (surface to surface), consentendo così di rappresentare l'interazione termica dei singoli componenti del modulo di accumulo.

Le mesh sono state realizzate utilizzando 24100 nodi, 74340 elementi esaedrici per la rappresentazione del fluido termovettore; 30640 elementi esaedrici per la rappresentazione del tubo di scambio e 205303 elementi tetraedrici e prismatici per la rappresentazione del modulo di accumulo come visibile in Fig. 18.

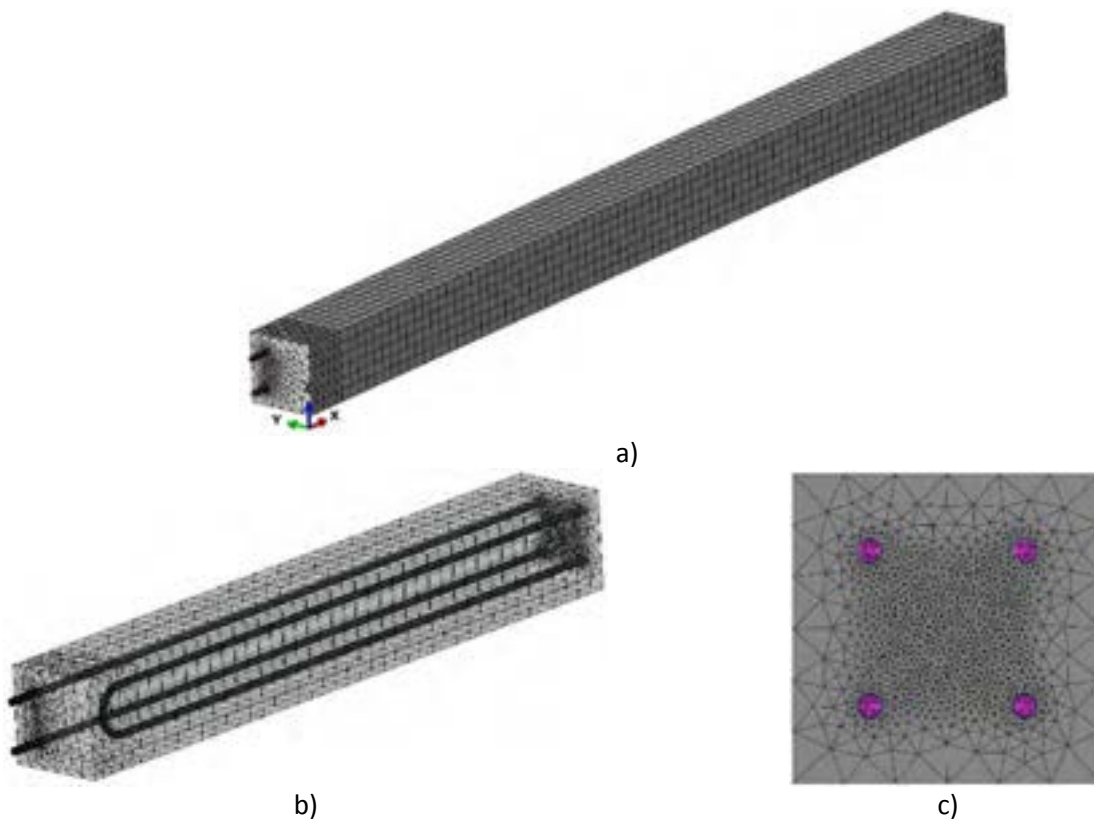


Fig. 18 Modulo di accumulo a); Visualizzazione del tubo di scambio all'interno del modulo di accumulo b); discretizzazione interna del modulo di accumulo c) (gli elementi in grigio caratterizzano il calcestruzzo, quelli azzurri il tubo di scambio e gli elementi viola il sale).

Come detto precedentemente, in questo studio si sono trascurati eventuali effetti meccanici dei provini andando ad indagare solo l'aspetto termico transitorio.

L'impiego di elementi in grado di simulare l'effetto di convezione termica dell'olio comporta la risoluzione di un problema transitorio non simmetrico e non lineare.

7.1 Calcestruzzo

Per il calcestruzzo si sono adottati parametri di conducibilità termica, densità e calore specifico in accordo con quanto ottenuto dalla caratterizzazione dei materiali fornita da Italcementi e dall'Università di Trento per i provini UNIPD-Italcementi ed UNITN-Cestaro rispettivamente.

7.2 Tubo di scambio

Il tubo in acciaio è stato rappresentato assumendo un comportamento termico costante (del range termico utilizzato in prova).

7.3 Fluido termovettore

Per simulare il fluido su un'analisi transitoria, senza considerare esplicitamente la fluidodinamica, sono stati utilizzati particolari elementi; ossia brick esaedrici di tipo DCC3D8. Questi sono particolari elementi con funzioni di forma lineari in grado di risolvere l'equazione di convezione e diffusione termica.

Per la rappresentazione del fluido in moto è stata aggiunta la condizione di flusso di massa realizzando una specifica subroutine (scritta in linguaggio FORTRAN77 ed implementata in Abaqus) in grado di associare alla geometria del tubo il flusso di massa voluto in accordo con la sperimentazione eseguita, assumendo una velocità costante del fluido all'interno del tubo e trascurando eventuali perdite.

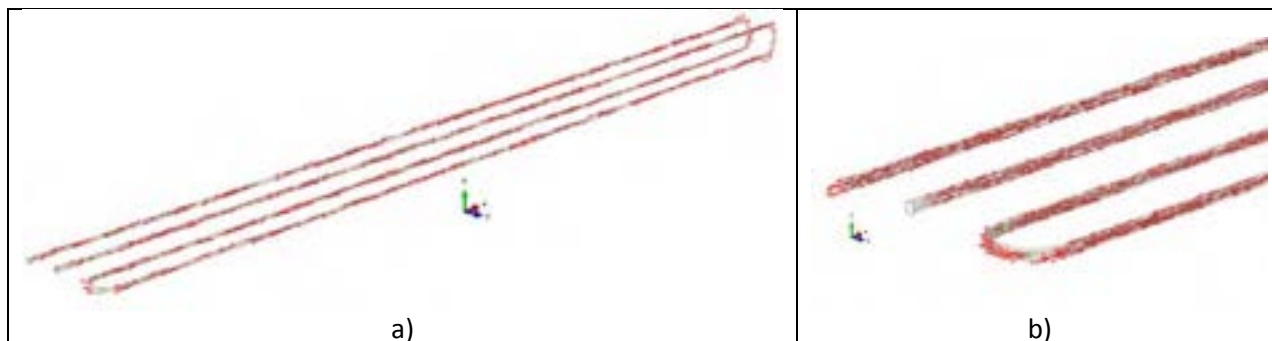


Fig. 19 Andamento del flusso di olio all'interno della condotta a); vista di un particolare b).

In Fig. 19 sono state riportate due viste dell'andamento del flusso di massa all'interno del modello dopo l'implementazione della subroutine.

7.4 Coefficiente di scambio tra fluido e tubo

Il coefficiente di scambio applicato al modello numerico per risolvere l'eq (3) è stato ottenuto per via sperimentale.

Il coefficiente h è stato assunto numericamente sfruttando algoritmi di contatto e risulta variabile in funzione della temperatura T e della distanza del fluido dalla parete (distanza individuata dalla gap function g_f che connette le superfici in contatto). Si ha quindi $h=h(T,g_f)$, assunta in questo lavoro, variabile linearmente con la distanza, tenendo in considerazione che il fluido durante la sperimentazione non si discosta mai dalla parete del tubo in acciaio.

Il coefficiente di scambio in funzione della temperatura è stato assunto in accordo con quanto valutato da ENEA (v. Tab. 5):

Temperatura ingresso fluido caldo	T1	°C	30	100	140
Temperatura uscita fluido caldo	T2	°C	30	100	130
Diametro interno	di	m	0.0140	0.0140	0.0140
Diametro esterno tubo	d0	m	0.016	0.016	0.016
Lunghezza tubi	L	m	12.00	12.00	12.00
Numero tubi	nt		1	1	1
Numero passaggi nei tubi	np		1	1	1
Portata all'interno dei tubi	F	kg/s	0.149	0.149	0.149
Sezione di passaggio del fluido	Si	m ²	0.000154	0.000154	0.000154
Flusso di materia all'interno dei tubi	Gi	kg/(s*m ²)	967.94	967.94	967.94
Velocità all'interno dei tubi	ui	m/s	1.10	1.10	1.10
Conducibilità termica	k	W/(m*K)	0.1084	0.1028	0.1000
Calore specifico	cp	J/kg*K	1879	2249	2434
Viscosità	μ	Pa*s	0.036994	0.002820	0.001484
Densità	ρ	kg/m ³	876.05	830.42	807.61
Numero di Reynolds	Re		366	4806	9129
Numero di Prandtl	Pr		641.21	61.68	36.13
	jh		1.40	14.66	32.88
Numero di Nusselt	Nu		12.06	57.83	108.57
Lunghezza di ingresso termico	Lth		128.24	161.85	180.07
	Nu		12.06	13.03	13.50
Coeff sc scambio interno	hi	W/(m ² *K)	93.37	424.62	775.49
	hi0	W/(m ² *K)	81.70	371.54	678.56
Sporcamento interno	Ri	m ² /W	0.00017	0.00017	0.00017
Coeff sc scambio interno con sporc	h'i0	W/(m ² *K)	80.56	349.22	607.64

Tab. 5 Valutazione del coefficiente di scambio fluido-struttura.

7.5 Coefficiente di scambio con l'ambiente

Le facce esterne del provino non risultano adiabatiche, ma permettono una perdita di calore con l'ambiente l'esterno. La condizione al contorno è stata assunta in accordo con l'eq (4), dove il valore T_{∞} è stato assegnato in base alle condizioni di prova pari a 30°C.

7.6 ANALISI TEST (Confronto con modello ENEA)

In questa prima analisi è stato eseguito un test tra due modelli numerici, il primo sviluppato da ENEA mentre il secondo sviluppato dall'Università di Padova. Le condizioni al contorno di questa prova non rispecchiano quelle avute durante la sperimentazione, ma i risultati ottenuti avevano come unico scopo il valutare la correttezza dei risultati numerici.

Le caratteristiche termiche dei materiali adottate nelle analisi sono state riportate in Tab. 6

Type	Oil	Steel	Concrete
Density [T/m ³]	7.600e ⁻¹⁰	8.341e ⁻⁹	2.500e ⁻⁹
Specific Heat [J/(TC)]	2.805e ⁵	3.780e ⁵	8.000e ⁵
Conductivity [J/(s mm C)]	1.040e ⁻⁴	2.000e ⁻²	1.370e ⁻³
Velocity [mm/s]	1.500e ³	-	-

Tab. 6 Caratteristiche termiche dei materiali impiegati nel modello test.

La simulazione ha considerato una condizione di equilibrio iniziale con il fluido termovettore a 200°C; condizione ottenuta tramite un’analisi Steady-state (SS) che ha permesso di determinare la temperatura di equilibrio nel calcestruzzo, assumendo un coefficiente di scambio con l’ambiente pari a $k = 6.0e^7W/(mm^2C)$. Il coefficiente di scambio tra fluido e tubo in acciaio si è assunto pari a $h = 0.0006W/(mm^2C)$. A differenza del modello sviluppato in questo report, il modello ENEA rappresenta il fluido termovettore mediante un elemento monodimensionale connesso al tubo in acciaio mediante particolari link che permettono il coefficiente di scambio fluido-struttura. La discretizzazione risulta più rada, comportando alcune instabilità numeriche (v. Fig. 20 a) non presenti nel modello tridimensionale (v. Fig. 20 b).

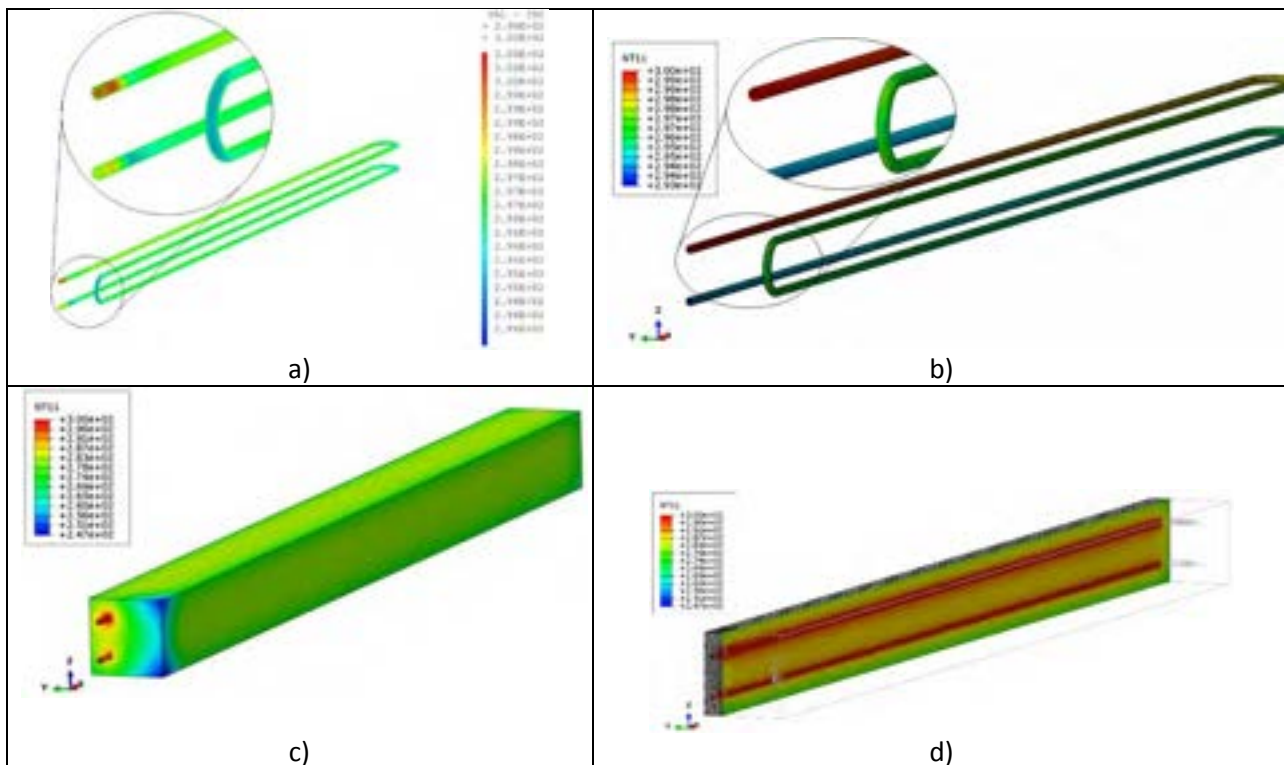


Fig. 20 Modello ENEA che considera il fluido attraverso una discretizzazione monodimensionale a); Modello tridimensionale del fluido b); mappa termica esterna del modello in ABAQUS a fine analisi c); mappa termica della sezione longitudinale del modello in ABAQUS d).

Come visibile nelle Fig. 20 c) e d) il modello realizzato in ABAQUS non presenta instabilità numeriche o salti di temperatura neppure nella matrice cementizia. Per questa ragione le indagini numeriche sono proseguite impiegando il modello tridimensionale sviluppato a Padova.

8 Analisi e Risultati

Il modello numerico realizzato è stato impiegato per rappresentare i cicli di degassaggio effettuati sperimentalmente nei due provini in calcestruzzo. Per poter confermare la capacità di questo strumento numerico di rappresentare il comportamento di un modulo di accumulo soggetto a fenomeni termici transitori e stazionari, i risultati numerici sono stati confrontati con quelli ottenuti durante la sperimentazione.

8.1 Assegnazione delle forzanti termiche

Durante la fase sperimentale la temperatura di ingresso dell'olio non è risultata essere esattamente quella nominale assegnata all'impianto (v. Fig. 14) a causa delle perdite termiche dell'impianto stesso. La forzante termica è stata quindi ottenuta basandosi sui valori ottenuti nel punto di controllo denominato T_{IN} (v. Fig. 15 b). La termocoppia T_{IN} rileva la temperatura del tubo di scambio all'ingresso del modulo di accumulo ma risulta direttamente a contatto con l'ambiente; per questa ragione la temperatura del fluido termovettore risulterà leggermente superiore. La perdita di temperatura è stata stimata di circa 5°C effettuando un'analisi stazionaria su una temperatura fissata al centro del fluido di 100°C; si è quindi scalata la forzante di 5°C rispetto al valore rilevato T_{IN} (v. Fig. 21 a).

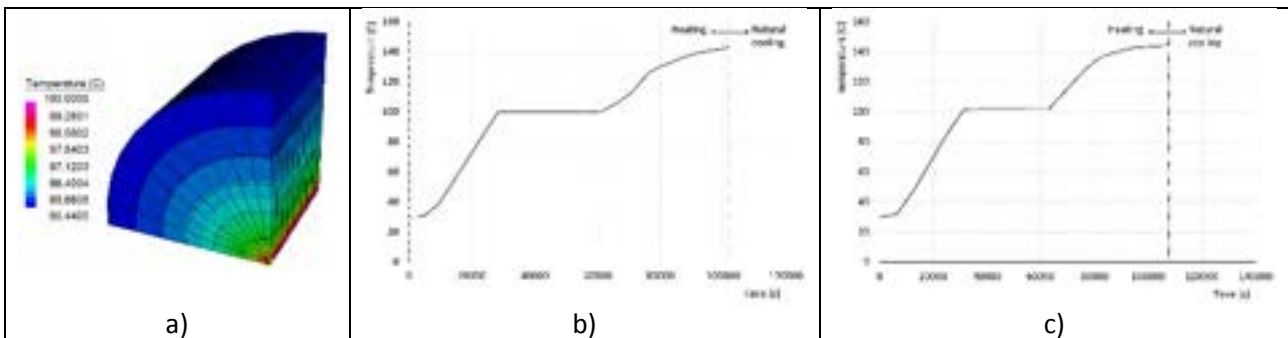


Fig. 21 Modello stazionario per il calcolo della perdita di temperatura a causa dello scambio termico con l'ambiente a); forzante termica per il modulo UNIPD-Italcementi b); forzante termica per il modulo di accumulo UNITN-Cestaro c).

È stato effettuato un primo riscaldamento del fluido in moto con una velocità di 1100 mm/s, partendo dalla temperatura ambiente di circa 30°C fino a circa 100°C in 8 ore (v. Fig. 21 b, c). Questo primo step di carico è stato poi mantenuto per altre 8 ore per effettuare il degassaggio del calcestruzzo. Successivamente il fluido termovettore è stato portato ad una temperatura massima pari a circa 140°C in circa 12 ore e l'impianto è stato poi bloccato portando a zero la velocità del fluido; si è così imposto un raffreddamento naturale come mostrato in Fig. 21 b, c) per i due moduli di accumulo.

8.2 Modulo di accumulo UNIPD-Italcementi

Nel campione (UNIPD-Italcementi) è stato riscontrato un elevato quadro fessurativo durante le fasi di riscaldamento, dovuto alla variazione di deformazione termica tra le barre in acciaio e il tubo accumulatore immersi nel getto e la bassissima resistenza a trazione di questa miscela di calcestruzzo. Si è inoltre osservato un notevole trasferimento di massa (fuoriuscita di acqua dal provino durante le fasi di degassaggio). Questi effetti hanno presumibilmente comportato una variazione sia della conducibilità termica del materiale che del coefficiente di scambio tra calcestruzzo e ambiente. Nelle simulazioni numeriche si è assegnato quindi una variazione del coefficiente di scambio del 25% durante il secondo step di carico (che portava l'olio dai 95 ai 140°C) passando da $9e^{-6}W/mm^2C$ ($9W/m^2K$) a $11.25e^{-6}W/mm^2C$ ($11.25W/m^2K$), nelle facce N, E, O (v. Fig. 15), mentre per la faccia Sud, essendo parzialmente coibentata, si è assunto un coefficiente di scambio termico pari a $6.0e^{-6}W/mm^2C$.

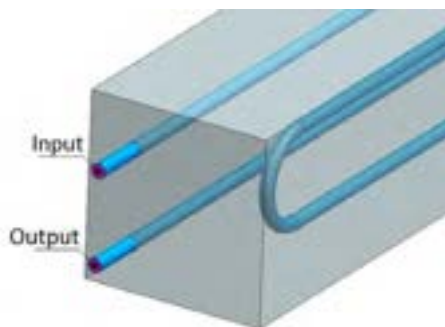


Fig. 22 Valutazione della temperatura in ingresso ed in uscita del fluido.

Per prima cosa si è confrontata la temperatura del fluido termovettore in ingresso ed in uscita dal provino (v. Fig. 22). Il suo andamento in queste due posizioni è stato riportato in Fig. 23 sia sperimentalmente che numericamente. In questa figura è possibile notare come il modello sia in grado di cogliere le perdite di carico termico che il fluido subisce (la riduzione di temperatura che il fluido subisce tra l'ingresso Fig. 23 a) e l'uscita v. Fig. 23 b) del TES) sia durante la fase di carico che durante il raffreddamento naturale.

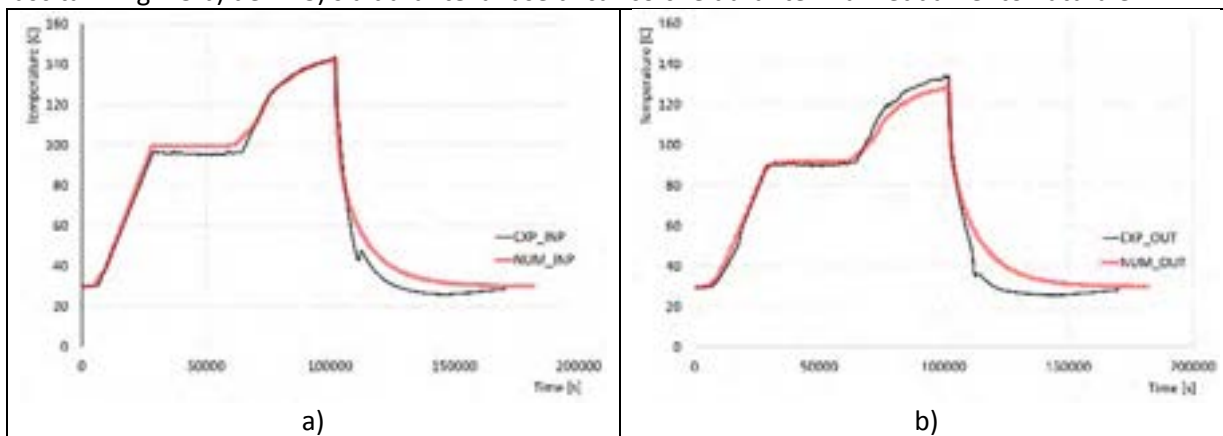


Fig. 23 Provino UNIPD-Italcementi: Confronto Numerico - Sperimentale della temperatura del sale in ingresso a); ed in uscita dal TES b).

Come detto precedentemente la discrepanza di temperatura nella Fig. 23 a) nella fase di carica è data dal fatto che si è assunta una forzante termica leggermente diversa da quella misurata nella termocoppia T_{IN} . È stata individuata nel provino una sezione di controllo, presso la mezzeria dell'elemento di calcestruzzo (v. Fig. 24 a), andando a posizionare alcune termocoppie sia internamente all'elemento di accumulo (prima del getto del calcestruzzo) che nel perimetro esterno (v. Fig. 24 b).

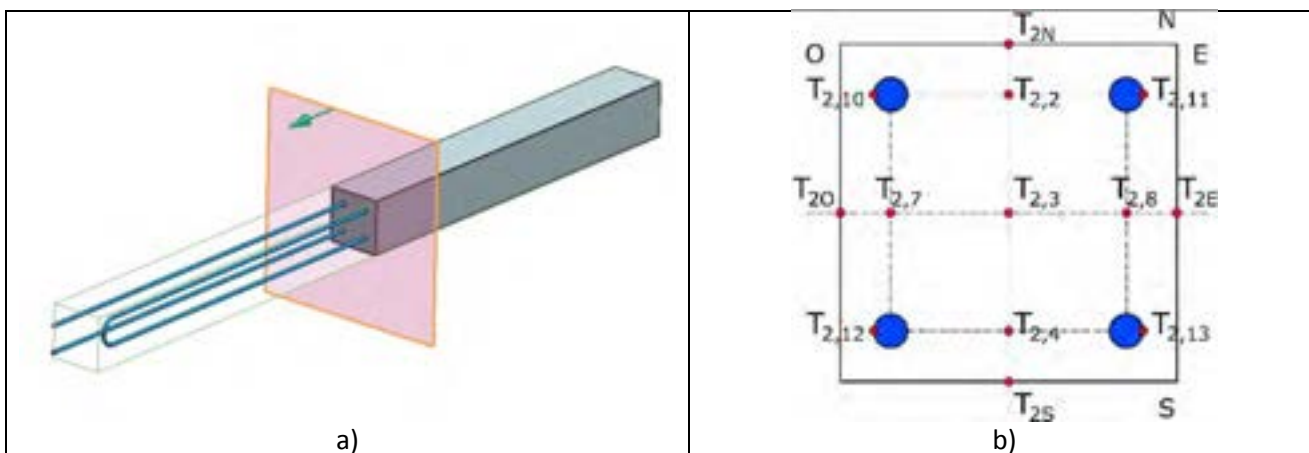


Fig. 24 Sezione di mezzeria del provino a); Posizionamento termocoppie b).

Le misurazioni sul perimetro esterno della sezione di controllo sono state denominate T2N, T2S, T2E, T2O (v. Fig. 24) e sono stati eseguiti confronti tra questi dati e il modello numerico realizzato (v. Fig. 25.)

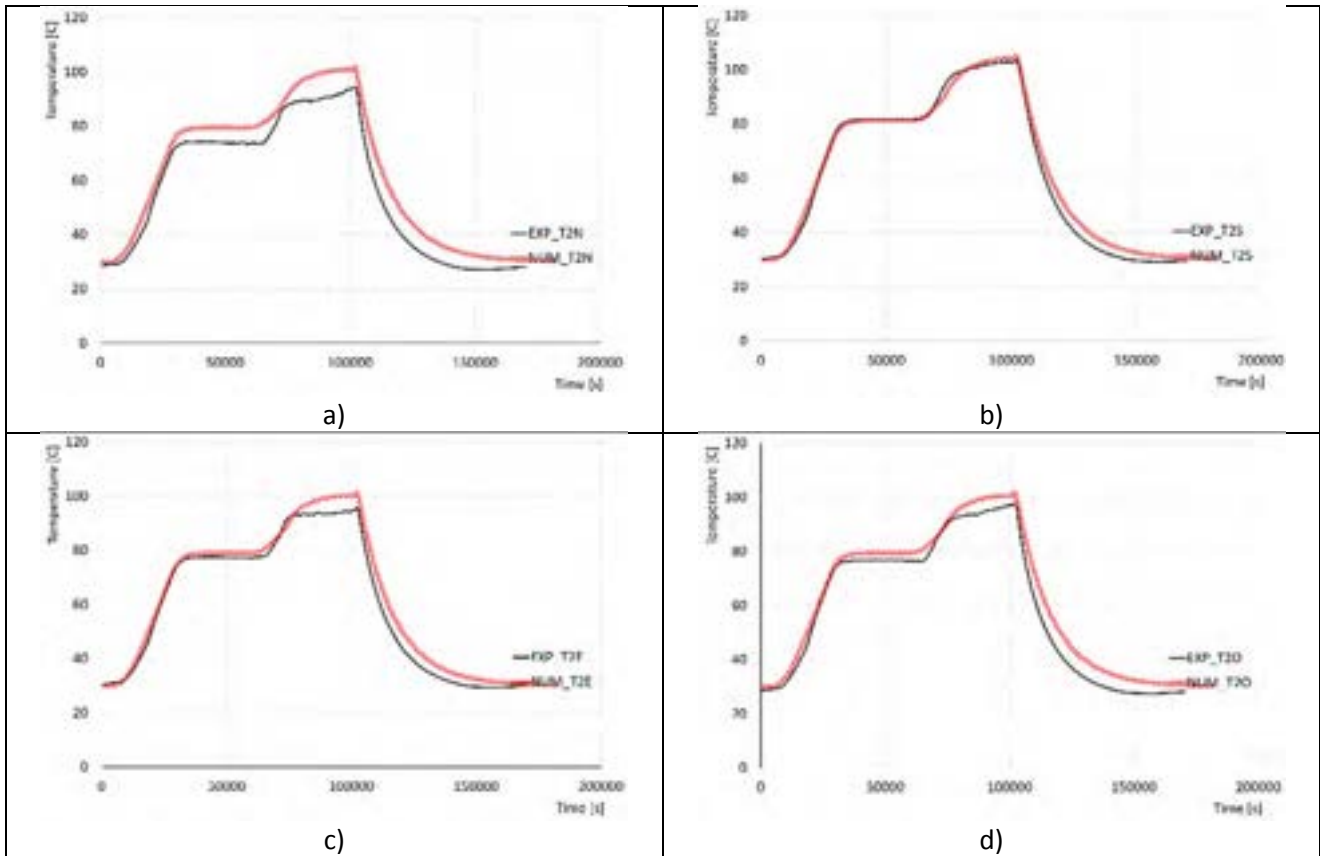
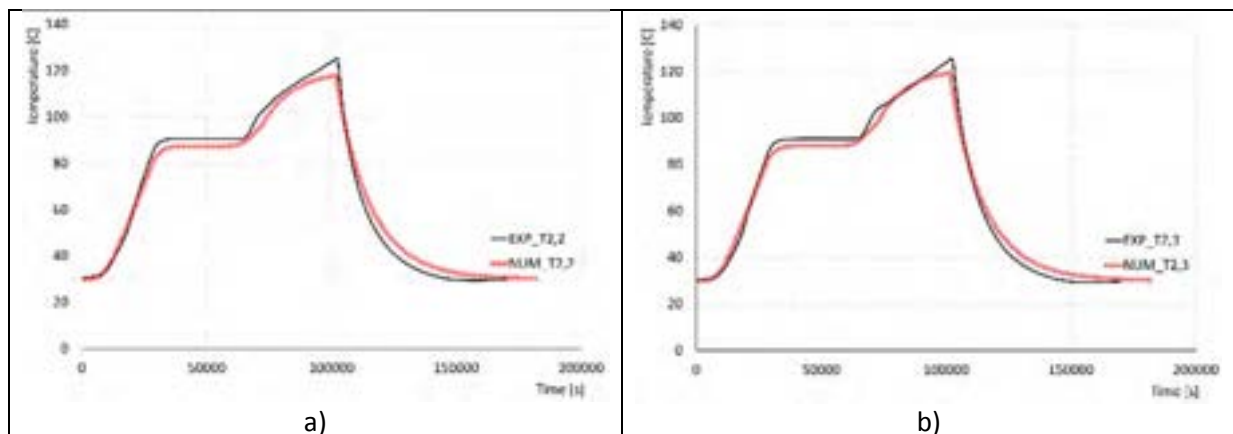


Fig. 25 Provino UNIPD-Italcementi: Confronto numerico-sperimentale della temperatura sul perimetro esterno nella sezione di mezzeria del provino in corrispondenza dei punti Nord a); Sud b); Est c); Ovest d).

Alcune variazioni di temperatura tra modello numerico e sperimentazione sono spiegabili considerando la notevole presenza di acqua nella superficie esterna del modulo durante la prova; questo ha comportato locali variazioni del coefficiente di scambio con l'ambiente, non considerate dal modello numerico in quanto il coefficiente di scambio è stato assunto costante su tutto il provino.

I confronti numerico-sperimentali all'interno della sezione di controllo vengono riportati in Fig. 26.



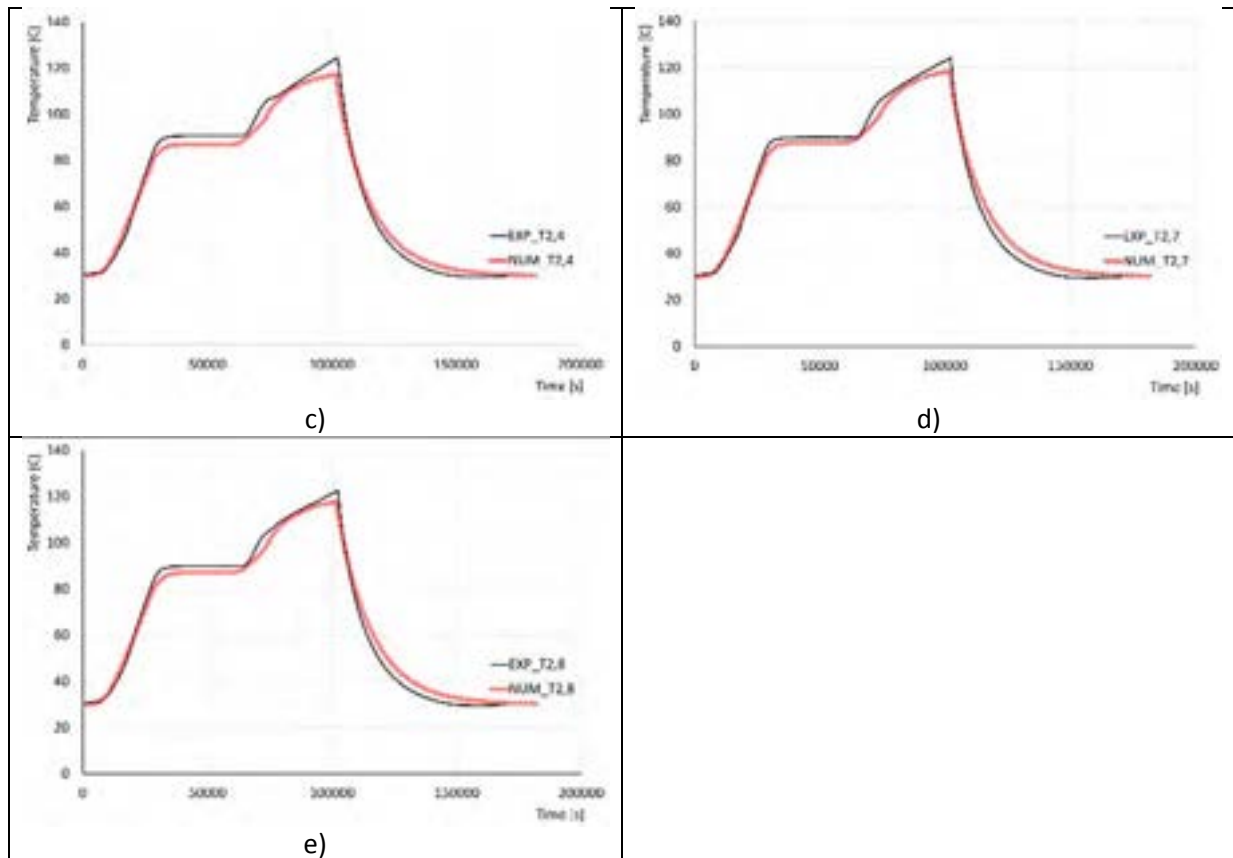
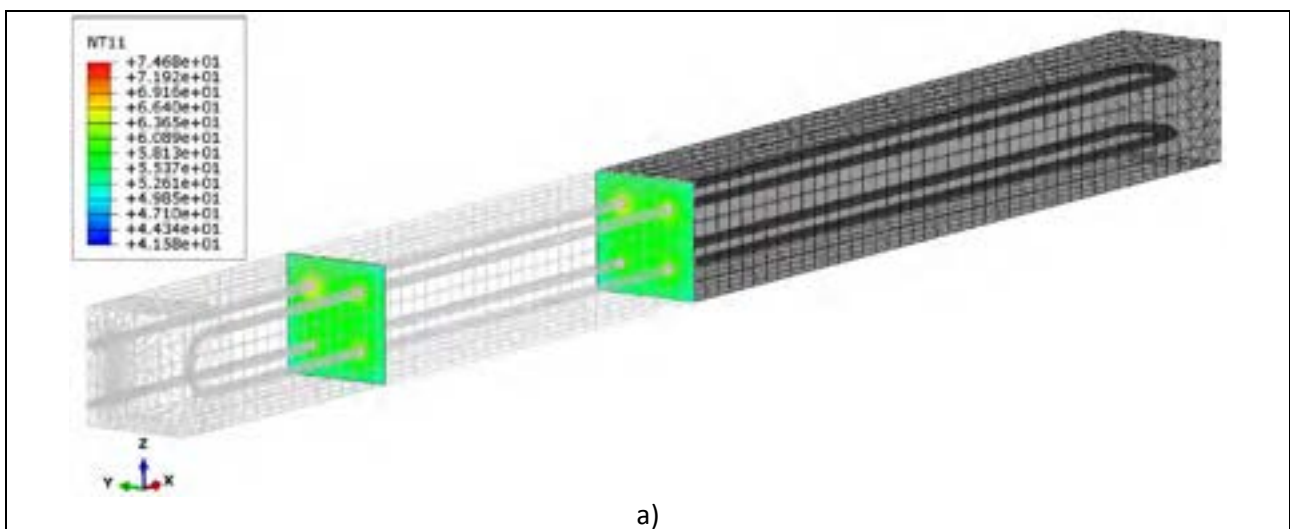


Fig. 26 Provino UNIPD-Italcementi: Confronto numerico-sperimentale della temperatura interna nel provino in corrispondenza delle termocoppie: T_{2,2} a); T_{2,3} b); T_{2,4} c); T_{2,7} d); T_{2,8} e).

L'evoluzione della temperatura nel modello numerico a differenti time step di analisi è stata riportata in Fig. 27, dove è possibile notare una temperatura pressoché costante nella zona di calcestruzzo all'interno del modulo di accumulo (tra il tubo di scambio) come del resto visibile dalle curve in Fig. 26.



a)

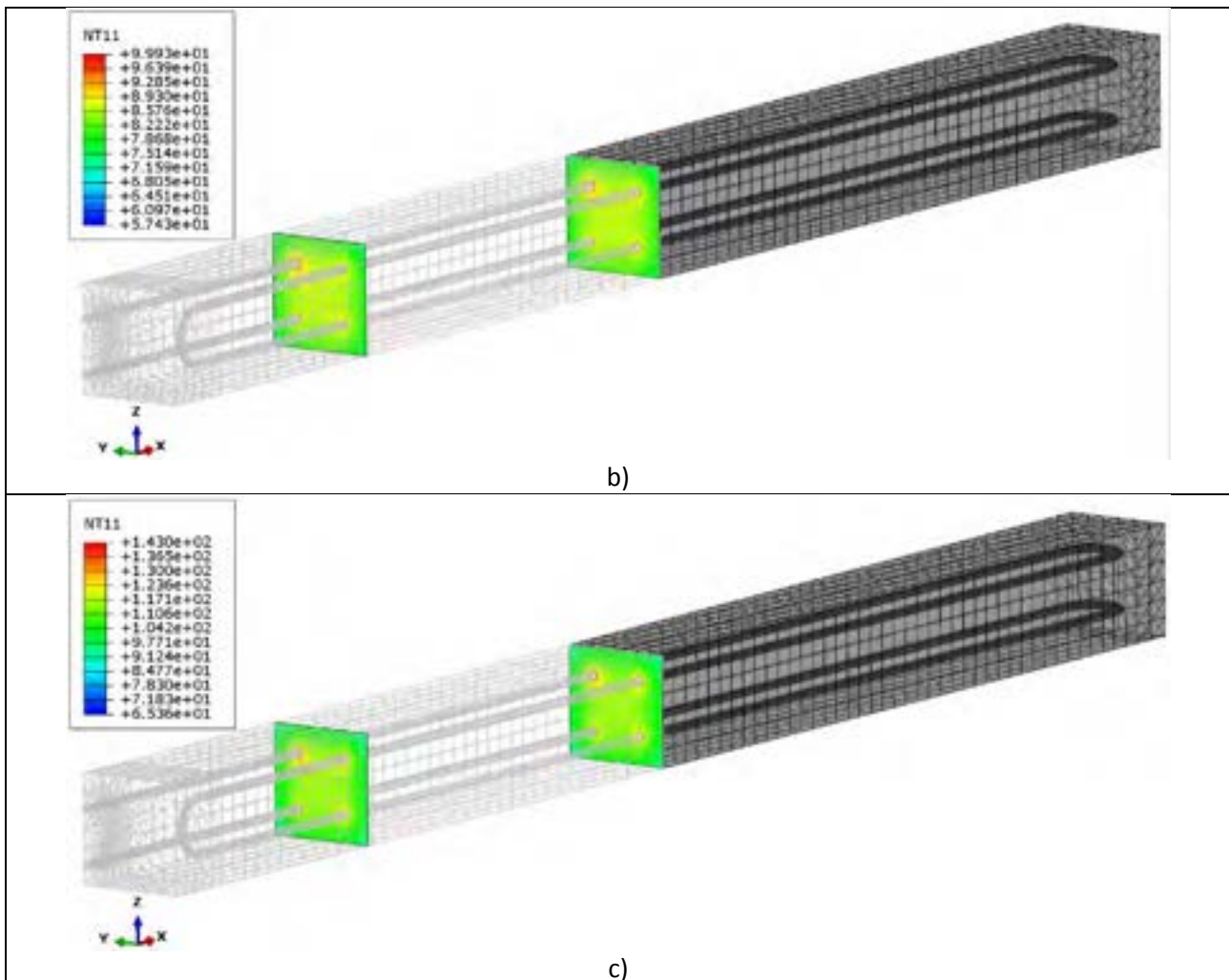


Fig. 27 Evoluzione della temperatura dopo 10000s a); 50000s b); 100000s c) di analisi.

8.3 Modulo UNITN-Cestaro

Anche per il modulo UNITN-Cestaro è stata assunta la stessa distribuzione delle termocoppie impiegata per il modulo sviluppato da Italcementi (v. Fig. 15). Essendo entrambi i provini soggetti a condizioni al contorno analoghe, anche in questo caso il coefficiente di scambio termico con l'ambiente è stato variato tra le facce, tenendo in considerazione che quella a Sud era parzialmente coibentata.

Anche per questo campione è stata assegnata una temperatura di input con un plateau del primo step di carico termico leggermente superiore (v. Fig. 28) rispetto a quello rilevato dalla termocoppia (un incremento di 5°C), come fatto nel test precedente, per tenere in considerazione che la temperatura rilevata della termocoppia è soggetta alle perdite di carico termico con l'ambiente (non essendo il tubo coibentato).

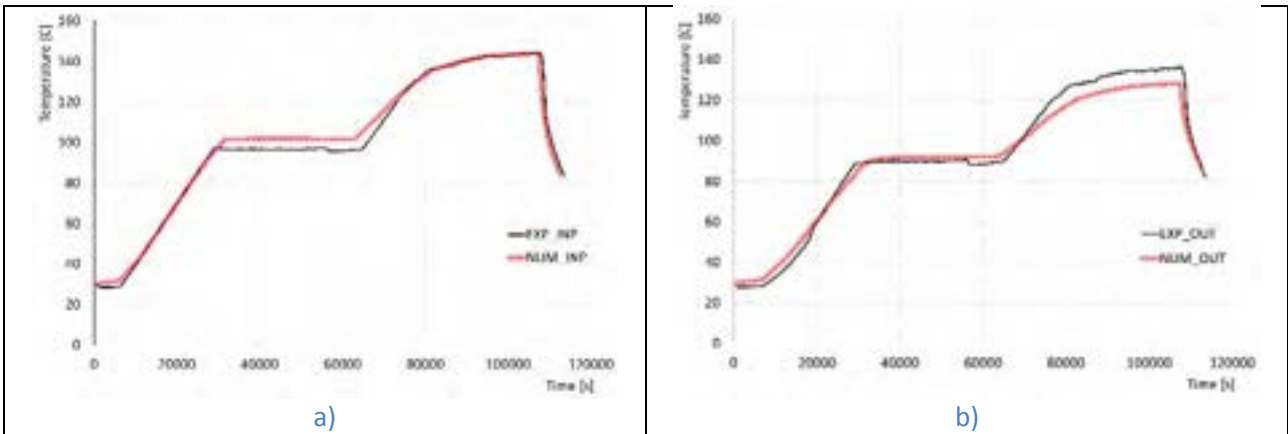


Fig. 28 Provino UNITN-Cestaro: Confronto Numerico - Sperimentale della temperatura del sale in ingresso ed in uscita del TES.

Confrontando le temperature ottenute tra modello numerico e sperimentazione si possono notare alcune variazioni di alcuni gradi (variazione massima riscontrata di 4.5°C) sia sul perimetro esterno del provino (v. Fig. 29), sia nel secondo step di carico, che portava la temperatura a 140°C nei punti interni del modulo di accumulo (v. Fig. 30). Queste discrepanze possono essere spiegate con i fenomeni di trasferimento di massa verificatesi anche in questo campione, non rappresentabili con il modello numerico realizzato. Lo spostamento dell’acqua non legata ha portato a variazioni del coefficiente di scambio con l’ambiente in zone localizzate del campione variando di fatto la capacità di accumulo della matrice cementizia.

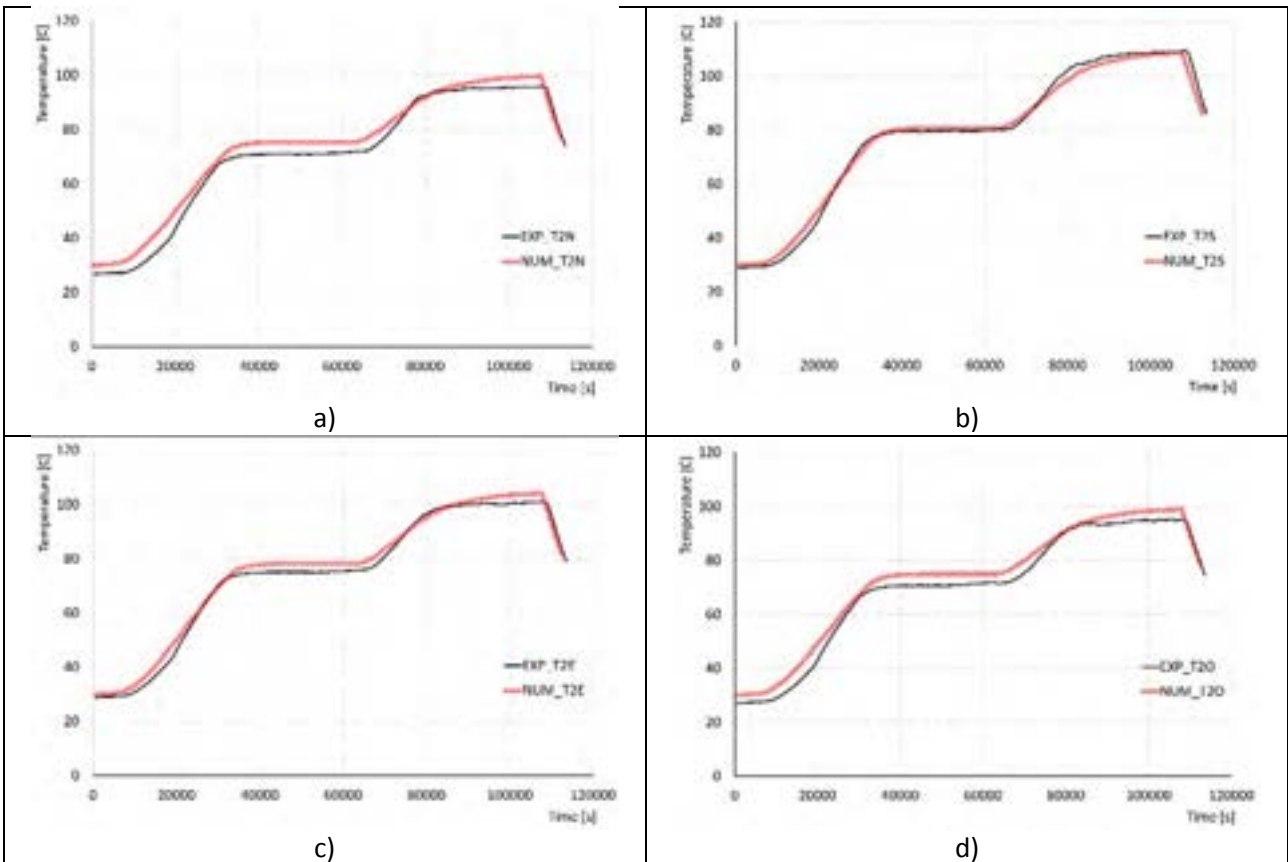


Fig. 29 Provino UNITN-Cestaro: Confronto numerico-sperimentale della temperatura sul perimetro esterno nella sezione di mezzeria del provino in corrispondenza dei punti: Nord a); Sud b); Est c); Ovest d).

Anche per per questo campione le variazioni di temperatura tra risultati numerici e quelli sperimentali sono risultate piuttosto contenute (attorno al 3%) e ciò permette di dire che il modello numerico è in grado di

simulare correttamente l'accumulo di temperatura del modulo studiato sia durante i processi transitori che durante le fasi stazionarie.

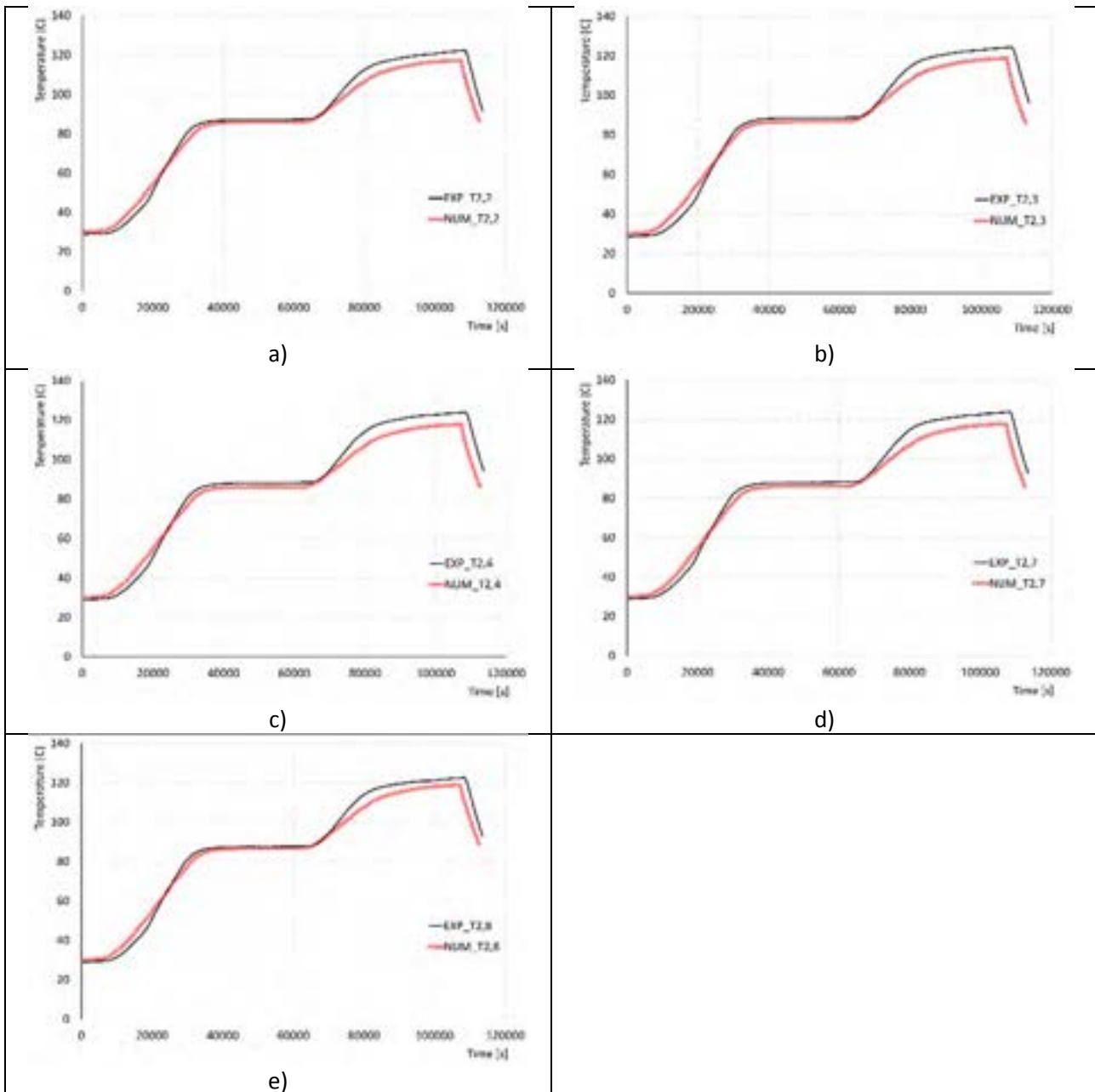


Fig. 30 Provino UNITN-Cestaro: Confronto numerico-sperimentale della temperatura interna nel provino in corrispondenza delle termocoppie: $T_{2,2}$ a); $T_{2,3}$ b); $T_{2,4}$ c); $T_{2,7}$ d); $T_{2,8}$ e).

Per poter considerare l'effetto del trasferimento di massa all'interno della matrice cementizia, e ottenere risultati più accurati, si dovrebbero impiegare modelli multi fisici di tipo termo-igrometrici considerando, oltre all'effetto di conduzione del calore, anche l'effetto di convezione dato dall'interazione fluido termovettore e matrice cementizia. Questa tipologia di modelli risultano molto onerosi a livello computazionale e per questa fase iniziale di test si è preferito impiegare un modello semplificato ma più versatile. In Fig. 31 sono state riportate alcune mappe termiche ottenute durante l'analisi in due differenti sezioni trasversali del modello.

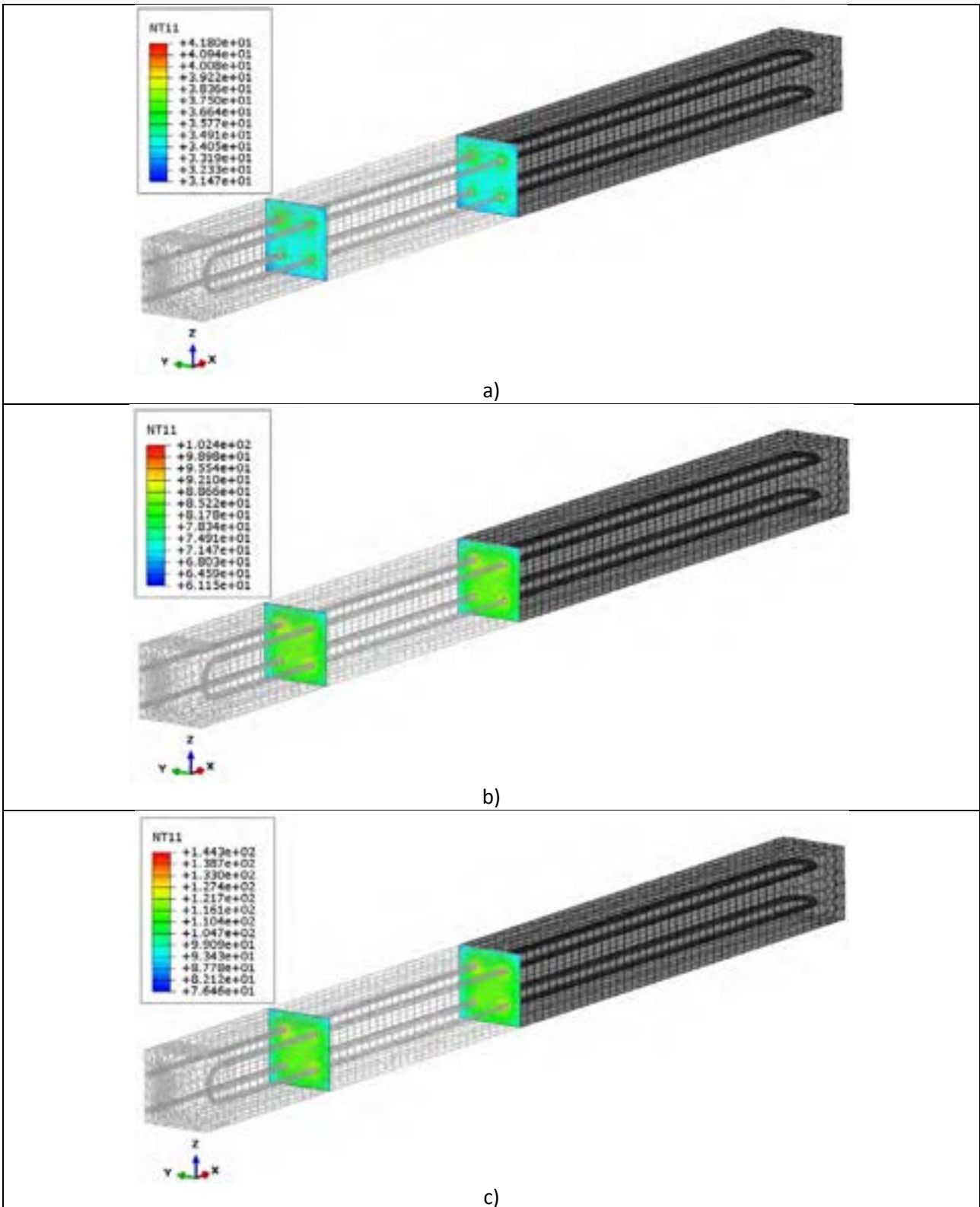


Fig. 31 Provino UNITN-Cestaro: Evoluzione della temperatura dopo 10000s a); 50000s b); 100000s c) di analisi.

9 Studio termo-meccanico di PCM incapsulato ed inglobato nel materiale cementizio

In questo periodo sono in fase di sviluppo alcuni modelli numerici in grado di simulare il comportamento dei materiali a cambiamento di fase PCM (Phase Change Materials), per incrementare ulteriormente la capacità di accumulo termico degli storage solidi che si stanno studiando. L'inserimento all'interno del mix design del calcestruzzo di un certo quantitativo di elementi a cambiamento di fase comporta infatti un miglioramento delle prestazioni termiche.

In letteratura sono presenti diverse tipologie di PCM, che possono essere classificati come inorganici, organici ed eutettici [5-7]. Il materiale scelto da ENEA per incrementare l'accumulo termico all'interno del calcestruzzo è un sale di tipo inorganico composto da sodio e potassio (60% of NaNO_3 and 40% of KNO_3). Questo sale è lo stesso impiegato come fluido termovettore all'interno della centrale solare ENEA di Priolo Gargallo.

Una delle principali problematiche dell'interazione tra calcestruzzo e questa tipologia di PCM è di tipo meccanico. Infatti la deformazione termica del sale risulta incompatibile con quella del calcestruzzo, essendo la prima circa un ordine di grandezza più grande rispetto a quella della matrice cementizia. Se il sale fosse semplicemente mescolato all'interno della miscela di calcestruzzo, anche se inerte rispetto alle reazioni chimiche prodotte durante la fase di presa ed indurimento del conglomerato; durante il riscaldamento, il sale, presentando un'espansione termica maggiore, causerebbe lesioni al modulo di accumulo, che potrebbero portare sia ad una diminuzione della capacità di accumulo che al collasso del modulo stesso.

Per ridurre questo fenomeno gli elementi a cambiamento di fase verranno inseriti nel mix design attraverso delle microcapsule in acciaio parzialmente riempite con il sale in modo da creare un'intercapedine vuota all'interno del calcestruzzo per facilitare l'espansione del sale.

Si deve quindi definire la dimensione, il grado di riempimento delle microcapsule, nonché la loro percentuale in volume da inserire nella matrice solida.

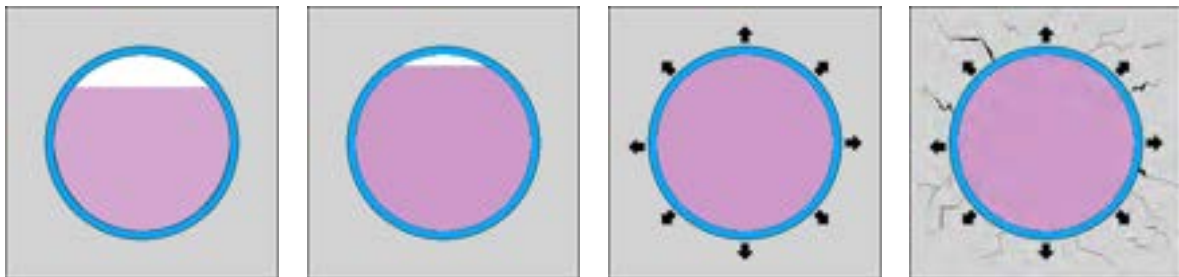


Fig. 32 Variazione di volume del PCM durante il cambiamento di fase.

Infatti, un riempimento eccessivo delle microcapsule comporterebbe un esaurimento rapido dello spazio vuoto a disposizione durante il cambiamento di fase del sale, che inizierebbe a spingere sulla matrice fino a danneggiarla (v. Fig. 32); viceversa se la capsula fosse troppo poco riempita, il quantitativo di sale potrebbe risultare insufficiente ad incrementare le caratteristiche termiche del calcestruzzo.

L'idea è quella di caratterizzare in una prima fase il materiale come composito, andando a rappresentare esplicitamente le singole fasi: la matrice cementizia, il liner in acciaio (la capsula) e l'elemento a cambiamento di fase. Una volta rappresentato il materiale al mesoscala si andrà ad effettuare il passaggio di scala dal meso al macro, ottenendo così un materiale omogeneo di più semplice impiego ma comunque capace di cogliere il comportamento globale di questa tipologia di materiali.

9.1 Rappresentazione in mesoscala

Il modello in mesoscala esplicita i principali componenti del calcestruzzo. Considerato che le microcapsule avranno la dimensione media degli aggregati, anche gli inerti medio-grandi verranno esplicitati nella modellazione.

Le singole fasi studiate risultano quindi:

- microcapsule composte da liner in acciaio e sale
- aggregati naturali medio-grandi
- matrice cementizia composta da pasta di cemento e aggregati sottili

All'interno della matrice cementizia aggregati e PCM sono stati disposti mediante una distribuzione random che tiene conto però dell'effettiva curva granulometrica del calcestruzzo.

Per ottenere questo comportamento è stato sviluppato un software (in linguaggio Visual Basic, v. Fig. 33 a) che permette, inserendo la curva granulometrica di un calcestruzzo, la realizzazione di un modello tridimensionale in mesoscala (v. Fig. 33).

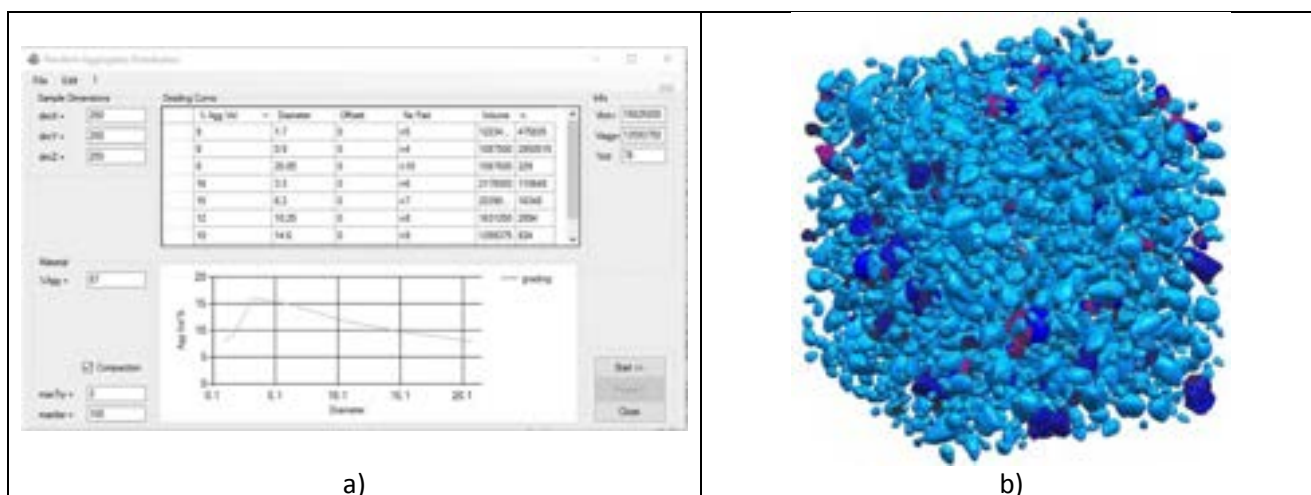


Fig. 33 Software per la realizzazione della distribuzione random degli aggregati a); Esempio di distribuzione degli aggregati b).

9.1.1 Distribuzione random degli aggregati e del PCM

Partendo dalla curva granulometrica impiegata nel mix design, l'algoritmo distribuisce in modo random all'interno di un volume le sfere, aventi diametro pari a quello del passante presente nella curva; il numero di sfere per ciascun diametro è legato alla percentuale in volume presente nel campione. Nel caso in cui gli aggregati presentino una forma altamente irregolare, non approssimabile quindi con una sfera, l'algoritmo considera che ciascun grano sia contenuto all'interno di una "sfera virtuale" (v. Fig. 34) e distribuisce in modo casuale tali sfere.



Fig. 34 Aggregati contenuti all'interno di sfere virtuali.

Considerando che le sfere tra di loro non possono compenetrare, la procedura numerica calcola una distanza minima tra gli aggregati ed una distanza effettiva:

$$d_{\min} = R_1 + R_2 + O \quad (5)$$

dove R_i è il raggio della sfera i -esima ed O il possibile offset tra due sfere. La distanza effettiva è pari invece a:

$$d = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (x_{2,j} - x_{1,j})^2} \quad (6)$$

dove $x_{i,j}$ è la j -esima coordinata della sfera i . Tale distanza permette di valutare l'interferenza tra due aggregati. La posizione del centro della sfera è definita con una funzione casuale:

$$x(j) = rand(j) \quad (7)$$

Considerando una forma irregolare degli aggregati si è definita una rotazione random:

$$\theta(j) = rand(j) \quad (8)$$

dove j sono le direzioni degli assi locali.

La procedura iterativa per ottenere la distribuzione random degli aggregati inizia definendo una posizione del centro della sfera di tentativo (x_{TR}) e si valuta, per ciascun aggregato già inserito nel volume, d_{\min} e d . Se $d > d_{\min}$ le sue sfere compenetrano ed x_{TR} non può essere accettato; in caso contrario verrà inserito un nuovo aggregato con centro $x = x_{TR}$.

9.1.2 Modello costitutivo dei PCM

Come già detto in precedenza, come materiale a cambiamento di fase si è scelta una miscela binaria di nitrato di sodio e di potassio con una percentuale in peso rispettivamente del 60% e 40%. Tale composto è caratterizzato da una temperatura di inizio e fine fusione pari a $T_{m1}=221C$ e $T_{m2}=238C$.

Al fine di descrivere il processo di riempimento della capsula in seguito all'elevato incremento di volume del sale durante il cambiamento di fase da solido a liquido (4.6%), si è seguito un approccio alle grandi deformazioni.

Il tensore costitutivo \mathbf{C} può essere scritto quindi come:

$$C_{ijkl} = \lambda(\phi, T) \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu(\phi, T) (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (9)$$

dove le funzioni non lineari λ e μ , dipendenti dalla temperatura T e dalla trasformazione di fase ϕ , assumono la seguente forma:

$$\lambda = \frac{E(\phi, T)(\nu(\phi, T))}{(1+\nu(\phi, T))(1-2\nu(\phi, T))} \quad (10)$$

$$\mu = \frac{E(\phi, T)}{2(1+\nu(\phi, T))} \quad (11)$$

Il modulo elastico ed il coefficiente di Poisson sono così espressi:

$$E(\phi, T) = \phi_1 E_s(T) + \phi_2 E_l \tag{12}$$

$$\nu(\phi, T) = \phi_1 \nu_s(T) + \phi_2 \nu_l \tag{13}$$

dove E_s, E_l e ν_s, ν_l sono rispettivamente i valori del modulo di Young e del coefficiente di Poisson per la fase solida e liquida. In Fig. 35 viene riportato un confronto tra risultati sperimentali e numerici di queste due caratteristiche meccaniche. I loro valori per temperature ≤ 120 C sono riportati in Tab. 7.

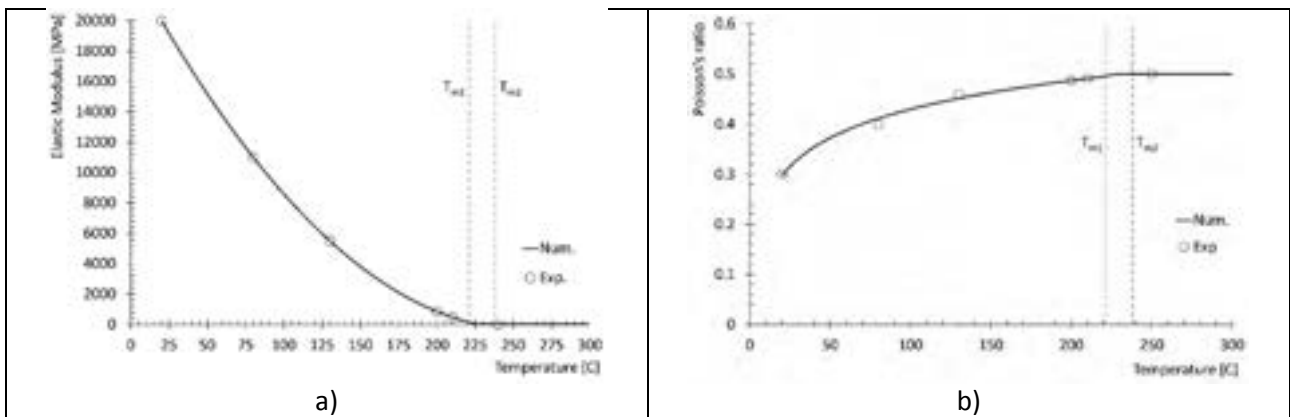


Fig. 35 Variazione del modulo elastico a); e del coefficiente di Poisson b) del sale al variare con la temperatura.

Temperatura [C]	E [GPa]	ν
20	20.72	0.29
40	17.69	0.33
60	14.66	0.37
80	11.63	0.42
100	8.61	0.46
120	5.58	0.50

Tab. 7 Valori del modulo di Young e del rapporto di Poisson a diverse temperature [8].

Considerando un elemento di sale di forma cubica (dimensione degli spigoli pari a 100mm), vincolato su una faccia laterale e soggetto a forze di gravità (v. Fig. 36 a); se questo viene riscaldato subisce il processo di cambiamento di fase riportato in Fig. 36 b).

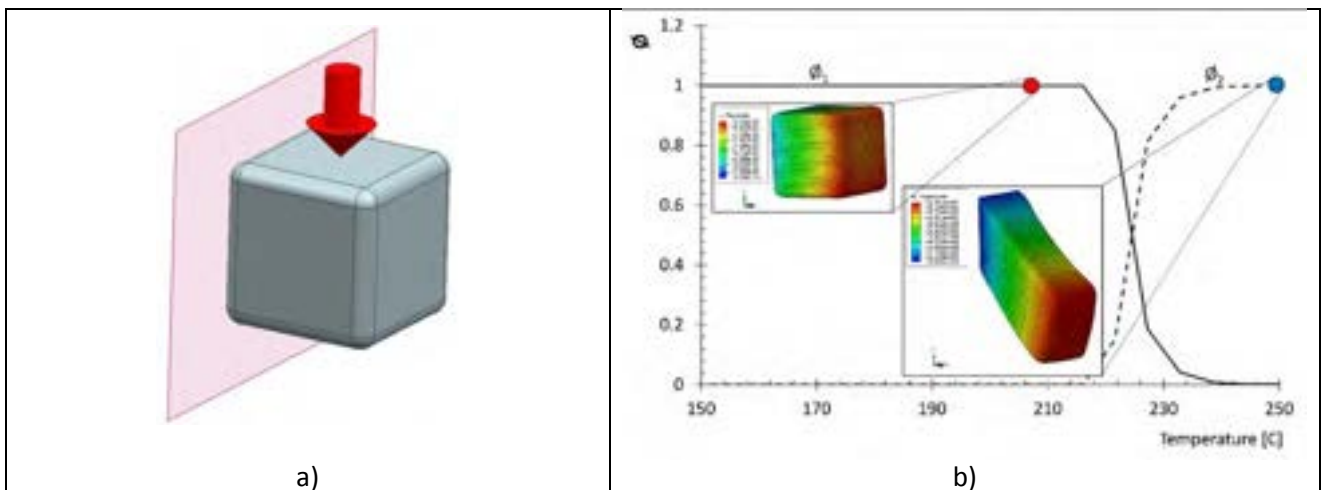


Fig. 36 Modello test del sale a); Variazione di fase vs. temperatura b).

Al fine di calibrare il modello numerico, si sono confrontate le curve sperimentali e numeriche sforzo-deformazione per un elemento cilindrico di sale avente diametro pari a 45mm e altezza pari a 90 mm, in accordo con [8] (v. Fig. 37 a). Le deformazioni assiale e laterale sono riportate in Fig. 37 b) e sono confrontate con i valori sperimentali a temperatura ambiente ($T=20^{\circ}\text{C}$). Aumentando la temperatura le caratteristiche meccaniche variano come in Tab. 7; ossia aumentano le deformazioni a parità di tensione.

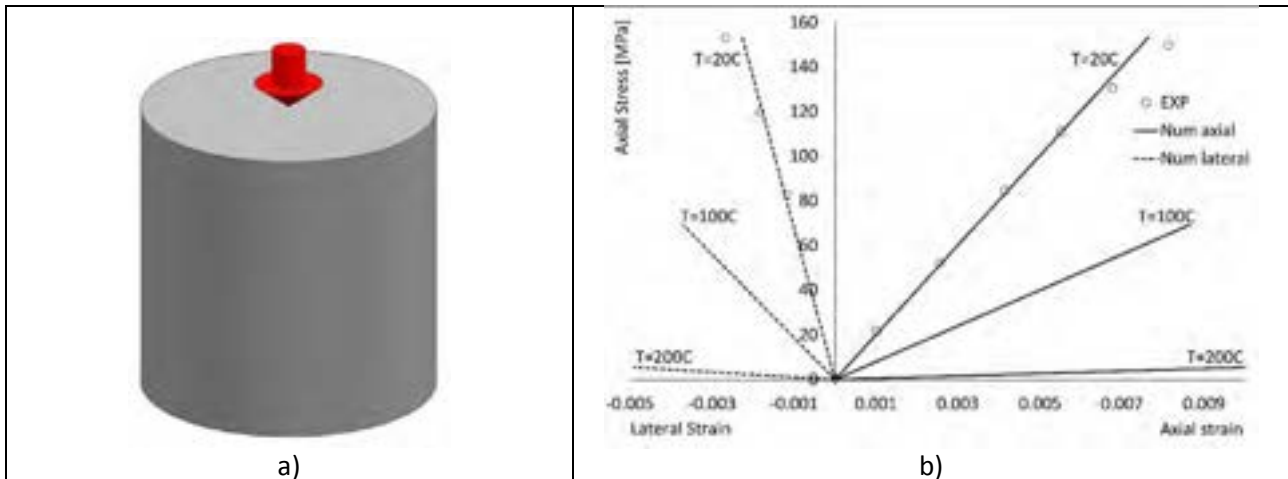


Fig. 37 Geometria del modello a); Confronto numerico sperimentale b).

9.2 Modello numerico cella base

La prima fase della modellazione del PCM è quella di valutare l'effetto del sale durante l'espansione termica nell'intorno della matrice cementizia. Si è quindi scelto di studiare una singola cella base composta da una micro capsula di PCM con vari gradi di riempimento a temperatura ambiente e un piccolo intorno di calcestruzzo (v. Fig. 38). Essendo l'elemento simulato molto piccolo (la dimensione della cella è quella di un cubo di 35mm di lato), il riscaldamento è stato assunto uniforme su tutta la cella base.

L'elemento studiato considera una micro capsula in acciaio di diametro esterno 26mm con uno spessore di acciaio pari a 0.5mm.

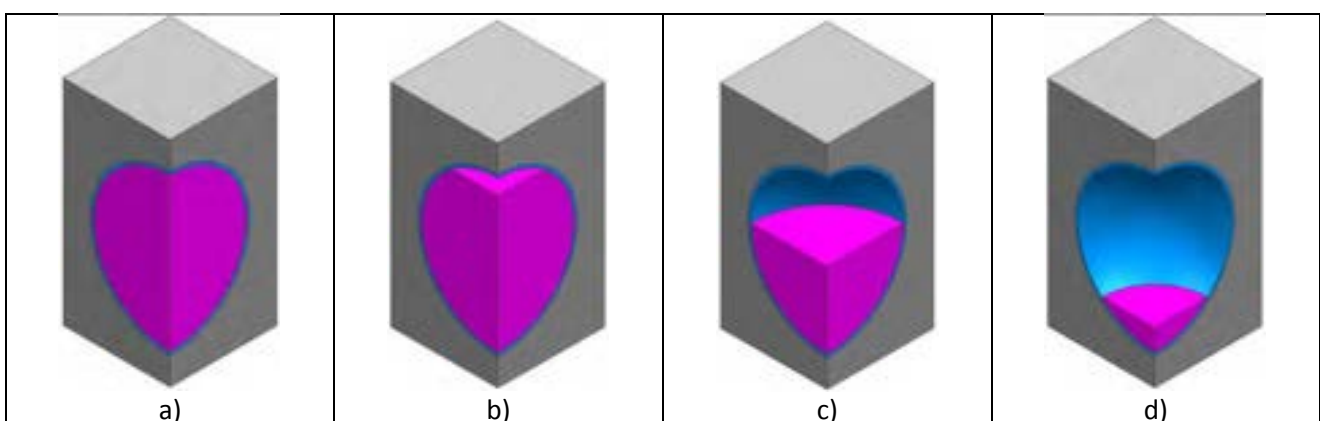


Fig. 38 Modelli di celle basi (considerando la simmetria su due piani) a diversi gradi di riempimento a temperatura ambiente: 100% di riempimento a); 80% di riempimento b); 50% di riempimento c); 25% di riempimento d).

Il modello costitutivo del calcestruzzo è di tipo damage-plasticity; per il liner in acciaio è stato considerato un modello di tipo elasto-plastico incrudente mentre il PCM è stato caratterizzato con il modello costitutivo spiegato precedentemente.

L'interazione tra sale e sfera in acciaio avviene mediante la teoria del contatto numerico di tipo normale.

Prendendo in considerazione in questa fase il modello di cella riempita per l'80% (v. Fig. 38), in Fig. 39 è stata riportata l'evoluzione deformativa del sale durante le fasi di riscaldamento (da 20 a 300°C).

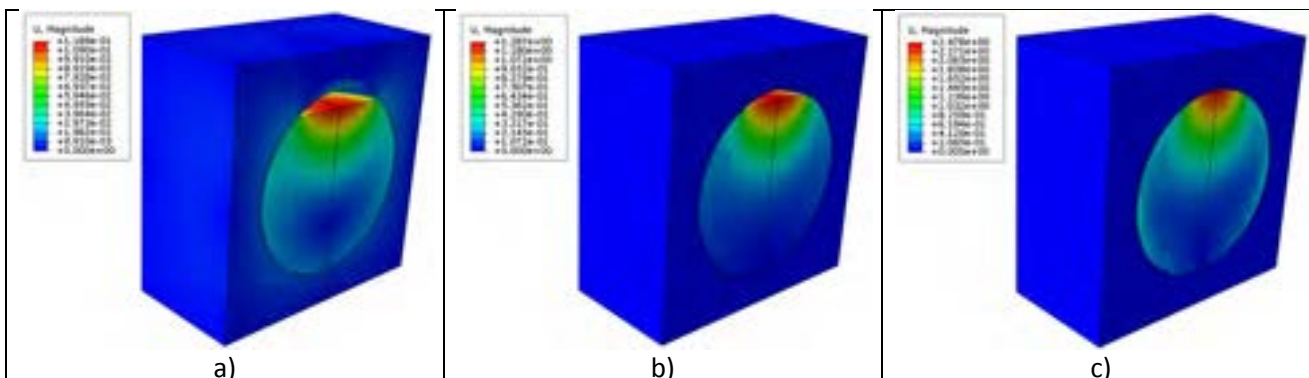


Fig. 39 Evoluzione dell'espansione termica durante l'analisi transitoria a 100°C a); a 220°C b) e a 300°C c).

È possibile notare in Fig. 39 come, a causa dell'espansione del PCM, il vuoto inizialmente presente nella capsula si riempie durante il riscaldamento. Una volta che la sfera in acciaio risulta completamente riempita, il sale, tenuto conto che cambia stato da solido a liquido (assunto come un fluido incompressibile), inizia a trasmettere alla matrice cementizia una pressione idrostatica sempre maggiore.

Durante il processo transitorio di riscaldamento (assunto lineare) il sale cambia fase come riportato in Fig. 40. Assunto un riscaldamento uniforme della cella base, anche il cambiamento di fase del sale avviene in modo uniforme (infatti le mappe di Fig. 40 risultano sempre dello stesso colore, ma la legenda indica la % di fase solida e liquida presente nel sale diversa a seconda della temperatura).

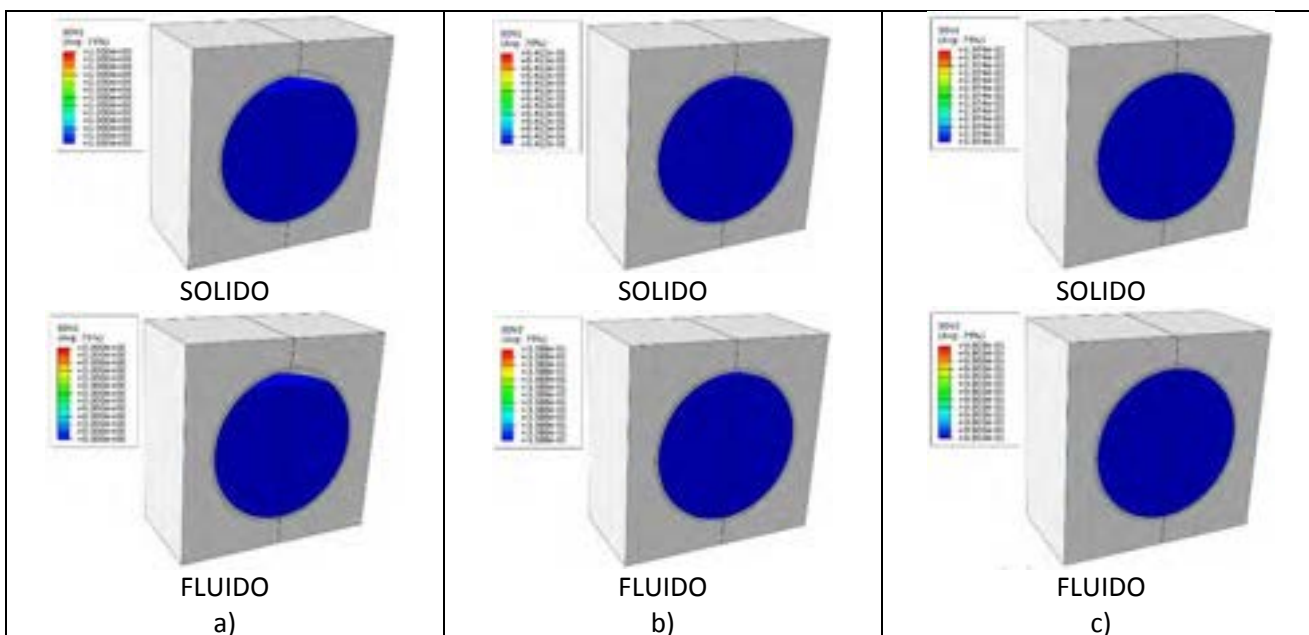


Fig. 40 Evoluzione della variazione di cambio fase durante l'analisi transitoria a 20°C a); a 220°C b) e a 300°C c).

Vengono inoltre riportate le mappe di danno (della sola matrice cementizia) che fanno vedere come un riempimento di questo tipo, anche se il sale risulta inglobato in una sfera di acciaio, riesca a danneggiare in modo marcato la matrice cementizia (v. Fig. 41; le zone rosse risultano essere quelle danneggiate).

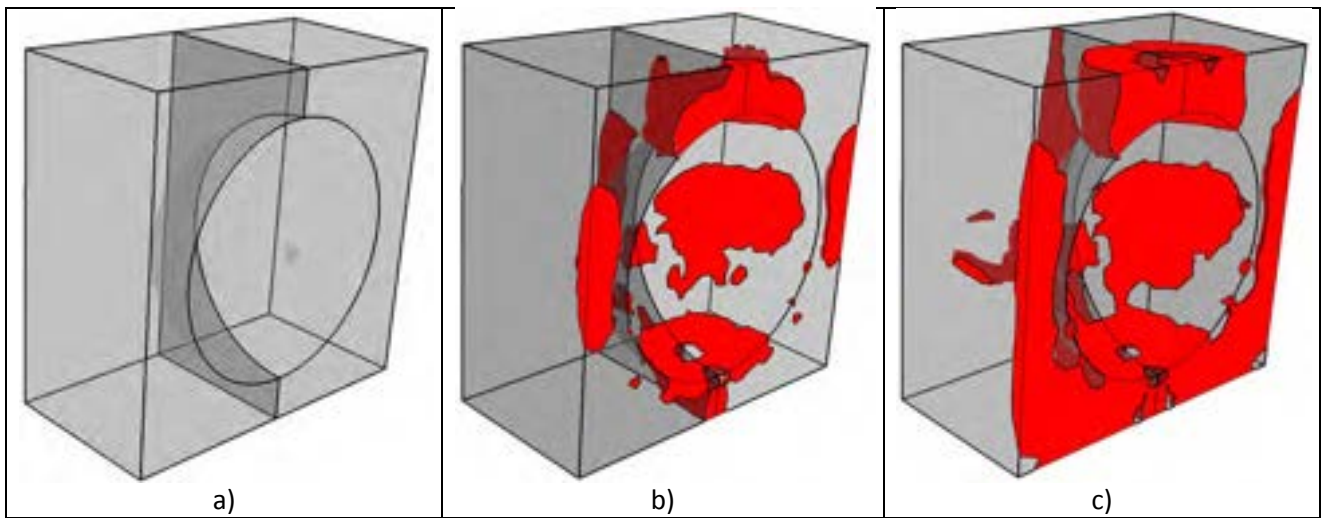


Fig. 41 Evoluzione del danno a 20°C a); a 60°C b) e a 300°C c).

10 Conclusioni

Nel presente lavoro sono stati sviluppati modelli numerici tridimensionali per la simulazione di un sistema di accumulo solido termico realizzato in calcestruzzo. Il fluido termovettore (olio diatermico) è stato simulato tenendo in considerazione, oltre agli effetti di conduzione termica, anche gli effetti di convezione dovuti al moto del fluido all'interno dell'elemento accumulatore.

Dalle analisi eseguite si è potuto constatare che i modelli numerici sviluppati sono stati in grado di cogliere, in modo sufficientemente corretto, il comportamento termico del sistema osservato sperimentalmente.

Le simulazioni condotte hanno però considerato solo il problema da un punto di vista termico, trascurando alcuni effetti quali: il trasferimento di massa intesa come fuoriuscita di acqua dal calcestruzzo durante le fasi di riscaldamento ed accentuati quadri fessurativi riscontrati sperimentalmente. Questi effetti hanno comportato una variazione dello scambio termico del provino con l'ambiente ed una variazione di conducibilità termica locale del materiale, considerate qui solo tramite variazioni delle condizioni al contorno del problema.

Per una miglior comprensione di questi effetti sul sistema di accumulo sia nel breve che nel lungo periodo (durante i ripetuti cicli termici che un impianto solare è soggetto), la presente attività di ricerca dovrebbe proseguire andando a sviluppare modelli di simulazione termo-igro-meccanici in grado di considerare sia il comportamento dell'acqua all'interno dell'elemento di accumulo durante le fasi di riscaldamento nonché dell'interazione tra effetti termici e danneggiamento (fessurazioni) dello scheletro solido.

La parte finale inoltre investiga il comportamento termo-meccanico del sistema di accumulo in calcestruzzo se contiene al suo interno un certo quantitativo di elementi a cambiamento di fase (PCM) al fine di migliorarne le capacità di accumulo termico. Analisi numeriche al mesoscala sono state effettuate, permettendo un'iniziale ma allo stesso tempo realistica comprensione del danneggiamento del materiale in seguito all'espansione del sale durante il suo riscaldamento e conseguente cambio di fase.

11 Riferimenti bibliografici

1. Girardi F., Di Maggio R. Realizzazione e caratterizzazione di un modulo di accumulo basata su mescola sviluppata da UNITN, Report ENEA, 2015.
2. Giannuzzi G.M., Giovannini E., Liberatore R., Mazzei D., Mele D., Crescenzi T. Analisi sperimentale e numerica del comportamento termodinamico di sistemi di accumulo a calore sensibile in materiali cementizi, Report ENEA 2015.
3. YU, C.-C.; HEINRICH, Juan Carlos. Petrov-Galerkin methods for the time-dependent convective transport equation. *International journal for numerical methods in engineering*, 1986, 23.5: 883-901.
4. YU, C. - C.; HEINRICH, Juan Carlos. Petrov—Galerkin method for multidimensional, time - dependent, convective - diffusion equations. *International Journal for numerical methods in engineering*, 1987, 24.11: 2201-2215.
5. Ling Tung-Chai, Poon Chi-Sun. Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete, an overview. *Construction and Building Materials*, 2013, 46: 55-62.
6. Hungera M., Entropa A.G., Mandilarasb I., Brouwersa H.J.H., Fountib M. The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31.10: 731-743.
7. Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew Sust Energy Rev*, 2009, 13.2: 318-45.
8. Iverson B.D., Broome S.T., Kruiuzenga A.M., Cordaro J.G.. Thermal and mechanical properties of nitrate thermal storage salts in the solid-phase. *Solar Energy*, 2012, 86: 2897-2911.