



Ricerca di Sistema elettrico

Simulazione del comportamento termo-dinamico di un elemento base di accumulo a calore latente e sua progettazione

*A. Miliozzi, G.M. Giannuzzi,
R. Liberatore, E. Giovannini*

SIMULAZIONE DEL COMPORTAMENTO TERMO-DINAMICO DI UN ELEMENTO BASE DI ACCUMULO A CALORE SENSIBILE O LATENTE E SUA PROGETTAZIONE

A. Miliozzi, G.M. Giannuzzi, R. Liberatore, E. Giovannini (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Energia elettrica da fonte solare

Obiettivo: Studio di configurazioni impiantistiche alternative

Responsabile del Progetto: Domenico Mazzei ENEA

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE	7
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	9
2.1 IL MEZZO DI ACCUMULO A CAMBIAMENTO DI FASE	10
2.2 SELEZIONE DEL TIPO DI ACCUMULO	10
2.2.1 <i>Aumento dell'area di scambio</i>	12
2.2.1.1 Strutturazione a sandwich	12
2.2.1.2 Macroincapsulamento	14
2.2.1.3 Materiali compositi con maggiore conducibilità termica	15
2.2.2 <i>Scelta del tipo di accumulatore a calore latente da realizzare</i>	17
2.3 PROGETTAZIONE DEGLI ACCUMULATORI ELEMENTARI	18
2.3.1 <i>Descrizione</i>	18
2.3.2 <i>Criteri di progettazione</i>	18
2.3.3 <i>Analisi di sensibilità</i>	19
2.3.3.1 Il fluido termovettore: l'olio diatermico	19
2.3.3.2 Confronto PCM-cemento.....	20
2.3.3.3 Effetto dei principali parametri sul tempo di carica	21
2.3.4 <i>Progettazione</i>	23
2.3.4.1 Specifiche di progetto e dimensionamento.....	23
2.3.4.2 Valutazioni termiche.....	23
2.3.4.3 Disegni di progetto	30
2.3.5 <i>Conclusione</i>	30
2.4 ANALISI DEL COMPORTAMENTO TERMO-DINAMICO	31
2.4.1 <i>Analisi FEM di un elemento di accumulo</i>	31
2.4.1.1 Geometria e mesh	32
2.4.1.2 Materiali	32
2.4.1.3 Condizioni di scambio termico.....	33
2.4.1.4 Elemento con tubo liscio	33
2.4.1.5 Elemento con tubo alettato.....	40
2.4.1.6 Considerazioni conclusive.....	46
2.4.2 <i>Analisi CFD di un elemento di accumulo</i>	48
2.4.2.1 Modello numerico	48
2.4.2.2 Prima geometria	51
2.4.2.3 Seconda geometria	55
2.4.2.4 Il parametro A_{mush}	61
2.4.2.5 Conclusioni	62
2.4.3 <i>Valutazione dello schermaggio termico</i>	62
2.4.3.1 Formulazione teorica.....	62
2.4.3.2 Analisi FEM semplificata	66
2.4.4 <i>Conclusioni</i>	70
2.5 PROGETTAZIONE DELLA SEZIONE DI PROVA	72
2.5.1 <i>Termocriostato di circolazione</i>	79
3 DISCUSSIONE E CONCLUSIONI	80
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	81
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	82
APPENDICE 1 – PROGETTO ELEMENTO DI ACCUMULO CON PCM	83
APPENDICE 2 – CONSIDERAZIONI PER CONTENITORE SIGILLATO	84
APPENDICE 3 – STIMA DEL COEFFICIENTE DI SCAMBIO TERMICO OLIO-TUBO	86
APPENDICE 4 – FISICA DEL CAMBIAMENTO DI FASE SOLIDO-LIQUIDO	88

Sommario

Nell'ambito dei sistemi di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, il solare termodinamico può dare, in una prospettiva di medio termine, un contributo significativo allo sviluppo di un sistema di produzione dell'energia elettrica sostenibile, sia attraverso l'impiego di impianti di diversa taglia nel sistema elettrico nazionale. L'attività di ricerca sul solare termodinamico si pone come obiettivo primario la riduzione i costi, rendendo gli impianti CSP, sia di grande che di piccola taglia, sempre più competitivi rispetto quelli tradizionali a combustibili fossili. In questa ottica, un ruolo determinante lo gioca la presenza di un sistema di accumulo con una elevata densità di energia termica ed alta efficienza di scambio termico. Una soluzione che presenta buone prospettive in termini di riduzione dei costi è quella basata su sistemi di accumulo a calore latente utilizzando materiali a cambiamento di fase (PCM). Questa soluzione, a basso costo ed alta densità di energia, è però condizionata dalla ridotta capacità di trasporto del calore (diffusività termica) di questi materiali. Sulla base di recenti studi, miscele di PCM ed opportune nanoparticelle, detti nanoPCM, sembrano essere in grado di incrementare sia la capacità termica che la diffusività del mezzo di accumulo. Durante il Piano Annuale di Ricerca del 2012, si sono sviluppati e caratterizzati nuovi mezzi di accumulo termico con PCM e nanoparticelle e dimostrata la loro capacità di incremento della capacità e della diffusività termica. Le attività del PAR 2013 sono, invece, finalizzate alla selezione di un nanoPCM con temperatura di fusione prossima ai 200-250°C, allo studio e progettazione di un sistema di accumulo elementare e della relativa sezione di prova e, quindi, alla studio sperimentale dello scambio termico, confrontando i risultati con quelli ottenuti con un sistema di accumulo a calore sensibile utilizzando cementi appositamente sviluppati. Nel presente lavoro, si riportano le attività Enea relative allo studio ed alla progettazione di un sistema elementare di accumulo termico a cambiamento di fase funzionante a media temperatura (circa 250°C) e della sezione di prova necessaria alla verifica delle condizioni di scambio termico che si instaurano. In particolare, si è scelto un tipo di scambiatore di riferimento e se ne è studiato il comportamento attraverso opportuni modelli di simulazione. Quindi, si è eseguita la progettazione sia del sistema di accumulo elementare che della relativa sezione di prova.

1 Introduzione

Nell'ambito dei sistemi di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, il solare termodinamico può dare, in una prospettiva di medio termine, un contributo significativo allo sviluppo di un sistema di produzione dell'energia elettrica sostenibile, sia attraverso l'impiego di impianti di diversa taglia nel sistema elettrico nazionale, sia per gli sviluppi previsti per questa tipologia di impianti in aree più favorevoli dal punto di vista della radiazione solare diretta, come il Nord Africa, con trasmissione in Europa dell'energia elettrica prodotta.

Gli impianti solari termodinamici o **CSP** (Concentrated Solar Power) sfruttano l'energia solare come unica o principale fonte di calore per la produzione di energia elettrica. Essi utilizzano opportuni sistemi ottici (concentratori) per raccogliere e concentrare la radiazione solare diretta e inviarla su un ricevitore, dove viene assorbita e trasformata in calore ad alta temperatura, che, trasferito ad un fluido termovettore, può essere impiegato in un ciclo termico per la produzione di energia elettrica o come calore di processo in vari impianti industriali.

L'attività di ricerca sul solare termodinamico si pone come obiettivo primario la riduzione i costi, rendendo gli impianti CSP, sia di grande che di piccola taglia, sempre più competitivi rispetto quelli tradizionali a combustibili fossili, e dovrà essere finalizzata non solo al miglioramento dell'efficienza dei principali componenti e sistemi, ma anche alla semplificazione impiantistica e delle procedure di gestione e manutenzione.

Negli attuali impianti solari è quasi sempre presente un sistema di accumulo termico (**TES** – Thermal Energy Storage) che consente di migliorarne il funzionamento, aumentarne la capacità operativa e quindi ridurre il costo finale dell'energia prodotta. Sino ad oggi, il mezzo, migliore e meno costoso, per accumulare calore sensibile ad alta temperatura è stato individuato nei sali fusi. In genere tali mezzi di accumulo hanno una capacità termica piuttosto limitata e necessitano di grandi volumi. Le elevate dimensioni dei contenitori necessari ad ospitare i mezzi di accumulo e le elevate superfici di scambio degli stessi incrementano inevitabilmente sia il costo che le perdite del sistema.

Per ridurre il costo e le dimensioni del sistema sono state proposte diverse soluzioni, alternative all'accumulo a calore sensibile. Quelle che sembrano essere le più appetibili sono connesse all'uso di materiali solidi a basso costo, come ad esempio cementi speciali, materiali inerti, oppure sfruttando il calore latente (materiali a cambiamento di fase, **PCM**). Le principali problematiche connesse a queste soluzioni, e che sino ad oggi ne hanno ridotto le potenzialità, sono spesso correlate alla ridotta capacità di trasporto del calore (diffusività termica). La possibilità dell'uso di materiali a cambiamento di fase, miscelati con una opportuna quantità di nano particelle sembrerebbe, sulla base di alcuni recenti studi, poter incrementare sia la capacità termica del mezzo che la sua diffusività.

Scopo, allora, della Linea Progettuale 2 (Solare Termodinamico) del Progetto B.1.3 (Energia elettrica da fonte solare) è di studiare e sviluppare, nel triennio 2012-2014, nuovi sistemi di accumulo termico per impianti CSP di piccola e media taglia, ma estendibili a taglie maggiori, basati sull'utilizzo di mezzi a cambiamento di fase (sali fusi) miscelati con opportune nanoparticelle. Tali sistemi dovranno essere efficienti, compatti ed economici.

Durante il Piano Annuale di Ricerca del 2012 (PAR 2012) si sono sviluppati e caratterizzati nuovi mezzi di accumulo, da impiegare come sistemi alternativi di accumulo termico, costituiti da una miscela di PCM e nanoparticelle. In particolare, per diverse temperature di riferimento, sono stati individuati e caratterizzati sia i PCM che le nanoparticelle, compatibili con essi e potenzialmente in grado di incrementarne le caratteristiche di capacità e diffusività termiche, studiate le caratteristiche delle miscele e valutata l'influenza delle nanoparticelle sulle loro proprietà.

Per il PAR 2013, nell'ambito dello sviluppo di sistemi alternativi di accumulo termico, saranno, invece, condotte le seguenti attività.

Un mezzo di accumulo a calore latente con temperatura di fusione prossima ai 200-250°C verrà selezionato, prodotto nelle opportune quantità, e completamente caratterizzato, con particolare riferimento alla diffusività/conducibilità termica, alla sua stabilità nel tempo (durabilità) ed a tutte quelle proprietà fisiche e termo-meccaniche necessarie (es. densità, variazione di volume al cambio di fase, coefficiente di dilatazione termica, pressione di vapore) nonché alla sua compatibilità con i materiali di contenimento (corrosione). Particolare attenzione dovrà essere posta nella scelta di un metodo di produzione del nanoPCM, che sia in grado di fornire in tempi brevi le quantità richieste (semi-industriale) mantenendo inalterate le caratteristiche del prodotto (rispetto dei protocolli).

Tali caratteristiche permetteranno la concezione e lo sviluppo di un sistema di accumulo di dimensioni più compatte e con uno scambio termico efficiente. La progettazione di questo elemento base e la sua caratterizzazione sperimentale costituiranno i principali obiettivi della seconda fase di questa attività. Perciò, sarà scelta una tipologia di sistema di accumulo di riferimento e studiato il suo comportamento sia termico che termo-meccanico attraverso opportuni modelli di simulazione. Conseguentemente verrà progettato un sistema di accumulo elementare e, quindi, la relativa sezione di prova.

Al fine di confrontare tale sistema a calore latente saranno svolte analoghe attività finalizzate alla realizzazione di un sistema di accumulo a calore sensibile utilizzando dei cementi appositamente sviluppati.

Le attività Enea relative alla selezione e caratterizzazione ed alla compatibilità chimica con i materiali di contenimento di una miscela di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle per lo sviluppo di un sistema di accumulo termico nell'intervallo di temperature 200-250°C sono state svolte e descritte in un precedente documento (rif. 1). In esso, si è identificato come adeguato un mezzo costituito da una miscela binaria di sali ($\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$) cui si è aggiunta una piccola quantità (1%wt) di nanoparticelle di SiO_2 e Al_2O_3 .

In questo documento si riportano le attività svolte da Enea relative allo studio ed alla progettazione di un sistema elementare di accumulo termico a cambiamento di fase funzionante a media temperatura (circa 250°C) e della sezione di prova necessaria alla verifica delle condizioni di scambio termico che si instaurano nello stesso.

In particolare, si è proceduto a:

- Scegliere un tipo di accumulatore a calore latente da realizzare: in questa fase il tipo di scambiatore da utilizzare è di tipo "tubo e guscio" con un fluido termovettore (HTF) che scorre internamente al tubo.
- Sviluppare dei modelli di simulazione dei transitori termici: sono stati sviluppati una serie di modelli numerici per la simulazione del sistema accumulo elementare a calore latente, sia di tipo semplificato che di dettaglio, per effettuare analisi termiche ed indagini parametriche del componente, e prevederne le prestazioni.
- Progettare dei sistemi di accumulo elementari: sulla base delle analisi numeriche effettuate si sono dimensionate le varie tipologie di accumulo elementare da indagare e si sono preparati i disegni da poter inviare in officina.
- Progettare la sezione di prova: sulla base delle caratteristiche termiche degli accumulatori elementari progettati si è eseguita la progettazione di una sezione di prova che rispondesse alle esigenze termo-fluidodinamiche connesse alle fasi di carico e scarico del sistema di accumulo.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

La presente attività di ricerca sui sistemi di accumulo a calore latente nasce come naturale prosecuzione di un precedente progetto, denominato **SOLTECA** (rif. 2), dedicato allo sviluppo di sistemi di accumulo a calore sensibile utilizzando come mezzo di accumulo dei cementi appositamente sviluppati.

I sistemi di accumulo termico a calore latente, qui proposti devono essere in grado, funzionando nelle medesime condizioni e con una forma simile, di possedere una maggiore densità di energia accumulata e, quindi, di ridurre sensibilmente il volume occupato.

Lo sviluppo di sistemi di accumulo a calore latente, come indicato in Figura 1, passa attraverso due fasi distinte e ben definite:

- i) l'indagine sul materiale di accumulo da utilizzare e
- ii) lo sviluppo dello scambiatore di calore che utilizza detto materiale.

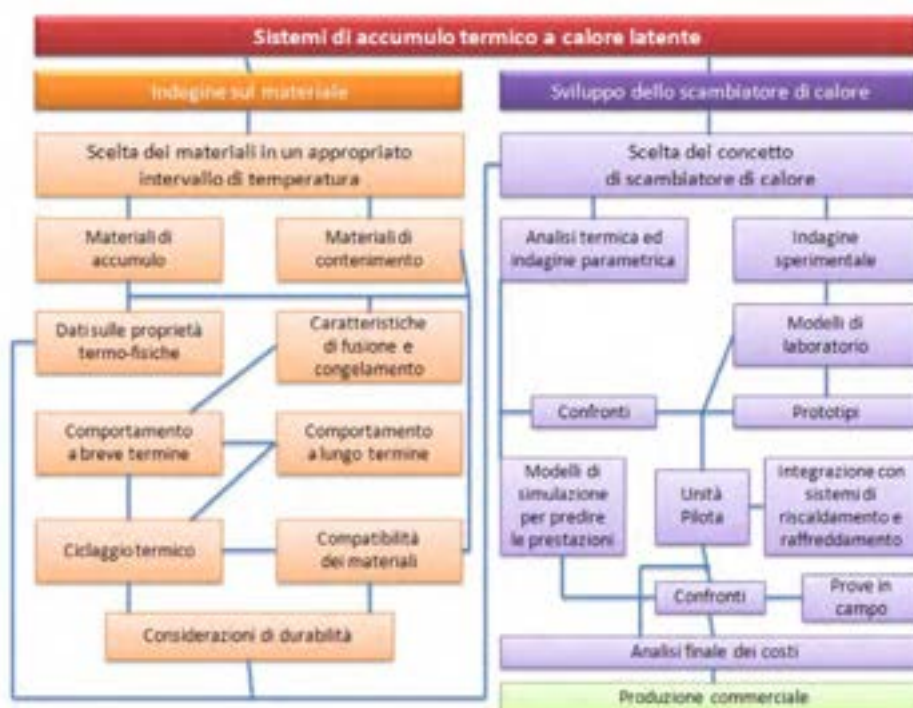


Figura 1- Schema di flusso rappresentante i vari passi che conducono allo sviluppo di un sistema di accumulo a calore latente

E' chiaro che la prima fase è quella fondamentale poiché condiziona significativamente la realizzazione dello scambiatore in funzione delle caratteristiche del mezzo di accumulo prescelto. Tale fase è stata già percorsa, in larga parte, durante il PAR 2012 ed ha condotto alla selezione di una serie di PCM di base e di nanoparticelle atte a ottenere dei mezzi di accumulo dalle caratteristiche desiderate [3, 4].

Le attività del PAR2013 saranno concentrate, invece, sulla seconda fase dello sviluppo di un sistema di accumulo a calore latente: lo sviluppo dello scambiatore di calore.

In particolare, ci si concentrerà su:

- La scelta del concetto di scambiatore di calore (elemento base di accumulo);
- L'analisi termica e l'indagine parametrica di un elemento base di accumulo;
- L'indagine sperimentale, comprensiva della progettazione di un elemento base di accumulo e della sezione di prova.

A tal fine si è deciso di sviluppare un sistema di accumulo che sia utilizzabile in sistemi di piccola taglia con temperature operative attorno ai 200-250°C. Il mezzo di accumulo sarà allora scelto in modo tale da avere una temperatura di fusione superiore a quella operativa e con buone caratteristiche termiche.

2.1 Il mezzo di accumulo a cambiamento di fase

La selezione del mezzo di accumulo è stata effettuata sulla base della temperatura di fusione richiesta e di altri criteri nella prima parte delle attività del PAR2013, riportate in [1].

Il mezzo di accumulo scelto è una miscela di sali costituita da nitrati di sodio (NaNO_3 60%wt) e potassio (KNO_3 40%wt), comunemente conosciuta come “sali solari”. Le sue principali caratteristiche termofisiche sono riportate in Tabella 1.

Proprietà	PCM base	nPCM
Densità (kg/m ³)	1850	1850
Conducibilità termica (W/m ² /°C)	0.5	0.5*
Calore latente (kJ/kg)	110	118
Calore specifico (J/kg/°C)	1700	2050
Temperatura di onset (°C)	219	218
Temperatura di endset (°C)	231	238
Temperatura media di fusione (°C)	225	228
* non disponibile ma supposta uguale al PCM base		

Tabella 1 – Caratteristiche fisiche dei sali solari di base e nano-caricati

Nella stessa tabella sono anche riportate le proprietà della stessa miscela con l’aggiunta del 1% di una miscela di nanoparticelle di silica e allumina ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$).

Le caratteristiche sopra esposte saranno utilizzate all’interno del presente lavoro al fine di studiare, progettare e valutare il comportamento termo-dinamico dell’elemento base di accumulo a calore latente.

2.2 Selezione del tipo di accumulo

Un contenimento per PCM dovrebbe avere le seguenti caratteristiche:

- (i) soddisfare i requisiti di resistenza, flessibilità, resistenza alla corrosione e stabilità termica;
- (ii) agire come barriera protettiva del PCM dall’interazione nociva con l’ambiente;
- (iii) fornire una sufficiente superficie per il trasferimento di calore;
- (iv) assicurare stabilità strutturale and facile manutenzione.

I tipi di contenitori studiati sino ad oggi sono ad **accumulo massivo in scambiatori di calore a tanca**, per **macroincapsulazione** e per **microincapsulazione**.

La Figura 2 mostra i vari schemi di contenimento utilizzati in sistemi di accumulo di energia termica a calore latente (LHTES).

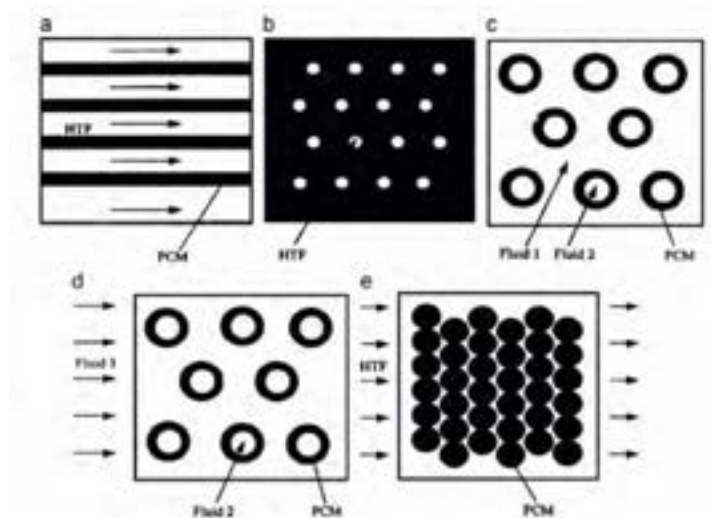


Figura 2 – Schema delle varie tipologie di sistemi LHTES: a) piastre piane; b) guscio e tubi a flusso interno; c) guscio e tubi a flusso parallelo; d) guscio e tubi a flusso perpendicolare; e) letto di sfere.

Il problema tecnologico maggiore per la realizzazione di sistemi di accumulo a calore latente ad alta temperatura è la conducibilità termica dei materiali a cambiamento di fase disponibili (Figura 3) che è insufficiente. I materiali più idonei forniscono una conducibilità di 0.5-1 W/m/K. Pertanto, il processo di progettazione dello scambiatore di calore è dominato dal compito di individuare soluzioni efficaci per aumentare l'effettiva conducibilità termica all'interno del materiale di accumulo.

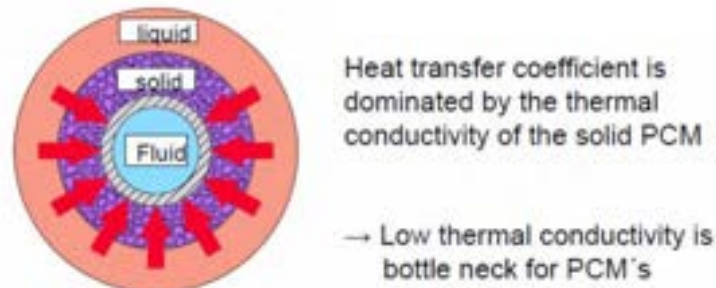


Figura 3 – Meccanismi di scambio termico tra HTF e PCM [5]

Mentre il PCM viene sempre utilizzato come materiale di accumulo separato dal fluido di lavoro, diverse soluzioni ([7],[12]) si possono applicare per aumentare il livello di potenza (Figura 4).

- Aumento dell'area di scambio del calore: l'area di contatto tra il PCM e il contenimento dell'HTF viene aumentata per ridurre la distanza di trasporto del calore all'interno del PCM. Possibili implementazioni di questo approccio utilizzano tubi alettati o capsule. Le pareti delle capsule possono essere sia flessibili che rigide per resistere ad una possibile differenza di pressione.
- Materiali compositi con maggiore conducibilità termica: un materiale che mostra una elevata conducibilità termica viene aggiunto al PCM. Il PCM può essere infiltrato in una matrice porosa costituita dal materiale aggiuntivo oppure i due componenti possono essere miscelati come polveri.
- Mezzo termovettore intermedio (liquido/gassoso): il PCM ed uno scambiatore di calore sono disposti in un contenitore riempito con un mezzo che trasferisce l'energia tra questi due componenti. Il trasporto di calore comporta un cambiamento di fase del fluido termovettore. La pressione del fluido termovettore è significativamente inferiore alla pressione del vapore nello scambiatore di calore; i costi per il contenimento esterno, possono essere ridotti in modo significativo rispetto a un sistema con uno scambiatore di calore a contatto diretto tra HTF e PCM.

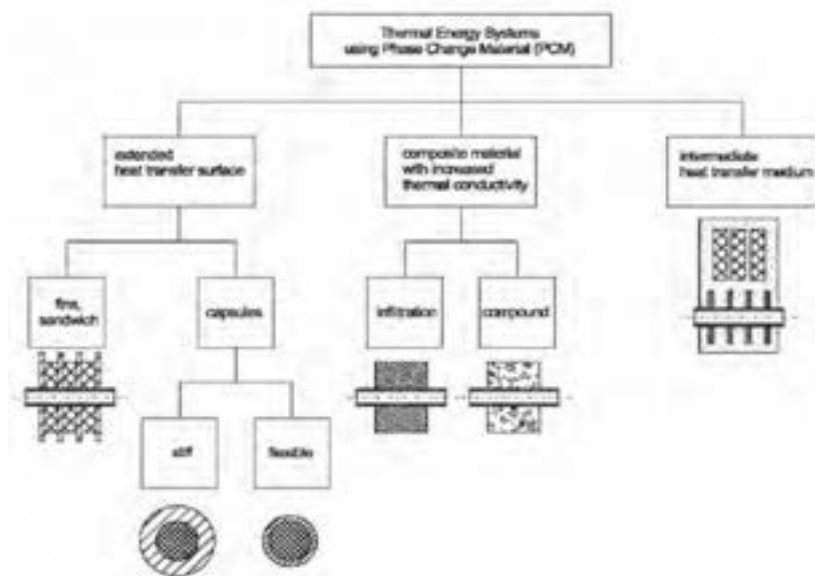


Figura 4 – Classificazione dei principali concetti per incrementare lo scambio termico nei PCM [7]

2.2.1 Aumento dell'area di scambio

2.2.1.1 Strutturazione a sandwich

Un altro approccio, per aumentare la conducibilità termica effettiva del PCM, è di integrare strati di materiali altamente conduttivi all'interno del PCM. Gli strati sono disposti nella direzione di trasporto del calore (Figura 5). L'applicazione di tubi con alette incorporate in un PCM è descritto come un concetto sandwich (Figura 6). Tale concetto è stato sviluppato poiché sembra essere l'opzione più promettente per realizzare sistemi di accumulo a calore latente efficienti ed a basso costo.[6],[8],[12]

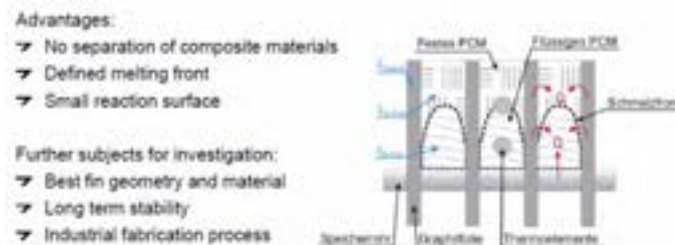


Figura 5 – Schema funzionale del concetto di accumulo LHTES a sandwich [5]

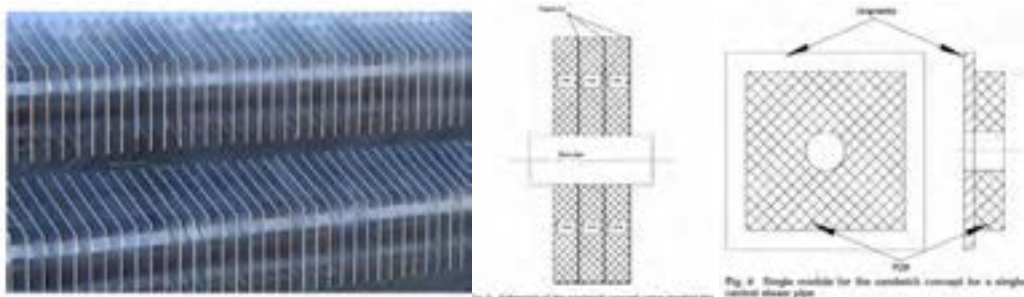


Figura 6 – Alettature per l'incremento dello scambio termico

La scelta dell'acciaio sarebbe una soluzione semplice in quanto i tubi di acciaio alettati sono componenti standard per gli scambiatori di calore. Invece, i fogli di grafite o alluminio vengono scelti come materiale per le alettature a causa della loro elevata conducibilità termica. Le alette in acciaio, per avere le stesse

prestazioni di trasporto di calore, rispetto alle alette realizzate in grafite o alluminio, richiedono un volume maggiore e, quindi, dei costi nettamente superiori, anche a causa della maggiore densità (Tabella 2).

	Graphite foil	Aluminum	Stainless steel	Carbon steel	Copper
Thermal conductivity (W/(m K))	150	200	20	30	350
Density (kg/m ³)	1000	2700	7800	7800	8800
Volume specific costs (estimated) (\$/m ³)	10,000	7000	20,000	15,000	40,000

Tabella 2 – Materiali utilizzabili per le alettature [8]

Il costo K di un sistema che trasporta un flusso di calore Q lungo una distanza L e una differenza di temperatura, T₁-T₂, è:

$$K = \frac{c\rho}{\lambda} \frac{QL^2}{(T_1 - T_2)}$$

con c i costi specifici di massa, ρ la densità e λ la conducibilità termica. In questo caso, i costi sono proporzionali al fattore cρ/λ. In Tabella 3, proprietà e costi associati ad alcuni materiali.

	Graphite foil	Stainless steel	Carbon steel
Density ρ (kg/m ³)	1000	7800	7800
Thermal conductivity (W/(m K))	150	20	30
Mass specific costs (€/t) (approximately)	10,000	2000	1500
$\frac{c\rho}{\lambda}$ (€/K/(W m ²)) (approximately)	66.7	780	390

Tabella 3 – Proprietà rilevanti per materiali utilizzati in sistemi LHTES sandwich

Il montaggio delle alette sui tubi è una questione fondamentale per il concetto di sandwich. Se il materiale delle alette è diverso dal materiale dei tubi aspetti quali la diversa dilatazione termica o la corrosione galvanica devono essere considerati.

L'applicazione di alette fatte di grafite espansa offre diversi vantaggi, oltre una buona conducibilità termica (150W/m/K). La grafite espansa ha una buona stabilità chimica con i nitrati e i nitruri a temperature fino a 250°C e la corrosione galvanica non si verifica nel contatto con i tubi di acciaio. Poiché lamine grafite mostrano una elevata flessibilità e sono spesso usate come materiale di tenuta, può essere facilmente realizzato uno stretto contatto tra i tubi e le alette [8]. Il prezzo specifico più elevato, rispetto l'acciaio inossidabile od al carbonio, è largamente compensato dalla sua bassa densità ed alta conducibilità termica (Figura 7).

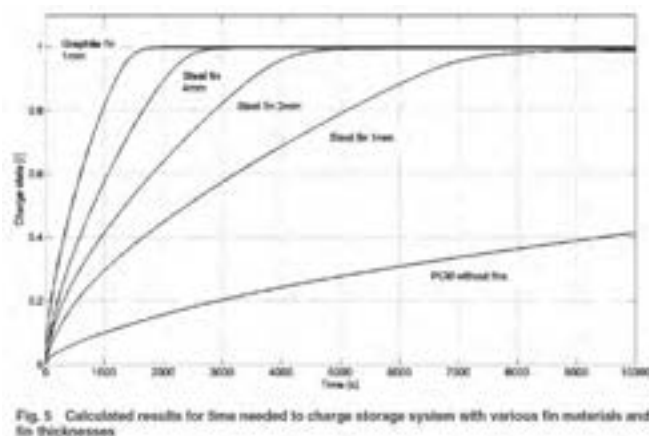


Figura 7 – Valutazione del tempo di carica richiesto per caricare un accumulo sandwich con alette di vari materiali e spessori

Comunque, la grafite è stabile con i nitrati solo al di sotto dei 250°C. Per applicazioni con temperature più elevate, è necessario utilizzare alette metalliche [12].

In Figura 8 sono mostrate alcune applicazioni sia di prova che semi-industriali di questo concetto.



Figura 8 – Applicazione del concetto di LHTES sandwich: schema, modulo di prova, modulo per sistemi LHTES [6][8][10]

2.2.1.2 Macroincapsulamento

Una seconda soluzione è quella di impacchettare il PCM all'interno di capsule (Figura 9) al fine di ridurre la distanza massima per il trasporto del calore ovvero per aumentare l'area dello scambio termico: tale concetto è detto **macro-incapsulamento** del mezzo di accumulo.

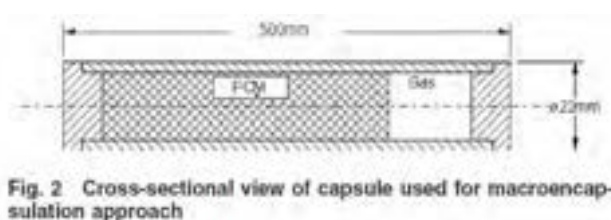


Figura 9 – Sezione trasversale di una capsula per macro-incapsulamento dei PCM [12]

In Figura 10 è mostrato un esempio di LHTES a macrocapsule utilizzato in un esperimento in scala di laboratorio: le capsule cilindriche hanno una lunghezza di 0.5 m e un diametro di 15–25 mm e sono state riempite con un eutettico $\text{NaNO}_3\text{--KNO}_3$. Le capsule sono disposte in parallelo ed integrate all'interno di un serbatoio.

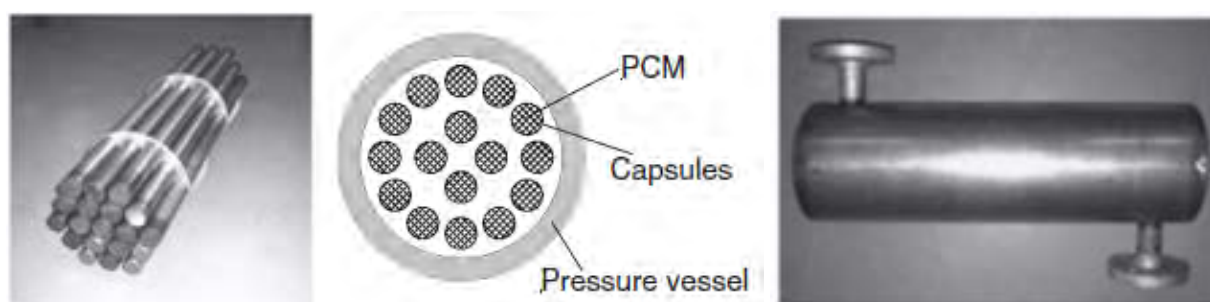


Figura 10 – Raggruppamento di capsule di PCM e contenitore esterno [8]

A causa delle variazioni di volume specifico che possono raggiungere fino al 10% durante il cambiamento di fase, i tubi non sono riempiti completamente con il PCM. Una frazione volumetrica di gas di circa il 20% è richiesta all'interno delle capsule rigide per limitare l'aumento di pressione durante la fusione del PCM, come mostrato in Figura 11.

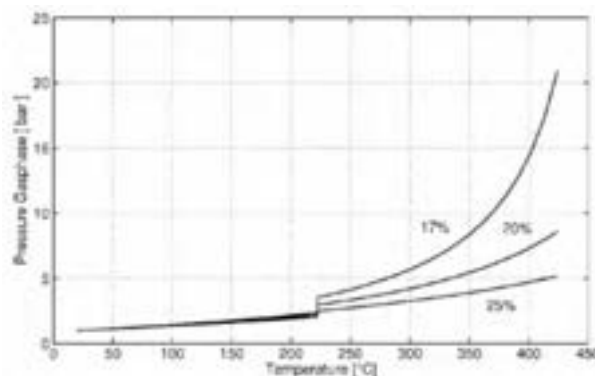


Figura 11 – Pressione nelle capsule in funzione della temperatura e del volume iniziale del gas

A causa del comportamento corrosivo di alcuni sali PCM, è necessario prevedere un certo spessore minimo della parete ed evitare un incapsulamento di tipo flessibile.

Comunque, questo concetto non viene considerato una soluzione promettente a causa, soprattutto, ad alcuni aspetti economici, dovuti ai seguenti svantaggi [12]:

- La quantità di materiale necessario per le capsule in pressione è significativa, se si utilizza un acciaio. La massa di acciaio è quasi equivalente alla massa di PCM;
- La frazione di volume di PCM nel serbatoio in pressione può essere inferiore al 40%;
- La procedura di riempimento e sigillatura con PCM fuso è complessa;
- Deve essere evitata una contaminazione del fluido HTF con il PCM a causa di perdite dalle capsule; questo richiede elevati standard di qualità con un conseguente ulteriore aumento dei costi.

2.2.1.3 Materiali compositi con maggiore conducibilità termica

I concetti di accumulo con PCM devono superare le limitazioni causate dalla loro bassa conducibilità termica, prendere in considerazione la variazione di volume al cambiamento di fase e portare ad unità di accumulo con alto rapporto efficienza-costi.

Ci sono due principali approcci:

- Aumento della superficie di scambio del calore;
- Aumentare della effettiva conducibilità termica.

La conducibilità termica può essere migliorata utilizzando dei materiali compositi in cui si combinano la proprietà di un elevato calore latente di un PCM con quella di una buona conducibilità termica di un additivo. Detti materiali compositi sono fabbricati in blocchi e successivamente assemblati insieme con l'insieme dei tubi (Figura 12).

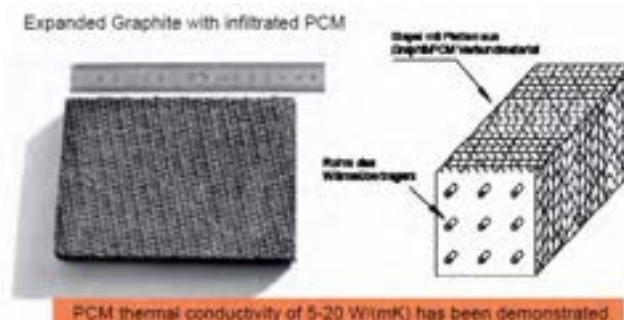


Figura 12 – Esempio di materiale composito con PCM e suo assemblaggio [5]

Se si opera in un intervallo di temperature 120–300°C, vengono correntemente utilizzati dei nitrati o nitriti e differenti tipi di grafite. La grafite è stata scelta a causa della sua elevata conducibilità termica e stabilità chimica. L'obiettivo è, in genere, di ottenere un materiale composito con una conducibilità termica effettiva

nell'intervallo $5\text{--}15\text{W(mK)}^{-1}$ usando una piccola quantità di grafite per ottenere un'alta capacità ed un basso costo del sistema di accumulo a PCM. La frazione di massa di grafite influenza significativamente la conducibilità termica efficace (Figura 13).

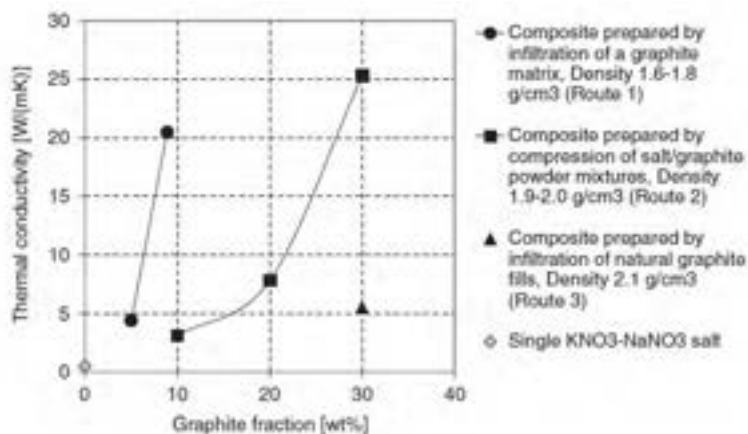


Figura 13 – Conducibilità termica di vari compositi grafite/sali rapportata ai soli sali

Il materiale composito è prodotto da compressione di una miscela di polveri di eutettico $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ e grafite espansa (Figura 14).

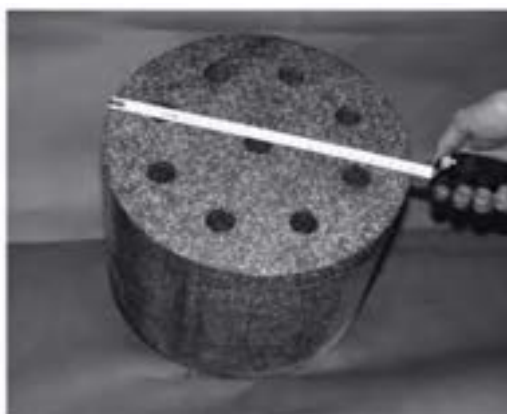


Figura 14 – Elemento di accumulo in PCM/composito in scala di laboratorio [6]

Lo sviluppo di un materiale di accumulo efficiente richiede la limitazione del contenuto di grafite per quanto riguarda i costi del materiale (rapporto tra i costi specifici di massa espansi grafite/PCM: circa 20:01) e la riduzione della capacità di accumulo volumetrica.

Un aspetto importante è anche il comportamento ciclico del materiale composito. La separazione dei componenti non deve essere il risultato di ripetuti carica/scarica.

Infatti, durante alcuni esperimenti documentati in letteratura [12], ha avuto luogo una significativa perdita di PCM, circa il 40% del sale nitrato si è separato dalla grafite. Esistono diverse possibili cause per la perdita sale del modulo di accumulo.

Queste cause includono la richiesta di un volume vuoto per l'espansione del sale, il degassamento causato dalle impurità e dall'umidità presente nei sali e la scarsa testabilità di sali nitrati di metalli alcalini su grafite e la loro buona bagnabilità delle superfici metalliche (tendenza allo strisciamento). Probabilmente la dispersione del sale è stata causata da una combinazione di questi fenomeni critici. La fattibilità dell'approccio con il materiale composito non può essere finora provata per i sali nitrati.

2.2.2 Scelta del tipo di accumulatore a calore latente da realizzare

Alla luce di quanto sopra esposto, è evidente che il tipo di accumulatore termico a calore latente di forma più semplice e, quindi, facilmente realizzabile è quello di tipo “tubo e guscio”, in cui il fluido termovettore (HTF) scorre all’interno del tubo.

Naturalmente, se il mezzo di accumulo non ha delle caratteristiche di diffusività termica sufficiente a garantire dei tempi di carica del sistema contenuti, sarà necessario prevedere un incremento della superficie di scambio termico attraverso l’utilizzo di un tubo opportunamente alettato (“sandwich”), in luogo di uno liscio (Figura 15).



Figura 15 – Esempio di tubo alettato da inserire all’interno di un contenitore (guscio) cilindrico

Il tubo ed il contenitore dei sali binari potrà essere realizzato in acciaio AISI 316 che, come mostrato nel documento [1], presenta elevate caratteristiche di compatibilità chimica con il mezzo di accumulo utilizzato.

Il resto della sezione di prova potrà essere realizzato sempre in acciaio AISI 316 o, viste le temperature non elevate, con un semplice acciaio al carbonio.

2.3 Progettazione degli accumulatori elementari

Oggetto del presente paragrafo è lo studio e la progettazione di elementi base di accumulo termico utilizzando materiali a cambiamento di fase (PCM) del tipo guscio e tubo ("shell and tube") da utilizzare nell'ambito delle attività che si riferiscono al PAR 2013 attività B.1.3 linea progettuale 2 dell'Accordo di Programma tra Enea e MISE.

2.3.1 Descrizione

Gli elementi di accumulo a PCM del tipo guscio e tubo sono costituiti in generale da un tubo di acciaio al cui interno scorre il fluido termovettore. Esternamente al tubo è posto un contenitore metallico cilindrico destinato a contenere il materiale di accumulo a cambiamento di fase (Figura 16 – (a)).

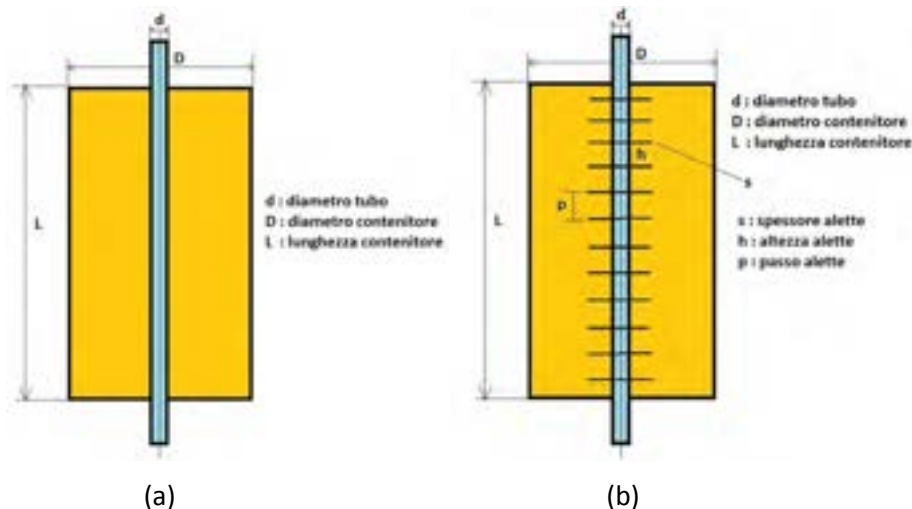


Figura 16- Schema di elemento di accumulo termico guscio-tubo (a) senza alette e (b) con alette.

La dimensione del tubo (diametro) influenza le modalità di scambio termico tra fluido termovettore e tubo e determina la superficie di scambio termico tra tubo e materiale di accumulo. La dimensione esterna del contenitore metallico è funzione della quantità di materiale di accumulo utilizzato, ovvero della capacità termica richiesta all'elemento, ed influenza i tempi di carica relativa all'elemento stesso, dipendenti dalla bassa diffusività del mezzo di accumulo. Spesso per aumentare le capacità di trasmissione termica del calore nel mezzo di accumulo si utilizzano diversi metodi di promozione della diffusività termica. Uno di questi consiste nell'utilizzo di un tubo alettato invece che liscio (Figura 16 – (b)). In questo paragrafo saranno prese in considerazione entrambe le configurazioni sopra descritte.

2.3.2 Criteri di progettazione

Per progettare l'elemento di accumulo a calore latente (PCM) si farà riferimento ad una serie di criteri mutuati da un elemento di accumulo a calore sensibile in cemento testato in Enea nell'ambito di precedenti progetti (Solteca). Tali elementi in cemento, di altezza (L) 500 mm e diametro (D) 100 mm, operanti nell'intervallo di temperatura 200-250°C, hanno evidenziato una capacità di accumulo pari a circa **183 Wh** con tempi di carica di circa **6 ore**. In Tabella 4 e Figura 17 sono riportati i principali dati e risultati relativi alla simulazione FEM di un elemento di accumulo a calore sensibile in cemento.

In conformità a questi dati si è allora deciso che le specifiche di base per un elemento di accumulo a calore latente dovranno essere quelle riportate in Tabella 5, dove il diametro del tubo è stato aumentato sia per incrementare la superficie di scambio tra tubo e PCM e sia per uniformarsi alla tipologie disponibili di forniture di tubi alettati.

DATI		RISULTATI	
Diametro tubo	11 mm	Capacità lineica	366 Wh/m
Diametro esterno cemento	100 mm	Capacità volumetrica	47 kWh/m ³
Densità cemento	2620 kg/m ³	Capacità Massica	18 Wh/kg
Conducibilità cemento	1.1 W/m ² /°C	Capacità per L=500mm	183 Wh
Calore specifico cemento	650 J/kg/°C	Tempo di carica (95%)	6 ore
Temperatura operativa minima	180 °C	Perc. calore accumulato	99.6 %
Temperatura operativa massima	280 °C		
Coeff. scambio convettivo olio	170 W/m ² /°C		

Tabella 4 – Dati e risultati della simulazione di un elemento di accumulo in cemento

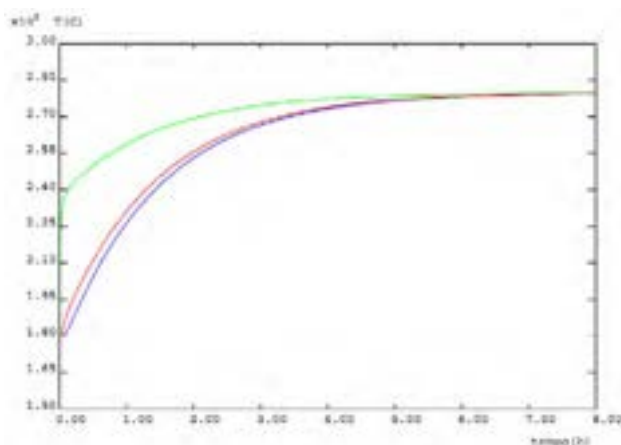


Figura 17- Elemento di accumulo in cemento: evoluzione della temperatura in corrispondenza del raggio interno, di quello esterno e di un punto intermedio.

Altezza (L)	500 mm
Diametro esterno tubo (d)	16 mm
Capacità termica	> 200 Wh
Tempo di carica	< 6 ore
Temperatura operativa minima	180 °C
Temperatura operativa massima	280 °C
Temperatura di fusione	220 °C

Tabella 5 – Dati di progetto per un singolo elemento di accumulo a calore latente

2.3.3 Analisi di sensibilità

Come si evince dalla Figura 16, i parametri fondamentali da analizzare, al fine di progettare un elemento di accumulo che abbia le caratteristiche desiderate (Tabella 5) sono il diametro esterno del guscio e le dimensioni delle eventuali alette (spessore, altezza e passo). Queste caratteristiche influenzano sia la capacità di accumulo che il tempo di carico/scarico dell'elemento. Per determinare il loro grado di influenza si è allora effettuata una analisi di sensibilità i cui risultati sono qui di seguito riportati ed analizzati. Le analisi sono state eseguite utilizzando il codice agli elementi finiti (FEM) Cast3M ed un modello bidimensionale a simmetria assiale.

2.3.3.1 Il fluido termovettore: l'olio diatermico

Il fluido termovettore che si pensa di utilizzare per questo tipo di prove è un olio diatermico. Nel circuito in fase di realizzazione si intende arrivare a condizione di deflusso dell'olio che siano completamente turbolente realizzando delle condizioni di scambio termico olio-tubo governare da un coefficiente di scambio termico di circa **1000 W/m²/°C**. Invece, nei test di riferimento, utilizzanti sistemi a calore sensibile in cemento, le

condizioni fluidodinamiche erano intermedie tra il deflusso laminare e quello turbolento. In questo caso il coefficiente di scambio termico olio-tubo è di circa **170 W/m²/°C**.

2.3.3.2 Confronto PCM-cemento

Il primo passo è stato quello di analizzare cosa accade se al sistema a calore sensibile in cemento si sostituisce un sistema a calore latente con sali solari. Naturalmente le caratteristiche geometriche ed operative rimangono inalterate rispetto a quelle riportate in Tabella 4. In Tabella 6 sono, allora, riportati i principali risultati del confronto tra le due situazioni e in Figura 18 i grafici relativi, rispettivamente, all'andamento radiale della temperatura iniziale e finale, distribuzione radiale della temperatura finale e all'evoluzione temporale delle temperature lato tubo, lato guscio e intermedia.

RISULTATI	CEMENTO	PCM
Capacità lineica (Wh/m)	366	852
Capacità volumetrica (kWh/m ³)	47	110
Capacità Massica (Wh/kg)	18	59
Capacità per L=500mm (Wh)	183	426
Tempo di carica (95%) (ore)	6	>10
Perc. calore accumulato (%)	99.6	61.0

Tabella 6 – Risultati del confronto tra sistemi di accumulo a cemento e PCM

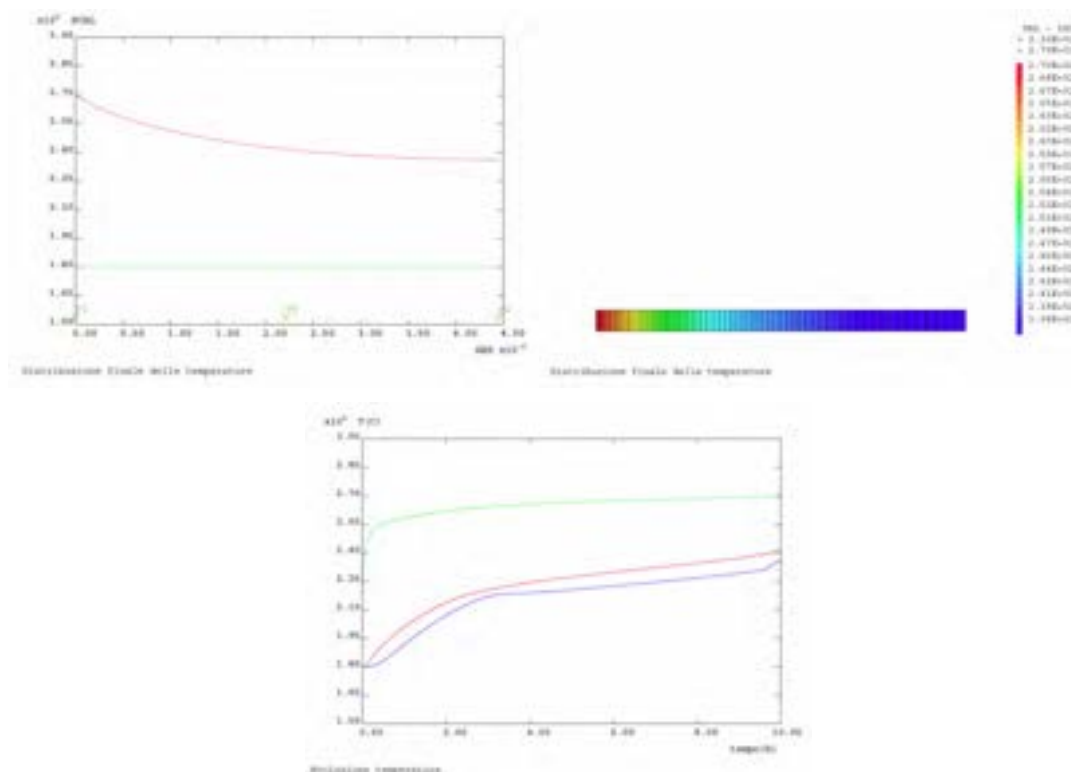


Figura 18- Risultati elemento di accumulo con PCM per confronto con cemento

Dall'analisi di questi dati si evince che:

- La capacità di accumulo sia lineica che volumetrica dell'elemento con PCM è più che raddoppiata rispetto quella dell'elemento in cemento;
- La capacità di accumulo massica del PCM è, invece, circa il triplo di quella del cemento;
- Mentre l'elemento in cemento si carica quasi completamente in circa 6 ore, quello con il PCM in circa 10 ore arriva appena sopra il 60%.

E' allora chiaro che, mantenendo le stesse caratteristiche degli elementi in cemento, i nuovi elementi a calore latente, a fronte di una capacità di accumulo largamente superiore, presentano il problema di avere tempi di carica del sistema troppo lunghi. Per ovviare a questo problema si può agire per due vie:

- Ridurre le dimensioni esterne del guscio: in tal modo si riduce la quantità di energia termica accumulata ma si riduce anche il tempo di trasporto del calore verso l'esterno;
- Aumentare la superficie di scambio termico tubo-PCM: ciò può avvenire sia incrementando le dimensioni del tubo che inserendo sistemi di promozione dello scambio stesso (es.: alette).

2.3.3.3 Effetto dei principali parametri sul tempo di carica

Tenendo conto delle conclusioni del paragrafo precedente e di quanto è in genere disponibile sul mercato, si è deciso di utilizzare le seguenti dimensioni di riferimento per un "ideale" elemento di accumulo a PCM:

- *Diametro esterno del contenitore:* 30 mm;
- *Altezza delle alette:* 10 mm;
- *Spessore delle alette:* 0.4 mm;
- *Passo delle alette:* 10 mm;

Da questa configurazione base sono stati fatti variare tutti i parametri base del sistema al fine di verificarne l'influenza sulla capacità di accumulo e sui tempi di carica dell'elemento. In Tabella 7 è riportato l'elenco dei casi presi in considerazione: chiaramente, il caso base sarà ancora quello relativo a un tubo liscio (senza alette). La dimensione del tubo e tutte le caratteristiche di calcolo sono conformi a quanto indicato in Tabella 4 e Tabella 5.

Caso	Descrizione sintetica
0	Caso base senza alettatura (altezza aletta 1mm)
1	Come il caso 0 ma con aletta alta 10 mm
2	Come il caso 0 ma con aletta alta 20 mm
3	Come il caso 0 ma con h 1000 W/m ² /°C
4	Come il caso 1 ma con h 1000 W/m ² /°C
5	Come il caso 2 ma con h 1000 W/m ² /°C
6	Come il caso 1 ma con spessore alette 0.8 mm
7	Come il caso 1 ma con spessore alette 1.0 mm
8	Come il caso 1 ma con passo alette 8 mm
9	Come il caso 1 ma con passo alette 12 mm
10	Come il caso 1 ma con raggio esterno del contenitore di 35 mm
11	Come il caso 1 ma con raggio esterno del contenitore di 40 mm

Tabella 7 – Elenco dei casi considerati per una analisi di sensibilità dell'elemento a PCM

I principali risultati dell'analisi di sensibilità eseguita sono stati riportati in Tabella 8 e mostrati graficamente, per quanto concerne il tempo di carica, in Figura 19, raggruppandoli per tipologia di parametro: (a) altezza dell'aletta, (b) spessore dell'aletta, (c) passo dell'aletta e (d) raggio esterno del guscio. Il parametro che influenza maggiormente i tempi di carica dell'elemento è senza dubbio il **raggio**

esterno del guscio contenente il PCM. Infatti, nel Caso4, con un tubo avente alette alte 10mm ed un raggio del guscio pari a 30mm, il tempo di carica è circa 1.7 ore. Se si incrementa il raggio del guscio a 35 (Caso10) e 40 (Caso11) mm si avranno tempi dell'ordine rispettivamente di 2.9 (+70%) e 4.5 (+165%) ore. In corrispondenza incrementerà anche la capacità termica che da 377 Wh/m passerà a 520 (+38%) e 690 (+83%) Wh/m. Naturalmente, i tempi di carica potrebbero essere alterati dalla presenza di elementi di promozione della conducibilità termica, le alette, che, invece, non cambiano sostanzialmente la capacità di accumulo dell'elemento. I casi da 3 a 9 dimostrano come, con differenti tipi di alettature, la capacità termica vari solo di un 3% massimo mentre i tempi di carica possono variare al massimo del 75%. Analizzando, invece, l'influenza dei **parametri caratteristici delle alette** si può osservare quanto segue:

- la variazione dello spessore delle alette ed il loro passo non alterano significativamente i tempi di carica del sistema;
- l'altezza delle alette ha invece un'influenza più marcata che però si evidenzia maggiormente per valori bassi mentre è meno marcata per successivi incrementi.

In altre parole, è "efficace" la semplice presenza di un'alettatura, anche se questa non copre tutta o larga parte della sezione disponibile. Da esplicitare, inoltre, che nelle simulazioni è stato indagato anche un ulteriore parametro: il **coefficiente di scambio termico tra olio e tubo**: sono stati considerati due valori distinti uno tipico di un deflusso sostanzialmente laminare (170 W/m²/°C), cosa che avveniva durante le prove con elementi in cemento, e l'altro caratteristico di un deflusso completamente turbolento (1000 W/m²/°C), condizione che dovrebbe essere realizzata nel nuovo impianto in via di progettazione. E' evidente che uno scambio termico migliorato agisce direttamente sulla dinamica termica e quindi sui tempi di carica del sistema. Infatti, nei casi 3, 4 e 5 di regime turbolento, rispetto ai relativi casi di regime laminare, si hanno riduzioni dei tempi di carica di circa il 27%, il 36% e il 45% rispettivamente. In **conclusione**, le indicazioni che si possono ricavare dalla precedente analisi di sensibilità degli elementi di accumulo a calore sensibile sono che:

- si dovrebbe adottare un impianto di prova il cui fluido termovettore si a caratterizzato da un deflusso di tipo turbolento;
- una alettatura di 10 mm dovrebbe essere in grado di promuovere sufficientemente la diffusività del sistema e contenere i tempi di carica;
- il guscio esterno dovrebbe avere delle dimensioni prossime ai 70 mm di diametro, che permetterebbero dei tempi di carica di 3 ore circa.

	Alt. alette	Spes. alette	Pas. alette	Rag. Est.	Coeff. Sc. termico	Cap. lineare	tempo carica
Caso	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(W/m ² /°C)	(Wh/m)	(hr)
0	1	0.4	10	30	170	377.6	4.076
1	10	0.4	10	30	170	373.2	2.914
2	20	0.4	10	30	170	364.9	2.559
3	1	0.4	10	30	1000	377.6	2.917
4	10	0.4	10	30	1000	373.2	1.755
5	20	0.4	10	30	1000	364.9	1.500
6	10	0.8	10	30	1000	368.5	1.478
7	10	1.0	10	30	1000	366.2	1.377
8	10	0.4	8	30	1000	372.0	1.617
9	10	0.4	12	30	1000	374.0	1.872
10	10	0.4	10	35	1000	520.1	2.952
11	10	0.4	10	40	1000	689.6	4.542

Tabella 8 – Principali risultati dell'analisi di sensibilità dell'elemento a PCM

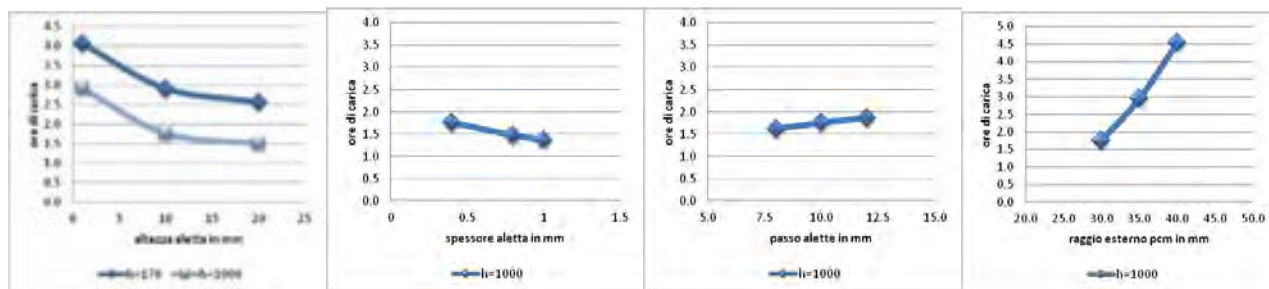


Figura 19- Risultati analisi di sensibilità

2.3.4 Progettazione

2.3.4.1 Specifiche di progetto e dimensionamento

Sulla base delle valutazioni tecniche e delle analisi di sensibilità effettuate nei paragrafi precedenti, per la progettazione dell'elemento base di accumulo a calore latente, da poter utilizzare nelle prove sperimentali, sono state formulate le seguenti specifiche:

Dimensioni tubo:

Raggio esterno tubo: 16 mm
Spessore tubo: 1 mm

Dimensioni guscio:

Raggio interno guscio: 35 mm
Spessore guscio: 2 mm
Altezza guscio: 500 mm

Dimensioni alette:

Passo delle alette: 10 mm
Spessore delle alette: 0.4 mm
Altezza delle alette: 10 mm

Intervallo operativo di temperatura:

Temperatura minima: 200 °C
Temperatura massima: 260 °C

Mezzo di accumulo:

Sali solari (NaNO₃-KNO₃):
Densità: 1850 kg/m³
Conducibilità termica: 0.5 W/m²/°C
Calore specifico: 1700 J/kg/°C
Calore latente: 110 kJ/kg
Temperatura di fusione: 225 °C
Temperatura di onset: 219 °C
Temperatura di endset: 231 °C

Acciaio:

AISI 316
Densità: 7800 kg/m³
Conducibilità termica: 20 W/m²/°C
Calore specifico: 500 J/kg/°C

Caratteristiche di accumulo:

(vedi paragrafo successivo)

Capacità termica: 198 Wh
Tempo di carica senza alette: 5.3 ore
Tempo di carica con alette: 3.3 ore

2.3.4.2 Valutazioni termiche

Utilizzando i dati relativi alle specifiche di progetto, sono state effettuate alcune valutazioni aggiuntive riguardanti l'elemento di accumulo in esame. I calcoli sono stati condotti per due differenti configurazioni: una utilizzando un tubo liscio (Caso A) e l'altra un tubo alettato (Caso B). In Tabella 9 sono riportati i principali risultati ottenuti.

Nelle figure da Figura 20 a Figura 27 e da Figura 28 a Figura 35 sono riportati, rispettivamente per i casi A e B, le geometrie, gli andamenti di temperatura e del fronte di fusione e l'evoluzione dell'energia accumulata.

RISULTATI	Caso A	Caso B
Capacità lineica (Wh/m)	397.3	393.8
Capacità volumetrica (kWh/m ³)	109	109
Capacità Massica (Wh/kg)	58.9	58.9
Capacità per L=500mm (Wh)	197	195
Tempo di carica (95%) (ore)	5.3	3.3
Perc. calore accumulato (%)	99.98	100.0

Tabella 9 – Risultati del confronto tra sistemi di accumulo a cemento e PCM

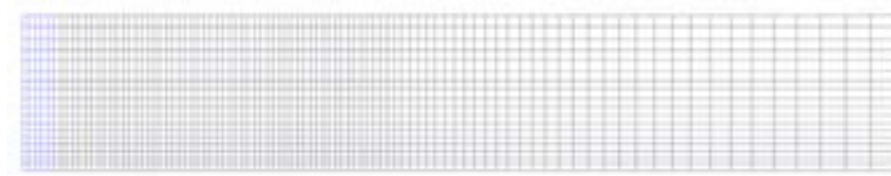


Figura 20- Caso A: Geometria di calcolo e discretizzazione FEM

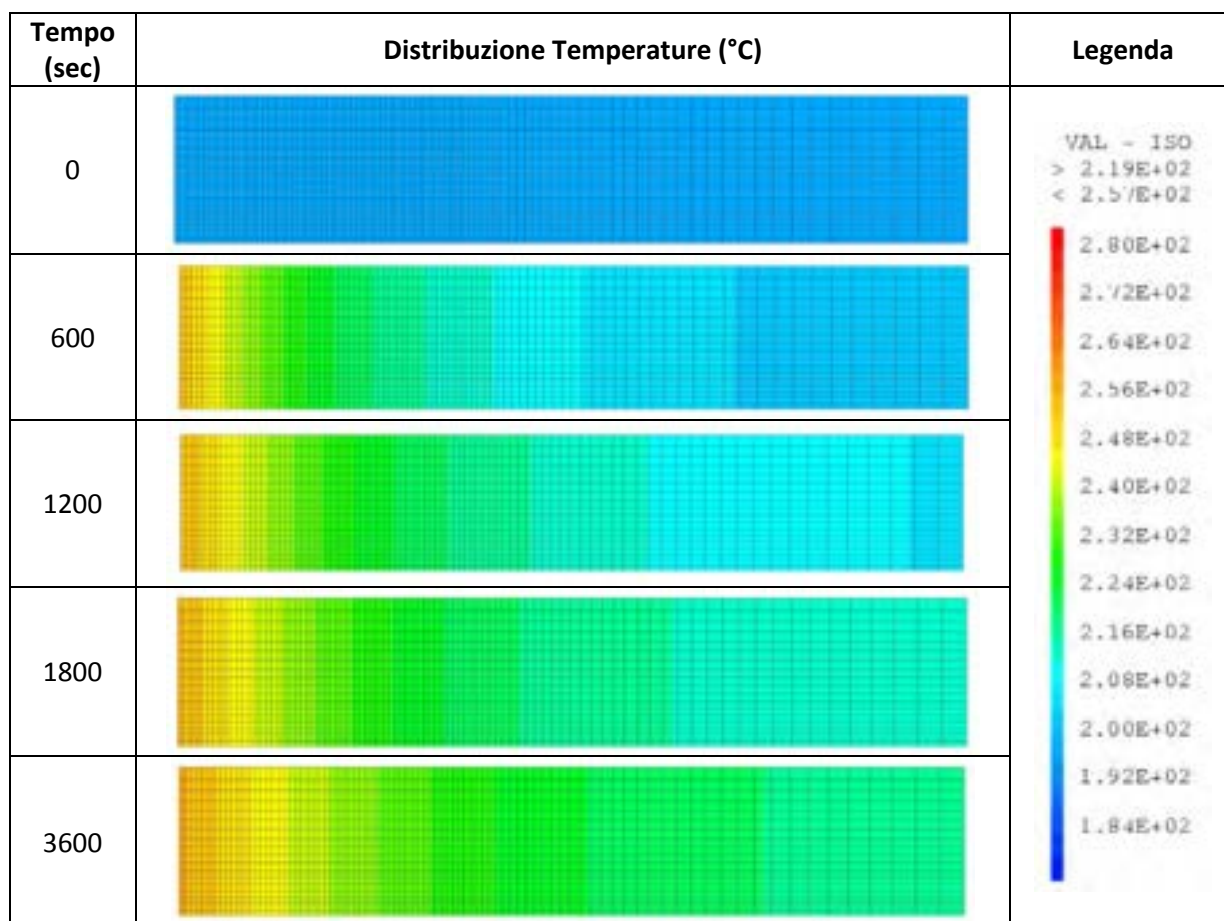


Figura 21- Caso A: avanzamento del fronte termico nella prima ora

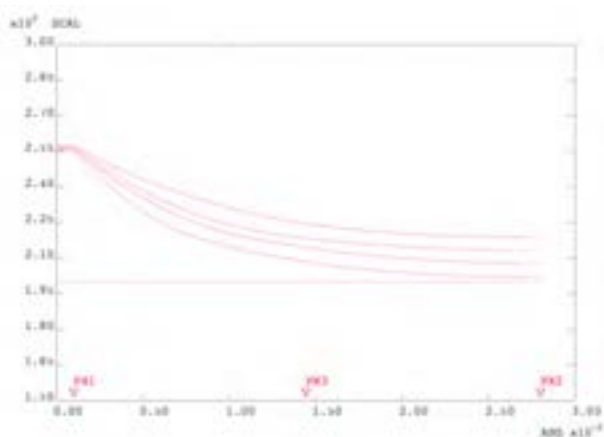


Figura 22- Caso A: Temperature nello spessore a diversi istanti (prima ora)

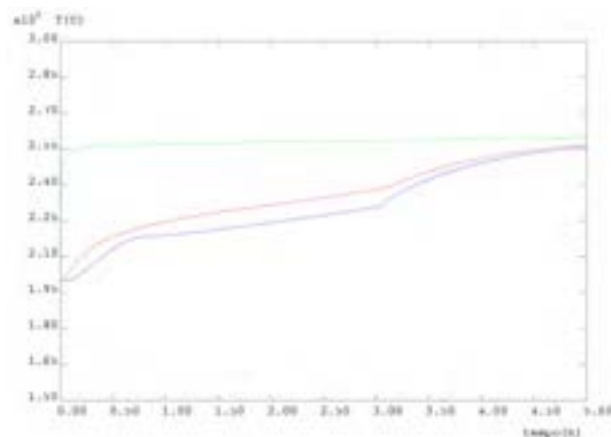


Figura 23- Caso A: evoluzione temporale delle temperature lato parete, lato guscio e intermedio

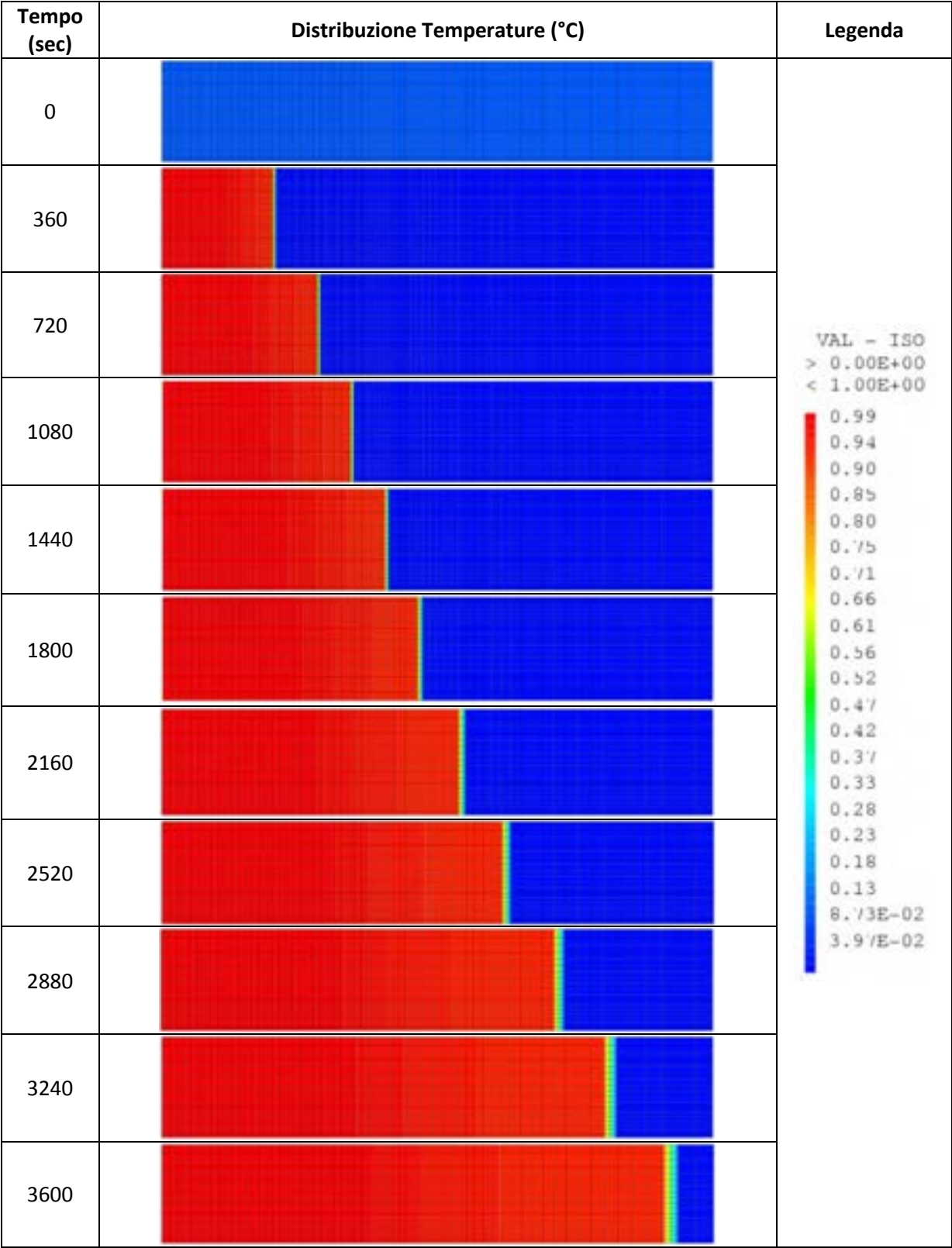


Figura 24- Caso A: avanzamento del fronte di fusione nella prima ora

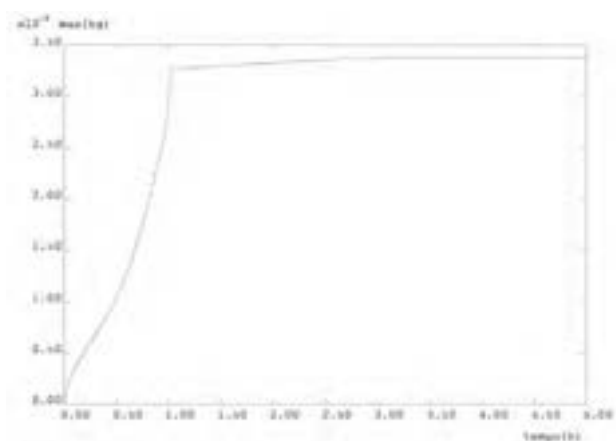


Figura 25- Caso A: evoluzione temporale della massa fusa di PCM

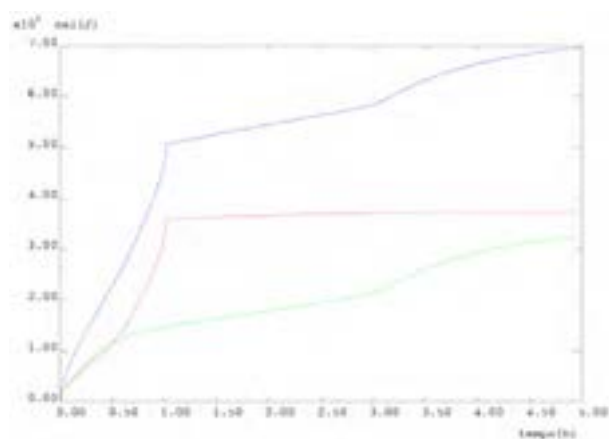


Figura 26- Caso A: evoluzione temporale del calore sensibile, latente e totale accumulato

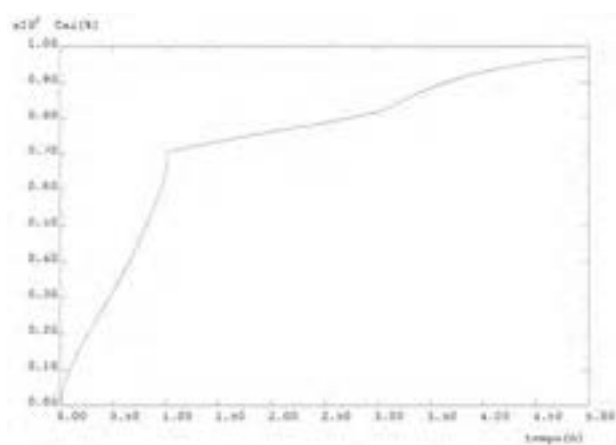


Figura 27- Caso A: evoluzione temporale (%) della energia termica accumulata



Figura 28- Caso B: Geometria di calcolo e discretizzazione FEM

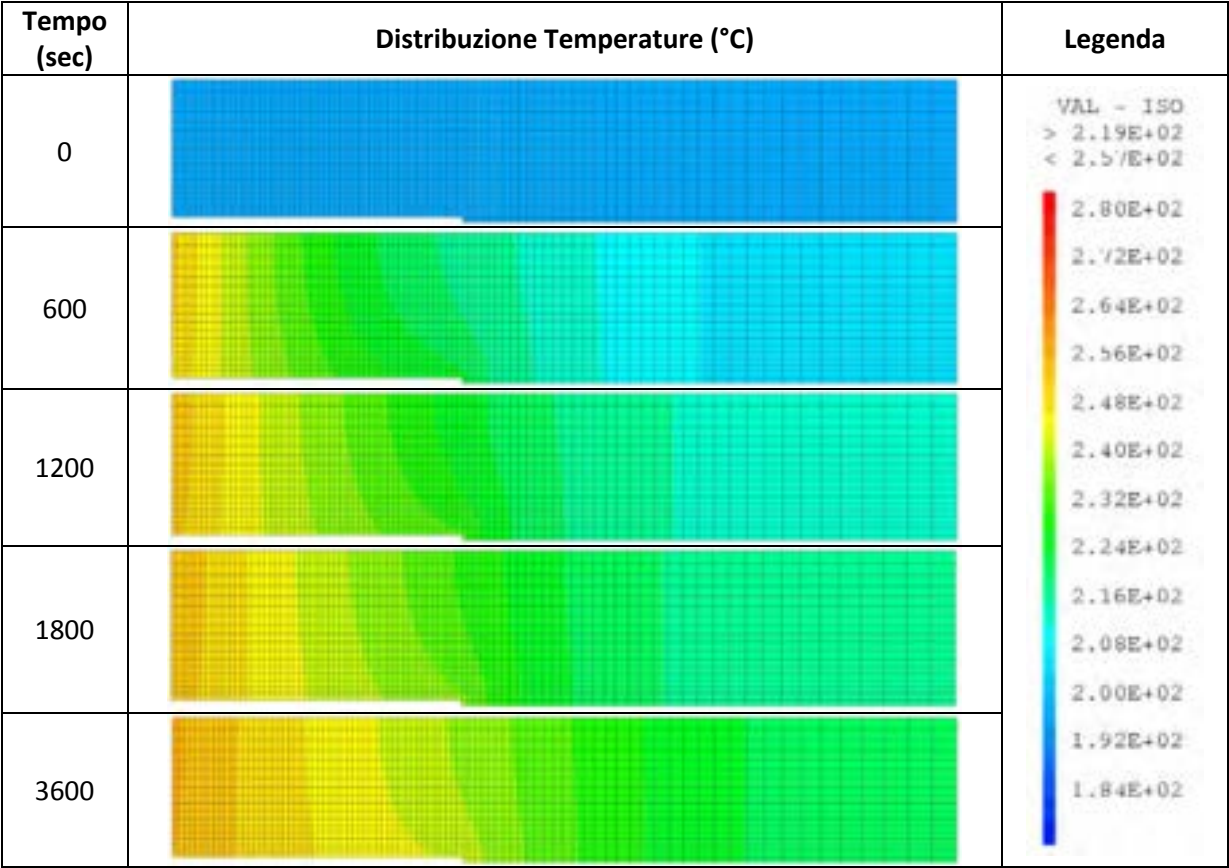


Figura 29- Caso B: avanzamento del fronte termico nella prima ora

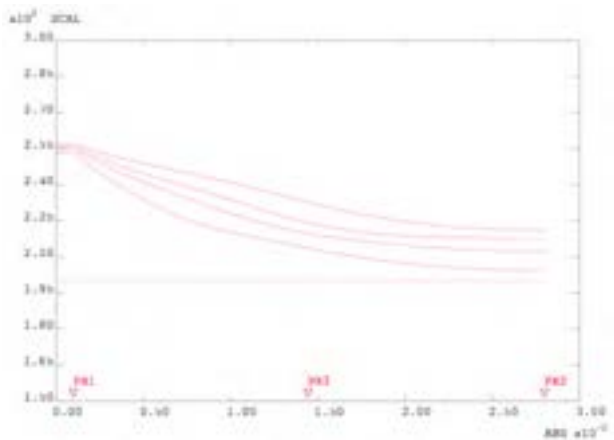


Figura 30- Caso B: Temperature nello spessore a diversi istanti (prima ora)

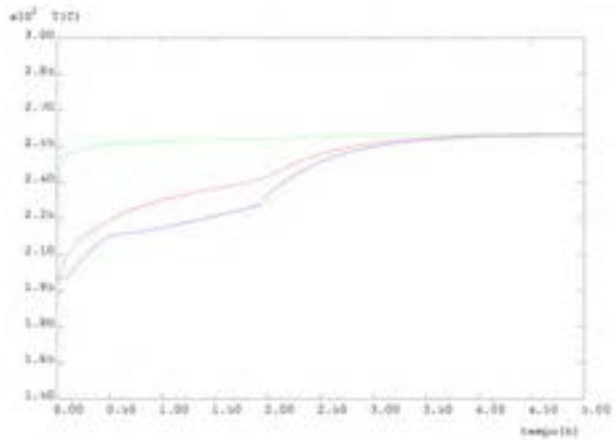


Figura 31- Caso B: evoluzione temporale delle temperature lato parete, lato guscio e intermedio

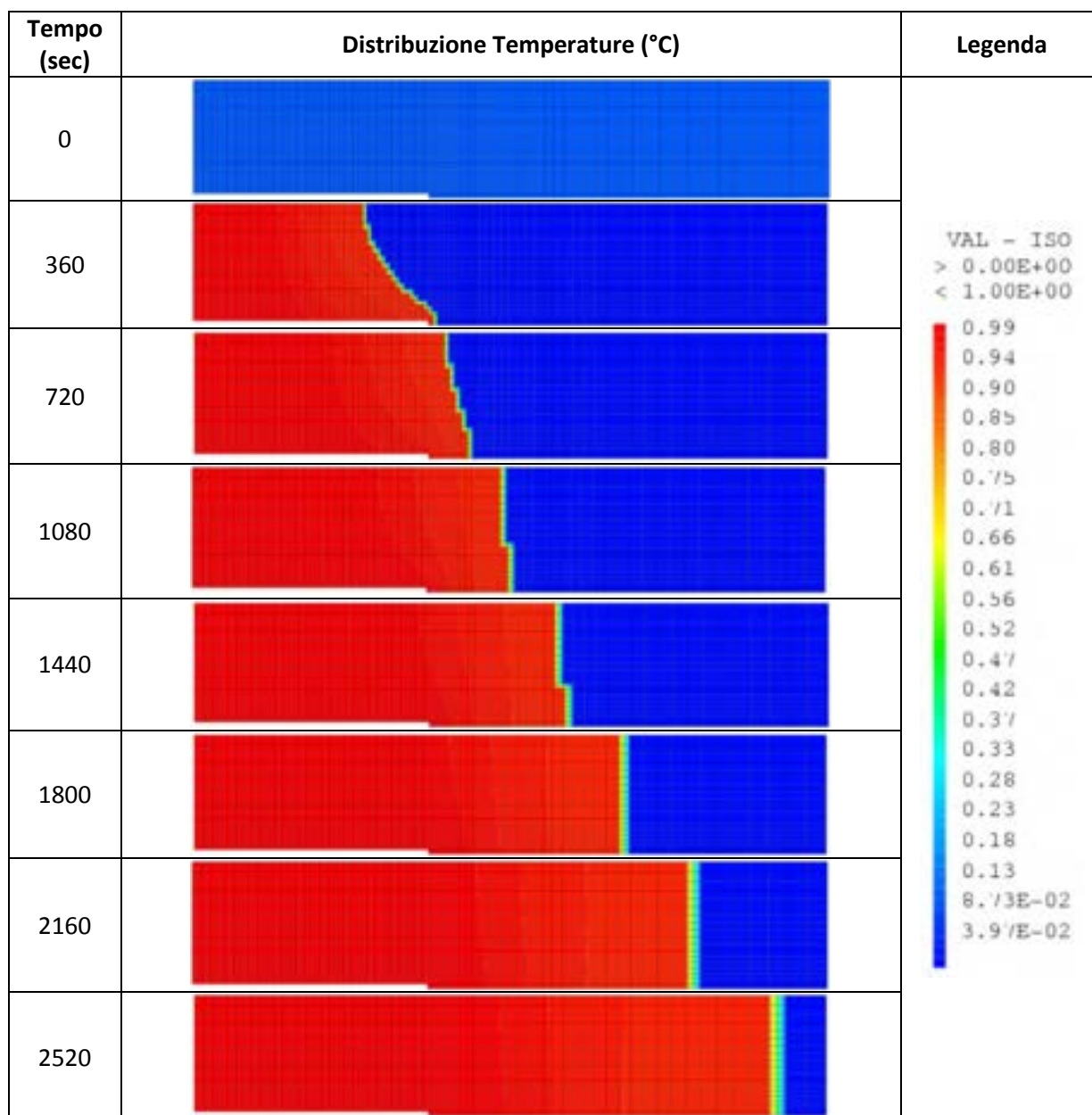


Figura 32- Caso B: avanzamento del fronte di fusione nella prima ora

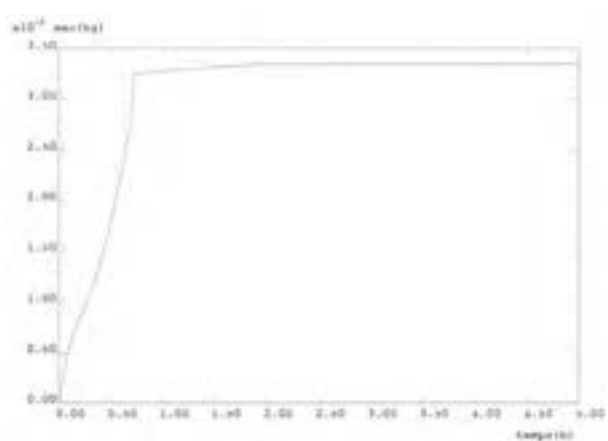


Figura 33- Caso B: evoluzione temporale della massa fusa di PCM

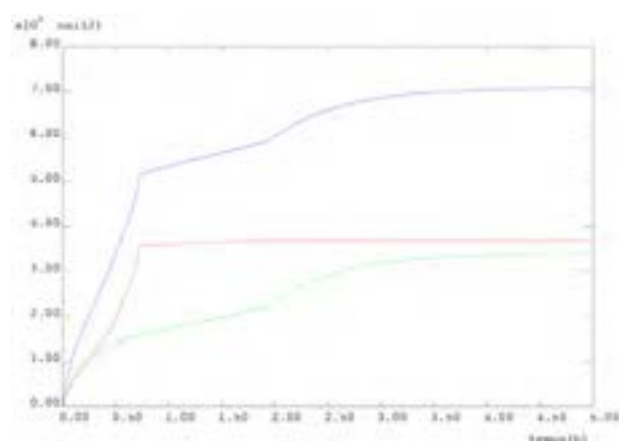


Figura 34- Caso B: evoluzione temporale del calore sensibile, latente e totale accumulato

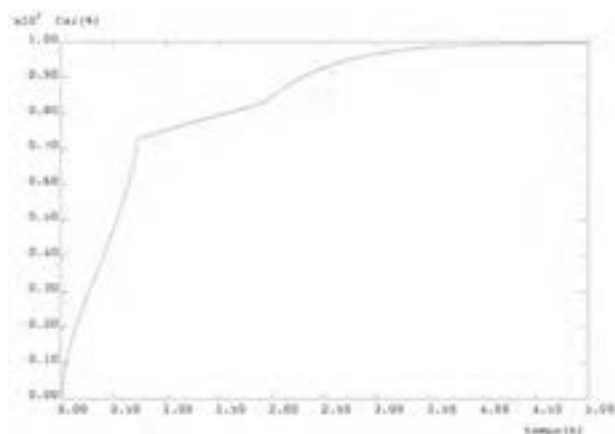


Figura 35- Caso B: evoluzione temporale (%) dell'energia termica accumulata.

2.3.4.3 Disegni di progetto

In Figura 36 e Figura 37 sono riportate alcune figure estratte dal progetto Enea dell'elemento di accumulo con PCM (Appendice 1).



Figura 36- Viste dell'elemento di accumulo con coibentazione

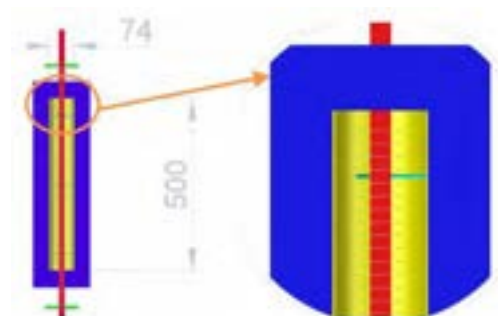


Figura 37- Spaccato dell'elemento di accumulo con particolare dell'interno (alette, tubo, pozzetti di misura)

2.3.5 Conclusione

Si è studiato e progettato un elemento base di accumulo a calore latente da realizzare e provare nell'ambito delle attività dell'accordo di programma ENEA-MISE PAR2013. L'elemento dovrà essere realizzato nelle due versioni con e senza alette di promozione della conduzione. Detti elementi verranno caricati con due tipologie di materiali di accumulo: la prima sarà costituita da semplici "sali solari" mentre la seconda sarà costituita dagli stessi sali cui è aggiunto l'1%wt di nanoparticelle di silica e allumina. Gli elementi da provare in una singola sessione dovranno essere 3 per ogni tipologia (con e senza alette e con e senza nanoparticelle). In totale gli elementi saranno 12 e verranno provati in 4 sessioni. L'impianto da utilizzare sarà progettato nel dettaglio in uno dei paragrafi seguenti.

2.4 Analisi del comportamento termo-dinamico

Oggetto del presente paragrafo è lo studio e l'analisi termica transitoria di un elemento di accumulo termico, con materiali a cambiamento di fase (PCM), della tipologia guscio e tubo ("shell and tube"), da utilizzare nell'ambito delle attività che si riferiscono al PAR 2013 attività B.1.3 linea progettuale 2 dell'Accordo di Programma tra Enea e MISE. L'elemento di accumulo che è stato preso in considerazione è quello scaturito dalla attività di progettazione illustrata in precedenza. In quella fase si era valutato il comportamento termico del componente effettuando delle analisi FEM "monodimensionali". In questo lavoro, invece si è proceduto a:

- Simulare il comportamento termico transitorio dell'intero elemento di accumulo attraverso analisi FEM 2D assialsimmetriche;
- Simulare il comportamento termico transitorio dell'intero elemento di accumulo attraverso analisi CFD 2D assialsimmetriche. In esse si è portato in conto l'effetto dovuto alla gravità sul PCM in fase liquido e quindi valutato l'influenza di questo fenomeno convettivo sullo scambio termico;
- Simulare il comportamento termico transitorio attraverso analisi FEM semplificata (1D assialsimmetriche) dell'elemento di accumulo in cui sia stato introdotto un opportuno strato di coibente.

La principale grandezza presa in esame durante queste analisi, oltre la capacità termica del sistema, è il tempo di carico e scarico dell'elemento di accumulo.

2.4.1 Analisi FEM di un elemento di accumulo

Un ipotetico sistema di accumulo può essere pensato come una serie di tubi che convogliano il fluido termovettore (Heat Transfer Fluid - HTF) all'interno di una massa di materiale destinato all'accumulo vero e proprio (Figura 38 - a). Per ovvie questioni di simmetria, è possibile analizzare le prestazioni di questi accumuli riducendo l'analisi ad un singolo tubo con relativa zona di influenza termica (Figura 38 - b). Per questa ragione, questo tipo di scambiatori viene di norma denominato "shell-and-tube".

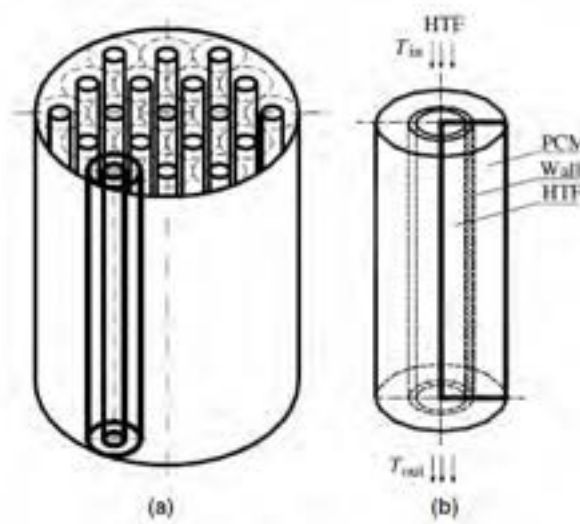


Figura 38 – Sistema di accumulatore completo (a) e singolo tubo (b)

In precedenza si era analizzato il comportamento termico di un elemento di accumulo di tipo "shell and tube" attraverso una serie di analisi semplificate FEM di sensibilità. Al termine di tale studio si era arrivati al dimensionamento ed alla progettazione di un elemento di accumulo "standard". Su tale base, si vuole ora

raffinare l'analisi termica attraverso una simulazione completa di detto componente. Per fare ciò, si è supposto che l'elemento di accumulo sia:

- disposto verticalmente;
- il fluido termovettore scorra dall'alto verso il basso, in fase di carico, e viceversa, in fase di scarico;
- il sistema presenti una simmetria assiale;
- il contributo convettivo dei moti relativi al materiale di accumulo in fase liquida siano trascurabili.

2.4.1.1 Geometria e mesh

Il sistema è costituito da un tubo (diametro interno 14 mm e spessore 1 mm) al cui interno scorre il fluido termovettore. Tale tubo, per una lunghezza di 500 mm, è contenuto all'interno di un vessel di diametro 70 mm e spessore 2 mm. L'intercapedine tra il tubo ed il vessel sarà riempita con un PCM che funge da mezzo di accumulo termico. Il tubo fuoriesce dall'elemento di accumulo di circa 200 mm da ciascun lato. Inoltre, tale tubo, in alcune configurazioni, presenterà, internamente all'elemento, delle alettature metalliche tese a favorire la diffusione termica all'interno del mezzo di accumulo. Le alette saranno caratterizzate da un'altezza di 10 mm, uno spessore di 0.4 mm ed un passo di 10 mm.

In Figura 39 è mostrata la geometria relativa ad un elemento con tubo liscio mentre in Figura 40 una con tubo alettato.

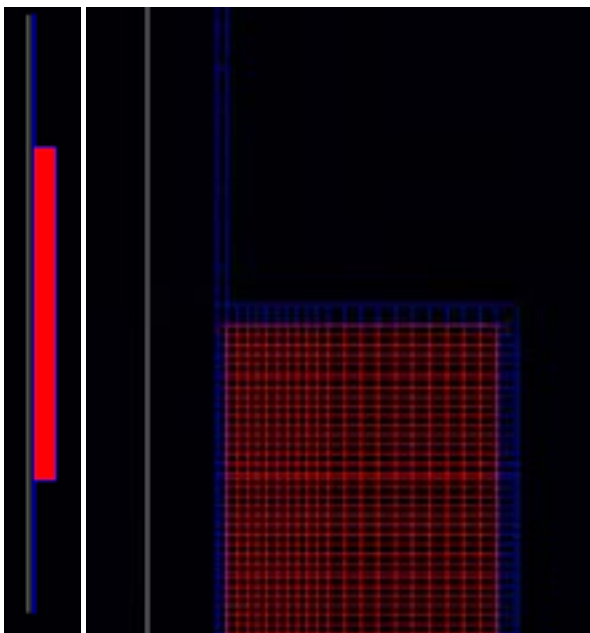


Figura 39- Mesh (generale e particolare) di un elemento di accumulo con tubo liscio

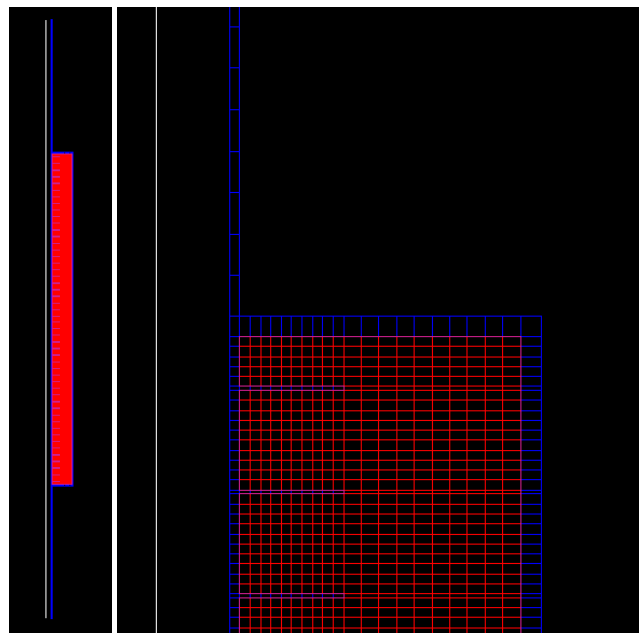


Figura 40- Mesh (generale e particolare) di un elemento di accumulo con tubo alettato

2.4.1.2 Materiali

I materiali utilizzati sono l'acciaio per il tubo e per il vessel dell'elemento ed i "sali solari" ($\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$) come mezzo di accumulo a cambio di fase. Le caratteristiche principali dell'acciaio sono:

densità	7800	kg/m ³
capacità termica	500	J/kg/°C
conducibilità termica	20	W/m/°C

Invece, per quanto riguarda i sali solari si è assunto:

densità	1850	kg/m ³
capacità termica	1700	J/kg/°C
conducibilità termica	0.5	W/m/°C
temperatura di fusione	225	°C
calore latente di fus.	110	kJ/kg

L'olio diatermico è supposto avere le seguenti caratteristiche:

densità	850	kg/m ³
capacità termica	1500	J/kg/°C
conducibilità termica	0.16	W/m/°C

2.4.1.3 Condizioni di scambio termico

La condizione di partenza del sistema è stata ipotizzata essere di tipo isoterma e pari alla temperatura ambiente (20°C). Tutte le superfici esterne del sistema sono considerate essere adiabatiche, e quindi nulle le perdite di calore verso l'esterno. L'unica superficie di scambio dell'elemento risulta allora essere quella interna del tubo che scambierà per convezione con l'olio diatermico. Il relativo coefficiente di scambio termico è stato stimato essere di circa 1000 W/m²/°C in condizione di turbolenza completamente sviluppata (per maggiori dettagli vedere *Appendice 3*). Durante la **prima carica** del sistema l'olio verrà inviato all'interno del tubo (sezione 1.54e-4 m²) con una velocità di circa 2 m/s (portata 0.26 kg/s) ed una temperatura di 200°C. Il riscaldamento avverrà fino al raggiungimento dello stazionario (sistema a T costante a 200°C). Il calore sarà accumulato sotto forma di calore sensibile. In seguito, mantenendo costanti le caratteristiche fluidodinamiche ed portando la temperatura dell'olio a 260°C, avviene la vera e propria **fase di carico** del sistema. Anche in questo caso il riscaldamento avverrà fino al raggiungimento del nuovo stazionario (sistema a T costante a 260°C). In questo caso, il calore sarà accumulato sia sotto forma di calore sensibile che di calore latente (cambio di fase solido-liquido del PCM). Infine, si potrà eseguire la **fase di scarico** del sistema mantenendo le stesse caratteristiche fluidodinamiche ma invertendo la direzione di percorrenza del flusso ed abbassando la temperatura dell'olio a 200°C.

2.4.1.4 Elemento con tubo liscio

L'elemento di accumulo con tubo liscio contiene circa 3.37 kg di sali solari (PCM) che occupano circa 1.8E-03 m³ di volume interno. Le altre masse in gioco sono gli 0.33 kg del tubo ed gli 1.9 kg del vessel esterno.

Prima carica

Durante le 10 ore di transitorio della prima carica, l'olio diatermico trasmette al sistema 353.7 Wh di energia termica. Questa viene accumulata dalle masse del sistema sotto forma di calore sensibile. In particolare, il PCM accumula circa 286.7 Wh di calore, praticamente uguale a tutto quello teoricamente disponibile (99.9%). Nell'acciaio, invece, se ne accumuleranno circa 55.6 Wh. Il sistema è allora caratterizzato da un accumulo volumetrico di 0.16 MWh/m³ e 85 Wh/kg. Il tempo di carica del sistema, relativo al 95% del carico teorico, è stimato essere di 3.3 ore.

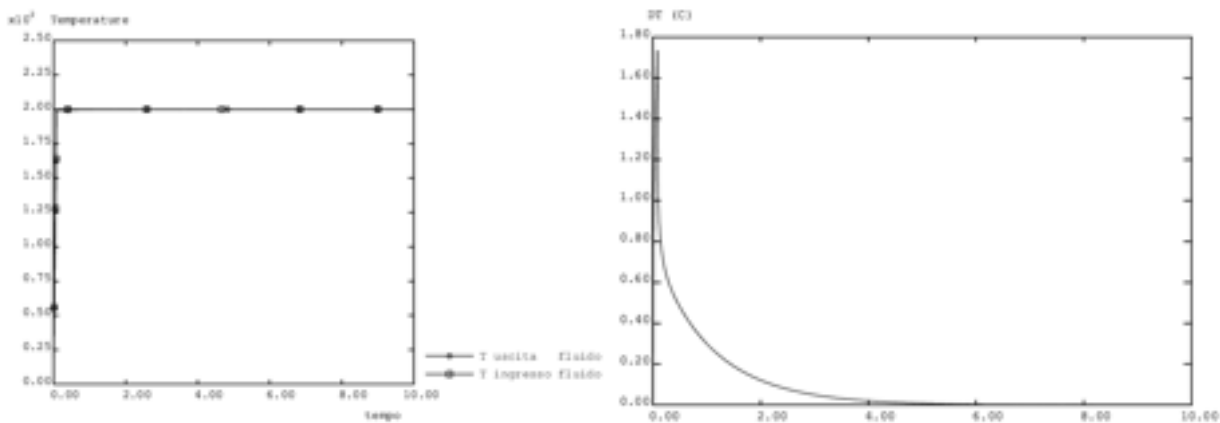


Figura 41- Evoluzione delle temperature di ingresso ed uscita e del salto termico del fluido termovettore

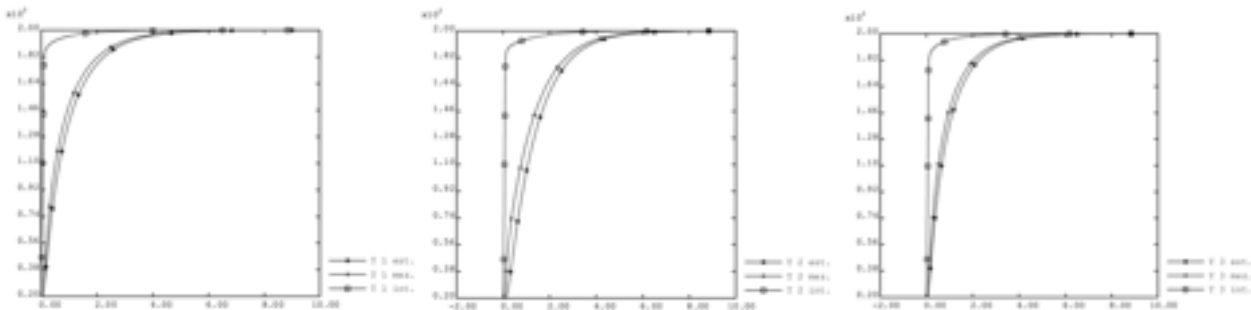


Figura 42- Evoluzioni temporali delle temperature in tre punti (interno, medio ed esterno) e su tre piani (superiore, medio ed inferiore)

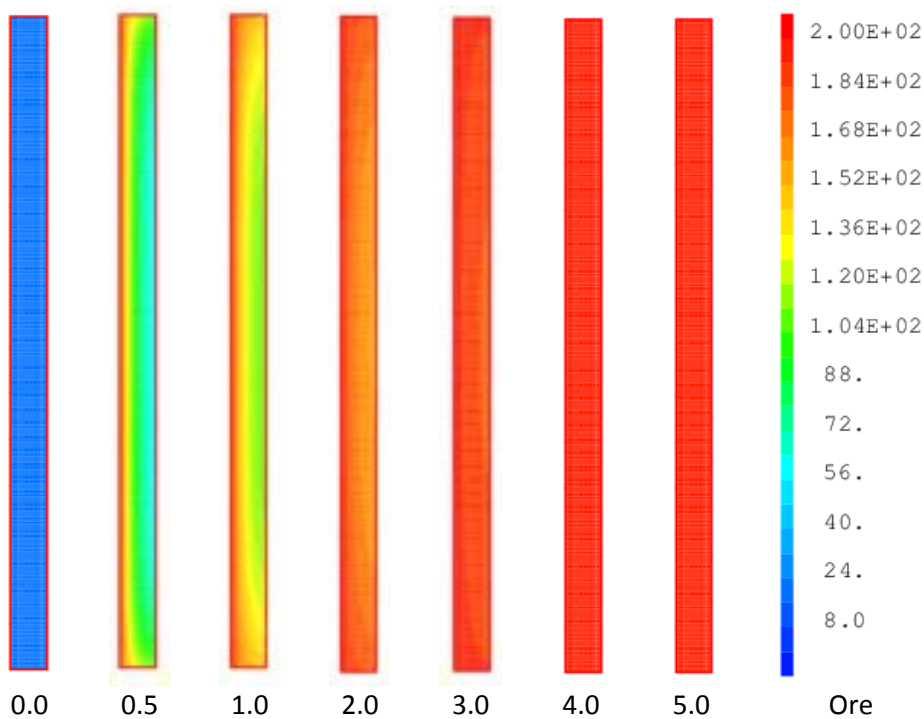


Figura 43- Prima carica: distribuzione delle temperature in diversi istanti.

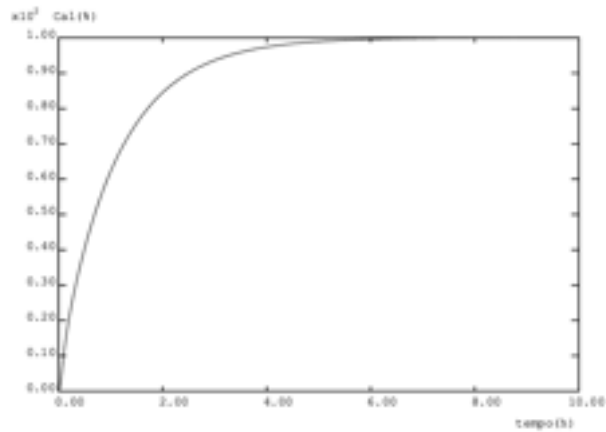


Figura 44- Evoluzione temporale del calore accumulato nel PCM come % di quello massimo

Fase di caricamento

Durante la fase di caricamento del sistema, l'olio diatermico trasmette allo stesso, durante le 8 ore di transitorio, 220.8 Wh di energia termica. Questa viene accumulata dalle masse del sistema sotto forma di calore sensibile e calore latente. In particolare, tutta la massa di PCM (3.37 kg) arriva a fusione accumulando circa 198.3 Wh di calore (di cui 95.2 Wh di calore sensibile e 103.1 Wh di calore latente), praticamente uguale a tutto quello teoricamente disponibile (99.8%). Nell'acciaio, invece, se ne accumuleranno circa 18.5 Wh. Tutta la massa di PCM arriva a fusione entro 3 ore dall'inizio del transitorio. Il sistema è allora caratterizzato da un accumulo volumetrico di 0.11 MWh/m³ e 58.7 Wh/kg. Il tempo di carica del sistema, relativo al 95% del carico teorico, è stimato essere di 4.3 ore.

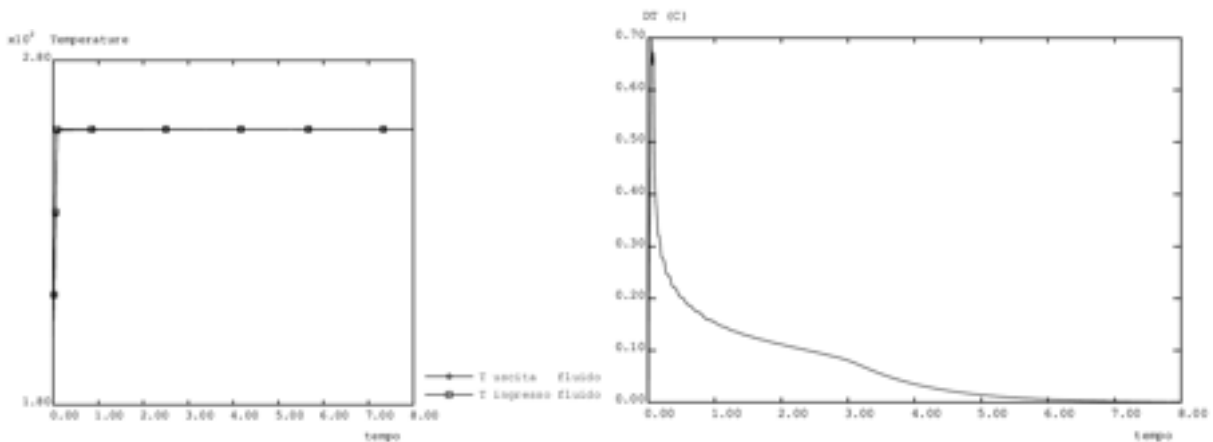


Figura 45- Evoluzione delle temperature di ingresso ed uscita e del salto termico del fluido termovettore

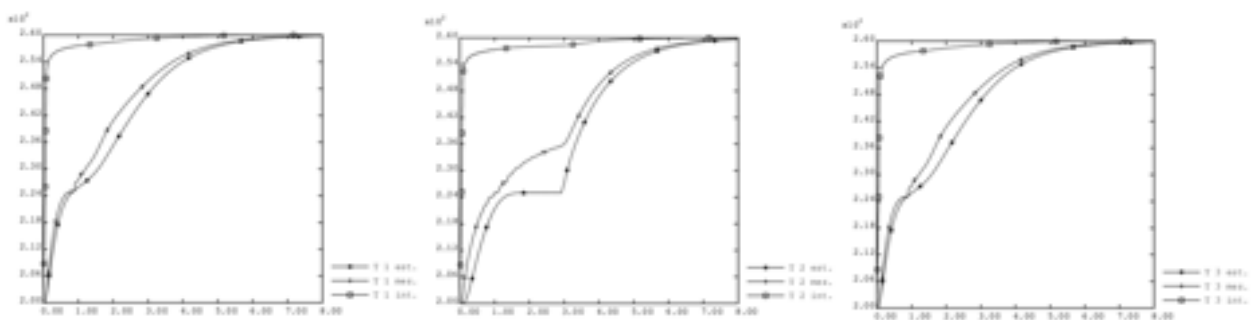


Figura 46- Evoluzioni temporali delle temperature in tre punti (interno, medio ed esterno) e su tre piani (superiore, medio ed inferiore)

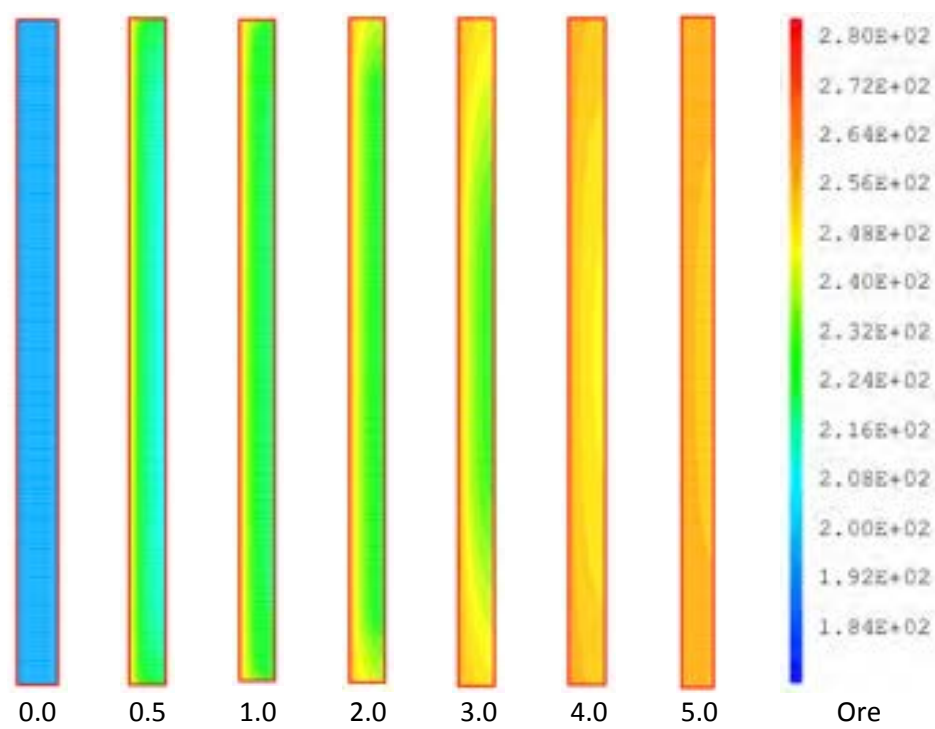


Figura 47- Carico: distribuzione delle temperature in diversi istanti.

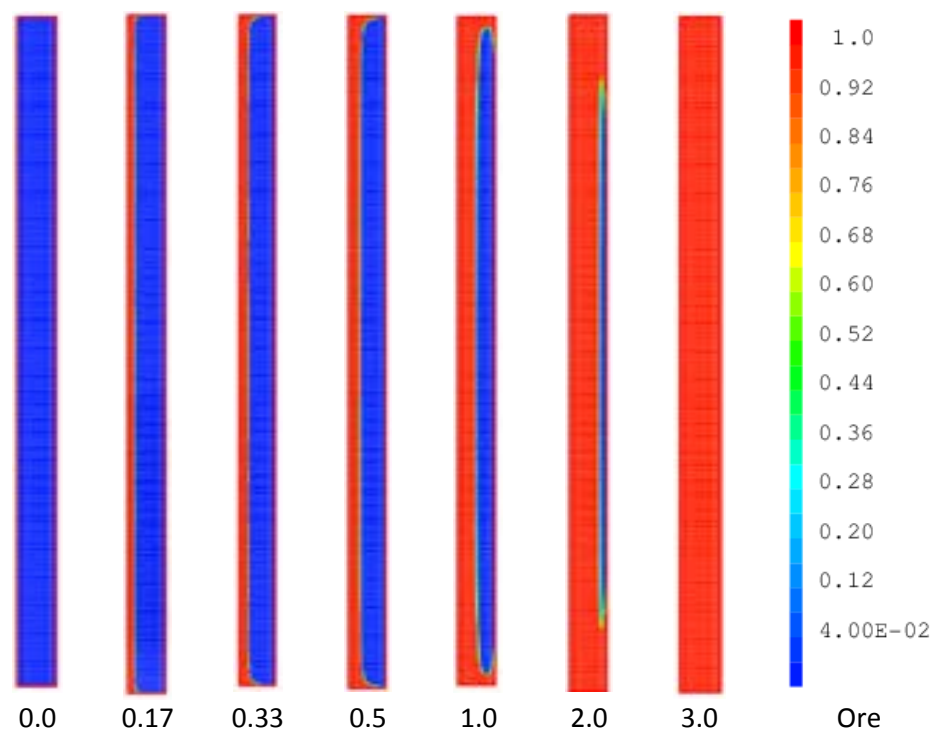


Figura 48- Carico: distribuzione della fase liquida (rossa) in diversi istanti.

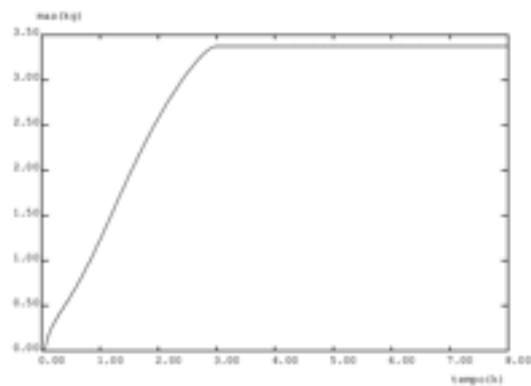


Figura 49- Evoluzione temporale della massa fusa di PCM

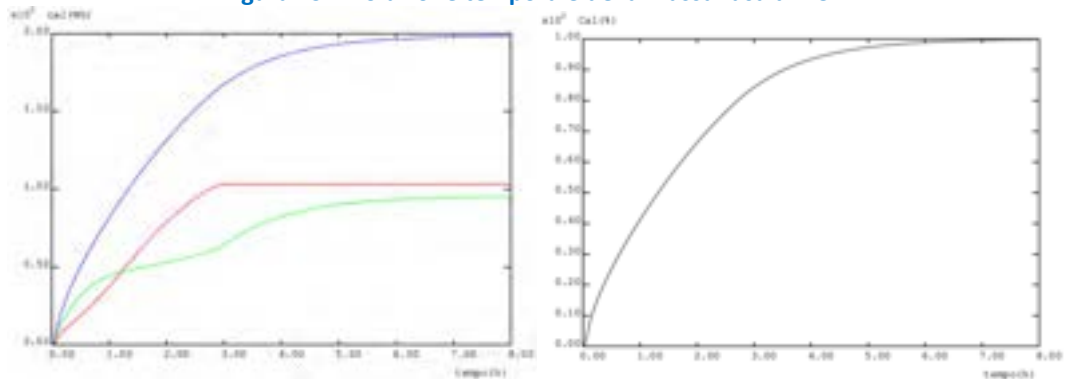


Figura 50- Evoluzione temporale del calore accumulato nel PCM sia in termini assoluti (blu-totale, -verde-sensibile e rosso-latente) sia come % di quello massimo

Fase di scaricamento

Durante la fase di scaricamento il fluido invece di cedere calore lo asporta dal sistema ed il PCM si raffredda e torna a solidificare. L'azione di carico-scarico del sistema comporta, da parte del fluido uno scambio complessivo di circa 431.4 Wh. Poiché durante il caricamento ne aveva ceduti circa 220.8 Wh, ne consegue che nel successivo scaricamento ne preleva circa 211.4 Wh dal sistema. Questa comprende tutto il calore latente del PCM (103 Wh) più parte del calore sensibile del PCM e della altre masse impegnate. La dinamica della fase di scarico è uguale ed opposta a quella di carico, non avendo impostato un differente comportamento tra PCM solido e liquido ed avendo ignorato gli effetti del moto del liquido. Il PCM risulta essere completamente solidificato circa 3 ore dopo l'inizio dello scarico e arriva allo stazionario dopo altre 5 ore.

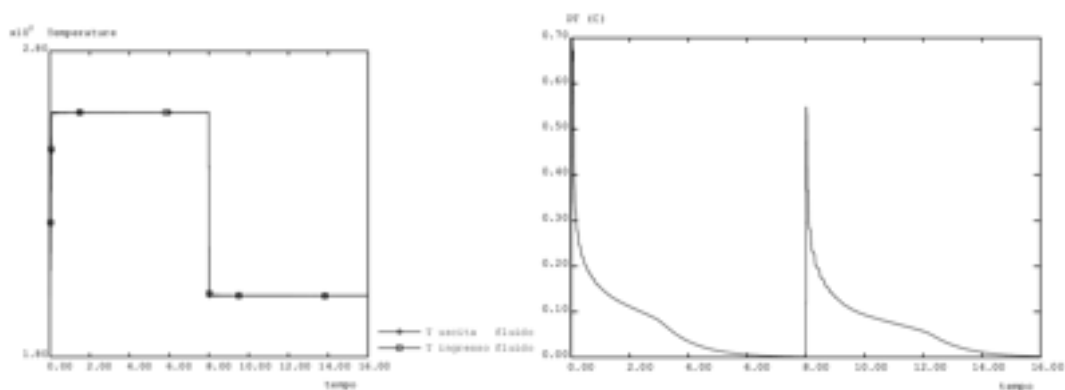


Figura 51- Evoluzione delle temperature di ingresso ed uscita e del salto termico del fluido termovettore

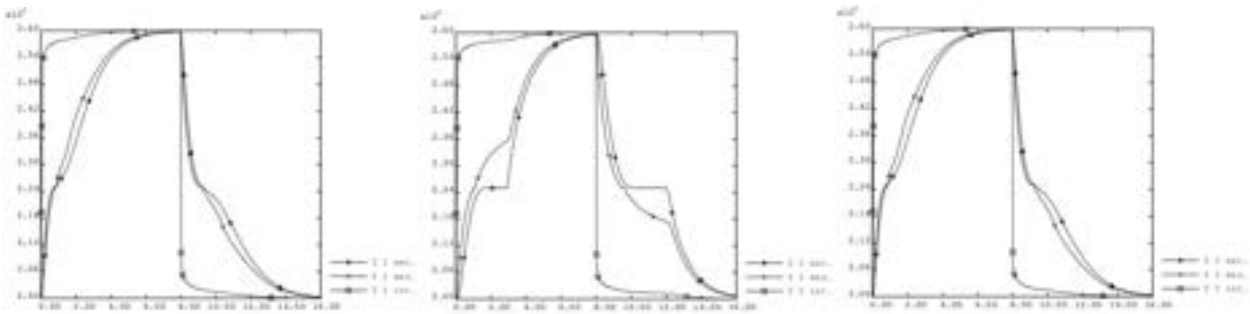


Figura 52- Evoluzioni temporali delle temperature in tre punti (interno, medio ed esterno) e su tre piani (superiore, medio ed inferiore)

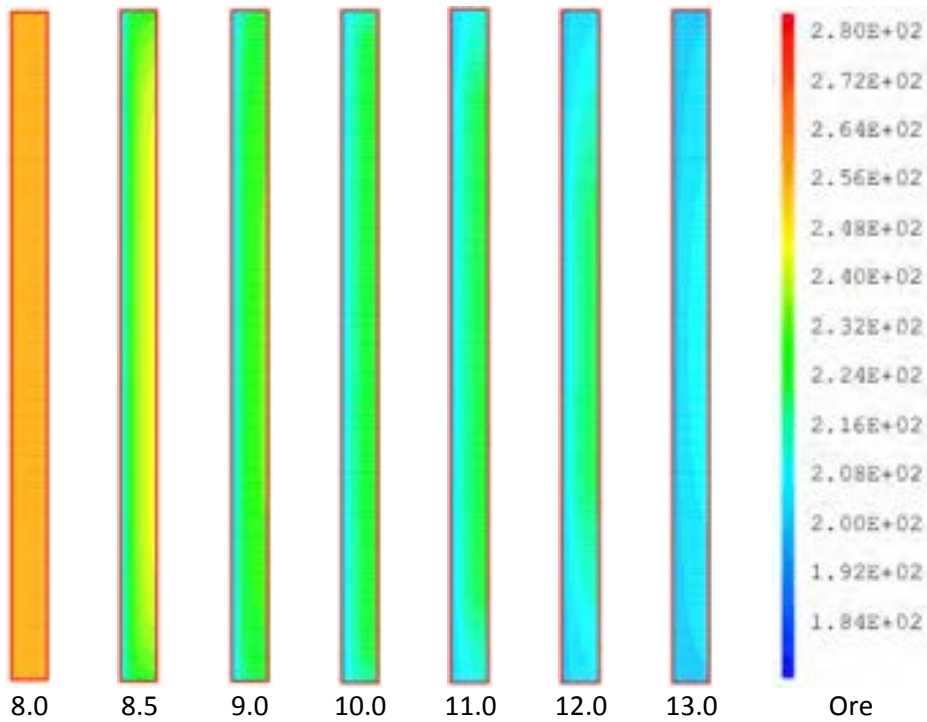


Figura 53- Scarico: distribuzione delle temperature in diversi istanti.

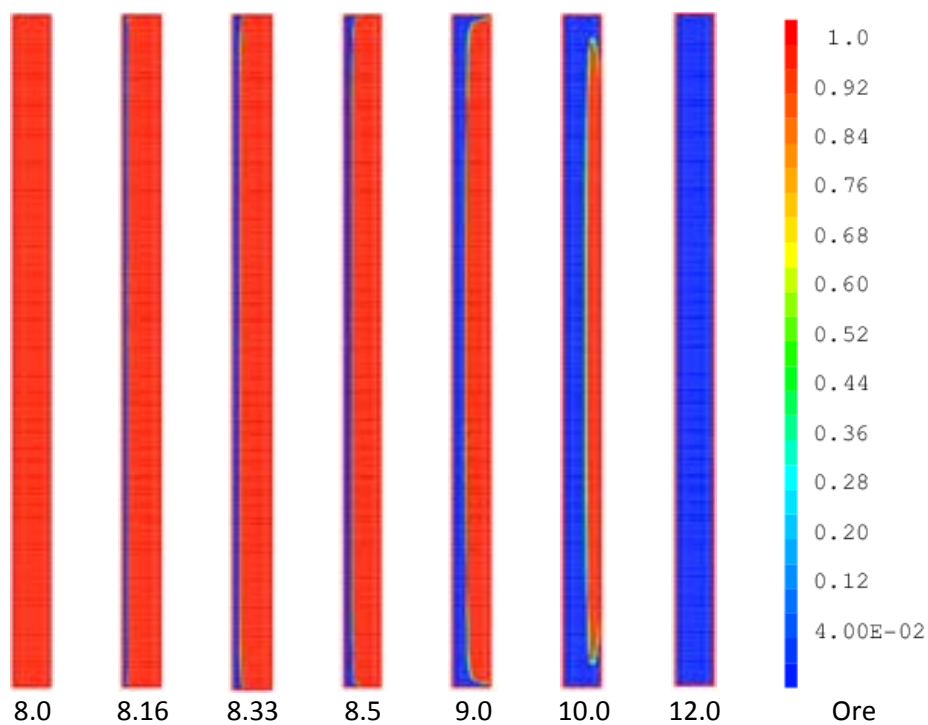


Figura 54- Scarico: distribuzione della fase liquida (rossa) in diversi istanti.

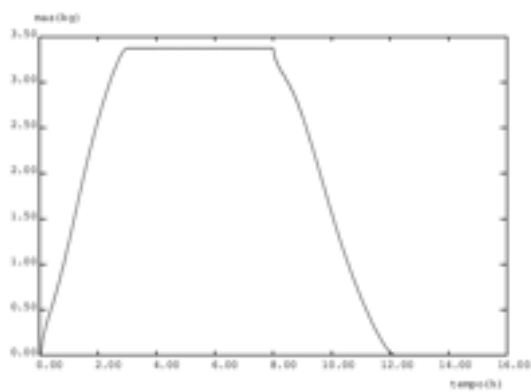


Figura 55- Evoluzione temporale della massa fusa di PCM

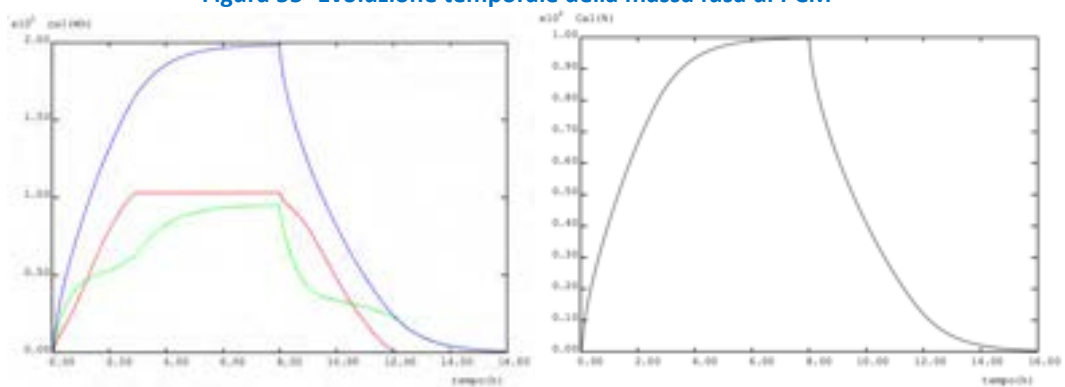


Figura 56- Evoluzione temporale del calore accumulato nel PCM sia in termini assoluti (blu-totale, -verde-sensibile e rosso-latente) sia come % di quello massimo

2.4.1.5 Elemento con tubo alettato

L'elemento di accumulo con tubo alettato contiene circa 3.34 kg di sali solari (PCM) che occupano circa $1.8E-03$ m³ di volume interno. Le altre masse in gioco sono gli 0.46 kg del tubo ed gli 1.9 kg del vessel esterno. La presenza delle alette riduce la massa ed il volume del PCM ed incrementa quelli del tubo. Di conseguenza, la capacità termica dell'elemento sarà leggermente inferiore ma la diffusività termica migliore ed i tempi di carico/scarico ridotti.

Prima carica

Durante le 10 ore di transitorio della prima carica, l'olio diatermico trasmette al sistema 343.0 Wh di energia termica. Questa viene accumulata dalle masse del sistema sotto forma di calore sensibile. In particolare, il PCM accumula circa 284.2 Wh di calore, praticamente uguale a tutto quello teoricamente disponibile (100%). Nell'acciaio, invece, se ne accumuleranno circa 58.8 Wh. Il sistema è allora caratterizzato da un accumulo volumetrico di 0.16 MWh/m³ e 85 Wh/kg. Il tempo di carica del sistema, relativo al 95% del carico teorico, è stimato essere di 2.1 ore.

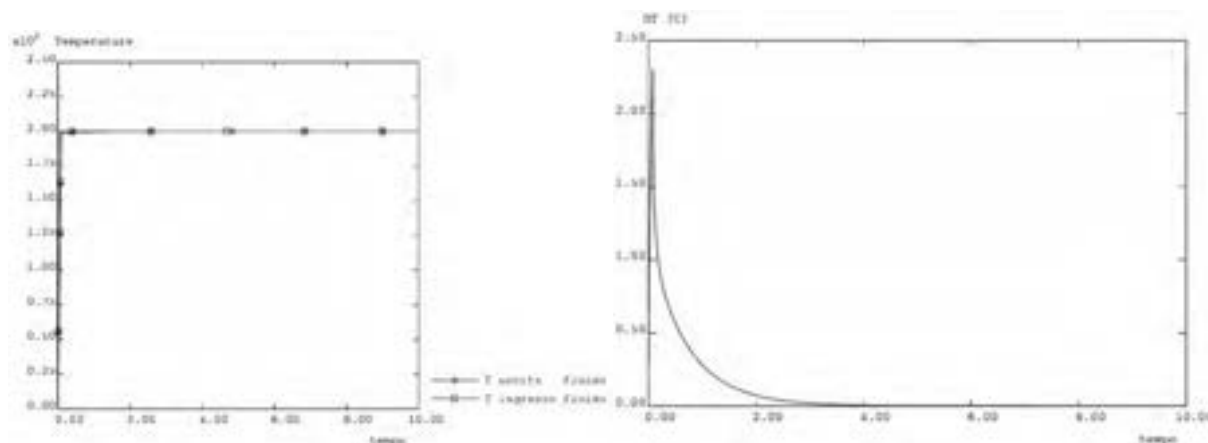


Figura 57- Evoluzione delle temperature di ingresso ed uscita e del salto termico del fluido termovettore

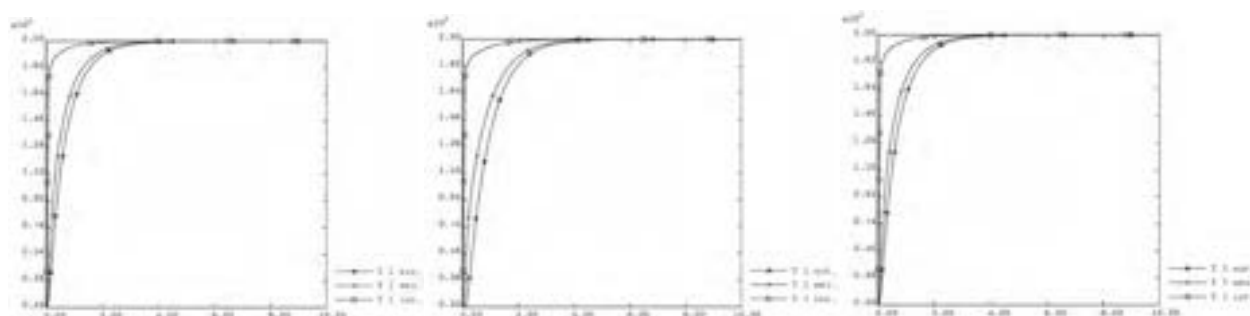


Figura 58- Evoluzioni temporali delle temperature in tre punti (interno, medio ed esterno) e su tre piani (superiore, medio ed inferiore)

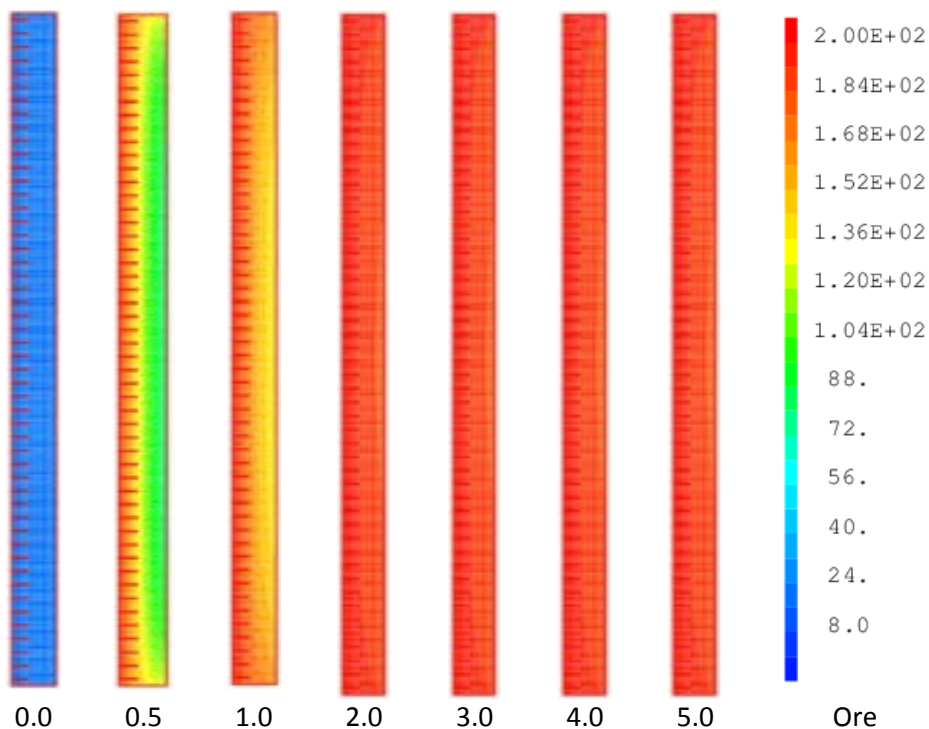


Figura 59- Prima carica: distribuzione delle temperature in diversi istanti.

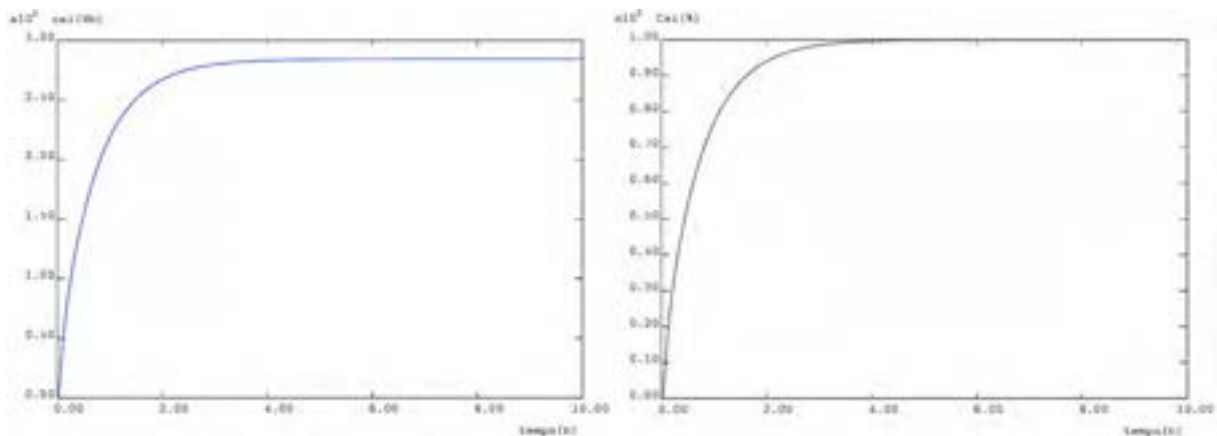


Figura 60- Evoluzione temporale del calore accumulato nel PCM come % di quello massimo

Fase di caricamento

Durante la fase di caricamento del sistema, l'olio diatermico trasmette allo stesso, durante le 8 ore di transitorio, 275.5 Wh di energia termica. Questa viene accumulata dalle masse del sistema sotto forma di calore sensibile e calore latente. In particolare, tutta la massa di PCM (3.34 kg) arriva a fusione accumulando circa 188.9 Wh di calore (di cui 86.7 Wh di calore sensibile e 102.2 Wh di calore latente), praticamente uguale a circa il 95.9% di quello teoricamente disponibile. Nell'acciaio, invece, se ne accumuleranno circa 17.6 Wh. Tutta la massa di PCM arriva a fusione entro 2 ore dall'inizio del transitorio. Il sistema è allora caratterizzato da un accumulo volumetrico di 0.1 MWh/m³ e 56.5 Wh/kg. Il tempo di carica del sistema, relativo al 95% del carico teorico, è stimato essere di 3.6 ore.

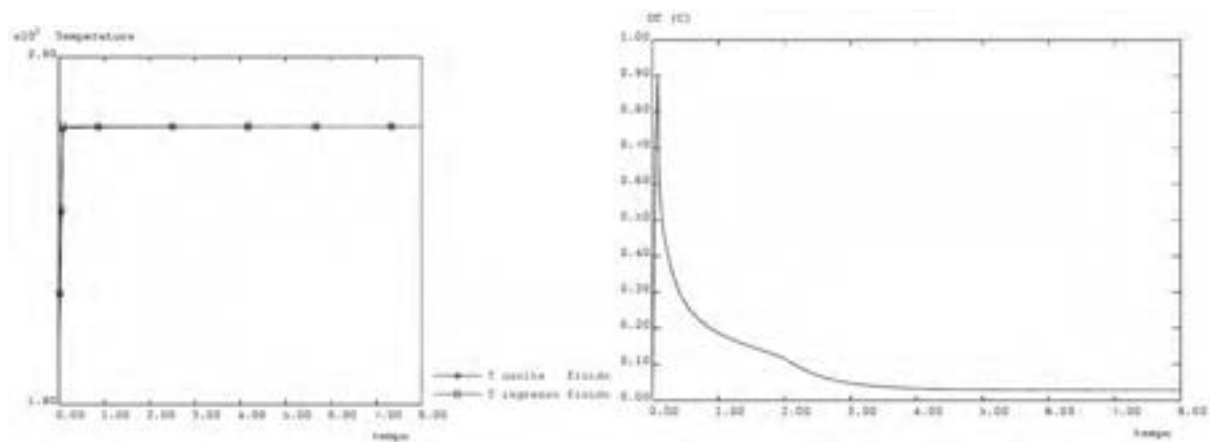


Figura 61- Evoluzione delle temperature di ingresso ed uscita e del salto termico del fluido termovettore

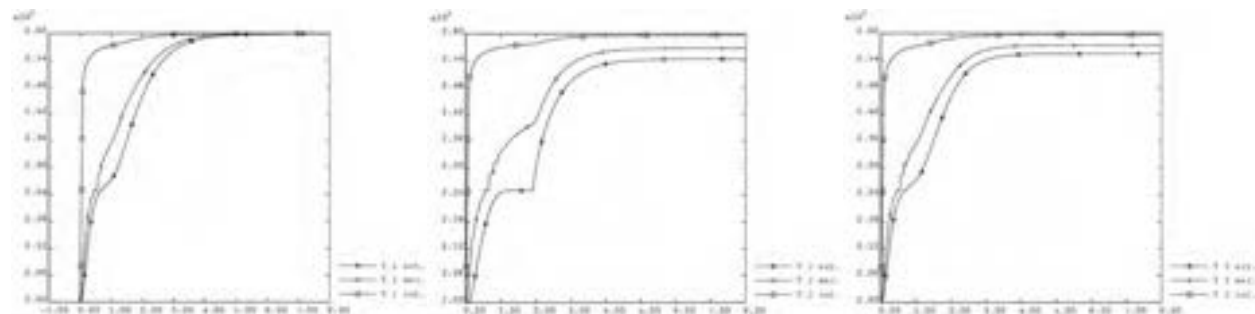


Figura 62- Evoluzioni temporali delle temperature in tre punti (interno, medio ed esterno) e su tre piani (superiore, medio ed inferiore)

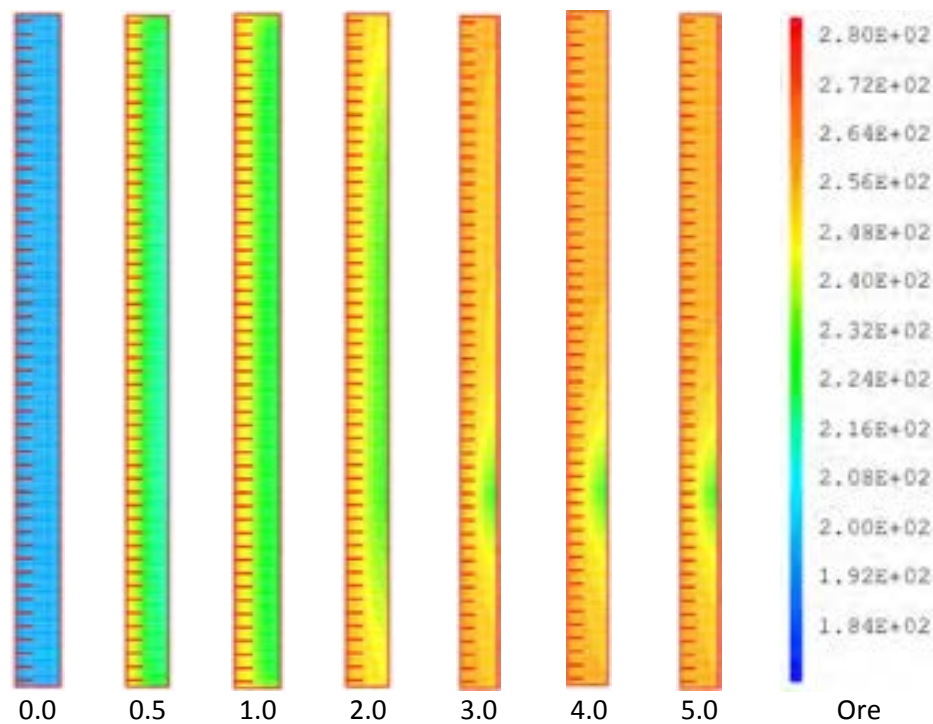


Figura 63- Carico: distribuzione delle temperature in diversi istanti.

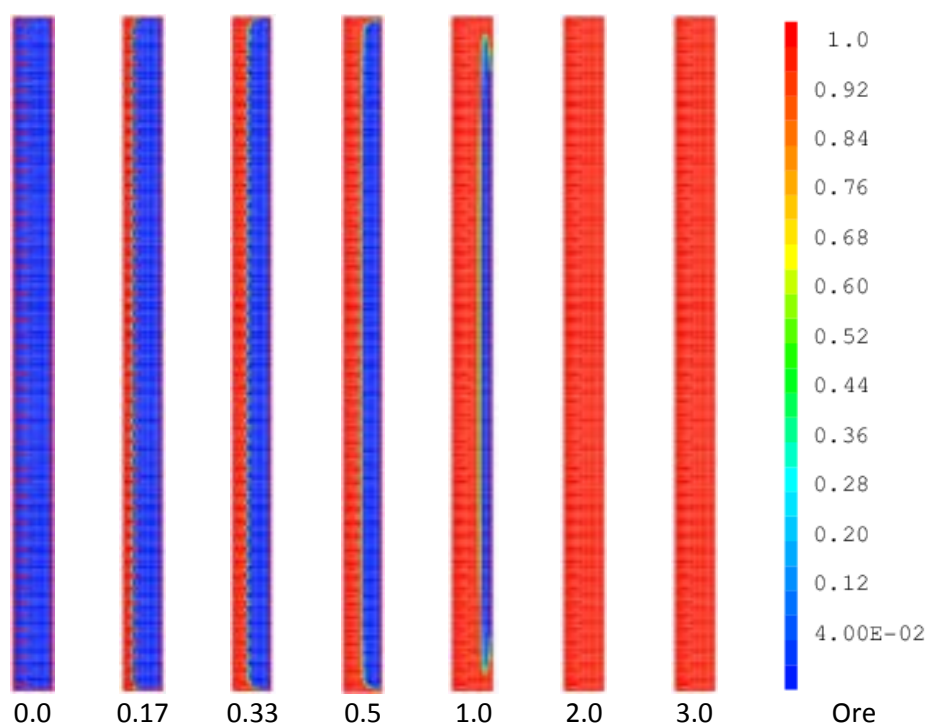


Figura 64- Carico: distribuzione della fase liquida (rossa) in diversi istanti.

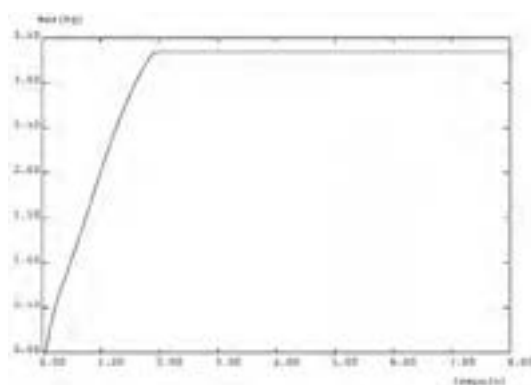


Figura 65- Evoluzione temporale della massa fusa di PCM

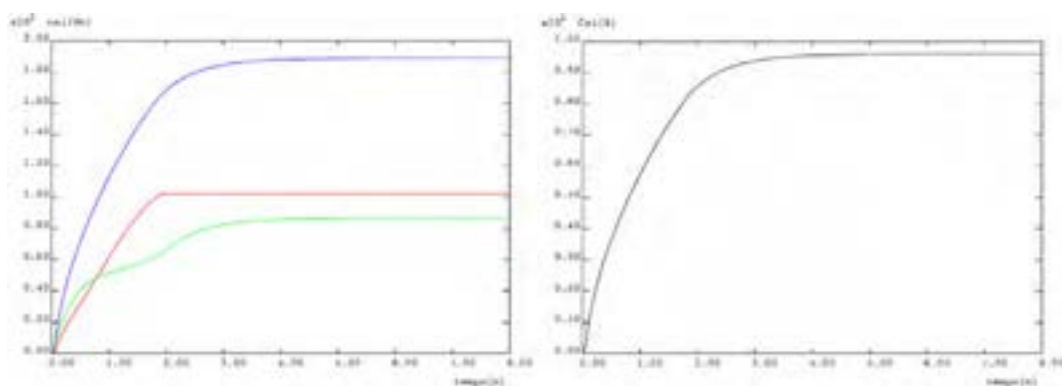


Figura 66- Evoluzione temporale del calore accumulato nel PCM sia in termini assoluti (blu-totale, -verde-sensibile e rosso-latente) sia come % di quello massimo

Fase di scaricamento

Durante la fase di scaricamento il fluido invece di cedere calore lo asporta dal sistema ed il PCM si raffredda e torna a solidificare. L'azione di carico-scarico del sistema comporta, da parte del fluido uno scambio complessivo di circa 472.8 Wh. Poiché durante il caricamento ne aveva ceduti circa 275.5 Wh, ne consegue che nel successivo scaricamento ne preleva circa 197.3 Wh dal sistema. Questa comprende tutto il calore latente del PCM (102 Wh) più parte del calore sensibile del PCM e della altre masse impegnate. La dinamica della fase di scarico è uguale ed opposta a quella di carico, non avendo impostato un differente comportamento tra PCM solido e liquido ed avendo ignorato gli effetti del moto del liquido. Il PCM risulta essere completamente solidificato circa 2.5 ore dopo l'inizio dello scarico e arriva allo stazionario dopo altre 4.5 ore.

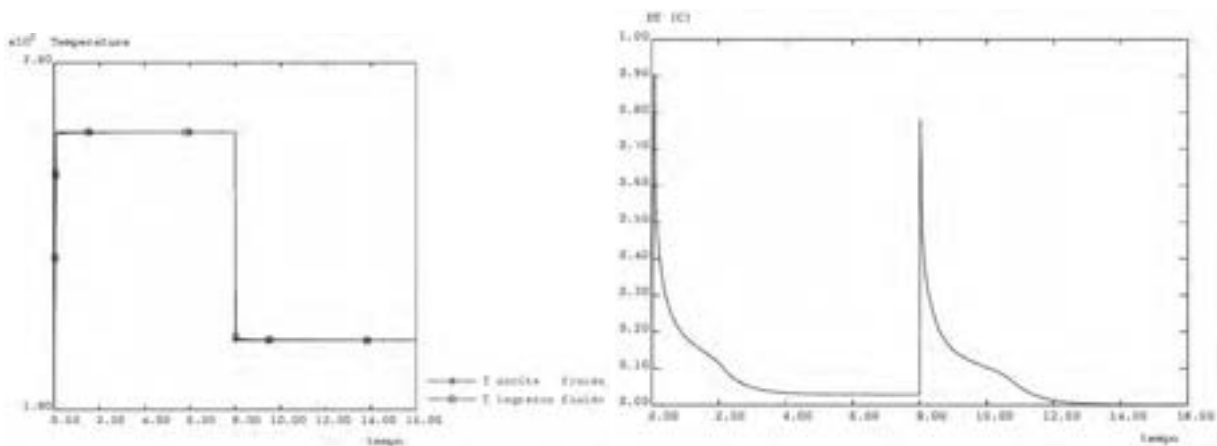


Figura 67- Evoluzione delle temperature di ingresso ed uscita e del salto termico del fluido termovettore

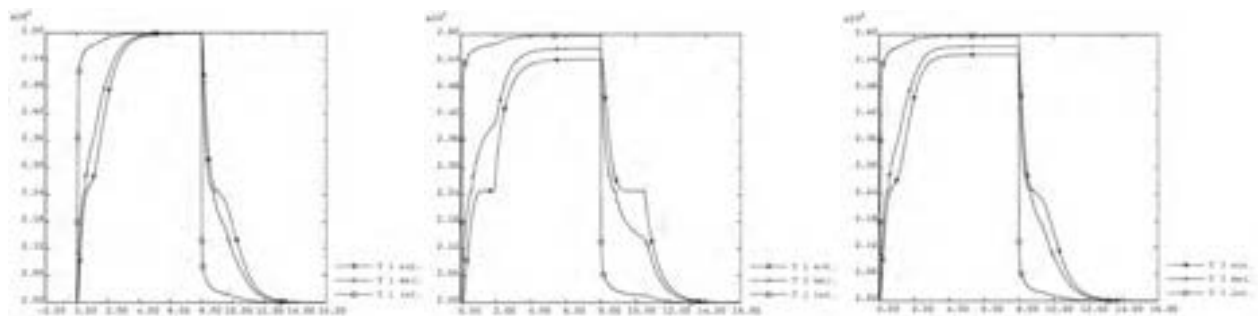


Figura 68- Evoluzioni temporali delle temperature in tre punti (interno, medio ed esterno) e su tre piani (superiore, medio ed inferiore)

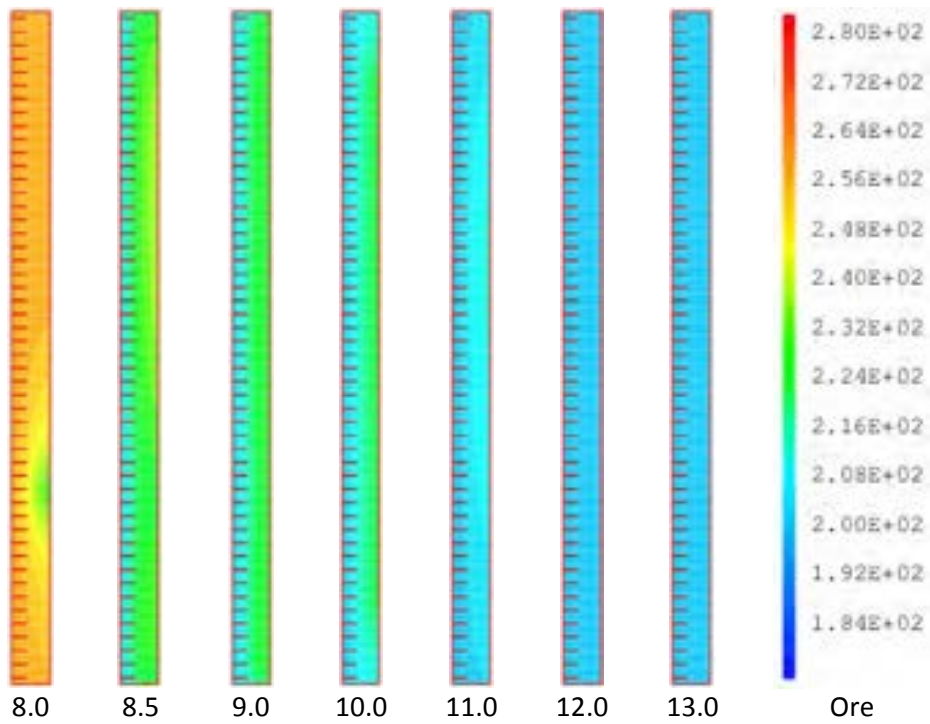


Figura 69- Scarico: distribuzione delle temperature in diversi istanti.

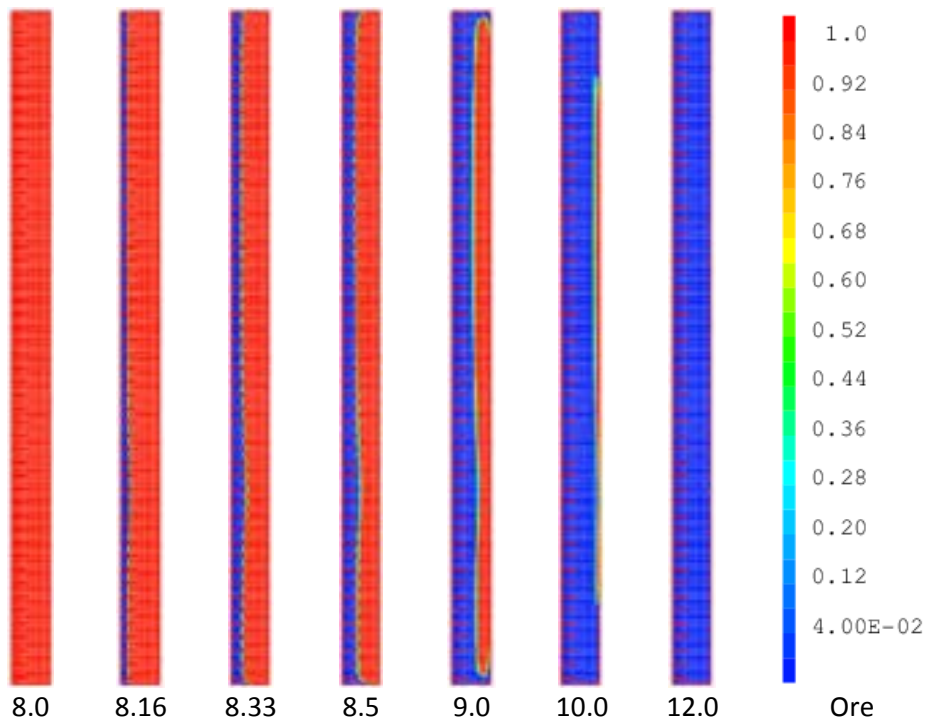


Figura 70- Scarico: distribuzione della fase liquida (rossa) in diversi istanti.

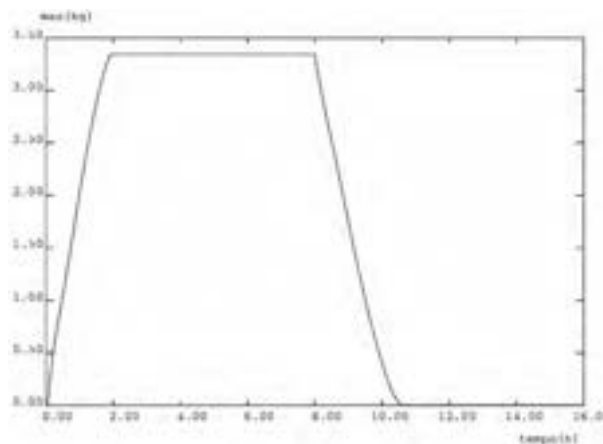


Figura 71- Evoluzione temporale della massa fusa di PCM

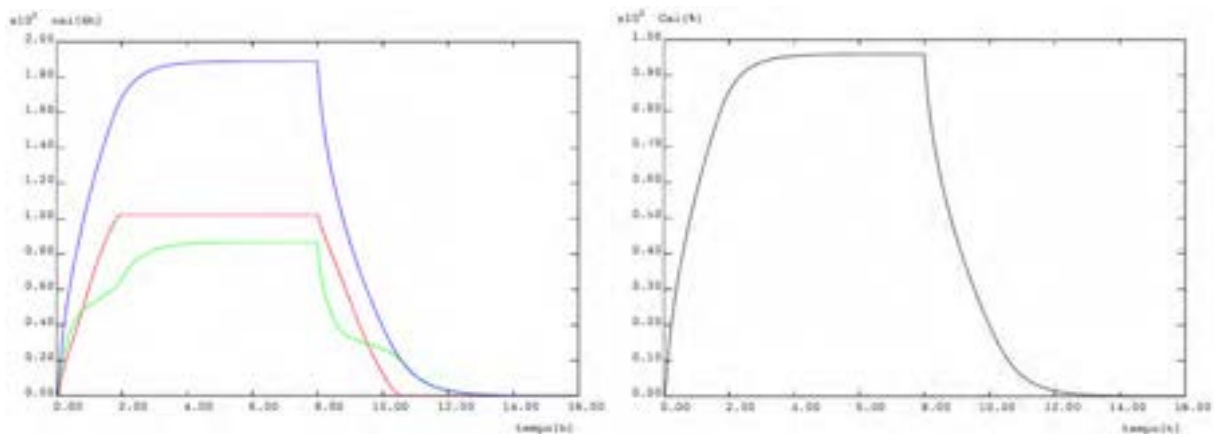


Figura 72- Evoluzione temporale del calore accumulato nel PCM sia in termini assoluti (blu-totale, verde-sensibile e rosso-latente) sia come % di quello massimo

2.4.1.6 Considerazioni conclusive

I risultati ottenuti nelle simulazioni precedenti sono stati riportati in modo sintetico e comparato in [Tabella 10](#). Per un elemento di accumulo con tubo liscio la prima carica avviene in circa 3.5 ore caricando nel PCM circa 285 Wh di calore sensibile che non potranno essere utilizzati nel normale funzionamento del sistema di accumulo. Durante la fase di carico effettivo dell'elemento verranno accumulati circa 200 Wh di calore in un tempo superiore alle 4.5 ore. L'energia accumulata potrà allora essere estratta dal sistema durante la fase di scarico dello stesso in un tempo valutato aggirarsi sempre intorno alle 5 ore. Quindi, un ciclo di carico-scarico del sistema dovrebbe impiegare circa 10 ore complessive per accumulare e poi cedere i circa 200 Wh di calore nell'intervallo di temperatura tra 200 e 260°C.

Nel caso di un elemento di accumulo con tubo alettato, la presenza delle alette riduce la massa ed il volume del PCM ed incrementa quelli del tubo. Di conseguenza, la capacità termica dell'elemento sarà leggermente inferiore ma la diffusività termica migliore ed i tempi di carico/scarico ridotti. Infatti, mentre la capacità termica dell'elemento passa dai 200 Wh a circa 190 Wh, con una riduzione del 5%, i tempi di carico-scarico invece si riducono di un 16% circa. In tal caso per un ciclo di carico-scarico sarebbero necessarie circa 7 ore. Nella analisi dei risultati appena esposti occorre però tenere in considerazione alcuni fattori:

- Nelle analisi eseguite in precedenza con un tubo liscio si è ignorato l'effetto "gravitazionale" indotto sul fluido e, quindi, gli eventuali moti convettivi che si potrebbero instaurare. Una tale valutazione, basata su analisi CFD, sarà oggetto della attività descritta nel prossimo capitolo ;

- Il sistema qui analizzato è stato supposto perfettamente adiabatico verso l'ambiente esterno. In realtà così non è e la presenza di una coibentazione con le relative perdite può fortemente condizionare sia i campi termici che le dinamiche dei transitori. Anche in questo caso, si effettueranno nei capitoli successivi delle valutazioni semplificate;
- Infine, in questo contesto abbiamo preso in esame un PCM "semplice" come i sali solari. Nel caso, invece, supponessimo di utilizzare un PCM con nanoparticelle aggiunte (vedi rif. 3 e 4) la situazione potrebbe essere molto diversa. Questo tipo di mezzo di accumulo avrebbe una capacità termica sicuramente maggiore ed una diffusività che, invece, potrebbe essere sempre insufficiente: ciò potrebbe condurre ad un sistema di accumulo con maggiore densità di energia ma con tempi di carica maggiori di quanto qui previsto.

Proprietà	Unità	Elemento di accumulo con tubo	
		liscio	alettato
Massa PCM	kg	3.37	3.34
Volume PCM	m ³	1.8E-03	1.8E-03
Massa tubo	kg	0.33	0.46
Massa vessel	kg	1.9	1.9
Prima carica (durata 10 ore)			
Energia termica da HTF	Wh	353.7	343.0
Energia accumulata nel PCM	Wh	286.7	284.2
in % del teorico	%	99.9	100.
Energia accumulata nell'acciaio	Wh	55.6	58.8
Energia tot. accumulata volumetrica	Wh/m ³	0.16	0.16
Energia tot. accumulata ponderale	Wh/kg	85	85
Tempo di carica (al 95%)	ore	3.3	2.1
Carico (durata 8 ore)			
Energia termica da HTF	Wh	220.8	275.5
Massa PCM fusa	kg	3.37	3.34
Tempo di fusione del PCM	ore	3	2
Energia accumulata nel PCM	Wh	198.3	188.9
in % del teorico	%	99.8	95.9
Di cui come calore sensibile	Wh	95.2	86.7
E come calore latente	Wh	103.1	102.2
Energia accumulata nell'acciaio	Wh	18.5	17.6
Energia tot. accumulata volumetrica	MWh/m ³	0.11	0.1
Energia tot. accumulata ponderale	Wh/kg	58.7	56.5
Tempo di carico (al 95%)	ore	4.3	3.6
Scarico (durata 8 ore)			
Energia termica ceduta a HTF	Wh	211.4	197.3
Tempo di solidificazione del PCM	ore	3	2.5
Tempo di scarico (al 95%)	ore	5	4.5

Tabella 10 – Quadro sintetico dei risultati delle simulazioni di scambio termico condotto su un elemento di accumulo

2.4.2 Analisi CFD di un elemento di accumulo

Nel presente capitolo saranno espone le caratteristiche di un modello CFD (**FLUENT**) per la simulazione di un elemento di accumulo termico a calore latente e mostrati i principali risultati ottenuti (13). Tali risultati saranno utili alla comprensione delle dinamiche che si innescano in un accumulo del tipo “shell-and-tube”, soprattutto nel caso in cui siano assenti possibile alettature del tubo di scambio. L’attività svolta farà riferimento diretto alle condizioni sperimentali di alcuni test già condotti in passato su elementi di accumulo a calore sensibile in cemento (progetto SOLTECA). Tali condizioni saranno leggermente variate al fine di poter utilizzare i suddetti elementi di accumulo a calore latente e valutarne le prestazioni.

In particolare:

- a) la caldaia dovrà essere in grado di erogare temperature tali da arrivare alla completa fusione del PCM (che è supposta avvenire a circa 517 K). Coerentemente con le potenzialità della caldaia impiegata si è scelto di erogare l’olio ad una temperatura crescente da 423.15 K a 523.15 K in 30 minuti; successivamente la temperatura del flusso viene lasciata inalterata fino alla completa carica dei moduli.
- b) A causa della riduzione di densità che i sali presentano sia all’aumentare della temperatura e sia durante il processo stesso di fusione, si rende necessario l’inserimento nei moduli di PCM di un cuscinetto d’aria di dimensioni sufficienti ad assorbire le dilatazioni del materiale e conseguentemente capace di comprimersi sotto la pressione generata dalla dilatazione stessa.
- c) Per poter indagare anche l’importanza di eventuali dinamiche convettive all’interno della fase liquida, si sceglie di disporre i moduli disposti in senso verticale. Il cuscinetto d’aria sarà dunque inserito nella parte superiore dei moduli. Conseguentemente anche l’alimentazione dell’olio deve essere effettuata nella parte alta dello scambiatore *shell-and-tube* risultante. Sebbene sia facile intuire che l’alimentazione dal basso permetterebbe di sfruttare in maniera migliore il moto della fase liquida indotto dalla convezione naturale al fine dello scambio termico, è anche vero che, arrivando il PCM a fusione prima nella parte inferiore, la sua dilatazione non potrebbe essere correttamente assorbita dal cuscinetto d’aria, vista l’interposizione della fase solida e, di conseguenza, si verrebbero a generare delle sovrappressioni pericolose per l’integrità dell’accumulo. Alimentando dall’alto invece, la fusione sarebbe innescata prima nelle zone dove la dilatazione del PCM può essere facilmente assorbita dal cuscinetto d’aria.

Per il resto, si sceglie di mantenere invariate le caratteristiche sia dell’olio diatermico impiegato come HTF e sia del gruppo pompa-caldaia.

2.4.2.1 Modello numerico

Caratteristiche dei materiali

Innanzitutto, ci si pone il problema di quali siano le caratteristiche da imporre per i materiali in gioco. Per l’olio diatermico e per l’acciaio della tubazione, saranno mantenute tutte le ipotesi di calcolo già usate per le simulazioni relative all’impianto SOLTECA. Per l’insieme pompa-caldaia saranno lasciate inalterate le caratteristiche già trovate in precedenza e definite in apposite UDF; l’unica variazione introdotta sarà relativa alle temperature erogate dalla caldaia, che dovranno essere congruenti con quelle previste per i test sperimentali e già citate al punto a) del precedente paragrafo. Sarà comunque mantenuto il rateo di aumento della temperatura imposto dalla caldaia, pari a circa 3 gradi al minuto. Per il PCM, ossia per i sali solari, l’obiettivo di indagare anche l’influenza della convezione naturale in fase liquida, impone subito una riflessione accurata. Infatti, condizione necessaria per l’insorgere della convezione è che il fluido presenti una densità variabile con la temperatura. D’altra parte però, non si può pensare di impostare per il PCM la densità variabile, pur mantenendo a disposizione dello stesso un volume costante. Per risolvere questo problema in ambiente **Fluent**, si sono individuate ed opportunamente testate tre soluzioni:

- a) Modellazione del cuscinetto d’aria, trattata ovviamente come gas comprimibile, e abilitazione del multifase. Come riportato però dal manuale di Fluent, il modello Solidification & Melting è compatibile

con il solo VOF (Volume of Fluid, ossia uno dei modelli numerici impiegati da Fluent® per gestire flussi multifase) ed è inoltre incompatibile con flussi comprimibili. Questa soluzione è stata quindi scartata.

- b) Modifica delle condizioni al contorno del volume che contiene il PCM. Sono state prese in esame diverse ipotesi e sono state condotte le relative simulazioni per verificarne la fattibilità. In particolare, si è fatta l'ipotesi che il dominio contenente il PCM presenti una parete aperta nella parte superiore attraverso la quale si possa avere un flusso di materiale in ingresso o in uscita. Si è provato ad impostare su tale parete aperta la condizione al contorno "Outflow" ovvero "Pressure Outlet". In entrambi i casi si è riscontrato difficoltà a giungere a convergenza a causa della difficoltà di trattare il rientro di materiale. Si è provato a risolvere questo problema definendo una UDF appropriata per la modellazione delle proprietà del materiale che rientra all'interno del dominio di calcolo. Anche in questo caso però è necessario un numero proibitivo di iterazioni per giungere a convergenza durante ogni time step. Per questo motivo si è preferito non procedere con questa soluzione.
- c) Adozione dell'approssimazione di Boussinesq per la modellazione della variazione di densità del PCM. Utilizzando tale ipotesi di calcolo (già implementata in Fluent), si definisce di fatto una densità costante per il materiale in oggetto, definendo altresì un thermal expansion coefficient, definito come:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} * \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

in cui si è fatto ricorso alle notazioni classiche per densità, temperatura e pressione. In questo modo, in ogni equazione risolta sarà inserita di fatto una densità costante. Solo nell'equazione della conservazione della quantità di moto la densità in ogni cella sarà calcolata come:

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta \Delta T)$$

Dove ρ_0 è la densità definita costante e $\Delta T = T - T_0$, con T_0 che indica la temperatura di riferimento (da specificare nel pannello delle operating conditions), in prossimità della quale $\rho = \rho_0$. Come indicato dallo stesso manuale di Fluent®, l'approssimazione di Boussinesq è accettabile, finché risulta:

$$\beta \Delta T \ll 1$$

Si è scelto dunque di impiegare quest'ultima soluzione per la densità del PCM. In particolare, come valori di riferimento per densità e temperatura, si sono assunti quelli corrispondenti alle condizioni iniziali del transitorio analizzato. La densità viene calcolata riferendoci alla funzione polinomiale riportata nel precedente capitolo, da cui si ottiene anche il valore di β . In definitiva si assume:

$$T_0 = 423.15 \text{ K}$$

$$\rho_0 = \rho(T_0) = 1994.6 \text{ kg/m}^3$$

$$\beta = 3.18861 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$$

Si può ritenere sicuramente accettabile l'approssimazione di Boussinesq, in quanto, ipotizzando che al più durante le prove si avrà una variazione di 100 K, risulterà: $\beta \Delta T = \beta \cdot (100 \text{ K}) = 0.0318861 \ll 1$, e perciò l'approssimazione può considerarsi ampiamente accettabile. Per quanto riguarda i valori di viscosità da imporre per il PCM, in virtù della formulazione adottata da Fluent® nell'ambito del modello Solidification&Melting, non è necessario apportare modifiche alla viscosità del materiale considerato in fase liquida. Infatti la forza di coesione del materiale stesso in fase solida viene calcolata introducendo un termine S proporzionale alla costante A_{mush} . Analizzando il calore specifico e la conducibilità termica, si è scelto di imporre per queste caratteristiche dei valori costanti; infatti, nel caso di sali non arricchiti di nanocariche (rif. 4), il calore specifico rimane pressoché costante attraverso il cambio di fase, così come la conducibilità. Si sono imposti dei valori medi che sono riportati, così come tutte le altre grandezze definite per il PCM, nella seguente tabella:

Sali solari (PCM)	
Densità	1994.6 kg/m ³
Conducibilità	0.4886 W/m/K
Calore Specifico	1626 J/kg/K
Viscosità	<i>Piecewise Linear:</i> (T) = 423.15K = 0.009349 kg/m.s (T) = 423.15K = 0.004667 kg/m.s
<i>Thermal Expansion Coefficient</i>	0.000318861 1/K
Calore Latente di fusione	110010 J/kg
T _{solidus}	493.03 K
T _{liquidus}	517.29 K

Tabella 11 – Caratteristiche del PCM usato

Condizioni al contorno

In questa fase ci si limiterà alla riproduzione ed all'analisi di un solo modulo cilindrico in PCM, sempre riproducendo una geometria assialsimmetrica. Si assumerà una coibentazione ideale e quindi tutte le pareti esterne saranno impostate come adiabatiche. Le UDF utilizzate per portata e temperatura d'ingresso dell'olio sono le seguenti:

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(temperatura, thread, i)
{
    real tempo;
    face_t f;
    tempo = CURRENT_TIME;

    begin_f_loop (f, thread)
    {
        if ((tempo>=0.0) && (tempo<1998))
            F_PROFILE (f, thread, i)=423.15+tempo/20;
        if (tempo>=1998)
            F_PROFILE(f, thread, i)=523.15;
    }
    end_f_loop (f, thread)
}
```

Figura 73 – UDF impiegata per la temperatura d'ingresso.

```
DEFINE_PROFILE(portata, thread, i)
{
    real time;
    real T;
    face_t f;
    time = CURRENT_TIME;

    begin_f_loop (f, thread)
    {
        if ((time>=0.0) && (time<1998))
        {
            T=423.15+time/20;
            F_PROFILE (f, thread, i)=-0.000001*T*T+0.0015*T-0.358;
        }
        if (time>=1998)
        {
            T=523.15;
            F_PROFILE (f, thread, i)=-0.000001*T*T+0.0015*T-0.358;
        }
    }
    end_f_loop (f, thread)
}
```

Figura 74 – UDF impiegata per la portata di olio.

Monitors

Per ogni simulazione si acquisiscono gli andamenti della temperatura e della frazione di liquido nel tempo, in varie posizioni del modulo. Riferendoci alla seguente figura (relativa per comodità alla prima mesh impiegata) e tenendo conto che la lunghezza assiale dei moduli è sempre stata conservata pari a 500 mm:

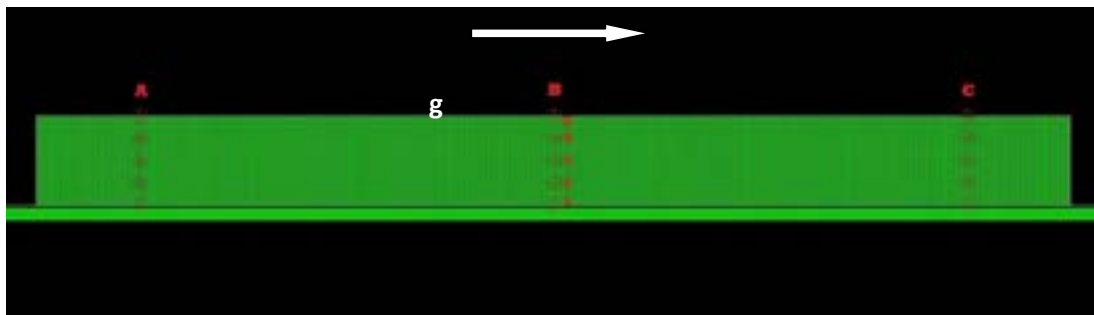


Figura 75 – Monitors di temperatura e frazione di liquido con indicazione del verso dell'accelerazione di gravità.

Si è scelto cioè di fissare tre piani, in corrispondenza di ognuno dei quali sono state rilevate temperatura e frazioni di liquido a 5 quote radiali differenti. I tre piani sono perpendicolari alla direzione assiale e sono disposti come segue:

- Il piano indicato con A si trova a 50 mm dal bordo superiore del modulo;
- Il piano indicato con B si trova in mezzeria, ossia a 250 mm da bordo superiore e bordo inferiore;
- Il piano indicato con C, si trova a 50 mm dal bordo inferiore del modulo.

Per ognuno di questi piani sono stati fissati 5 punti, numerati in ordine crescente dal più interno (più vicino al piping) al più esterno. Essi sono tutti equidistanti tra loro; il primo di questi punti si trova proprio sulla parete esterna del tubo in acciaio e quello più esterno sulla parete esterna del PCM. In questo modo ogni punto viene identificato da una lettera e da un numero. In più è stata acquisita anche l'entalpia accumulata nel modulo, definendola come integrale esteso a tutto il volume assialsimmetrico. Infine salvataggi frequenti dei file .dat hanno permesso di ricavare le distribuzioni di tutte le variabile termo-fluidodinamiche di interesse in vari istanti.

2.4.2.2 Prima geometria

Come primo approccio al problema, si è scelto di conservare per il sistema shell-and-tube generale le stesse dimensioni già adottate per i moduli in calcestruzzo, ossia raggio esterno del modulo di 50 mm e diametri interno ed esterno del tubo d'acciaio pari rispettivamente a 11 mm e 14 mm. Ovviamente si è fatto ancora ricorso all'ipotesi di assial-simmetria, per cui la mesh prodotta è ancora bidimensionale. A monte e a valle del modulo sono state conservati due tratti di tubo lunghi 300 mm, al fine di permettere al flusso d'olio entrante (le cui caratteristiche sono variabili nel tempo, come già indicato) di sviluppare completamente un profilo laminare per le velocità assiali. Mentre per la discretizzazione della porzione di dominio destinata all'olio e all'acciaio si sono conservate le caratteristiche già usate per le simulazioni esposte nel capitolo 5, per la porzione destinata ad accogliere il PCM la natura del problema ha imposto una discretizzazione più fitta. Infatti, durante il transitorio che si andrà a simulare, il fronte di fusione attraverserà l'intero dominio; conseguentemente quest'ultimo non sarà più destinato a materiale solido, bensì accoglierà, per buona parte del tempo simulato, anche materiale liquido. Per poter dunque riprodurre precisamente la morfologia del fronte di fusione e le caratteristiche del materiale che cambia fase (in primis la sua velocità!) in ogni istante, si è scelto di fare ricorso ad una griglia uniforme e particolarmente fitta. Ogni cella della zona destinata al PCM è stata infatti disegnata di forma quadrata e con ciascun lato di lunghezza pari a 0.5 mm. La mesh risultante si compone di 130000 celle. Alcune immagini aiutano a capire le caratteristiche di questa prima geometria:

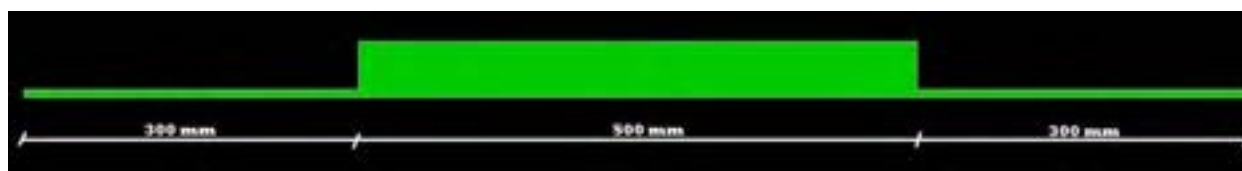


Figura 76 – Dimensioni assiali: valide per ogni mesh.

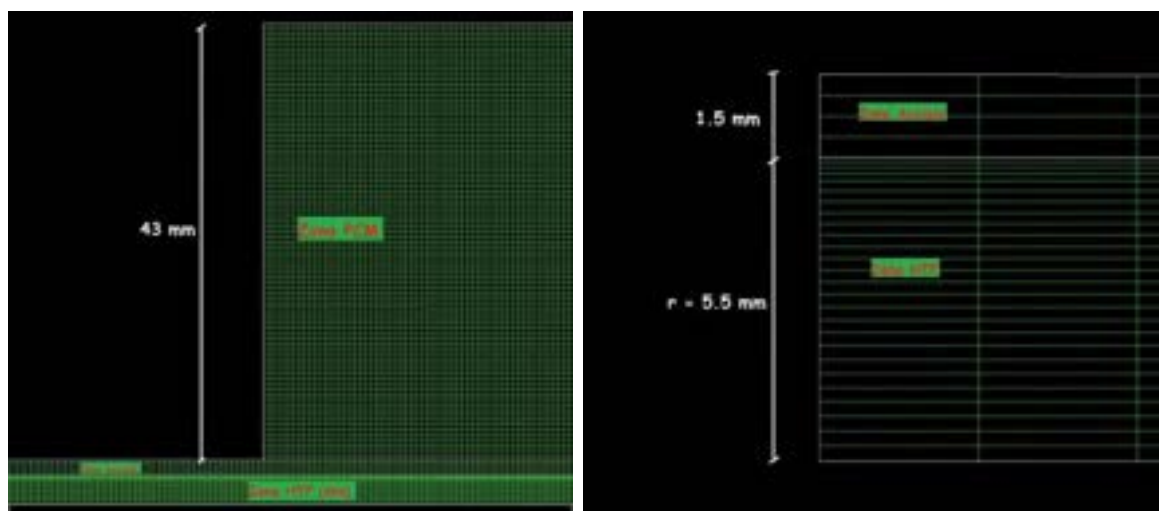


Figura 77 – Dimensioni radiali della prima mesh.

Per quanto riguarda i modelli di discretizzazione numerica adottati, il valore del time step necessario a ridurre i residui fino a 10^{-12} è stato fissato a 2 sec. Si è scelto di partire da una temperatura del PCM uniforme e pari a 423.15 K (per cui si parte da PCM solido per poi portarlo a fusione tramite riscaldamento). Si tenga presente che, anche in questo caso, non sarebbe fattibile un calcolo relativo a transitori di svariate ore adottando time step più bassi.

Il modello allestito è stato dunque applicato alla geometria appena esposta. E' emersa immediatamente la grande lentezza nella risposta di un sistema così disegnato. D'altronde era prevedibile una così scarsa velocità di risposta ai transitori termici, visto che la diffusività dei sali assume valori che si aggirano intorno a $1.5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, circa un terzo di quella del cemento.

Alcune stime effettuate sia grazie a modelli teorici che grazie a simulazioni numeriche più semplici hanno fornito come tempo di carica di un sistema così disegnato un valore prossimo alle 14-15 ore. Un tempo così alto limita sia la riproducibilità numerica (tempi di simulazione di circa 18 giorni) che l'effettiva possibilità di adottare un sistema del genere come accumulo in impianti STD.

Si riportano di seguito le evoluzioni di temperatura e frazione di liquido nell'intero dominio durante le prime 3.5 ore di funzionamento: le immagini sono acquisite ad intervalli regolari di mezzora. Ogni considerazione tecnica è rimandata alla prossima geometria elaborata.

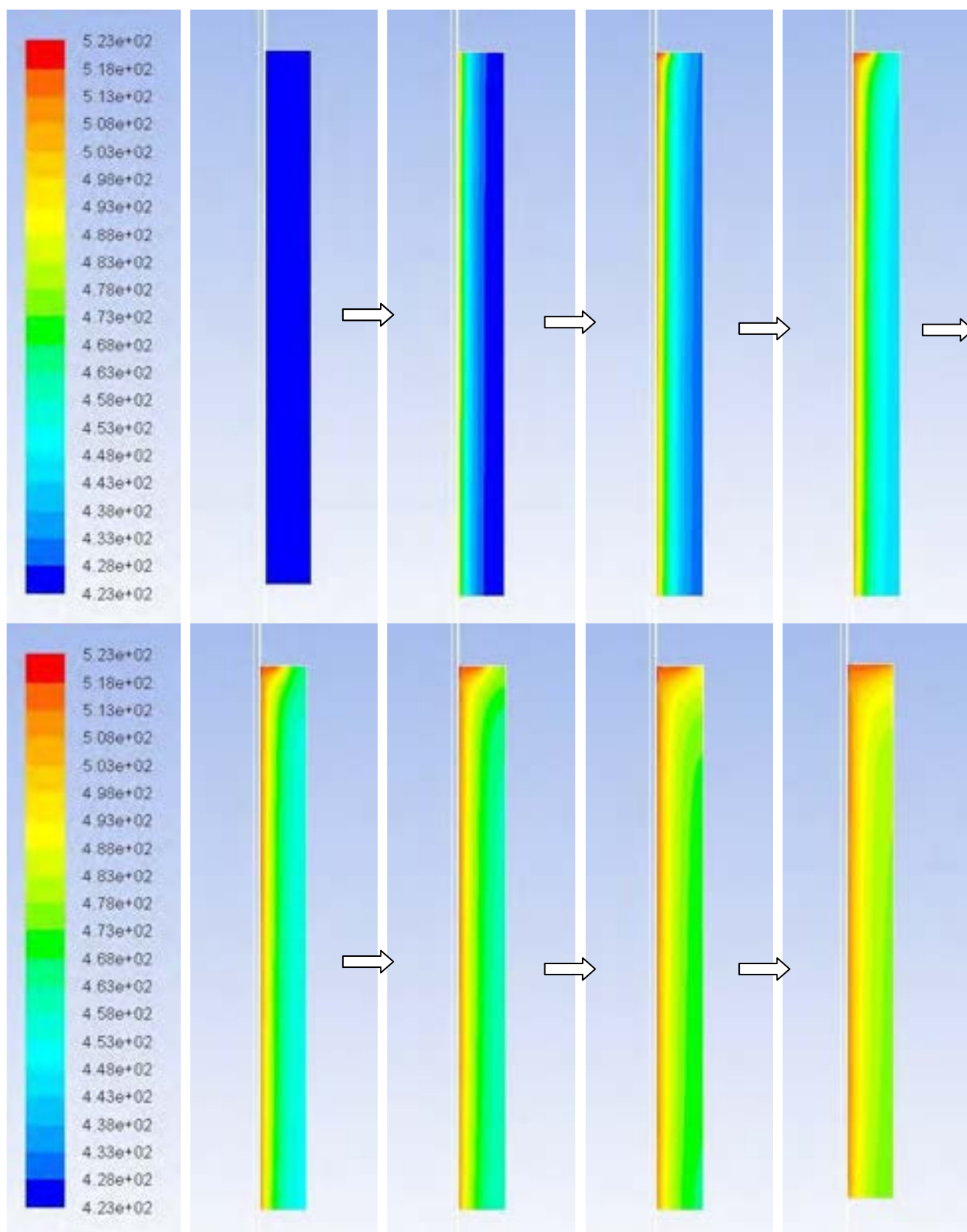


Figura 78 - Distribuzioni di temperatura acquisite ad intervalli regolari di 30 minuti.

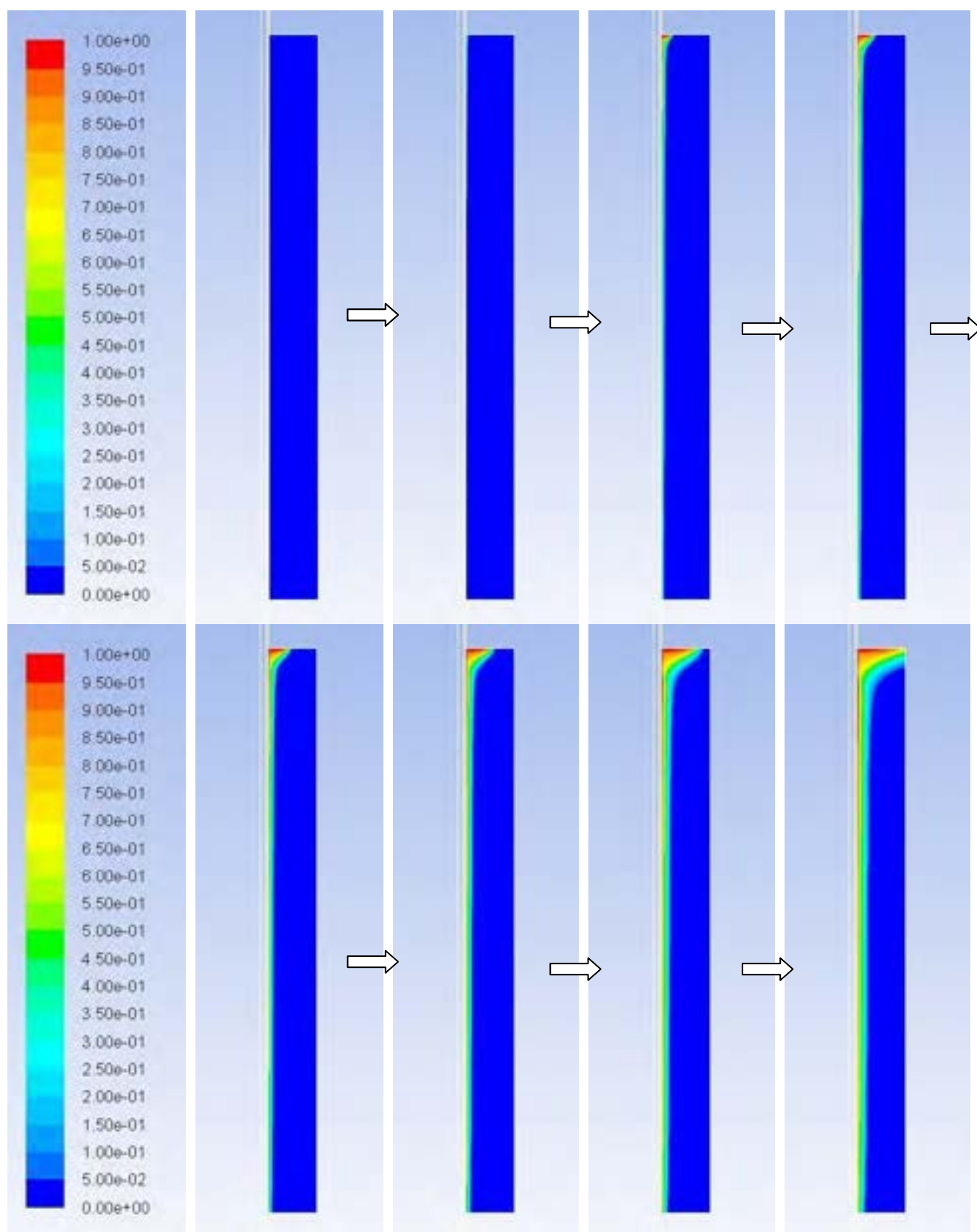


Figura 79 – Distribuzioni di frazione di liquido acquisite ad intervalli regolari di 30 minuti.

2.4.2.3 Seconda geometria

La lentezza nella risposta della prima geometria elaborata, impone la modifica della stessa. In particolare si rende necessario apportare delle modifiche che favoriscano ed intensifichino lo scambio termico tra olio e PCM e allo stesso tempo permettano al calore entrante di raggiungere più facilmente anche le zone del modulo più lontane dal tubo interno. Per questo motivo si è scelto di allargare il tubo di acciaio, riducendo inoltre lo spessore; consultando i diametri commerciali disponibili per questo tipo di piping, la scelta è ricaduta su un tubo avente diametro interno di 14 mm e spessore di 16 mm. Allo stesso tempo, si è pensato di restringere il raggio del modulo di PCM da 50 mm a 35 mm: questa scelta corrisponde allo studio di uno scambiatore shell-and-tube in cui i tubi immersi nel materiale di accumulo siano più fitti ed in numero maggiore, in modo che ognuno di essi agisca su una porzione di PCM più ridotta. Mantenendo inalterate tutte le altre caratteristiche in gioco (portata e temperatura di olio, caratteristiche dei materiali, morfologia della mesh e misure assiali della stessa), si è pervenuti alla mesh mostrata di seguito, composta da un totale di circa 119000 celle.



Figura 80 – Nuova geometria, dimensioni assiali.

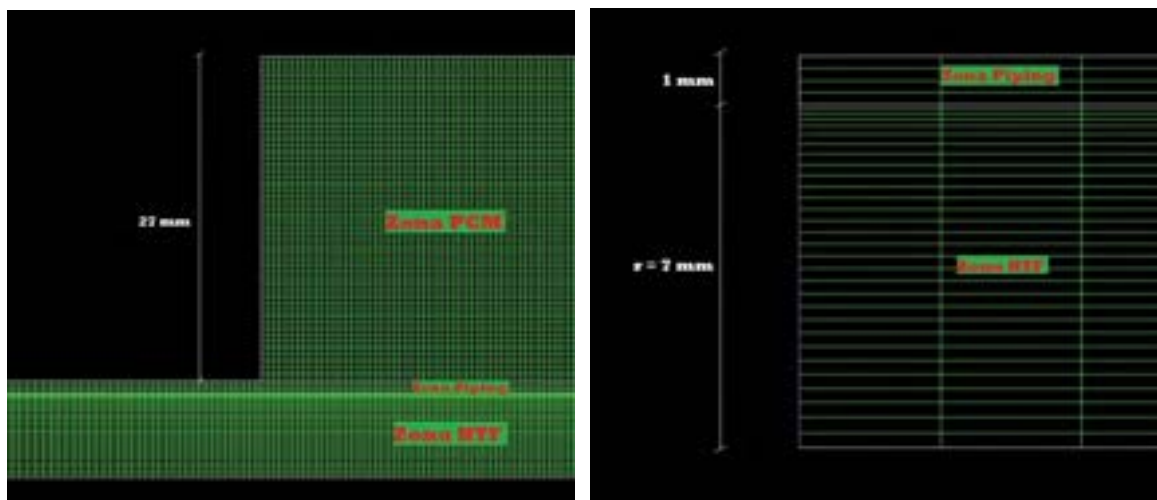


Figura 81 – Dimensioni radiali della nuova geometria.

In questo caso il time step da adottare per ottenere bassi valori dei residui si è rivelato molto più piccolo del caso precedente e pari a 0.5 sec. Questo perché, essendo lo sviluppo radiale della geometria più piccolo, i gradienti di temperatura saranno mediamente più alti in questa direzione e, in più, avendo prolungato la simulazione solo per 3.5 ore, nel caso precedente non si era ancora verificato il passaggio in fase liquida di gran parte del PCM; ora invece, la simulazione verrà prolungata fino alla completa (o quasi) carica del modulo e perciò finché tutto il PCM sarà arrivato a fusione. La simulazione delle dinamiche di un fluido è senz'altro più gravosa rispetto a quelle di un solido e questo si riflette inevitabilmente sull'ampiezza del time step da adottare. Sempre partendo da una temperatura iniziale del PCM pari a 423.15 K, il tempo necessario a caricare completamente il modulo si è rivelato prossimo alle 7 ore; le seguenti figure mostrano l'evoluzione delle temperature sempre ad intervalli regolari di 30 minuti. Questa volta si ritiene particolarmente efficace mostrare il movimento del fronte di fusione: saranno quindi riportati i valori di frazione di liquido compresi tra 0.45 e 0.55, come valori intermedi tra fase solida e fase liquida. In questo modo si mostrerà chiaramente come si muove il fronte di fusione all'interno del PCM. In più si riportano gli andamenti temporali delle temperature rilevate dai monitors impostati durante il transitorio analizzato.

Per comodità in questi grafici si riportano anche le temperature di inizio e fine fusione, per agevolare le considerazioni che saranno espone nei prossimi paragrafi. Infine si allega anche l'andamento temporale dell'entalpia globalmente accumulata.

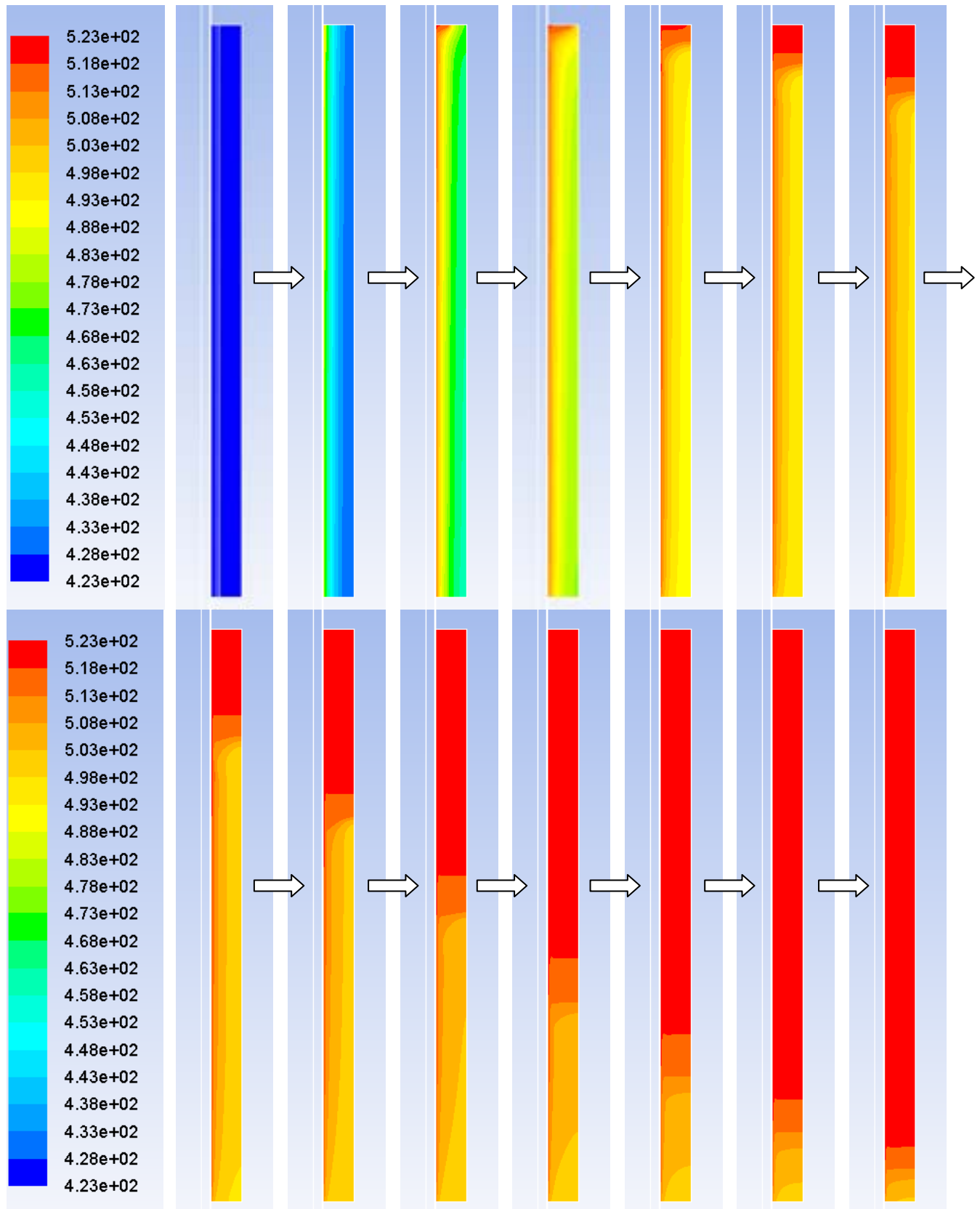


Figura 82 – Distribuzioni di temperatura acquisite ad intervalli regolari di 30 minuti.

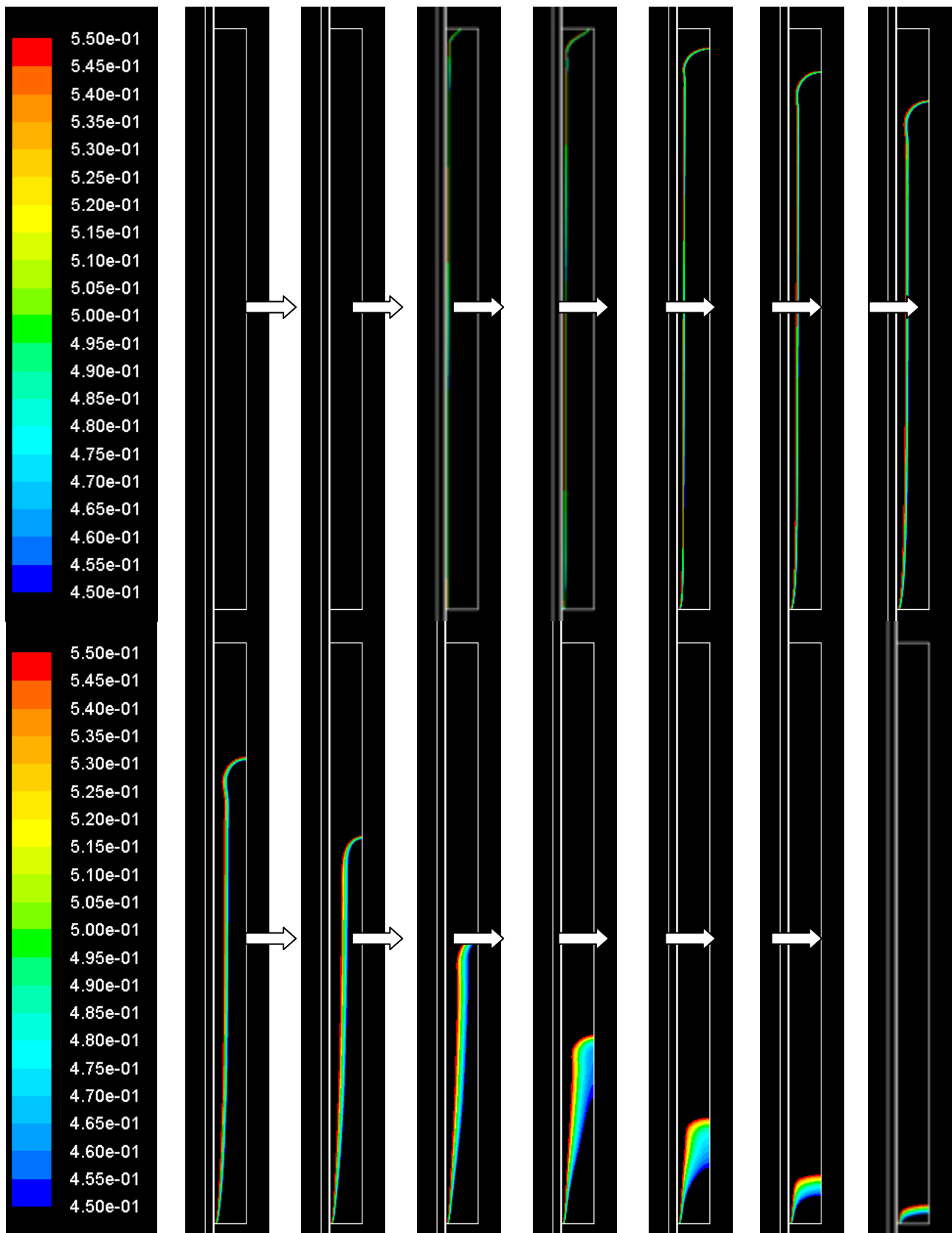


Figura 83 – Movimento del fronte di fusione: immagini acquisite ogni 30 minuti.

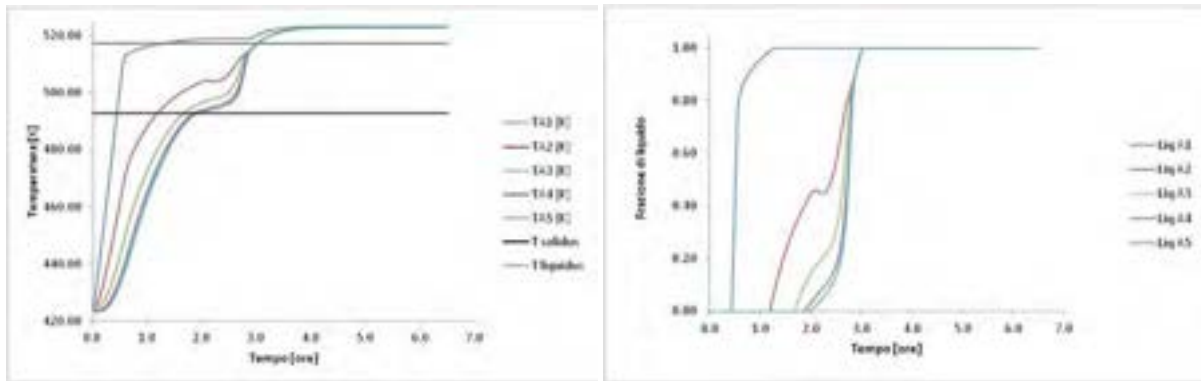


Figura 84 – Andamenti temporali di temperature e frazioni di liquido in prossimità dei 5 punti monitorati sul piano A.

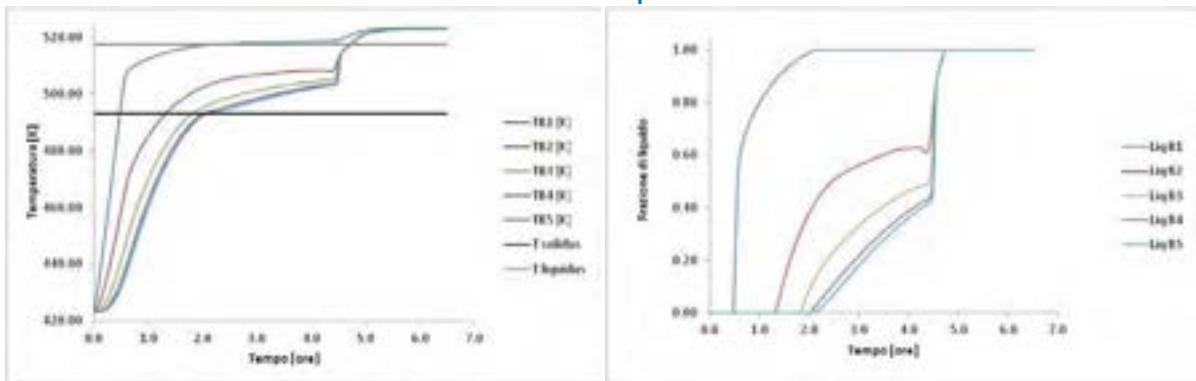


Figura 85 – Andamenti temporali di temperature e frazioni di liquido in prossimità dei 5 punti monitorati sul piano B.

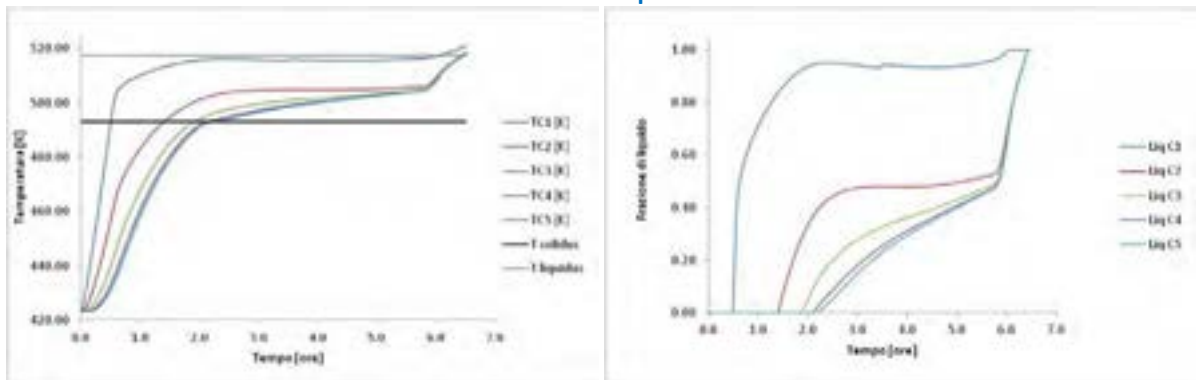


Figura 86 – Andamenti temporali di temperature e frazioni di liquido in prossimità dei 5 punti monitorati sul piano C.

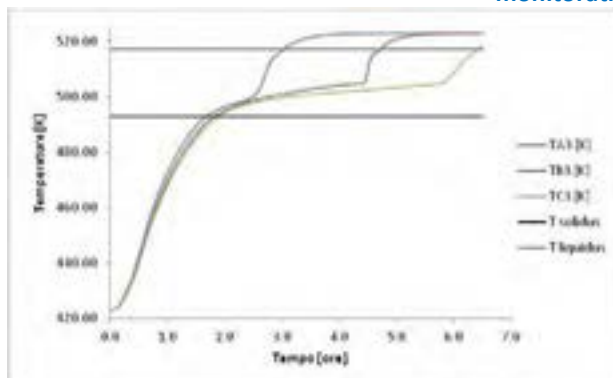


Figura 87 – Confronto tra le temperature rilevate alla stessa quota radiale (mezzeria) ma a diverse quote assiali.

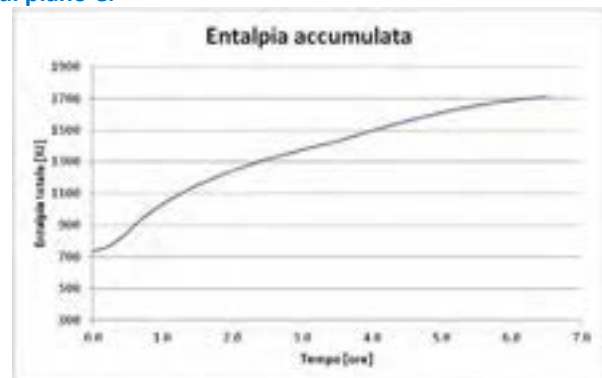


Figura 88 – Andamento temporale dell'entalpia globale del PCM.

Passiamo all'analisi dei risultati ottenuti. Dalla Figura 88 si deduce che l'accumulo analizzato è stato in grado di accumulare circa 1 MJ di energia termica nell'arco di 6.5 ore. Questo dato testimonia ancora una volta le straordinarie potenzialità dei materiali PCM nell'accumulo di energia. Accumulare così tanta energia in un volume così ridotto sarebbe praticamente impossibile se si adottassero i metodi e le tecnologie impiegate fino ad oggi. Si esaminano quindi le distribuzioni spaziali di temperatura mostrate in Figura 82. Si evince chiaramente che, fintanto che il PCM si trova interamente allo stato solido, le linee isoterme risultano perfettamente parallele all'asse del tubo, come è lecito aspettarsi in virtù dello scambio termico per conduzione. Quando invece il PCM comincia a fondere, contestualmente si instaura nella fase parzialmente liquida un movimento di massa dovuto alla differente densità a seconda della temperatura. Più il materiale è vicino alla temperatura di fine fusione, più è fluido e più questo movimento di massa si intensifica. In altre parole, allo scambio termico per conduzione si aggiunge una componente di scambio termico per convezione naturale, confermato dalle distribuzioni di velocità riportate di seguito. Esse sono relative, per comodità, ad un solo istante di tempo (circa 4 ore dall'inizio della simulazione).

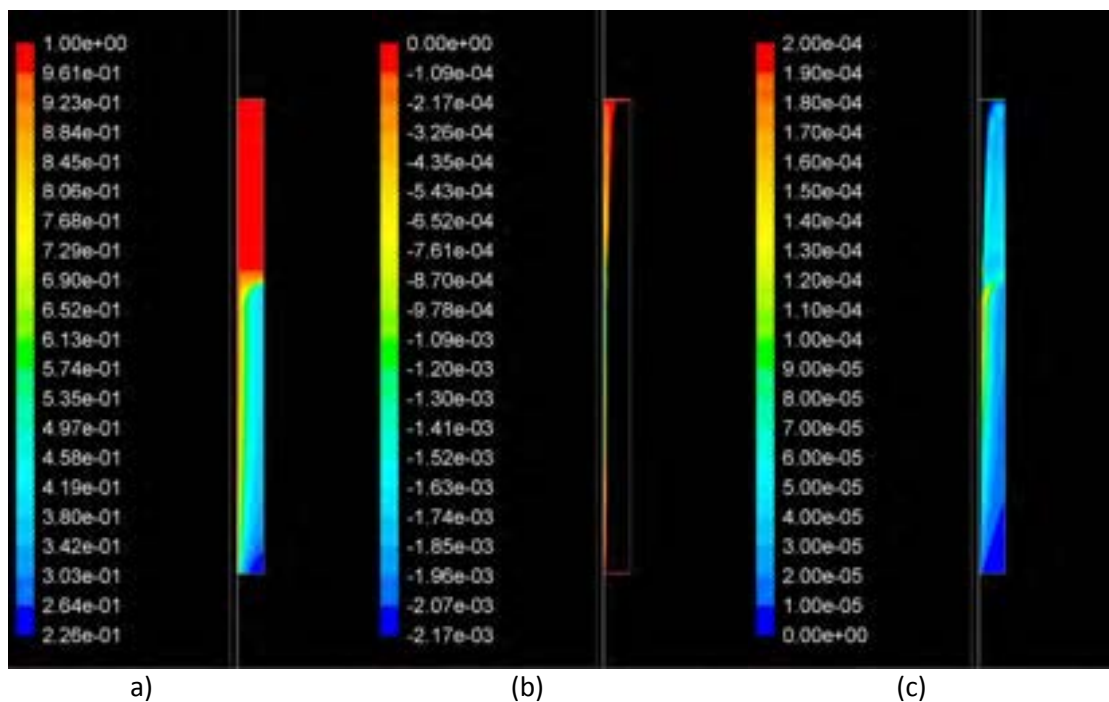


Figura 89 – Frazioni di liquido (a), velocità dirette verso l'alto (b) e velocità dirette verso il basso (c) espresse in m/s dopo 4 ore (verso positivo coincidente con il verso di g e diretto verso il basso).

In Figura 89 si vede chiaramente come il materiale adiacente alla parete esterna del tubo destinato all'HTF, essendo più caldo, sia caratterizzato da un moto di risalita, indicato dall'insorgere di velocità negative (l'asse relativo è orientato come g, verso il basso). A questo moto di risalita corrisponde un moto di discesa del materiale più lontano dalla parete e, per questo, più freddo. Questo moto è più intenso proprio in prossimità del fronte di fusione, laddove il materiale diventa sufficientemente fluido da potersi muovere nel dominio sotto l'azione delle forze indotte dai gradienti di temperatura e densità. Ad ulteriore conferma, si riporta un particolare dei vettori di velocità a ridosso del fronte di fusione, sempre allo stesso istante di tempo (Figura 90).

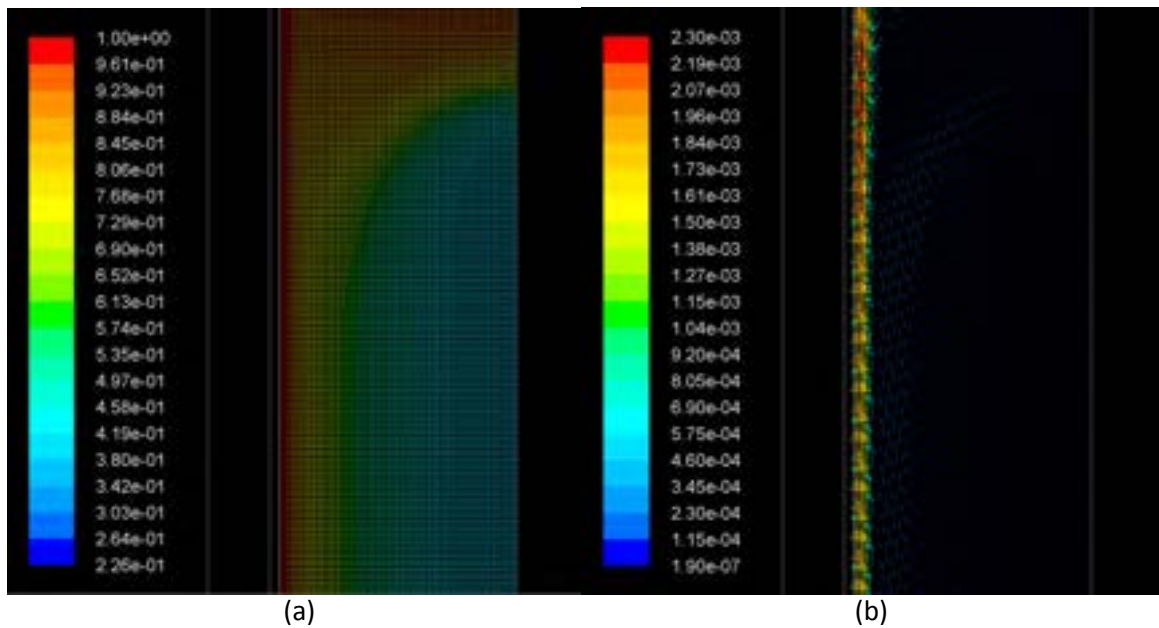


Figura 90 – Frazione di liquido (a) e vettori di velocità (modulo in m/s) (b) a ridosso del fronte di fusione dopo 4 ore.

Si deve sempre tenere presente che i sali impiegati come PCM sono caratterizzati da una viscosità molto bassa e presentano quindi un'elevata facilità di movimento. Non a caso le linee iso-temperatura nella parte alta del modulo già dopo un paio d'ore si presentano orizzontali e non più verticali, indice del fatto che la fase liquida sperimenta un movimento convettivo tutt'altro che trascurabile. Facendo sempre riferimento alla [Figura 82](#), si nota che il volume di PCM già carico (cioè già a temperatura pari a quella dell'olio HTF, 523.15 K, a cui corrisponde il colore rosso) sia posizionato nella parte alta e si estenda man mano verso il basso. Al contrario, nella parte inferiore le temperature sembrano rimanere costanti: si vedono colori che vanno dal giallo intenso all'arancione, colori a cui corrispondono temperature tipiche della zona di transizione. Infatti il PCM in questa zona sta attraversando il cambio di fase e quindi, visto l'accumulo di calore latente anziché sensibile, la sua temperatura cresce in maniera molto lenta dalla $T_{solidus}$ alla $T_{liquidus}$. Appena il PCM diventa sufficientemente fluido (cioè appena la sua temperatura è sufficientemente vicina a quella di fine fusione) esso può cominciare a muoversi e, sotto la spinta dovuta al gradiente di densità (a sua volta provocato dal gradiente di temperatura) sale verso l'alto, andando ad ingrandire il volume di PCM già carico. Questo ragionamento è confermato anche dal movimento del fronte di fusione mostrato in [Figura 83](#): il fronte inizialmente si muove parallelamente al tubo per poi accelerare più fortemente in senso assiale, cioè perpendicolare al tubo. L'evoluzione del fronte è conseguenza del movimento di massa appena descritto. Si noti come gli andamenti mostrati in [Figura 83](#) siano perfettamente in linea con la [Figura 112-b](#), relativa alla fusione controllata prevalentemente da scambio termico convettivo. Ad ulteriore conferma di quanto esposto, si esaminano i diagrammi riportati in [Figura 84](#), [Figura 85](#), [Figura 86](#) e [Figura 87](#). Esse mostrano l'andamento delle temperature nei punti monitorati e le conseguenti evoluzioni della frazione di liquido. Ragionando in generale, si vede come tutte le sezioni monitorate presentino andamenti simili con l'unica anomalia rappresentata da uno sfasamento temporale (evidente in [Figura 87](#)). In particolare si vede che le temperature rilevate a ridosso del tubo d'acciaio seguono fedelmente la temperatura della parete stessa; in questi punti lo scambio termico è così intenso che il cambio di fase avviene in maniera estremamente veloce come testimoniano gli andamenti di frazioni di liquido nei punti caratterizzati dal numero 1. Andando invece verso la parte interna del volume di PCM questo comportamento è gradualmente smorzato. Per ogni punto interno si distingue chiaramente un cambio di pendenza nelle curve di temperatura in prossimità della temperatura di inizio fusione. Anche questo è perfettamente in linea con quanto ci si sarebbe aspettato a livello puramente teorico: è evidente l'analogia tra questo comportamento e quello previsto in [Appendice 2](#) e riassunto dalla [Figura 114](#). Superata la temperatura di inizio fusione il materiale accumula energia termica sotto forma di calore latente e pertanto la sua temperatura cresce in maniera più lenta. Si vede chiaramente però che, sia nel piano A che nel piano B e

nel piano C, in un certo istante le temperature interne al PCM manifestano un secondo cambio di pendenza e ricominciano a crescere in maniera più rapida, sebbene la fusione non sia ancora terminata. Contestualmente le temperature indicate con 2, 3, 4 e 5 convergono tutte verso un unico valore e proseguono la loro crescita verso i 523.15 K della forzante in maniera più rapida. Evidentemente questo secondo cambio di pendenza corrisponde al manifestarsi della convezione naturale: le temperature proprie di ogni piano convergono perché, trovandosi ad una stessa altezza assiale, appena diventano sufficientemente fluide (il che sembra accadere per frazioni di liquido prossime a 0.5) possono muoversi e andare a stratificarsi verticalmente sotto l'azione delle forze convettive.

Questa stratificazione è in tutto e per tutto analoga alla stratificazione che avviene nei sistemi di accumulo di tipo "Thermocline", nei quali proprio questa stratificazione viene sfruttata per captare sali caldi e freddi da un serbatoio unico. Tutto questo è ulteriormente confermato dalle distribuzioni di frazione di liquido mostrate in Figura 83. Infine, è particolarmente utile analizzare il confronto tra le temperature rilevate alla stessa quota radiale ed indicate con 3; questo confronto è riportato in Figura 88. Si noti come comportamenti analoghi siano però sfasati nel tempo, in conseguenza del movimento prevalentemente assiale del fronte di fusione. Si nota però che nei punti indicati con B, la pendenza delle temperature dopo l'intervento della convezione naturale è maggiore rispetto alla pendenza nei piani A e C. D'altronde, il piano indicato con B si trova nella posizione più favorevole rispetto allo scambio termico per convezione: quando il fronte di fusione lo attraversa (e cioè quando il PCM assume facoltà di movimento) il piano B si trova in posizione intermedia tra il PCM già caldo che lo sovrasta e quello ancora "freddo" che si trova nella parte bassa. Ciò vuol dire che il piano B è esposto ad un gradiente termico più elevato rispetto a quello a cui sono esposti i piani A e C nel momento in cui sono attraversati dal fronte di fusione: conseguentemente la convezione naturale sarà più intensa, poiché alimentata proprio dal gradiente termico in senso verticale. Ad ulteriore conferma, dalla Figura 83 si nota una certa accelerazione del fronte di fusione quando esso attraversa la parte centrale del modulo. Un terzo cambio di pendenza si manifesta in ogni punto monitorato al superamento della temperatura di fine fusione, conseguenza del ritorno all'accumulo di energia termica sotto forma di calore sensibile.

Da un punto di vista globale si può dimostrare che l'instaurarsi della convezione naturale non riduce in maniera rilevante il tempo necessario alla carica del modulo, pur cambiandone profondamente le dinamiche termiche. Nel capitolo precedente si era stimato il tempo di carica di questa seconda geometria, senza tener conto dei moti convettivi, ottenendo un tempo di carica pari a circa 6-7 ore. Tale dato è stato ottenuto tramite simulazioni analoghe condotte con un codice agli elementi finite di nome CAST3M in cui ovviamente non si è tenuto conto in alcun modo della convezione.

2.4.2.4 Il parametro A_{mush}

Nella presentazione del modello teorico impiegato da Fluent© per riprodurre il cambio di fase si è già parlato del momento dissipatore aggiunto nella corrispondente equazione di conservazione al fine di simulare la forza di coesione in fase solida ed in zona di transizione. Si ricorda che questo momento dissipatore è calcolato come:

$$S = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} \vec{u}$$

Esso è quindi proporzionale alla costante definita come A_{mush} e assume valore massimo quando il materiale è solido ($\beta = 0$) e si annulla quando il materiale è completamente liquido ($\beta = 1$).

Vista la dipendenza di S da A_{mush} è corretto affermare che tanto maggiore sarà quest'ultimo fattore, tanto maggiore sarà la forza di coesione indotta nel materiale durante l'attraversamento della zona di transizione. A_{mush} dovrebbe essere settata dunque a seconda delle caratteristiche del materiale in cambiamento di fase, in particolare a seconda della sua densità e della sua viscosità che ne regolano la maggiore o minore facilità di movimento. Il manuale di Fluent© suggerisce per A_{mush} dei valori compresi tra 10^5 e 10^7 , fornendo un valore di default pari a 10^5 . Visto però che i sali solari sono caratterizzati da una

densità molto alta, si è scelto di fissare per A_{mush} un valore pari a $5 \cdot 10^5$. Ovviamente questa imposizione non è supportata da basi teoriche e dovrebbe invece prendere le mosse da una precisa stima della resistenza al moto della fase parzialmente liquida del PCM considerato. Comunque, conducendo delle simulazioni anche con A_{mush} pari al valore di default non si sono riscontrate grosse discrepanze rispetto a quanto già esposto. L'unica differenza corrisponde al fatto che l'instaurarsi della convezione naturale (i cui segnali sono stati già definiti) si manifesta per frazioni di liquido minori.

I tempi di carica non hanno subito alcun cambiamento.

2.4.2.5 Conclusioni

Le simulazioni condotte hanno permesso di distinguere e studiare le dinamiche tipiche di un sistema di accumulo a calore latente: si è stati in grado di dimostrare che, sebbene la convezione naturale che si instaura nella fase parzialmente liquida del PCM, influisca in maniera importante sulle dinamiche relative alla fusione ed alla fase di carica del sistema, essa non ha particolare influenza sui tempi di carica dello stesso. Chiaramente una effettiva validazione di questi dati si potrà ottenere solo attraverso opportune prove sperimentali. Inoltre, si può prevedere di approfondire ulteriormente la conoscenza teorica delle caratteristiche dei sali solari in zona di transizione e ripetere le simulazioni condotte adottando una geometria 3D anziché una assialsimmetrica. E' facile prevedere che l'adozione di una mesh tridimensionale possa fornire dei risultati più aderenti alla realtà. In più, si sottolinea come la natura del problema di fusione dei PCM suggerisca l'adozione per questi ultimi di un modello che li consideri come fluidi comprimibili, al fine di considerare correttamente l'influenza reciproca tra variazioni di densità e pressioni indotte. Vista l'impossibilità di condurre questo tipo di simulazioni in Fluent® (a causa dell'incompatibilità numerica tra flussi comprimibili e materiali che sperimentino fusione/solidificazione), sarebbe necessario impiegare codici di altro tipo. Si può ancora pensare di variare la geometria adottata per i moduli in PCM fino a pervenire ad una configurazione ottima che massimizzi il rapporto tra energia stoccata e tempo di carica; a tal proposito si può agire sia sulla morfologia dei tubi (scegliendo per esempio dei tubi alettati per aumentare le superfici di scambio), sia modificare le caratteristiche del gruppo pompa-caldaia per intensificare lo scambio termico (ad esempio aumentando la portata di olio fino ad ottenere un regime di flusso turbolento nel tubo interno).

2.4.3 Valutazione dello schermaggio termico

Nelle analisi FEM e CFD precedenti si era ipotizzato che l'elemento di accumulo fosse perfettamente isolato dall'ambiente esterno. Chiaramente, nella realtà tale ipotesi non è conservativa poiché sarà necessario predisporre una opportuna coibentazione che ridurrà ma non annullerà le perdite del sistema. In questo capitolo cercheremo prima di tutto di dimensionare la coibentazione da adottare, nel rispetto dei criteri che verranno definiti, e quindi di valutarne gli effetti sul sistema (capacità termica, tempi di carico-scarico) attraverso delle analisi FEM semplificate.

2.4.3.1 Formulazione teorica

Calcolo spessore minimo coibente

In **Figura 16**, è mostrata una parte della sezione piana di un elemento di accumulo a PCM, di lunghezza L . Nella parte interna scorre il fluido termovettore che cede o recupera calore dal sistema. Esso scorre all'interno di un tubo di raggio r_1 e spessore s_a . Il calore è accumulato all'interno di una zona di spessore s_p che contiene il mezzo di accumulo. Tale mezzo è delimitato da un vessel di spessore s_v . All'esterno del vessel ci darà uno spessore s_c di coibente tale da minimizzare le perdite di energia termica dal sistema e permettere al mezzo di accumulo la sua totale fusione.

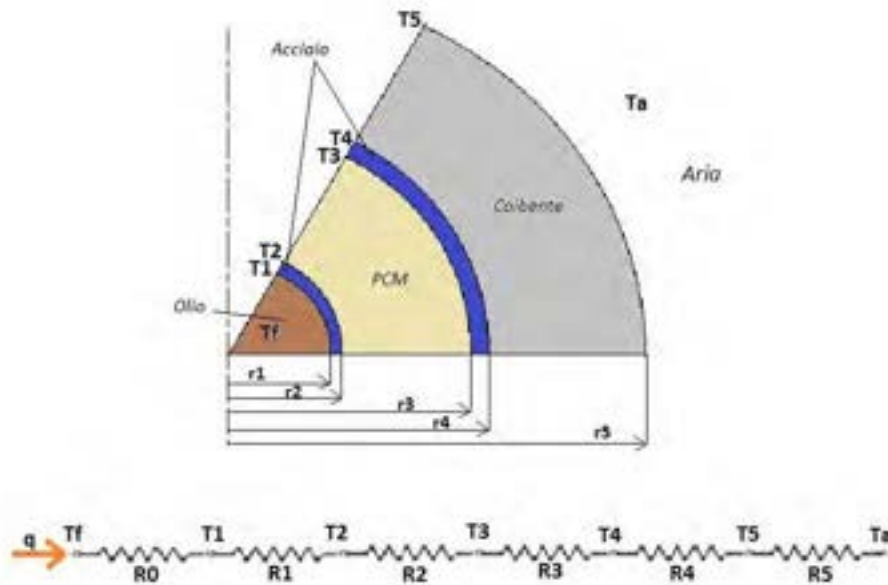


Figura 91- Schema di elemento di accumulo termico guscio-tubo (a) senza alette e (b) con alette.

Le varie zone saranno definite dai seguenti raggi;

$$r_2 = r_1 + sa \quad r_3 = r_2 + sp \quad r_4 = r_3 + sv \quad r_5 = r_4 + sc$$

Per l'elemento di accumulo coibentato vale l'equivalenza elettrica rappresentata in Figura 16. Le resistenze termiche conduttive relative all'acciaio, al PCM nelle sole fasi liquida o solida ed al coibente possono essere espresse come segue:

$$R_1 = \frac{1}{k_1 \pi L} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad R_2 = \frac{1}{k_2 \pi L} \ln \frac{r_3}{r_2}$$

$$R_3 = \frac{1}{k_3 \pi L} \ln \frac{r_4}{r_3} \quad R_4 = \frac{1}{k_4 \pi L} \ln \frac{r_5}{r_4}$$

Invece, le resistenze convettive relative allo scambio termico con l'olio diatermico, internamente, e con l'aria, esternamente sono espresse:

$$R_0 = \frac{1}{2\pi r_1 L h_0} \quad R_5 = \frac{1}{2\pi r_5 L h_5}$$

Quindi, la resistenza termica totale del sistema è:

$$R_{tot} = R_0 + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$$

Mentre, la potenza termica trasmessa è:

$$q = \frac{(T_f - T_a)}{R_{tot}}$$

In fase di carica, la coibentazione deve essere in grado di consentire al PCM di fondere completamente in modo da massimizzare la quota di energia accumulata. Ciò significa in pratica imporre una temperatura **T3** che sia: **T3 > Tfus**. In tal caso, avendo come incognita lo spessore di coibente, sc, la resistenza termica complessiva può essere scritta come:

$$R_{tot} = (R_0 + R_1 + R_2 + R_3) + (R_4 + R_5) = R_{0123} + R_{45}(sc)$$

Inoltre, avendo imposto **T3** si può conoscere q:

$$q = \frac{(T_f - T_3)}{R_{012}}$$

E **T4**:

$$T_4 = T_3 - qR_3$$

Quindi possiamo scrivere:

$$q = \frac{(T_f - T_4)}{R_{0123}} = \frac{(T_4 - T_a)}{R_{45}}$$

ovvero

$$R_{45}(sc) = R_{0123} \frac{(T_4 - T_a)}{(T_f - T_4)}$$

R45(sc) è una funzione complessa di sc, infatti:

$$R_{45}(sc) = \frac{1}{\pi L} \left[\frac{1}{k_4} \ln \frac{(r_4 + sc)}{r_4} + \frac{1}{(r_4 + sc) h_5} \right]$$

Dalle relazioni precedenti ne deriva:

$$\frac{1}{\pi L} \left[\frac{1}{k_4} \ln \frac{(r_4 + sc)}{r_4} + \frac{1}{(r_4 + sc) h_5} \right] = R_{0123} \frac{(T_4 - T_a)}{(T_f - T_4)}$$

Da tale relazione è possibile ricavare, per via iterativa, il valore di **sc** che soddisfa la temperatura **T3** imposta. Successivamente è poi possibile ricavare gli altri valori di temperatura incogniti.

$$T_1 = T_f - qR_0 \quad T_2 = T_1 - qR_1 \quad T_5 = T_4 - qR_4$$

Particolare importanza riveste la temperatura esterna **T5** che deve rispettare i limiti imposti per la sicurezza del personale.

APPLICAZIONE

Il nostro sistema ha le seguenti caratteristiche:

lunghezza	L	m	1
raggio tubo	r1	mm	7
spessore tubo	sa	mm	1
spessore PCM	sp	mm	27
spessore vessel	sv	mm	3
coef. scambio olio	h0	W/m2/K	1000
cond. acciaio	k1,k3	W/m/K	20
cond. pcm	k2	W/m/K	0.5
cond. coibente	k4	W/m/K	0.04
coef. scambio aria	h5	W/m2/K	5
temp. fluido	Tf	°C	260
temp. aria ambiente	Ta	°C	20

Da cui: $r_2 = 8 \text{ mm}; \quad r_3 = 35 \text{ mm} \quad r_4 = 38 \text{ mm}$

Essendo la temperatura di fusione del PCM di circa 225°C si impone che: $T_3 = 230^\circ\text{C}$. Con questi dati è possibile calcolare le resistenze termiche R_0 , R_1 , R_2 ed R_3 nonché la potenza termica trasmessa q :

R_0	K/W	0.0227	R_1	K/W	0.0010
R_2	K/W	0.4698	R_3	K/W	0.0006
q	W	60.77			

Di conseguenza il valore della resistenza **R_{0123}** sarà di 0.4942 K/W e la resistenza **R_{45}** di 3.4545 K/W. Ora è possibile, attraverso una procedura iterativa, calcolare il valore dello spessore di coibente sc , partendo da un valore iniziale di 20 mm. Alla fine si ottiene una stima di: **$sc = 120$ mm**. Con questo dato si possono allora ricavare i parametri mancanti:

r_5	mm	159			
R_4	K/W	3.2542	R_5	K/W	0.2002
T_1	°C	258.6	T_2	°C	258.6
T_4	°C	230.0	T_5	°C	32.2

La temperatura esterna al sistema è piuttosto bassa (circa 32°C) e le perdite contenute (60 W/m).

Dimensionamento e valutazione andamento temperature

Sulla base delle precedenti valutazioni si è ipotizzato di utilizzare uno spessore sc del coibente pari a 100 mm. Con questo dati si possono eseguire delle valutazioni analoghe alle precedenti e che condurranno ai seguenti risultati:

DATI				RISULTATI			
lunghezza	L	m	0.5				
raggio tubo	r_1	mm	7	R_0	K/W	0.04547	
spessore tubo	s_a	mm	1	R_1	K/W	0.00212	
spessore PCM	s_p	mm	27	R_2	K/W	0.93959	
spessore vessel	s_v	mm	3	R_3	K/W	0.00130	
spessore coibente	s_c	mm	100	R_4	K/W	5.86448	
	r_2	mm	8	R_5	K/W	0.46131	
	r_3	mm	35	R_{tot}	K/W	7.31430	
	r_4	mm	38				
	r_5	mm	138	q	W	32.81	
coef. scambio olio	h_0	W/m ² /K	1000	T olio-acc	T_1	°C	258.5
coef. scambio aria	h_5	W/m ² /K	5	T acc-pcm	T_2	°C	258.4
cond. acciaio	k_1, k_3	W/m/K	20	T pcm-ves	T_3	°C	227.6
cond. pcm	k_2	W/m/K	0.5	T ves-coib	T_4	°C	227.6
cond. coibente	k_4	W/m/K	0.07	T coib-aria	T_5	°C	35.1
temperatura olio	T_f	°C	260.0				
temperatura aria	T_a	°C	20.0				

Tabella 12 – Dati e risultati della valutazione dello scambio termico in un elemento di accumulo

L'andamento finale delle temperature è illustrato in Figura 92.

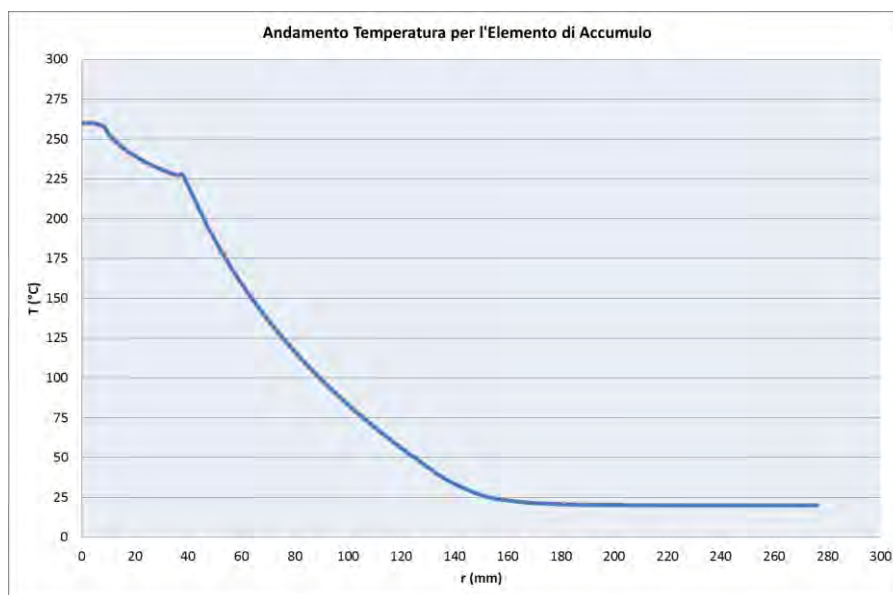


Figura 92- Andamento radiale della temperatura nell'elemento di accumulo ed al suo esterno

2.4.3.2 Analisi FEM semplificata

Al fine di verificare l'efficacia del dimensionamento effettuato in precedenza anche in condizioni transitorie, si è effettuata una analisi termica FEM semplificata (monodimensionale).

- **Geometria**

La geometria è quella relativa ad uno spessore dell'elemento di accumulo da analizzare costituito da un tubo in acciaio al cui interno scorre l'olio diatermico, uno spessore di PCM, il vessel di contenimento in acciaio e, infine, lo spessore di coibente che è in contatto con l'ambiente esterno. I dati utilizzati sono gli stessi di Tabella 4. Il mesh ottenuto è mostrato in Figura 93.



Figura 93- Mesh radiale nello spessore dell'elemento di accumulo

- **Caratteristiche materiali**

Per i materiali si sono utilizzate le caratteristiche qui riportate:

Materiale	Conducibilità termica	Densità	Capacità termica	Temp. di fusione	Calore latente
	$W/m.K$	kg/m^3	$J/kg/K$	$^{\circ}C$	J/kg
Acciaio	20.	7800.	500.	-	-
Sali solari (PCM)	0.5	1850.	1700.	225.	110000
Coibente	0.07	96.	1150.	-	-

Tabella 13 – Caratteristiche termiche dei materiali

- **Caratteristiche di scambio termico**

Lo scambio termico in fase di carica avviene per conduzione all'interno dei vari strati costituenti lo spessore dell'elemento di accumulo, ivi compreso l'eventuale cambio di fase solido-liquido del PCM. Inoltre, ci sarà scambio termico convettivo sia verso il fluido HTL (olio diatermico), caratterizzato da un coefficiente di scambio convettivo di 1000. $W/m^2/^{\circ}C$ (flusso turbolento), che verso l'ambiente esterno, con coefficiente di

scambio convettivo di $5 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$ (aria statica a 20°C). L'olio diatermico è ipotizzato essere ad una temperatura iniziale di 200°C ed incrementare istantaneamente ad una temperatura di 260°C . L'intero sistema partirà da un campo termico determinato dallo stazionario corrispondente alla temperatura di partenza dell'olio per poi evolvere nel tempo fino ad un massimo di 10 ore dall'incremento di temperatura del fluido.

- **Risultati**

In Figura 94 è mostrata l'andamento radiale delle temperature lungo lo spessore dell'elemento di accumulo a diversi istanti temporali tra l'inizio del transitorio e le 10 ore. E' evidente come la dinamica relativa al PCM, e quindi al cambio di fase, rallenti notevolmente l'ingresso del calore (bassa diffusività termica) e quindi il raggiungimento dello stazionario.

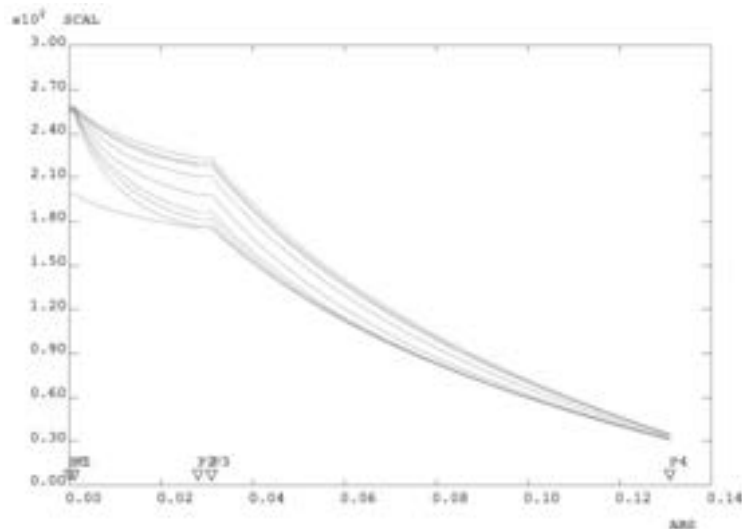


Figura 94- Andamento radiale temperatura in vari istanti tra l'inizio e 10 ore di carica

In particolare, come si evidenzia anche in Figura 95 per i punti di interfaccia tubo-pcm (px1), pcm-vessel (px2) e coibente-aria (px3), si ha una rapida variazione a ridosso del tubo dell'olio, una variazione nel punto più lontano del pcm che è abbastanza pronunciata per le prime due ore ma che poi rallenta notevolmente senza raggiungere lo stazionario e, infine, una variazione impercettibile e lentissima all'esterno dell'elemento.

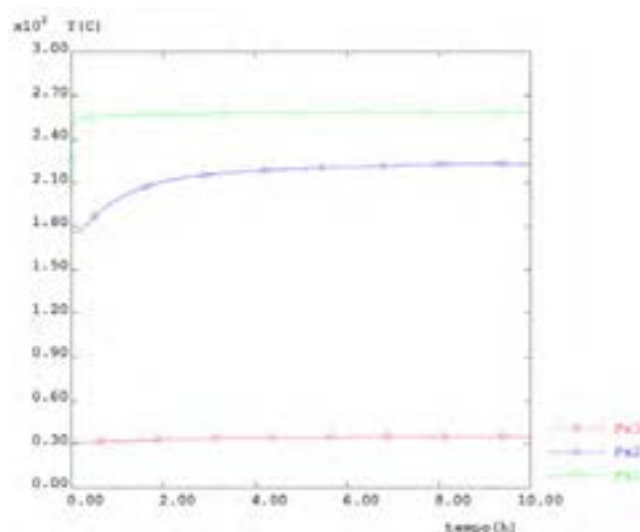


Figura 95- Evoluzione della temperatura alla interfaccia tubo-pcm, pcm-vessel e coibente-aria

In Figura 96 è invece possibile vedere l'evoluzione della potenza lineica sia in entrata al sistema, proveniente dall'olio diatermico, sia in uscita dallo stesso, e rilasciata verso l'ambiente esterno. Integrando questi valori sull'intervallo di tempo del transitorio si ottengono circa 1014 Wh/m in ingresso e 603 Wh/m in uscita. In tal caso, nel sistema sono rimasti accumulati circa 411 Wh/m.

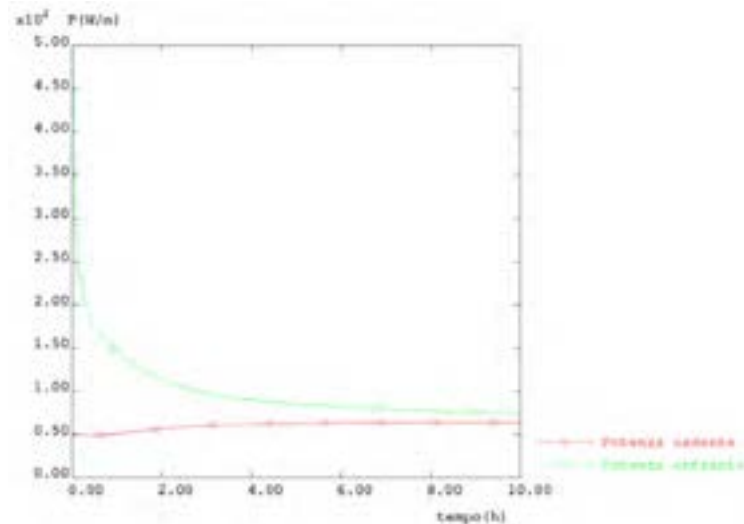


Figura 96- Evoluzione della potenza lineica entrante (da olio) e uscente (verso ambiente)

Le masse presenti nell'elemento di accumulo sono così ripartite: 0.37 kg/m di tubo, 6.75 kg/m di pcm, 5.37 kg/m di vessel e 5.3 kg/m di coibente, per un totale di circa 18.2 kg/m. Il PCM impiegato sarebbe in grado, al massimo, di accumulare (a 260°C costanti) circa 191.2 Wh/m di calore sensibile e 206.2 di calore latente, per un totale di circa 397.4 Wh/m. In realtà, non potendo, a causa delle perdite, raggiungere una temperatura costante del sistema e, per di più, non avendo, dopo 10 ore di transitorio, raggiunto una configurazione stazionaria, l'energia immagazzinata sarà largamente inferiore ai valori massimi sopra riportati. Per quanto concerne il calore sensibile questo si suddivide tra le varie masse in gioco come segue: 3.0 Wh/m nel tubo, 162.0 Wh/m nel PCM, 35.5 Wh/m nel vessel e 28.7 Wh/m nel coibente. In totale: 229.3 Wh/m. Il PCM ne ha accumulato solo l'84.7% del massimo ipotizzato. Invece, la massa di PCM fusa dopo 10 ore risulta essere di circa 5.9 kg, ovvero l'87% del totale, cui corrisponde allora un calore latente accumulato di circa 179.5 Wh/m. Il calore totale accumulato è, quindi, circa 409 Wh/m, pari al 85.9% del massimo.

- **Commenti**

Il dimensionamento dello strato di coibente era stato effettuato nell'ipotesi che, al raggiungimento dello stazionario dovesse fondere tutto il PCM impiegato. L'analisi del transitorio termico ha evidenziato che dopo 10 ore di riscaldamento, di fatto non si è raggiunto lo stazionario e le temperature sono leggermente inferiori a quelle ipotizzate. Ciò è facilmente visibile dagli andamenti mostrati in Figura 97 e Figura 98: in esse risulta evidente che le temperature raggiunte nel PCM dopo 10 ore (curva rossa) sono 4-5 °C inferiori a quelle dello stazionario (curva blu) e, soprattutto, in buona parte inferiori alla temperatura di fusione (curva gialla tratteggiata).

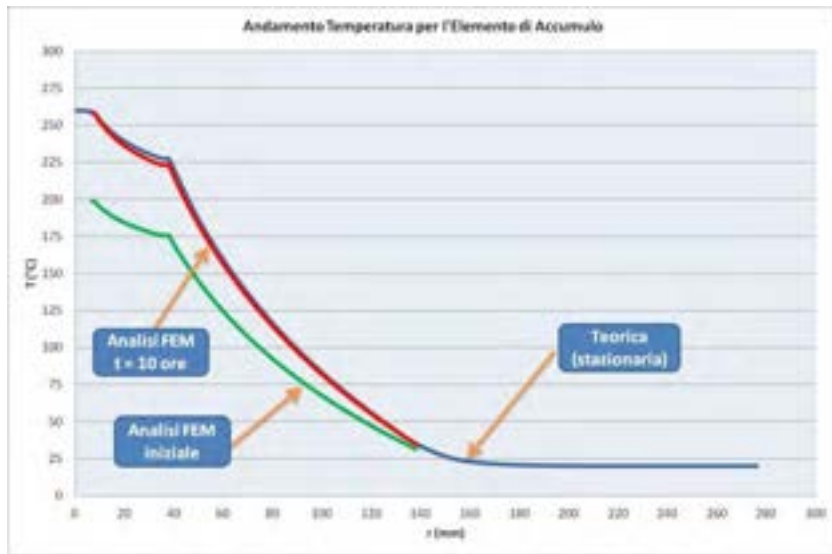


Figura 97- Andamento radiale della temperatura nell'elemento di accumulo: confronto tra teorico-stazionario ed analisi FEM dopo 10 ore

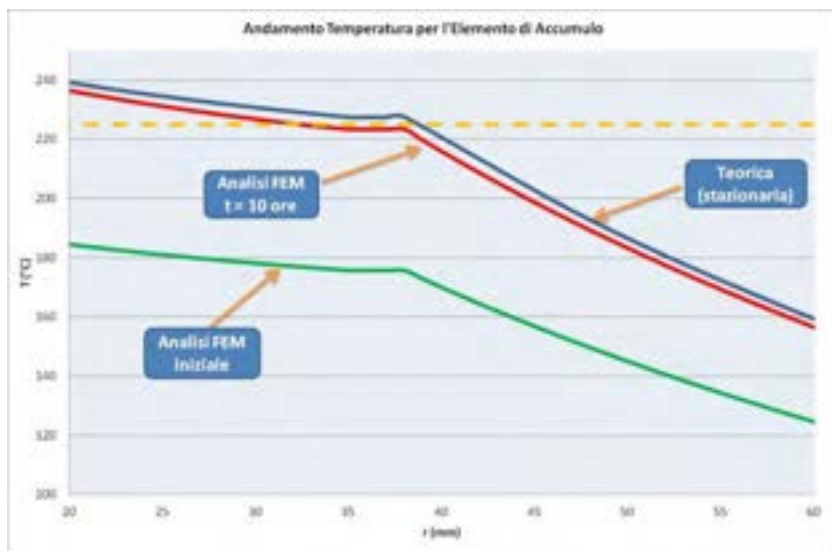


Figura 98- Andamento radiale della temperatura nell'elemento di accumulo: confronto tra teorico-stazionario ed analisi FEM dopo 10 ore (dettaglio)

La conseguenza di tale fatto è che, contrariamente a quanto ipotizzato, parte del PCM non riesce a fondere. Ciò è evidente anche guardando l'evoluzione della massa di PCM fusa di Figura 99. Chiaramente la situazione risulterebbe anche peggiore nel caso il transitorio fosse più breve: per transitori dell'ordine di 5-6 ore la massa fusa sarebbe tra il 60 ed il 70 % di quella totale.

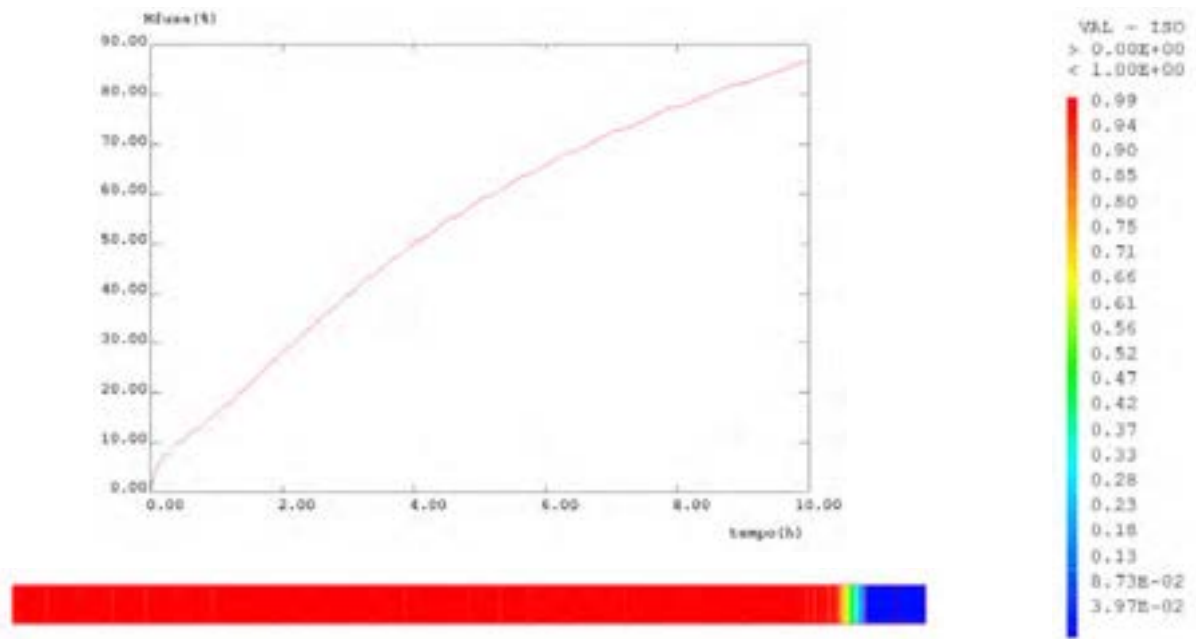


Figura 99- Evoluzione della massa fusa in percentuale rispetto quella disponibile

Più che un ulteriore incremento dello spessore di coibentazione, probabilmente, la situazione potrebbe migliorare inserendo opportuni sistemi di promozione della diffusività termica (es: alette).

2.4.4 Conclusioni

Il lavoro riportato nel presente documento ha riguardato lo studio e l'analisi termica transitoria di un elemento di accumulo termico della tipologia guscio e tubo ("shell and tube"), realizzato con materiali a cambiamento di fase (PCM). L'elemento di accumulo che è stato preso in considerazione ha le caratteristiche derivanti dalla precedente fase di progettazione. In questa fase si è valutato il comportamento termico del componente attraverso una serie di analisi FEM e CFD. In particolare si è:

- Analizzato il comportamento termico transitorio dell'intero elemento di accumulo attraverso analisi FEM 2D assialsimmetriche;
- Analizzato il comportamento termico transitorio dell'intero elemento di accumulo attraverso analisi CFD 2D assialsimmetriche. In esse si è portato in conto l'effetto dovuto alla gravità sul PCM in fase liquido e quindi valutato l'influenza di questo fenomeno convettivo sullo scambio termico;
- Analizzato il comportamento termico transitorio attraverso analisi FEM semplificata (1D assialsimmetriche) dell'elemento di accumulo in cui sia stato introdotto un opportuno strato di coibente.

I principali risultati ottenuti sono i seguenti:

- La prima carica di un elemento di accumulo a tubo liscio dovrebbe essere di circa 3.5 ore, durante le quali verranno forniti dal fluido 350 Wh di calore, 285 dei quali stoccati nel PCM. Se, invece, il tubo è alettato, la prima carica avviene in circa 2.5 ore, durante le quali verranno forniti dal fluido 340 Wh di calore, 284 dei quali stoccati nel PCM.
- Durante la fase di carico effettivo dell'elemento a tubo liscio, tra 200 e 260°C, verranno accumulati circa 200 Wh di calore in un tempo superiore alle 4.5 ore. Un tempo analogo è necessario per la fase di scarico del sistema, per un totale di circa 10 ore. Nel caso di un elemento con tubo alettato, l'energia termica accumulata è leggermente inferiore (190Wh) come pure, ma in modo più marcato i tempi necessari (3 ore per il carico e 7 ore per il carico-scarico).

- Nel caso di un elemento di accumulo con tubo alettato, la presenza delle alette riduce la massa ed il volume del PCM ed incrementa quelli del tubo. Di conseguenza, la capacità termica dell'elemento sarà leggermente inferiore (5%) ma la diffusività termica migliore ed i tempi di carico/scarico ridotti (16%).
- Se si tiene in conto, attraverso delle analisi CFD di un elemento di accumulo a tubo liscio, anche dell'effetto "gravitazionale" indotto sul PCM in fase fluida e, quindi, degli eventuali moti convettivi che si potrebbero instaurare, si ottiene un tempo di carico di circa 5 ore. In questo caso, si può dire che, sebbene la convezione naturale, che si instaura nella fase parzialmente liquida del PCM, influisca in maniera importante sulle dinamiche relative alla fusione ed alla fase di carica del sistema, essa non ha particolare influenza sui tempi di carica dello stesso.
- Il sistema sin qui analizzato è stato supposto perfettamente adiabatico verso l'ambiente esterno. In realtà, le perdite verso l'esterno non sono nulle, ma soltanto limitate utilizzando una coibentazione di opportuno spessore. Uno strato di lana di roccia di circa 100 mm dovrebbe garantire che, al raggiungimento dello stazionario relativo alla fase di carico del sistema, tutto il PCM impiegato sia arrivato alla fusione.
- La presenza del coibente, conduce a tempi di carico del sistema molto lunghi e, di conseguenza, alla impossibilità di raggiungere lo stazionario (o il 95% del carico massimo) in tempi non eccessivi. Un sistema a tubi lisci, con la presenza di coibentazione, dopo circa 5 ore arriva a circa il 60-70% del carico massimo.
- Per migliorare le prestazioni "dinamiche" del sistema di accumulo, sembra più indicato, piuttosto che incrementare ulteriormente lo spessore del coibentazione, inserire opportuni sistemi di promozione della diffusività termica (es.: alette).
- Infine, in questo contesto abbiamo preso in esame un PCM "semplice" come i sali solari. Nel caso, invece, supponessimo di utilizzare un PCM con nanoparticelle aggiunte (vedi rif. 3 e 4) la situazione potrebbe essere molto diversa. Questo tipo di mezzo di accumulo avrebbe una capacità termica sicuramente maggiore ed una diffusività che, invece, potrebbe essere sempre insufficiente: ciò potrebbe condurre ad un sistema di accumulo con maggiore densità di energia ma con tempi di carica maggiori di quanto qui previsto.

2.5 Progettazione della sezione di prova

La progettazione dell'impianto è stata eseguita con l'ausilio del software Autocad. L'utilizzo di tale software ha permesso oltre alla definizione dei disegni, anche un'analisi critica, in fase di pre-dimensionamento, che ha evidenziato le criticità nella sua realizzazione.

La Figura 105 riporta una vista isometrica dell'impianto completo, mentre le figure Figura 106, Figura 107 e Figura 108, evidenziano i profili bidimensionali, dai quali si possono valutare gli ingombri.

Da come si vede, è stata fatta la scelta di costruire un impianto sospeso ad una incastellatura tramite dei tiranti. Tale opzione favorisce le dilatazioni termiche derivanti dall'alta temperatura di esercizio.

L'incastellatura è realizzata con profilati Bosch, che formano una struttura cubica avente spigolo di 2 m.

Si noti che l'impianto è composto da una parte del sistema di accumulatori (2 serie parallele di 3), che possono essere eventualmente ed alternativamente rese indipendenti dal resto del circuito che premette il riscaldamento, la movimentazione e la corretta alimentazione del fluido di processo.

Gli accumulatori posti contemporaneamente sull'impianto sono 6 ed hanno un diametro di 70 mm ed un'altezza di 700 mm, rivestiti da un coibente di 100 mm di spessore.

In realtà, di essi, solo 3 in parallelo lavorano contemporaneamente, lasciando all'operatore la possibilità di escluderne la prima o la seconda serie tramite 4 valvole on/off (V2, V3, V4 e V5). La

Figura 102 e la Tabella 14 chiariscono meglio il concetto.

Occorrono poi 7 valvole on/off per gli sfiati, drenaggi e rimbocchi. Di esse 2 valvole per gli sfiati sono poste nelle tubature superiori di collegamento degli accumulatori, 2 nelle parti in basso di essi ed 1, nella parte inferiore, sulla linea di mandata dell'olio.

L'impianto prevede inoltre un flussimetro a turbina orizzontale (F1) ed una valvola di regolazione a spillo per la regolazione della portata (SV1). Le elettrovalvole potranno essere comandate da remoto tramite LabVIEW.

Il flussimetro, inoltre, tramite segnale analogico, permetterà la visione e la registrazione della portata del fluido.

Su display in remoto compariranno tutti i dati delle temperature, che saranno anche opportunamente registrati su file, rilevate da termocoppie K.

Il riscaldamento ed il raffreddamento dell'olio è affidato al termocriostato Julabo HT30M1CU, che mediante una pompa centrifuga assicura la movimentazione dell'olio.

Tuttavia, se l'alta viscosità alle temperature più basse di processo, unita all'elevato numero di giunzioni, valvole, curve e passaggi a T determinassero delle perdite di carico tali da non raggiungere una velocità adeguata, è previsto l'utilizzo di una pompa di rilancio (Figura 100), in serie al termocriostato.

Infatti, con oli particolarmente viscosi, l'impianto potrebbe lavorare in condizioni di modo laminare a causa delle perdite di carico che imporrebbero velocità basse.



Figura 100: pompa di rilancio.

Pur potendo supportare portate (40 L/min), tale pompa non può essere fatta lavorare ad una portata superiore a quella di uscita dal termocriostato (18 L/min) per evitare discontinuità di funzionamento.

La pompa, a trascinamento magnetico, ha connessioni da 1", può sopportare temperature fino a 320 °C e perdite di carico fino a 6,5 bar con portate di 7 L/min, 4 bar a circa 34 L/min e 5,5 bar a 18 L/min.

Il sistema di movimentazione dell'olio prevede la possibilità di tre diversi tipi di circolazione:

- oraria;
- antioraria;
- ricircolazione con by-pass degli accumulatori.

In pratica attraverso l'uso di 4 valvole con attuatore elettrico (VE1, VE2, VE3 e VE4), del tipo mostrato in Figura 101, è possibile far circolare l'olio:

- in senso orario, preferibile per la carica degli accumulatori;
- in senso antiorario per il raffreddamento degli stessi (scarica);
- in by-pass degli accumulatori (ricircolo), qualora si voglia raffreddare il fluido senza farlo passare per gli accumulatori.



Figura 101: valvola con attuatore elettrico e raccordi.

Quest'ultimo accorgimento è previsto in modo tale che gli accumulatori, in fase di scarica, si raffreddino mediante il fluido già a temperatura di set-up evitando che le misure sperimentali includano le rampe di raffreddamento. Stesso accorgimento potrebbe essere utilizzato per la fase di riscaldamento.

La sequenza di apertura e chiusura valvole è la seguente:

- carico: VE2 e VE3 aperte; EV1 e VE4 chiuse;
- scarico: VE2 e VE3 chiuse; EV1 e VE4 aperte;
- ricircolo: VE1 e VE3 aperte; VE2 e VE4 chiuse.

La Figura 103 e la Tabella 15 evidenziano meglio gli schemi funzionali.

I tubi sono di acciaio AISI 316 di DN16. Per minimizzare i costi rendendo tuttavia l'impianto il più efficiente possibile, si sono scelte valvole con attuatore elettrico da 3/8", valvole manuali on/off da 1/2" e valvole di sfiato/drenaggio da 1/4". Inoltre, la pompa di rilancio, data, la prevalenza da assicurare, ha imbocchi di mandata e aspirazione da 1". Sono così necessari vari raccordi per unire il tubo alla filettatura delle valvole e vari adattatori per unire le varie parti di tubazione dell'impianto, in particolare dove sono previste deviazioni di fluido o passaggi a T.

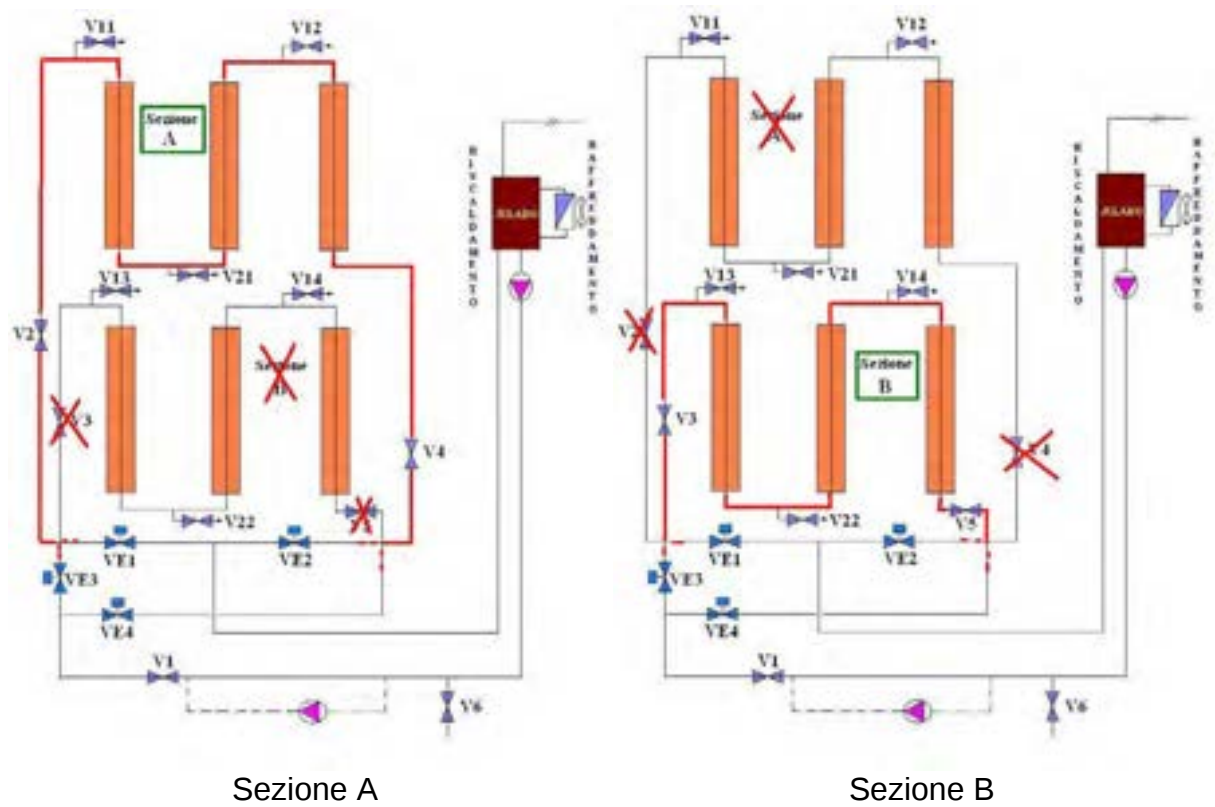


Figura 102: schemi per la selezione delle linee di accumulatori.

Circuito Prova	Valvole manuali			
	V2	V3	V4	V5
A	ON	OFF	ON	OFF
B	OFF	ON	OFF	ON

Tabella 14: configurazione delle valvole per la selezione della linea di accumulatori.

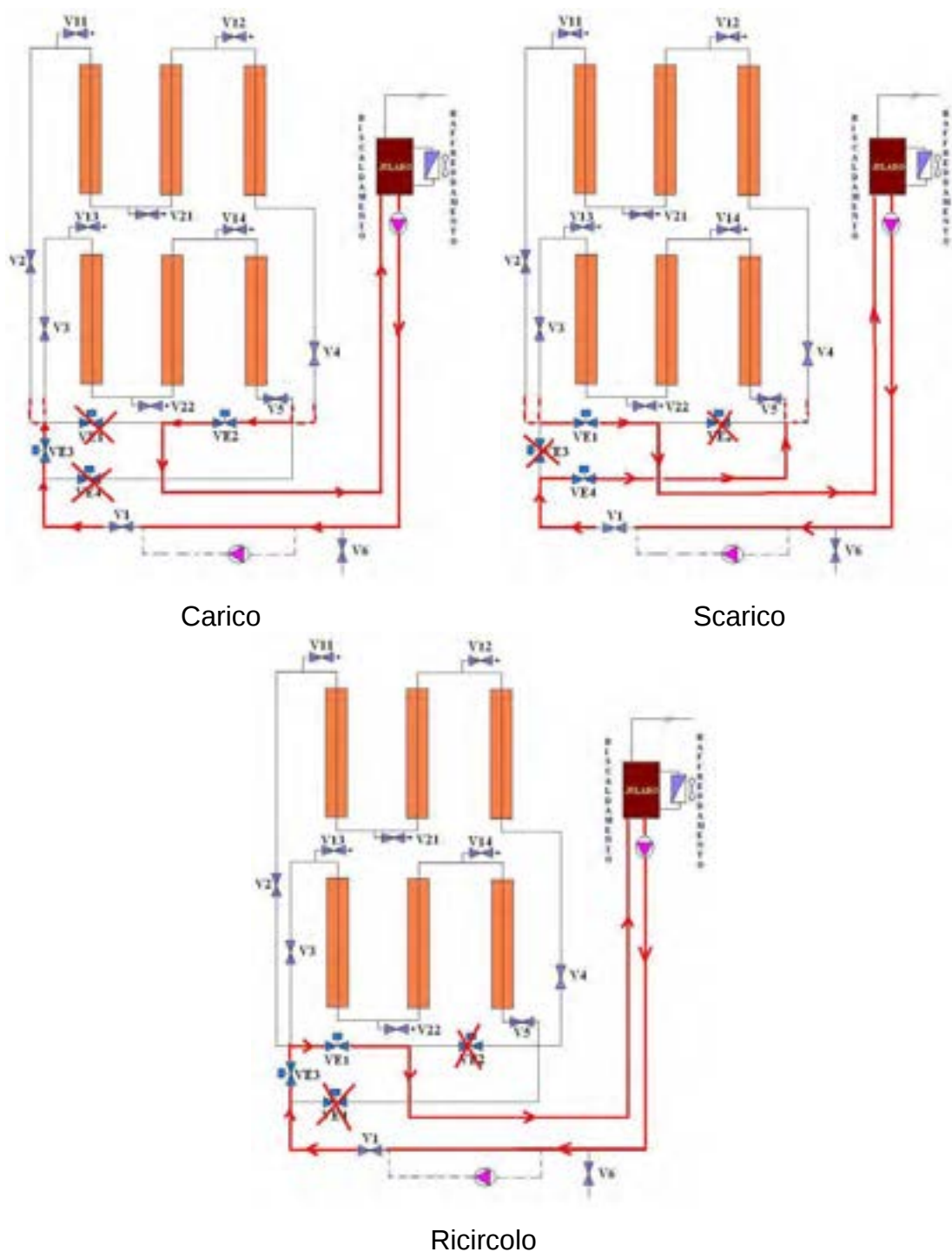


Figura 103: schemi per la selezione del flusso dell'olio diatermico.

Tipo di test	Elettro-Valvole			
	VE1	VE2	VE3	VE4
Carico	OFF	ON	ON	OFF
Scarico	ON	OFF	OFF	ON
Ricircolo	ON	OFF	ON	OFF

Tabella 15: configurazione delle valvole per la selezione del flusso dell'olio diatermico.

In definitiva si riporta la tabella 7 che mostra la strumentazione di massima e i materiali per la realizzazione dell'impianto:

Q.tà	Materiale
6	Accumulatori in acciaio a tubi lisci
6	Accumulatori in acciaio a tubi alettati
24	Tiranti
-	Coibentazione (spessore =100 mm)
-	Tubi acciaio L=20000mm (DN 16, Di 14)
16	Adattatori 16→16
7	Adattatori 16→16 a T
2	Adattatori 16→16 a 90 °C
8	Raccordi 16 →1/2"
11	Raccordi 16 → 3/8"
4	Valvole on/off manuali (1/2 ")
7	Valvole di sfiato (1/4 ")
1	Valvola di regolazione manuali
1	Flussimetro a turbina
4	Valvole con attuatore elettrico (3/8 ")
-	Struttura di sostegno con profilati Bosch
32	Termocoppie K (quante e come vengono inserite)

Tabella 16: elenco materiale.

Le termocoppie (

Figura 104) saranno poste, per il primo accumulatore di ognuna delle due serie in parallelo:

- 3 nella parte in basso, poste sulla superficie esterna, sulla mezzeria e nella parte più interna;
- 3 nella parte a media altezza, poste sulla superficie esterna, sulla mezzeria e nella parte più interna;
- 3 nella parte in alto, poste sulla superficie esterna, sulla mezzeria e nella parte più interna;
- per ognuno degli accumulatori è prevista inoltre una termocoppia sul tubo in ingresso e in uscita (12 in totale)
- 1 all'uscita del termocriostato;
- 1 all'ingresso del termocriostato.

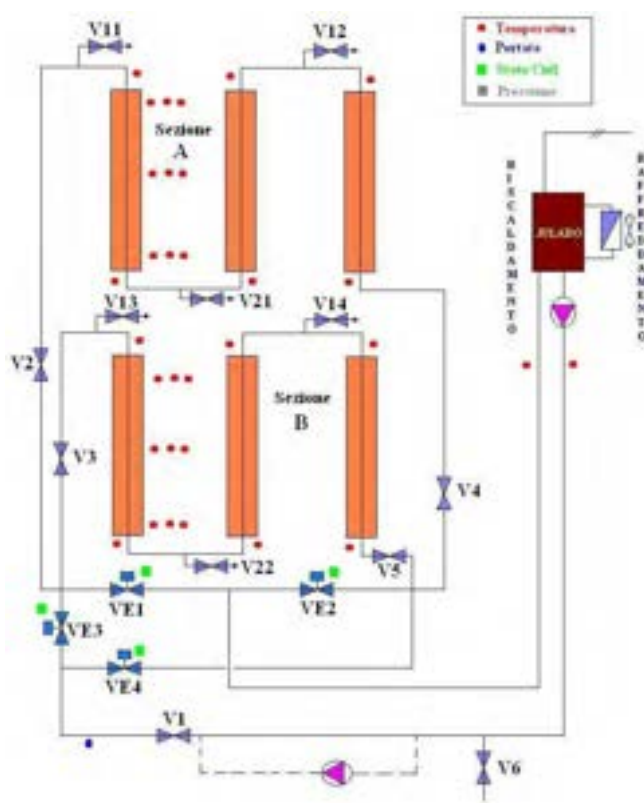


Figura 104: schema di posizionamento dei punti di misura.

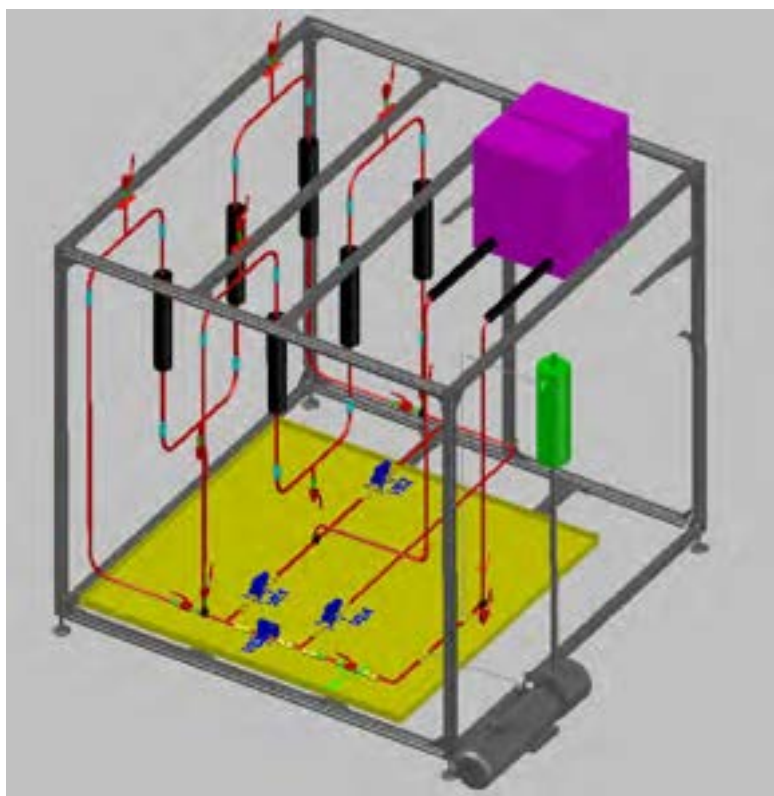
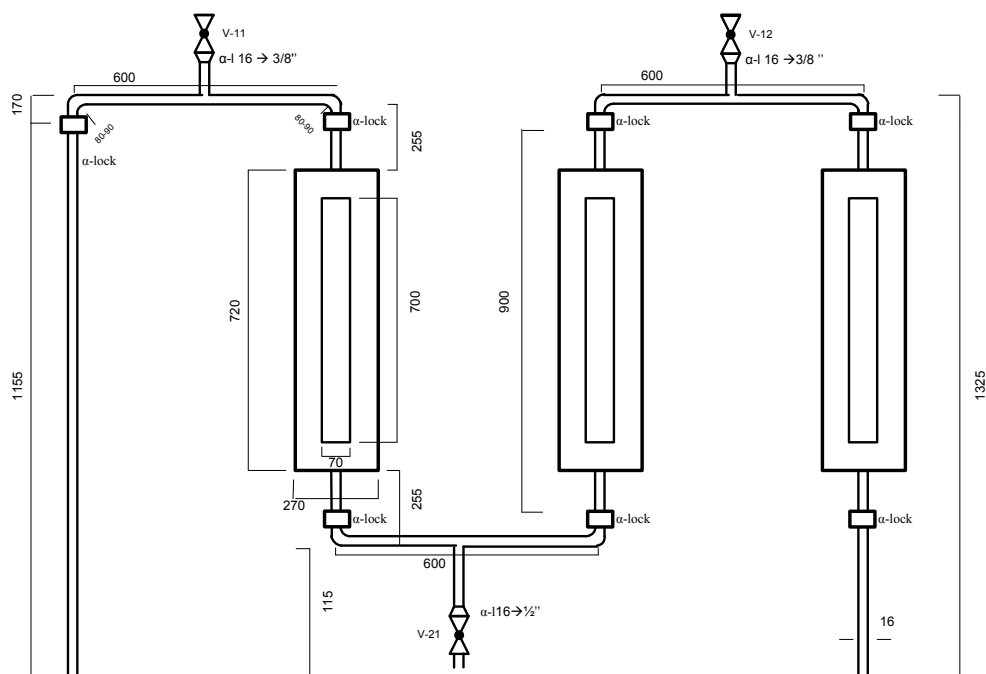


Figura 105: vista 3D dell'impianto completo



NB: 2 uguali in parallelo

Figura 106: vista 2D di una serie di accumulatori e relativa tubatura

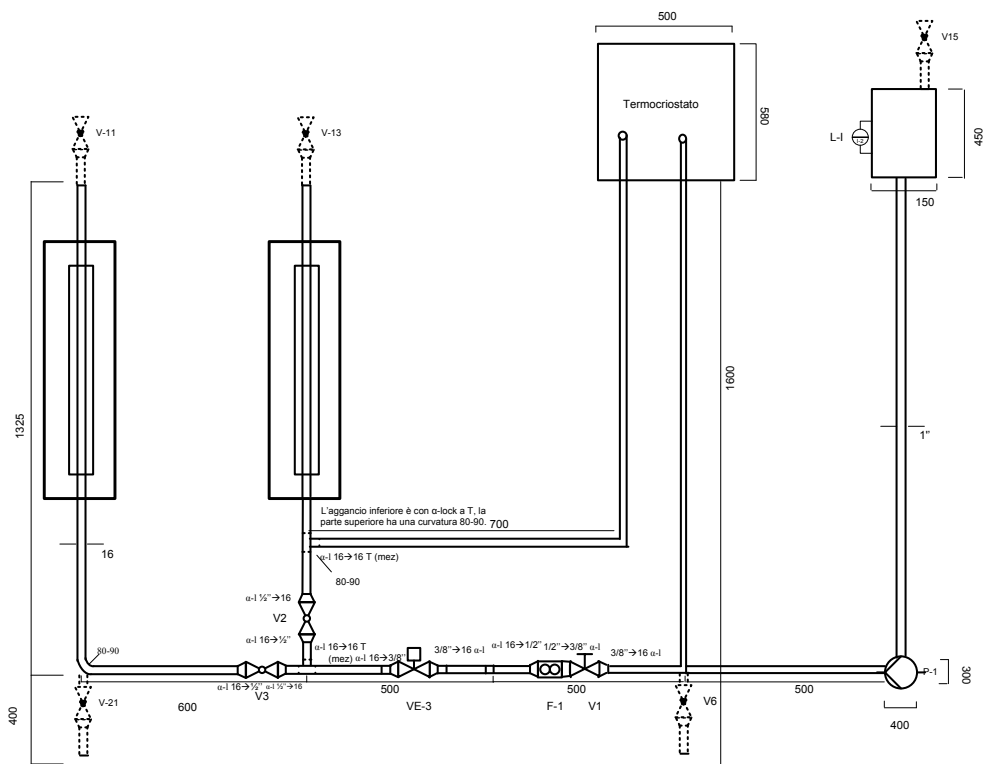


Figura 107: vista 2D della sezione di impianto, che mostra le 2 serie di accumulatori, il termocriostato, la pompa e le relative tubazioni, valvole e flussimetri.

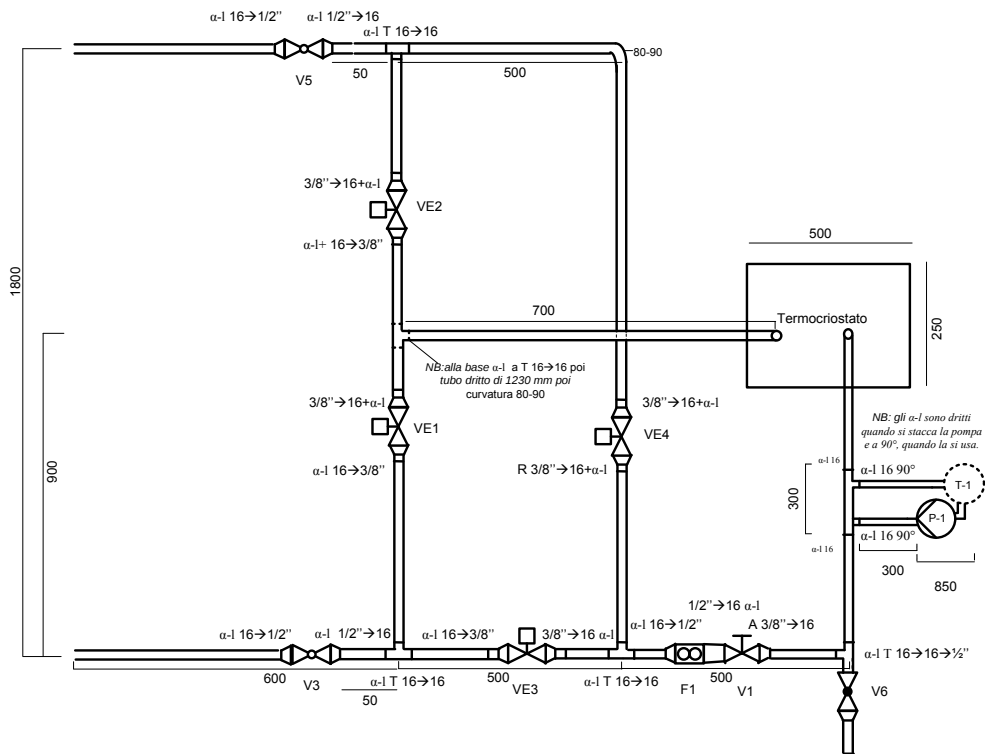


Figura 108: vista 2D dall'alto, della sezione di impianto che alimenta gli accumulatori.

2.5.1 Termocriostato di circolazione

Per il riscaldamento dell'olio nel circuito è stata proposta l'apparecchiatura Julabo HT30M1CU (Figura 109), che è un termostato di circolazione in grado di riscaldare l'olio diatermico fino a 400 °C, con temperatura controllata e con stabilità garantita a $\pm 0,01$ °C. La capacità riscaldante è di 3 kW e di raffreddamento di 15 kW mediante utilizzo di acqua a 20°C; possiede una pompa centrifuga con velocità di 18 L/m e garantisce una pressione di 1,2 bar.



Figura 109: termostato di circolazione.

L'apparecchiatura possiede una vasca integrata in acciaio inox del volume di 2 L. Ha un display con indicazione simultanea della temperatura di set point, della temperatura interna e della temperatura del circuito esterno, ha un'interfaccia RS232 per controllo e programmazione, ha la possibilità di collegamento con un sensore esterno ed una programmazione integrata delle temperature di 10 step. Il sistema è anche fornito di un serpentino di raffreddamento. Il peso è di circa 35 kg. Ha un vaso di espansione, che funge anche da ingresso per l'immissione dell'olio diatermico di alimentazione. L'olio scelto ed idoneo alle caratteristiche dell'impianto è il Therminol 66 della ditta Solutia.

I vantaggi di tale olio sono:

- non tossicità;
- temperatura di auto combustione maggiore di 370 °C;
- possibilità di poter lavorare con basse evaporazioni anche ad alte temperature (0,3 bar a 300 °C)

Gli svantaggi sono:

- alta viscosità a basse temperature (0,0295 Pa*s a 30 °C);

Di seguito, la Tabella 17, contiene le principali caratteristiche fisiche alle temperature di esercizio.

Temperatura [°C]	180	280
Portata in massa [kg/s]	0,15	0,14
Portata in volume [L/min]	10	10
Velocità [m/s]	1,08	1,08
Perdite di carico [bar]	0,43	0,40
Densità [g/L]	899,5	824,6
Viscosità [Pa*s]	0,00106	0,00046
Capacità termica [J/kg/K]	2122	2492
Conducibilità termica [W/m/K]	0,107	0,097
Numero di Reynolds	12869	29655
Numero di Prandtl	21,02	11,82
Coefficiente di scambio termico con tubi puliti [W/m ² /K]	940	1371
Coefficiente di scambio termico con tubi sporchi [W/m ² /K]	809	1110

Tabella 17 : principali caratteristiche fisiche alle temperature di esercizio dell'impianto.

3 Discussione e conclusioni

Scopo del presente lavoro (parte del PAR 2013 - sviluppo di sistemi alternativi di accumulo termico) era quello di studiare e progettare un sistema elementare di accumulo termico a cambiamento di fase (PCM) funzionante a media temperatura (circa 250°C) e della sezione di prova necessaria alla verifica delle condizioni di scambio termico che si instaurano nello stesso.

Tale obiettivo è stato raggiunto attraverso un esteso studio e valutazione delle caratteristiche di scambio termico tra il fluido termovettore, il sistema di accumulo e l'ambiente esterno, utilizzando sia modelli semplificati che modelli numerici complessi (FEM, CFD).

Il risultato finale è allora costituito da una serie di disegni e specifiche di progetto che consentiranno la realizzazione sia degli accumulatori elementari che della sezione di prova relativa.

Il materiale di accumulo utilizzato è una miscela binaria di sali ($\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$) cui, eventualmente, si può aggiungere una piccola quantità (1%wt) di nanoparticelle di SiO_2 e Al_2O_3 . Essa avrà una temperatura di fusione prossima ai 230°C e, quindi all'interno dell'intervallo di temperatura previsto (200-260°C).

La tipologia di accumulatori selezionati e progettati è del tipo "tubo e guscio", con un fluido termovettore (HTF) che scorre internamente al tubo, nelle due versioni con tubo liscio e con tubo alettato, per incrementare la diffusività termica del mezzo di accumulo.

Il sistema di accumulo termico a calore latente, qui proposto, sarà in grado di possedere una elevata densità di energia accumulata e, quindi, di ridurre sensibilmente il volume occupato.

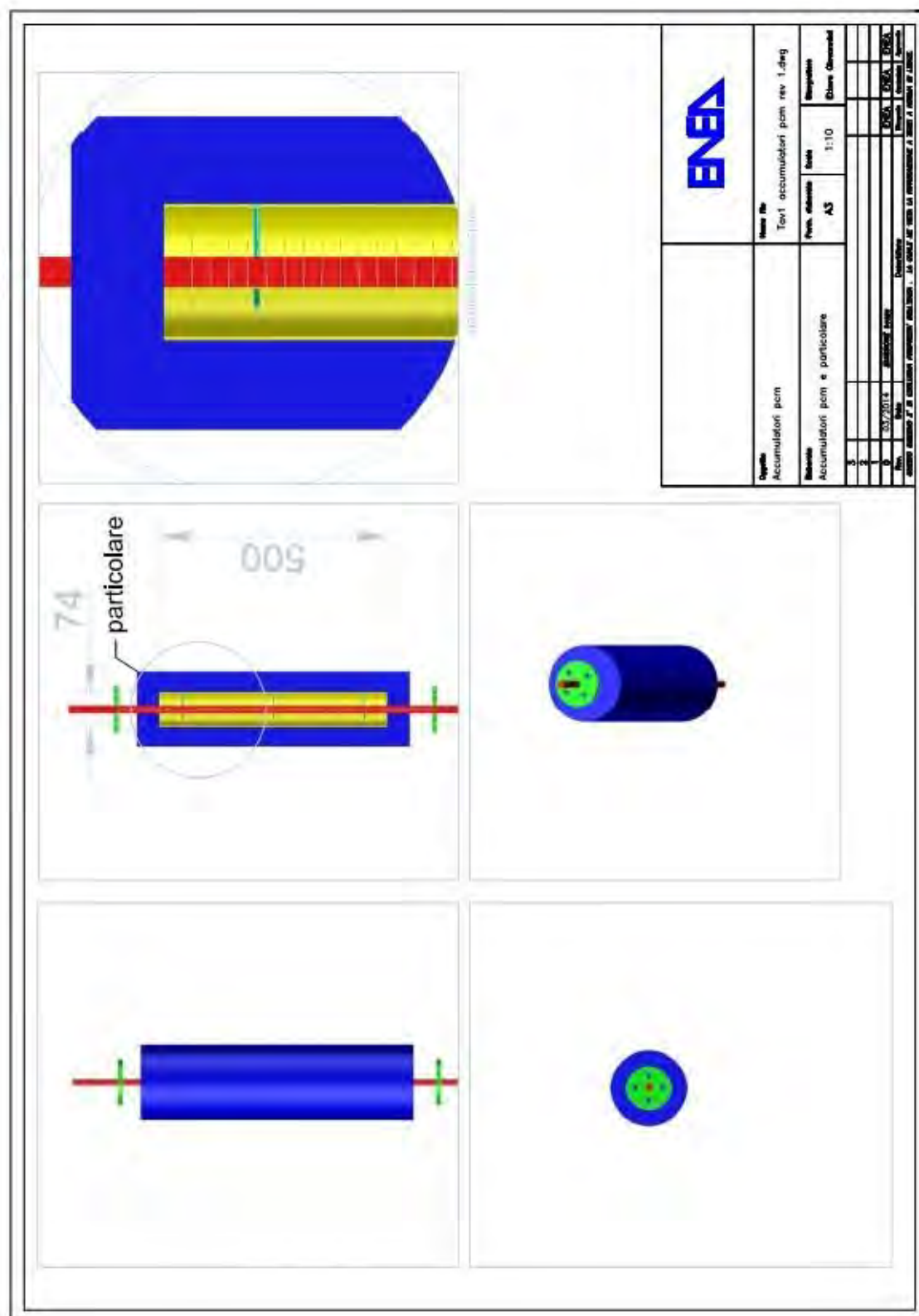
4 Riferimenti bibliografici

1. ENEA – Report RdS/PAR2013/000 – “Selezione e caratterizzazione di una miscela di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle per lo sviluppo di un sistema di accumulo termico nell’intervallo di temperatura 200-250°C”, A. Miliozzi, E. Veca
2. V. A. Salomoni, C.E. Majorana, G.M. Giannuzzi, A. Miliozzi, R. Di Maggio, F. Girardi, D. Mele, M. Lucentini – “Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants” - Solar Energy 103 (2014) 303–315
3. ENEA – Report RdS/2013/079 – “Individuazione e caratterizzazione di miscele di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle, da impiegare come sistemi alternativi di accumulo termico”, A. Miliozzi, E. Veca, S. Sau
4. Università di Perugia – Report RdS/2013/081 – “Studio e sviluppo di un mezzo di accumulo termico a calore latente a media temperatura costituito da una miscela di sali e nanoparticelle”, Josè Maria Kenny, Manila Chieruzzi
5. Doerte Laing, Storage Development for Direct Steam Generation Power Plants, Parabolic Trough Technology Workshop, March 09, 2007, Golden CO, USA
6. Tamme, Bauer, Buschle, Laing, Muller-Steinhagen and Steinmann, Latent heat storage above 120°C for applications in the industrial process heat sector and solar power generation, Int. J. Energy Res. 2008; Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/er.1346
7. Steinmann, Tamme, Latent Heat Storage for Solar Steam Systems, Jnl of Solar Energy Engineering, FEBRUARY 2008, Vol. 130
8. Steinmann, Laing, Tamme, Development of PCM Storage for Process Heat and Power Generation, Journal of Solar Energy Engineering, NOVEMBER 2009, Vol. 131
9. A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009)
10. I. Fernández, C.J. Renedo, S. Pérez, J. Carcedo and M. Mañana, Advances in phase change materials for thermal solar power plants Quality, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2010
11. HIGH TEMPERATURE STORAGE OF SOLAR ENERGY USING PHASE CHANGE MATERIALS, Lehigh energy updates, August 2010, Vol. 28, No. 2
12. Wolf-Dieter Steinmann, Doerte Laing, Rainer Tamme, Latent Heat Storage Systems for Solar Thermal Power Plants and Process Heat Applications, Journal of Solar Energy Engineering, MAY 2010, Vol. 132
13. Gilberto Santo, Modellazione di sistemi di accumulo termico con materiali a cambiamento di fase per impianti solari a concentrazione, Tesi di Laurea Magistrale in Tecnologie delle energie rinnovabili & centrali termiche, A.A. 2012/2013

5 Abbreviazioni ed acronimi

CSP	Potenza solare concentrata (Concentrating Solar Power)
TES	Accumulo energia termica (Thermal Energy Storage)
PCM	Materiali a cambiamento di fase (Phase Change Materials)
PAR	Piano Annuale di Ricerca
FEM	Metodo agli elementi Finiti (Finite Element Method)
CFD	Fluidodinamica Computazionale (Computational Fluid Dynamics)
LCOE	Costo livellato dell'energia (Levelized Cost Of Energy)
LHTES	Accumulo energia termica a calore latente (Latent Heat Thermal Energy Storage)

Appendice 1 – Progetto elemento di accumulo con PCM

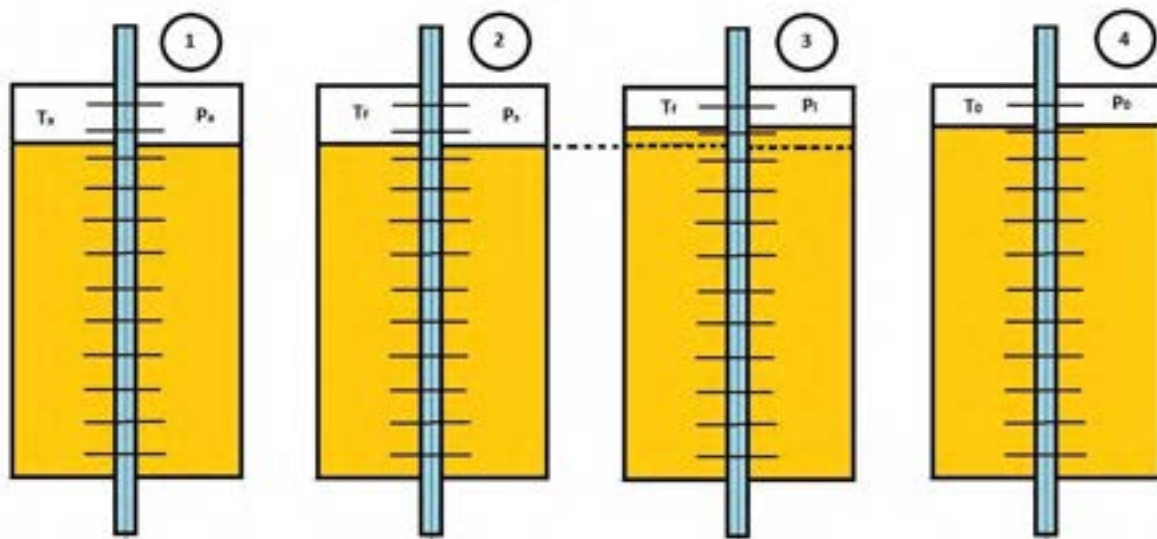


Appendice 2 – Considerazioni per contenitore sigillato

In questo documento si è considerato che il contenitore dei sali non fosse sigillato e quindi la sua pressione interna rimanesse quella atmosferica. Nel caso in cui, invece, questo sia sigillato e in ragione dell'importante variazione volumetrica dei sali e, quindi, della sua pressione interna, il contenitore dovrà essere opportunamente dimensionato e verificato alla tenuta meccanica (contenitore in pressione). Qui di seguito sono riportate alcune considerazioni in merito.

L'evoluzione durante la carica

Durante la fase di carica dell'elemento di accumulo la situazione evolve come rappresentato nella figura seguente:



- Nella fase iniziale (1) l'elemento si troverà alla temperatura e alla pressione ambiente (T_a , P_a). Il volume totale V_T sarà costituito da quello delle eventuali alette V_{al} , dei sali $V_{s,0}$ e del cuscino di aria $V_{a,0}$: $V_T = V_{al} + V_{s,0} + V_{a,0}$;
- Poi (2), detto volume si riscalerà gradualmente fino a portarsi alla temperatura di fusione dei sali. In questo istante, ipotizzando che non varino i volumi, la pressione dell'aria si porterà ad un valore P_s : $P_s = P_a * T_f/T_a$;
- A temperatura T_f avviene quindi la trasformazione di fase (3) che comporta un aumento di volume dei sali proporzionale ad $(1+\alpha)$: $V_{s,l} = V_{s,0} * (1+\alpha)$, ed una conseguente riduzione del volume di aria libero: $V_{a,l} = V_{a,0} - \alpha * V_{s,0}$. Variando il volume di aria, a temperatura costante, ci sarà anche un incremento di pressione dell'aria: $P_l = P_s * (V_{a,0}/(V_{a,0}-\alpha * V_{s,0}))$;
- Infine (4), il volume si riscalerà ulteriormente portandosi a T_0 e la pressione dell'aria, nel caso di volume scostante, salirà fino a: $P_0 = P_l * T_0/T_f$;;

La pressione di progetto

Per poter dimensionare o verificare la tenuta dell'elemento occorre stabilire il valore della pressione di progetto, che nel nostro caso corrisponderebbe a P_0 .

Nel caso di un contenitore cilindrico chiuso, di diametro d e spessore s , soggetto ad una pressione interna P_0 lo stato di sollecitazione che si instaura è il seguente:

- Tensione radiale: $\sigma_r = P_0$;
- Tensione assiale $\sigma_a = P_0 D / (4 s)$;
- Tensione tangenziale $\sigma_t = 2 \sigma_a$;

Queste si combineranno dando luogo alla seguente tensione ammissibile (VonMises):

$$\begin{aligned}\sigma_{VM} &= 1/(2^{0.5}) * ((\sigma_r - \sigma_a)^2 + (\sigma_a - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_r)^2)^{0.5} = \\ &\approx 1/(2^{0.5}) * (\sigma_a^2 + \sigma_a^2 + (2 \sigma_a)^2)^{0.5} = (3^{0.5}) \sigma_a = \\ &= (3^{0.5})/4 P_0 D/s;\end{aligned}$$

La condizione base allora dovrà essere:

$$\sigma_{VM} \leq \sigma_{amm} = \sigma_{ult} / f_s ;$$

con σ_{amm} , tensione ammissibile del materiale, σ_{ult} , tensione ultima del materiale, f_s , fattore di sicurezza. Su tale base la pressione di progetto dell'elemento potrà essere valutata nel seguente modo:

$$P_0 = 4/(3^{0.5}) * \sigma_{amm} * s/D$$

Il volume di aria iniziale

Il volume minimo di aria necessario potrà essere ricavato dalla relazione per P_i della situazione (3) sostituendo le pressioni P_i e P_s con le relazioni dei casi (2) e (4).

Facendo tale operazione si ottiene:

$$\begin{aligned}V_{a,0} &= (V_T - V_{al}) * \alpha k / (k (1 + \alpha) - 1) \\ k &= P_0/T_0 * T_a/P_a\end{aligned}$$

La quantità di sali da caricare

Chiaramente il volume di sali dell'elemento sarà:

$$V_{s,0} = V_T - V_{al} - V_{a,0}$$

e, di conseguenza, sapendo la densità degli stessi (ρ_s), se ne potrà determinare il peso:

$$\text{Peso_sali} = V_{s,0} * \rho_s$$

Applicazione

Nel caso: $\sigma_{ult} = 565$ MPa; $f_s = 3$; $d=16$ mm; $D=70$ mm; $H=500$ mm, $s = 2$ mm, $P_a=0.1$ MPa, $T_a=20^\circ\text{C}$, $P_0=12.5$ MPa $T_0=260^\circ\text{C}$, $\alpha=5\%$, $\rho_s=1850$ kg/m³

Si ottiene:

$\sigma_{amm} = 188$ MPa	$P_0 = 12.5$ MPa	$V_T = 1.824 \times 10^{-3}$ m ³
$k = 68.3$	$V_{a,0} = 8.8 \times 10^{-5}$ m ³	$V_{s,0} = 1.736 \times 10^{-3}$ m ³
$\text{Peso_sali} = 3.2$ kg		

Appendice 3 – Stima del coefficiente di scambio termico olio-tubo

Per valutare lo scambio termico tra il fluido termovettore (HTF) e la parete interna del tubo di scambio termico è necessario valutare il coefficiente di scambio convettivo h (W/m²/K). Tale coefficiente può essere determinato per via teorica conoscendo le caratteristiche del fluido HTF e del suo deflusso. Per quanto riguarda l'HTF occorre sapere:

- Densità (ρ – kg/m³)
- Calore specifico (c_p – J/kg/K)
- Conducibilità termica (k – W/m/K)
- Viscosità dinamica (μ – kg/m/s)

Inoltre, dalla portata volumetrica della pompa p_v (lit/min) è possibile ricavare la portata massica p (kg/s) e quindi, noto il diametro interno e area di passaggio del tubo di scambio (d – m; A – m²), la velocità v (m/s) del fluido:

$$p = \frac{p_v}{1000 * 60} * \rho \quad A = \pi / 4 * d^2 \quad v = \frac{p}{\rho A}$$

Le caratteristiche del deflusso sono identificate attraverso due numeri adimensionali: Prandl e Reynolds. Per essi valgono le relazioni:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad Re = \frac{4p}{\pi \mu d}$$

Nel caso risultasse $Re > 3000$. e $Pr > 0.6$, per determinare il numero di Nusselt si può applicare la seguente correlazione (Dittus-Boelter): $Nu = 0.023 * Re^n * Pr^m$; in cui $n=0.8$ ed $m=0.4$, se il fluido è riscaldato, o $m=0.33$, se è raffreddato.

A questo punto è possibile determinare il valore di h :

$$h = \frac{k \cdot Nu}{d}$$

Nel caso di un tubo di diametro interno $d=14$ mm, percorso da olio diatermico ad una velocità imposta $v=2$ m/s si hanno le seguenti variazioni di portata massica:

T/ (°C)	Olio				
	vis.din. kg/m/s	dens kg/m ³	cp J/kg/°C	cond. W/m/°C	q kg/s
150	0.008248	867.7	1436.6	0.1665	0.267
160	0.007473	861.3	1450.6	0.1658	0.265
170	0.006812	854.8	1464.6	0.1651	0.263
180	0.006242	848.4	1478.6	0.1644	0.261
190	0.005746	841.9	1492.6	0.1637	0.259
200	0.005313	835.4	1506.6	0.163	0.257
210	0.004931	829.0	1520.6	0.1623	0.255
220	0.004592	822.5	1534.6	0.1616	0.253
230	0.004291	816.1	1548.6	0.1609	0.251
240	0.00402	809.6	1562.6	0.1602	0.249
250	0.003777	803.2	1576.6	0.1595	0.247
260	0.003557	796.7	1590.6	0.1588	0.245
270	0.003358	790.2	1604.6	0.1581	0.243
280	0.003176	783.8	1618.6	0.1574	0.241
290	0.00301	777.3	1632.6	0.1567	0.239
300	0.002858	770.9	1646.6	0.156	0.237

Se consideriamo le temperature comprese tra 200 e 260 °C, la portata varia tra 0.24 e 0.26 kg/s. Per queste portate e temperature, Pr risulterà essere tra 35 e 50 mentre Re tra 4500 e 6000.

T/ (°C)	Prandtl	Reynolds									
		q (kg/s)									
	-	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.3	0.31
150	71.17	2426	2536	2646	2756	2867	2977	3087	3198	3308	3418
160	65.38	2677	2799	2921	3042	3164	3286	3407	3529	3651	3773
170	60.43	2937	3071	3204	3338	3471	3605	3738	3872	4005	4139
180	56.14	3206	3351	3497	3643	3788	3934	4080	4226	4371	4517
190	52.39	3482	3640	3798	3957	4115	4273	4431	4590	4748	4906
200	49.11	3766	3937	4108	4279	4451	4622	4793	4964	5135	5307
210	46.20	4058	4242	4426	4611	4795	4980	5164	5349	5533	5718
220	43.61	4357	4555	4753	4951	5149	5347	5545	5743	5941	6139
230	41.30	4663	4875	5087	5299	5511	5723	5935	6147	6359	6571
240	39.21	4977	5203	5429	5655	5882	6108	6334	6560	6786	7013
250	37.34	5297	5538	5779	6020	6260	6501	6742	6983	7223	7464
260	35.63	5625	5880	6136	6392	6647	6903	7159	7414	7670	7926
270	34.08	5959	6230	6500	6771	7042	7313	7584	7855	8125	8396
280	32.66	6299	6586	6872	7158	7445	7731	8017	8304	8590	8876
290	31.36	6647	6949	7251	7553	7855	8157	8459	8761	9064	9366
300	30.17	7000	7318	7637	7955	8273	8591	8909	9228	9546	9864

Questo tipo di deflusso è chiaramente turbolento ed è valida la correlazione di Dittus-Boelter. Allora il coefficiente di scambio convettivo potrà assumere valori compresi tra 800 e 920 W/m²/K.

T/ (°C)	h (W/m ² /C) valida se Re>3000 e Pr>0.6 (Dittus-Boelter)									
	q (kg/s)									
	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.3	0.31
150	577.7	598.6	619.3	639.9	660.3	680.5	700.6	720.6	740.4	760.1
160	605.2	627.1	648.8	670.4	691.7	712.9	734.0	754.9	775.6	796.2
170	632.2	655.1	677.8	700.3	722.6	744.7	766.7	788.6	810.2	831.8
180	658.8	682.6	706.2	729.7	753.0	776.0	798.9	821.7	844.3	866.7
190	684.9	709.7	734.3	758.6	782.8	806.8	830.6	854.3	877.8	901.1
200	710.6	736.3	761.8	787.1	812.2	837.1	861.8	886.4	910.7	934.9
210	736.0	762.6	789.0	815.2	841.2	867.0	892.6	918.0	943.2	968.3
220	760.9	788.5	815.8	842.9	869.8	896.4	922.9	949.2	975.2	1001.2
230	785.6	814.0	842.2	870.2	897.9	925.4	952.8	979.9	1006.8	1033.6
240	809.9	839.2	868.3	897.1	925.7	954.1	982.2	1010.2	1038.0	1065.6
250	833.9	864.1	894.0	923.7	953.1	982.4	1011.4	1040.1	1068.7	1097.1
260	857.6	888.6	919.4	949.9	980.2	1010.3	1040.1	1069.7	1099.1	1128.3
270	881.0	912.9	944.5	975.9	1007.0	1037.8	1068.5	1098.9	1129.1	1159.1
280	904.1	936.8	969.3	1001.5	1033.4	1065.1	1096.5	1127.7	1158.7	1189.5
290	927.0	960.5	993.8	1026.8	1059.5	1092.0	1124.2	1156.2	1188.0	1219.6
300	949.5	983.9	1018.0	1051.8	1085.3	1118.6	1151.6	1184.4	1216.9	1249.3

Detti valori potranno essere anche superiori nel caso si utilizzasse un olio a più bassa viscosità.

Appendice 4 – Fisica del cambiamento di fase solido-liquido

I processi di fusione e solidificazione rientrano in una vastissima gamma di applicazioni ingegneristiche: dalle classiche lavorazioni di fonderia, agli accumuli termici a calore latente, la comprensione delle dinamiche di problemi multifase è fondamentale. I processi di fusione e solidificazione possono essere classificati come: *one-region*, *two-region* o *multi-region*. La classificazione dipende solitamente dalle proprietà del materiale coinvolto e dalle condizioni iniziali. Per una sostanza pura la fusione e la solidificazione intervengono in corrispondenza di una singola temperatura: l'acqua, ad esempio, fonde ad una temperatura uniforme di 0 °C mentre l'alcool etilico fonde a -114 °C. Per il passaggio da solido a liquido di un PCM con una singola temperatura di fusione, l'interfaccia solido-liquido appare dunque come un confine ben definito. Le condizioni iniziali in questo caso determineranno se il problema potrà essere classificato come *one* o *two-region*. Per il processo di fusione ad esempio, se la temperatura iniziale del PCM, T_i , è pari quella di fusione, T_m (melting temperature), la temperatura nella fase solida rimarrà uniformemente uguale a T_m durante l'intero processo. In questo caso, rimane da determinare solo la distribuzione di temperatura nella fase liquida e quindi l'intero problema può essere classificato come un problema di tipo *one-region* (Figura 110-a). Se invece il processo di fusione viene analizzato partendo da una temperatura uniforme del PCM minore di quella di fusione ($T_i < T_m$), sarà necessario determinare la distribuzione di temperatura sia in fase solida che in fase liquida; per questa ragione un problema del genere viene classificato come *two-region* (Figura 110-b).

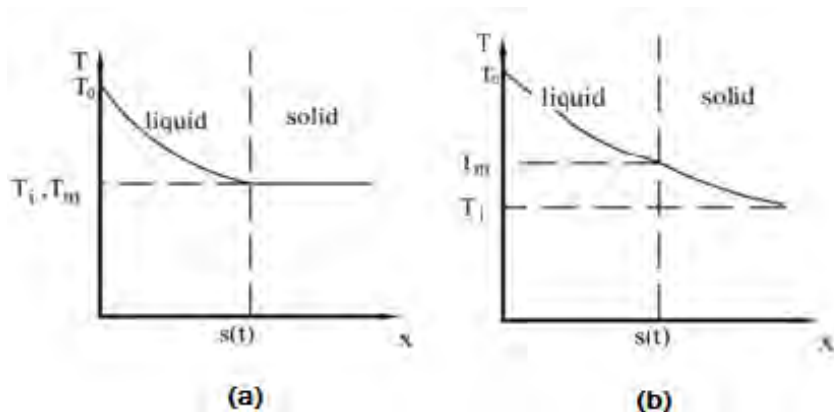


Figura 110- Fusione: problema monodimensionale di tipo one-region (a) e two-region (b)

Per un PCM multi-componente (composto cioè da più sostanze pure), il processo di cambio di fase avviene in un campo di temperature, anziché in prossimità di un valore puntuale. Queste temperature vengono spesso chiamate:

- T_{onset} , ossia la temperatura in corrispondenza della quale il PCM completamente solido comincia il processo di fusione (spesso indicata anche come $T_{solidus}$).
- T_{endset} , ossia la temperatura in corrispondenza della quale il PCM ha completato la fase di fusione ed è pertanto completamente liquido (spesso indicata anche come $T_{liquidus}$).

Il PCM si presenta quindi come completamente solido se la sua temperatura è minore di T_{onset} , e come completamente liquido se la sua temperatura è maggiore di T_{endset} . Per valori di temperatura compresi tra questi ultimi, fase solida e fase liquida coesistono: la porzione di materiale in cui ciò avviene viene chiamata zona fangosa o, in inglese, *mushy zone*. Per poter risolvere un problema che coinvolga un PCM multicomponente sarà quindi necessaria la determinazione della distribuzione di temperature in 3 regioni distinte, ossia la regione solida, la zona fangosa e la regione liquida. Per questo motivo questo tipo di problema viene identificato come *multi-region* (Figura 111).

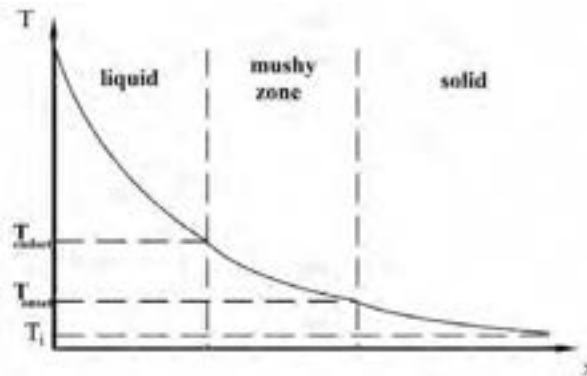


Figura 111- Fusione: problema monodimensionale di tipo multi-region

In questo tipo di problemi la convezione naturale indotta dal gradiente di temperatura nella zona liquida e in quella fangosa può avere un effetto rilevante sulle dinamiche di fusione e solidificazione. Malgrado ciò, l'importanza della convezione naturale nei problemi multi-region non era stata mai individuata fino agli anni '70. La seguente figura mostra l'effetto della convezione naturale sul processo di fusione in una cavità rettangolare:

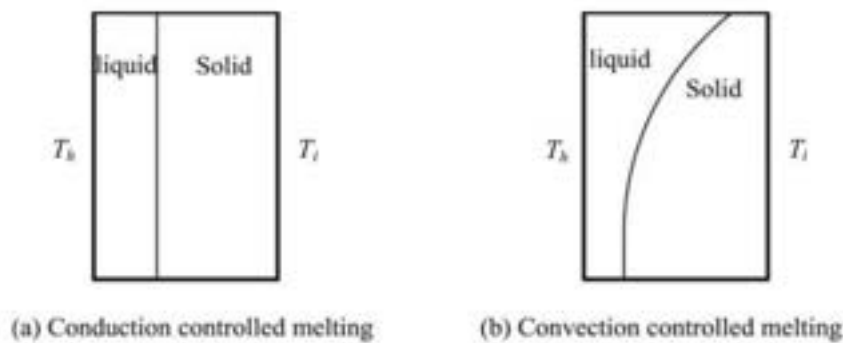


Figura 112- Fusione controllata da conduzione (a) e da convezione (b)

La parete a sinistra si trova a temperatura $T_i > T_{endset}$, mentre la parete a destra è a temperatura iniziale $T_i < T_{onset}$. Quando la fusione è indotta dalla sola conduzione il fronte di fusione si muove parallelamente alla parete riscaldata, mentre invece la convezione nella fase liquida (così come nella zona fangosa) causa l'accelerazione del fronte nella parte superiore della cavità; ciò accade perché il liquido più caldo, vicino alla parete, tende a salire mentre quello più freddo, vicino all'interfaccia, tende a scendere. La forma del fronte di fusione è dunque inclinata nella parte alta e la velocità di fusione in questa zona aumenta a causa del maggior flusso di calore in fase liquida. Questo tipo di fenomeno ha una grande importanza nella crescita di microstrutture durante i processi di solidificazione delle leghe metalliche. Durante tutte gli studi numerici condotti nell'ambito di questo lavoro di tesi si è scelto di tener conto della convezione naturale che si manifesta in fase liquida, tenendo conto della dipendenza della densità del PCM dalla temperatura, e allo stesso tempo coinvolgendo nel modello allestito l'effetto della gravità. In più, la variazione di densità del PCM ha anche un importante effetto sulla posizione del fronte di fusione; infatti, generalmente il cambio di fase di un materiale è accompagnato da una sua dilatazione, ossia da una diminuzione della sua densità. Perciò, in prossimità del fronte, la densità del materiale assume valori diversi a seconda della regione considerata: una volta passato il fronte di fusione, il PCM tende a dilatarsi, esercitando di fatto una vera e propria spinta sullo stesso fronte. Analizzando a titolo di esempio un caso monodimensionale e indicando con:

- u_f la velocità del fronte di fusione dovuta al solo passaggio di fase;
- u_p la velocità addizionale provocata dalla variazione di densità;
- ρ_{sol} la densità della fase solida;
- ρ_{liq} la densità della fase liquida;

possiamo scrivere l'equazione di conservazione della massa all'interfaccia solido-liquido come:

$$\rho_{sol} (u_f - u_p) = \rho_{liq} u_f$$

da cui otteniamo che la velocità addizionale provocata dalla variazione di densità vale:

$$u_p = [(\rho_{sol} - \rho_{liq}) / \rho_{sol}] u_f$$

Dall'uguaglianza appena scritta si capisce come un aumento di densità da fase solida a fase liquida provoca una accelerazione del fronte di fusione, una riduzione di densità al contrario induce un rallentamento del fronte (velocità negativa). Volendo analizzare infine il fenomeno del cambio di fase da un punto di vista puramente energetico, com'è noto la fusione è caratterizzata dalla continua acquisizione da parte del materiale di una quota di calore a cui non corrispondono però aumenti di temperatura apprezzabili. Per sostanze pure la fusione si esaurisce in prossimità di un valore puntuale di temperatura, per cui diagrammando la temperatura del PCM in funzione del calore accumulato, nel caso di sostanza pura si ottiene:

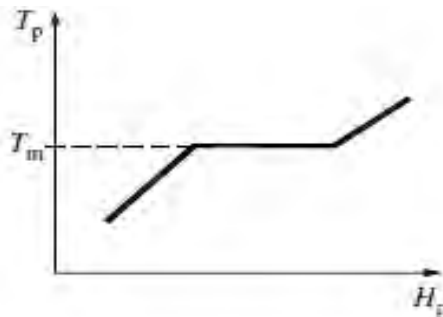


Figura 113- Diagramma calore-temperatura durante la fusione di una sostanza pura

mentre nel caso di PCM multicomponente:

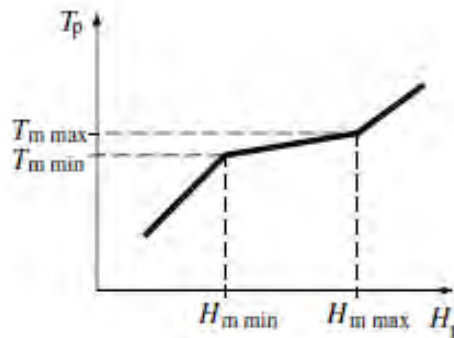


Figura 114- Diagramma calore-temperatura durante la fusione di un PCM multicomponente

In entrambi i casi si noti come durante la fusione il materiale pur continuando ad accumulare calore, non manifesta un aumento "sensibile" di temperatura. Per questo motivo, nella schematizzazione più usata dei processi di cambio fase, si introduce una quantità caratteristica di ogni materiale, nota come **calore latente**. Questa grandezza rappresenta il calore necessario a completare il passaggio di fase; durante questa fase il calore acquisito serve a rompere i legami nella struttura atomica del materiale e non produce quindi un sensibile aumento di temperatura. Più precisamente, tutto ciò viene confermato dall'andamento del calore specifico di ogni materiale in funzione della sua temperatura, a ridosso del range corrispondente al cambio di fase. Si verifica infatti che in questo intervallo il calore specifico (e di conseguenza la capacità termica del materiale) assume valori molto più alti rispetto a quelli assunti sia in fase solida che in fase liquida. Quanto appena descritto è da intendersi come del tutto generale e valido per qualunque sostanza durante un cambiamento di fase.