

ENEA

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA
TRANSIZIONE ECOLOGICA



Progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico contenente più elementi.

R. Petrucci, F. Dominici, M. Rallini, L. Torre



Report RdS/PTR(2021)/268

PROGETTAZIONE PRELIMINARE DI UN MODULO DI ACCUMULO TERMICO CONTENENTE PIÙ ELEMENTI.

R. Petrucci, F. Dominici, M. Rallini, L. Torre (Università di Perugia)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

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

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

Work package: 2 Accumulo termico

Linea di attività: LA2.13 - Progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico cementizio con PCM a più elementi ed LCA del sistema.

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone ENEA

Responsabile del Work package: Raffaele Liberatore ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Ottimizzazione e realizzazione di materiali a cambiamento di fase stabilizzati in forma per l'utilizzo in sistemi di accumulo termico con calcestruzzo. Progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico cementizio con PCM a più elementi ed LCA del sistema.

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Adio Miliozzi

Responsabile scientifico: Prof. Luigi Torre

Indice

SOMMARIO.....	3
1 INTRODUZIONE	4
2 PROGETTAZIONE DI UN SINGOLO ELEMENTO DI ACCUMULO	5
2.1 ASSEMBLAGGI	5
2.2 COMPONENTI DI BASE	6
2.3 SUPPORTO ALLA VERIFICA STRUTTURALE DI UN ELEMENTO DI ACCUMULO.....	8
3 PROGETTAZIONE DI UN MODULO DI ACCUMULO TERMICO	10
4 CONCLUSIONI.....	12
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	13
CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	14

Sommario

La presente attività, inquadrata all'interno del contratto di collaborazione ENEA-UniPG e concerne le attività 2021 relative alla Linea 2.13 del PTR 2019-2021, ha riguardato la progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico con aggiunta di materiale a cambiamento di fase stabilizzato in forma (SS-CPCM) contenente più elementi base.

Tale attività è partita quindi dalla progettazione e verifica strutturale di un singolo elemento del nucleo completo attivo (il modulo) proposto da ENEA. Ciò ha riguardato la mera fase di design (progetto e disegno) di singoli componenti metallici, così come quella di assemblaggio del singolo elemento del nucleo. La verifica oggetto del supporto ha contemplato la tenuta strutturale di un singolo elemento per azioni e forze agenti sia durante la manipolazione (Carico e scarico) che quella legata alla fase di utilizzo dello stesso, quando è accoppiato ad altri elementi e al materiale di coibentazione all'interno del modulo completo.

E' stato osservato come la tenuta strutturale sia garantita anche con fattori di sicurezza molto significativi da un punto di vista numerico.

Durante la fase di progettazione dell'elemento base e del modulo sono stati anche analizzati i possibili materiali da utilizzare per la coibentazione (soluzioni presenti nel mercato) e per l'appoggio ed l'isolamento termico del nucleo completo (pavimentazione resistente e isolante/refrattaria).

La configurazione totale individuata sarà oggetto, nel proseguo di tale lavoro, di valutazione degli impatti ambientali potenziali, mediante studio LCA. Oltre al nucleo in questione, lo studio LCA verrà eseguito anche includendo i trasporti presso l'utilizzatore finale e quelli inerenti ad eventuali tragitti quotidiani, come si vedrà nel documento ad essa dedicato.

1 Introduzione

Il presente lavoro è inquadrato all'interno del contratto di collaborazione ENEA-UniPG e concerne le attività 2021 relative alla Linea 2.13 del PTR 2019-2021.

Le attività in questione hanno previsto la Progettazione preliminare di un modulo di accumulo termico contenente più elementi. In questa sede si si descrive l'analisi di fattibilità a livello progettuale.

A questo proposito, l'obbiettivo del documento in questione è quello di verificare che il sistema nel suo complesso abbia una tenuta meccanica sufficiente all'espletamento di tutte le funzioni inerenti alla fase post-produzione, ossia quelle di movimentazione ed in particolare impilamento e trasporto.

Oltre a ciò, è opportuno verificare che il sistema o il modulo sia nelle condizioni ideali per l'espletamento della propria funzione principale, ossia quella di accumulare calore da fonti ad elevata temperatura, che altrimenti andrebbero disperse (fase di carica), e poterlo cedere (fungendo da sorgente, come se fosse una pila) ad altre utilities. Una condizione necessaria per questo è che il sistema sia adeguatamente isolato termicamente e non vi siano perdite di energia accumulata (massimizzazione del rendimento). Tale verifica è contenuta in questo documento.

In questo documento è riportato anche qualche disegno dell'elemento e degli assemblaggi che lo caratterizzano, risultante dal dimensionamento delle varie componenti e della struttura complessiva da un punto di vista di mera geometria. A tal proposito, si dà per accertato che la fase di lavoro precedente, svolta con altre realtà, abbia portato ad una verifica strutturale preliminare e di tenuta meccanica della struttura nel suo complesso, di modo che la stessa non necessiti di ulteriori analisi.

2 Progettazione di un singolo elemento di accumulo

Come anticipato, in questa sezione si farà solo un sommario di quanto è stato ottenuto in fase di progettazione, per evitare di duplicare documenti, relativamente al singolo modulo e alla fase di verifica di tenuta meccanica/strutturale del modulo completo.

Molti più dettagli saranno forniti nell'ambito della verifica o del calcolo della performance di isolamento termico del modulo nel suo complesso.

2.1 Assemblaggi

Gli assemblaggi di cui sopra riguardano l'elemento di base complessivo, costituito dal nucleo di cemento attivo, basato sui PCM, il quale è basato sulla composizione studiata nel progetto, le strutture metalliche, le quali sono basate sulla gabbia di acciaio B450C, e la struttura tubolare a base di acciaio inox AISI 304, come si può vedere i figura 1.

La struttura metallica, assemblata, di cui è riportata l'immagine in 3D in figura è costituita dai seguenti elementi:

- Coppia di centine orizzontali (ossia avente la loro dimensione maggiore coincidente con l'omologa del nucleo di cemento). Materiale di base acciaio B450C;
- Dieci centine verticali, saldate alla coppia costituita dalla controparte orizzontale. Materiale di base acciaio B450C;
- Profilo tubolare piegato in acciaio AISI 304;

Come si vede in figura 2, il tubo è vincolato alla gabbia mediante le due estremità del profilo circolare inerente alla centina verticale, le quali sono ripiegate verso il baricentro della struttura. Il peso della parte tubolare contribuisce ad assicurare il vincolo alla gabbia. Il fissaggio completo alla struttura nel suo complesso avviene quando si esegue la gettata di cemento e questo si solidifica.

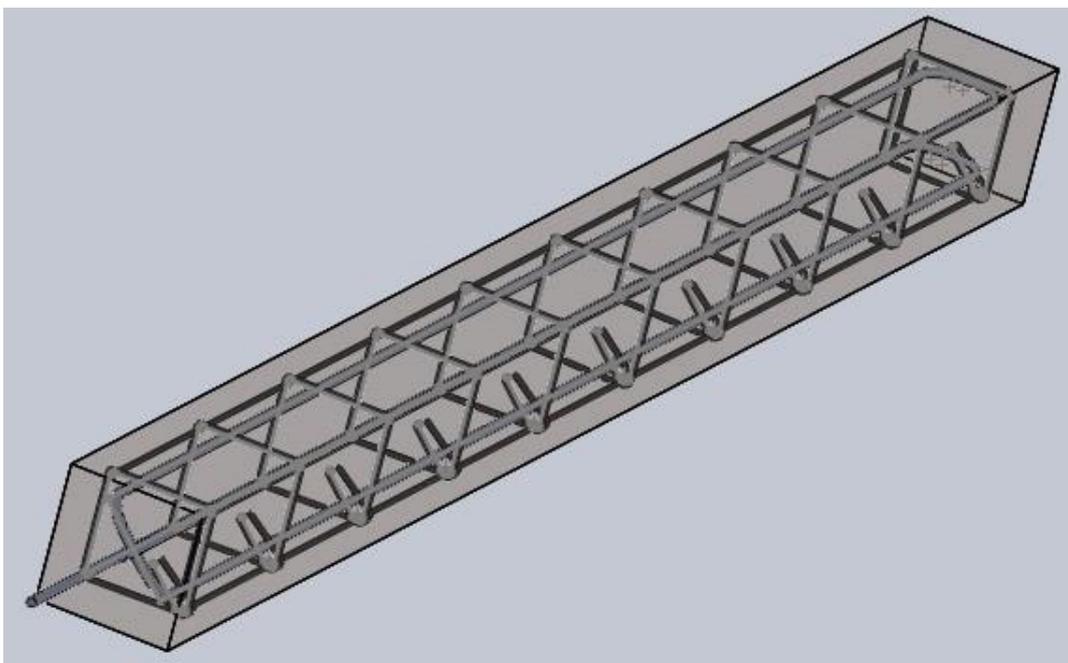


Figura 1: Assemblaggio inerente al componente nel suo complesso.

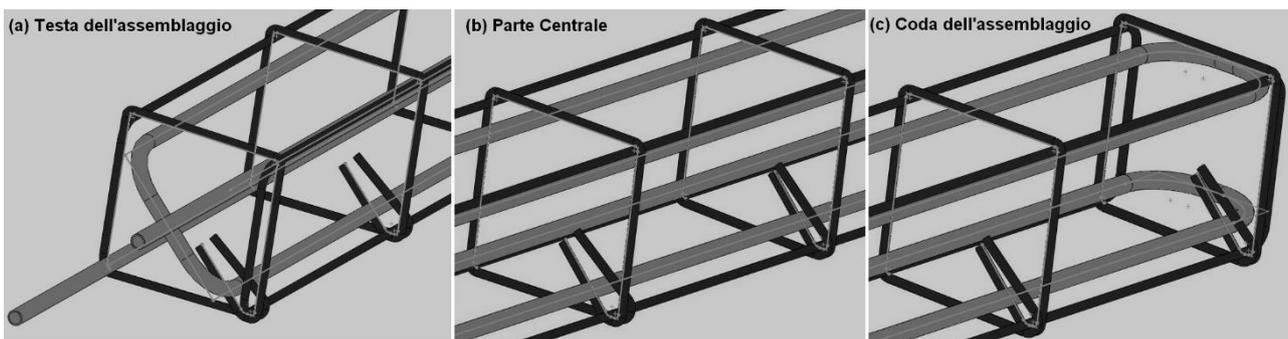


Figura 2: Assemblaggio inerente alla parte metallica.

Per quanto riguarda la mera gabbia, questa è formata dalle due tipologie di centine sopra menzionate, le quali sono saldate insieme. Le centine verticali sono formate da due gruppi, leggermente differenti tra loro. Cambia il senso di rotazione della piegatura inerente al tratto orizzontale, onde assicurare il maggior grado di omogeneità e simmetria alla struttura della gabbia.

Le sezioni dei profili utilizzate per la costruzione della gabbia, con relative centine (2 centine orizzontali e 10 verticali), e dei tubi di in inox sono riportati nella sezione successiva.

2.2 Componenti di base

Per quanto riguarda la parte cementizia, la relativa descrizione è stata fatta in un capitolo dedicato e non sarà inserita in questa sezione, la quale, invece, riguarda gli elementi metallici.

A questo proposito, in figura 3 è rappresentata la struttura del tubo in acciaio INOX AISI 304 insieme alle relative dimensioni. Come si può notare si tratta di un tubo di diametro esterno pari 16 mm e spessore pari a 1,50 mm. La struttura complessiva del tubo pesa circa 6,63 kg.

Tale elemento di per ha la potenzialità per contribuire in modo molto significativo alla tenuta strutturale del singolo elemento attivo, quando sottoposto a sollecitazione flessionale (come nelle operazioni di movimentazione). Il relativo contributo non è stato affatto considerato nella fase di verifica strutturale, quindi i risultati ottenuti dipingono un quadro sicuramente conservativo.

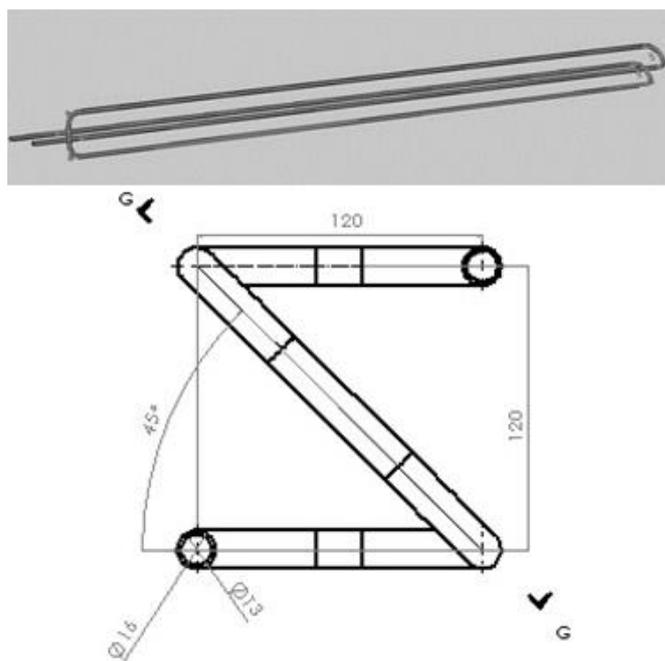


Figura 3: Tubo in acciaio AISI 304.

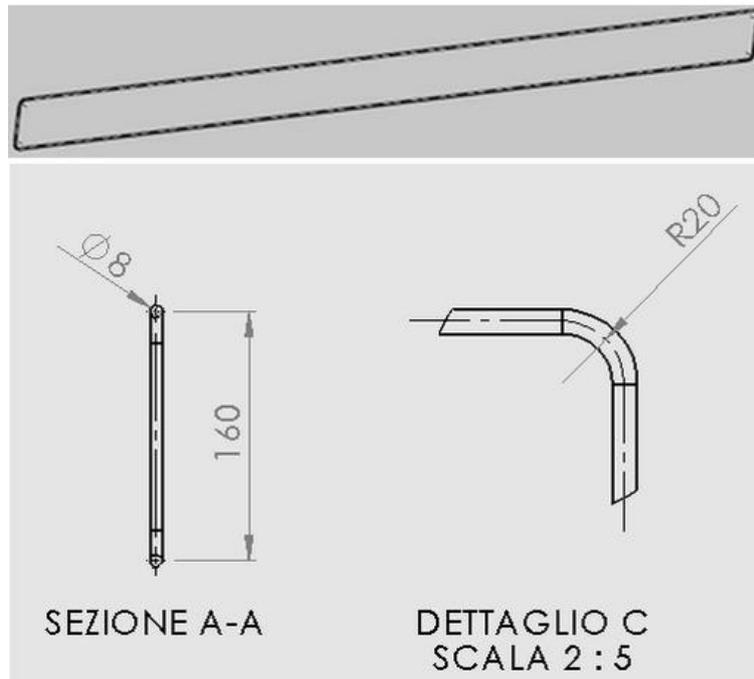


Figura 3: Centina orizzontale in acciaio.

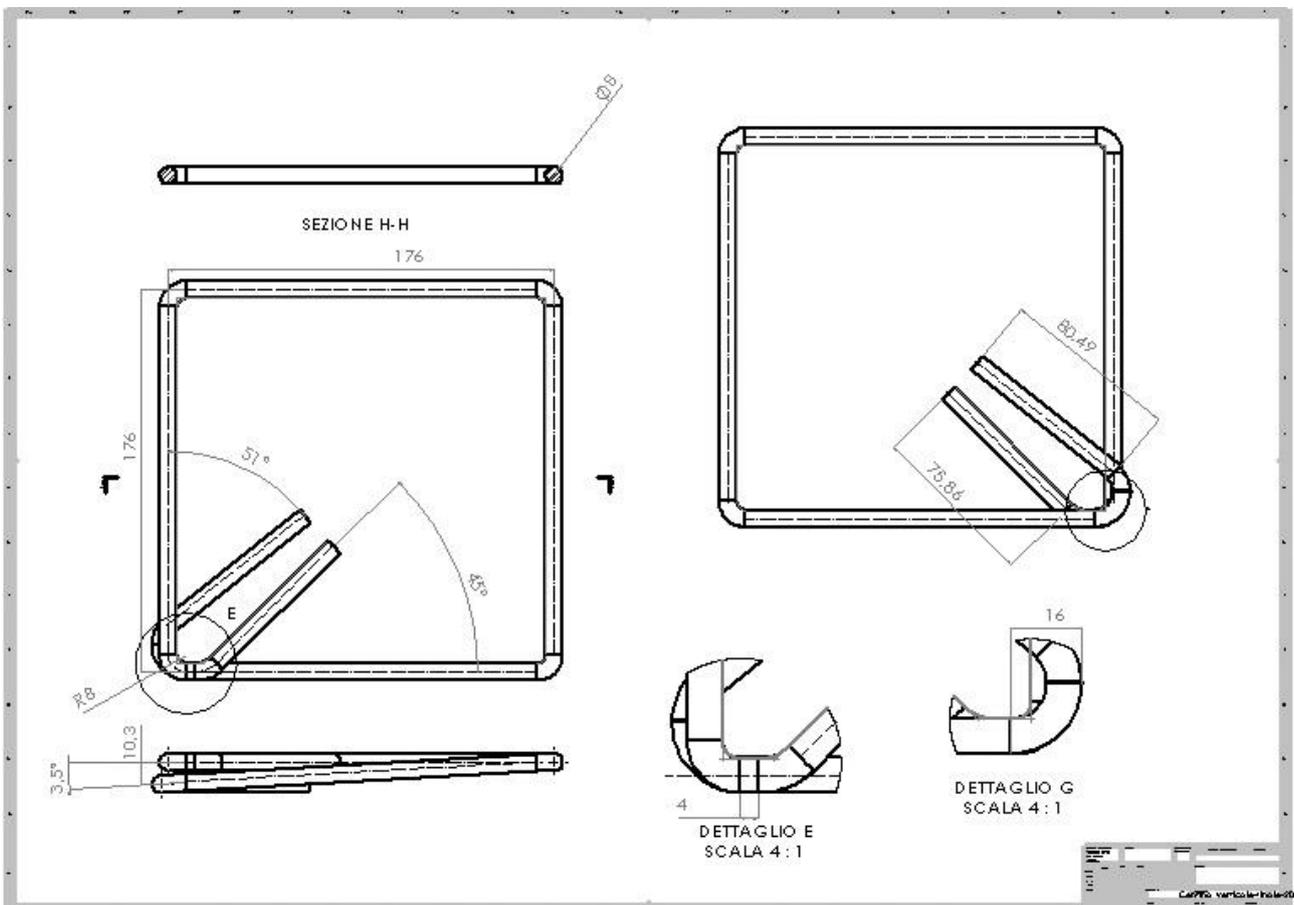


Figura 5: Centine verticali.

In figura 4 si ha l'immagine della centina orizzontale, che compone la struttura della gabbia, formata da due elementi analoghi di lunghezza pari a 2840 mm ed altezza pari a 168 mm. Il profilo delle due componenti menzionate è pieno ed è circolare, con un diametro di 8 mm, la quale determina un peso pari a 2,433 kg per ciascuna. Si tratta di una parte avente le seguenti caratteristiche:

Infine, come elemento di base si hanno 10 centine verticali, le quali sono state suddivise in 2 gruppi da 5 (figura 5). Tali gruppi si distinguono solo per la direzione di piegamento di uno dei lati della stessa. Ognuna determina un peso di 0,35 kg ed ha un profilo identico alla tipologia precedente

Da ciò, la gabbia totale è costituita, come anticipato da due centine orizzontali, da dieci centine verticali saldate a questa, mediante 40 saldature da 8 mm.

L'elemento attivo è costituito in totale dal nucleo di cemento, che ha un volume di $0,15 \text{ m}^3$, da un tubo riscaldante e dalla gabbia suddetta.

Per la verifica a flessione del sistema in oggetto sono stati considerati solo i contributi delle centine orizzontali della gabbia e della parte inerente al calcestruzzo. Questo determina una maggiore conservatività dei risultati.

2.3 Supporto alla verifica strutturale di un elemento di accumulo

Per quanto riguarda la fase di supporto alla verifica strutturale delle sezioni del nucleo di accumulo termico prodotto all'interno del progetto ENEA, sono state analizzate due tipologie di sollecitazioni, ossia quella di trazione e di compressione. Le considerazioni legate alla scelta di suddette sollecitazioni sono state ampiamente descritte nel capitolo dedicato e riassunte anche nella parte iniziale di questo (figura 6).

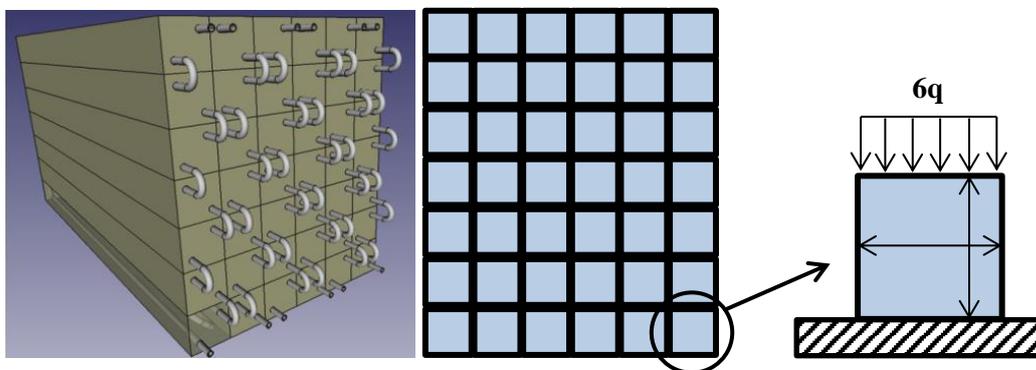


Figura 6: Schema considerato nella verifica di resistenza a compressione.

Nel caso della sollecitazione di compressione è stata presa in considerazione la configurazione prevista da ENEA e UniPG per la realizzazione di un modulo di accumulo complesso, ossia legata all'impilamento dei singoli nuclei l'uno sopra all'altro secondo una matrice 7 x 6, così come schematizzato in figura 6.

Come si nota, il primo elemento in basso è quello che sostiene il carico più alto, in quanto dato dal peso dei 6 elementi che lo sovrastano, per questo l'elemento in questione è stato oggetto della verifica. Al peso in questione va aggiunto quello del materiale di coibentazione sovrastante. Da ciò, il carico totale a compressione è pari a 2204,4 kg (22044 N).

Il secondo caso si configura principalmente come una sorta di sollecitazione a flessione semplice di una trave appoggiata su due carrelli o su un carrello ed una cerniera, come schematizzato in figura 7.

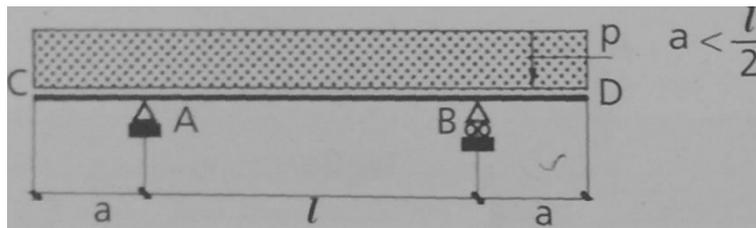


Figura 7: Sollecitazione a flessione.

La lunghezza totale del singolo elemento è di circa 3000 mm ed ha una sezione resistente pari a 220 mm x 220 mm, mentre la distanza rispetto alle estremità è determinata da quella tra gli anelli dove è assicurata la fune di carico.

La verifica a compressione è relativamente semplice, perchè basta calcolare lo sforzo a compressione agente sul nucleo inferiore e confrontarlo con il valore della resistenza, sempre a compressione, del calcestruzzo considerato.

Per quanto riguarda la verifica a flessione, riassumendo quanto visto nella sezione dedicata, sono state quantificate le seguenti proprietà:

- Carico distribuito - $q = 1,21 \text{ N/mm}$;
- Reazioni vincolari e sforzi di taglio = 1815 N;
- Momento flettente massimo = $605 \text{ N}\cdot\text{m}$;
- Momento di inerzia della sezione resistente = $1,74 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$;

Si ricorda che nel calcolo della sezione in calcestruzzo armato si è scelto di utilizzare il metodo del coefficiente di omogeneizzazione, ossia come se fosse tutta di calcestruzzo. Da ciò, come detto, sono state calcolate le tensioni sul calcestruzzo (σ_c), delle barre di acciaio vicine al lato compresso della trave (σ'_a) e su quelle vicine al lato teso della stessa (σ_a):

- $\sigma_c = 1,03 \text{ MPa}$;
- $\sigma'_a = 0,07 \text{ MPa}$;
- $\sigma_a = 33,48 \text{ MPa}$;

I risultati ottenuti hanno indicato che sia il calcestruzzo che l'acciaio sono assolutamente in sicurezza rispetto a fratture impreviste. Infatti, posto che la resistenza alla compressione del calcestruzzo usato ammonti a 18 MPa, mentre quella a trazione, a 2,43 MPa, sono stati calcolati i seguenti coefficienti di sicurezza:

- $n_{cc} = 17,48$;
- $n_{cf} = 2,36$;
- $n_a = 13,44$;

, dove n_{cc} rappresenta il coefficiente di sicurezza per il calcestruzzo rispetto alla compressione, n_{cf} quello sempre per il calcestruzzo rispetto alla fessurazione, mentre n_a è quello per l'acciaio. I valori confermano la sicurezza della struttura in corrispondenza delle sollecitazioni considerate.

3 Progettazione di un modulo di accumulo termico

Dal singolo elemento si è passati ad analizzare l'intero nucleo attivo, che, come detto, è composto da una matrice di 7 righe e 6 colonne di singoli elementi impilati insieme, quindi di un totale di 42 moduli, circondati da una coibentazione a base di lana di roccia su tre quarti della superficie esterna. La superficie inferiore del modulo dovrebbe poggiare al di sopra di un pavimento di mattoni forati ad elevata efficienza di isolamento (schema di figura 8).

Il materiale coibente ha lo scopo di minimizzare le perdite termiche, così come il pavimento menzionato. La tipologia identificata in questo studio è quella relativa al ProRox SL 960 della Rockwool, ossia basta su pannelli rigidi di spessore 100 mm (il massimo disponibile nel mercato) e dimensioni superficiali pari a 1000x600 mm. Il peso specifico di questo prodotto è pari a 100 kg/m².

Il peso specifico del materiale costituente il singolo nucleo è circa 2500 kg/m², derivante dal fatto che all'interno del cemento vi sono anche il tubo riscaldante in acciaio inox e la gabbia di acciaio.

La superficie esterna del nucleo è coibentata con uno spessore di 400 mm di suddetto sistema (4 strati di pannelli). L'ingombro complessivo, escluse le tubazioni esterne alla coibentazione, sarà di 3,80 m di profondità, 1,90 m di larghezza e 2,12 m di altezza.

La scelta è ricaduta sul sistema di coibentazione menzionato (figura 9), perché dotato di una buona stabilità geometrica, basso peso e un elevato potere isolante, che varia tra 0,04 W/mK e 0,06 W/mK all'aumentare della temperatura, da quella ambiente ai 250 °C. Il sistema mantiene una bassa conducibilità termica (intorno a 0,106 W/mK) anche a temperature prossime ai 500 °C. Oltre a ciò, il materiale rimane performante anche fino ai 700 °C.

La scelta dello spessore massimo di 400 mm è stata fatta con lo scopo di limitare al massimo i flussi termici e, soprattutto, la temperatura della parete esterna, affinché si mantenga inferiore ai 35 °C.

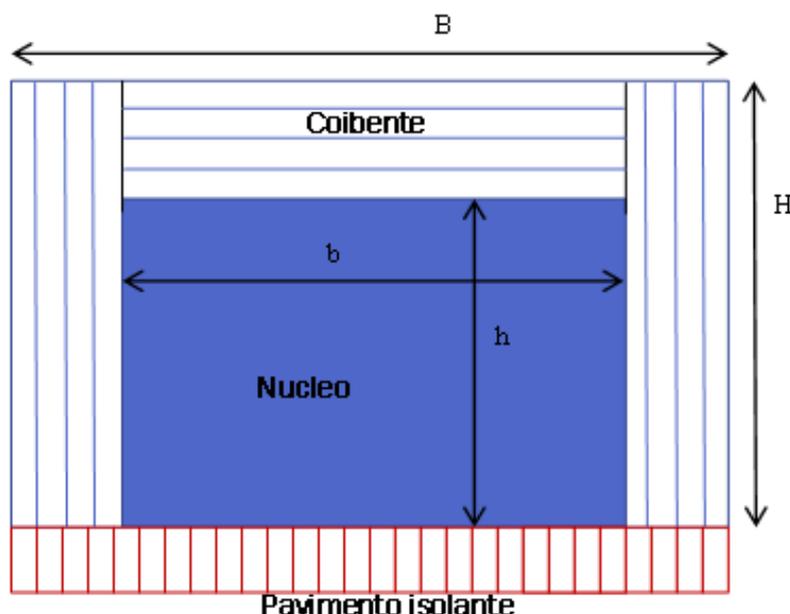


Figura 8: Schema del nucleo completato del materiale di coibentazione ed isolamento termico.



Figura 9: Pannelli di materiale coibente.

Per quanto riguarda la pavimentazione è stato considerato un sistema di forati (figura 10), nel cui interno è iniettato anche del materiale isolante termico ed acustico. Un esempio è quello dei sistemi NormaBlok® Più, che sono usati per murature monostrato, i quali possono essere completati in fase di produzione da un materiale isolante iniettato nei fori (ad esempio polistirene caricato con grafite), in modo da ottenere prestazioni termiche molto elevate anche con spessori contenuti (Informazioni prese dal sito della [Fornaci Laterizi Danesi](#)).



Figura 10: Tipologia di mattoni isolanti per la realizzazione della pavimentazione.

Il materiale considerato è in grado di sostenere il peso di tutto il nucleo, in quanto ampiamente utilizzato in soluzioni edili strutturali, ma soprattutto per la bassa conducibilità termica, che ammonta a circa 0,06 W/mK, che quindi non è molto differente da quella dell'altro materiale analizzato in precedenza.

E' stato ipotizzato di inserire il nucleo intero all'interno di un classico modulo container, le cui dimensioni standard sono pari a 5,86 m di lunghezza, 2,31 m di larghezza e 2,36 m di altezza.

Tale componente, essendo un elemento ausiliario, è stato trascurato nel calcolo degli impatti ambientali inerenti alla fase di produzione del modulo, mentre è stato incluso nel calcolo degli impatti generati dal trasporto del modulo stesso dal produttore all'utilizzatore ed anche nel proprio tragitto quotidiano all'interno del distretto industriale.

4 Conclusioni

Come riportato nei paragrafi precedenti, oltre alla progettazione delle varie parti del singolo modulo, ossia tubi e carpenteria in acciaio e al disegno del modulo completo stesso, è stata fatta una verifica strutturale a flessione e a compressione.

La verifica a flessione serve a comprendere la tenuta strutturale di ognuno dei singoli moduli nella fase di carico/impilamento. La verifica a compressione serve a stabilire la tenuta di ognuno dei singoli elementi sotto il peso di quelli sovrastanti (schiacciamento orizzontale).

E' stato verificato che per entrambe le sollecitazioni, la progettazione eseguita offre ampie garanzie di tenuta strutturale.

Oltre a questo, è stato individuato un gruppo di materiali/sistemi, che possono essere utilizzati nell'isolamento del modulo attivo.

La configurazione totale individuata sarà oggetto di valutazione anche degli impatti ambientali potenziali, mediante studio LCA. La tipologia delle metodologie di studio e delle unità funzionali considerate sarà meglio spiegata in seguito. Si può anticipare che tale analisi riguarderà in primo luogo il modulo completo, formato da 42 singoli nuclei, secondo la matrice sopra menzionata, ognuno dei quali è composto come segue:

- Calcestruzzo attivo con materiali PCM – 0,15 m³, ossia 346 kg;
- Tubo riscaldante in acciaio inox, di cui precedentemente è stato menzionato il peso;
- Gabbia metallica in acciaio, di cui precedentemente è stato menzionato il peso.

Il nucleo completo è quindi formato dai seguenti sistemi aggiuntivi:

- Nucleo attivo – numero pari a 42;
- Ulteriore piping di connessione – peso pari a 5,93 kg di tubo in acciaio inox;
- Materiale di coibentazione – peso pari a 1117 kg;
- Pavimento isolante – 317 kg.

Oltre al nucleo in questione, lo studio LCA è stato fatto anche sullo stesso con inclusi i trasporti presso l'utilizzatore finale e quelli inerenti ad eventuali tragitti quotidiani, come si vedrà nel documento ad essa dedicato.

5 Abbreviazioni ed acronimi

UniPG = Università degli Studi di Perugia;

LCA = Life Cycle Analysis o Analisi del ciclo di vita;

σ_c = Sforzo massimo a compressione agente sul calcestruzzo;

σ'_a = Sforzo massimo a trazione agente sulle barre di acciaio vicino al lato compresso della sezione resistente;

σ_a = Sforzo massimo a trazione agente sulle barre di acciaio vicino al lato teso della sezione resistente;

n = fattore di sicurezza;

n_{cc} = coefficiente di sicurezza per il calcestruzzo rispetto alla compressione;

n_{cf} = coefficiente di sicurezza per il calcestruzzo rispetto alla fessurazione;

n_a = coefficiente di sicurezza per l'acciaio;

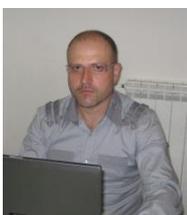
PCM = Phase-Change Material o Materiale a cambiamento di fase;

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro



Prof. Luigi Torre

Luigi Torre è professore Ordinario di Tecnologia dei Materiali, Tecnologia dei Polimeri e dei Compositi, presso l'Università di Perugia. Laureatosi all'università Federico II di Napoli ha ottenuto il Ph. D presso l'Università di Washington (Seattle) USA. Attualmente il Professor Torre dirige il Laboratorio di Scienza e Tecnologia dei Materiali dell'Università di Perugia. Il prof. Torre è stato Presidente del SAMPE (Society of Advancement of Material and Process Engineering) Europe nel 2008 e nel 2009 e SAMPE Global President nel 2016 siede tuttora nel Consiglio di Amministrazione di SAMPE Global. Il prof Torre ha pubblicato più di 180 articoli scientifici su riviste internazionali.



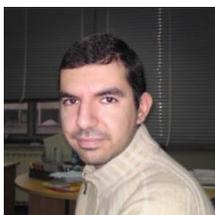
Ing. Roberto Petrucci

Roberto Petrucci è Roberto Petrucci (Terni, Italia, 1973) si è laureato in ingegneria dei materiali a Febbraio 2002 ed ha conseguito il dottorato di ricerca in Ingegneria Industriale nel 2005 in entrambi i casi presso l'Università degli studi di Perugia (2005) discutendo la tesi sullo "Studio e l'ottimizzazione delle tecniche Liquid Moulding per la produzione dei materiali compositi basati su matrici termoindurenti". E' stato ricercatore post-doc presso l'Università di Perugia, dove ha rivestito anche il ruolo di responsabile del Laboratorio di Processo dei materiali polimerici, compositi e nanocompositi. Oltre a questo, si occupa dello sviluppo di studi LCA su processi e prodotti. Recentemente è stato anche dipendente part time presso il centro Europeo sui Polimeri Nanostrutturati (ECNP Scarl), per il quale ha seguito diversi progetti europei su specifiche tematiche (LCA e nanotecnologie).



Dr. Franco Dominici

Franco Dominici è assegnista di ricerca del Gruppo di Scienza e Tecnologia dei Materiali, presso l'Università di Perugia. Si è laureato in Ingegneria dei Materiali ed in Ingegneria Industriale all'Università di Perugia ed ha ottenuto il Ph.D. Internazionale in Ingegneria Civile ed Ambientale presso l'Università di Firenze. Il Dr. Dominici si occupa di processo e caratterizzazione dei materiali, di polimeri e compositi ad alte prestazioni e di nanotecnologie; ha partecipato alle attività tecniche in più di dieci progetti europei e molti altri progetti di ricerca e sviluppo con enti ed aziende nazionali ed internazionali. L'ing. Dominici ha pubblicato più di 60 articoli scientifici ed è membro dell'editorial board di riviste internazionali.



Dr. Marco Rallini

Marco Rallini si è laureato con lode in Ingegneria dei Materiali presso l'Università degli Studi di Perugia nel 2009. Ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile e Materiali Innovativi nel 2013. Nel 2008 ha conseguito il titolo di Specialista in Tecniche Metallurgiche dopo un periodo di lavoro presso ThyssenKrupp - Acciai Speciali Terni. Nel 2009 ha frequentato lo Steelmaster presso ICSIM Franco Momigliano. I suoi temi di ricerca riguardano principalmente lo sviluppo e la caratterizzazione di materiali compositi e nanocompositi resistenti alle alte temperature. Durante il periodo di dottorato ha acquisito le capacità e le competenze per lo sviluppo e la caratterizzazione di compositi e nanocompositi basati su matrici polimeriche; è principalmente specializzato nella produzione di compositi fibro-rinforzati a matrice termoindurente (tecniche di liquid molding, stampaggio, hand lay-up), compositi a matrice elastomerica (estrusione, calandratura) e nella caratterizzazione di compositi e nanocompositi in termini di: proprietà meccaniche (trazione, flessione, compressione, durezza), termogravimetria (TG), calorimetria a scansione differenziale (DSC), analisi termo-meccanica (TMA), microscopia elettronica a scansione (SEM).