



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche – DIISM

Collettori solari massivi: caratterizzazione sperimentale di materiali per la  
realizzazione di un prototipo

Massive solar collectors: experimental characterization of materials for the  
realization of a prototype

A.A. 2022/2023

*RELATORE:*

Prof. Di Nicola Giovanni

STUDENTE:

Giandomenico Silvia



*Alla mia famiglia e a Giulio*



# Indice argomenti

<b>1. Scopo della tesi .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Introduzione .....</b>	<b>3</b>
2.1. Problemi ambientali connessi alla produzione di energia: un problema globale.....	3
2.2. L'importanza delle fonti rinnovabili e dell'energia solare.....	5
2.3. Trasformare l'energia solare in energia termica. Principali metodi di trasferimento del calore. .	6
<b>3. Funzionamento impianto solare-termico e principali componenti.....</b>	<b>10</b>
<b>4. Collettori solari-termici: tecnologia ed utilizzi.....</b>	<b>12</b>
4.1. Collettori solari-termici tradizionali (FPC).....	12
4.1.1. Principali vantaggi degli FCP .....	13
4.1.2. Principali limiti degli FCP .....	14
4.2. Collettori solari termici massivi (MSTC) .....	15
4.2.1. Principali vantaggi degli MSTC .....	16
4.2.2. Principali limiti degli MSTC.....	16
4.2.3. Campi d'applicazione degli MSTC.....	16
4.2.4. Principali materiali utilizzati negli MSTC .....	17
<b>5. MSTC - Analisi della letteratura .....</b>	<b>21</b>
5.1. Principali prototipi realizzati e casi di studio effettuati .....	21
<b>6. PCM: Phase Change Material .....</b>	<b>41</b>
6.1. Calore latente e transizione di fase .....	41
6.2. Classificazione dei PCM.....	44
6.2.1. PCM organici .....	46
6.2.2. PCM inorganici .....	47
6.2.3. PCM eutettici .....	48
<b>7. Utilizzo di pcm nella matrice cementizia .....</b>	<b>50</b>

7.1. Principali caratteristiche fisiche, meccaniche e termiche del calcestruzzo che subiscono variazioni in presenza di PCM nella matrice cementizia .....	52
7.1.1. Caratteristiche fisiche, meccaniche e termiche del calcestruzzo con PCM micro-incapsulato	54
7.1.2. Caratteristiche fisiche, meccaniche e termiche del calcestruzzo con PCM macro-incapsulato .....	56
<b>8. Aggregati artificiali o riciclati: produzione ed utilizzo nella matrice cementizia .....</b>	<b>58</b>
8.1. Aggregati naturali .....	58
8.2. Aggregati artificiali o riciclati .....	59
8.2.1. Utilizzo degli aggregati artificiali o riciclati nel calcestruzzo .....	61
<b>9. Analisi per la caratterizzazione .....</b>	<b>63</b>
9.1. Calorimetria differenziale a scansione: DCS (Differential Scanning Calorimetry) .....	63
9.2. Analisi granulometrica per setacciatura .....	66
9.2.1. Procedimento dell'analisi granulometrica .....	66
9.2.2. Interpretazione dei risultati .....	67
9.3. Analisi della densità .....	69
9.4. Analisi della porosità .....	69
<b>10. Caratterizzazione sperimentale di materiali per la realizzazione di un prototipo .....</b>	<b>73</b>
10.1. Materiali utilizzati .....	73
10.1.1. PCM: paraffine .....	73
10.1.2. Aggregato da macinazione di blocchi Poroton .....	76
10.2. Confezionamento dell'aggregato ed analisi granulometrica .....	76
10.3. Determinazione dei vuoti e della densità .....	81
10.4. Impregnazione dell'aggregato .....	82
10.4.1. Metodologia .....	84
<b>11. Ipotetico prototipo da realizzare con le caratteristiche sopra riportate .....</b>	<b>86</b>
<b>Conclusioni .....</b>	<b>89</b>
<b>Bibliografia e sitografia .....</b>	<b>91</b>



# Indice Figure

<b>Figura 1</b> _ Impianto a circolazione naturale [11].....	11
<b>Figura 2</b> _ Impianto a circolazione forzata 1) Pannello solare, 2) Centralina di controllo, 3) Pompa, 4) Pressostato, 5) Serbatoio, 6) Altra fonte di calore (caldaia, pompa di calore, ecc.) [11].....	11
<b>Figura 3</b> _ Vista schematica del collettore solare piatto [3].....	12
<b>Figura 4</b> _ Vista esplosa del collettore solare piatto [3].....	12
<b>Figura 5</b> _ Capacità termica volumetrica C in funzione della densità $\rho$ per i più comuni materiali da costruzione [14].....	18
<b>Figura 6</b> _ Collettore in calcestruzzo fibrorinforzato [13].....	22
<b>Figura 7</b> _ Progetto del Collettore solare in calcestruzzo (CSC) [15] .....	22
<b>Figura 8</b> _ Schema idraulico del collettore [15].....	23
<b>Figura 9</b> _ Collettore solare in calcestruzzo [18] .....	24
<b>Figura 10</b> _ Schema della disposizione della serpentina all'interno del collettore in calcestruzzo [19] .....	25
<b>Figura 11</b> _ Scalda acqua solare con collettore in calcestruzzo [20] .....	26
<b>Figura 12</b> _ Fosse serpentina in rame [20].....	26
<b>Figura 13</b> _ Schema apparato di prova e punti di controllo [21] .....	27
<b>Figura 14</b> _ Stratigrafia del modello oggetto di studio [22].....	28
<b>Figura 15</b> _ Dimensione sala di prova collettore integrato in copertura [23] .....	29
<b>Figura 16</b> _ Stratigrafia della copertura delle due sale di prova [23].....	29
<b>Figura 17</b> _ Collettori solari in calcestruzzo: Slab1 materiale conduttivo e tubi in alluminio, Slab2 materiale conduttivo e tubi in PVC e Slab3 materiale non conduttivo e tubi in PVC [24] .....	30
<b>Figura 18</b> _ Collettore Solare in Calcestruzzo costituito da tre moduli collegati in serie [25].....	31
<b>Figura 19</b> _ Schema di collegamento collettori [25].....	31
<b>Figura 20</b> _ Scalda acqua solare oggetto di studio [26] .....	32
<b>Figura 21</b> _ Rappresentazione schematica della geometria del pannello a pavimento e di quello a parete [27] .....	33
<b>Figura 22</b> _ Parete esterna laboratorio solare a Christchurch in Nuova Zelanda [28].....	34
<b>Figura 23</b> _ Stratigrafia del pannello SHSC [28].....	34
<b>Figura 24</b> _ Configurazione del circuito di sperimentazione: 1. Serbatoio, 2. Pompa, 3. Collettore in calcestruzzo, 4.Tubi del circuito, 5. Apparato di monitoraggio ambientale, 6. Sistema di acquisizione dati [29] .....	35
<b>Figura 25</b> _ Sezione pannello solare integrato al soffitto [30].....	35

<b>Figura 26</b> _ Schema del sistema di riscaldamento solare dell'acqua. (A) Tubazioni in alluminio annegate nei tre pannelli in calcestruzzo. (B) Sezione del collettore con le tubazioni annegate nel calcestruzzo [31] .....	36
<b>Figura 27</b> _ Modello semplificato del Collettore Solare Termico Massivo oggetto di studio [32]....	37
<b>Figura 28</b> _ Diagramma di transizione di fase [37] .....	43
<b>Figura 29</b> _ Classificazione dei materiali utilizzati come PCM in base alla temperatura [45].....	45
<b>Figura 30</b> _ Tipologie di PCM [46] .....	46
<b>Figura 31</b> _ Metodi per incorporare il PCM al cemento [47] .....	51
<b>Figura 32</b> _ Principali codici EER di rifiuti utilizzati per gli aggregati riciclati ed artificiali [56] ....	59
<b>Figura 33</b> _ Esempio di impianto di frantumazione [57].....	60
<b>Figura 34</b> _ Tabella 11.2.III Norme Tecniche per le costruzioni [58].....	62
<b>Figura 35</b> _ DSC strumentazione [60] .....	63
<b>Figura 36</b> _ Curve tipo risultanti da analisi DSC di un polimero con focus in corrispondenza della fusione e della cristallizzazione [59].....	65
<b>Figura 37</b> _ Quantità minima del campione di prova [61] .....	66
<b>Figura 38</b> _ Esempio di curva granulometrica [61] .....	68
<b>Figura 39</b> _ Esempio di fuso granulometrico [61] .....	68
<b>Figura 40</b> _ Schema picnometro ad elio [62].....	69
<b>Figura 41</b> _ Rappresentazione delle tipologie di pori presenti in un materiale [63].....	69
<b>Figura 42</b> _ Micropori materiale ceramico [63].....	70
<b>Figura 43</b> _ Termogramma paraffina RT44HC [65].....	75
<b>Figura 44</b> _ Termogramma paraffina RT62HC [66].....	75
<b>Figura 45</b> _ Pori Blocchi Poroton [67].....	76
<b>Figura 46</b> _ Frantoio a mascelle utilizzato per la formazione dell'aggregato.....	77
<b>Figura 47</b> _ Materiale risultante dalla macinazione del blocco Poroton.....	77
<b>Figura 48</b> _ Classi granulometriche ottenute. Da destra verso sinistra 4-8 mm, 2-4 mm, 1-2 mm, 0.5-1 mm e 0-0.5 mm. ....	77
<b>Figura 49</b> _ Setacci con le differenti maglie .....	78
<b>Figura 50</b> _ Setacciatore meccanico .....	78
<b>Figura 51</b> _ Curve granulometriche dei gruppi 4-8 mm, 2-4 mm, 1-2 mm, 0.5-1 mm e 0-0.5 mm ...	81
<b>Figura 52</b> _ Attrezzatura per nebulizzazione paraffina.....	84
<b>Figura 53</b> _ Pesatura iniziale della massa del campione.....	85
<b>Figura 54</b> _ Campione ad impregnazione ultimata .....	85
<b>Figura 55</b> _ Sezione prototipo.....	86

<b>Figura 56</b> _Pianta prototipo .....	87
<b>Figura 57</b> _Stratigrafia prototipi .....	87

# Indice Tabelle

<b>Tabella 1</b> _Energia media richiesta per la produzione dei principali materiali necessari a produrre FCP [13].....	15
<b>Tabella 2</b> _Principali dati raccolti dalla letteratura sui Collettori Solari Termici in Calcestruzzo. Legenda: T) teorico, E) sperimentale, DHW) acqua calda domestica, WH) acqua calda, IM) fusione di ghiaccio e neve.....	39
<b>Tabella 3</b> _Vantaggi e svantaggi delle principali tipologie di PCM.....	49
<b>Tabella 4</b> _Caratteristiche paraffina RT44HC .....	74
<b>Tabella 5</b> _Caratteristiche paraffina RT62HC .....	74
<b>Tabella 6</b> _Risultati dell'analisi granulometrica .....	80
<b>Tabella 7</b> _Composizione dei pori in volume %.....	81
<b>Tabella 8</b> _Tipologia di pori in volume percentuale .....	82
<b>Tabella 9</b> _Densità assoluta dei campioni oggetto di studio .....	82
<b>Tabella 10</b> _Determinazione della quantità di paraffina RT44HC e RT62HC da utilizzare .....	84
<b>Tabella 11</b> _Principali dimensioni del prototipo.....	86



# 1. Scopo della tesi

In un mondo dove l'industrializzazione e la produzione di energia elettrica e termica sta mettendo alle strette il panorama ambientale e geopolitico globale, c'è bisogno di iniziare ad orientarsi verso scelte più sostenibili. Molto si è fatto negli ultimi decenni per cercare di cambiar rotta ma ancora molto c'è da fare. La presente tesi ha lo scopo di andare a toccare tematiche attuali che riguardano direttamente ognuno di noi e le future generazioni che si troveranno davanti il frutto del nostro sfruttamento incontrollato ed irrazionale delle risorse attualmente presenti nel sottosuolo terrestre. L'uomo ha la possibilità ed il dovere, ora più che mai, di cercare di cambiar rotta, sfruttando forme di energia pulita e rinnovabile.

Il Sole è il nostro motore principale da secoli, fin dalla nascita del nostro pianeta. L'utilizzo dell'energia solare è stato ed è ambito di ricerca scientifica e di innovazione tecnologica. Molti sono i metodi per utilizzare questo enorme potenziale che la natura ci ha donato. Tra quelli che permettono di intercettare la radiazione solare e trasformarla in energia termica si andranno ad analizzare i collettori solari termici per la produzione e lo stoccaggio di acqua calda. In particolare, si andrà ad approfondire lo studio dei collettori solari termici massivi, Massive Solar-Thermal Collector (MSTC), collettori che sfruttano il massiccio spessore dell'assorbitore e le sue proprietà termofisiche.

La letteratura scientifica è quanto di più prezioso si possa avere per analizzare le tematiche sopra riportate, in quanto racchiude l'esperienza teorica e pratica dei ricercatori di tutto il mondo e questo vuol dire avere un ampio raggio di lavori a differenti latitudini, radiazioni solari e con diverse situazioni climatiche e culturali. Per avere un quadro accurato, si andranno a studiare tutti quegli articoli che toccano direttamente le tecnologie utili alla comprensione di questi collettori che utilizzano materiali da costruzione mediamente poco costosi. Importante sarà capire l'influenza dei vari componenti e della realizzazione stessa e come la conformazione dei collettori e il posizionamento dei vari elementi migliori o pregiudichi l'efficienza ed il rendimento dello stesso.

Verrà analizzato l'utilizzo dei materiali a cambiamento di fase, Phase Change Material (PCM), specificando le principali tipologie e le relative caratteristiche, e degli aggregati riciclati, materiale derivante dalla demolizione degli edifici e trattato secondo la normativa vigente.

Il paragrafo principale di questa tesi illustra la caratterizzazione delle cere paraffiniche e dell'aggregato ricavato dalla macinazione di blocchi Poroton. Si andranno a specificare le analisi utili per studiare le loro caratteristiche termiche e meccaniche e dopo aver raccolto i dati e le informazioni

utili alla comprensione del tema trattato, si procederà con l'esposizione della metodologia applicata, specificando come sono stati ottenuti i dati utilizzati per l'applicazione pratica.

In fine, a conclusione di tutte le analisi e gli studi effettuati, si indicheranno le caratteristiche qualitative e quantitative per la realizzazione di un ipotetico prototipo.

## 2. Introduzione

### 2.1. Problemi ambientali connessi alla produzione di energia: un problema globale

La produzione di energia, per i più svariati motivi, è una delle attività che più ha impegnato l'essere umano fin dalla preistoria. Nel corso del Novecento, in particolare tra il 1973 e il 2004, il consumo energetico pro-capite è letteralmente raddoppiato provocando l'insorgere di varie problematiche ambientali e geopolitiche. L'evoluzione dell'uomo e delle tecnologie da esso utilizzate, quindi, porta con sé una richiesta sempre crescente di risorse. Le fonti energetiche utilizzabili sono molteplici e la maggior parte hanno come fonte primaria la radiazione solare che colpendo la superficie terrestre viene conservata indirettamente sotto forma di energia fossile o direttamente utilizzata. Esse si suddividono principalmente in due categorie:

- Fonti energetiche primarie:

sono risorse presenti in natura come il sole, il petrolio, il gas naturale, ecc,

- Fonti energetiche secondarie:

sono fonti di energia non direttamente presenti in natura che derivano da quelle primarie.

Un'ulteriore classificazione è data dall'esauribilità della risorsa stessa. Si dividono infatti in:

- Fonti energetiche esauribili:

quelle presenti in quantità limitata sul globo terrestre;

- Fonti energetiche non esauribili o rinnovabili:

quelle presenti in gran quantità e non soggette ad esaurimento.

Attualmente le prime sono quelle più utilizzate, in particolare petrolio, carbone e gas naturale grazie alla disponibilità ancora relativamente elevata e al costo abbastanza contenuto. Questo, però, comporta un progressivo esaurimento dei giacimenti [1]. Comunemente chiamati anche combustibili fossili, sono derivati dalla trasformazione naturale della sostanza organica presente nel sottosuolo che si trasforma in forme molecolari più stabili e ricche di carbonio con il passare delle ere geologiche. La distribuzione mondiale di queste risorse risulta disomogenea sia come quantità che come tipologia di giacimenti. Il loro utilizzo comporta una serie di vantaggi legata al loro alto rapporto energia/volume, alla facilità di trasporto e d'immagazzinamento e al loro costo contenuto. Rispetto però al consumo attuale e a quello che si prevede per il futuro la preoccupazione generale riguarda la

disponibilità a lungo termine ed il conseguente aumento dei costi, senza contare l'impatto ambientale decisamente negativo. I principali svantaggi, infatti possono essere riassunti come segue:

- Sono inquinanti:

anche se l'innovazione industriale sta sviluppando macchinari e tecnologie sempre più all'avanguardia, l'inquinamento è un problema tangibile e le sostanze chimiche, liberate nell'atmosfera, provocano danni ambientali consistenti;

- Incrementano la CO<sub>2</sub>:

il loro utilizzo incrementa l'emissione di CO<sub>2</sub>, un gas non prettamente inquinante ma principale responsabile del surriscaldamento globale. [2]

Alla luce dei problemi ambientali legati alla produzione dell'energia elettrica e termica, lo scenario globale attuale non è dei più floridi. La richiesta energetica è costante ed in continuo aumento in qualsivoglia settore e la crescita della popolazione mondiale non fa sperare in un tempestivo miglioramento della situazione. A livello internazionale, come indicato da Kalogirou, Soteris A. [3] i principali problemi ambientali legati alla produzione di energia sono:

- Piogge acide:

l'SO<sub>2</sub> (biossido di zolfo) e l'NO<sub>x</sub> (ovvero la somma del monossido di azoto NO e del biossido di azoto NO<sub>2</sub>) sono prodotti dalla combustione dei combustibili fossili e sono trasportati a grandi distanze tramite l'atmosfera, depositandosi a terra tramite le precipitazioni e danneggiando gli ecosistemi sensibili all'acidità;

- Riduzione dello strato di ozono:

lo strato di ozono, presente nell'atmosfera terrestre, ha il compito fondamentale di assorbire le radiazioni ultraviolette ed infrarosse. Le emissioni di CFC (Composti chimici contenenti cloro, fluoro e carbonio), halon e NO<sub>x</sub> stanno provocando un veloce assottigliamento di questa naturale barriera terrestre con conseguente diminuzione della schermatura e aumento del cancro alla pelle e danni agli occhi per diverse specie terrestri;

- Cambiamento climatico globale:

l'aumento delle concentrazioni atmosferiche dei gas serra provoca un conseguente innalzamento della temperatura della superficie terrestre e dei livelli del mare.

Il settore edile solo in Italia è responsabile del 45% del consumo energetico e del 18% di produzione della CO<sub>2</sub> [4] e nella maggior parte dei paesi europei, gli edifici rappresentano circa il 40% del consumo totale di energia [5].

## **2.2. L'importanza delle fonti rinnovabili e dell'energia solare**

Far fronte alla situazione precedentemente descritta è una priorità oltre che un dovere verso le future generazioni. Studiare e pianificare azioni correttive per implementare, a lungo termine, uno sviluppo ed un approvvigionamento sostenibile risulta dunque essere fondamentale. È in questo particolare scenario che trovano il loro spazio le fonti di energia rinnovabile, considerate inesauribili perché naturalmente presenti sulla nostra Terra e prodotte ad un ritmo uguale o superiore al quale vengono consumate. Infatti, sono considerate “sostenibili” quando il tasso di rigenerazione è superiore o uguale a quello di utilizzo e quando non si pregiudica la disponibilità futura delle stesse. A differenza delle fonti di energie tradizionali, hanno la peculiarità di non immettere nell'ambiente inquinanti e/o climalteranti [6].

Le risorse energetiche rinnovabili sembrano essere la soluzione più efficiente ed efficace. Quest'ultime dovrebbero essere disponibili a costi ragionevoli ed essere utilizzabili senza avere impatti negativi per la società. L'energia rinnovabile si ottiene infatti dalla conversione di fenomeni naturali, quali per esempio energia solare, eolica, gravitazionale, ecc, in energia elettrica o termica. Attualmente sono stati compiuti progressi significativi in materia, migliorando l'efficienza di raccolta e conversione dell'energia e riducendo i costi iniziali e di manutenzione. I vantaggi derivanti dall'installazione e dal funzionamento di sistemi ad energia rinnovabile sono principalmente i seguenti:

- Risparmio energetico:

risparmio dei consumi di energia elettrica e/o diesel che sono generalmente utilizzati per la produzione di energia elettrica e termica;

- Generazione di nuovi posti di lavoro:

si parla di tutta la sfera che riguarda lo studio e lo sviluppo delle nuove tecnologie, nonché la loro produzione ed installazione;

- Riduzione dell'inquinamento ambientale:

il vantaggio più importante dei sistemi di energia rinnovabile è la riduzione dell'inquinamento ambientale. Ciò è possibile grazie alla riduzione delle emissioni atmosferiche con conseguente impatto positivo sulla salute pubblica, sull'agricoltura e sugli ecosistemi [3].

La principale fonte di energia rinnovabile, da cui derivano tutte le altre, è il Sole. Basti pensare che, per esempio, l'energia idraulica è legata al ciclo naturale dell'acqua che evaporando a causa dell'energia solare provoca le successive precipitazioni. In termini numerici, il Sole irradia alle soglie dell'atmosfera terrestre  $1367 \text{ W/m}^2$ , detta anche costante solare. Approssimando la Terra ad una sfera di  $6371 \text{ km}$ , si ottiene che la superficie d'intercettazione solare è pari a  $127,5$  milioni di  $\text{km}^2$ , che moltiplicata per la costante solare, corrisponde a  $174300 \text{ TW}$  di potenza media. Il 30% di quest'ultima viene riflessa o intercettata dall'atmosfera ed una parte viene assorbita dagli oceani. La quantità di energia solare a disposizione è quindi enorme ma necessita di essere raccolta in aree molto vaste [7]. Fino a qualche tempo fa, la ricerca e lo sviluppo sull'efficienza energetica e sull'uso delle energie rinnovabili si è concentrata principalmente su edifici residenziali di piccole dimensioni. Specialmente nell'Europa centrale e settentrionale, i prezzi elevati dell'energia e le fiscali normative edilizie hanno fatto in modo che gli edifici riducessero al minimo i consumi. Attualmente si sta spostando l'attenzione anche sui complessi residenziali di maggiore dimensione, nonché più urbani, in quanto una porzione sempre crescente della popolazione mondiale vive nelle grandi città ed a quest'ultima va dedicata maggior attenzione [5].

In altre parole, la produzione di energia, l'efficienza ed il risparmio energetico sono fattori fondamentali per lo sviluppo di ogni paese e su queste nuove tecnologie si sta puntando ed investendo molto, soprattutto negli ultimi decenni.

### **2.3. Trasformare l'energia solare in energia termica. Principali metodi di trasferimento del calore.**

Come precedentemente affermato, l'energia solare è la fonte energetica che la Terra possiede in grandissime quantità e che può essere tramutata in calore grazie alle conoscenze acquisite negli ultimi decenni. Il calore, per definizione, è l'energia trasferita tra due sistemi, grazie ad una differenza di temperatura, riconoscibile solo nel momento in cui attraversa il contorno. Il calore viene misurato in Joule, J. Per capire come le tecnologie attuali sfruttino questo potenziale, occorre analizzare quali sono e come funzionano i meccanismi di trasmissione di calore:

- Conduzione:

Lo scambio termico per conduzione è dovuto al trasferimento di energia tra le diverse particelle di un mezzo. Quest'ultimo si può trovare allo stato solido, in cui tale scambio avviene per vibrazione del reticolo cristallino, o allo stato liquido e gassoso, in cui invece è legato alle collisioni ed alla mobilità molecolare. Il flusso termico per conduzione lungo una direzione  $x$  è espresso mediante il Postulato di Fourier:

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad [W]$$

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Dove:

$\lambda$ : rappresenta la conducibilità termica del mezzo

$A$ : l'area di scambio termico;

$\frac{dT}{dx}$ : il gradiente di temperatura lungo la direzione x.

Nella maggior parte delle applicazioni che si possono comunemente incontrare in edilizia, il problema è considerato realistico grazie ad alcune ipotesi semplificative:

- Conduzione stazionaria, cioè che il flusso termico si mantenga costante nel tempo;
- Mezzo omogeneo ed isotropo, cioè che la conducibilità termica del mezzo sia costante indipendentemente dalla posizione nel materiale e dalla direzione del flusso termico;
- Conduzione monodimensionale, cioè si presuppone che lo spessore soggetto all'attraversamento del flusso termico sia nettamente inferiore rispetto alle altre dimensioni.

Attraverso queste semplificazioni si arriva alla seguente formula:

$$\int_0^L \dot{q} dx = - \int_{T_1}^{T_2} \lambda dT \rightarrow \dot{q} \int_0^L dx = -\lambda \int_{T_1}^{T_2} dT \rightarrow \dot{q} L = \lambda (T_1 - T_2) \rightarrow \dot{q} = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{L}$$

Come si può notare dalla formula, la conducibilità termica del materiale ha una notevole importanza per quanto riguarda la conduzione. Essa, infatti, rappresenta la capacità che ha il mezzo di trasferire energia termica al suo interno. Come già detto, nei solidi il meccanismo conduttivo è associato alla vibrazione molecolare e alla mobilità degli elettroni. Ciò vuol dire che la struttura reticolare interna del materiale influisce significativamente sulla capacità di condurre e trasmettere il calore. In linea generale, i solidi hanno una conducibilità termica migliore rispetto ai liquidi ed ai gas ed i metalli puri sono quelli che meglio assolvono a questo compito grazie al loro reticolo interno [8].

- Convezione:

Lo scambio termico per convezione implica un trasferimento di energia mediante conduzione e trasporto di massa. Esso avviene tra solido e fluido o tra fluido e fluido qualora vi sia moto relativo tra i due mezzi. La potenza termica scambiata per convezione è ben rappresentata dalla Legge di Newton:

$$\dot{Q} = h A (T_s - T_\infty) \quad [W]$$

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} h (T_s - T_\infty) \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Dove:

H: rappresenta la tipologia di scambio convettivo;

$T_s$ : la temperatura della superficie;

$T_\infty$ : la temperatura del fluido.

Il processo convettivo è riducibile a due macrocategorie:

- convezione forzata, in cui il fluido è portato dallo stato di quiete al moto tramite una sorgente esterna;
- convezione naturale dove il moto del fluido è generato da un gradiente di temperatura che provoca una variazione locale di densità, inducendo una forza di galleggiamento nello stesso.

La seconda si innesca nel momento in cui il fluido, che possiede una determinata densità, entrando in contatto con una superficie ad una temperatura superiore, vede ridotta la sua densità localmente, motivo per cui la forza di galleggiamento spinge le particelle riscaldate a risalire. L'entità di tale forza dipende dalla differenza di temperatura tra parete e fluido e dalla capacità di quest'ultimo di variare la propria densità (coefficiente di espansione volumetrica) [8].

• Irraggiamento:

Lo scambio termico per irraggiamento avviene per trasferimento di energia elettromagnetica tra due differenti corpi che può indurre ad un incremento di temperatura alla stregua di un vero e proprio scambio termico. A differenza di quello conduttivo e convettivo, non necessita quindi di un mezzo affinché possa avvenire. Inoltre, il vuoto non incide negativamente sul trasferimento di energia, che invece avviene alla velocità della luce nel mezzo. Quando un elemento possiede un certo livello di energia interna, la sua superficie emette delle radiazioni che raggiungono un altro corpo innalzandone la temperatura. Non è necessario il contatto affinché lo scambio avvenga e la legge che descrive questo fenomeno è quella di Stefan-Boltzmann:

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad [W]$$

Dove:

$\sigma$ : è una costante, detta costante di Stefan-Boltzmann, che vale  $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ;

$\varepsilon$ : è l'emissività della superficie. Quest'ultima è una grandezza adimensionale che rappresenta il rapporto tra l'emissione di un corpo reale e quello di un "corpo nero", ovvero una superficie reale di riferimento che, a parità di temperatura e lunghezza d'onda, emetta più di qualsiasi altra superficie reale e che sia un emettitore diffuso.

Si parla di irraggiamento termico quando un fotone, associato ad una lunghezza d'onda compresa tra 0,1 e 100  $\mu\text{m}$ , colpendo una superficie, induce sulle molecole di quest'ultima un aumento di energia cinetica, rotazionale, traslazionale e vibrazionale, con conseguente aumento di temperatura. Un corpo emette radiazioni elettromagnetiche a condizione che la sua temperatura assoluta sia superiore a 0°K. Nei solidi solo i primi  $\mu\text{m}$  contribuiscono all'irraggiamento, mentre nei gas si parla di emissione sferica. Quando una superficie emette la stessa quantità di energia in tutte le direzioni parliamo di emettitore diffuso, mentre generalmente i corpi reali sono considerati emettitori direzionali. Qualunque corpo inoltre presenta un'emissione variabile in base alla dimensione della superficie, alla temperatura della stessa, alla direzione di ricezione, al tipo di materiale che riveste la superficie ed alla lunghezza d'onda [9].

In ognuno dei metodi descritti la principale condizione è che vi sia differenza di temperatura tra i corpi o tra le diverse zone di uno stesso corpo. Gli impianti solari termici utilizzano questi metodi di trasferimento del calore tramite i diversi componenti ovvero sfruttando la conducibilità termica del materiale utilizzato per l'assorbitore nel collettore, la convezione tra il fluido di lavoro e quest'ultimo e l'irraggiamento che il sole ci offre quotidianamente.

### 3. Funzionamento impianto solare-termico e principali componenti

L'idea di utilizzare l'energia solare non è recente, anzi! Le sue origini risiedono fin nell'antichità dove fu utilizzata in svariati modi. Attualmente, uno dei più utilizzati è associato agli impianti solari termici, dispositivi in grado di captare l'energia solare, immagazzinarla e sfruttarla ai fini di riscaldare l'acqua. In base alla temperatura d'esercizio gli impianti si distinguono in:

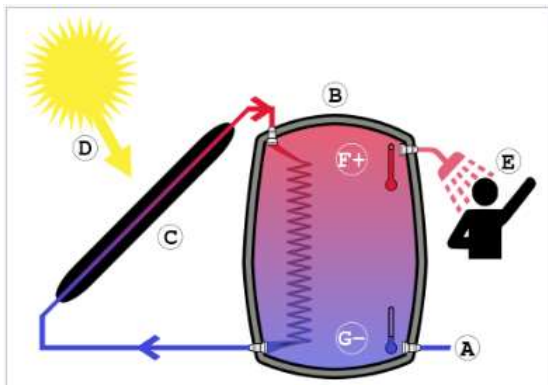
- Impianti a bassa temperatura fino a 120°C;
- Impianti a media temperatura fino a circa 500°C;
- Impianti ad alta temperatura fino a circa 1000°C.

In questa tesi verranno analizzati studi e simulazioni che restano nel campo delle basse temperature. I sistemi che si andranno ad approfondire, nello specifico, sono quelli adibiti alla produzione di acqua calda sanitaria. I componenti di cui sono solitamente composti tali impianti sono i seguenti:

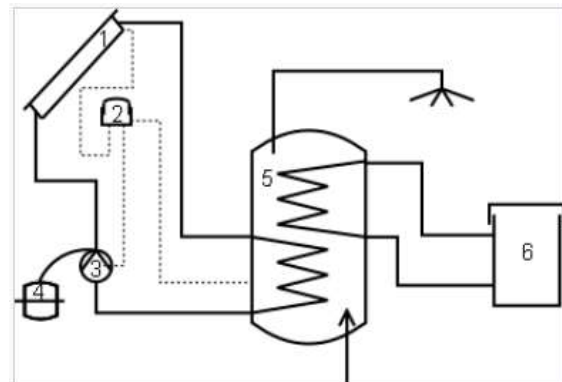
- Collettore solare-termico;
- Circuito di tubazioni;
- Fluido vettore;
- Serbatoio di accumulo;
- Pompa;
- Centralina di controllo;
- Valvole;
- Eventuale generatore di calore.

Il principale componente di questo sistema è senza dubbio il collettore solare-termico. Comunemente chiamato pannello solare, assolve al compito di assorbire la radiazione solare in ingresso, convertendola in calore e trasferendola per convezione al fluido vettore che scorre nel circuito. Quest'ultimo può essere una miscela di acqua ed additivo, per aumentarne la conduzione ed evitarne il congelamento nei mesi invernali, o semplicemente acqua. Come si può notare dalle immagini sottostanti, i componenti dell'impianto si differenziano in base al modo in cui avviene fatto scorrere il fluido all'interno del circuito. La circolazione naturale, come rappresentato nella *Figura 1* sfrutta la naturale tendenza dell'acqua calda di migrare verso l'alto per convezione. La densità del liquido riscaldato, risultando inferiore rispetto a quella del liquido più freddo, attiva il fenomeno del galleggiamento del primo sul secondo. In questo caso il serbatoio dovrà trovarsi nella parte alta del collettore dove, tramite lo scambiatore presente, cederà calore all'acqua dello stesso che verrà poi inserita nel circuito di distribuzione per arrivare, in fine, alle utenze nelle varie ore del giorno e della

notte secondo disponibilità. In questo caso il consumo elettrico è nullo in quanto non sono presenti dispositivi elettronici.



**Figura 1** Impianto a circolazione naturale [11]



**Figura 2** Impianto a circolazione forzata 1) Pannello solare, 2) Centralina di controllo, 3) Pompa, 4) Pressostato, 5) Serbatoio, 6) Altra fonte di calore (caldaia, pompa di calore, ecc.) [11]

La circolazione forzata, invece, utilizza un sistema più complesso. Come si evince dalla *Figura 2*, il serbatoio è separato dal collettore ed è spesso collocato in un locale tecnico sottostante. La circolazione del fluido avviene con l'ausilio di pompe, che entrano in azione solo quando la temperatura del fluido vettore presente nei pannelli è superiore a quella dell'acqua presente nel serbatoio di accumulo. Normalmente il circuito idraulico collegato al pannello è chiuso e separato da quello del serbatoio e nella maggior parte dei casi si utilizzano serpentine, ognuna delle quali è collegata ad un generatore diverso di acqua calda, come per esempio pompa di calore, caldaia, ecc. In linea generale si utilizza la pompa per permettere al fluido di lavoro di muoversi all'interno del circuito fino alla serpentina presente nel serbatoio che trasferisce calore all'acqua in esso presente e che verrà poi distribuita alle varie utenze. Quando la temperatura nel serbatoio diminuisce o quando c'è una variazione di temperatura tra collettore e serbatoio interviene la centralina che aziona uno degli altri generatori di calore presenti nell'impianto [10]. In entrambi i casi, se il serbatoio è ben progettato ed opportunamente isolato l'impianto è in grado di erogare acqua calda anche quando il collettore non capta radiazioni solari. La circolazione naturale rispetto a quella forzata risulta essere più sensibile alle perdite di carico del circuito primario, motivo per il quale il serbatoio di accumulo viene posizionato molto vicino al collettore [11].

## 4. Collettori solari-termici: tecnologia ed utilizzi

Questo capitolo ha lo scopo di andare ad analizzare i principali vantaggi e svantaggi dei collettori solari termici tradizionali, Flat-Plate Solar Collector (FPC), e dei collettori solari termici massivi, Massive Solar-Thermal Collector (MSTC). Quest'ultimi sono strutture massicce che sfruttano la capacità termica dell'assorbitore. Sono di facile costruzione ed utilizzo e presentano prestazioni differenti dai collettori tradizionali.

### 4.1. Collettori solari-termici tradizionali (FPC)

Attualmente, i collettori solari maggiormente utilizzati sono i così detti Flat-Plate Solar Collector (FPC), disponibili sul mercato in molteplici tipologie. Utilizzati in tutto il mondo, hanno assunto rilevante importanza sia nelle applicazioni residenziali che in quelle industriali e commerciali che richiedano acqua calda a bassa temperatura ed in particolare nelle regioni il cui clima è mite o caldo.

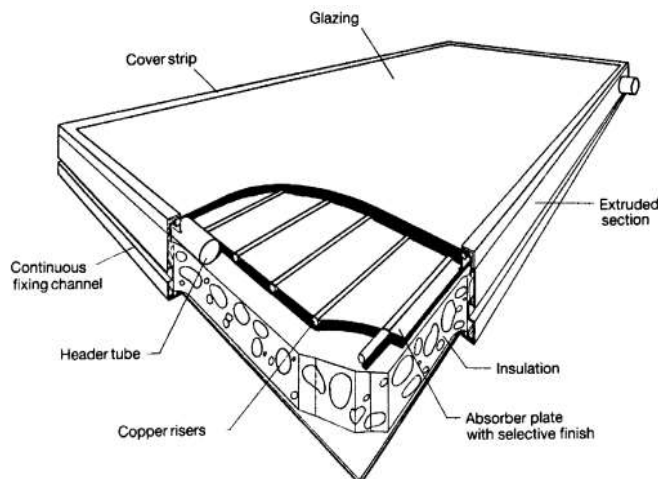


Figura 3\_Vista schematica del collettore solare piatto [3]

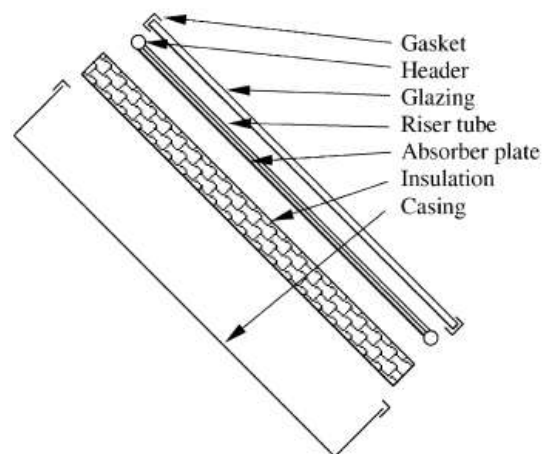


Figura 4\_Vista esplosa del collettore solare piatto [3]

Il collettore solare piatto è il componente principale di qualsiasi sistema di riscaldamento solare dell'acqua dal quale dipende il livello di prestazione dello stesso. Nelle *Figure 3 e 4* è riportato lo schema tipico di un FPC:

- Piastra assorbente:

È una superficie ad alto assorbimento che assolve al compito di intercettare e captare la radiazione solare. Possono avere varie conformazioni e possono essere sia piatte che scanalate. I materiali tipicamente più utilizzati come assorbitori sono il rame, alluminio e acciaio inox mentre il colore che si predilige per questo componente è il nero. Attualmente, per motivi estetici riguardanti soprattutto l'impatto ambientale, si stanno studiando anche nuovi rivestimenti per l'utilizzo di ulteriori colorazioni.

- Copertura trasparente:

Viene utilizzata una o più lastre di vetro, o di altro materiale, per ridurre le perdite per convezione della piastra di assorbimento grazie all'aria stagna presente tra quest'ultima e l'assorbitore. Inoltre, riduce le perdite di radiazione in quanto il vetro lascia passare le onde corte ricevute dal sole comportandosi come materiale trasparente e trattiene le radiazioni a onde lunghe emesse dall'assorbitore verso l'esterno, provocando un vero e proprio effetto serra;

- Tubazioni:

Possono essere saldate alla piastra o essere parte integrante di essa. Entrambe le estremità si collegano ai tubi di testata, di dimensioni maggiori, che trasferiscono il fluido in ingresso e in uscita ai circuiti secondari;

- Isolamento:

Ha lo scopo di ridurre al minimo le perdite di calore dalla parte posteriore e dai lati del collettore stesso;

- Contenitore o involucro:

Oltre a contenere tutti gli elementi del collettore ha la funzione di preservarli da agenti esterni quali per esempio la polvere e l'umidità.

Quando la radiazione, passando attraverso la copertura trasparente, colpisce la superficie assorbente, una grande parte di questa energia viene assorbita dalla piastra e poi trasferita al fluido di lavoro nei tubi. Gli FCP, solitamente, sono fissati in copertura o in luoghi colpiti costantemente dalla radiazione solare. Sono orientati verso sud nell'emisfero settentrionale e verso nord nell'emisfero meridionale, in modo che guardino sempre all'equatore, con un angolo d'inclinazione variabile in base alla località. I collettori solari piatti vengono progettati e realizzati in modo tale da avere una vita utile di utilizzo più lunga possibile [3].

#### **4.1.1. Principali vantaggi degli FCP**

La tecnologia riguardante i collettori solari piatti, in particolar modo negli ultimi decenni, ha avuto notevoli progressi. L'aggiunta di rivestimenti selettivi ha diminuito l'emissione degli assorbitori, migliorando le prestazioni ed incrementato l'efficienza della copertura.

Gli FCP rappresentano il 26,4% della tecnologia solare termica globale installata e l'84,9% a livello europeo [12]. Le prestazioni degli FPC possono essere sintetizzate come segue:

- Assenza di emissione di anidride carbonica, ossidi, zolfo, azoto e particolato [11];
- Tecnologia affidabile, collaudata e presente sul mercato internazionale da oltre 20 anni;
- Di semplice installazione in quanto generalmente il sistema va integrato a uno preesistente;

- Risparmio economico per quanto riguarda il consumo di energia elettrica per la produzione di acqua calda sanitaria, per gli elettrodomestici e per il riscaldamento;
- Incremento del valore economico dell'immobile in cui sono installati.

I collettori sono efficienti sia in modalità naturale che in modalità forzata e le proprie prestazioni sono perlopiù influenzate dalla trasmittanza, dall'assorbimento, dalla conduzione dell'energia solare del piatto e dalla conducibilità del fluido di lavoro. Attualmente, si è arrivati ad un buon livello di sviluppo tecnologico, mirando sempre all'ottimizzazione delle tecniche esistenti ed all'introduzione di nuove.

#### 4.1.2. Principali limiti degli FCP

Se da un lato i collettori solari-termici piatti sono di facile realizzazione ed utilizzo, dall'altro presentano aspetti ancora in via di miglioramento. Il principale limite al loro sviluppo è l'elevato costo iniziale dovuto all'approvvigionamento delle materie prime e alla realizzazione delle stesse. Attualmente, come riportato nell'articolo di Al Hoqani, Talal Mohammed, Parimal S. Bhambare e Dinesh K. Kaithari [13], i materiali più utilizzati sono il rame, l'alluminio e l'acciaio, che richiedono una gran quantità di energia derivante dai combustibili fossili in molte delle loro fasi di produzione. Nella *Tabella 1* è riportata l'energia media richiesta sottoforma di calore per la lavorazione di quest'ultime. È evidente come in tal senso i materiali metallici risiedano ai vertici della classifica.

<b>Materiale</b>	<b>Energia richiesta [MJ/kg]</b>
Titanio	560,6
Alluminio	283,8
Rame	130,3
Polistirene a bassa densità	123,2
Polistirene ad alta densità	111,8
Polistirene	74,2
Lana di vetro	28,0
Lastre d'acciaio	27,9
Carta	25,4
Vetro	15,0
Cemento Portland	8,9
Mattone comune	4,1
Calcestruzzo	1,3

Legno	0,00105
-------	---------

*Tabella 1\_Energia media richiesta per la produzione dei principali materiali necessari a produrre FCP [13]*

Inoltre, per soddisfare la domanda energetica richiesta da un edificio, più collettori devono essere collegati in serie richiedendo un investimento iniziale considerevole che viene ammortato anche con diversi anni, quando poi, potrebbe esser necessaria una sostituzione. In Italia, infatti, un impianto a pannelli solari termici, si ammortizza nell'arco di 5/10 anni in base all'ubicazione, all'uso ed alla dimensione ed hanno una durata media di circa 15 anni in quanto la stessa è pregiudicata dagli effetti negativi della radiazione ultravioletta del sole. Inoltre, il fluido vettore che scorre nel circuito del collettore, in caso di utilizzo di antigelo può portare a corrosione o intasamento a causa della sua acidità, alcalinità o durezza, mentre se si utilizza solo acqua, soprattutto in presenza di climi rigidi, può andare incontro al gelo. In fine, la copertura in vetro risulta essere molto delicata e predisposta a fattori come dilatazione termica o grandine ed al deposito di polvere o di umidità tra assorbitore e lo stesso che ne pregiudicano il normale rendimento [3]. Sarebbe quindi opportuno orientarsi verso materiali meno energivori per la produzione dei collettori solari come per esempio il calcestruzzo.

#### **4.2. Collettori solari termici massivi (MSTC)**

Negli ultimi decenni sta prendendo sempre più piede lo studio dei collettori solari termici massivi (Massive Solar-Thermal Collectors, MSTC), strutture massicce ed opache, esposte all'esterno, integrati o meno nell'edificio, che fungono da sistemi solari attivi. Il materiale utilizzato come assorbitore è generalmente il calcestruzzo, in cui vengono annegate le tubazioni in cui scorre il fluido di lavoro. Il principio di utilizzo è simile a quello del riscaldamento a pavimento ma, in questo caso, si estrae calore dal materiale massivo per trasferirlo al fluido di lavoro che scorre nelle tubazioni e viene applicato a strutture verticali e orizzontali integrate, totalmente o parzialmente, e non integrate. Gli MSTC rappresentano un'opportunità per gli scopi energetici dell'edificio in quanto sfruttano la superficie naturalmente esposta alle radiazioni. Ciò è favorito dalle buone proprietà termo-fisiche del calcestruzzo e dalla sua elevata lavorabilità che permette di plasmare il materiale nelle conformazioni desiderate mantenendo le caratteristiche strutturali primarie [14].

Le principali differenze rispetto agli FPC sono l'assenza di un rivestimento esterno in vetro, di uno strato isolante e l'importanza del ruolo della massa termica dell'assorbitore. Sebbene il rendimento dei MSTC sia inferiore rispetto ai collettori tradizionali, sono facilmente integrabili nelle strutture principali dell'edificio ed i materiali utilizzati per la loro costruzione sono più economici, senza contare la manutenzione che risulta sicuramente meno impegnativa. Attualmente i principali campi

d'impiego degli MSTC riguardano il riscaldamento delle piscine. In queste applicazioni, il fluido lavora nel campo della bassa e media temperatura e l'assorbitore è prossimo a quella ambiente [15].

#### **4.2.1. Principali vantaggi degli MSTC**

I principali vantaggi dei MSTC sono i seguenti:

- Alta capacità termica, ovvero il rapporto fra il calore scambiato tra il corpo e l'ambiente e la variazione di temperatura del corpo stesso che ne consegue. Caratteristica per la quale il collettore è capace di accumulare energia termica anche nei periodi di scarsa disponibilità di energia solare;
- Robustezza. Riesce anche a sopportare carichi esterni;
- Può diventare superficie radiante libera ed essere collegato ad altre unità;
- Le tecniche di prefabbricazione del calcestruzzo permettono di utilizzare materiali locali per la realizzazione;
- I costi di realizzazione e di manutenzione sono estremamente inferiori rispetto al collettore solare classico;
- Non necessita di una struttura portante;
- Possono essere costruiti prototipi garantendo comunque alti standard di qualità.

#### **4.2.2. Principali limiti degli MSTC**

Gli MSTC sono ancora oggetto di ricerca e nonostante la potenzialità posseduta da questa tecnologia, non hanno ancora avuto spazio nel mercato globale. Il principale limite di questi collettori è legato al fatto che i sistemi integrati per l'edilizia possono portare a fenomeni di rimozione di calore e quindi perdite di calore attraverso l'involucro edilizio, nonché creazione di condensa su superfici interne ed esterne. Ricerche recenti stanno cercando di affrontare queste tematiche, cercando soluzioni. In particolare, si sta focalizzando l'attenzione sull'ottimizzazione dei materiali e della geometria dei collettori [12].

#### **4.2.3. Campi d'applicazione degli MSTC**

I campi di applicazione degli MSTC sono molteplici. Grazie alle tecnologie sviluppate nella lavorazione del calcestruzzo, è stato possibile studiare e realizzare differenti tipologie di collettori che possono essere indipendenti dalla costruzione o integrati nell'edificio. Inoltre, per migliorare la loro esposizione ed essere applicati in modo da ottenere il massimo rendimento, possono essere posizionati orizzontalmente, verticalmente ed anche inclinati. In letteratura sono presenti svariati

lavori che descrivono le caratteristiche e i risultati ottenuti da ogni prototipo, che possiamo suddividere in tre principali macro-famiglie:

- MSTC indipendenti

Fanno parte di questa categoria tutti i collettori separati fisicamente dall'involucro edilizio, aventi cioè un livello minimo di integrazione.

- MSTC parzialmente integrato nella costruzione

Fanno parte di questa categoria i collettori che possono essere applicati all'involucro edilizio senza però essere inglobati in esso.

- MSTC integrato nella costruzione

Fanno parte di questa categoria i collettori inglobati nell'involucro edilizio. I collettori solari in calcestruzzo, in tal senso, si prestano a molteplici applicazioni.

Va sottolineato che, con l'aumentare del grado di integrazione dei collettori solari termici massivi con l'edificio, occorre prendere precauzioni riguardo le perdite di calore di quest'ultimo e procedere ad un'analisi completa del comfort termico [14].

#### **4.2.4. Principali materiali utilizzati negli MSTC**

Come affermato nei precedenti paragrafi, i materiali utilizzati per la realizzazione dei Collettori Solari-Termici Massivi possono essere molteplici. In linea generale, indipendentemente dal campo di applicazione, un MSTC è composto da un materiale assorbente, principalmente il calcestruzzo, in cui viene inglobata la tubazione, che può essere in materiale metallico o plastico, la quale trasporta il fluido di lavoro, solitamente acqua. Nei successivi paragrafi si andranno ad analizzare i principali materiali utilizzati per i vari componenti e le loro caratteristiche.

##### **4.2.4.1. Materiale assorbitore**

Il materiale assorbente ideale dovrebbe essere facilmente plasmabile, resistente e stabile alle alte temperature e alle lunghe esposizioni alle radiazioni ultraviolette. Inoltre, dovrebbe essere un materiale leggero, non poroso e non corrosivo. La differenza fondamentale tra i collettori solari tradizionali e gli MSTC sta nel comportamento termico dell'assorbitore. Se i primi hanno una conducibilità termica superiore, i secondi sono in grado di accumulare maggior calore. La velocità di conduzione del calore dipende direttamente dalla diffusività termica di un materiale:

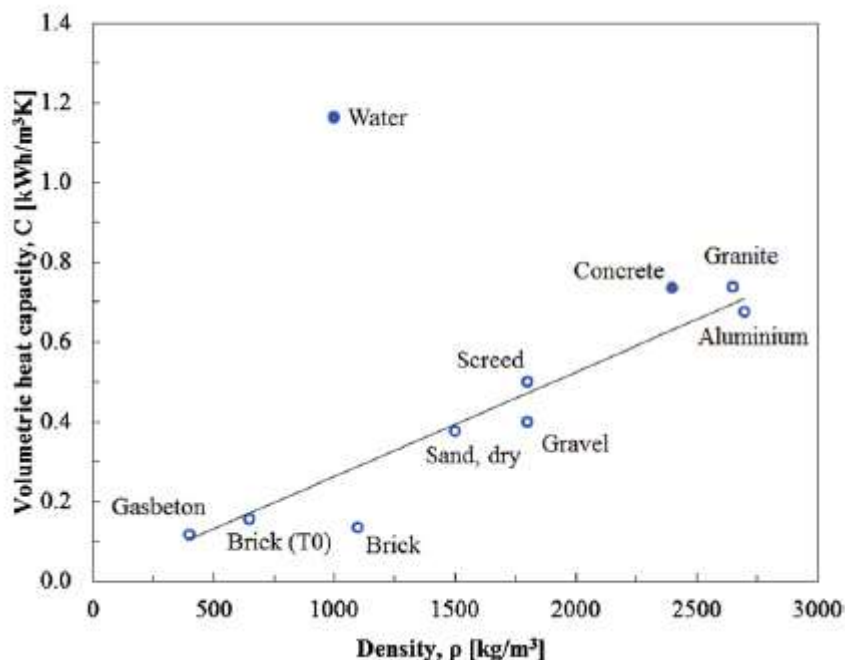
$$\alpha = \lambda / \rho c$$

dunque, le sostanze con elevata diffusività termica regolano rapidamente la loro temperatura con quella dell'ambiente circostante, perché conducono il calore rapidamente rispetto alla loro capacità termica volumetrica, come dimostrato dalla legge di Fourier:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \nabla^2 T$$

L'ordine di grandezza della densità dei materiali massivi varia tra 400 e 2800 kg/m<sup>3</sup> a seconda della quantità di vuoti in essi presenti, la conducibilità termica è generalmente superiore a 1,0 W/mK e la capacità termica specifica  $c_p$  non differisce significativamente da un materiale da costruzione all'altro e di solito è di circa 1,0 kJ/ (kg K).

I materiali massivi hanno un importante potenziale di raccolta dell'energia solare, grazie alla loro elevata capacità e conducibilità termica e all'elevato calore specifico, che permette loro di immagazzinare la più alta frazione di radiazione solare. Per comprendere e confrontare correttamente la capacità di stoccaggio di diversi materiali, un parametro particolarmente importante è la capacità termica volumetrica  $C$ . Come si può riscontrare dalla *Figura 5* con 0,66 kWh/(m<sup>3</sup>K), il calcestruzzo possiede un alto valore di capacità termica volumetrica, risultando un materiale ampiamente sfruttabile per le applicazioni solari in cui è importante l'immagazzinamento di energia solare [14].



*Figura 5* Capacità termica volumetrica  $C$  in funzione della densità  $\rho$  per i più comuni materiali da costruzione [14]

In fine, per ottenere prestazioni ottimali, oltre ad un'elevata conducibilità termica, un buon assorbitore dovrebbe avere una bassa emissione termica, motivo per il quale risulta utile applicare rivestimenti selettivi spettralmente [12].

#### **4.2.4.2. Fluido di lavoro**

Il fluido di lavoro, o termovettore, è una sostanza allo stato liquido, o in alcuni casi allo stato gassoso, che assolve al compito di trasportare il calore accumulato, all'interno dell'impianto solare termico. Viene utilizzata direttamente acqua o miscele di quest'ultima con glicole, composto chimico incolore ed inodore che viene utilizzato come antigelo ed antiruggine all'interno del circuito [16].

I principali requisiti che dovrebbero soddisfare i fluidi termovettori sono:

- Resistenza fino alle massime temperature di stagnazione, ovvero quando l'impianto è in sovrapproduzione, per esempio per inutilizzo per un periodo di tempo, e si raggiungono temperature molto elevate, intorno ai 200°C. In un contesto simile il fluido può acidificare e dare origine a fenomeni corrosivi nei confronti del circuito di distribuzione [17];
- Garantire una protezione antigelo e anticorrosione;
- Non essere tossico;
- Non essere eccessivamente viscoso per non sovraccaricare le pompe che azionano il movimento dell'acqua nel circuito;
- Deve essere facilmente reperibile sul mercato ed avere un costo ridotto.

Nel caso di miscele con glicole i requisiti sopra indicati vengono adeguatamente soddisfatti con una percentuale di circa il 40 %, tale da non renderla troppo viscosa [16].

#### **4.2.4.3. Rete di trasferimento del calore**

Per rete di trasferimento di calore si intende l'insieme di tubazioni e di canali tramite i quali avviene il passaggio del fluido di lavoro, siano essi all'interno del collettore stesso o all'esterno per l'accumulo verso il serbatoio o la distribuzione alle utenze. Il diametro interno del circuito dipende dalla portata e dalla dimensione del sistema. Per quanto riguarda i materiali invece possono essere utilizzati il rame, l'acciaio inossidabile o i multistrati:

- Le tubazioni in acciaio presentano una superficie corrugata e sono soggetti a perdite di carico maggiori;
- Le tubazioni in rame sono resistenti agli urti e possono essere lavorate con facilità. Sono inoltre durature e saldabili e ciò vuol dire che sono facilmente riparabili;

- Le tubazioni in multistrato sono robuste e resistenti al calore e alla pressione d'esercizio e possono facilmente essere curvate manualmente.

Senza dubbio un circuito in rame possiede caratteristiche fisiche e meccaniche decisamente migliori. Non è tossico, non assorbe sostanze nocive ed è riciclabile anche se rispetto agli altri materiali risulta essere decisamente il più costoso. Il materiale più idoneo da utilizzare dipende ovviamente dalle applicazioni e da variabili ambientali quali l'esposizione, la posizione geografica ed il clima presente.

## 5. MSTC - Analisi della letteratura

Nell'arco degli anni sono stati prodotti diversi articoli riguardanti prototipi e sperimentazioni nell'ambito dei collettori solari-termici massivi. Gli articoli selezionati sono stati di fondamentale importanza per meglio capire e assimilare nozioni importanti per la comprensione del tema trattato. A partire dall'anno 2000 ai giorni d'oggi sono stati raccolti i risultati di svariate campagne sperimentali dislocate in tutto il mondo. È di seguito riportata l'analisi della letteratura.

### 5.1. Principali prototipi realizzati e casi di studio effettuati

L'analisi della letteratura fornisce una panoramica di ciò che è stato detto, analizzato, studiato e realizzato negli ultimi anni. È la somma di tutte le informazioni raccolte dai principali autori dei nostri giorni.

Al Hoqani, Talal Mohammed, Parimal S. Bhambare e Dinesh K. Kaithari [13], studiano gli effetti della realizzazione di un collettore a piastre piane con assorbitore in cemento fibrorinforzato (*Figura 6*). La conducibilità termica del calcestruzzo è nettamente inferiore rispetto ai metalli. L'aggiunta di fibre metalliche, scarto di lavorazione degli stessi, oltre ad avere un effetto positivo su quest'ultima, migliora anche le prestazioni di resistenza. Nello specifico è stato utilizzato l'acciaio, l'alluminio ed il rame. Inoltre, sono state fatte delle valutazioni riguardanti gli effetti dei parametri di progetto del collettore in calcestruzzo fibrorinforzato. In quest'analisi sono state effettuate diverse ipotesi:

- Lo spessore della piastra influisce sulle prestazioni del collettore. Infatti, all'aumentare di quest'ultimo, il fattore di efficienza e della velocità di rimozione del calore aumentano e tendono a diventare costanti con lo spessore della piastra di 0,04 m.
- A mano a mano che lo spazio tra le tubazioni aumenta, considerati costanti il diametro, il coefficiente di scambio termico complessivo e la portata del fluido, i valori di rimozione del calore diminuiscono qualsiasi sia lo spessore della piastra.
- Considerati costanti lo spazio fra i tubi, il loro diametro ed il coefficiente di scambio termico, con l'aumento della portata massica aumenta il fattore di riduzione del calore per tutto lo spessore della piastra a causa dell'aumento del coefficiente di scambio termico convettivo all'interno del tubo. Questo fattore diminuisce la temperatura superficiale del collettore diminuendo la perdita di calore dalla superficie all'ambiente circostante.
- Considerati costanti lo spessore della piastra, la distanza tra i tubi ed il loro diametro, con l'aumentare del coefficiente di scambio termico diminuisce il fattore di rimozione del calore per tutte le portate di acqua.

Gli autori concludono affermando che le prestazioni dei collettori fibrorinforzati sono paragonabili ai sistemi tradizionali, ovvero ai collettori solari a piastre metalliche, garantendo acqua calda alla temperatura di circa 50-60 °C con un'efficienza media giornaliera del 55-65% e per di più, grazie all'elevato ritardo termico, il collettore sarebbe in grado di fornire acqua calda anche dopo il tramonto. Questa tipologia di collettori, integrati nella copertura, potrebbe offrire un buon sistema passivo di riscaldamento solare dell'acqua.

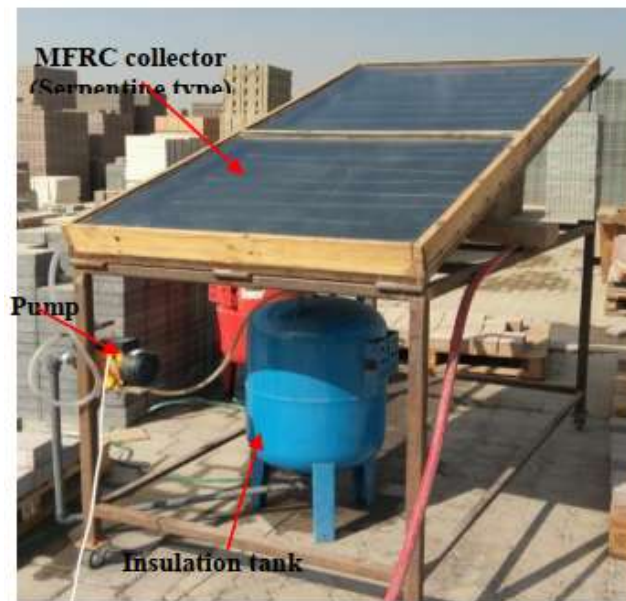
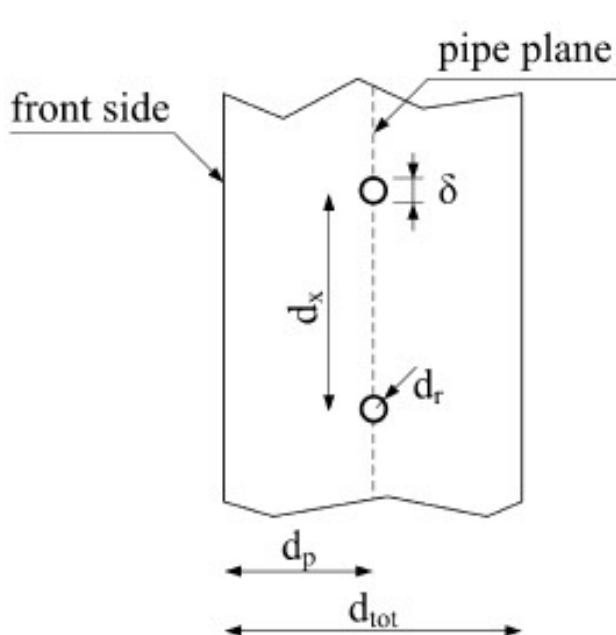


Figura 6 \_ Collettore in calcestruzzo fibrorinforzato [13]

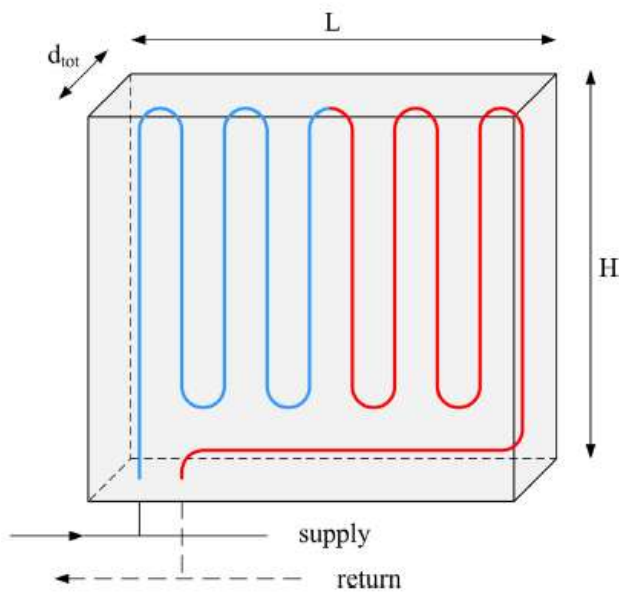
D'Antoni, Matteo, e O. Saro [15], sviluppano un modello di progettazione numerica (Figure 7 e 8), con il software di simulazione Trnsys, per indagare sul potenziale energetico di un collettore solare



in calcestruzzo (CSC) nelle diverse condizioni climatiche europee, nello specifico nelle città di Stoccolma, Stoccarda e Atene. In questo caso il CSC viene concepito come un elemento strutturale che utilizza simultaneamente uno scambiatore di calore ed una serpentina inglobata nella matrice massiccia di calcestruzzo. Nello specifico, la simulazione, prevede che sia installato verticalmente e distaccato dalle strutture dell'edificio, svolgendo la funzione di recinzione da cortile, in modo tale da godere di doppia esposizione alle radiazioni solari. La superficie d'assorbimento è di 6,096 m<sup>2</sup> e lo spessore di

Figura 7 \_ Progetto del Collettore solare in calcestruzzo (CSC) [15]

0,127 m. La bobina al suo interno è in polietilene rinforzato, materiale in grado di gestire eventuali



**Figura 8** Schema idraulico del collettore [15]

dilatazioni e contrazioni del calcestruzzo dovute alle variazioni di temperatura date dal funzionamento del collettore. Il diametro esterno della serpentina è di 25,4 mm, lo spessore è di 2,8 mm e la profondità di applicazione di 63,5 mm. Il fluido di lavoro utilizzato è una miscela di acqua e brina in modo tale che possa resistere a temperature prossime agli 0°C. In fine, non sono stati previsti trattamenti superficiali dell'assorbitore per cui il coefficiente di assorbimento e di emissività sono tipici del calcestruzzo. Alla luce della conformazione del

CSC, gli autori hanno implementato un calcolo dettagliato dei metodi di trasferimento del calore radiativo e convettivo, e della raccolta del calore attraverso il fluido di lavoro. Nella simulazione sono state delineate la temperatura d'ingresso del liquido e la portata massica, trascurando il layout del collettore e i carichi energetici degli edifici. Si è rivelato che, per tutti i climi, il contributo delle fonti energetiche ambientali è pressoché costante, con la radiazione solare che incide per il 62% e la temperatura ambiente per il 25%, mentre i guadagni latenti e radiativi variano dal 5% al 7%. In fine, gli autori sottolineano che i costi d'investimento relativi alla produzione di CSC ammonta a 0,040-0,058 €/kWh.

Patil, Sangram R., Rahul Lodha, e A. A. Keste. [18] hanno condotto uno studio volto ad accertare la fattibilità dell'utilizzo del calcestruzzo come assorbitore di un collettore solare per l'immagazzinamento di acqua calda. Quest'ultimo è stato progettato, fabbricato e testato a Pune, in India (Figura 9). Lo scopo è verificare la possibilità di utilizzare collettori in calcestruzzo, in quanto materiale da costruzione a basso costo, integrandoli direttamente negli elementi edilizi, come ad esempio in copertura o nelle pareti esterne. La dimensione della superficie assorbente del prototipo è di 2,00 m<sup>2</sup>, per uno spessore di 0,03 m, all'interno del quale è stata inglobata una serpentina del diametro di 0,008 m in rame, resistente alla corrosione di una vasta gamma di pH quando viene a contatto con acqua e sali neutri. Le prove sono state condotte sia nella stagione invernale che in quella estiva e per diverse portate (da 20 a 45 litri/ ora). Tramite il pirometro, opportunamente posizionato e livellato con la superficie assorbente, sono stati raccolti dati riguardanti temperatura ambiente e radiazione ad ogni ora e con l'ausilio di indicatori di temperatura digitali e termocoppie è stata registrata quella dell'acqua in ingresso ed uscita. La temperatura media di quest'ultima è risultata

essere di 58°C. L'efficienza complessiva media del collettore di calcestruzzo è risultata essere del 34% e la sua efficienza ottica del 42,75%. Il coefficiente complessivo di perdita di calore del collettore di calcestruzzo è risultato essere 11,2 W/m<sup>2</sup>K.

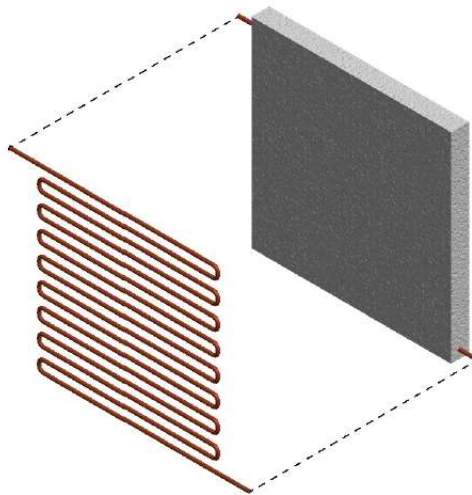


*Figura 9\_Collettore solare in calcestruzzo [18]*

Nella simulazione effettuata da O'Hegarty Richard, Oliver Kinnane, e Sarah McCormack [19] vengono esaminati i parametri maggiormente influenti dei collettori solari in calcestruzzo adibiti alla produzione di acqua calda sanitaria domestica. In questo articolo si afferma che le prestazioni sono influenzate non solo da fattori esterni ma anche dalla matrice di calcestruzzo, dalla rete di tubazioni e dal fluido di lavoro. Il collettore solare in calcestruzzo viene simulato utilizzando un modello numerico con condizioni al contorno in stato stazionario, in cui i parametri sono scelti tra una gamma realistica di valori e la loro influenza sulle prestazioni è valutata in termini di differenza di temperatura tra il fluido in ingresso e quello in uscita. La superficie considerata, non smaltata, è di 0,81 m<sup>2</sup> e la tubazione, la cui configurazione è a serpentina, è completamente inglobata nella matrice di calcestruzzo ad una profondità di 0,025 m (*Figura 10*). La temperatura superficiale utilizzata per simulare condizioni estive a cielo sereno è di 40°C mentre quella del fluido in ingresso è di 10°C. Da questo studio sulla differenza tra la temperatura in uscita e quella in ingresso si riscontra che:

- La conducibilità termica del calcestruzzo incide positivamente sulla differenza di temperatura, con un incremento particolarmente significativo a valori più bassi di conducibilità;
- La conducibilità termica del materiale utilizzato per le tubazioni non ha particolare rilevanza sulla differenza di temperatura;
- Il diametro del tubo è un parametro trascurabile;

- La profondità di inserimento delle tubazioni è un parametro fortemente influente. Maggiore è la profondità, minore è la differenza di temperatura. Ne consegue che il piano di posa migliore è quello più vicino possibile alla superficie in accordo con le modalità di costruzione e di integrazione del collettore con l'edificio;
- La distanza tra i tubi aumenta la superficie dello scambio di calore. La distanza tra le tubazioni e l'aumento della temperatura è inversamente proporzionale. Tuttavia, questo parametro è spesso dettato dalla tipologia di materiale e dal layout utilizzato;
- La portata massica del collettore può essere facilmente regolata al momento della costruzione del collettore stesso. È importante però sottolineare che all'aumentare della portata massica vi è una diminuzione della temperatura in uscita derivante dall'elevata capacità termica dell'assorbitore, motivo per il quale il trasferimento di calore verso la tubazione è più lenta.



*Figura 10*\_Schema della disposizione della serpentina all'interno del collettore in calcestruzzo [19]

Sable Ajinkya [20] propone uno studio su un progetto di una piastra piana in calcestruzzo per la fabbricazione di uno scaldacqua solare, da integrare successivamente alla copertura di un edificio, zona che gode della massima esposizione e di una grande superficie, limitandovi carichi extra (*Figura 11*). Il progetto vede una serpentina di rame dotata di fossette come da *Figura 12*, parzialmente inglobata per il 50% nella piastra di calcestruzzo della superficie di 2,00 m<sup>2</sup> e dello spessore di 3,5 cm. L'involucro di compensato di legno, profondo 0,10 m e coperto con un foglio di alluminio di 0,3 mm di spessore, è dotato di copertura in vetro ed è inclinato secondo la latitudine del luogo, in questo caso l'India, di 19°. Inoltre, la superficie superiore della piastra assorbente è verniciata di nero per aumentare l'assorbimento del calcestruzzo da 0,65 a 0,95. L'acqua che viene riscaldata viene successivamente stoccata in un serbatoio da 150 l. L'autrice, inoltre, specifica che la lastra è stata fabbricata utilizzando circa 25 kg di cemento, 5 kg di sabbia, 100 kg di aggregati e 7 kg di fibre di

acciaio dolce per aumentare la conducibilità termica del calcestruzzo. La campagna sperimentale è stata effettuata nei mesi di settembre, gennaio ed aprile per 5 diverse portate, ovvero 20 l/h, 25 l/h, 30 l/h, 35 l/h e 40 l/h, facendo scorrere l'acqua all'interno della serpentina dalle 11:00 a.m. alle 4:00 p.m., cioè per 5 h al giorno. I risultati riscontrati sono stati i seguenti:

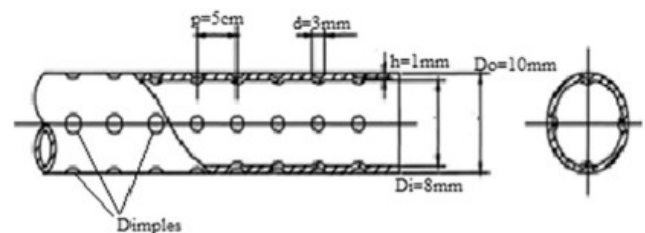
- La temperatura dell'acqua in uscita è superiore a quella in ingresso;
- Grazie alle proprietà del calcestruzzo di accumulare calore, il collettore continua a fornire acqua calda anche a bassa radiazione solare con minime fluttuazioni sulla temperatura in uscita;
- Maggiore è la temperatura dell'acqua in entrata minore è il calore utile ottenuto.

Inoltre, si riscontra che la temperatura media ottenuta per tutte le portate e per ciascuna stagione è superiore a 50°C. La quantità di acqua calda raccolta aumenta di 25 l aumentando la portata di 5 l/h a discapito della temperatura in uscita che risulta inferiore di 3,5°C. Si possono, inoltre, variare le portate a seconda delle temperature ambiente e delle stagioni per stoccare la quantità di acqua calda necessaria. Per quanto riguarda le fossette invece, sono stati confrontati due collettori di identica fattura, testati simultaneamente per tutte le portate ad intervalli di registrazione dei dati di 15 minuti. In questo caso si è riscontrato che:

- La maggior parte delle prove mostra un aumento della temperatura in uscita nel collettore la cui serpentina è dotata di fossette;
- Si riscontra una maggiore influenza delle fossette a portate superiori in quanto la turbolenza provocata dalle stesse porta ad una maggiore velocità nel trasferimento di calore.



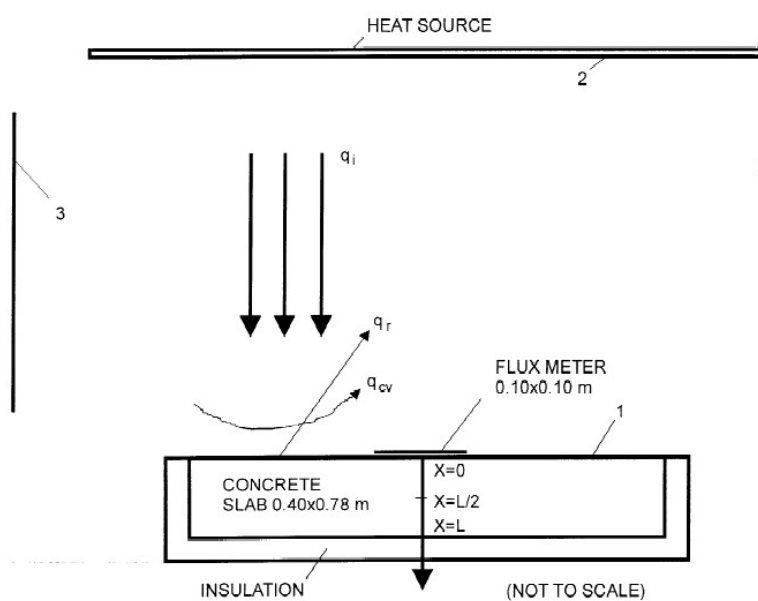
**Figura 11** \_Scalda acqua solare con collettore in calcestruzzo [20]



**Figura 12** \_Fossette serpentina in rame [20]

Bilgen, E. e M-A. Richard [21] hanno condotto uno studio sperimentale sulla convezione naturale, la radiazione e la conduzione del calore di una lastra di cemento orizzontale, non verniciata, delle dimensioni L: 0,40 m per H: 0,78 m e dello spessore S: 0,10 m. Le caratteristiche termo-fisiche utilizzate sono state le seguenti: densità  $\rho = 2300,0 \text{ kg/m}^3$ , capacità termica  $c_p = 880 \text{ J/kgK}$ ,

conducibilità termica  $k = 1,4 \text{ W/mK}$  e emissività  $\varepsilon = 0,88$ . Successivamente la lastra è stata isolata con sottostrati di polistirene di  $0,05 \text{ m}$  e poggiata su uno strato di polistirolo di  $0,05 \text{ m}$ . Le termocoppie, composte da fili in costantana (lega binaria di rame al 60% e nichel al 40%) del diametro di  $1,27 \times 10^{-3} \text{ m}$ , sono state fissate al centro geometrico della lastra e su tre livelli quali la superficie ( $x = 0$ ), il centro ( $x = L/2$ ) e sul fondo ( $x = L$ ). Dopo aver forato la lastra, quest'ultime sono state fissate ad essa tramite resina epossidica, successivamente ricoperta con cemento. La temperatura ambiente è stata misurata tramite termocoppia mentre il flusso di calore convettivo sulla superficie è stato misurato tramite flussometro di  $0,1 \times 0,1 \times 10^{-4} \text{ m}$ , con una risoluzione di  $\pm 1 \text{ W/m}^2$ , realizzato in rame con emissività  $\varepsilon = 0,05$ . Come fonte di calore è stato utilizzato un sistema di 25 lampade alogene da  $75 \text{ W}$ , installate in modo sfalsato nella superficie di  $1 \text{ m}^2$  in quanto la radiazione prodotta da quest'ultime ha una distribuzione spettrale simile alla radiazione solare nella gamma di lunghezze d'onda di  $0,20\text{-}2,7 \text{ }\mu\text{m}$ . Le misurazioni del flusso di calore sono state effettuate sulla superficie ricevente posta a  $1,0 \text{ m}$  e utilizzando una maglia di  $0,1 \text{ m}$  per  $0,1 \text{ m}$ . L'esperimento è stato effettuato in laboratorio con cicli di riscaldamento/raffreddamento di  $12\text{h}$ . L'obiettivo di Bilgen, E. e M-A. Richard è stato quello di ottenere ed esaminare le temperature transitorie nei punti indicati nella *Figura 13* ed il flusso di calore dalla superficie della lastra durante il periodo di raffreddamento, in funzione del flusso termico incidente e della temperatura ambiente. Si è riscontrato che il trasferimento di calore è irregolare su una grande superficie e risulta inferiore dal centro del collettore. Inoltre, l'energia incidente non è un parametro che influenza fortemente l'assorbimento di calore. Le perdite di calore per radiazione sono state del 60% e quelle per convezione naturale del 40%. Si può



**Figura 13** Schema apparato di prova e punti di controllo [21]

riscontrare infine che la miglior condizione di conservazione e restituzione di calore è avvenuta nelle prime 4 h dall'avvio delle varie prove. Si può migliorare la prestazione del collettore, sia in termini di accumulo di energia che di prestazioni termiche, andando a ottimizzare i vari parametri come, per esempio, lo spessore della lastra di calcestruzzo.

Benkaddour Ayman, Mustapha Faraji e Hamza Faraji [22] presentano un sistema di stoccaggio

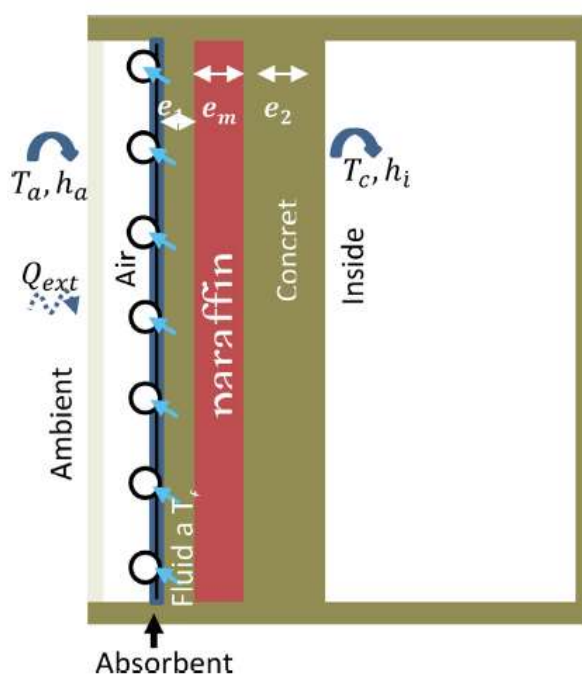


Figura 14 \_Stratigrafia del modello oggetto di studio [22]

dell'acqua calda composto da una parete composta PCM/calcestruzzo in tre strati, come si evince dalla *Figura 14*. Lo strato intermedio è costituito da cera di paraffina dello spessore di 2,00 cm su una parete dalla larghezza totale di 20,00 cm, con la parete esterna direttamente accoppiata con l'assorbitore. È presente anche la copertura in vetro. Il sistema utilizza la radiazione solare incidente e la convezione dell'aria esterna. Il calore trasmesso provoca un aumento della temperatura fino alla fusione dello strato di paraffina che immagazzina energia termica sottoforma di calore latente. Sono stati utilizzati i dati metereologici della città di Casabianca in Marocco e sono state eseguite

simulazioni parametriche delle prestazioni termiche della parete tramite modello matematico per studiare gli effetti della posizione dello strato di PCM e le conseguenze sull'accumulo di calore latente. Per lo sviluppo del modello sono state necessarie eseguire le seguenti ipotesi:

- Le proprietà termofisiche sono costanti. Si presume che densità, capacità e conducibilità termica siano costanti ed indipendenti dalla temperatura;
- Confini orizzontali tra strati adiabatici;
- Il flusso indotto nel PCM è trascurabile.

Considerando un flusso costante a bassa velocità e con dissipazione viscosa trascurabile, gli autori hanno potuto riscrivere la seguente equazione dell'energia:

$$\nabla \left( \frac{k}{\rho c_p} \nabla h(t) \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \lambda \Delta h_f \frac{\partial f}{\partial t}$$

Risolvendo tale equazione con il metodo del volume finito e considerando tre diverse posizioni nello strato di muro, ovvero a 2, 4 e 6 cm di profondità dall'interfaccia esterna, si riscontra che più spostiamo la paraffina verso l'interno minore sarà l'accumulo di calore latente, causato dalla resistenza termica delle pareti di calcestruzzo.

Sarachitti, R., Chotetanorm, C., Lertsatitthanakorn, C., e Rungsiyopas, M. [23] esaminano le

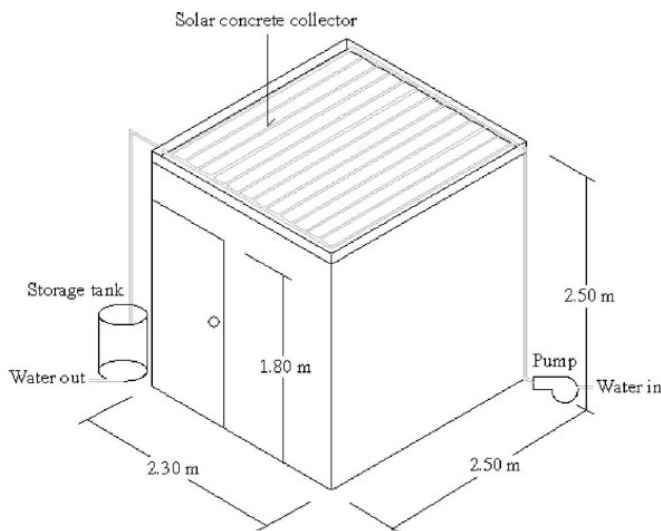


Figura 15\_ Dimensione sala di prova collettore integrato in copertura [23]

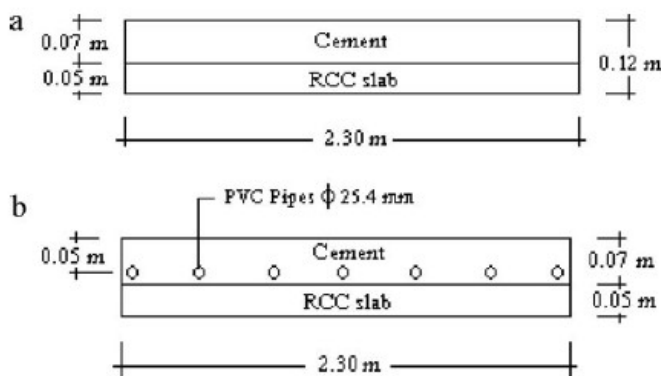


Figura 16\_ Stratigrafia della copertura delle due sale di prova [23]

prestazioni termiche di un collettore in calcestruzzo integrato nella copertura di un'abitazione. Sono state costruite due sale di prova separate, senza finestre e dotate soltanto di una porta di 0,70 x 1,80 m: sulla prima è stato applicato il collettore e sull'altra una semplice copertura in calcestruzzo, le cui dimensioni sono riportate nelle *Figure 15 e 16*. Le pareti sono state costruite con due lamiere di amianto divise da uno strato di schiuma

(dimensioni 0,004 m, 0,025 m e 0,004 m) e le superfici esterne sono state verniciate di bianco. Lo scopo è quello di valutare la riduzione del trasferimento per conduzione nell'edificio tramite il collettore e conseguentemente produrre acqua calda. Quest'ultimo è composto da uno stato di cemento dello spessore di 0,07 m, al cui interno sono predisposte dieci tubazioni in PVC distanti l'una dall'altra 0,10 m, e uno

strato di cemento armato dello spessore di 0,05 m. È stata utilizzata inoltre una pompa per portare l'acqua al collettore e un serbatoio di 0,1 m<sup>3</sup> per immagazzinarla. Le termocoppie di tipo T sono state posizionate al centro delle superfici interne ed esterne delle coperture, all'ingresso e all'uscita delle tubazioni ed al centro di ogni stanza di prova, rispettivamente a 0,10m, 1,25 m e 2,20m. In fine, è stato utilizzato un piranometro per misurare la radiazione solare incidente e le misurazioni sono state registrate ogni 10 minuti, dalle 9 alle 16, durante 30 giorni estivi e 30 invernali in Thailandia. Le indagini sperimentali rivelano vantaggi sia dal punto di vista tecnico che economico. Il collettore solare riesce a ridurre significativamente l'aumento di calore all'interno della stanza di prova. Ciò è dimostrato dal fatto che la temperatura ambiente massima è inferiore di 2,3 °C rispetto alla stanza convenzionale e che la temperatura dell'acqua in uscita dal collettore arriva a raggiungere i 45°C due volte al giorno. Ciò ha un notevole impatto sia sulla necessità di raffrescare meccanicamente il clima interno con l'azionamento dei condizionatori che su quella di azionare la caldaia per la produzione di acqua calda, il che si traduce in un forte risparmio di energia elettrica. In fine, il ritorno economico,

mantenendo la temperatura interna a 26°C, è stimato di 2,54 anni secondo i tassi delle banche thailandesi. Questo risulta quindi essere un approccio vantaggioso a livello economico ed ambientale.

Krishnavel, V., Karthick, A. e Murugavel, K. K. [24] presentano uno studio eseguito in seguito alla



realizzazione di tre collettori solari con assorbitore in calcestruzzo con caratteristiche differenti nel National Engineering College, Kovilpatti, Tamil Nadu, India (Figura 17). Con le dimensioni comuni di L: 1,75 m, H: 1,28 m e S: 0,10 m, il primo ed il secondo collettore sono stati realizzati aggiungendo alla matrice cementizia una

**Figura 17** Collettori solari in calcestruzzo: Slab1 materiale conduttivo e tubi in alluminio, Slab2 materiale conduttivo e tubi in PVC e Slab3 materiale non conduttivo e tubi in PVC [24]

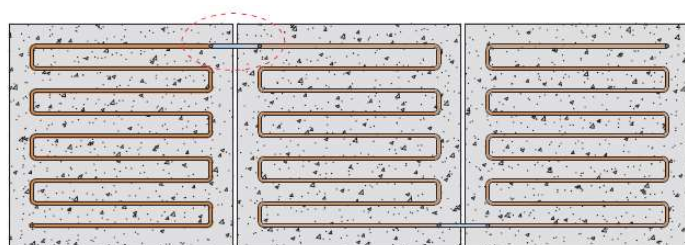
rete metallica di alluminio e fibre di ferro, mentre per il terzo sono stati utilizzati semplicemente materiali convenzionali. Per quanto riguarda le tubazioni invece sono state utilizzate per il primo quelle in alluminio e per gli altri due collettori quelli in PVC. Tutte e tre le tipologie sono collegate superiormente ed inferiormente dalle tubazioni di testata in modo tale da distribuire uniformemente il flusso del fluido. Da quello inferiore, l'acqua viene introdotta nel collettore dal serbatoio di stoccaggio, opportunamente isolato, della capacità di 60 l, mentre quello superiore è collegato all'ingresso del serbatoio e le valvole di controllo sono utilizzate per la regolazione del flusso e della circolazione dell'acqua calda nel collettore stesso. Ogni lastra è stata posizionata su di una struttura in acciaio disposta secondo l'angolo d'inclinazione solare e le superfici sono state verniciate di nero per aumentare l'assorbimento. Le termocoppie di tipo K sono state predisposte per misurare la temperatura d'ingresso e di uscita dell'acqua e quella della piastra di assorbimento. In fine sono stati installati un piranometro di tipo fotovoltaico per la misura della radiazione globale ed un flussimetro con cronometro per misurare il flusso d'acqua calda. Le prove sono state condotte nel periodo da marzo a maggio e le letture sono state effettuate dalle 10:00 alle 17:00 con intervalli di 60 minuti su tutti i collettori simultaneamente, mantenendo il flusso di acqua calda in ingresso a 0,02 kg/s durante tutto il periodo dell'esperimento. Sono stati inoltre raccolti dati per tre diverse inclinazioni dei collettori, ovvero posizione orizzontale ed inclinazione di 18° e 30° verso sud. Dalla campagna sperimentale è emerso che, in posizione orizzontale, il collettore 1 è quello in cui si registra la temperatura più alta dell'acqua, 62°C, oltre che la massima efficienza pari al 65%, mentre nel collettore 3 si registra la temperatura più bassa 53°C. In tutti e tre i collettori, ad ogni modo, l'acqua raggiunge la temperatura di picco intorno alle ore 13:30. Aumentando l'inclinazione del collettore si nota una diminuzione della prestazione dello stesso. Il caso peggiore è riportato dal collettore 3 che

ha un'efficienza pari soli al 30%. Gli autori concludono che per uso residenziale il collettore 2 è quello più economico ed in grado di fornire acqua calda a temperatura moderata per sopperire alle esigenze domestiche.

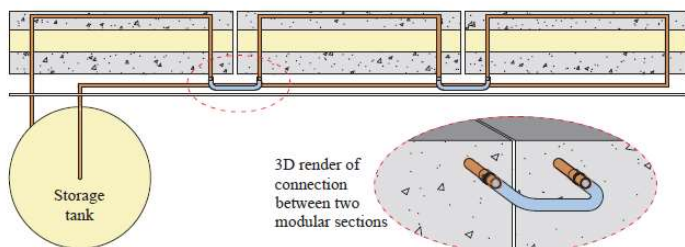
O'Hegarty R., Kinnane O. e McCormack S. J. [25] hanno condotto un'indagine sperimentale volta a



**Figura 18**\_Collettore Solare in Calcestruzzo costituito da tre moduli collegati in serie [25]



Elevation of the pipe network of a modular concrete solar collector system



**Figura 19**\_Schema di collegamento collettori [25]

studiare le prestazioni di un Collettore Solare in Calcestruzzo (CSC) integrato nella facciata di un edificio (*Figura 18*). Il prototipo realizzato prevede tre collettori da  $0,36 \text{ m}^2$  (L:  $0,60 \times$  H:  $0,60\text{m}$ ), collegati in serie, come da *Figura 19*, per costituire un'area totale di circa  $1,00 \text{ m}^2$  di superficie di raccolta e connessi ad un serbatoio di 100 l, riempito con 65 l di acqua potabile per consentire eventuali fuoriuscite da accumulo di pressione nel circuito. Il sistema è posizionato ad un'altezza superiore rispetto al serbatoio per permettere all'acqua di defluirvi anche senza l'utilizzo della pompa e di un agente antigelo. Gli strumenti di controllo utilizzati sono delle termocoppie di tipo K per rilevare l'andamento della temperatura nel collettore, un piranometro, per misurare

l'irradianza solare e un anemometro per misurare la velocità del vento. Per permettere al fluido di muoversi nel circuito è stata installata una pompa e per consentire di incrementare le portate è stato installato un bypass con valvola a saracinesca regolabile manualmente. La portata all'interno del circuito è impostata a  $0,02 \text{ kg/s}$  e viene misurata tramite un misuratore magnetico. Per la configurazione delle tubature a serpentina, infatti, è consigliabile impostare bassi valori causa della resistenza idraulica. L'allestimento sperimentale è stato progettato per simulare una facciata esposta a sud in un clima europeo di media latitudine come Dublino. Inoltre, è stato sviluppato un modello matematico utilizzato per ampliare lo studio a diversi collettori e a climi differenti. Gli autori affermano che il circuito confezionato per lo studio sperimentale è in grado di fornire un quarto del fabbisogno di acqua calda di una singola abitazione raggiungendo i massimi rendimenti energetici in primavera ed in autunno. I risultati sono espressi in funzione alla produzione di energia e alla frazione

solare e dal modello matematico si evince che per una giornata primaverile limpida, a Dublino si registra una frazione solare pari al 37.8% che può arrivare fino al 44.4% aumentando la superficie del collettore da 1,00 a 2,00 m<sup>2</sup>. La lunghezza del tubo non è un fattore rilevante e la superficie di riferimento è verniciata di nero. Per lo stesso collettore senza rivestimento il valore di frazione solare si riduce al 29.8%. Per quanto riguarda la portata, per valori ridotti, si ottiene un aumento della temperatura in uscita ma una diminuzione di quella del serbatoio. In conclusione, questo studio, dimostra che la produzione di energia è sufficiente per tutto l'anno e non solo in estate.

Patil S. R., Keste A. A. e Sable, A. B. [26] progettano un collettore solare in calcestruzzo (*Figura*



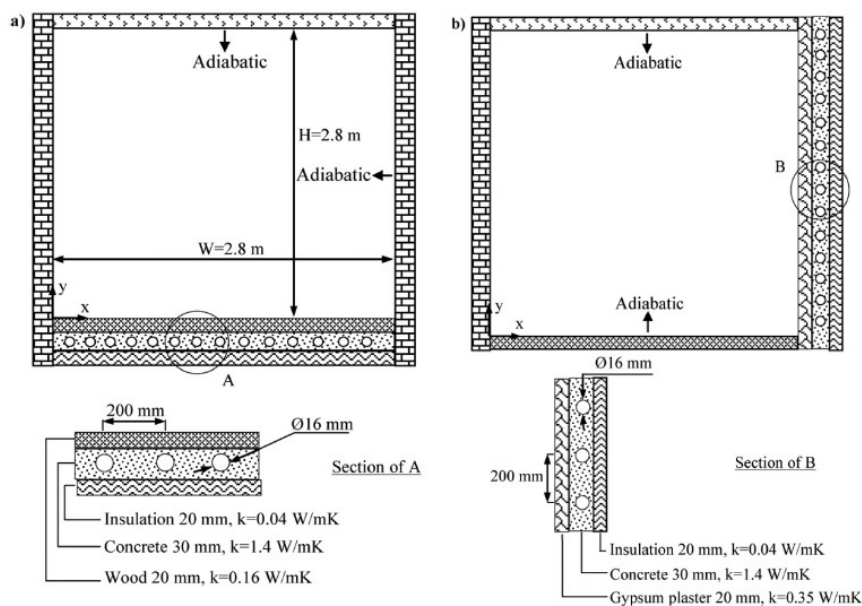
*Figura 20* \_Scalda acqua solare oggetto di studio [26]

20) al fine di realizzare uno scaldacqua solare per scopi domestici a Pune, in India. Poiché la conducibilità termica del calcestruzzo è generalmente molto bassa, circa 2,00 W/mK, sono stati aggiunti dei frammenti metallici per aumentare l'efficienza del collettore e migliorare le proprietà meccaniche del calcestruzzo ad alta temperatura. Il collettore ha una superficie di assorbimento di 2,00 m<sup>2</sup> ed

uno spessore di 0,035 m, calcolato in modo da non avere flessione nella lastra. Il circuito interno è composto da una serpentina in rame, di diametro interno di 10 mm ed esterno di 12 mm, con spaziatura tra i tubi di 8 cm parallelamente al lato lungo del collettore. In fine, la portata massica impostata è di 25 l/h. Le fibre metalliche inserite nel calcestruzzo sono composte da rottami di acciaio dolce in polvere che possiedono una conducibilità termica di 54,00 W/mK e ne saranno necessarie almeno 7 kg su 175 kg di calcestruzzo. Inoltre, è presente una rete metallica inglobata nel collettore ad una profondità di 2,9 cm dal fondo, in modo tale che il 50% del tubo sia fissato alla rete e direttamente esposto alla luce solare ed il restante 50% rimane annegato nella lastra di conglomerato. La rete è stata applicata ai fini di aumentare sia la rigidità che la conducibilità termica. L'involucro esterno è composto da compensato di legno impermeabile. Per il controllo delle prestazioni sono state inserite due termocoppie di tipo K all'ingresso e all'uscita del circuito interno ed un piranometro per misurare l'irradiazione solare. Le prove sono state condotte da settembre a maggio per tre differenti portate (20, 25, 30 l/h) e si è osservato che le prestazioni del collettore sono paragonabili a quelle di un collettore tradizionale con una temperatura di uscita che va da 47° a 80°C e che c'è un ritardo di fase tra calore massimo assorbito dall'acqua e l'insolazione solare massima incidente, principalmente nelle ore del mattino. In conclusione, gli autori affermano che per la maggior parte dei giorni il

collettore è in grado di soddisfare le esigenze dettate dall'uso domestico e potrebbe essere utilizzato per preriscaldare l'acqua per uso industriale, applicandolo all'interno di un tetto inclinato esposto a sud o anche su coperture piane riducendo i costi d'installazione.

Karabay H., Arıcı M. e Sandık M. [27] effettuano uno studio comparativo tra un sistema di riscaldamento a pavimento ed uno a parete, nell'ipotesi di riscaldare una stanza di un edificio residenziale situato a Kocaeli, in Turchia. Tale stanza, presa in considerazione per la valutazione del flusso d'aria ed il trasferimento di calore, ha le dimensioni riportate nella *Figura 21*, così come la stratigrafia dei pannelli a pavimento ed a parete. Entrambi sono attraversati da tubazioni di 16 mm di diametro e per la finitura sono stati utilizzati rispettivamente legno e gesso. Le simulazioni sono state eseguite con una temperatura esterna di 3°C e per tre diverse temperature dell'acqua in entrata, cioè 30°C, 40°C e 50°C, sistemando i vari parametri in modo tale che i due sistemi possano essere comparati.



*Figura 21* \_Rappresentazione schematica della geometria del pannello a pavimento e di quello a parete [27]

I risultati principali di questo studio sono che la velocità dell'aria, intorno al livello della caviglia, raggiunge 0.19 m/s per il sistema di riscaldamento a pavimento, valore vicino al limite per il comfort termico. La temperatura media dell'aria, a parità di temperatura dell'acqua presente nelle tubazioni, è più elevata nella stanza con riscaldamento a parete anche se le differenze non sono particolarmente rilevanti. In fine, l'effetto di trasferimento di calore radiativo sulla temperatura dell'aria è più significativo per il sistema di riscaldamento a parete che per quello a pavimento. Gli autori fanno notare che tali risultati sono ottenuti per stanze non ammobiliate e senza moquette che avrebbero ridotto il rendimento del sistema a pavimento mentre non avrebbero avuto particolari ripercussioni sul sistema a parete.

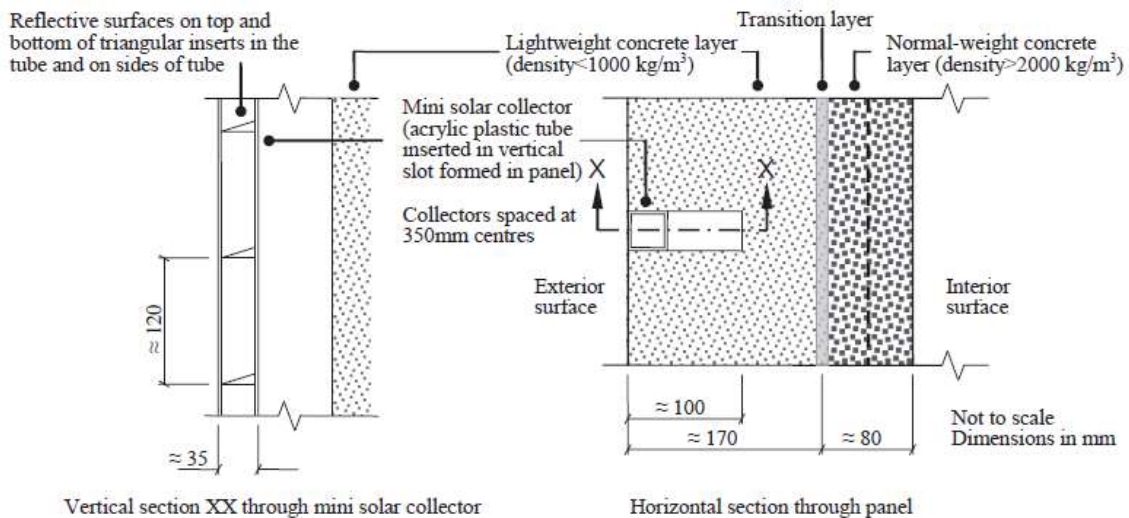
Bellamy L. A. [28] testa per dodici mesi le prestazioni energetiche di un pannello solare in



**Figura 22** Parete esterna laboratorio solare a Christchurch in Nuova Zelanda [28]

calcestruzzo stratificato, Solar Heated Stratified Concrete (SHSC), utilizzando misure sperimentali. Questo nuovo tipo di pannello è stato ideato per sopperire alle scarse caratteristiche termiche del materiale ordinario ed è formato dalla sovrapposizione di uno strato di calcestruzzo normale, che conferisce robustezza e massa termica al pannello, e di uno leggero dove viene incorporato

un mini-collettore solare come riportato nella *Figura 23*. Nel caso oggetto di studio, il collettore è orientato a nord di un laboratorio solare a Christchurch in Nuova Zelanda e ricopre solo una piccola frazione della superficie totale del pannello, il 10%. Lo spessore è di 250 mm ed è montato nella parete esterna, dove viene assorbita la radiazione solare. All'interno la luce è stata esclusa, la temperatura è stata mantenuta a 20°C e la conduzione sulla superficie interna è misurata con un sensore termico e un datalogger. Sono state monitorate le temperature interne ed esterne e la radiazione solare esterna incidente sulla parete verticale.

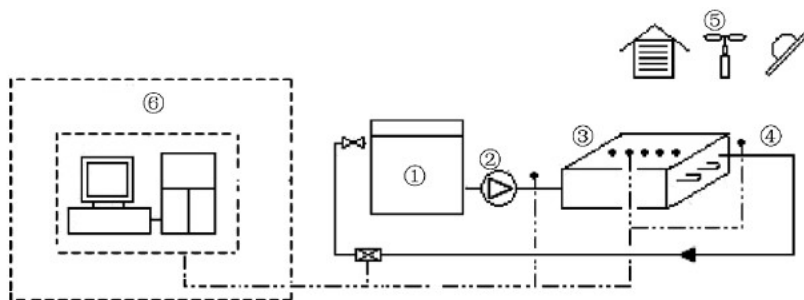


**Figura 23** Stratigrafia del pannello SHSC [28]

Sono stati testati due ulteriori collettori: uno stratificato senza mini-collettore per valutare l'efficacia di quest'ultimo ed un pannello sandwich in polistirene leggero al fine di valutare l'effetto della massa termica sulle prestazioni energetiche della parete ed agire come controllo per la campagna sperimentale (*Figura 22*). Tutti e tre sono stati verniciati con la stessa colorazione. I risultati ottenuti hanno evidenziato che la conduzione del pannello stratificato è sempre inferiore alla conduzione sul pannello leggero. Le maggiori differenze di conduzione tra i due si verificano da metà mattina a mezzanotte, quando il calore solare viene raccolto, immagazzinato e rilasciato. Sembra che il calore prodotto dal collettore riduca la conduzione troppo presto nel giorno e non persista lungamente nella

notte e ciò indica che la progettazione non è ottimale. Quando la temperatura ambientale interna è inferiore a 10°C, il pannello stratificato ha le migliori prestazioni di riscaldamento dei tre pannelli e il collettore solare migliora le prestazioni del 15%. Quando invece è inferiore di 15°C, il pannello leggero e lo stratificato hanno prestazioni quasi uguali e il collettore solare migliora le prestazioni del 22%. In linea generale, il mini-collettore solare migliora le prestazioni energetiche di oltre il 20%. L'autore, infine, precisa che non è stato valutato l'aspetto economico e la fattibilità di tale applicazione.

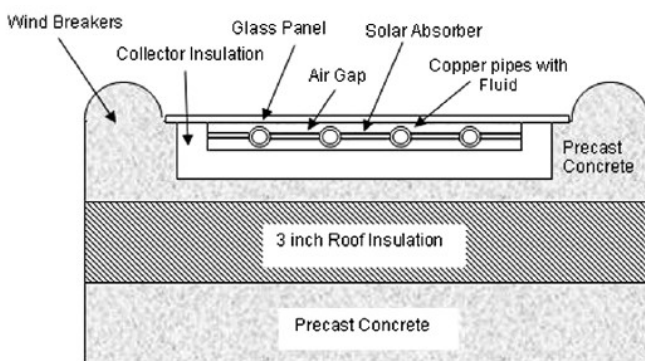
Wang H., Zhao J. e Chen, Z. [29] sperimentano un piccolo sistema per lo scioglimento di ghiaccio e



**Figura 24** Configurazione del circuito di sperimentazione: 1. Serbatoio, 2. Pompa, 3. Collettore in calcestruzzo, 4. Tubi del circuito, 5. Apparato di monitoraggio ambientale, 6. Sistema di acquisizione dati [29]

neve sul manto stradale, basato sul riutilizzo dell'acqua di sistemi geotermici a circa 40°C. Come mostrato dalla *Figura 24*, il sistema è composto da una pavimentazione in calcestruzzo, dei tubi inglobati al suo interno, un serbatoio per il riscaldamento dell'acqua, una pompa di circolazione, dei tubi di circuito ed un sistema di monitoraggio e di acquisizione dati. In particolare, il collettore ha le dimensioni H: 1000 mm e L: 1000 mm ed uno spessore di 300 mm ed è contenuto da una lastra di 18 mm di spessore. Le tubazioni al suo interno sono in polietilene ad alta densità (HDPE) con diametro nominale di 25 mm, posizionati a una distanza di 200 mm l'uno dall'altro e ad una profondità di 50 mm. Sono stati condotti esperimenti con ghiaccio tritato e solido e neve artificiale e naturale per valutarne la velocità di fusione e si è riscontrato che sarebbe possibile applicare tale metodologia basata sull'utilizzo di acqua geotermica di coda a bassa temperatura.

Hassan M. M. e Beliveau, Y. [30] progettano un collettore solare integrato nel tetto basato sullo



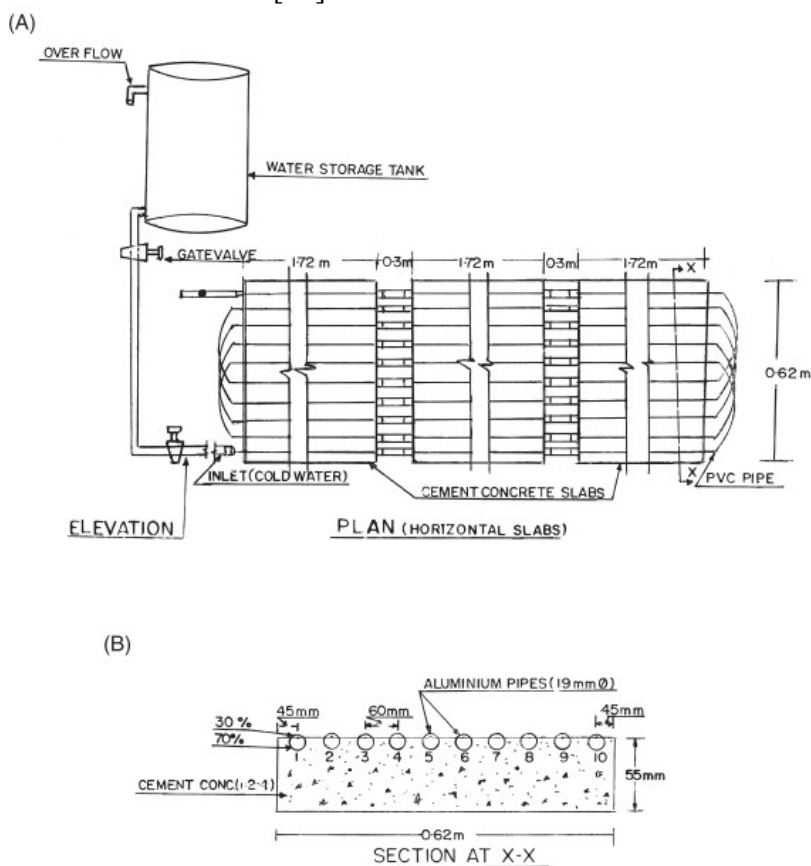
**Figura 25** Sezione pannello solare integrato al soffitto [30]

sviluppo di modelli tridimensionali agli elementi finiti. Tale studio si basa su diversi criteri di progettazione quali le prestazioni termiche, la progettazione ambientale, durabilità, sostenibilità ed economicità. È costituito da un pannello a vetro singolo di 6.35 mm con superficie selettiva seguito da 1 mm di spazio d'aria.

Il mezzo di raccolta termico è costituito dal fluido di lavoro, composto da acqua ed antigelo, e dal

circuito realizzato in rame e verniciato di nero. I tubi sono posati all'interno di una cavità di calcestruzzo e sono collegati tra loro da una piastra di rame dello spessore di 1 mm, anch'essa verniciata di nero. Uno strato isolante dello spessore di 50.8 mm viene posto tra la piastra e il calcestruzzo dello spessore di 76,2 mm per evitare dispersioni termiche per conduzione verso il calcestruzzo (Figura 25). Il pannello si completa con uno strato successivo di schiuma di poliuretano dello spessore di 76.2 mm e di un ulteriore strato di calcestruzzo per garantire stabilità strutturale e contribuire all'inerzia termica all'interno della struttura. In fine si suppone che il collettore ricopra tutta la lunghezza del tetto e sia collocato a Blacksburg in Virginia con un'inclinazione di  $37^\circ$  e per 12 mesi. I risultati di questo studio mostrano prestazioni adeguate nei confronti del collettore integrato nella copertura. In particolare, si è riscontrato che la temperatura massima raggiunta in estate è di  $111^\circ\text{C}$  mentre nella stagione invernale è di  $59^\circ\text{C}$  e che la portata massica ottimale del fluido si aggira tra i  $0.0005 \text{ m}^3/\text{h}$  ed i  $0.005 \text{ m}^3/\text{h}$  durante la stagione invernale ed i  $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$  in estate. Il diametro più efficace, inoltre, risulta essere di 6.35 mm in quanto garantisce una distribuzione delle temperature più uniforme. In fine, l'energia raccolta da questo collettore è sufficiente a soddisfare l'85% del fabbisogno complessivo di riscaldamento degli ambienti e di acqua calda.

Chaurasia P. B. L. [31] effettua uno studio sui collettori solari in calcestruzzo armato per la



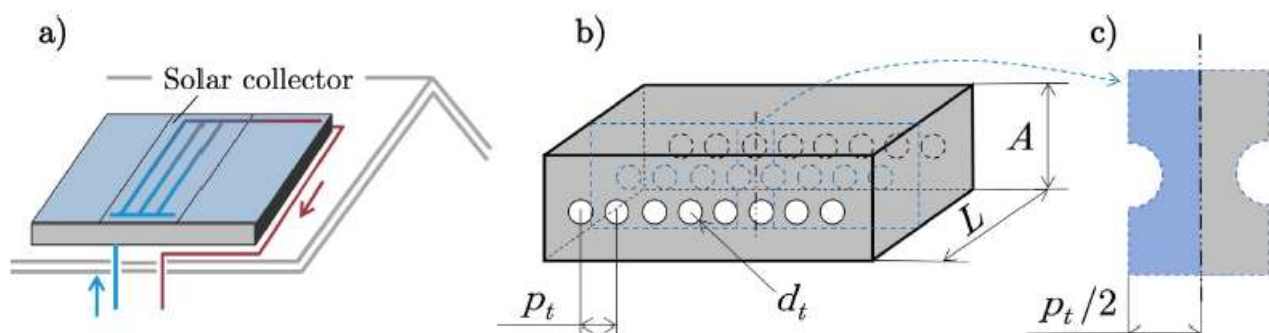
produzione di acqua calda sanitaria. Sono stati realizzati con materiali da costruzione comuni, con l'acciaio che rappresenta il 2% del calcestruzzo in volume e che conferisce un leggero aumento della conducibilità termica complessiva alla piastra. Le dimensioni di ogni lastra, tre in totale, sono di L: 1.72 m ed H: 0.62 m. Lo spessore della lastra è di 55 mm. Le tubazioni, posizionate parallelamente al lato lungo del collettore in modo da ridurre il numero di giunti e le perdite di carico, sono in alluminio e sono incorporati sulla

**Figura 26** Schema del sistema di riscaldamento solare dell'acqua. (A) Tubazioni in alluminio annegate nei tre pannelli in calcestruzzo. (B) Sezione del collettore con le tubazioni annegate nel calcestruzzo [31]

superficie superiore in modo tale che il 70% sia inglobato nella matrice cementizia del pannello. In

totale sono state utilizzate 10 tubazioni per collettore distanziate l'una dall'altra di 60 mm. I tubi dei tre pannelli, sono stati connessi da tubi in PVC ad alta densità per garantire un flusso continuo d'acqua nel sistema, ed un collegamento al serbatoio di stoccaggio come si può notare dalla *Figura 26*. In fine, il sistema è mantenuto da un'intelaiatura angolare in ferro reclinabile. Questi collettori sono stati testati per diversi anni in diverse condizioni, al Central Arid Zone Research Institute, in Jodhpur, con diversi diametri di tubazioni (12, 19 e 25 mm) ed a diverse angolazioni quali orizzontalmente al piano, inclinati di  $41^\circ$  verso sud ed in verticale verso sud. La posizione ottimale del collettore risulta essere quella inclinata, in quanto garantisce un rendimento superiore rispetto agli altri. Si conclude che l'acqua fredda può essere facilmente scaldata tramite il suo passaggio nei tubi di alluminio fino ad ottenere una temperatura moderata che va dai  $36^\circ\text{C}$  ai  $58^\circ\text{C}$  garantendo circa 25-40 litri di acqua calda al di sopra della temperatura del corpo umano ( $36^\circ\text{C}$ ). La temperatura massima di acqua calda è ottenuta dalle 12 a.m. alle 2 p.m. Inoltre, la temperatura dell'acqua può essere incrementata dai  $2^\circ\text{C}$  ai  $5^\circ\text{C}$  utilizzando una vernice scura. L'integrazione di questo sistema in copertura risulta essere di facile applicazione ed a basso costo.

Peralta, Ignacio, e al. [32] hanno analizzato un collettore solare termico massivo applicato alla copertura per evitare perdite di calore nell'edificio.



**Figura 27** \_Modello semplificato del Collettore Solare Termico Massivo oggetto di studio [32]

In fase preliminare, per trasformare un problema di scambio termico tridimensionale in uno bidimensionale, è stato ipotizzato che la distribuzione della temperatura nei tubi sia la stessa, in modo tale da poterlo rappresentare come un parallelepipedo con un solo tubo, la cui larghezza  $p_t$  è rappresentata in *Figura 27/b*. Inoltre, si suppone che il gradiente di temperatura nel piano perpendicolare allo scorrimento del fluido sia maggiore rispetto a quello longitudinale, consentendo di dividere il collettore in  $n$  sezioni a temperatura costante. In questo modo è stato possibile considerare solo metà del dominio come si evince dalla *Figura 27/c*. In fine il collettore viene considerato come se fosse in posizione orizzontale, di lunghezza  $L$ :1.20 m e spessore 0.127 m, le cui tubazioni di 0.0254 m di diametro siano posizionate a 0.0635 m di profondità e ad una distanza di 0.165 m l'una dall'altra. Per lo studio parametrico vengono scelte due differenti località, Sauce Viejo, in Argentina, e Francoforte, in Germania, le quali si differenziano per la tipologia di clima,

subtropicale il primo e caldo il secondo, e per le rispettive temperature medie nel periodo estivo ed invernale (24,4-13,8°C e 18,0-1,7°C). Gli autori concludono che il collettore analizzato è in grado di soddisfare i carichi di riscaldamento dell'intero edificio e che un corretto utilizzo dei PCM nella stratigrafia del collettore può consentire un rendimento più elevato con miglioramenti del 38.9% per i climi caldi e del 27.4% per i climi freddi, a differenza di un posizionamento scorretto che invece pregiudica il normale funzionamento del collettore che non sarebbe in grado di raggiungere la temperatura minima per fornire energia termica all'acqua. Un altro aspetto importante è la scelta della qualità del PCM da utilizzare, prestando attenzione alle temperature di fusione e solidificazione adatti ad ogni clima. La conclusione finale degli autori è che in ogni caso un utilizzo ponderato ed intelligente di questi materiali nei collettori migliora le prestazioni energetiche degli stessi, in particolar modo nei climi più caldi.

È di seguito riportata nella *Tabella 2* un riassunto dei principali dati raccolti in seguito all'analisi della letteratura effettuata:

MSTC – Analisi della letteratura												
Generalità			Caratteristiche geometriche collettore		Caratteristiche circuito idraulico				Efficienza			
N. paper	Anno	Analisi (T/E)	Applicazione	Area [m <sup>2</sup> ]	Spessore [m]	Materiale	Diametro [mm]	Profondità [mm]	Portata [l/min]	Vetro	Isolante posteriore	Vernice nera
32	2022	T	DHW	-	0.127	-	25.4 (out)	165.0	-	no	no	no
22	2020	T	DHW	-	0.20	-	-	-	-	si	no	no
13	2019	E	WH	2.00	0.03	-	12.7 (out)	150.0	1.00	si	si	si
18	2018	E	WH	2.00	0.03	rame	8.0	80.0	0.33-0.75	si	si	no
25	2017	T e E	DHW	1.00	0.08	rame	15.0 (out)	50.0	1.20	no	si	si
20	2017	E	DHW	2.00	0.035	rame	10.0 (out)	80.0	0.50	si	si	si
26	2016	E	WH	2.00	0.10	rame	12.0 (out)	80.0	0.42	si	si	si
24	2014	E	WH	2.24	0.10	alluminio	12.5	-	-	no	no	si
19	2015	T	DHW	0.81	0.80	-	15.0 (in)	25.0	-	no	no	no
15	2013	T	WH	3.50	0.13	PE-X	25.4 (out)	16.5	15-75 [kg/h/m <sup>2</sup> ]	no	no	no
27	2013	T	WH	-	0.07	-	16.0	200.0	-	no	si	no
28	2012	E	WH	-	0.25	acrilic plastic	-	-	-	no	no	si
23	2011	T e E	WH	5.75	0.12	PVC	25.4 (out)	100.0	-	no	no	no
29	2008	E	IM	1.00	0.30	HDPE	25.0 (out)	200.0	< 83	no	si	no
30	2007	T	DHW e WH	5.25	0.23	rame	6.35	-	11.4-0.00016	si	si	si
21	2002	T e E	WH	0.31	0.10	-	-	-	-	no	si	no
31	2000	E	DHW	1.06	0.05	alluminio	19.0 (out)	60.0	1.33-1.67	no	no	si

**Tabella 2** Principali dati raccolti dalla letteratura sui Collettori Solari Termici in Calcestruzzo. Legenda: T) teorico, E) sperimentale, DHW) acqua calda domestica, WH) acqua calda, IM) fusione di ghiaccio e neve.

Si può dedurre che i parametri riportati sono quelli che influenzano maggiormente le prestazioni dei collettori solari termici massivi. In particolare, si è riscontrato che con l'aumentare dello spessore della piastra, il fattore di efficienza ed il tasso di dissipazione del calore aumentano rispettivamente del 47% e del 39%. Viceversa, con l'aumentare dello spazio tra i tubi, la seconda diminuisce tra il 30% e il 55%, indipendentemente dallo spessore della piastra. In fine, si può affermare che esiste una correlazione lineare tra l'area del collettore e la produzione di acqua calda [33].

## 6. PCM: Phase Change Material

La natura discontinua dell'energia solare fa sì che sia necessario lo stoccaggio dell'energia termica in modo tale da aumentare le ore di operatività dei sistemi solari-termici. Dalla seconda metà del XX secolo il Phase Change Material (PCM) o materiale a cambiamento di fase è diventato uno dei temi di ricerca più interessanti. Solitamente, i PCM sono solidi a temperature standard e si liquefanno accumulando il calore che viene sottratto all'ambiente. Viceversa, quando lo cedono, solidificano tornando allo stato iniziale per diversi cicli fino a deterioramento del materiale stesso. Sono dunque in grado di immagazzinare energia termica durante la fusione e di rilasciarne durante la solidificazione ad una temperatura pressoché costante. È per tale motivo che negli anni hanno attirato l'attenzione del settore edile, in quanto, la sua inclusione negli elementi da costruzione per applicazioni di riscaldamento solare, consente una migliore combinazione tra il materiale assorbente e l'unità di accumulo, la quale non è sfruttabile utilizzando uno stoccaggio di calore sensibile. I PCM hanno un ampio potenziale nella progettazione di edifici in quanto possono attenuare le differenze termiche giornaliere tra ore diurne e notturne e rivelarsi un grande aiuto in termini di architettura ecosostenibile e di risparmio energetico. I requisiti che un PCM dovrebbe possedere per poter essere impiegato in edilizia sono:

- Temperatura di fusione intorno ai 25 °C;
- Elevato calore di transizione di fase (liquefazione/solidificazione);
- Basso costo;
- Non essere tossico, corrosivo o igroscopico;
- Essere disponibile sul mercato in quantità tali da poter essere incorporato nei normali materiali edilizi.

Attualmente i più utilizzati e sperimentati sono i materiali paraffinici, i quali sembrano essere quelli che maggiormente soddisfino tali requisiti [34].

### 6.1. Calore latente e transizione di fase

I PCM sfruttano quello che in termodinamica viene definito calore latente. Il calore, definito come il trasferimento di energia tra due sistemi, associato ad una differenza di temperatura, si differenzia principalmente in due tipologie:

- Calore sensibile:

In termodinamica è la quantità di calore scambiata tra due corpi affinché venga raggiunto l'equilibrio termico tra di essi, ovvero affinché raggiungano la stessa temperatura. Il calore sensibile può essere calcolato come prodotto tra la variazione di temperatura e il calore specifico:

$$q = c \cdot \Delta T$$

dove q è espresso in J/kg [35].

- Calore latente:

In termodinamica è la quantità di energia scambiata durante lo svolgimento di una transizione di fase. Tale energia non incrementa la temperatura del materiale, bensì agisce sulla forza dei legami intermolecolari. Per definizione, il calore latente esprime la quantità di calore necessario affinché una massa di 1 kg di una specifica sostanza effettui un determinato passaggio di stato:

$$Q = m \lambda$$

Dove  $\lambda$  indica il calore latente stesso. Ricavandolo tramite formula inverse otteniamo:

$$\lambda = \frac{Q}{m}$$

ne consegue che è misurato in J/kg, dove Q è il calore fornito o sottratto al sistema e m la massa di sostanza [36].

Con il termine transizione di fase si indica la trasformazione di un sistema termodinamico da uno stato di aggregazione all'altro. Il nostro campo d'interesse riguarda le transizioni di fase del primo ordine, ovvero quelle che coinvolgono il calore latente. Durante tali fenomeni, un sistema termodinamico assorbe o rilascia una gran quantità di energia che non può essere istantaneamente trasferita dal sistema all'ambiente circostante, motivo per il quale sono associati a regimi di fase misti in cui alcune parti hanno completato la transazione a differenza di altre. Quanto appena descritto può essere rappresentato tramite il diagramma delle fasi, dove in ascissa viene definita la temperatura T ed in ordinata la pressione p, come si evince dalla *Figura 28*. Ogni punto del piano rappresenta una determinata fase della sostanza ad eccezione di quelli che si trovano sulle così dette linee di transizione, che delineano le fasi della sostanza d'interesse ed in corrispondenza delle quali avvengono i passaggi da una fase all'altra. Quest'ultimi avvengono solo per determinate coppie dei valori di pressione e temperatura. Il punto C, detto punto critico, rappresenta il valore massimo di

temperatura per il quale la sostanza si può trovare allo stato liquido ed il punto  $P_t$ , detto punto triplo, rappresenta l'unica coppia di valori per il quale le tre fasi coesistono simultaneamente [37].

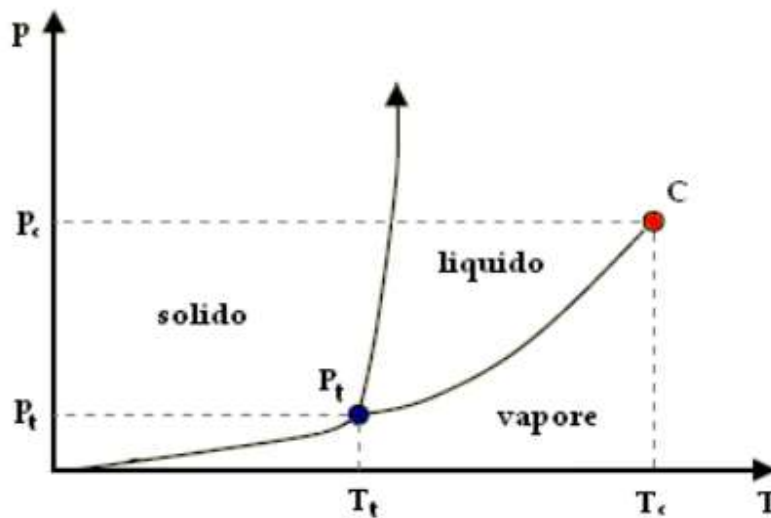


Figura 28\_Diagramma di transizione di fase [37]

Le principali transizioni tra le fasi solide, liquide e aeriformi si classificano in:

- Fusione:

è la transizione tramite il quale una sostanza allo stato solido passa allo stato liquido in seguito all'applicazione di calore o pressione. Le condizioni in corrispondenza del quale avviene tale fenomeno viene chiamato punto di fusione [38]. Quest'ultimo, infatti, si definisce come lo stato termodinamico, ad una data pressione e temperatura, in corrispondenza del quale avviene il processo di fusione. La sostanza, assorbendo il cosiddetto calore di fusione, rompe i legami intermolecolari ed interatomici che formano il reticolo cristallino fino a totale cambiamento di stato. In questo transito la temperatura rimane costante, per poi ritornare ad aumentare una volta che il passaggio allo stato liquido è completato. In generale, i principali casi d'interesse avvengono a pressione atmosferica, pressoché costante, motivo per il quale, il punto di fusione viene indicato con la temperatura. In laboratorio, quest'ultima, viene identificata riscaldando un campione in condizioni controllate e rilevando visivamente o strumentalmente la temperatura alla quale si attiva il fenomeno [39].

- Solidificazione:

è la transizione di fase inversa alla fusione, ovvero determina il passaggio dallo stato liquido allo stato solido in una determinata sostanza. Questo fenomeno avviene quando la temperatura scende al di sotto di quella di fusione, al di sopra della quale, appunto, avviene il fenomeno inverso. In generale la solidificazione può portare alla formazione di un solido amorfo, nel caso in cui la velocità di raffreddamento sia eccessivamente elevata, o di un solido cristallino, nel caso in cui tale fenomeno

avvenga a basse velocità, con la formazione di un reticolo cristallino o di un solido avente zone di diversa cristallinità [40].

- Sublimazione:

è la transizione di fase che descrive il passaggio dallo stato solido a quello aeriforme, senza passare per lo stato liquido. Questo è possibile, al variare della temperatura, solo per determinate condizioni di pressione. In particolare, la pressione di sublimazione di una sostanza corrisponde alla pressione di vapore della stessa [41].

- Brinamento:

è la transizione di fase inversa alla sublimazione, ovvero è il passaggio dallo stato aeriforme a quello solido di una sostanza senza passare per lo stato liquido [42].

- Vaporizzazione:

è la transizione di fase che descrive la trasformazione di una sostanza dallo stato liquido a quello aeriforme quando si somministra calore. Quando il fenomeno coinvolge l'intera massa della sostanza prende il nome di *ebollizione*, mentre quando coinvolge soltanto la superficie si parla di *evaporazione* [43].

- Condensazione:

è la transizione dalla fase aeriforme a quella liquida di una determinata sostanza. Tale trasformazione può avvenire a temperatura costante per compressione, se la temperatura è inferiore a quella critica, o per raffreddamento con una fonte esterna o per espansione adiabatica [44].

## 6.2. Classificazione dei PCM

I PCM attualmente conosciuti sono parecchi e presenti sotto varie forme e stati di aggregazione. Ognuno di essi possiede determinate caratteristiche e proprietà che li rendono più o meno idonei a determinati utilizzi.

I PCM possono essere classificati, in primo luogo, in base alla temperatura a cui avviene il cambiamento di fase. Nello specifico si possono distinguere tre principali categorie:

- PCM a bassa temperatura:

materiali il cui cambiamento di fase avviene a temperature inferiori ai 15°C. Tali materiali sono perlopiù utilizzati per la refrigerazione.

- PCM a media temperatura:

materiali il cui cambiamento di fase avviene a temperature comprese tra i 15°C e i 90°C. Sono i più diffusi e versatili e vengono utilizzati per l'accumulo di acqua calda, nei sistemi passivi degli edifici e per la climatizzazione degli ambienti.

- PCM ad elevata temperatura:

materiali il cui cambiamento di fase avviene a temperature superiori ai 90°C. Tali materiali sono utilizzati per applicazioni industriali, negli impianti solari di produzione di potenza e nelle applicazioni aerospaziali [45].

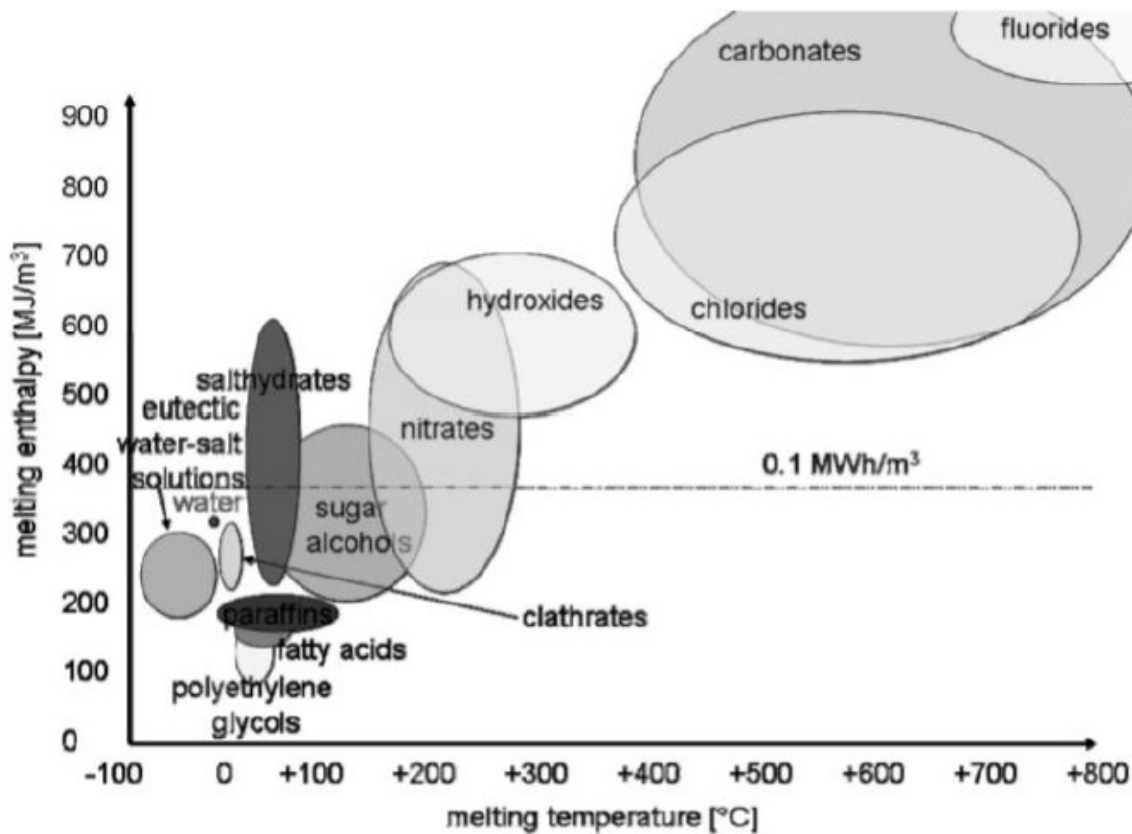


Figura 29\_Classificazione dei materiali utilizzati come PCM in base alla temperatura [45]

Un'ulteriore classificazione può essere fatta in base allo stato di aggregazione durante la transizione di fase. Si possono dividere in quattro gruppi ovvero i PCM solido-solido, PCM solido-liquido, PCM liquido-aeriforme e PCM solido-aeriforme. I secondi sono i più adatti allo stoccaggio di energia termica per le applicazioni oggetto di studio e sono a loro volta suddivisi in tre sottocategorie quali organici, inorganici ed eutettici come riportato nella Figura 30:

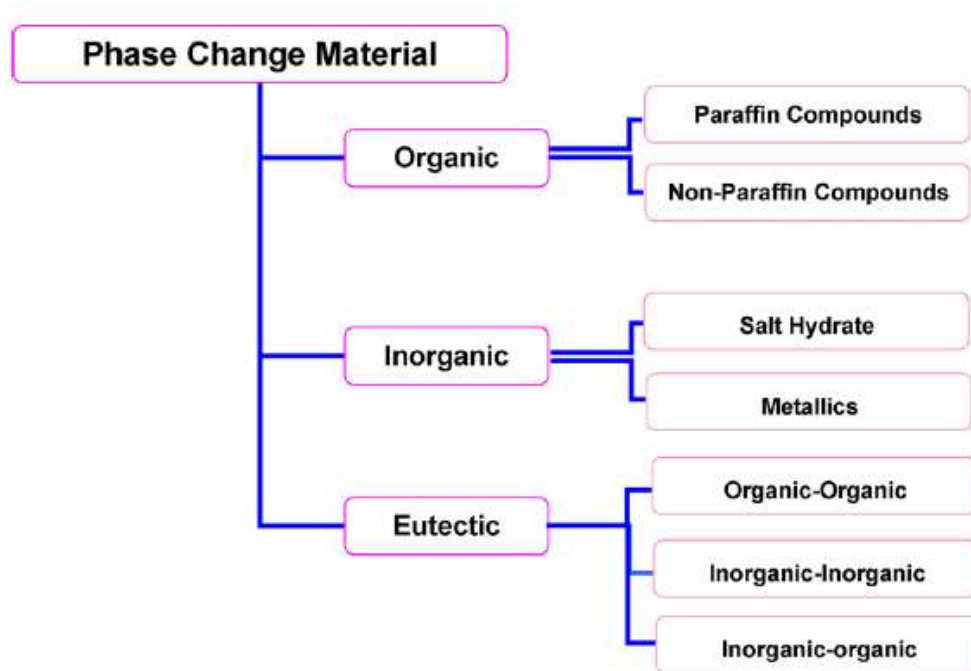


Figura 30\_Tipologie di PCM [46]

### 6.2.1. PCM organici

I PCM organici presentano un processo di fusione congruente con temperature costanti e sono in grado di affrontare un gran numero di cicli di fusione/solidificazione senza andare incontro ad un precoce deterioramento. Hanno un minor sotto raffreddamento rispetto ad altri materiali e sono compatibili con la maggior parte dei materiali da costruzione. I PCM organici si dividono materiali paraffinici e non paraffinici.

- Paraffine

La composizione chimica della paraffina è costituita da una miscela di n-alcani a catena:



È proprio la cristallizzazione di quest'ultima che rilascia una gran quantità di calore latente, tanto maggiore quanto più molecole di carbonio ed idrogeno saranno presenti. Chimicamente sono inerti e stabili sino alla temperatura di 500°C, mostrando piccole variazioni di volume in fase di fusione, il quale aumenta con l'aumentare del numero di atomi di carbonio. La paraffina è sicura, affidabile, prevedibile, poco costosa e non corrosiva ma presenta altresì alcuni svantaggi quali la bassa conducibilità termica, l'incompatibilità con contenitori di plastica e una moderata infiammabilità [46].

- Materiali non paraffinici

I materiali non paraffinici sono numerosi ed hanno proprietà molto varie tra di loro a differenza delle paraffine che godono di caratteristiche molto simili. Possono essere suddivisi principalmente in due sottogruppi ovvero gli acidi grassi, la cui composizione chimica è rappresentata dalla formula  $C_mH_nO_2$ , dove m ed n sono i numeri atomici, e tutti gli altri PCM non paraffinici come gli esteri, gli alcoli, i glicoli, ecc. In linea generale questa tipologia di PCM è caratterizzata da elevati calori latenti e bassa conduttività termica. Inoltre, sono infiammabili anche a basse temperature ed instabili a quelle alte, possedendo inoltre vari livelli di tossicità a seconda del materiale preso in esame. In fine, sono molto più costosi dei materiali paraffinici, motivo per il quale sono ancora poco utilizzati in campo edile [45].

### **6.2.2. PCM inorganici**

I materiali inorganici si classificano in idrati di sale e in metalli. Sono materiali caratterizzati da calore di fusione che non si degrada con ciclicità, inoltre non hanno un raffreddamento apprezzabile [46].

- Idrati di sale

Gli idrati di sale si possono considerare come leghe di sali inorganici ed acqua che formano un solido cristallino caratteristico. La formula generale è la seguente:



La liquefazione e la solidificazione del sale idrato avvengono in concomitanza dell'idratazione e della disidratazione del sale. Questi materiali sono caratterizzati da una fusione incongruente, che si verifica quando l'acqua rilasciata in fase di cristallizzazione non è sufficiente a dissolvere il materiale residuo in fase solida che tende ad accumularsi nella parte inferiore, rendendo con il passare del tempo la transizione di fase irreversibile. Un altro svantaggio è rappresentato dal sotto raffreddamento, dovuto alla bassa velocità di nucleazione dei cristalli di sale idrato. Ciò significa che il calore latente viene rilasciato a una temperatura minore rispetto a quella di fusione. Tali problematiche possono essere affrontate introducendo, per esempio, in soluzione agenti di nucleazione che permettano una più rapida formazione di cristalli o incapsulando il PCM. In generale, la maggior parte degli idrati di sale non sono adatti alle applicazioni edili in quanto, oltre al basso valore di calore latente, sono tossici e pericolosi sia per l'ambiente che per l'essere umano [45].

- Metalli

Questa categoria comprende metalli a bassa fusione e metalli eutettici. Tali materiali non sono ancora stati considerati propriamente PCM a causa del loro peso ma parlando di volume sono possibili candidati grazie al loro elevato calore di fusione per unità di volume. Le loro principali caratteristiche sono il basso calore di fusione per unità di peso, l'elevato calore di fusione per unità di volume, l'elevata conducibilità termica, il basso calore specifico e la pressione di vapore relativamente bassa [46].

### **6.2.3. PCM eutettici**

I materiali eutettici, detti anche miscele eutettiche, sono miscele di sostanze il cui punto di fusione è inferiore rispetto a quello dei singoli componenti. In questo tipo di materiale tutti i componenti fondono e solidificano congruamente e simultaneamente, senza segregazione e si può intervenire sul punto di fusione agendo sulla ponderazione in massa dei componenti di fase. In generale, i materiali eutettici godono di una buona conducibilità termica ma hanno un calore latente di solidificazione e un calore specifico limitati [45].

Sono riportate nella *Tabella 3* le principali caratteristiche degli elementi descritti in questo paragrafo.

Tipologie di PCM		Vantaggi	Svantaggi
	Paraffine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sicure</li> <li>• Affidabili</li> <li>• Prevedibili</li> <li>• Poco costose</li> <li>• Non corrosive</li> <li>• Compatibili con i principali materiali da costruzione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bassa conducibilità termica</li> <li>• Incompatibilità con contenitori di plastica</li> <li>• Moderata infiammabilità</li> </ul>
<u>Organici:</u>	Non-paraffine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevato calore di fusione</li> <li>• Assenza di sovraraffreddamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bassa conducibilità termica</li> <li>• Bassa temperatura di infiammabilità</li> <li>• Differente livello di tossicità in base alla tipologia</li> <li>• Instabilità alle alte temperature</li> <li>• Corrosivi</li> <li>• Molto costose</li> </ul>
	Idrati di sale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alte densità di energia</li> <li>• Buona conducibilità termica</li> <li>• Bassa corrosività</li> <li>• Compatibilità con la plastica</li> <li>• Poco costosi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sovraraffreddamento</li> <li>• Fusione incongruente</li> <li>• Tossicità</li> </ul>
<u>Inorganici</u>	Metalli	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevata conduttività termica</li> <li>• Bassa tensione di vapore</li> <li>• Limitato coefficiente di variazione volumetrica</li> <li>• Elevato calore latente per unità di volume</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fusione incongruente</li> <li>• Molto costosi</li> </ul>
<u>Eutettici</u>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buona conducibilità termica</li> <li>• Possibilità di intervenire sul punto di fusione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basso calore di solidificazione</li> <li>• Basso calore specifico</li> <li>• Molto costosi</li> </ul>

*Tabella 3* Vantaggi e svantaggi delle principali tipologie di PCM

## 7. Utilizzo di PCM nella matrice cementizia

Il calcestruzzo è il materiale maggiormente utilizzato in edilizia. Questo grazie alla sua versatilità ed alla sua elevata resistenza a compressione. Tuttavia, le sue caratteristiche termiche sono ancora tema di studio e ricerca in quanto, per ottimizzarne le prestazioni, sarebbe necessario aumentare la sua capacità di accumulo di calore. L'utilizzo di PCM nel confezionamento del calcestruzzo risulta avere effetti positivi sull'efficienza energetica degli edifici in quanto contribuirebbe a ridurre le variazioni di temperatura e di carichi termici. D'altro canto, le proprietà fisiche e meccaniche del calcestruzzo fresco e indurito, a seconda del metodo di confezionamento, subiscono delle variazioni che non devono essere trascurate. In letteratura vengono individuati due principali tipologie di PCM adatti ad essere inglobati nel calcestruzzo ovvero quelli organici, come le paraffine, e quelli inorganici, come gli idrati di sale, ma i primi sono quelli maggiormente utilizzati grazie alla loro buona stabilità chimica e termica, all'inattività in ambienti alcalini, all'elevata capacità termica, all'atossicità ed al punto di fusione che corrisponde alla temperatura di comfort umano. Da contro, le principali limitazioni di questo materiale sono la bassa conducibilità termica, l'inflammabilità, l'incompatibilità con la plastica e le elevate variazioni di volume. I metodi utilizzati per incorporare i PCM nei materiali da costruzione possono essere suddivisi principalmente in:

- Metodi diretti:

consistono nell'inserimento diretto del PCM nel conglomerato cementizio mediante miscelazione o immersione a umido, ovvero inserendolo allo stato liquido nella miscela. In questo caso il rischio di interazione con le proprietà della matrice circostante e la possibilità che il PCM non rimanga contenuto in essa fanno sì che questo metodo sia ancora poco studiato [47].

- Metodi indiretti:

consistono nell'utilizzare PCM incapsulati o aggregati che li contengano. Entrambi vengono preparati con tecniche di incapsulamento o con impregnazione sottovuoto e successivamente inseriti nella miscela del calcestruzzo [47].

Tra i metodi indiretti si distinguono due ulteriori classificazioni:

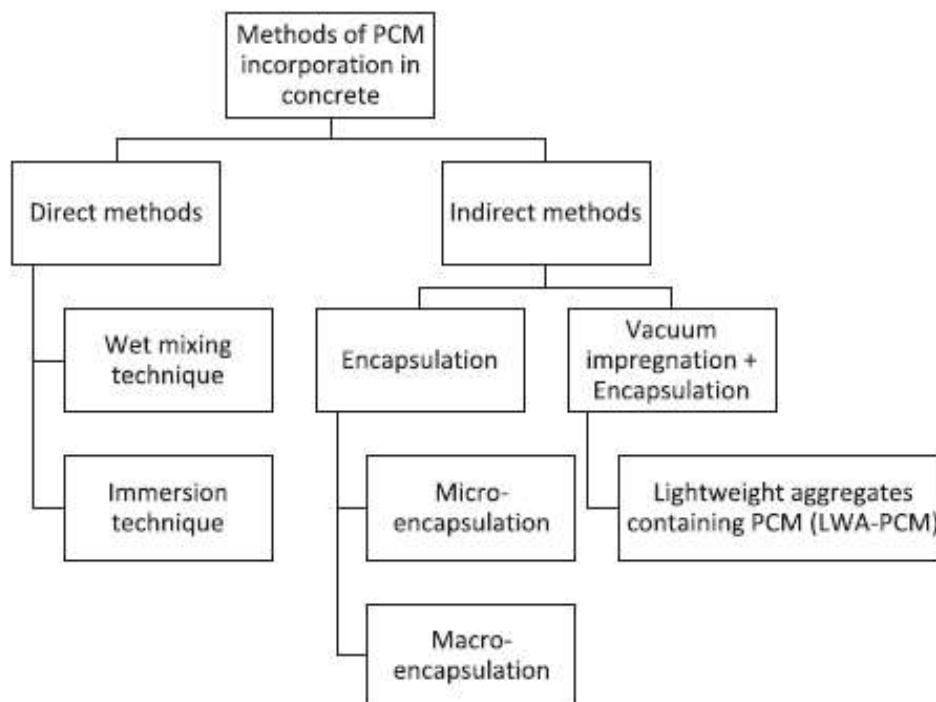
- PCM micro-incapsulato:

le particelle di PCM vengono rinchiusi in un guscio solido di materiale polimerico sintetico, di dimensioni comprese tra 1  $\mu\text{m}$  e 1000  $\mu\text{m}$ , creato con metodi fisici o chimici. Il vantaggio principale di questa metodologia è legato al fatto che durante la transizione di fase non vi sia perdita di materiale,

inoltre, vi è un'elevata velocità di trasferimento del calore attraverso la superficie. I PCM micro-incapsulati, in fine, mostrano una maggiore stabilità chimica e affidabilità termica, poiché la separazione di fase all'interno del materiale, durante le transizioni di fase, è limitata a distanze microscopiche. Da contro avremo che le proprietà meccaniche del calcestruzzo subiscono variazioni ed il costo di produzione risulta essere elevato. In letteratura in principali utilizzi in questo campo sono per la produzione di polveri o aggregati fini da inserire in miscela [47].

- PCM macro-incapsulato:

il PCM viene incorporato in contenitori o materiali porosi da inserire in miscela e generalmente le dimensioni si aggirano intorno ad 1 cm. I principali vantaggi di questa metodologia è che il PCM macro-incapsulato può essere utilizzato in miscela senza alterare le prestazioni meccaniche del calcestruzzo ed in quantità superiore rispetto al precedente metodo. Inoltre, il costo è più contenuto [47].



**Figura 31** Metodi per incorporare il PCM al cemento [47]

## 7.1. Principali caratteristiche fisiche, meccaniche e termiche del calcestruzzo che subiscono variazioni in presenza di PCM nella matrice cementizia

Inserire PCM micro o macro-incapsulato nel calcestruzzo apporta modifiche alle caratteristiche proprie del conglomerato tradizionale. Sono di seguito specificate le principali proprietà del calcestruzzo che subiscono variazioni in questo processo.

- Calore d'idratazione:

Le reazioni chimiche di idratazione che innescano la presa e l'indurimento del conglomerato cementizio sono reazioni esotermiche, ovvero trasferiscono calore dal sistema all'ambiente. Il calore d'idratazione dipende dal tipo e dalla classe del cemento, inoltre, è direttamente proporzionale al contenuto di cemento Portland e alla sua finezza di macinazione. La quantità di calore emesso nel corso dell'idratazione dei vari componenti si misura in kcal/kg [48].

- Lavorabilità:

La lavorabilità delle miscele di calcestruzzo fresco è intesa come lavoro utile interno necessario ad ottenere la costipazione completa del conglomerato. Quest'ultima è responsabile della mobilità del composto, da cui a sua volta dipende la facilità di trasporto e di getto, e la compattabilità, da cui dipende l'eliminazione dell'aria in eccesso intrappolata nel conglomerato. La lavorabilità è influenzata da diversi fattori quali:

- Dimensione degli aggregati e curva granulometrica: a parità di acqua utilizzata per la realizzazione dell'impasto, la lavorabilità è direttamente proporzionale al diametro massimo dell'inerte;
- Natura degli aggregati: a parità di acqua utilizzata per la realizzazione dell'impasto, la lavorabilità è maggiore negli aggregati naturali rispetto agli aggregati ottenuti da macinazione;
- Tipo di cemento utilizzato, temperatura, che influenza i tempi di idratazione, e presenza di additivi [49].

- Densità:

La densità di una sostanza o di una miscela è il rapporto tra la massa ed il volume da esse occupato:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Nel SI, Sistema Internazionale, tale grandezza viene misurata in kg/m<sup>3</sup> ed indica la quantità di massa presente in un metro cubo di materiale. In linea generale la densità del calcestruzzo è di 2,4 kg/m<sup>3</sup>[50].

- Resistenza a compressione:

Il calcestruzzo, normalmente, ha una buona resistenza quando sottoposto a sforzi di compressione. In tal senso è classificato in base alla resistenza caratteristica  $R_{ck}$  o  $f_{ck}$ . La prima viene determinata sulla base di valori ottenuti da prove di compressione monoassiale su provini cubici ( $H/D = 1$ ) di lato 150 mm, maturati in un ambiente protetto fino a 28-30 giorni dal getto. La seconda, invece, viene determinata utilizzando provini cilindrici ( $H/D = 2$ ) di diametro 150 mm ed altezza di 300 mm, confezionati secondo le medesime modalità. Tra i due valori esiste la seguente correlazione:

$$f_{ck} = 0,83 R_{ck}$$

La differenza sostanziale risiede nel differente stato tensionale che si genera nei provini in seguito alle prove di compressione. I provini cubici, infatti, sono più tozzi rispetto a quelli cilindrici che, essendo più snelli, risentono meno degli sforzi di confinamento esercitati dall'attrito. Tali valori sono definiti "caratteristici" in quanto corrispondono al frattile con probabilità 5% di non essere superata. Ciò vuol dire che considerato un provino di una classe definita, la probabilità che la sua resistenza a compressione, misurata tramite prova di carico, sia uguale alla resistenza corrispondente alla sua classe è del 95%. La norma EN 206 classifica il calcestruzzo in base alle classi di resistenza in classi che vanno dalla C8/10 fino a raggiungere la C100/120 in cui il primo valore corrisponde al valore  $f_{ck}$  e il secondo al valore  $R_{ck}$ , entrambi espressi in N/mm<sup>2</sup> [51].

- Conducibilità termica

Si consideri una barretta cilindrica di materiale omogeneo ed isotropo, le cui estremità siano costituite da due superfici piane parallele poste a distanza  $\Delta x$  e mantenute a temperature differenti ed uniformi,  $T_1$  e  $T_2$ , con  $T_1 > T_2$ . Considerando il corpo ben isolato lungo tutto il suo sviluppo, in modo tale che il flusso termico, causato dalla differenza di temperatura tra le due sezioni, abbia luogo solo lungo l'asse, si avrà che:

$$\dot{Q}_x \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

La proporzionalità tra il flusso termico  $\dot{Q}_x$ , la differenza di temperatura  $\Delta T$ , la lunghezza della barra  $\Delta x$  e la sua superficie è esprimibile tramite la conducibilità termica del materiale  $\lambda$  ed il Postulato di Fourier:

$$\dot{Q}_x = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$\lambda$  è una proprietà fisica del materiale, misurata in W/(m K), e descrive l'attitudine di un materiale a trasmettere calore. Il valore della conducibilità termica delle diverse sostanze può variare con la

temperatura e la pressione. In linea generale la conducibilità termica del calcestruzzo è di 0,8 – 1,4 W/ (m K) [52].

- Capacità termica specifica

La capacità termica  $C$  di un corpo è il rapporto tra il calore scambiato con l'ambiente  $Q$  e la variazione di temperatura  $\Delta T$  che ne consegue. Indica la quantità di calore da fornire ad una sostanza per innalzarne la temperatura di un K. Una sostanza che ha un valore elevato di capacità termica è in grado di assorbire una gran quantità di calore innalzando di poco la propria temperatura. In formule si avrà:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

La capacità termica è inoltre proporzionale alla capacità termica unitaria  $c$  e alla quantità della sostanza  $N$ :

$$C = N \cdot c$$

In fine, è uguale al prodotto tra il calore specifico per unità di massa  $c_m$  e la massa  $M$ :

$$C = c_m \cdot M$$

Nel sistema internazionale l'unità di misura della capacità termica è il J/K [53].

### **7.1.1. Caratteristiche fisiche, meccaniche e termiche del calcestruzzo con PCM micro-incapsulato**

Le grandezze fisiche, meccaniche e termiche che risentono maggiormente dell'inserimento di PCM micro-incapsulato nella matrice cementizia sono le seguenti:

- Calore d'idratazione:

Diversi studi dimostrano che incorporare PCM nel calcestruzzo riduce la temperatura di picco nella fase d'idratazione in quanto viene assorbito il calore rilasciato in tale processo. Con un PCM micro-incapsulato al 5% in peso di calcestruzzo, la temperatura di picco subisce una riduzione di circa il 28% o, in generale, subisce un ritardo nel raggiungimento di quest'ultima. Inoltre, diversi autori hanno utilizzato modelli numerici per studiare l'andamento della temperatura d'idratazione e lo sviluppo delle sollecitazioni nel calcestruzzo indurito. Aumentando la quantità di PCM o il suo calore latente di fusione, si è notato che il raggiungimento del picco di temperatura è ritardato. Questo ha suggerito agli autori che il PCM micro-incapsulato potrebbe essere utilizzato per controllare ed

attenuare lo stress termico e la fessurazione di conglomerati cementizi, spesso causati da processi d'idratazione troppo rapidi, o dovuti a cicli di gelo e disgelo [47].

- Lavorabilità:

I risultati della ricerca hanno dimostrato che aggiungendo nella miscela PCM micro-incapsulato, la lavorabilità e i valori di flusso delle miscele si riducono. Tale fenomeno, secondo gli autori, potrebbe essere ovviato aumentando il rapporto acqua-cemento o con l'aggiunta di additivi super-fluidificanti che, tuttavia, potrebbero avere ripercussioni sulla resistenza del composto [47].

- Densità e porosità aperta:

La densità delle miscele di calcestruzzo che presentano PCM micro-incapsulato al loro interno risulta essere inferiore rispetto ai conglomerati tradizionali in quanto vengono fisicamente sostituiti materiali con densità maggiore. Basti pensare alla densità della sabbia si aggira intorno ai  $2,64 \text{ kg/m}^3$  e del PCM micro-incapsulato ai  $0,90 \text{ kg/m}^3$ . Inoltre, diversi autori hanno concluso che questo tipo di PCM, incorporato nel conglomerato, comporti un aumento della porosità legato alla scarsa compatibilità con la matrice cementizia ed alla conseguente formazione di microfessure [47].

- Resistenza a compressione:

Gli studi effettuati per quanto riguarda la variazione di resistenza a compressione hanno evidenziato un significativo decremento della stessa. Le principali cause riscontrate sono:

- La rottura delle microcapsule, durante il processo di miscelazione del composto;
- Le reazioni chimiche, che potrebbero interferire con la reazione d'idratazione del cemento;
- L'aumento della porosità;
- L'aggiunta di acqua nell'impasto per compensare la scarsa lavorabilità dovuta all'aggiunta del PCM micro-incapsulato;

La diminuzione media di resistenza a compressione per conglomerati con presenza di oltre il 3% in peso di PCM è generalmente superiore al 40% [47].

- Conducibilità termica:

Gran parte degli articoli presenti in letteratura dimostrano che il calcestruzzo contenente PCM micro-incapsulato subisce una diminuzione della conducibilità termica, probabilmente dovuta all'aumento della porosità e alla sostituzione di una certa percentuale di sabbia, che ha una conducibilità termica maggiore. Per basse concentrazioni di PCM, come il 5% in massa di calcestruzzo, mediamente la conducibilità termica subisce una riduzione del 25-50%.

- Capacità termica specifica:

La capacità termica specifica del calcestruzzo in cui viene incorporato PCM micro-incapsulato aumenta, in particolar modo nel range delle temperature di fusione del PCM a causa della sua capacità termica latente.

### **7.1.2. Caratteristiche fisiche, meccaniche e termiche del calcestruzzo con PCM macro-incapsulato**

Le grandezze fisiche, meccaniche e termiche che risentono maggiormente dell'inserimento di PCM macro-incapsulato o LWA-PCM (Lightweight Aggregates containing PCM) nella matrice cementizia sono le seguenti:

- Lavorabilità:

Con l'inserimento di PCM macro-incapsulato o LWA-PCM nella matrice cementizia, la lavorabilità si riduce, in quanto la fluidità diminuisce. In caso di utilizzo sarebbe necessario aumentare il rapporto acqua/cemento [47].

- Densità:

Nonostante il PCM vada a riempire i pori dell'aggregato leggero, diversi studi hanno riscontrato una diminuzione della densità rispetto ad un comune calcestruzzo confezionato con aggregato tradizionale [47].

- Resistenza a compressione:

Gli studi effettuati sul calcestruzzo contenente PCM macro-incapsulato o LWA-PCM sono molto dispersivi. Sebbene la maggior parte di essi dimostri che la resistenza a compressione subisca una netta diminuzione, una piccola parte, invece, non riscontra differenze apprezzabili. Tale incongruenza potrebbe essere correlata alla variabilità dei parametri utilizzati quali il tipo e la quantità di PCM, il tipo di aggregato leggero utilizzato e la sua capacità di assorbimento, il metodo per incorporare il PCM nel LWA o il metodo di progettazione della miscela [47].

- Conducibilità termica:

Secondo quanto prodotto nella letteratura internazionale, le miscele contenenti PCM macro-incapsulato tendono a presentare un significativo decremento della conducibilità termica. Tale problema potrebbe essere ovviato aggiungendo un materiale conduttivo come rivestimento del sistema [47].

- Capacità termica specifica:

Per quanto riguarda la capacità termica specifica sono stati prodotti risultati discordanti. Ciò è probabilmente dovuto all'utilizzo del metodo DSC per la valutazione del comportamento termico del calcestruzzo contenete PCM macro-incapsulato o LWA-PCM nonostante le limitazioni per lo studio su materiali eterogenei [47].

## 8. Aggregati artificiali o riciclati: produzione ed utilizzo nella matrice cementizia

Gli aggregati sono componenti costituiti da elementi minerali granulari, naturali o artificiali, aventi forma e dimensioni consoni al confezionamento di calcestruzzo. Gli inerti hanno un ruolo fondamentale per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche del conglomerato, in quanto ne compongono circa l'80% del volume totale. È fondamentale che siano di buona qualità e che vi sia una composizione granulometrica sufficientemente e adeguatamente variegata. Inoltre, devono essere adeguatamente resistenti e non gelivi, ovvero quando sono saturi d'acqua, a temperature tali da provocare la formazione di ghiaccio non devono scheggiarsi o sfaldarsi. Non devono contenere solfati né cloruri e devono essere privi di limo, argilla o humus, che potrebbero compromettere l'adesione dell'inerte con la matrice cementizia, o materie organiche, che possono compromettere il processo d'idratazione. La UNI 8520-2:2022 specifica le caratteristiche e i requisiti degli aggregati e filler, definiti e classificati in conformità alla UNI EN 12620, destinati al confezionamento di calcestruzzi di adeguata resistenza e durabilità, in funzione della destinazione d'uso [54].

Gli aggregati per il confezionamento del calcestruzzo possono essere naturali o artificiali e le principali caratteristiche sono descritti nei seguenti paragrafi.

### 8.1. Aggregati naturali

In base alla loro dimensione gli inerti sono principalmente classificati in:

- *Filler*:  $d < 0,063$  mm;
- *Aggregato fine (sabbia e graniglia)*:  $0,063$  mm  $< d < 4$  mm;
- *Aggregato grosso*:  $d > 4$  mm:
  - *Ghiaietto/pietrischetto*:  $4$  mm  $< d < 16$  mm;
  - *Ghiaia/pietrisco*:  $16$  mm  $< d < 32$  mm.

Dove:

- $d$ : è il diametro nominale del granulo;
- Ghiaie, ghiaietti e sabbie sono di origine alluvionale e vengono estratte dai letti dei fiumi o dalle cave ad esso adiacenti;
- Pietrischi, pietrischetti, graniglie e sabbie sono derivati dalla frantumazione delle rocce stesse.

Le categorie sopra citate si differenziano, oltre che per le loro caratteristiche, per la loro forma. Le prime hanno una forma più rotondeggiante, dovuta all'azione di levigatura effettuata dall'acqua

fluviale, mentre i secondi sono più irregolari e presentano spigoli vivi. La qualità dell'aggregato naturale dipende principalmente dalla sua natura petrografica, ovvero dalla sua natura mineralogica che conferisce allo stesso proprietà fisiche e chimiche differenti [54].

## 8.2. Aggregati artificiali o riciclati

Negli ultimi decenni, sono stati svolti studi e ricerche per vagliare la possibilità di utilizzare tecniche di riciclo nell'ambito dei materiali e delle tecnologie da costruzione. L'obiettivo è di andare verso una progettazione più sostenibile, dettata da una sensibilità sempre crescente verso l'ecologia e l'ambiente. L'utilizzo di aggregato riciclato o artificiale, ottenuto dalle demolizioni di edifici, può essere in tal senso una soluzione efficace. Il settore edile rappresenta il più grande produttore di rifiuti nell'Unione Europea e nei paesi industrializzati rappresenta il 30-40% della produzione totale di rifiuti. In Italia ogni anno, mediamente, si producono 68 milioni di tonnellate di inerti, il 78% dei quali vengono recuperati e riutilizzati nelle costruzioni di infrastrutture o per calcestruzzi a bassa resistenza [55].

In base alla loro dimensione gli inerti sono principalmente classificati in:

- *Filler*: granuli passanti al setaccio 0.063 mm.
- *Aggregato fine*:  $D \leq 4$  mm;
- *Aggregato grosso*:  $d \geq 2$  mm e  $D \geq 4$  mm;

Dove:

- D è la dimensione nominale superiore dei granuli espressa in mm;
- d è la dimensione nominale inferiore dei granuli espressa in mm [54].

Nelle norme armonizzate europee l'aggregato riciclato è definito come aggregato minerale risultante dal recupero dei rifiuti di materiale inorganico precedentemente utilizzato per le costruzioni, mentre quello artificiale deriva da un processo industriale che implichi una modificazione termica o di altro tipo. I codici EER (codici utilizzati per classificare rifiuti pericolosi e non all'interno dell'Elenco Europeo dei Rifiuti) più comuni utilizzati in questo ambito sono riportati nella seguente tabella:

EER	Descrizione
010408	scarti di ghiaia e pietrisco, diversi da quelli di cui alla voce 01 04 07
010413	rifiuti prodotti dalla lavorazione della pietra, diversi da quelli di cui alla voce 01 04 07
101311	rifiuti della produzione di materiali compositi a base di cemento, diversi da quelli di cui alle voci 10 13 09 e 10 13 10
170101	cemento
170102	mattoni
170103	mattonelle e ceramiche
170107	miscugli o scorie di cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche, diverse da quelle di cui alla voce 17 01 06
170302	miscele bituminose diverse da quelle di cui alla voce 17 03 01
170504	terra e rocce, diverse da quelle di cui alla voce 17 05 03
170508	pietrisco per massicciate ferroviarie, diverso da quello di cui alla voce 17 05 07
170904	rifiuti misti dell'attività di costruzione e demolizione, diversi da quelli di cui alle voci 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03

Figura 32 principali codici EER di rifiuti utilizzati per gli aggregati riciclati ed artificiali [56]

Questi rifiuti, opportunamente lavorati, sono in grado essere ridotti in aggregati di ottima qualità equiparabili a livello prestazionale a quelli di origine naturale.

Gli impianti per la produzione di aggregati riciclati sono divisi in due categorie:

- Impianti fissi: sono ubicati nel territorio e ricevono i rifiuti prodotti entro una distanza contenuta intorno ai 50 km;
- Impianti mobili: vengono trasportati verso i cantieri di produzione dei rifiuti [56].

Le linee che posso assumere gli impianti di frantumazione degli inerti sono molteplici, ma in linea generale, è composto dai seguenti macchinari:

- Alimentatore: è il componente iniziale dell'impianto. Tale dispositivo consente di caricare il materiale e può essere dotato di una tramoggia che permette di scaricarlo in modo graduale e controllato;
- Frantoio: si possono trovare principalmente due tipologie, a mascelle o a cono. Il primo è un macchinario che, utilizzando due mascelle, schiaccia e frantuma il materiale caricato nel frantoio tramite l'alimentatore mentre il secondo utilizza un cono che ruota ad alta velocità e schiaccia i materiali contro la parete solida;
- Vagliatura: è il processo tramite il quale si suddivide il materiale secondo le diverse pezzature tramite i vagli;
- Nastro trasportatore: sono utilizzati per trasportare l'inerte all'interno dell'impianto di frantumazione. I trasportatori possono essere composti da nastri o da coclee;
- Separatore magnetico: è un componente opzionale dell'impianto ed ha la funzione di separare automaticamente i materiali ferrosi presenti nel materiale.
- Impianto di lavaggio: è un componente molto importante che ha lo scopo di pulire il materiale da impurità quali fango, argilla e polvere [57].



Figura 33 \_Esempio di impianto di frantumazione [57]

Un impianto efficiente deve essere in grado di suddividere il materiale in ingresso in tre principali macro-famiglie quali:

- Materiale nuovamente riutilizzabile;
- Frazione leggera come carta, plastica, legno, impurezze, ecc;
- Frazione metallica.

Le principali fasi di recupero, invece, si possono riassumere come segue:

- *Frantumazione*: operazione finalizzata a ridurre i rifiuti in dimensioni consone a renderli utilizzabili nei conglomerati;
- *Separazione*: serve ad eliminare materiali indesiderati nel prodotto finale,
- *Classificazione per vagliatura*: i granuli vengono separati in base alla loro dimensione in modo da ottenere frazioni granulometriche omogenee [56].

### **8.2.1. Utilizzo degli aggregati artificiali o riciclati nel calcestruzzo**

Gli aggregati riciclati o artificiali possono essere utilizzati sia come prodotto finito sia come materiale grezzo per la manifattura di altri prodotti importanti per il settore delle costruzioni come il calcestruzzo, i prodotti prefabbricati, l'asfalto, la calce ed il cemento. I campi di applicazione di questo tipo di aggregati si possono dividere principalmente in due categorie:

- *Applicazioni non legate*: dove l'aggregato è utilizzato sciolto, come per esempio per le costruzioni stradali, massicciate ferroviarie, ecc.
- *Applicazioni legate*: dove la miscela contiene una sostanza legante come, ad esempio, il cemento o il bitume.

Numerosi studi presenti nella letteratura internazionale hanno dimostrato la fattibilità della produzione di calcestruzzo con aggregati artificiali per uso strutturale ed hanno riportato, a parità di classi di resistenza a compressione le seguenti differenze tra le principali caratteristiche, con un conglomerato tradizionale:

- Resistenza a trazione inferiore di circa il 10%;
- Modulo elastico inferiore di circa il 20%;
- Pari tensione di aderenza con le barre d'acciaio;
- Pari gradi di vulnerabilità alla fessurazione per ritiro igrometrico;
- Caratteristiche di durabilità pressoché equivalenti in termini di resistenza a cicli di gelo e disgelo, resistenza all'attacco solfatico, resistenza alla penetrazione di agenti aggressivi per armature metalliche;
- Nessun problema di cessione di sostanze potenzialmente pericolose per l'ambiente.

La normativa tecnica si sta adeguando alle direttive europee applicando restrizioni sullo smaltimento dei rifiuti, incentivi al riciclaggio dei rifiuti, anche nelle opere pubbliche e l’inserimento della gestione dei rifiuti come parte integrante delle licenze edilizie e dei permessi di demolizione. Inoltre, in seguito all’emanazione della norma UNI EN 12620-2008 “Aggregati per calcestruzzo”, le Norme Tecniche per le Costruzioni con il D.M. 14 gennaio 2008 (attualmente sostituito dal D.M. 17 gennaio 2018) si sono adeguate inserendo l’utilizzo dell’aggregato artificiale o riciclato secondo i limiti riportati nella tabella 11.2.III e dopo aver eseguito analisi preliminari in laboratorio.

**Tabella 11.2.III**

<b>Origine del materiale da riciclo</b>	<b>Classe del calcestruzzo</b>	<b>percentuale di impiego</b>
Demolizioni di edifici (macerie)	= C 8/10	fino al 100%
Demolizioni di solo calcestruzzo e c.a.	≤ C30/37	≤ 30%
	≤ C20/25	fino al 60%
Riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati - da qualsiasi classe da calcestruzzi > C45/55	≤ C45/55	fino al 15%
	Stessa classe del calcestruzzo di origine	fino al 5%

*Figura 34* Tabella 11.2.III Norme Tecniche per le costruzioni [58]

È evidente come la percentuale massima e la tipologia utilizzabile renda difficile lo sviluppo di tale tecnologia in ambito prettamente strutturale, senza contare la tipologia di controlli a cui il materiale deve essere sottoposto. Diverso è il discorso per i calcestruzzi a bassa resistenza che, invece, possono utilizzare fino al 100% di aggregato riciclato purché vengano rispettate le prescrizioni della norma sopra citata. L’utilizzo di questi aggregati nell’abito dell’edilizia è dunque ancora limitato e sulla base di una recente indagine dell’ATECAP, Associazione Tecnico Economica del Calcestruzzo Preconfezionato, le principali cause sono:

- Limitata richiesta di calcestruzzo confezionato con aggregati riciclati;
- Mancanza di certezza sulle caratteristiche tecniche degli aggregati riciclati;
- Difficoltà nel reperimento;
- Mancanza di compatibilità delle proprietà degli aggregati riciclati con le caratteristiche richieste dalle norme tecniche;
- Assenza di offerta di aggregati riciclati nel territorio di competenza;
- I costi associati alla demolizione selettiva sono mediamente maggiori del 20-25% rispetto alle normali demolizioni.

In ultimo vi è anche il pregiudizio, ormai ingiustificato, che tali aggregati non siano consoni alla realizzazione di calcestruzzi strutturali [58].

## 9. Analisi per la caratterizzazione

In questo capitolo verranno specificate le principali analisi che saranno utilizzate per la caratterizzazione. I PCM vengono esaminati dal punto di vista della calorimetria con differenti metodi. Nel caso in esame si andrà ad utilizzare quella differenziale a scansione, la DSC, con la quale sono state analizzate le principali caratteristiche termiche delle paraffine considerate. Due caratteristiche importanti da esaminare per quanto riguarda l'aggregato sono la distribuzione granulometrica e dei pori. Nei successivi paragrafi si andranno ad approfondire tali analisi.

### 9.1. Calorimetria differenziale a scansione: DCS (Differential Scanning Calorimetry)

La calorimetria differenziale a scansione è una delle tecniche maggiormente utilizzate per la caratterizzazione di un materiale, grazie all'elevata quantità di informazioni che si possono ricavare da essa. Un calorimetro DSC è in grado di misurare i flussi di calore associati alle transizioni di fase sia somministrando e sottraendo calore (condizioni dinamiche), sia mantenendo la temperatura costante in maniera controllata (condizioni isoterme). Ciò permette di misurare in quale intervallo di temperatura avvengono le transizioni di fase e le energie ad essi associati.



*Figura 35\_\_DSC strumentazione [60]*

Per poter misurare un flusso di calore, si necessita di un campione di riferimento sollecitato in modo analogo al campione esaminato che permetta di ottenere un segnale differenziale in grado di misurare le interferenze esterne al sistema. Il vantaggio di questa tecnica non distruttiva è che con pochi mg di materiale si riescono ad ottenere svariate informazioni [59]. Il macchinario viene preparato predisponendo il campione in uno dei due crogioli di identiche dimensioni, uno dei quali rimane vuoto per fungere da riferimento per la misura differenziale. I due vani sono tali da resistere alla

temperatura di prova senza interferire con il campione e vengono chiusi ermeticamente tramite l'unità di controllo in modo tale da non avere interferenze dall'esterno. All'interno della fornace viene creata un'atmosfera inerte con un flusso continuo ed uniforme di Ar o N<sub>2</sub>. Ogni variazione di temperatura è dovuta a reazioni esotermiche, che la innalzano, o endotermiche che la abbassano. Tutti i dati relativi a tali variazioni vengono registrati dalle termocoppie ed inviati all'elaboratore che mediante il software dedicato rielabora i valori restituendo i dati di interesse. Con questo strumento è possibile analizzare quantitativamente il meccanismo di funzionamento del calorimetro introducendo le opportune approssimazioni. Viene dimostrato, infatti, che il flusso termico, dato dalla differenza tra flusso di calore erogato dal macchinario ai campioni in modo da mantenerli in equilibrio termico secondo uno schema di temperature preimpostate, è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura tra campione di riferimento e campione analizzato. Si può quindi stimare il flusso termico dalle reazioni che avvengono all'interno del materiale in quanto direttamente proporzionale alla differenza di temperatura tra campione e riferimento [60].

Con la calorimetria in condizioni dinamiche è possibile determinare diverse caratteristiche termiche, tra cui:

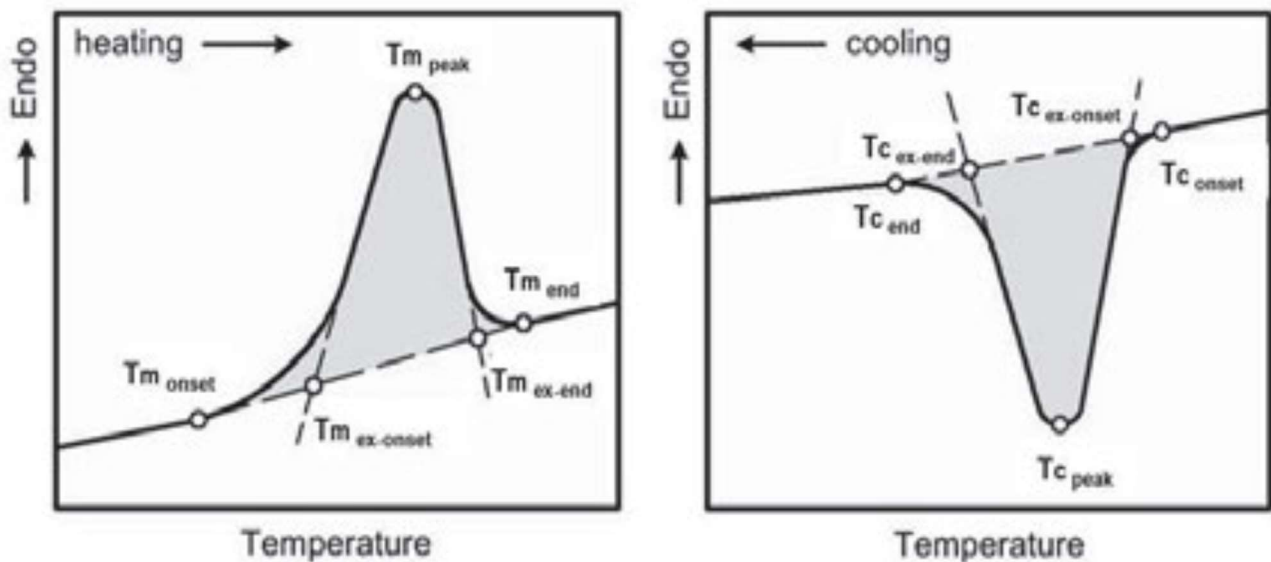
- Temperatura di fusione e cristallizzazione;
- Entalpia di fusione e cristallizzazione;
- Altre caratteristiche termiche come temperatura di transizione vetrosa, grado di cristallinità, comportamento di fase, temperatura di denaturazione delle proteine, ecc.

Maggiore sarà la velocità di scansione, più ci si discosterà dall'equilibrio termodinamico.

Con la calorimetria in condizioni isoterme possono essere invece eseguiti test di stabilità termica, possono essere studiate cinetiche di cristallizzazione e di transizione di fase ed altre tipologie di dati che non verranno trattati in questa tesi.

I risultati dell'analisi DSC permettono di determinare la temperatura di fusione e quella di cristallizzazione. La temperatura di fusione  $T_m$  di un polimero cristallino, come precedentemente detto, corrisponde al passaggio di stato dalla fase cristallina a quella liquido-viscosa. La transizione avviene sempre in un certo intervallo di temperature, la cui ampiezza dipende dalla presenza di difetti lungo la catena del polimero. Il valore di picco della endoterma,  $T_{m\ peak}$ , è influenzato dalla natura del materiale, dalle condizioni con le quali si sviluppano i cristalli e dalla velocità di riscaldamento. Allo stesso modo, la temperatura di cristallizzazione  $T_c$  corrisponde al punto minimo dell'endoterma nell'intervallo di temperatura a cui avviene la cristallizzazione del materiale stesso. La difficoltà delle molecole dei polimeri a cristallizzare, però, fa sì che vi sia un allargamento del relativo valore di

picco  $T_{c\ peak}$  e un sottoraffreddamento più marcato con differenze di decine di gradi tra  $T_m$  e  $T_c$ . La temperatura di cristallizzazione dipende dalla velocità di raffreddamento, tanto veloce quanto minore sarà la  $T_c$  osservata. Nella *Figura 36* sono rappresentati due esempi di curve ottenute tramite il DSC in cui si notano le temperature sopra indicate. La conoscenza di queste temperature è importante per stabilire le condizioni ottimali di lavorazione e per avere un determinato intervallo di temperature di utilizzo in base al materiale stesso [59].



**Figura 36** \_Curve tipo risultanti da analisi DSC di un polimero con focus in corrispondenza della fusione e della cristallizzazione [59]

I termogrammi DSC riportano un segnale espresso in mW in funzione della temperatura o del tempo. L'area sottesa dalla curva rappresenta l'energia coinvolta nella transizione di fase e viene convertita dallo strumento in J/g. L'area  $A$  di un picco DSC è solitamente espressa anch'essa in J/g ed è data dall'equazione:

$$A = \frac{(m \Delta H)}{(\lambda g)}$$

Dove:

- $m$  è la massa del campione;
- $\Delta H$  è la variazione di entalpia associata alla transizione;
- $\lambda$  è la conduttività termica;
- $g$  è un fattore geometrico strumentale.

L'entalpia di un materiale è l'energia da fornire o sottrarre per il passaggio da una temperatura ad un'altra. In particolare, l'entalpia di fusione  $\Delta H_m$  è il calore necessario a portare una mole di sostanza

dallo stato cristallino a quello liquido o liquido-viscoso. Al contrario l'entalpia di cristallizzazione,  $\Delta H_c$ , è il calore sviluppato nella transizione opposta [59].

## 9.2. Analisi granulometrica per setacciatura

L'analisi granulometrica è normata secondo la UNI EN 933-1 ed ENI EN 933-2 ed ha lo scopo di determinare la distribuzione dei granuli di un determinato composto mediante il metodo della setacciatura. Può essere applicata ad aggregati di origine naturale o artificiale, inclusi gli aggregati leggeri fino ad una dimensione nominale di 63 mm ed esclusi i filler. La prova consiste nel selezionare una determinata quantità di materiale che verrà suddiviso in classi granulometriche, per mezzo di una serie di setacci posizionati con le relative maglie in ordine decrescente. Tutti i setacci hanno fori quadrati con rete metallica per diametri nominali  $D \geq 4$  mm e in tela metallica per diametri nominali  $D \leq 4$  mm. Il setacciatore, scuotendo il campione in maniera circolare e sussultoria, fa in modo che i granuli di dimensioni minori alla maglia passino al setaccio sottostante e che quelli di dimensione nominale uguale o maggiore vengano trattenuti. Tale operazione viene eseguita previo lavaggio del campione e successiva essiccazione in forno o per via secca qualora tale operazione alteri le caratteristiche fisiche di alcuni particolari tipi di aggregato leggero. La quantità minima di aggregato per eseguire la prova viene definita nel prospetto 1, riportato nella *Figura 37*, della norma e dipende dalla dimensione massima degli inerti:

Dimensione massima dell'aggregato D (mm)	Massa della porzione di prova (minimo) (kg)
63	40
32	10
16	2.6
8	0.6
$\leq 4$	0.2

*Figura 37* \_Quantità minima del campione di prova [61]

### 9.2.1. Procedimento dell'analisi granulometrica

Una volta identificata, la porzione di prova va essiccata in forno a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  fino ad ottenere massa costante  $M_1$ . Tale operazione permette di eliminare l'acqua o l'umidità in eccesso presente nell'aggregato ed ottenere il peso secco da registrare. I principali passaggi successivi sono i seguenti:

- Lavaggio

Prima di procedere alla setacciatura è necessario lavare il campione di prova. A tal fine è necessario inserire quest'ultimo in un recipiente ed aggiungere acqua fino a coprirlo agitandolo vigorosamente. Con il setaccio da 63µm e da 2 mm si procederà all'eliminazione del materiale fine di sospensione fino a che le acque di lavaggio non risulteranno limpide e prive di residui. Tutto il materiale trattenuto viene essiccato al forno ad una temperatura di 110±5°C fino a raggiungere massa costante, la quale, una volta raffreddata andrà pesata e registrata come M<sub>2</sub>.

- Setacciatura

Una volta eseguito il lavaggio e l'essiccazione del campione, la porzione residua va setacciata impilando i setacci da quelli con la maglia più grande a quelli con la maglia più piccola, partendo dall'alto, oltre al coperchio posizionato a chiusura nella parte superiore ed al fondello nella parte inferiore. La colonna va movimentata manualmente o meccanicamente per un determinato periodo di tempo ed una volta completata tale operazione, i setacci vanno tolti singolarmente assicurandosi che non vi sia perdita di materiale.

- Pesatura

Il materiale trattenuto ai vari setacci va misurato e registrato. Partendo dall'alto avremo R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>...R<sub>n</sub> ed il materiale presente nel fondello P.

### 9.2.2. Interpretazione dei risultati

La massa trattenuta a ciascun setaccio è espressa come percentuale della massa totale M<sub>1</sub>:

$$\left(\frac{R_i}{M_i}\right) \times 100$$

La percentuale cumulativa del passante ad ogni setaccio, escluso quello da 63 mm, rispetto alla massa essiccata di origine, è calcolata come segue:

$$100 - \sum \left(\frac{R_i}{M_i}\right) \times 100$$

Inoltre, per ogni setaccio avremmo una percentuale di trattenuto e di passante.

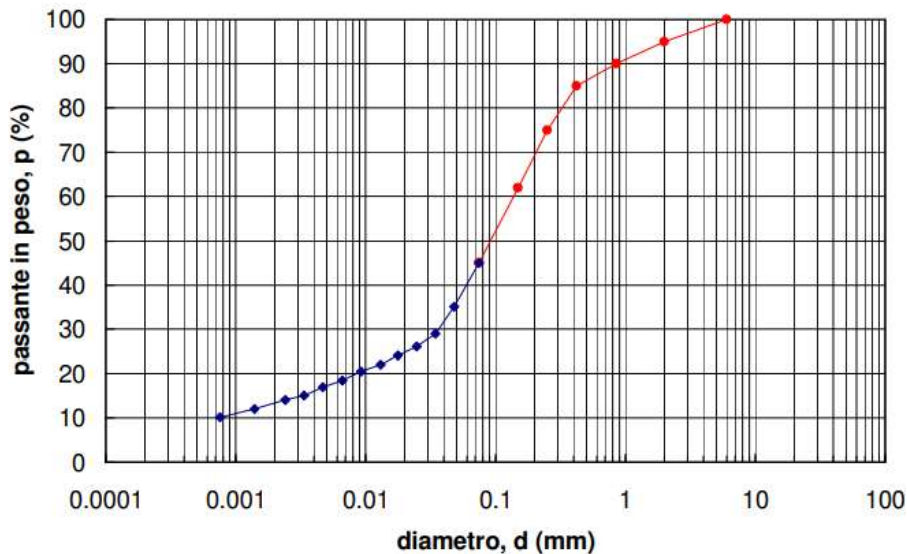
Sia T<sub>i</sub> il trattenuto al setaccio i avremo:

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^i m_j}{m_{tot}} \cdot 100$$

Sia  $P_i$  il passante al setaccio  $i$  avremo:

$$P_i = \frac{\sum_{j=i+1}^N m_j}{m_{tot}} \cdot 100 = 100 - T_i$$

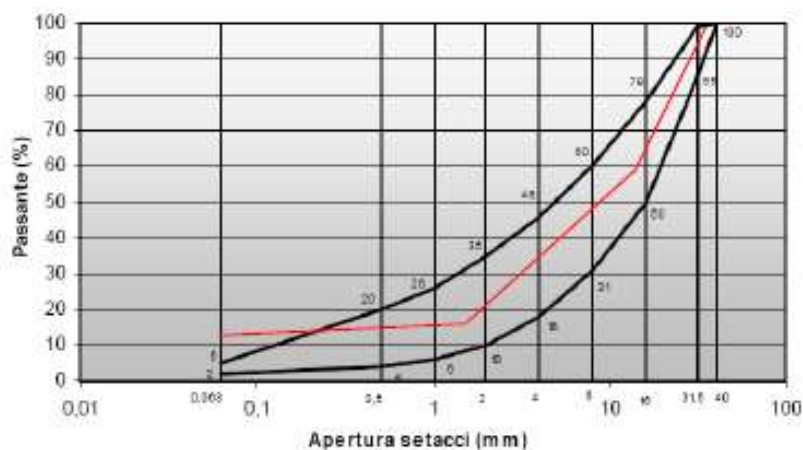
Dai risultati ottenuti, graficando la percentuale cumulativa di passante per ciascun setaccio in funzione della maglia del setaccio stesso si ottiene la curva granulometrica della porzione di prova come rappresentato nella *Figura 38*:



*Figura 38* Esempio di curva granulometrica [61]

In base alla forma della curva ed alla lunghezza delle sue code il materiale risulterà avere una prevalenza di granuli grossi piuttosto che fini o viceversa o una granulometria ben assortita.

In fine, a seconda dell'utilizzo a cui è destinato un materiale, i capitolati presentano fusi granulometrici, ovvero range che devono essere rispettati affinché il materiale sia conforme [61].



*Figura 39* Esempio di fuso granulometrico [61]

### 9.3. Analisi della densità

Come già detto, la densità è il rapporto tra la massa ed il volume di una sostanza. La massa viene misurata come peso del campione, misurato con una semplice bilancia analitica, mentre il volume viene misurato tramite il picnometro ad elio. Solitamente questo macchinario è costituito da due celle calibrate,  $V_1$  e  $V_2$ , collegate tra loro tramite una valvola. L'elio è contenuto nella cella di riferimento, a pressione e volume noti, mentre la cella che contiene il campione viene depressurizzata mediante una pompa a vuoto. Raggiunto il grado di vuoto impostato  $P_1$  si apre la valvola posta tra le due celle e si lascia espandere il gas verso  $V_2$ . Il sistema raggiunge un nuovo equilibrio termodinamico e applicando la legge di Boyle si ottiene l'espressione:

$$V_g = V_1 + V_2 - \frac{P_1 V_1}{P_2} [62].$$

Dove  $V_g$  è il volume del campione esaminato.

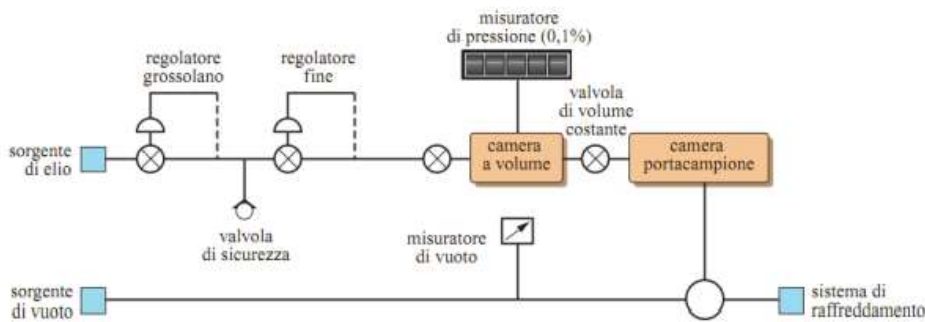


Figura 40\_Schema picnometro ad elio [62]

### 9.4. Analisi della porosità

I materiali porosi possono essere definiti come solidi che presentano vuoti in determinate frazioni del loro volume, ovvero che presentano al loro interno delle discontinuità di differente forma e dimensione. La porosità di un materiale è rappresentabile come delle cavità a livello microstrutturale.

Esse

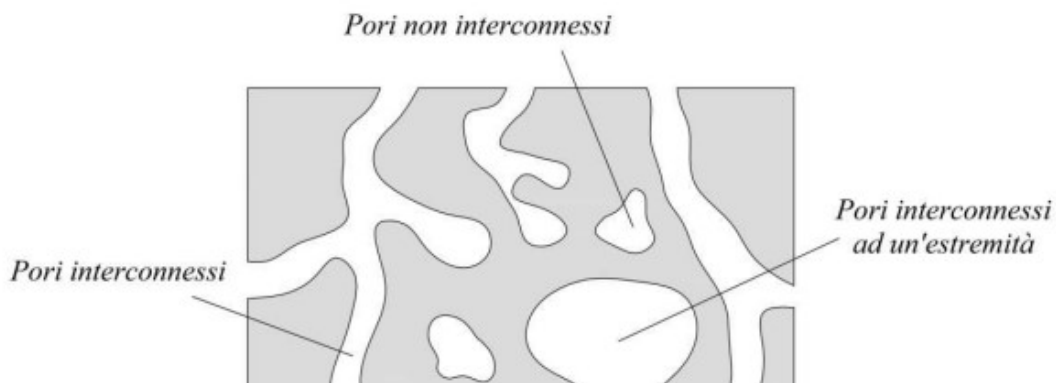


Figura 41\_Rappresentazione delle tipologie di pori presenti in un materiale [63]

formano una rete continua ed interconnessa collegata all'ambiente esterno, da entrambe le estremità o solo da una, o possono essere pori isolati e dispersi nel materiale, cioè non interconnessi all'esterno, come rappresentato nella *Figura 41*.

In base alla dimensione i pori vengono così classificati:

- *Macropori*: diametro superiore a 50  $\mu\text{m}$ ;
- *Mesopori*: diametro compreso tra i 2 ed i 50  $\mu\text{m}$ ;
- *Micropori*: diametro inferiore ai 2  $\mu\text{m}$ .

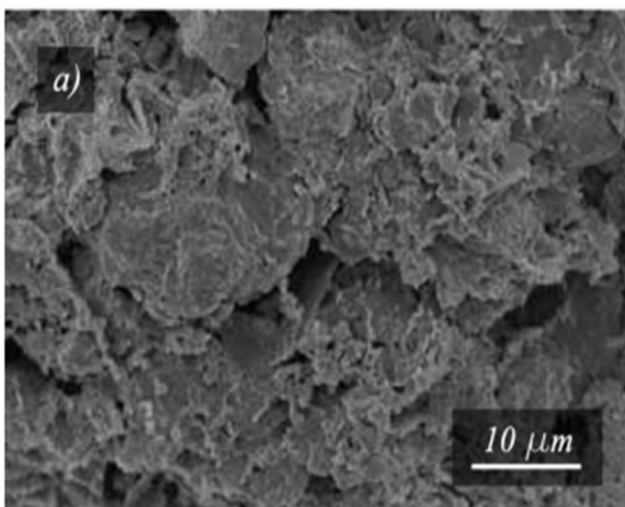
La porosità è una caratteristica microstrutturale di un elemento, che ne influenza direttamente le proprietà fisico-chimiche del materiale stesso, migliorando o pregiudicando la resistenza meccanica, la capacità di trasmissione del calore o di consentire ai fluidi di circolare in esso. Inoltre, è una grandezza scalare genericamente definita con il seguente rapporto:

$$\Phi = \frac{V_p}{V_t}$$

Dove:

- $V_p$ : volume dei pori;
- $V_t$ : volume totale.

La porosità intesa come quantità di vuoti, di una determinata forma, distribuzione e tortuosità, è strettamente legato alla modalità con cui si sono formati i materiali, ovvero alla loro genesi. Differenti sono le microstrutture degli stessi elementi formati con processi differenti. Un chiaro esempio ne



*Figura 42* Micropori materiale ceramico [63]

sono le rocce. Quelle sedimentarie si formano grazie alla stratificazione di materiale detritico, alla precipitazione di minerali negli spazi intergranulari e all'effetto del peso dei vari strati che le compongono, con un lento processo di compattazione. Le arenarie, ad esempio, hanno una porosità compresa tra il 10% ed il 45% che varia anche in base alla profondità di formazione, tanto minore quanto maggiore è quest'ultima. Le rocce magmatiche, invece, che si formano da un

brusco o lento raffreddamento con successiva solidificazione del magma, hanno porosità che possono variare dal 0.5 % al 25%. Nel caso di nostro interesse, ovvero per quanto riguarda i materiali ceramici,

la formazione della microstruttura è strettamente legata alle tecniche di fabbricazione, in particolar modo all'essiccamento ed alla cottura. Infatti, lo smaltimento di acqua in eccesso produce un avvicinamento delle particelle che causa il ritiro del materiale e la formazione di un reticolo di pori sia interconnessi che chiusi. Infine, nel processo di cottura, che avviene a 1000°C, avvengono trasformazioni stabili ed irreversibili del materiale che portano alla formazione di neo-composti resistenti che subiscono un'ulteriore riduzione della porosità. Il laterizio generalmente ha una percentuale di vuoti che va dal 30% al 40% con valori medi di diametro compresi tra 0.5 µm e 1.5 µm.

Per la misurazione della porosità esistono differenti metodi che hanno lo scopo di misurare il volume dei pori presenti nel materiale. Quest'ultime possono essere riassunte come segue:

- Metodo diretto: consiste nella misurazione del volume occupato da un campione di materiale e successivamente da quello occupato dallo stesso ridotto in polvere;
- Assorbimento di gas: consiste nella misurazione della quantità di gas che può essere assorbita dal materiale;
- Intrusione forzata di mercurio: consiste nella misurazione della porosità effettiva, convogliando il mercurio nei pori del mezzo ad una pressione tale da riempire le cavità presenti al suo interno e determinare il volume occupato dai pori.
- Imbibizione: consiste nella misurazione della porosità effettiva, immergendo il campione in un liquido fino a raggiungere la saturazione dello stesso. Misurando il volume ed il peso del materiale prima e dopo tale operazione è possibile determinare la porosità del materiale;
- Metodo ottico: consiste nell'osservazione statisticamente significativa di sezioni di materiale mediante analisi microscopica e macroscopica.

Nel caso oggetto di studio, è stato utilizzato il metodo dell'intrusione forzata di mercurio per la determinazione dei vuoti presenti nei campioni di laterizio. La porosimetria a mercurio è una tecnica ampiamente utilizzata per la caratterizzazione dei materiali porosi. Essendo il mercurio un liquido avente un angolo di contatto maggiore di 90°, non può penetrare naturalmente nella matrice del campione di prova, che solitamente ha un volume compreso tra 1 e 5 cm<sup>3</sup>. Pertanto, attraverso all'applicazione di una pressione esterna, il liquido è in grado di infiltrarsi all'interno del materiale e raggiungere anche le cavità più piccole. Quest'ultima viene calcolata tramite l'equazione di Washburn:

$$p = - \frac{2\gamma \cos \theta}{r}$$

Dove:

- $p$ : è la pressione assoluta esercitata espressa in  $\text{N/m}^2$ ;
- $\gamma$ : è la tensione superficiale del mercurio espressa in  $\text{N/m}$ ;
- $\theta$ : è l'angolo di contatto del sistema mercurio-aria;
- $r$ : è il raggio del poro.

Considerando noti  $\gamma$  e  $\theta$ , con valori rispettivamente di  $4.80 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}$  e  $141.3^\circ$  ed ipotizzando che tutti i pori siano cilindrici otterremo la seguente formula semplificata:

$$r = - \frac{75000}{p}$$

Se la pressione ricavata dallo strumento raggiunge i 2000 bar lo strumento è in grado di determinare un volume dei pori compreso tra  $0.0037$  e  $7.5 \mu\text{m}$ , arrivando anche a  $0.0018 \mu\text{m}$  per valori di pressione di 4000 bar. Il campione viene preparato essiccando e pesando circa  $1 \text{ cm}^3$  di materiale ed inserendolo nel dilatometro in cui viene applicato il sottovuoto. Successivamente viene inserito il mercurio a pressione ambiente, che viene via via aumentata per favorire l'ingresso del mercurio nei pori. La variazione di pressione è proporzionale al volume dei pori e viene registrata per mezzo di un sistema di elaborazione dati. Si ricava quindi il raggio dei pori  $r$  nota la pressione  $p$  [63]. La conoscenza della porosità, della dimensione dei pori e del loro volume è di fondamentale importanza per la caratterizzazione dei materiali porosi: la permeabilità, l'assorbimento, la densità, la resistenza e altri fattori influenzati dalla porosità dei materiali determinano il modo in cui essi possono essere utilizzati.

## **10. Caratterizzazione sperimentale di materiali per la realizzazione di un prototipo**

Dopo aver analizzato in linea teorica tutte le analisi e le nozioni occorrenti per la realizzazione della caratterizzazione dell'aggregato oggetto di studio, si procederà a descrivere quanto eseguito. Innanzi tutto, si descriverà il materiale selezionato e le caratteristiche da esso presentato, come sono stati ottenuti gli aggregati necessari alla lavorazione, come sono stati calcolati i propri vuoti ed in fine come è stato applicato il PCM nei pori raggiungibili dall'esterno.

### **10.1. Materiali utilizzati**

I materiali scelti per questo tipo di applicazione sono delle paraffine e dei blocchi Poroton macinati utilizzati come mezzo poroso, ovvero come aggregato della matrice cementizia. Nei paragrafi successivi verranno esplicitate le principali caratteristiche di quest'ultimi.

#### **10.1.1. PCM: paraffine**

I materiali paraffinici selezionati per la sperimentazione in esame sono dell'azienda Rubitherm Technologies GmbH, esperta nella tecnologia legata ai PCM. Tra i vari prodotti ne sono stati presi in considerazione in particolare due, le cui temperature di fusione sono state ritenute adatte a tale applicazione:

- RT44HC
- RT62HC

Entrambi sono PCM puri che utilizzano processi di cambiamento di fase tra solido e liquido, cioè fusione e solidificazione, per immagazzinare grandi quantità di energia termica a temperatura quasi costante. Questi materiali sono un mezzo molto efficace di immagazzinamento del calore anche applicati a piccoli volumi ed a basse differenze di temperature di esercizio [64].

Il PCM RT44HC possiede le seguenti caratteristiche:

- elevata capacità di accumulo di energia termica;
- stoccaggio e rilascio di calore a temperature quasi costanti;
- nessun effetto sovra raffreddamento, chimicamente inerte;
- prodotto di lunga durata, con prestazioni stabili durante i cicli di cambiamento di fase.

Inoltre, sono riportate nella *Tabella 4* le principali caratteristiche termo-fisiche [65]:

Proprietà	U.M.	RT44HC
Campo di fusione	°C	41-44
Campo di solidificazione	°C	44-40
Capacità di accumulo del calore $\pm 7,5\%$ Combinazione di calore latente e sensibile in un intervallo di temperatura di 35 °C a 50 °C	kJ/kg Wh/kg	250 70
Capacità termica specifica	kJ/kg*K	2
Densità solida	kg/l	0,8
Densità liquida	kg/l	0,7
Conducibilità termica (per entrambe le fasi)	W/(m*K)	0,2
Espansione volumetrica	%	12,5
Punto d'infiammabilità	°C	>180
Max.temperatura d'esercizio	°C	70

*Tabella 4* \_Caratteristiche paraffina RT44HC

Il PCM RT62HC è caratterizzato dalle seguenti caratteristiche:

- elevata capacità di accumulo di energia termica;
- sovra raffreddamento limitato;
- prestazioni stabili durante i cicli di cambiamento di fase;
- non tossico.

Inoltre, sono riportate nella *Tabella 5* le principali caratteristiche termo-fisiche [66]:

Proprietà	U.M.	RT62HC
Campo di fusione	°C	62-63
Campo di solidificazione	°C	62
Capacità di accumulo del calore $\pm 7,5\%$ Combinazione di calore latente e sensibile in un intervallo di temperatura di 35 °C a 50 °C	kJ/kg Wh/kg	230 64
Capacità termica specifica	kJ/kg*K	2
Densità solida	kg/l	0,85
Densità liquida	kg/l	0,84
Conducibilità termica (per entrambe le fasi)	W/(m*K)	0,2
Max.temperatura d'esercizio	°C	90
Corrosività	-	Effetti corrosivi con il metallo

*Tabella 5* \_Caratteristiche paraffina RT62HC

I materiali paraffinici considerati in questa tesi sono caratterizzati dai seguenti termogrammi:

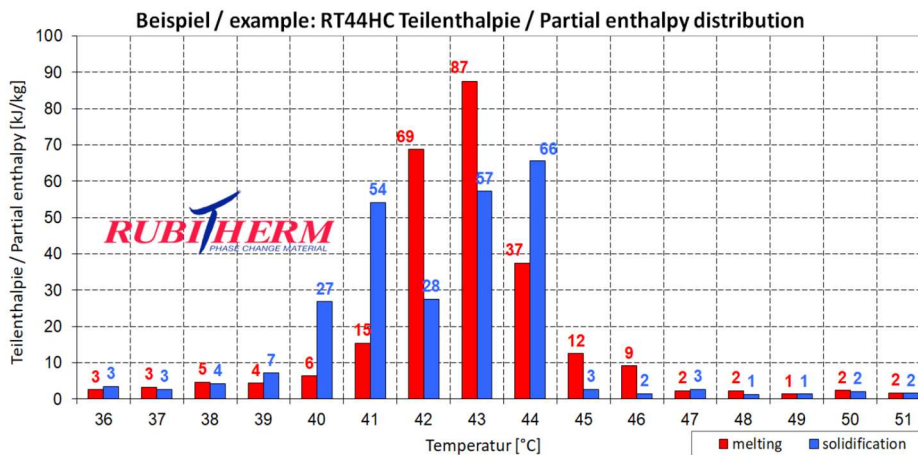


Figura 43 \_Termogramma paraffina RT44HC [65]

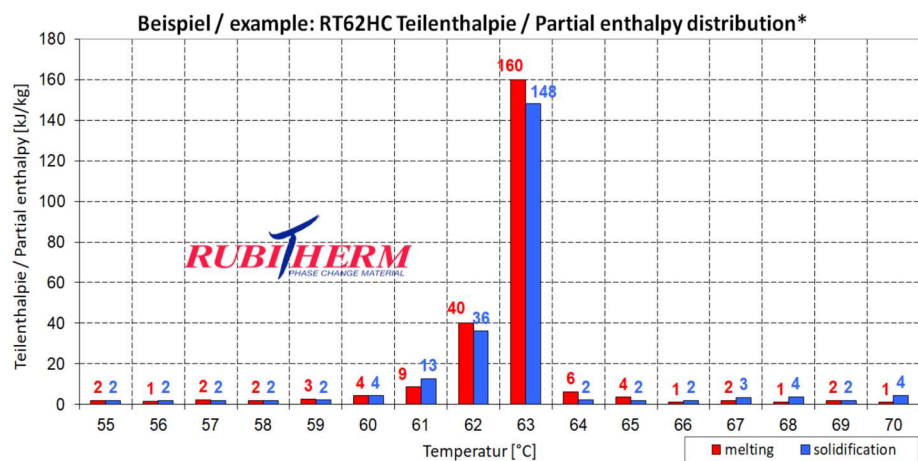


Figura 44 \_Termogramma paraffina RT62HC [66]

Da questi termogrammi si evince che:

- il campo di fusione della paraffina RT44HC è compreso nell'intervallo che va dai 41°C ai 44°C mentre quello di solidificazione è compreso tra i 40°C e i 44°C;
- il campo di fusione della paraffina RT62HC è compreso nell'intervallo che va dai 62°C ai 63°C così come quello di solidificazione.

A parità di massa, la paraffina RT44HC, ha una variazione di entalpia di fusione e di solidificazione maggiore rispetto alla paraffina RT62HC. Ciò vuol dire che sarà necessario fornire o sottrarre maggior energia per la transizione di fase della prima rispetto alla seconda, ma che tale fenomeno avverrà in un range minore di temperatura.

### 10.1.2. Aggregato da macinazione di blocchi Poroton

Come materiale di recupero per confezionare l'aggregato sono stati utilizzati i blocchi di laterizio Poroton, mattoni che, in seguito alla cottura, risultano alleggeriti da alveoli ottenuti dall'inserimento di una determinata quantità di additivi alleggerenti nell'argilla cruda, prima della fase di formatura. In base al tipo di additivazione si possono ottenere macro o micro-pori, inserendo per esempio polistirolo nel caso dei primi o farine di cellulosa o fossili per i secondi. Il risultato finale è frutto dello stesso principio di realizzazione: il materiale inserito, durante la cottura, brucia scindendosi in anidride carbonica ed acqua, lasciando nell'impasto numerosi alveoli.



*Figura 45\_ Pori Blocchi Poroton [67]*

L'argilla cotta normalmente, a seconda del tipo, presenta valori di densità che si aggirano tra i 1800 ed i 2000 kg/m<sup>3</sup>, a differenza dei blocchi Poroton che invece possono arrivare fino a 1400 o 1500 kg/m<sup>3</sup> (anche se livelli ottimali di resistenza meccanica e termica si ottengono con valori che vanno da 1450 a 1600 kg/m<sup>3</sup>). Questa tecnica conferisce differenti caratteristiche termofisiche a questo materiale. La presenza dei pori, infatti, comporta, a parità di volume, una diminuzione di peso ma anche una diminuzione della conducibilità termica con conseguente aumento dell'inerzia termica. Dal punto di vista meccanico invece, non vi è perdita di resistenza tale da pregiudicare l'utilizzo in edilizia [67]. Tali caratteristiche lo rendono il materiale ideale per assolvere alla funzione di vettore per inglobare il volume prestabilito di PCM.

### 10.2. Confezionamento dell'aggregato ed analisi granulometrica

L'aggregato necessario è stato creato appositamente in laboratorio tramite l'utilizzo di un frantoio a mascelle. Il materiale viene inserito al suo interno e passa attraverso la tramoggia per poi arrivare alla camera di frantumazione. La riduzione granulometrica avviene nella zona cuneiforme posta tra il braccio fisso e quello mosso dall'albero di trasmissione eccentrico. Tale movimento ellittico schiaccia il campione per poi lasciarlo cadere per gravità. Non appena il campione raggiunge una finezza inferiore alla larghezza della fessura di scarico cade nel raccogliatore rimovibile all'interno del frantoio. La regolazione continua in scala della larghezza della fessura assicura una riduzione ottimale delle dimensioni in base alla larghezza impostata.



**Figura 46** Frantoio a mascelle utilizzato per la formazione dell'aggregato



**Figura 47** Materiale risultante dalla macinazione del blocco Poroton

Nel caso oggetto di studio sono state ricavate cinque pezzature granulometriche, ottenute impostando il macchinario in modo tale da ottenere i gruppi 4-8 mm, 2-4 mm, 1-2 mm, 0.5-1 mm e 0-0.5 mm.



**Figura 48** Classi granulometriche ottenute. Da destra verso sinistra 4-8 mm, 2-4 mm, 1-2 mm, 0.5-1 mm e 0-0.5 mm.

Successivamente si è provveduto al lavaggio delle stesse per rimuovere il filler, con i setacci da 0,063 e 2 mm sovrapposti, e all'essiccazione in forno ad una temperatura di 105°C fino al raggiungimento di massa costante. Una volta che il materiale si è freddato, da ogni gruppo sono stati ricavati tre campioni da 250 g, ognuno dei quali è stato setacciato per 90 secondi e ad una frequenza di 80 hertz, con il seguente gruppo di vagli disposti in ordine decrescente: 63 mm, 31.5 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.125 mm e 0.063 mm.



*Figura 49* \_Setacci con le differenti maglie



*Figura 50* \_Setacciatore meccanico

Sono di seguito riportate le tabelle relative alla setacciatura, eseguita con vibrovaglio, o vaglio meccanico, dei campioni esaminati. Per ogni gruppo di tre campioni relativo alle varie frazioni granulometriche sono state misurate e riportate le percentuali di trattenuto e di passante, parziali e totali, sia dell'intero campione che dei singoli setacci.

Campione	Massa [g]	Analisi granulometrica Frazione 4-8 mm [g]												
		63 mm	16 mm	31.5 mm	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.500 mm	0.250 mm	0.125 mm	0.063 mm	Filler	Perdita [g]
1	250	0	0	0	3	234	250	250	250	250	250	250	250	0
2	250	0	0	0	2	242	250	250	250	250	250	250	250	0
3	250	0	0	0	2	232	249	249	249	249	249	249	249	1
<b>Sommatoria</b>	750	0	0	0	7	708	749	749	749	749	749	749	749	1
<b>Trattenuto in M.-%</b>		0,00	0,00	0,00	0,93	94,40	99,87	99,87	99,87	99,87	99,87	99,87	99,87	
<b>Passante in M.-%</b>		100,00	100,00	100,00	99,07	5,60	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,00	

Campione	Massa [g]	Analisi granulometrica Frazione 2-4 mm [g]												
		63 mm	16 mm	31.5 mm	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.500 mm	0.250 mm	0.125 mm	0.063 mm	Filler	Perdita [g]
1	250	0	0	0	0	12	247	250	250	250	250	250	250	0
2	250	0	0	0	0	12	248	250	250	250	250	250	250	0
3	250	0	0	0	0	10	246	248	248	248	248	248	248	2
<b>Sommatoria</b>	750	0	0	0	0	34	741	748	748	748	748	748	748	2
<b>Trattenuto in M.-%</b>		0,00	0,00	0,00	0,00	4,53	98,80	99,73	99,73	99,73	99,73	99,73	99,73	
<b>Passante in M.-%</b>		100,00	100,00	100,00	100,00	95,47	1,20	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,00	

Campione	Massa [g]	Analisi granulometrica Frazione 1-2 mm [g]												
		63 mm	16 mm	31.5 mm	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.500 mm	0.250 mm	0.125 mm	0.063 mm	Filler	Perdita [g]
1	250	0	0	0	0	0	12	246	249	249	249	249	249	1
2	250	0	0	0	0	0	11	247	250	250	250	250	250	0
3	250	0	0	0	0	0	12	246	248	248	248	248	249	1
<b>Sommatoria</b>	750	0	0	0	0	0	35	739	747	747	747	747	748	2
<b>Trattenuto in M.-%</b>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,67	98,53	99,60	99,60	99,60	99,60	99,73	
<b>Passante in M.-%</b>		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	95,33	1,47	0,40	0,40	0,40	0,40	0,27	

Campione	Massa [g]	Analisi granulometrica Frazione 0.5-1 mm [g]												
		63 mm	16 mm	31.5 mm	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.500 mm	0.250 mm	0.125 mm	0.063 mm	Filler	Perdita [g]
<b>1</b>	250	0	0	0	0	0	0	32	250	250	250	250	250	0
<b>2</b>	250	0	0	0	0	0	0	28	248	249	249	249	249	1
<b>3</b>	250	0	0	0	0	0	0	25	249	250	250	250	250	0
<b>Sommatoria</b>	750	0	0	0	0	0	0	85	747	749	749	749	749	1
<b>Trattenuto in M.-%</b>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,33	99,60	99,87	99,87	99,87	99,87	
<b>Passante in M.-%</b>		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	88,67	0,40	0,13	0,13	0,13	0,13	

Campione	Massa [g]	Analisi granulometrica Frazione 0-0.5 mm [g]												
		63 mm	16 mm	31.5 mm	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0.500 mm	0.250 mm	0.125 mm	0.063 mm	Filler	Perdita [g]
<b>1</b>	250	0	0	0	0	0	0	1	39	165	226	244	250	0
<b>2</b>	250	0	0	0	0	0	0	0	40	161	223	243	250	0
<b>3</b>	250	0	0	0	0	0	0	0	13	149	221	242	249	1
<b>Sommatoria</b>	750	0	0	0	0	0	0	1	92	475	670	729	749	1
<b>Trattenuto in M.-%</b>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	12,27	63,33	89,33	97,20	99,87	
<b>Passante in M.-%</b>		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,87	87,73	36,67	10,67	2,80	0,13	

Tabella 6\_Risultati dell'analisi granulometrica

Sono state così ottenute le curve granulometriche per tutte le pezzature considerate:

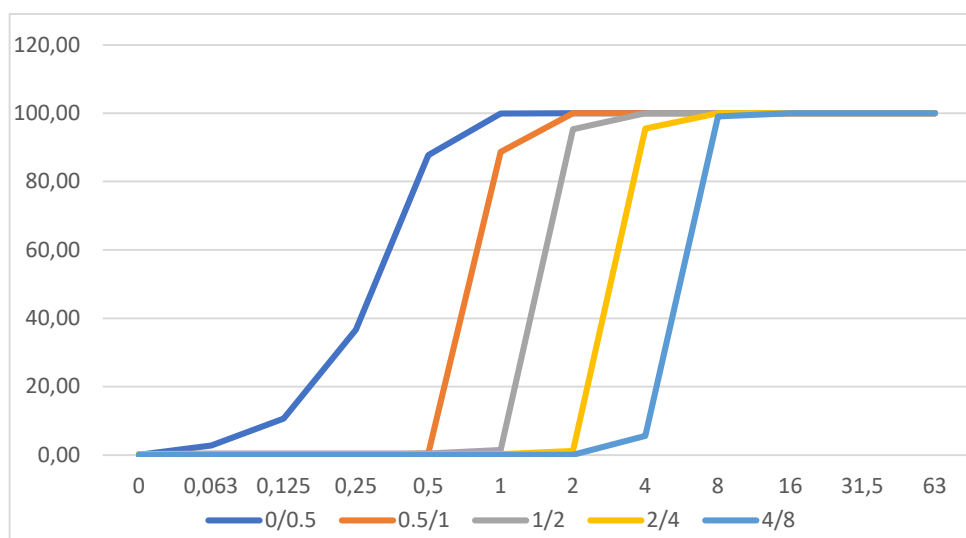


Figura 51\_Curve granulometriche dei gruppi 4-8 mm, 2-4 mm, 1-2 mm, 0.5-1 mm e 0-0.5 mm

Come si evince dalla *Figura 51*, i gruppi 1-2 mm, 0.5-1 mm e 0-0.5 mm, risultano essere perlopiù composti da aggregato fine e filler, motivo per il quale sono stati scartati per quanto riguarda la successiva fase di impregnazione dei pori con il PCM. Ipoteticamente, quindi, nel mix design per calcestruzzo potrebbero essere inseriti solo i gruppi 4-8 mm e 2-4 mm. La quantità di PCM da utilizzare verrà valutato in seguito alla determinazione dei pori presenti in tali frazioni granulometriche.

### 10.3. Determinazione dei vuoti e della densità

Con il porosimetro a mercurio, utilizzando cioè il metodo dell'intrusione forzata di mercurio sopra descritto, è stata ricavata la composizione dei pori in volume percentuale. Nei due gruppi granulometrici più rappresentativi, ovvero il 2-4 mm e il 4-8 mm, sono stati individuati per ogni campione da 250g, i pori aperti e quelli chiusi, ottenendo la percentuale dei pori totali come somma delle medie di quest'ultimi come riportato nella *Tabella 7*:

	Numero identificativo dei campioni						Media
	Campione_1 (2-4 mm)	Campione_2 (2-4 mm)	Campione_3 (2-4 mm)	Campione_1 (4-8 mm)	Campione_2 (4-8 mm)	Campione_3 (4-8 mm)	
Pori aperti (%)	34,33	34,3	34,29	35,59	35,02	/	34,70
Pori chiusi (%)	2,95	1,64	1,78	0,45	0,79	/	1,52
Pori totali (%)	37,28	35,94	36,07	36,04	35,81	/	36,23

Tabella 7\_Composizione dei pori in volume %

I pori presenti, a loro volta suddivisi in tre tipologie:

- Pori gel: le cui dimensioni vanno da 1 nm to 10 nm;
- Pori capillari: le cui dimensioni vanno da 10 nm to 10 µm;
- Pori d'aria: le cui dimensioni sono inferiori a 10 µm.

Nella *Tabella 8* sono riportate le tipologie di pori espresse in volume percentuale per ogni singolo campione e come media su tutti e sei i valori riportati:

Tipo di pori	Numero identificativo dei campioni						Media
	Campione_1 (2-4 mm)	Campione_2 (2-4 mm)	Campione_3 (2-4 mm)	Campione_1 (4-8 mm)	Campione_2 (4-8 mm)	Campione_3 (4-8 mm)	
Pori gel	2,85	2,95	2,71	1,85	2,12	1,71	2,37
Pori capillari	94,43	94,26	94,38	94,94	92,35	96,00	94,39
Pori d'aria	2,72	2,79	2,92	3,21	5,53	2,28	3,24

*Tabella 8*\_Tipologia di pori in volume percentuale

È stata successivamente calcolata la densità apparente del materiale, ovvero quella che prende in considerazione il volume totale occupato dal solido, cioè il suo ingombro esterno, compresi quindi gli spazi vuoti. Quest'ultimo viene calcolato come segue:

$$\rho_b = (1 - p) \cdot \rho_p$$

Dove:

- $\rho_b$ : densità apparente dell'aggregato;
- $p$ : percentuale di pori;
- $\rho_p$ : densità assoluta dell'aggregato.

La densità assoluta è stata ottenuta con il picnometro ad elio come media di quella dei sei campioni dei gruppi 4-8 mm e 2-4 mm, con massa che va dai 0,637 g ai 1,247 g come riportato nella *Tabella 9*:

	Numero identificativo dei campioni						Media
	Campione_1 (2-4 mm)	Campione_2 (2-4 mm)	Campione_3 (2-4 mm)	Campione_1 (4-8 mm)	Campione_2 (4-8 mm)	Campione_3 (4-8 mm)	
Densità assoluta	2,6427	2,6427	2,641	2,6336	2,6301	2,6314	2,637
Massa testata	0,839	0,637	1,247	1,008	1,128	1,101	0,993

*Tabella 9*\_Densità assoluta dei campioni oggetto di studio

Come si evince dalla tabella soprastante, il valore medio della densità assoluta è di 2,637 g/cm<sup>3</sup>, mentre il valore ottenuto per la densità apparente è di 1,682 g/cm<sup>3</sup>.

#### 10.4. Impregnazione dell'aggregato

L'ultimo passaggio dell'oggetto di studio di questa tesi è l'impregnazione dei pori dell'aggregato ottenuto dalla macinazione di blocchi Poroton con materiale paraffinico, previa essiccazione del materiale in forno fino al raggiungimento di massa costante. Tale operazione risulta essere molto

delicata in quanto il PCM va nebulizzato in modo continuo sulla quantità di materiale stabilita, in modo tale che venga completamente assorbito e possa penetrare nei pori capillari ed in quelli aperti.

Come percentuale di riempimento è stata valutata l'80% per minimizzare la perdita di PCM racchiuso nei pori capillari aperti. Tale fenomeno può verificarsi durante il cambiamento di fase qualora non si usassero tecniche di incapsulamento. Tale valore è noto grazie ad un brevetto tedesco in cui dei campioni di prova sono stati caricati termicamente e ciclicamente per 20 volte ad una temperatura di 5°C a 50°C. Tale procedura, ripetuta per diverse percentuali di riempimento, ha permesso di rilevare le percentuali di perdita di PCM durante i cicli di riscaldamento/raffreddamento, denotando una correlazione tra essi. Con una percentuale in volume dell'80% di PCM si ottiene una perdita in massa del 2% dello stesso, considerata accettabile ai fini dello studio condotto [62].

La massa percentuale di paraffina da utilizzare è stata calcolata come segue:

$$M_{\%} = \frac{\rho_{PCM} \cdot \phi_c \cdot \phi_o \cdot Fill_{\%}}{\rho_b}$$

Dove:

- $\rho_{PCM}$ : densità della paraffina allo stato liquido espressa in g/cm<sup>3</sup>;
- $\phi_c$ : porosità capillare espressa in volume %;
- $\phi_o$ : porosità dei pori aperti espressa in volume %;
- $\rho_b$ : densità apparente espressa in g/cm<sup>3</sup>;
- $Fill_{\%}$ : percentuale di riempimento espressa in volume %.

I risultati ottenuti per entrambe le paraffine sono riportati nella seguente tabella:

RT44HC	
Determinazione quantità di paraffina da utilizzare	
Densità apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	1,682
Pori aperti [Vol.-%]	34,706
Pori capillari [Vol.-%]	94,394
Densità paraffina allo stato liquido [g/cm <sup>3</sup> ]	0,7
Percentuale di riempimento [Vol.-%]	80
Massa secca di paraffina [M.-%]	10,9071
<b>Paraffina per 200g di aggregato [g]</b>	<b>21,8142</b>
RT62HC	
Determinazione quantità di paraffina da utilizzare	
Densità apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	1,682
Pori aperti [Vol.-%]	34,706

Pori capillari [Vol.-%]	94,394
Densità paraffina allo stato liquido [g/cm <sup>3</sup> ]	0,84
Percentuale di riempimento [Vol.-%]	80
Massa secca di paraffina [M.-%]	13,0886
<b>Paraffina per 200g di aggregato [g]</b>	<b>26,1772</b>

Tabella 10\_Determinazione della quantità di paraffina RT44HC e RT62HC da utilizzare

### 10.4.1. Metodologia

Dopo aver identificato la quantità di paraffina da utilizzare si può effettuare l'impregnazione dell'aggregato.



Figura 52\_Atrezzatura per nebulizzazione paraffina

In primo luogo, si procederà a pesare il campione con una bilancia di precisione al grammo, avendo l'accuratezza di mescolare affondo il materiale, precedentemente essiccato a 105°C, e rovesciandolo con una paletta dal basso verso l'alto in modo tale che i granuli siano uniformemente distribuiti. Successivamente, avendo calcolato la quantità di paraffina necessaria per raggiungere il grado di riempimento desiderato, si procederà a portarla ad una temperatura superiore di 20°C a quella di fusione in modo tale da provocare lo scioglimento del materiale che a temperatura ambiente si presenta come un blocco di cera paraffinica. Con l'ausilio di una pompa con nebulizzatore manuale, si vaporizzerà sull'aggregato il materiale. Per far sì che riesca a penetrare nei pori è necessario procedere vaporizzando il PCM in modo continuo, mantenendolo manualmente in agitazione e mescolandolo in modo da rigirarlo su sé stesso. Inoltre, è necessario monitorare costantemente la quantità di PCM nebulizzato pesando frequentemente il campione.

Una volta eseguite queste operazioni il materiale è pronto per essere inserito nel mix design del conglomerato cementizio.



*Figura 53\_ Pesatura iniziale della massa del campione*



*Figura 54\_ Campione ad impregnazione ultimata*

## 11. Ipotetico prototipo da realizzare con le caratteristiche sopra riportate

Alla luce di quanto è emerso in questa tesi, si è ipotizzata la conformazione di un ipotetico MSTC da realizzare dopo la caratterizzazione del materiale precedentemente descritta. L'idea di base è quella di realizzare un prototipo, la cui sperimentazione possa essere eseguita sulla copertura dell'Università Politecnica delle Marche e che quindi vi possa essere facilmente trasportato dal luogo di realizzazione dello stesso. Da tale necessità e dall'analisi della letteratura emerge che la conformazione geometrica potrebbe avere le caratteristiche riportate in tabella:

Elemento	Dimensione
Area del collettore	0,32 m <sup>2</sup>
Spessore del collettore	0,08 ÷ 0,10 m
Diametro interno delle tubazioni	0,012 ÷ 0,015 m
Interasse tubazioni	0,06 ÷ 0,10 m
Profondità delle tubazioni dalla superficie	0,02 ÷ 0,04 m

Tabella 11\_Principali dimensioni del prototipo

Il materiale da utilizzare per l'assorbitore massivo sarà il calcestruzzo, che verrà confezionato con cemento Portland I 42.5 R, aggregati riciclati da mattoni o argilla espansa ed acqua. Per le tubazioni potrebbe essere utilizzato il rame o il PVC, il cui layout sarà a serpentina con interasse riportato nella Tabella 11, ed il fluido vettore potrebbe essere l'acqua. Il contenitore, che fungerà anche da cassaforma, potrebbe essere realizzato in legno comune per evitare l'interazione del materiale paraffinico con quello plastico. Inoltre, la superficie principale del collettore potrebbe essere verniciata di nero con  $\alpha = 0,90$ . Viene di seguito riportata la rappresentazione schematica del prototipo:

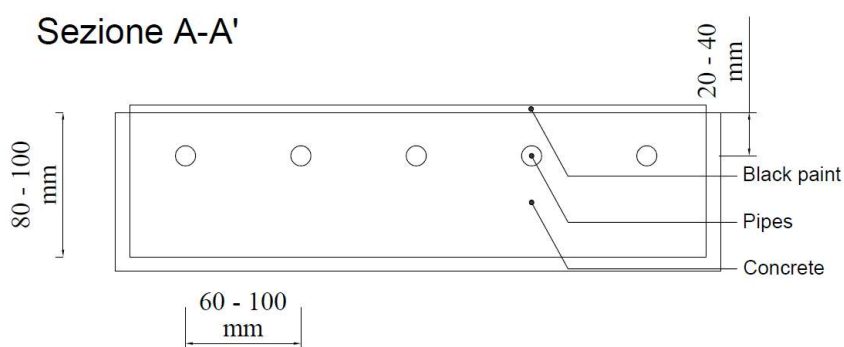
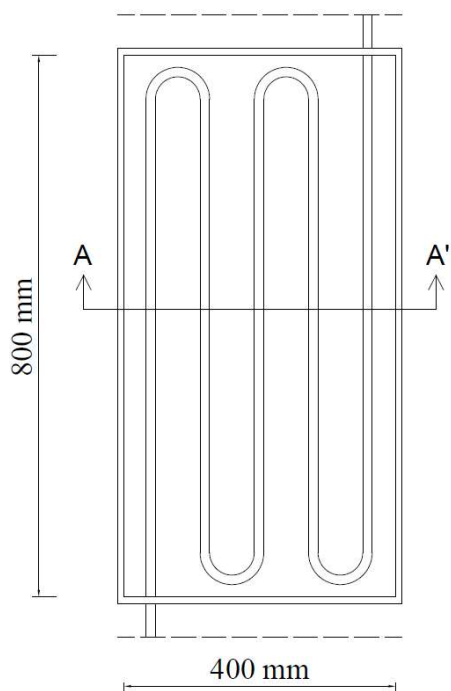


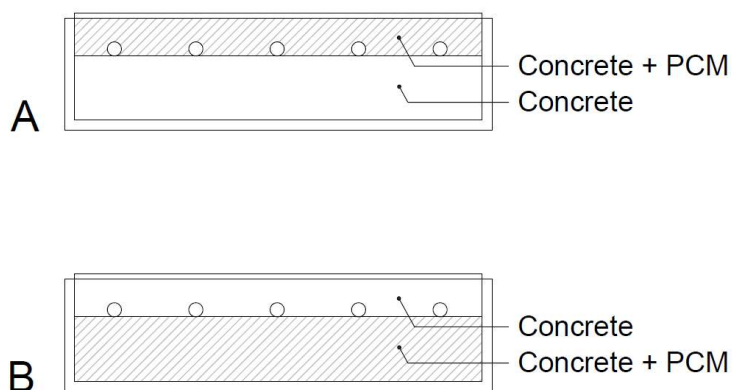
Figura 55\_Sezione prototipo



**Figura 56\_Pianta prototipo**

Nella letteratura internazionale diversi sono i casi di studio per quanto riguarda la posizione ottimale del PCM nella matrice cementizia. In primo luogo, si potrebbe pensare a realizzare due prototipi, uno con paraffina RT44HC e l'altro con la RT62HC. Sarebbe interessante capire da questo primo confronto le differenze riscontrate e quanto le differenti variazioni di entalpia e di range di applicazione incidano sul caso di applicazione. Dopo aver definito le caratteristiche termiche di ognuno dei collettori, a parità di condizioni ambientali e fisico-meccaniche, e scelto il materiale più idoneo all'applicazione, si potrebbe ipotizzare di creare tre differenti prototipi per capire quale sia la disposizione migliore dello strato di PCM nel collettore, si potrebbero realizzare due differenti schemi:

- Strato superiore di calcestruzzo con PCM che inglobi totalmente la tubazione (A);
- Strato inferiore di calcestruzzo con PCM a contatto con la parte inferiore della tubazione (B);



**Figura 57\_Stratigrafia prototipi**

Di ognuno dei prototipi sopra riportati sarebbe interessante rilevare i seguenti dati:

- Temperatura ambiente;
- Direzione e velocità del vento;
- Temperatura dell'acqua in ingresso e in uscita all'interno dei tubi;
- Temperatura della superficie irradiata del collettore;
- Temperature del collettore a diverse profondità.

Per rilevare la distribuzione della temperatura interna durante le prove, potrebbero essere annegate nella matrice cementizia delle termocoppie e potrebbero essere utilizzate anche per verificare la temperatura di uscita del fluido che circola all'interno della serpentina, nel nostro caso acqua. In fine il circuito andrebbe collegato ad una pompa che permetta al fluido di scorrere all'interno della serpentina ed attivare i meccanismi di scambio termico precedentemente esaminati. Si potrebbero azionare i prototipi nelle ore più calde della giornata dalle ore 11:00 alle ore 16:00, sia nel periodo estivo che invernale. Tramite le termocoppie ci si attende di rilevare un incremento della temperatura di uscita dell'acqua dal circuito ed un accumulo di calore che rilasci acqua calda al collettore per diverse ore successive all'azionamento.

## Conclusioni

Da quanto emerso da questa tesi gli impianti solari termici massivi accoppiati all'utilizzo di PCM inglobato nella matrice cementizia hanno un grande potenziale.

Gli MSTC sono robusti e facili da costruire. Da quanto emerso dalla letteratura hanno alta capacità termica, costi contenuti e permettono di realizzare prototipi di alta qualità. Rispetto ai collettori tradizionali sono durevoli e praticamente esenti da manutenzione. La temperatura massima del fluido in uscita varia dai 33°C ai 65°C con un'efficienza giornaliera che va dal 28% al 40% [25]. Per raggiungere tali percentuali, molto importanti sono parametri come la conducibilità termica, che può aumentare le prestazioni fino al 10% grazie all'utilizzo di materiali altamente conduttivi, e l'assorbimento solare, che può incrementare il rendimento fino al 33%. Fra i parametri dimensionali particolarmente influenti vi è lo spessore della piastra del collettore che può accrescere il fattore di efficienza fino al 47%, e la distanza tra i tubi, che può invece ridurlo fino al 30-55% indipendentemente dallo spessore della piastra. Inoltre, si può affermare che esiste una correlazione lineare tra l'area del collettore e la produzione di acqua calda [33].

I materiali a cambiamento di fase, i PCM, sono in grado di incrementare le caratteristiche termiche del calcestruzzo, che è un materiale versatile e ad elevata inerzia termica. Basti pensare che per un conglomerato contenente il 20% di LWA-PCM sul totale in massa degli aggregati, la capacità termica specifica equivalente aumenta del 86.40% e lo stoccaggio di energia termica del 82.73% [47]. Molto è stato già prodotto su questa tematica nella letteratura internazionale e sicuramente questo tema sarà oggetto di ulteriore sperimentazione. La paraffina risulta essere uno dei materiali più versatili in tal senso grazie alla sua affidabilità, alla sua compatibilità con i principali materiali da costruzione e al suo costo contenuto. Importante sarà capire come intervenire sulla bassa conducibilità termica della stessa.

Gli aggregati artificiali sono ancora poco utilizzati viste le restrizioni ed i controlli che necessitano sia per la produzione che per l'utilizzo stesso. Sarebbe importante implementare la realizzazione di questo tipo di aggregato sia dal punto di vista tecnologico che ecologico. Infatti, il settore edile in Europa è responsabile del 30-40% della produzione di rifiuti e solo il 78% di quest'ultimi viene poi riutilizzato nonostante la normativa permetta il suo utilizzo sia nelle opere strutturali che non strutturali [55]. In particolare, potrebbero essere utilizzati per la realizzazione di collettori parzialmente integrati alla costruzione o indipendenti, che non necessitano quindi di raggiungere elevati livelli di resistenza meccanica.

La caratterizzazione dei materiali è molto importante per lo studio delle caratteristiche degli stessi e tramite essa si è riscontrato che le paraffine oggetto di studio sono idonee all'utilizzo nell'aggregato leggero. Il laterizio Poroton grazie alla sua conformazione e al gran numero di pori presenti è un mezzo di contenimento del PCM adeguato. Basti pensare che con il raggiungimento di un rapporto di riempimento dell'80%, circa il 27% del volume degli aggregati può contenere PCM contribuendo ad incrementare le capacità di accumulo termico del materiale [33].

Il prototipo ideato, in fine, potrebbe essere uno spunto per successivi lavori di studio. Facilmente realizzabile senza particolari tecnologie o macchinari può essere trasportato in copertura presso l'Università Politecnica delle Marche con una semplice automobile. La circolazione interna del fluido verrebbe azionata tramite una pompa e l'andamento interno delle temperature controllato tramite le termocoppie applicate a più livelli nel collettore. Ci si aspetterebbe di vedere dai dati in uscita un incremento della temperatura. Si potrebbe inoltre pensare di creare un circuito che preveda anche un serbatoio da posizionare nella parte superiore del collettore per completare l'opera e studiare la capacità di accumulo dell'impianto con esso realizzato. Sarebbe inoltre interessante eseguire delle prove di schiacciamento su provini confezionati con aggregati contenenti PCM per capire come la resistenza a compressione vari rispetto al calcestruzzo tradizionale e come conseguentemente introdurre tale tecnologia nell'involucro edilizio, tenendo presente le perdite di carico termico dell'edificio stesso.

Le tecnologie descritte in questa tesi sicuramente troveranno ampio sviluppo nel futuro prossimo. Ancora molto c'è da analizzare in materia ma sicuramente è una tematica che troverà ampio spazio, soprattutto data la necessità di spostare l'attenzione verso fonti di energia più sostenibili.

## Bibliografia e sitografia

- [1]. Fonti energetiche. (7 maggio 2023). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 20 settembre 2023, 20:59 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Fonti\\_energetiche&oldid=133390281](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Fonti_energetiche&oldid=133390281).
- [2]. Combustibile fossile. (29 luglio 2023). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 20 settembre 2023, 21:00 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Combustibile\\_fossile&oldid=134692666](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Combustibile_fossile&oldid=134692666).
- [3]. Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in energy and combustion science*, 30(3), 231-295.
- [4]. Caterina Maconi “Edilizia, in Italia le abitazioni sono responsabili del 45% dei consumi energetici” *La Repubblica* (09 Novembre 2022).
- [5]. Hestnes, A. G. (1999). Building integration of solar energy systems. *Solar energy*, 67(4-6), 181-187.
- [6]. Fonti di energia rinnovabile. (16 settembre 2023). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 20 settembre 2023, 21:08 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Fonti\\_di\\_energia\\_rinnovabile&oldid=135494527](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Fonti_di_energia_rinnovabile&oldid=135494527).
- [7]. Energia solare. (6 settembre 2023). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 20 settembre 2023, 21:10 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Energia\\_solare&oldid=135332045](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Energia_solare&oldid=135332045).
- [8]. Yunus a. Cengel (1998) *Introduction to thermodynamics and heat transfer*, McGraw-Hill Companies, Inc.
- [9]. Hazami, M., Kooli, S., Lazâar, M., Farhat, A., & Belghith, A. (2010). Energetic and exergetic performances of an economical and available integrated solar storage collector based on concrete matrix. *Energy Conversion and Management*, 51(6), 1210-1218.
- [10]. Impianto solare termico. (16 novembre 2021). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 20 settembre 2023, 21:15 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Impianto\\_solare\\_termico&oldid=124061238](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Impianto_solare_termico&oldid=124061238).
- [11]. Pannello solare termico. (13 luglio 2023). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 20 settembre 2023, 21:19 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Pannello\\_solare\\_termico&oldid=134449751](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Pannello_solare_termico&oldid=134449751).
- [12]. O’Hegarty, R., Kinnane, O., & McCormack, S. J. (2016). Review and analysis of solar thermal facades. *Solar Energy*, 135, 408-422.
- [13]. Al Hoqani, T. M., Bhambare, P. S., & Kaithari, D. K. Solar Thermal Energy Utilization using Metal Fiber Reinforced Concrete (MFRC) Collector for Producing Hot Water in Sultanate of Oman.

- [14]. d'Antoni, M., & Saro, O. (2012). Massive solar-thermal collectors: a critical literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3666-3679.
- [15]. D'Antoni, M., & Saro, O. (2013). Energy potential of a Massive Solar-Thermal Collector design in European climates. *Solar energy*, 93, 195-208.
- [16]. <https://www.ariston.com/it-it/the-comfort-way/consigli-e-soluzioni/glicole-pannelli-solari-sostituzione>
- [17]. [https://www.unirc.it/documentazione/materiale\\_didattico/1464\\_2022\\_552\\_40493.pdf](https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/1464_2022_552_40493.pdf)
- [18]. Patil, S. R., Lodha, R., & Keste, A. A. (2020). Concrete solar collector-an experimental investigation in solar passive energy. *Materials Today: Proceedings*, 23, 366-372.
- [19]. O'Hegarty, R., Kinnane, O., & McCormack, S. (2016). Parametric analysis of concrete solar collectors. *Energy Procedia*, 91, 954-962.
- [20]. Sable, A. (2017). Experimental and economic analysis of concrete absorber collector solar water heater with use of dimpled tube. *Resource-Efficient Technologies*, 3(4), 483-490.
- [21]. Bilgen, E., and M-A. Richard. "Horizontal concrete slabs as passive solar collectors." *Solar Energy* 72.5 (2002): 405-413.
- [22]. Benkaddour, A., Faraji, M., & Faraji, H. (2020). Numerical study of the thermal energy storage behaviour of a novel composite PCM/Concrete wall integrated solar collector. *Materials Today: Proceedings*, 30, 905-908.
- [23]. Sarachitti, R., Chotetanorm, C., Lertsatitthanakorn, C., & Rungsiyopas, M. (2011). Thermal performance analysis and economic evaluation of roof-integrated solar concrete collector. *Energy and Buildings*, 43(6), 1403-1408.
- [24]. Krishnavel, V., Karthick, A., & Murugavel, K. K. (2014). Experimental analysis of concrete absorber solar water heating systems. *Energy and buildings*, 84, 501-505.
- [25]. O'Hegarty, R., Kinnane, O., & McCormack, S. J. (2017). Concrete solar collectors for façade integration: An experimental and numerical investigation. *Applied energy*, 206, 1040-1061.
- [26]. Patil, S. R., Keste, A. A., & Sable, A. B. (2016). Investigation and development of liquid flat plate solar collector using concrete as absorber plate and its performance testing. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 6(4), 1212-1220.
- [27]. Karabay, H., Arıcı, M., & Sandık, M. (2013). A numerical investigation of fluid flow and heat transfer inside a room for floor heating and wall heating systems. *Energy and Buildings*, 67, 471-478.
- [28]. Bellamy, L. A. (2012). An experimental assessment of the energy performance of novel concrete walls embedded with mini solar collectors. *Energy Procedia*, 30, 29-34.

- [29]. Wang, H., Zhao, J., & Chen, Z. (2008). Experimental investigation of ice and snow melting process on pavement utilizing geothermal tail water. *Energy Conversion and Management*, 49(6), 1538-1546.
- [30]. Hassan, M. M., & Beliveau, Y. (2007). Design, construction and performance prediction of integrated solar roof collectors using finite element analysis. *Construction and Building Materials*, 21(5), 1069-1078.
- [31]. Chaurasia, P. B. L. (2000). Solar water heaters based on concrete collectors. *Energy*, 25(8), 703-716.
- [32]. Peralta, I., Fachinotti, V. D., Koenders, E. A., & Caggiano, A. (2022). Computational design of a Massive Solar-Thermal Collector enhanced with Phase Change Materials. *Energy and Buildings*, 274, 112437.
- [33]. Aquilanti, A., Peralta, I., Koenders, E. A., & Di Nicola, G. (2023). A Brief Review of the Latest Advancements of Massive Solar Thermal Collectors. *Energies*, 16(16), 5953.
- [34]. Materiali a cambiamento di fase per l'edilizia. (22 luglio 2020). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 20 settembre 2023, 22:07 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Materiali\\_a\\_cambiamento\\_di\\_fase\\_per\\_l%27edilizia&oldid=114481005](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Materiali_a_cambiamento_di_fase_per_l%27edilizia&oldid=114481005).
- [35]. Calore sensibile. (23 agosto 2021). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 20 settembre 2023, 22:09 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Calore\\_sensibile&oldid=122635229](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Calore_sensibile&oldid=122635229).
- [36]. Calore latente. (30 dicembre 2022). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 20 settembre 2023, 22:10 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Calore\\_latente&oldid=131234513](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Calore_latente&oldid=131234513).
- [37]. Transizione di fase. (19 agosto 2023). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 21 settembre 2023, 07:04 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Transizione\\_di\\_fase&oldid=135033796](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Transizione_di_fase&oldid=135033796).
- [38]. Fusione (fisica). (18 febbraio 2023). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 1 agosto 2023, 11:40 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Fusione\\_\(fisica\)&oldid=132114988](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Fusione_(fisica)&oldid=132114988).
- [39]. Punto di fusione. (24 luglio 2023). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 1 agosto 2023, 11:41 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Punto\\_di\\_fusione&oldid=134618022](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Punto_di_fusione&oldid=134618022).
- [40]. Solidificazione. (28 maggio 2022). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 1 agosto 2023, 12:42 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Solidificazione&oldid=127577962](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Solidificazione&oldid=127577962).
- [41]. Sublimazione. (17 luglio 2023). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 1 agosto 2023, 13:27 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Sublimazione&oldid=134506761](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Sublimazione&oldid=134506761).
- [42]. Brinamento. (24 ottobre 2022). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 1 agosto 2023, 13:44 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Brinamento&oldid=130104693](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Brinamento&oldid=130104693).

- [43]. Vaporizzazione. (9 settembre 2022). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 1 agosto 2023, 13:46 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Vaporizzazione&oldid=129258266](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Vaporizzazione&oldid=129258266).
- [44]. Condensazione. (12 aprile 2023). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 1 agosto 2023, 14:09 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Condensazione&oldid=132971996](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Condensazione&oldid=132971996).
- [45]. <https://webthesis.biblio.polito.it/12152/1/tesi.pdf>
- [46]. Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318-345.
- [47]. Berardi, U., & Gallardo, A. A. (2019). Properties of concretes enhanced with phase change materials for building applications. *Energy and Buildings*, 199, 402-414.
- [48]. Idratazione del cemento. (18 giugno 2023). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 2 settembre 2023, 21:31 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Idratazione\\_del\\_cemento&oldid=134028599](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Idratazione_del_cemento&oldid=134028599).
- [49]. Lavorabilità. (28 novembre 2021). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 19 agosto 2023, 22:26 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Lavorabilit%C3%A0&oldid=124262159](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Lavorabilit%C3%A0&oldid=124262159).
- [50]. Densità. (30 aprile 2023). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 5 settembre 2023, 20:21 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Densit%C3%A0&oldid=133259975](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Densit%C3%A0&oldid=133259975).
- [51]. Calcestruzzo. (21 luglio 2023). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 20 agosto 2023, 13:58 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Calcestruzzo&oldid=134577320](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Calcestruzzo&oldid=134577320).
- [52]. <https://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/docenti201/Cappellett/materiali-/Fisica-e-M1/Trasmissione-del-calore1.pdf>
- [53]. Capacità termica. (23 luglio 2022). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 5 settembre 2023, 22:21 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Capacit%C3%A0\\_termica&oldid=128489412](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Capacit%C3%A0_termica&oldid=128489412).
- [54]. Inerte. (7 luglio 2023). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 22 agosto 2023, 11:48 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Inerte&oldid=134355160](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Inerte&oldid=134355160).
- [55]. [https://www.repubblica.it/green-and-blue/2022/08/23/news/economia\\_circolare\\_edilizia\\_riciclo\\_materiali-362677814/](https://www.repubblica.it/green-and-blue/2022/08/23/news/economia_circolare_edilizia_riciclo_materiali-362677814/)
- [56]. <http://anpar.org/wp-content/uploads/2018/10/GLI-AGGREGATI-RICICLATI-Impaginato-def.pdf>

- [57]. <https://www.baioni.it/come-e-fatto-un-impianto-di-frantumazione-inerti/#:~:text=Si%20tratta%20di%20una%20macchina,e%20trasportato%20al%20successivo%20componente>.
- [58]. <https://www.ingenio-web.it/articoli/calcestruzzo-strutturale-con-aggregati-riciclati/>
- [59]. [https://moodle2.units.it/pluginfile.php/283832/mod\\_resource/content/1/Appunti-%20DSC-TGA.pdf](https://moodle2.units.it/pluginfile.php/283832/mod_resource/content/1/Appunti-%20DSC-TGA.pdf)
- [60]. Calorimetria differenziale a scansione. (3 marzo 2020). Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 11 agosto 2023, 15:11 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Calorimetria\\_differenziale\\_a\\_scansione&oldid=111219950](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Calorimetria_differenziale_a_scansione&oldid=111219950).
- [61]. [https://www.unife.it/ing/lm.civile/insegnamenti/costruzione-di-strade/materiale-didattico/11\\_terre-aggregati-e-miscele\\_2021/at\\_download/file](https://www.unife.it/ing/lm.civile/insegnamenti/costruzione-di-strade/materiale-didattico/11_terre-aggregati-e-miscele_2021/at_download/file)
- [62]. [https://amslaurea.unibo.it/18166/1/DePietriTonelli%C2%AD\\_Davide\\_Tesi.pdf](https://amslaurea.unibo.it/18166/1/DePietriTonelli%C2%AD_Davide_Tesi.pdf)
- [63]. [https://iris.unica.it/retrieve/e2f56ed8-00c1-3eaf-e053-3a05fe0a5d97/Tesi\\_Casnedi.pdf](https://iris.unica.it/retrieve/e2f56ed8-00c1-3eaf-e053-3a05fe0a5d97/Tesi_Casnedi.pdf)
- [64]. <https://www.rubitherm.eu/produktkategorie/organische-pcm-rt>
- [65]. [https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata\\_-\\_RT44HC\\_DE\\_09102020.PDF](https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-_RT44HC_DE_09102020.PDF)
- [66]. [https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata\\_-\\_RT62HC\\_EN\\_09102020.PDF](https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-_RT62HC_EN_09102020.PDF)
- [67]. <https://www.poroton.it/mattoni-laterizi/laterizio-porizzato/>

## Ringraziamenti

È incredibile! Dopo tutti questi anni si chiude quest'interminabile capitolo della mia vita!

Quante lacrime e sacrifici sono nascosti tra le righe di questa tesi e quanti progetti stravolti e modificati di continuo!

In questo percorso sono diverse le persone che vorrei ringraziare.

Primo fra tutti il Professor Giovanni Di Nicola, che mi ha proposto questo interessantissimo argomento di studio e che mi ha sempre dimostrato grande disponibilità nonostante una pandemia in corso. Un ringraziamento particolare va anche ad Alessia Aquilanti che mi ha seguito con pazienza in questi anni di tira e molla e mi ha accompagnato a questo traguardo. La vostra passione e professionalità sarà difficilmente dimenticata. Grazie di vero cuore.

Grazie alle mie colonne portanti, mamma e babbo, che in particolare in quest'ultimo anno sono stati indispensabili. Una parte di tutto questo è sicuramente merito vostro. Mi avete supportato in modo sincero, senza chiedere nulla in cambio, sempre pronti ad aiutarmi a gestire tutte le dinamiche che mi si sono presentate davanti. Non basterà un'eternità a dimenticare quanto amore mi avete trasmesso e vi adoro per questo.

Grazie a te, Alessio, compagno di vita indispensabile. Abbiamo affrontato questo periodo armandoci di pazienza e credo proprio che possiamo dire di aver fatto del nostro meglio! Sei la persona che più di tutti ha sopportato le mie frustrazioni ed i miei malumori e nonostante tutto mi hai sempre strappato un sorriso. Grazie per essere come sei, per essere un papà stupendo, una persona infaticabile, un amico sempre pronto a farsi in quattro. Grazie per tenermi ogni giorno la mano in questa vita un po' caotica e disordinata...proprio come piace a noi!

Grazie a tutta la mia famiglia, in particolare a mia sorella Marina che è sempre un faro in mezzo alla tempesta ed in qualsiasi situazione è sempre al mio fianco.

Grazie agli amici di sempre, a quelle persone che ci sono sempre state e che sempre ci saranno. Grazie a voi che mi siete rimasti accanto nonostante le mie assenze e che avete in qualche modo contribuito a rendere più leggero questo periodo che per me è stato davvero pesante. Siete le costanti della mia vita e di questo sono grata al cielo!

Un ringraziamento speciale va a te, Giulio, che sei stato un bambino tanto paziente. Mi hai strappato un sorriso dietro l'altro e mi hai insegnato a rallentare quando ero troppo carica di stress e cose da fare. Quei tuoi occhioni stupendi per me sono vita, sono carburante che non esaurisce mai. Sei la gioia

che non riesco a descrivere a parole e arriverò dove voglio anche per te, perché una persona felice è sicuramente una mamma migliore.

In fine vorrei ringraziare anche me stessa, per averci creduto nonostante tutto, perché nonostante tutto accade sempre l'impossibile!