

# Il calcestruzzo per l'efficienza energetica degli edifici

## I vantaggi della massa termica



**Federbeton**

Federazione delle associazioni della filiera del cemento e del calcestruzzo armato

Traduzione e pubblicazione: FEDERBETON, Ottobre 2009  
Editore: PUBBLICAMENTO S.r.l.

*Tutti i diritti sono riservati. La riproduzione e la trasmissione in qualsiasi forma o con qualsiasi mezzo, elettronico o meccanico, comprese fotocopie, registrazioni o altro tipo di sistema di memorizzazione o consultazione dei dati sono assolutamente vietate senza previo consenso scritto di FEDERBETON.*

Pubblicazione originale:  
European Concrete Platform ASBL  
a cura di: Jean-Pierre Jacobs 1050 Brussels, Belgio  
Grafica e Stampa: The European Concrete Platform ASBL

La European Concrete Platform dichiara che tutte le informazioni contenute nel presente testo sono corrette e aggiornate al momento della sua pubblicazione e sono riportate in buona fede.

La loro divulgazione non comporta alcuna responsabilità per i soci dell'associazione. Nonostante gli sforzi compiuti in tal senso la European Concrete Platform non garantisce l'esattezza e l'eshaustività delle informazioni. Eventuali errori, se segnalati, saranno tempestivamente corretti.

Il presente testo riflette le opinioni degli autori e la European Concrete Platform non si assume la responsabilità di quanto riportato. Tutte le indicazioni e le informazioni fornite dalla European Concrete Platform sono destinate a coloro che sono in grado di valutare il significato e i limiti del contenuto dell'opera, e di assumersi la responsabilità della loro applicazione pratica. Non si assume, pertanto, alcuna responsabilità (neppure per casi di negligenza) per eventuali danni derivanti da tali indicazioni o informazioni.

I lettori devono essere consapevoli del fatto che tutte le pubblicazioni edite dalla European Concrete Platform sono soggette a revisione periodica e, pertanto, sono tenuti ad accertare che la versione in loro possesso sia la più recente.

**Immagine di copertina:**

*Abitazione in calcestruzzo a Marke, Belgio, che sfrutta i vantaggi dell'accumulo termico e della massa termica per ridurre i consumi energetici, assicurando al tempo stesso il massimo comfort in tutti i periodi dell'anno.*

*(per gentile concessione dell'architetto Ansfried Vande Kerckhove, fotografo Jasmine Van Hevel, Belgio)*

# Il Calcestruzzo per l'efficienza energetica degli edifici:

## I vantaggi della massa termica

Questo documento, redatto dalla European Concrete Platform, è destinato a progettisti, Enti normatori, proprietari e utilizzatori di edifici. La finalità che gli autori si propongono è dimostrare in che modo il calcestruzzo può essere utilizzato per rallentare i cambiamenti climatici legati all'effetto serra e minimizzarne gli effetti sull'ambiente costruito.

## Indice

<b>1 I vantaggi degli edifici in calcestruzzo in termini di efficienza termica</b>	<b>2</b>
La Direttiva sul Rendimento Energetico degli Edifici (EPBD)	2
I vantaggi della massa termica	2
In che modo il calcestruzzo contribuisce al raggiungimento della conformità alla Direttiva 2002/91/CE	3
L'utilizzo del calcestruzzo negli edifici va a vantaggio di tutti	3
Il risparmio energetico aumenta nell'arco della vita utile di un edificio	4
Il risparmio energetico abbatte in maniera significativa le emissioni di CO <sub>2</sub>	4
<b>2 L'uso efficiente dell'energia negli edifici</b>	<b>5</b>
Valutazione del fabbisogno energetico degli edifici	5
L'impatto dei cambiamenti climatici	6
I flussi energetici all'interno degli edifici	6
<b>3 L'uso del calcestruzzo e il fabbisogno energetico degli edifici</b>	<b>8</b>
Il principio della massa termica	8
Come trarre il massimo vantaggio dalla massa termica	9
Studi sulla massa termica	10
<b>4 La Direttiva sul Rendimento Energetico nell'Edilizia</b>	<b>11</b>
Le prescrizioni della Direttiva	11
Calcolare il fabbisogno energetico all'interno di un edificio	12
<b>5 Dimostrazione dell'efficienza energetica del calcestruzzo</b>	<b>13</b>
Come calcolare il rendimento energetico teorico	13
I vantaggi del calcestruzzo comprovati dall'analisi su edifici reali	14
<b>6 Bibliografia</b>	<b>16</b>

L'impiego del calcestruzzo migliora l'efficienza energetica e al tempo stesso il comfort termico

## 1. I VANTAGGI DEGLI EDIFICI IN CALCESTRUZZO IN TERMINI DI EFFICIENZA TERMICA

Il calcestruzzo è un materiale altamente affidabile, universalmente noto e molto diffuso, che trova impiego per vari tipi di applicazioni. In particolare, negli edifici è molto utilizzato per:

- pavimenti controterra o ai piani;
- elementi strutturali (es. travi, pilastri e solette);
- murature esterne e interne, ivi compresi pannelli, blocchi o elementi decorativi;
- tegole per coperture.

La grande versatilità delle caratteristiche strutturali e materiali del calcestruzzo è senz'altro una delle ragioni del suo successo. La maggior parte degli edifici utilizza calcestruzzo, materiale altamente resistente, ignifugo, acusticamente isolante, che si sta affermando sempre di più anche per la sua massa termica.

### La Direttiva sul Rendimento Energetico nell'Edilizia (EPBD)

Il calcestruzzo rappresenta un'ottima soluzione per rispondere in maniera efficace ai requisiti previsti dalla Direttiva sul Rendimento Energetico nell'Edilizia (Direttiva 2002/91/CE del 16 dicembre 2002), emanata con l'obiettivo di ridurre il consumo energetico in Europa. Gli Stati Membri dell'UE hanno direttamente recepito la Direttiva oppure, sulla base di questa, hanno introdotto modifiche ai regolamenti vigenti in campo edilizio, con il risultato che la Direttiva sta già condizionando in misura significativa la progettazione e le tecniche di costruzione degli edifici. Le disposizioni della Direttiva riguardano:

- le prescrizioni minime riguardo al rendimento energetico degli edifici di nuova costruzione;



**Fig. 1a** Una casa modello vicino ad Amburgo (Germania), interamente costruita in calcestruzzo per conto delle Associazioni Tedesche dell'Industria del Cemento e del Calcestruzzo. Quest'interessante edificio è stato progettato specificamente per offrire ai proprietari un'unità abitativa flessibile in grado di soddisfare ogni loro esigenza (per gentile concessione di Betonbild, Erkrath, Germania).

### I vantaggi della massa termica

Il principale vantaggio derivante dall'impiego del calcestruzzo negli edifici è l'elevata massa termica, e la "stabilità termica" che ne deriva. Ciò non solo consente di abbattere il consumo energetico, ma offre anche condizioni climatiche interne più confortevoli per gli utenti.

#### La massa termica del calcestruzzo negli edifici:

- ottimizza i vantaggi offerti dall'accumulo termico, abbattendo in tal modo il consumo di combustibile per il riscaldamento;
- riduce il consumo energetico per il riscaldamento in misura del 2-15% (v. cap. 5);
- contiene le oscillazioni della temperatura interna;
- differisce il raggiungimento dei picchi di temperatura all'interno di uffici e di altri edifici adibiti ad uso non residenziale successivamente all'abbandono dei locali da parte degli occupanti;
- riducendo i picchi di temperatura può rendere inutile l'installazione di impianti di condizionamento;
- tramite l'uso della ventilazione notturna permette di eliminare la necessità di un raffrescamento durante le ore diurne;
- se abbinata ad impianti di condizionamento, può ridurre anche del 50% il fabbisogno energetico per il raffrescamento;
- può abbattere i costi energetici degli edifici;
- consente un migliore utilizzo delle fonti di calore a bassa temperatura, quali, ad esempio, le pompe di calore geotermiche;
- stante i minori consumi energetici per gli impianti di riscaldamento e raffrescamento, contribuisce ad abbattere le emissioni di CO<sub>2</sub>, il gas principale responsabile dell'effetto serra.

- le prescrizioni minime riguardo al rendimento energetico degli edifici esistenti;
- la certificazione energetica per gli edifici;
- l'installazione di impianti di riscaldamento/raffrescamento passivi.

Il tutto si basa sul principio che il rendimento energetico non deve in alcun modo influire sulla qualità delle condizioni climatiche interne.

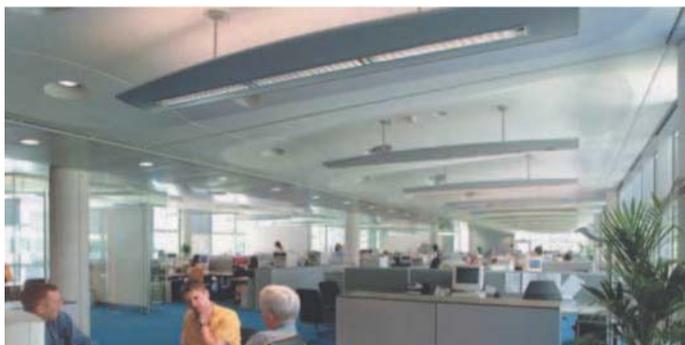
L'approccio al problema del consumo energetico negli edifici adottato dalla Direttiva è, dunque, di tipo integrato, e per tale motivo i progettisti sono sempre più consapevoli dell'importanza di utilizzare materiali efficienti dal punto di vista della riduzione dei consumi energetici.

### **In che modo il calcestruzzo contribuisce al raggiungimento della conformità alla Direttiva 2002/91/CE**

Le ricerche sul rendimento energetico degli edifici realizzati in calcestruzzo, sia reali che sperimentali, hanno dimostrato che per tutte le condizioni climatiche presenti nei paesi europei, esiste la possibilità di trarne dei vantaggi, purché, in fase di progettazione, si tenga conto della massa termica del calcestruzzo. Se tale effetto è considerato in maniera adeguata nelle procedure di calcolo prescritte dalla Direttiva, un edificio costruito in calcestruzzo, quindi con un materiale pesante, può consentire un risparmio energetico del 2-15% rispetto ad un edificio che impiega, invece, materiali leggeri (v. cap. 5).

È stato, inoltre, accertato che gli edifici realizzati con calcestruzzo assicurano agli occupanti un comfort termico costante e prolungato (giorni) rispetto a quello assicurato dai materiali leggeri (ore), sia nei climi caldi che in quelli freddi. Integrando in maniera intelligente riscaldamento, ventilazione, schermatura solare, conformazione della struttura dell'edificio e raffrescamento notturno è possibile sfruttare al meglio la massa termica del calcestruzzo, realizzando così edifici che si adattano meglio alle variazioni di temperature e che assicurano il massimo comfort, anche senza l'installazione di condizionatori.

Il fatto che la Direttiva sia favorevole ai sistemi di riscaldamento e raffrescamento passivi, ed in particolare che riconosca il ruolo fondamentale della massa termica, non può che essere sottolineato.



**Fig. 1b** Un ambiente di lavoro molto confortevole realizzato sfruttando a pieno la massa termica del calcestruzzo: la sede di Toyota, GB (per gentile concessione della Concrete Society, GB).

## **L'utilizzo del calcestruzzo negli edifici va a vantaggio di tutti**

### **Occupanti e proprietari di edifici**

Il risparmio energetico reso possibile dalla massa termica del calcestruzzo può consentire di abbattere le spese per il riscaldamento/raffrescamento, alleviando, in tal modo ed in misura significativa, i costi di gestione degli edifici. Inoltre, la "stabilità termica" offerta dal calcestruzzo consentirà di disporre di abitazioni più confortevoli in futuro, quando gli effetti dei cambiamenti climatici saranno più sensibili. Ciò potrebbe contribuire a valorizzare gli immobili energeticamente più efficienti. Un altro vantaggio è il minor costo dell'investimento derivante dall'installazione di sistemi di riscaldamento, ventilazione e raffreddamento meno complessi.

### **L'ambiente**

La riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra è il vantaggio fondamentale risultante dal minor consumo energetico derivante dalla massa termica durante la vita utile di un edificio. Dato che la gran parte delle emissioni globali di CO<sub>2</sub> è prodotta dagli edifici, considerando il fatto che questi hanno una vita utile molto lunga, si comprende facilmente il significativo impatto globale ottenibile da una pur minima diminuzione del consumo energetico.

## Il risparmio energetico aumenta nell'arco della vita utile di un edificio

Considerando il costo medio dell'approvvigionamento energetico in Europa nel secondo trimestre del 2006, dagli studi sugli edifici adibiti ad uso abitativo è emerso che, per un appartamento di circa 70-80 m<sup>2</sup>, il risparmio energetico derivante dall'impiego di materiali edili pesanti, come il calcestruzzo, equivarrebbe a circa 60 Euro all'anno. Dato, però, che il mercato dell'energia è caratterizzato da forti oscillazioni, se la marcata tendenza al rialzo del prezzo del petrolio registrata negli ultimi anni dovesse perdurare, sarebbe molto importante ottimizzare il ricorso agli impianti di riscaldamento/raffrescamento attraverso un utilizzo più efficiente della massa termica. Nella pratica, il risparmio energetico dipenderà, ovviamente, dal comportamento responsabile degli utenti (ad esempio l'abitudine di chiudere finestre e persiane), ma è fuor di dubbio che anche un piccolo miglioramento ottenibile attraverso una diversa progettazione di un edificio potrebbe portare, anno dopo anno, ad un risparmio considerevole nell'arco della sua vita utile.

## Il risparmio energetico abbatte in maniera significativa le emissioni di CO<sub>2</sub>

La fig. 1c dimostra come anche una modesta riduzione del consumo energetico su base annua sia in grado di abbattere in maniera significativa le emissioni di CO<sub>2</sub>. Inoltre, un recente studio inglese ha messo in evidenza che una casa costruita con calcestruzzo e mattoni mediamente pesanti, che sfrutti al massimo la sua massa termica, nell'arco di un periodo di 11 anni è in grado di ammortizzare le maggiori emissioni di "CO<sub>2</sub> incorporata" rispetto ad una casa equivalente costruita con telaio di legno e per tutta la sua rimanente vita utile consentirà di abbattere i costi energetici, e quindi le emissioni di biossido di carbonio (Hacker et al 2006).

Si definisce come "CO<sub>2</sub> incorporata" di un materiale, di un elemento edile o di un edificio la quota di CO<sub>2</sub> emessa durante i vari processi associati con la produzione, ivi incluse le fasi di estrazione delle risorse naturali, fabbricazione e trasporto.

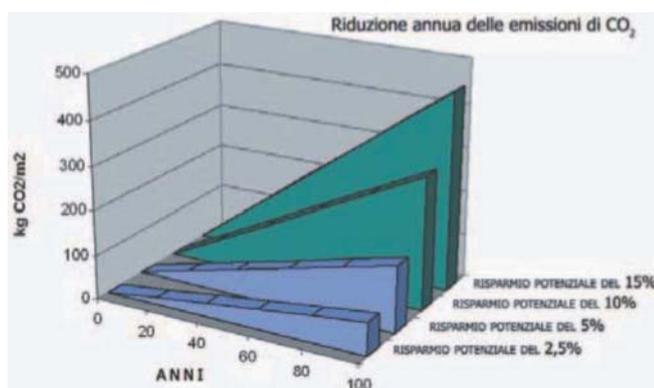


Fig. 1c Conseguenze a lungo termine dei piccoli incrementi annui in termini di risparmio energetico. N.B.: Il risparmio intrinseco è automatico con un edificio costruito con materiali pesanti. Il risparmio potenziale si ottiene allorché l'edificio e gli impianti sono appositamente progettati per ottenere il massimo rendimento energetico.

A mano a mano che gli effetti dei cambiamenti climatici saranno più evidenti, diventerà più chiara l'importanza della massa termica del calcestruzzo ai fini del miglioramento del comfort termico degli edifici, contribuendo all'affermazione degli edifici "a prova di futuro" nel nostro secolo.

Questa pubblicazione si propone di illustrare in che modo l'impiego del calcestruzzo pesante può contribuire a migliorare il rendimento energetico ed il comfort termico degli edifici.



Fig. 1d Casa in muratura a blocchi di calcestruzzo a Bonheiden, Belgio (per gentile concessione dell'architetto Gie Wollaert, fotografo FEBE, Associazione Belga dei produttori di elementi Prefabbricati in calcestruzzo).



Fig 1e Edificio residenziale 'verde' a Dublino, Irlanda (per gentile concessione del Gruppo per lo Sviluppo del Calcestruzzo, Irlanda).

Il rendimento energetico è legato al raggiungimento di un equilibrio tra riduzione dei consumi e mantenimento di condizioni climatiche interne confortevoli

## 2. L'USO EFFICIENTE DELL'ENERGIA NEGLI EDIFICI

La riduzione del fabbisogno energetico degli edifici è un fattore di primaria importanza per il ruolo significativo che questo può avere, ai fini dell'abbattimento del consumo energetico, ad un livello sostenibile. Nel panorama europeo, le statistiche dimostrano che l'energia necessaria per il riscaldamento, l'illuminazione e il raffrescamento degli edifici rappresenta oltre il 40% dell'energia primaria consumata.

Ciò significa che nell'ambito dell'Unione Europea l'occupazione e l'uso degli edifici rappresenta la maggiore fonte singola di emissione di gas ad effetto serra, tra cui soprattutto il biossido di carbonio. La fig. 2a rappresenta la distribuzione del consumo energetico nei paesi dell'UE negli edifici ad uso sia abitativo che commerciale.

Nell'ottica di riportare entro il 2010 le emissioni inquinanti ai livelli del 1990, l'UE ha puntato ad introdurre un meccanismo in grado di abbattere i consumi energetici degli edifici. Di conseguenza, vari Stati Membri hanno recepito la Direttiva sul Rendimento Energetico nell'Edilizia (Direttiva 2002/91/CE del 16 dicembre 2002), entrata in vigore in Italia nel settembre del 2005, con l'obiettivo di garantire un minore consumo energetico negli edifici di nuova costruzione. L'argomento è trattato approfonditamente nel cap. 4.

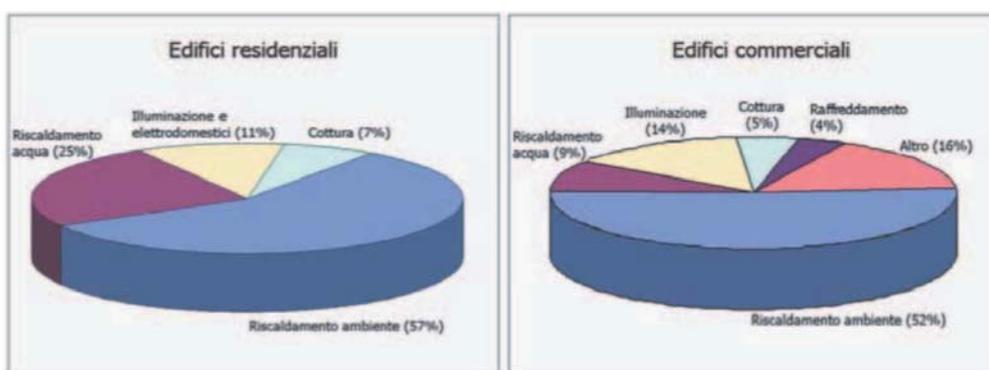


Fig. 2a Il consumo energetico nei paesi dell'UE negli edifici residenziali e commerciali. Fonte [www.intuser.net](http://www.intuser.net)

### Valutazione del fabbisogno energetico degli edifici

Per allinearsi alle nuove norme e realizzare edifici "verdi", assicurando al tempo stesso il massimo comfort termico, è assolutamente necessario tenere conto di tutti i flussi energetici, dei fattori o dei parametri rilevanti (inclusa la massa termica). Il consumo energetico di un edificio può essere calcolato con metodi semplici, che prendano in considerazione i dati statistici relativi alle temperature esterne registrate in una data località, l'isolamento termico (valore U) e la percentuale di ventilazione attesa, oppure mediante appositi software in grado di rappresentare il modello matematico dei flussi termodinamici (es. conduzione, convezione e irraggiamento).

La Direttiva prevede un approccio alla progettazione olistico e integrato, consentendo l'uso di metodi differenti, che vanno da quelli semplici di tipo "stato quasi stazionario" a quelli molto sofisticati, "dinamici", ma, la complessità dei flussi energetici, fa sì che il computer sia sempre più frequentemente utilizzato per le simulazioni progettuali (fig. 2b). Sono disponibili molti software specifici per il calcolo dei consumi energetici, ma non tutti si prestano a qualsiasi situazione, ad esempio alcuni sono validi per gli edifici residenziali, mentre altri sono indicati solo per particolari paesi o zone climatiche.

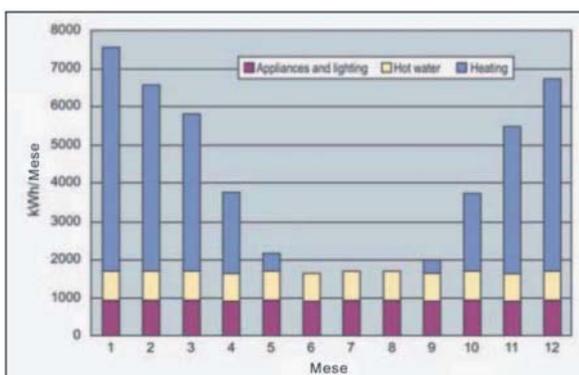


Fig. 2b Fabbisogno energetico teorico mensile di un edificio residenziale, calcolato con l'ausilio del programma Consolis considerando come parametro il clima di Stoccolma.

## L'impatto dei cambiamenti climatici

I cambiamenti climatici che interessano tutti i paesi del mondo possono influire sul comfort termico degli edifici di tutta Europa. Proprio partendo dalla crescente evidenza che i cambiamenti climatici influiscono sull'ambiente costruito, De Saulles (2005) riferisce che, secondo uno studio, nella metà del XXI secolo molti degli edifici oggi esistenti adibiti sia ad uffici che ad abitazioni avranno problemi di surriscaldamento (CIBSE, 2005). Anzi, secondo alcune indagini, nel 2080 Londra avrà la stessa temperatura di Marsiglia (Arup, 2004).

Per tale motivo, è necessario progettare gli edifici in modo tale che anche in futuro siano in grado di preservare la salute e mantenere il giusto comfort - rispettare gli standard attualmente vigenti potrebbe non bastare per contrastare gli effetti dei cambiamenti climatici. Gli edifici costruiti con materiali pesanti assicurano una buona stabilità termica, una soluzione sicura ed eco-compatibile, che riduce, e in molti casi addirittura elimina, la necessità di installare sistemi di raffrescamento meccanico. È stato dimostrato che gli edifici che hanno livelli elevati di massa termica, sistemi solari passivi e un efficace controllo della ventilazione, hanno un ottimo rendimento energetico (Arup & Bill Dunster Architects, 2004). Quest'approccio alla progettazione può essere l'unico modo per realizzare edifici di nuova costruzione "a prova di futuro", per cui i manufatti realizzati in calcestruzzo e muratura possono contribuire a creare un ambiente confortevole, oggi e in futuro.

## I flussi energetici all'interno degli edifici

La fig. 2c evidenzia i principi fondamentali dei flussi energetici negli edifici. Tutti noi dobbiamo comprendere che i vari flussi interagiscono all'interno di un edificio, contribuendo, in tal modo, a creare le condizioni interne che noi percepiamo. Anzi, è proprio una gestione efficace di tali flussi che contribuisce a ridurre il consumo energetico, un aspetto a cui i regolamenti per l'edilizia attribuiscono grande importanza relativamente al rendimento energetico.

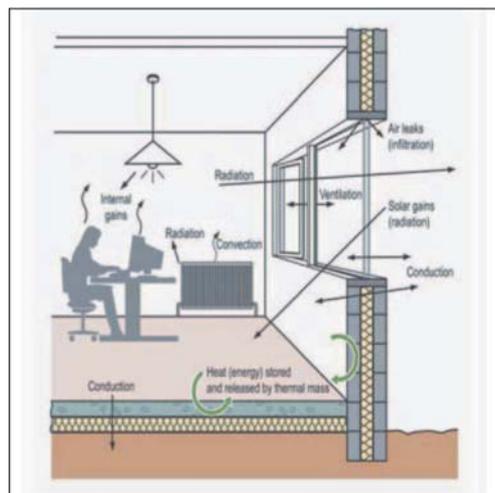
L'energia (ad esempio il calore) è trasportata per trasmissione (conduzione), movimento d'aria (convezione) e/o irraggiamento.

La trasmissione dipende dall'isolamento termico o, al contrario, dalla conduttività del materiale o della costruzione.

Il movimento d'aria è regolato dalla ventilazione, ma può essere causato anche da dispersioni d'aria; per tale motivo, gli edifici diventano sempre più "ermetici" allo scopo di prevenire tali flussi imprevisti.

L'irraggiamento interessa soprattutto le pareti vetrate degli edifici, e varia con la latitudine e l'esposizione.

La direzione e l'entità dei flussi energetici variano durante la giornata, nel corso dell'anno e anche da luogo a luogo, in funzione delle condizioni climatiche esterne ed interne, ed anche della presenza di persone e di attrezzature. La capacità dei materiali edili di assorbire e cedere energia sfruttando la propria massa termica ha un impatto significativo sul rendimento energetico degli edifici. Tale effetto si può ottenere sia con ventilazione naturale, senza alcun intervento meccanico, che con metodi attivi, quali l'immissione forzata di aria o acqua attraverso serpentine e tubi nelle solette di calcestruzzo. Il principio della massa termica è descritto in dettaglio nel cap. 3.



**Fig. 2c** Flussi di calore (energia) all'interno di un edificio.

**Il calore viene fornito** dall'irraggiamento solare, e internamente dalla luce, dal riscaldamento, dagli occupanti e dalle attrezzature.

**Il calore viene disperso** a causa di dispersioni d'aria, ventilazione, irraggiamento attraverso i vetri delle finestre e per conduzione attraverso pareti, finestre e pavimenti.

**Il calore viene assorbito e ceduto** dalla massa termica dell'edificio.

In termini pratici, due sono gli scopi fondamentali dell'efficienza energetica:

1. ridurre la quantità di energia che un edificio consuma;
2. garantire un adeguato livello di comfort termico per gli occupanti.

Il calcestruzzo contribuisce al raggiungimento di ambedue gli scopi, come si vedrà nel cap. 3.



**Fig. 2d** Sezione di una parete esterna altamente isolata con strato interno di calcestruzzo pesante. La massa termica assicura un rendimento termico eccellente in tutte le stagioni combinando il maniera ottimale il flusso e l'assorbimento dell'energia (*BedZED, GB*).



**Fig. 2e** Il nuovo centro ricerca e sviluppo di Italcementi "ITCLAB" nel parco tecnologico "Km Rosso" di Bergamo. Il centro è stato progettato secondo i canoni tecnologici più avanzati da Richard Meier (*per gentile concessione di Italcementi*).

La stabilità termica del calcestruzzo contribuisce a realizzare edifici caratterizzati da bassi consumi energetici e “a prova di futuro”

### 3. L'USO DEL CALCESTRUZZO E IL FABBISOGNO ENERGETICO DEGLI EDIFICI

L'utilizzo della massa termica, la capacità di immagazzinamento di calore della struttura del calcestruzzo, riduce le esigenze di riscaldamento e raffreddamento di un edificio, pertanto consente di abbattere i consumi energetici. L'inerzia termica del materiale ha la capacità di contenere le oscillazioni della temperatura, ritardando il raggiungimento delle temperature di picco all'interno degli edifici e mantenendo, in tal modo, condizioni climatiche interne più confortevoli e più stabili (v. fig. 3a). Tale principio è riconosciuto dalla metodologia prescritta dalla norma EN ISO 13790, che affianca la Direttiva 2002/91/ (v. cap. 4).

#### Il principio della massa termica

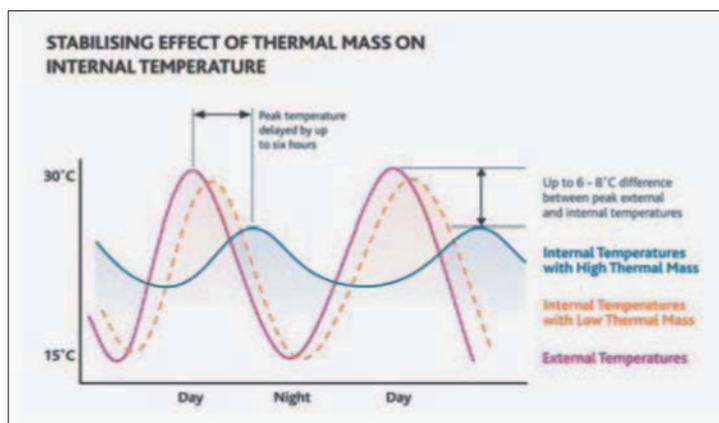


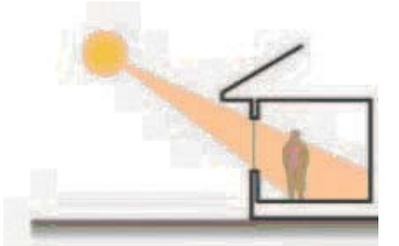
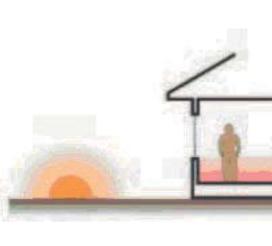
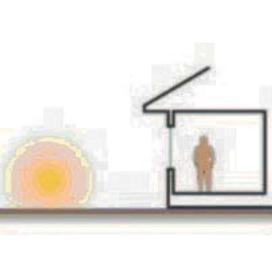
Fig. 3a L'effetto della massa termica sul confort. (tratto da *La massa termica per l'edilizia abitativa*, pubblicazione a cura di The Concrete Centre, GB).

Essendo un materiale pesante, il calcestruzzo nella stagione fredda assorbe calore dalle fonti disponibili, quali i raggi solari e il calore degli occupanti, e lo immagazzina per poi cederlo successivamente nell'arco della giornata (v. fig. 3b). Per contro, la capacità del calcestruzzo di raffreddarsi di notte e poi di liberare quest'energia "fresca" all'interno dell'edificio nelle ore diurne, fa sì che il materiale sia in grado di offrire un contributo importante al comfort termico anche durante l'estate.

Il calcestruzzo pesante fornisce il più alto livello di massa termica. Il calcestruzzo isolante leggero fornisce, invece, un livello più basso, ma comunque utile. È noto da tempo che la massa termica ha un effetto positivo sul fabbisogno energetico e sul comfort termico degli edifici, ma tale fattore è stato inserito nelle normative riguardanti i consumi energetici degli edifici solo in tempi relativamente recenti (v. cap. 4). Nell'arco della giornata, il livello di massa termica di un materiale determina la profondità con cui il calore penetra nello stesso e, di conseguenza, la sua capacità di assorbire energia, fungendo in tal modo da deposito termico.

La massa termica d'estate			
	<p><b>Nelle ore diurne</b> Nelle giornate calde, le finestre si tengono chiuse per non far entrare l'aria calda, avendo cura di regolare la schermatura per minimizzare l'accumulo termico. Il raffreddamento è fornito dalla massa termica. Quando le temperature sono meno rigide, è possibile aprire le finestre per garantire la ventilazione.</p>		<p><b>Nelle ore notturne</b> Se la giornata è stata afosa, la sera gli occupanti aprono le finestre in modo da rinfrescare la massa termica.</p>

Fig. 3b (continua a p. 11) Raffrescamento passivo d'estate, assorbimento e cessione del calore accumulato durante il periodo invernale (per gentile concessione di The Concrete Centre, GB).

La massa termica d'inverno			
	<p><b>10.00 - 17.00</b></p> <p>Il sole penetra attraverso le finestre esposte a sud ed irradia la massa termica che in tal modo si riscalda insieme all'aria. Nelle belle giornate, il calore del sole rende l'ambiente confortevole da metà mattina fino al tardo pomeriggio.</p>		<p><b>17.00 - 23.00</b></p> <p>Dopo il tramonto, la massa termica ha ormai assorbito una notevole quantità di calore, che viene lentamente liberata e ceduta all'ambiente, garantendo così condizioni confortevoli di notte.</p>
	<p><b>23.00 - 7.00</b></p> <p>Gli occupanti cedono calore all'ambiente, contribuendo in tal modo a riscaldarlo, per cui occorre solo una minima quantità di riscaldamento supplementare. Inoltre, buona ermeticità e isolamento minimizzano la dispersione di calore.</p>		<p><b>7.00 - 10.00</b></p> <p>Le prime ore del mattino sono quelle in cui i sistemi di riscaldamento solare passivo hanno più difficoltà a mantenere il comfort termico. La massa termica ha di solito ceduto ormai la maggior parte del suo calore, e gli occupanti devono ricorrere al riscaldamento supplementare. Tuttavia, buona ermeticità e isolamento contribuiscono a minimizzare tale esigenza.</p>

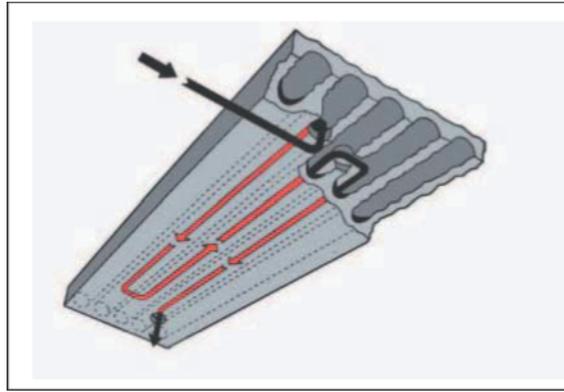
Per spiegare la notevole capacità del calcestruzzo di immagazzinare calore, può essere utile confrontare alcuni tipi di pareti: una parete in blocchi di materiale pesante con finitura a intonaco assorbe calore fino a sette volte di più rispetto ad una parete con telaio in legno con finitura di cartongesso. Ciò significa che in una torrida giornata d'estate, la maggiore capacità di assorbire calore di un'abitazione realizzata con materiali pesanti può avere un effetto di raffreddamento pari a quello di due condizionatori portatili convenzionali.

### Come trarre il massimo vantaggio dalla massa termica

La massa termica del calcestruzzo assicura il migliore rendimento negli edifici in cui la temperatura varia regolarmente nell'arco della giornata. Ad esempio, nelle scuole o negli uffici in cui i picchi di accumulo di calore interno sono considerevoli e coincidono con i picchi di accumulo termico, l'effetto "tampone" ("buffer") del calcestruzzo rallenta e ritarda il raggiungimento dei picchi di temperatura. L'abbassamento della temperatura che si registra la sera, quando gli edifici si svuotano, dà modo al calcestruzzo di raffreddarsi durante la notte.

La presenza di finiture interne quali, ad esempio, cartongesso e moquette, riduce, in una certa misura, la massa termica, agendo da strato isolante. Di conseguenza, non necessariamente un edificio strutturalmente costruito con materiale pesante fornirà automaticamente un alto livello di massa termica; ciò dipende, infatti, dal grado di interazione termica tra gli elementi strutturali di calcestruzzo e lo spazio occupato, vale a dire da quanto calore essi riescono a scambiare con l'ambiente circostante. L'ideale sarebbe che l'isolamento delle pareti esterne fosse collocato dietro lo strato interno di calcestruzzo (ad esempio, nell'intercapedine), mentre l'isolamento dei piani terreni fosse collocato sotto la soletta. A parte ciò, la regola vuole che, nei limiti del possibile, la superficie del calcestruzzo sia esposta termicamente in modo diretto o attraverso l'uso di finiture quali vernice, piastrelle o malta umida. La regola pratica vuole che per essere efficace la massa debba essere "visibile" per la fonte interna di calore.

Anche se alcuni tipi di pareti di calcestruzzo prevedono l'uso di un isolante interno in combinazione con il taglio termico, l'applicazione di pavimenti di calcestruzzo consente comunque di ottenere, in tali edifici, un significativo livello di massa termica. Laddove il clima è caratterizzato da temperature estreme per lunghi periodi di tempo, i sistemi passivi che prevedono l'uso della massa termica possono risultare meno efficienti: in tali condizioni sono più utili i sistemi attivi (meccanicamente assistiti), nei quali l'energia è trasferita dall'acqua nelle serpentine o dall'aria nei tubi (v. fig. 3c). L'elevata conduttività termica del calcestruzzo favorisce una distribuzione efficace del calore assorbito dall'aria o dall'acqua nell'ambiente, attraverso la soletta. Quest'approccio offre enormi vantaggi anche laddove si registra un enorme accumulo di calore interno, ad esempio negli uffici che hanno molti computer o altre apparecchiature, perché l'aria e l'acqua fredda possono migliorare la capacità di assorbimento del calore della soletta.



**Fig. 3c** Il sistema Termodeck: la ventilazione meccanica trasporta l'aria a bassa velocità attraverso un solaio alveolare prefabbricato, soluzione che garantisce un buon trasferimento di calore, grazie al contatto prolungato tra l'aria e il calcestruzzo. Di solito in ogni soletta si utilizzano tre fori su cinque e un diffusore d'aria è situato nella parte inferiore della soletta, all'intradosso (per gentile concessione di Termodeck®, Svezia).

### Studi sulla massa termica

L'effetto della massa termica è noto anche grazie all'opera di un gruppo di studio dell'Università di Tampere in Finlandia (Hietamäki et al. 2003), che da un'attenta analisi di 28 lavori internazionali ha tratto le seguenti conclusioni:

- la massa termica consente di risparmiare il 2-15% dei costi di riscaldamento, confrontando gli edifici costruiti con materiali leggeri e pesanti nelle condizioni climatiche dei paesi dell'Europa del Nord ciò corrisponde ad una riduzione del 10%;
- se d'estate non si usano sistemi di raffrescamento, negli edifici costruiti con materiali pesanti la temperatura interna più alta raggiunta è comunque di 3-6 gradi minore di quella che si raggiunge in un edificio analogo costruito con materiali leggeri; se ne deduce che l'elevata massa termica riduce l'esigenza di raffrescamento;
- la ventilazione notturna negli edifici commerciali può ridurre o evitare l'uso del raffrescamento meccanico. Se associato ad una massa termica elevata, ciò **diminuisce l'energia necessaria per il raffrescamento in misura che può raggiungere anche il 50%**;
- associando una massa termica elevata con una buona ermeticità, il consumo energetico per il riscaldamento delle abitazioni unifamiliari può diminuire del 20% rispetto a quello delle stesse abitazioni costruite con materiali leggeri.

Uno studio norvegese ha messo a confronto il rendimento estivo di un'abitazione unifamiliare con ventilazione notturna con quello di un edificio commerciale con ventilazione notturna o raffrescamento attivo con diversi orari di funzionamento (Dokka T H, 2005). La simulazione si è basata su dati relativi al clima norvegese, che sono stati inseriti in un modello, disponibile in commercio, di calcolo termico in regime dinamico. Dai risultati è emerso che il riscaldamento dell'edificio residenziale costruito con materiali pesanti avrebbe richiesto un consumo di energia più basso del 7% circa rispetto all'edificio costruito con materiali leggeri, e che la massa termica del calcestruzzo influiva in misura considerevole sul comfort termico. Per l'edificio commerciale, la differenza nel consumo energetico necessario per il riscaldamento sarebbe stata di circa il 10%, e nel caso del sistema di raffrescamento attivo, il raffrescamento dell'edificio realizzato con materiali leggeri avrebbe richiesto oltre il 30% di energia in più. Nell'edificio costruito con materiali leggeri, nonostante la presenza del sistema di raffrescamento passivo e della ventilazione notturna, non si è riusciti ad evitare un surriscaldamento che ha fatto registrare per 179 ore temperature superiori a 26° C.

I risultati delle indagini più recenti sull'argomento sono riportati nel cap. 5.



**Fig. 3d** Scuola superiore a basso consumo energetico costruita nel 1993 a Gislaved, Svezia, con il sistema TermoDeck e ampliata nel 2006 fino a una superficie totale di 12.000 m<sup>2</sup> (per gentile concessione di Strängbetong, Svezia).

La Direttiva fornisce un riferimento comune per il calcolo del rendimento energetico degli edifici in Europa e stabilisce le prescrizioni minime per gli edifici di nuova costruzione e per quelli ristrutturati

## 4. LA DIRETTIVA SUL RENDIMENTO ENERGETICO NELL'EDILIZIA

La Direttiva 2002/91/CE del 16 dicembre 2002, entrata in vigore in Italia nel settembre del 2005, si pone l'obiettivo di ridurre il consumo energetico degli edifici di nuova costruzione nei paesi dell'UE. I 160 milioni di edifici censiti in Europa, con i loro occupanti, rappresentano il 40% del consumo energetico del Vecchio Continente e costituiscono la principale fonte di emissioni di CO<sub>2</sub>. In una prima fase la Direttiva si applica solo agli edifici esistenti la cui superficie complessiva è superiore a 1000 m<sup>2</sup>.

### Le prescrizioni della Direttiva

La Direttiva prevede una serie di norme e strumenti riguardanti il rendimento energetico, che hanno effetti sul progetto e sul funzionamento degli edifici. La presente pubblicazione si concentra sul potenziale ruolo che può avere il calcestruzzo per raggiungere le finalità della Direttiva: per tale motivo, in questa sede, non si esamineranno, in dettaglio, tutti gli aspetti della normativa.

Le disposizioni della Direttiva invitano Istituzioni, Enti e progettisti a intervenire attraverso vari modi,:

- fornendo una base comune metodologica per il calcolo del rendimento energetico integrato degli edifici;
- fornendo le prescrizioni minime riguardo al rendimento energetico degli edifici di nuova costruzione, ivi inclusi gli aspetti relativi al raffrescamento;
- imponendo la verifica del consumo energetico degli edifici una volta realizzati e della loro conformità alle norme;
- prevedendo l'utilizzo ai fini della valutazione del rendimento energetico di un indicatore sintetico del CO<sub>2</sub>, che promuova l'uso delle fonti energetiche alternative (ad esempio i pannelli solari);
- promuovendo l'uso di sistemi di riscaldamento e raffrescamento passivi;
- ribadendo che un buon rendimento energetico non deve in alcun modo influire sulla qualità dell'ambiente interno;
- imponendo una certificazione energetica degli edifici che accresca la consapevolezza del problema e conferisca valore agli immobili con maggiore efficienza energetica (v. fig. 4a).

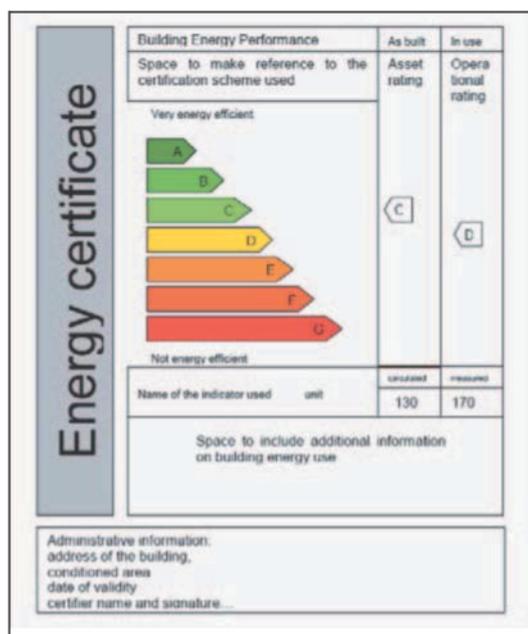


Fig. 4a Come potrebbe essere la certificazione energetica degli edifici (per gentile concessione di [www.eplabel.org](http://www.eplabel.org)).

In passato, nell'esecuzione dei calcoli per determinare il rendimento energetico ingegneri ed esperti nella realizzazione di impianti energetici dovevano eseguire i progetti tenendo conto del valore prescritto della trasmittanza U degli elementi per rivestimenti, pavimenti, pareti e tetto.

Alcuni paesi hanno applicato un approccio olistico al rendimento energetico (il consumo energetico calcolato dell'edificio, di solito espresso in kWh/m<sup>2</sup>), poi recepito nella nuova Direttiva. Questo cambiamento apre la possibilità che nella valutazione del rendimento energetico degli edifici si tenga conto anche di aspetti quali la massa termica e l'ermeticità.

La Direttiva è flessibile circa la valutazione del rendimento energetico ed introduce il criterio del rendimento energetico integrato, che consente di tenere conto nella progettazione anche di aspetti quali la massa termica.

Gli aspetti che la Direttiva impone vengano presi in conto sono:

- le proprietà termiche dell'edificio (es. il rivestimento esterno e le murature interne), ivi inclusa l'ermeticità;
- gli impianti di riscaldamento e dell'acqua calda, inclusi gli aspetti relativi all'isolamento;
- i sistemi di condizionamento dell'aria;
- i sistemi di ventilazione meccanica;
- gli impianti di illuminazione incorporati (soprattutto negli edifici non residenziali);
- la posizione e l'esposizione dell'edificio, ivi incluse le condizioni climatiche esterne;
- i sistemi solari passivi e la protezione solare;
- la ventilazione naturale;
- le condizioni climatiche interne, ivi incluso il clima interno previsto dal progetto.

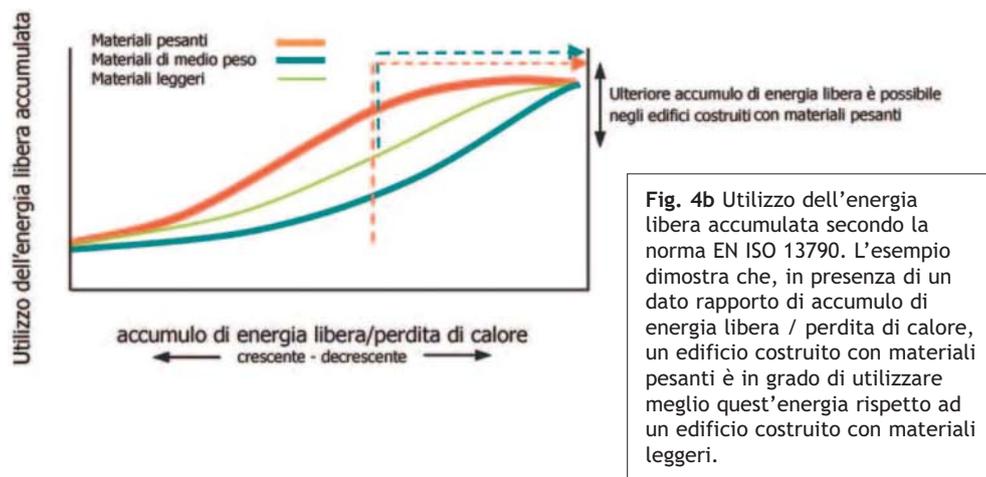
### Calcolare il fabbisogno energetico all'interno di un edificio

L'applicazione della Direttiva richiede l'uso di una serie di norme, la più importante delle quali è forse la EN ISO 13790 - *Prestazione termica del fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento (CEN 2005)*, che definisce i metodi di valutazione della massa termica e dell'ermeticità, stabilendo come calcolare il fabbisogno energetico di un edificio. La suddetta norma permette un calcolo termico di tipo "quasi stazionario" e anche calcoli molto più sofisticati, di tipo "dinamico".

I metodi dinamici consentono di simulare il vero comportamento termodinamico di una stanza o di un edificio, ma essendo basati su un progetto molto dettagliato e su dati climatici, possono richiedere molto tempo. Tuttavia, dove esiste la possibilità di accedere facilmente a raccolte di dati climatici su base oraria e di utilizzare un software di facile utilizzo, il modello dinamico riscuote sempre maggior favore.

Il metodo "quasi stazionario" è più semplice e tiene conto dei vantaggi della massa termica, caratteristiche che lo rendono l'ideale per le prime fasi della progettazione, quando si devono prendere decisioni strategiche sui materiali da impiegare. Tale metodo consente di valutare la massa termica quantificando l'energia libera accumulata (vale a dire il calore emanato dall'irraggiamento solare e dagli occupanti) e l'energia acquistata, la maggior parte della quale può essere utilizzata in un edificio costruito con materiali pesanti, che pertanto richiede un consumo energetico più basso rispetto ad un edificio in materiali leggeri.

La fig. 4b evidenzia il metodo di calcolo: come si vede, negli edifici costruiti con materiali pesanti è possibile utilizzare gran parte dell'energia libera accumulata. Ciò rappresenta un punto importante della norma EN ISO 13790.



In una ricerca recente è chiaramente dimostrato il ruolo del calcestruzzo ai fini della stabilità termica e del rendimento energetico degli edifici.

## 5. DIMOSTRAZIONE DELL'EFFICIENZA ENERGETICA DEL CALCESTRUZZO

Per stabilire quanto il calcestruzzo mantenga condizioni climatiche interne costanti, minimizzando al tempo stesso il consumo energetico, sono state effettuate diverse simulazioni numeriche (Johannesson et al, 2006) (Johannesson G, Lieblang P, e Öberg M). Lo scopo è stato quello di studiare il bilancio energetico degli edifici residenziali e commerciali costruiti con materiali pesanti e leggeri in diverse regioni europee caratterizzate da condizioni climatiche diverse (dalla Svezia al Portogallo). È stato, quindi, sviluppato un progetto semplice di edificio a due piani (v. fig. 5a) adatto ad ospitare sia uffici che abitazioni. Sono state previste due diverse configurazioni: la versione costruita con materiali pesanti prevedeva solai e murature interne ed esterne di calcestruzzo, quella costruita con materiali leggeri aveva strutture di legno o di acciaio leggeri fatta eccezione per la soletta del pianterreno, realizzata in calcestruzzo. In ambedue i casi, l'isolamento termico utilizzato è stato lo stesso, onde poter studiare accuratamente l'effetto della sola massa termica.



Fig. 5a Modello di edificio utilizzato per i test energetici.

### Come calcolare il rendimento energetico teorico

Sono disponibili diversi programmi per il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici, molti dei quali elaborati proprio a seguito dell'introduzione della norma EN ISO 13790.

Lo studio sul rendimento energetico del calcestruzzo ha utilizzato cinque differenti software prodotti in Danimarca, Germania e Svezia. Tre programmi applicano un modello "quasi stazionario", uno applica un modello dinamico generico e l'ultimo applica, contemporaneamente, i due approcci.

I risultati delle prove effettuate con i cinque programmi dimostrano che un edificio costruito con calcestruzzo pesante offre vantaggi significativi in termini di rendimento energetico rispetto ad un edificio analogo costruito con materiali leggeri. Tutti i software utilizzati hanno evidenziato un chiaro vantaggio a favore dell'edificio costruito con i materiali pesanti.

Per l'edificio residenziale con finestre esposte in posizione tale da non comportare accumuli di energia, la versione realizzata con materiali pesanti ha richiesto tra il 2 e il 9% di energia, primaria o acquistata, in meno (1,5-6 kWh/m<sup>2</sup>/anno) rispetto alla versione costruita con materiali leggeri. Quando le finestre sono state esposte a sud, il vantaggio a favore della prima soluzione è risultato ancora più evidente. Nella fig. 5b si può vedere che nell'edificio costruito con materiali pesanti e con finestre esposte a sud la quantità di energia necessaria per il raffrescamento è molto più bassa rispetto a quella richiesta per l'edificio realizzato in materiali leggeri con orientamento delle finestre tale da non comportare accumuli di energia. In altre parole, i materiali pesanti consentono di sfruttare al massimo l'energia solare, riducendo al minimo i problemi legati al comfort termico.

**Il vantaggio in termini di rendimento energetico offerto dal calcestruzzo è stato**

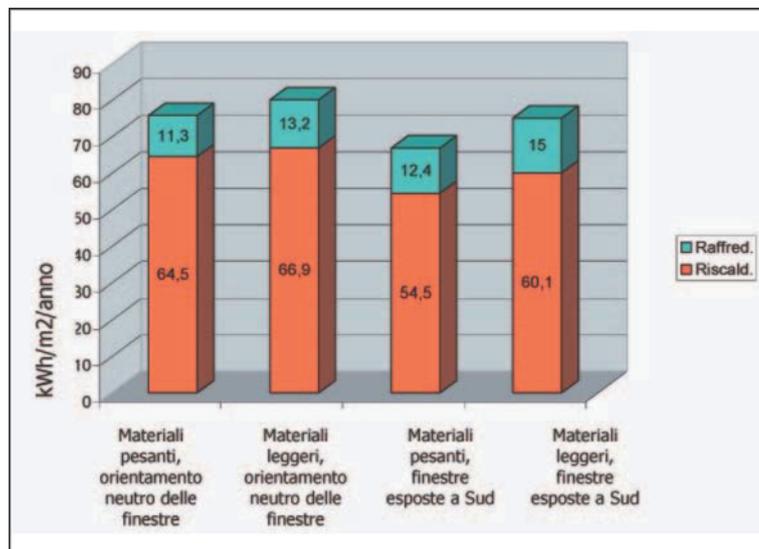


Fig. 5b Vari edifici europei sono stati analizzati con l'ausilio di software che simulavano gli effetti legati all'utilizzo di materiali leggeri e di materiali pesanti.

ancor più marcato simulando un edificio per uffici (7- 15%), in cui l'effetto della massa termica è apparso più evidente. Il progetto prevedeva un impianto di condizionamento dell'aria (per dissipare l'accumulo di calore interno fornito dagli occupanti e dalle apparecchiature), ma la versione costruita con materiali pesanti, che utilizzava la massa termica per minimizzare il ricorso al raffrescamento, ha evidenziato un rendimento termico migliore rispetto alla versione realizzata con materiali leggeri. È stato difficoltoso effettuare la valutazione del comfort termico utilizzando i modelli che usano l'approccio "quasi stazionario", ma considerando la riduzione dell'energia necessaria per il raffrescamento come un indicatore di comfort termico, si può sostenere che l'edificio costruito con materiali pesanti ha evidenziato un rendimento migliore del 10-20% rispetto a quello dell'edificio costruito con materiali leggeri.

In ambedue i casi, se la massa termica fosse stata considerata nelle fasi iniziali della progettazione unitamente all'impiego dei condizionatori e alla stima delle temperature interne, il risparmio energetico avrebbe potuto essere ben più alto.

In breve, i software hanno fornito risultati coerenti sia per la richiesta totale di energia che per relazionare edifici realizzati con materiali pesanti e leggeri. I risultati forniti dai due metodi di calcolo sono tra loro comparabili per gli edifici di calcestruzzo, ma molto meno per gli edifici costruiti con materiali leggeri.

Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che la minore stabilità termica di questi ultimi rende più difficile prevedere il comportamento reale delle strutture per gli scenari di test utilizzati.

### I vantaggi del calcestruzzo comprovati dalle analisi su edifici reali

Per avere conferma della validità complessiva dei risultati precedentemente citati, gli stessi software sono stati utilizzati per analizzare diversi edifici reali (v. fig. 5c) esposti a condizioni climatiche diverse. L'analisi è stata condotta su varie soluzioni strutturali realizzate con materiali pesanti e leggeri, ed ha considerato i dati climatici specifici di ciascun sito.

I risultati di tale studio di validazione, riassunti nella tab. 1, concordano con i dati



Fig. 5c Vari edifici europei sono stati analizzati con l'ausilio di software che simulavano gli effetti legati all'utilizzo di materiali leggeri e pesanti.

Tabella 1: Esempio derivato da studi su edifici reali. Fabbisogno energetico annuo (kWh/m<sup>2</sup>)

Tipo di edificio	Fabbisogno energetico	Materiale pesante	Materiale Leggero
GB/Irlanda UK/Abitazione semi-indipendente. Media di 9 locali	Riscaldamento**	34	35
Semi-indipendente. Lisbona	Riscaldamento* Raffrescamento Totale	17 27 44	19 32 51
Multifamiliare, Würzburg	Riscaldamento*	51	55
Semi-indipendente, Stoccolma	Riscaldamento	78	81

**Legenda**  
 \* Regime di riscaldamento continuo  
 \*\* Media tra riscaldamento continuo e intermittente che tiene conto delle modalità d'uso del riscaldamento intermittente in questi paesi



**Fig. 5d** Torre Verde, un edificio residenziale "verde" di 12 piani (7.200 m<sup>2</sup>), costruito in calcestruzzo a Lisbona, Portogallo. Dalle analisi è emerso che rispetto ad un edificio convenzionale il volume annuo delle emissioni di CO<sub>2</sub> è più basso di 24 t. I pannelli solari forniscono il 70% dell'energia necessaria per i consumi domestici di acqua calda degli inquilini (per gentile concessione di Tirone Nunes, SA, Portogallo).



**Fig. 5e** Edificio realizzato con calcestruzzo gettato in opera a Bruxelles, Belgio (per gentile concessione dell'architetto Joël Claisse Architectures; fotografo Jean-Paul Legros, Belgio).



**Fig. 5f** L'istituto scolastico Kvernhuset a Fredrikstad, Norvegia. Un edificio "verde" costruito con calcestruzzo preconfezionato e con altre soluzioni sostenibili (per gentile concessione di Terje Heen - comune di Fredrikstad).

sperimentali ottenuti con i cinque software, ma è emersa un'osservazione interessante relativamente al riscaldamento intermittente degli edifici. Si evidenziano differenze minime tra i fabbricati realizzati con materiali pesanti e leggeri esposti a cicli intermittenti di riscaldamento, soltanto laddove il calo di temperatura, tra cicli successivi, risulta minimizzato da un isolamento efficace e da un'ermeticità adeguata.

## 6. BIBLIOGRAFIA

ARUP. Too hot to handle. Building, No. 6, 2004, UK.

ARUP/BILL DUNSTER ARCHITECTS (2004). UK Housing and Climate Change - Heavyweight versus lightweight construction, Arup Research and Development, Bill Dunster Architects, UK.

CIBSE (Chartered Institute of Building Services Engineers) (2005). Climate change and the Indoor environment: Impacts and adaptation, TM36, CIBSE, UK.

DE SAULLES T (2005). Thermal mass - a concrete solution for a changing climate. The Concrete Centre, UK, 25 pp.

DOKKA T H (2005). Varmelagringseffekt ved bruk av tunge materialer i bygninger. (Effect of thermal storage by use of heavy materials in buildings.) SINTEF report STF 50 A05045, Norvegia.

EC (2003). DIRECTIVE 2002/91/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 2002 on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Community, 2003.

HIETAMÄKI J, KUOPPALA M, KALEMA T and TAIVALANTTI K. Thermal mass of buildings - Central researches and their results. Tampere University of Technology, Institute of Energy and Process Engineering. Report 2003:174. Finlandia, 43 pp + Annex.

CEN (2005). ISO DIS 13790: 2005. Thermal performance of buildings - Calculation of energy use for space heating, CEN/TC 89.

JOHANNESSON G et al. (2006). Possibility to energy efficient houses by new integrated calculation approach. ByggTeknik No. 3, Svezia. 2006, 66 pp.

JOHANNESSON G, LIEBLANG P and ÖBERG M Holistic building design for better energy performance and thermal comfort - opportunities with the Energy Performance of Buildings Directive. Submitted in April 2006 to the International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings. Div. of Building Technology, Dept. of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Svezia.

HACKER et al. (2006) Embodied and operational carbon dioxide emissions from housing: a case study on the effects of thermal mass and climate change. ARUP Research commissioned by The Concrete Centre and British Cement Association, UK.

ÖBERG M (2005). Integrated life cycle design - Application to Swedish concrete multi-dwelling buildings, Lund University. Division of Building Materials, Report TVBM-3103, Svezia.

**Figg. 6a e 6b** EDIFICIO ECOBOX, FUNDACIÓN METRÓPOLI per un futuro sostenibile, edificio commerciale 'verde' in calcestruzzo (Madrid, Spagna) (per gentile concessione degli architetti Vicente Olmedilla e Ángel de Diego, Spagna).





