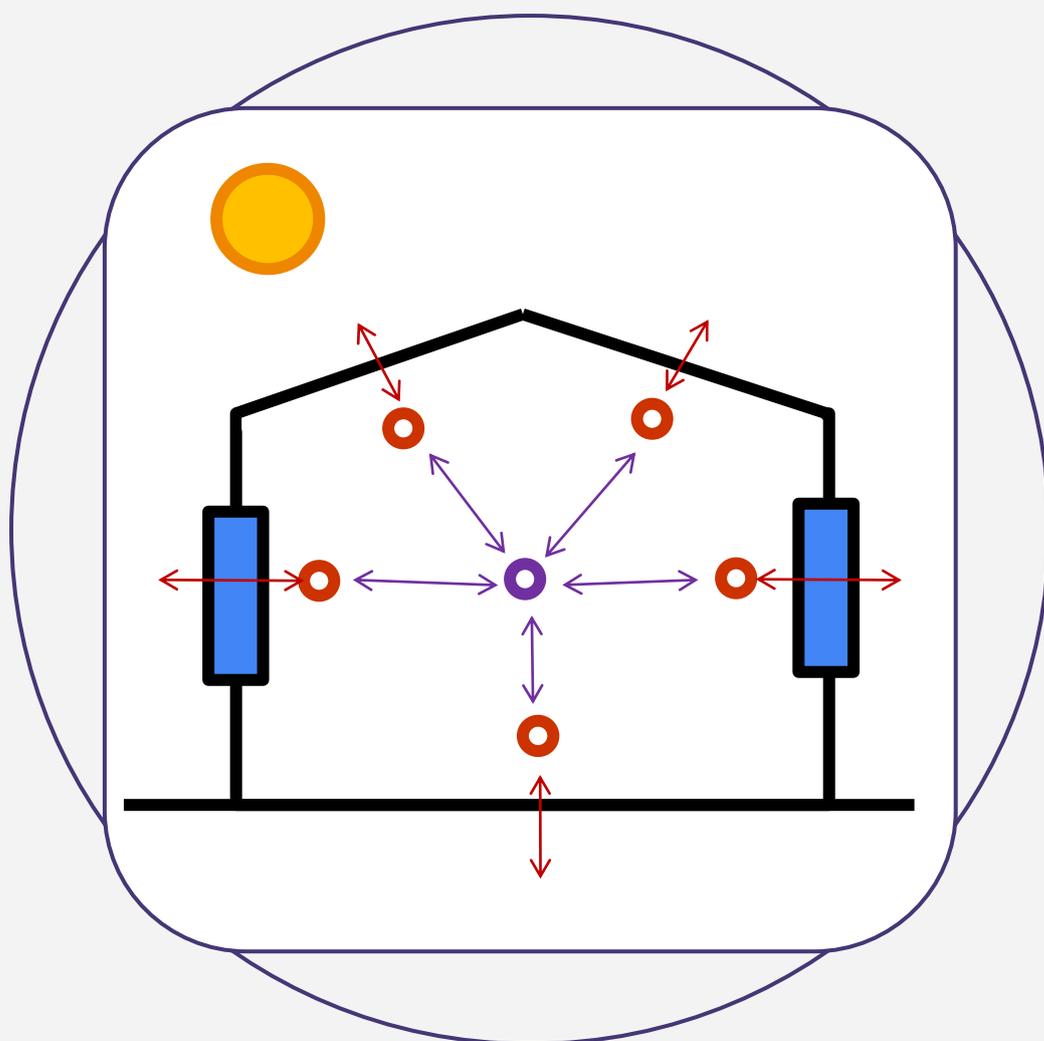


# PRESTAZIONI ESTIVE DEGLI EDIFICI

Caratteristiche dei materiali isolanti, prestazioni delle stratigrafie e comfort delle zone termiche



## I MANUALI ANIT

ANIT, Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico e acustico, pubblica periodicamente **guide e manuali** sulle tematiche legate all'efficienza energetica e all'isolamento acustico degli edifici.

Gli argomenti trattati riguardano la legislazione, le norme tecniche di riferimento, le tecnologie costruttive, le indicazioni di posa e molto altro.

Le **guide** sono riservate ai Soci ANIT e analizzano leggi e norme del settore, i **manuali** sono scaricabili per tutti gratuitamente e affrontano con un taglio pratico temi sviluppati in collaborazione con le Aziende associate.



## STRUMENTI PER I SOCI

I soci ricevono



Costante **aggiornamento** sulle **norme in vigore** con le GUIDE



I software per calcolare **tutti i parametri** energetici, igrotermici e acustici degli edifici



Servizio di **chiarimento tecnico** da parte dello Staff ANIT



Abbonamento alla rivista specializzata **Neo-Eubios**

I servizi e la quota di iscrizione variano in base alla categoria di associato (Individuale, Azienda, Onorario).

**Il presente manuale è realizzato in collaborazione con:**



### Tutti i diritti sono riservati

Questo documento è stato realizzato da Tep Srl.

Le informazioni riportate sono da ritenersi indicative ed è sempre necessario riferirsi a eventuali documenti ufficiali in vigore. I contenuti sono aggiornati alla data in copertina. Si raccomanda di verificare sul sito [www.anit.it](http://www.anit.it) l'eventuale presenza di versioni più aggiornate.

Nessuna parte di questo documento può essere riprodotta o divulgata senza l'autorizzazione scritta di Tep Srl.

# INDICE

<b>PREMESSA</b> .....	<b>2</b>
<b>1 MATERIALI, STRATIGRAFIE, ZONA TERMICA</b> .....	<b>3</b>
1.1 <i>Le prestazioni estive dell'involucro opaco</i> .....	3
1.2 <i>Requisiti minimi estivi</i> .....	4
1.3 <i>CAM – Criteri ambientali minimi</i> .....	5
<b>2 PRESTAZIONI ESTIVE DEI MATERIALI</b> .....	<b>7</b>
2.1 <i>Introduzione</i> .....	7
2.2 <i>I materiali isolanti funzionano anche d'estate?</i> .....	7
2.3 <i>Condizioni al contorno variabili (e non stazionarie)</i> .....	8
2.4 <i>Diffusività e capacità termica</i> .....	9
<b>3 PARAMETRI ESTIVI DI UNA STRATIGRAFIA</b> .....	<b>11</b>
3.1 <i>Introduzione</i> .....	11
3.2 <i>I parametri dinamici della norma UNI EN ISO 13786</i> .....	11
<b>4 ANALISI ESTIVA DELLA ZONA TERMICA</b> .....	<b>14</b>
4.1 <i>Il comfort estivo all'interno di un edificio</i> .....	14
4.2 <i>Simulazione dinamica oraria secondo UNI EN ISO 52016-1</i> .....	14
4.3 <i>Il modello del comfort adattivo secondo UNI EN 16798-1</i> .....	15
<b>5 ESEMPI DI SOLUZIONI AD ALTE PRESTAZIONI ESTIVE</b> .....	<b>17</b>
5.1 <i>Inerzia e isolamento</i> .....	17
5.2 <i>Esempi di stratigrafie</i> .....	18
<b>CONTATTI</b> .....	<b>23</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>23</b>

## PREMESSA

Il presente manuale propone una sintesi su come valutare le prestazioni energetiche estive dell'involucro opaco degli edifici attraverso un'analisi dei seguenti 3 aspetti:

- le prestazioni dei singoli materiali;
- le prestazioni delle stratigrafie;
- le prestazioni della zona termica.

In altri termini abbiamo provato a individuare per ogni livello le chiavi di lettura per una corretta analisi estiva e le prestazioni che influenzano i livelli successivi. Ad esempio come le caratteristiche di un materiale influenzano le prestazioni di una stratigrafia e come queste ultime influenzano le prestazioni dell'intera zona termica.

Trattandosi di un tema molto ampio abbiamo deciso di limitare l'attenzione allo studio del solo involucro opaco, ma anche così siamo fiduciosi di poter dare un aiuto a chi è interessato a capire come governare al meglio le scelte progettuali.

Il lavoro è stato realizzato in collaborazione con l'azienda CELENIT associata ad ANIT dal 1989.

Buona lettura,  
ANIT

# 1 MATERIALI, STRATIGRAFIE, ZONA TERMICA

## 1.1 Le prestazioni estive dell'involucro opaco

Il controllo delle prestazioni estive degli edifici è un tema ampio e affascinante: riguarda infatti numerosi aspetti progettuali, normativi e tecnologici, ognuno affrontabile da diverse angolazioni.

Ad esempio:

- potremmo affrontare il tema dal punto di vista energetico e studiare le strategie necessarie a ridurre il fabbisogno di raffrescamento degli edifici;
- oppure dal punto di vista del comfort estivo e ottimizzare le scelte progettuali e le modalità d'uso degli spazi interni per favorire condizioni climatiche ottimali agli utenti;
- oppure ancora analizzare il problema partendo dagli obblighi legislativi e quindi impostare le scelte sulla base delle indicazioni previste dal legislatore atte a limitare il rischio di surriscaldamento.

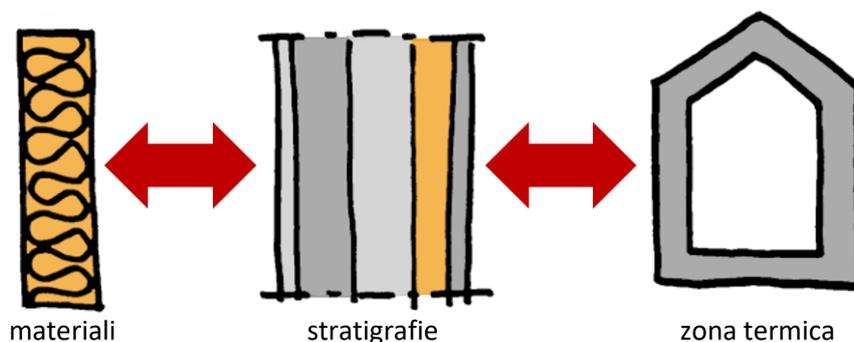
Per il presente manuale abbiamo deciso di concentrare l'attenzione su uno dei molteplici "ingredienti" che ha a che fare con le prestazioni estive degli edifici, ovvero l'involucro opaco.

A tale scopo abbiamo deciso di presentare i temi proponendo un'analisi su tre livelli differenti:

- 1- i singoli materiali;
- 2- le stratigrafie;
- 3- l'intera zona termica.

Si tratta di tre piani d'analisi valutabili sia separatamente che in modo interconnesso: possiamo studiare le prestazioni estive di un singolo materiale e verificare le ricadute sulle prestazioni di un'intera stratigrafia, così come possiamo ottimizzare le prestazioni estive di una stratigrafia e ottenere miglioramenti di un'intera zona termica.

Per valutare in modo completo le prestazioni estive dell'involucro opaco, crediamo sia utile quindi un approfondimento basato sui suddetti tre livelli accompagnato da un inquadramento normativo e alcuni esempi di calcolo a supporto.



## 1.2 Requisiti minimi estivi

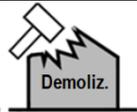
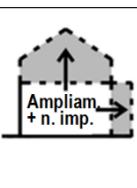
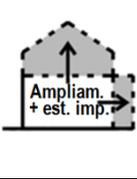
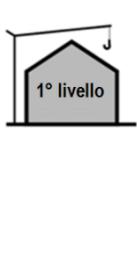
Le regole per il controllo delle prestazioni energetiche degli edifici ad oggi in vigore sono descritte dal Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015. Queste regole, che nel loro insieme hanno preso il nome di “**Requisiti minimi**”, sono articolate su numerosi aspetti riguardanti sia indici generali dell’edificio che prescrizioni puntuali su singoli componenti d’involucro o d’impianto.

Per quanto riguarda le prestazioni estive, il decreto propone diversi obblighi in funzione dell’ambito d’applicazione dell’intervento e della categoria di edificio.

Se limitiamo la nostra analisi alle verifiche estive legate alle prestazioni dell’involucro opaco, il decreto prevede il controllo:

- 1- dell’indice energetico per il servizio di raffrescamento  $EP_{c,nd}$ ;
- 2- delle prestazioni inerziali delle strutture opache esposte alla radiazione attraverso la trasmittanza periodica  $Y_{ie}$  o la massa superficiale  $M_s$ ;
- 3- del rischio di surriscaldamento della copertura attraverso un’analisi dell’efficacia delle strategie progettuali adottate (riflettanza solare, intercapedini ventilate, coperture verdi).

Gli ambiti d’applicazione previsti dal DM 26 giugno 2015 sono:

	<p><b>Nuova costruzione</b></p> <p>Per edificio di nuova costruzione si intende l’edificio il cui titolo abilitativo sia stato richiesto dopo l’entrata in vigore del DM 26/6/15 (ovvero dal 1° ottobre 2015)</p>
	<p><b>Demolizione e ricostruzione</b></p> <p>Rientrano in questa categoria gli edifici sottoposti a demolizione e ricostruzione, qualunque sia il titolo abilitativo necessario.</p>
	<p><b>Ampliamento di edifici esistenti con nuovo impianto</b></p> <p>Ampliamento di edifici esistenti (dotati di nuovi impianti tecnici) per il quale valga almeno una delle seguenti condizioni:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• nuovo volume lordo climatizzato &gt; 15% volume lordo climatizzato esistente</li> <li>• nuovo volume lordo climatizzato &gt; 500 m<sup>3</sup></li> </ul>
	<p><b>Ampliamento di edifici esistenti con estensione di impianto</b></p> <p>Ampliamento di edifici esistenti (collegati all’impianto tecnico esistente) per il quale valga almeno una delle seguenti condizioni:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• nuovo volume lordo climatizzato &gt; 15% volume lordo climatizzato esistente</li> <li>• nuovo volume lordo climatizzato &gt; 500 m<sup>3</sup></li> </ul>
	<p><b>Ristrutturazioni importanti di primo livello</b></p> <p>La ristrutturazione prevede contemporaneamente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• un intervento che interessa l’involucro edilizio con un’incidenza &gt; 50 % della superficie disperdente lorda complessiva dell’edificio;</li> <li>• la ristrutturazione dell’impianto termico per il servizio di climatizzazione invernale e/o estiva asservito all’intero edificio.</li> </ul> <p>In tal caso i requisiti di prestazione energetica si applicano all’intero edificio e si riferiscono alla sua prestazione energetica relativa al servizio o servizi interessati.</p>
	<p><b>Ristrutturazioni importanti di secondo livello</b></p> <p>L’intervento interessa l’involucro edilizio con un’incidenza &gt; 25 % della superficie disperdente lorda complessiva dell’edificio e può interessare l’impianto termico per il servizio di climatizzazione invernale e/o estiva.</p>
	<p><b>Riqualificazione energetica dell’involucro</b></p> <p>Interventi sull’involucro che coinvolgono una superficie ≤ 25 % della superficie disperdente lorda complessiva dell’edifici.</p>

Non è sempre facile identificare l'ambito d'applicazione rispetto alle categorie sopra elencate, per approfondire questo tema rimandiamo alla [Guida ANIT sui requisiti minimi](#) e al servizio di [chiarimento dedicato ai Soci ANIT](#). Per quanto riguarda i 3 punti citati, l'obbligo di verifica dipende dall'ambito d'applicazione dell'intervento e dal tipo di edificio in oggetto, come mostrato dalla seguente tabella:

		Ambiti d'applicazione previsti dal DM 26/6/2015													
		Nuovo edificio		Demoliz.		Ampliam. + n. imp.		1° livello		Ampliam. + est. imp.		2° livello		Riq. energet.	
Categoria utenze	E1	Residenze													
	E2	Uffici													
	E3	Ospedali													
	E4	Ricreativi													
	E5	Negozi													
	E7	Sportivi													
	E6	Scuole													
	E8	Capannoni													
		Verificare $EP_{c,nd}$ Verificare $Y_{ie}$ o $M_s$ Verificare surriscaldamento copertura						Verificare surriscaldamento copertura							
		Verificare $EP_{c,nd}$ Verificare surriscaldamento copertura													

**Tabella 1** Tavola sinottica relativa alle verifiche estive previste dal DM 26/6/2015 su strutture opache e zone termiche. La tabella è una sintesi dello schema proposto all'interno della "Guida ANIT - Regole per l'efficienza energetica degli edifici" disponibile per i soci ANIT sul sito [www.anit.it](http://www.anit.it).

Come si vede quindi la verifica di tutti e tre i parametri estivi non è sempre obbligatoria, ma varia di caso in caso. Tra questi parametri, il controllo di  $EP_{c,nd}$  è il più complesso perché richiede uno studio del bilancio energetico delle zone termiche coinvolte dagli interventi, ovvero una simulazione completa dei flussi energetici che attraversano l'involucro. Invece le verifiche di trasmittanza periodica  $Y_{ie}$ , massa superficiale  $M_s$  e del surriscaldamento della copertura sono meno complesse e possono essere documentate a partire dallo studio delle singole stratigrafie oggetto di intervento.

È bene segnalare che ad oggi i requisiti minimi sono in fase di revisione, come richiesto dalla Direttiva 2018/844/UE e promesso dall'art.4 del DLgs 48/2020. Questa revisione probabilmente toccherà le modalità di controllo delle prestazioni estive degli edifici, ma per il momento non ci è dato sapere né i tempi né la portata di queste modifiche.

### 1.3 CAM – Criteri ambientali minimi

Il Decreto Ministeriale 23 Giugno 2022 "Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi (GU Serie Generale n.183 del 06-08-2022)", anche detto CAM, in vigore dal 4 dicembre 2022, prevede una serie di requisiti di sostenibilità suddivisi per gruppi di edifici, singoli edifici, componenti edilizi e cantiere.

Si tratta di fatto di una serie di regole obbligatorie da documentare nelle relazioni progettuali e di gara per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di **edifici pubblici**.

Alcuni di questi criteri riguardano da vicino il controllo delle prestazioni estive, ovvero:

- 1- la massa superficiale o la trasmittanza termica periodica delle strutture opache (Criterio 2.4.2);
- 2- la temperatura operante estiva della zona termica (Criterio 2.4.2);
- 3- l'indice di riflessione solare (SRI) delle strutture opache di copertura (Criterio 2.3.3).;
- 4- il comfort termo igrometrico degli ambienti interni (Criterio 2.4.6).

Anche in questo caso limitiamo la nostra analisi ai primi due aspetti, e riportiamo il testo del punto 2.4.2:

#### 2.4.2 Prestazione energetica

##### Criterio

*Fermo restando quanto previsto all'allegato 1 del decreto interministeriale 26 giugno 2015 [...] e fatte salve le norme o regolamenti locali (ad esempio i regolamenti regionali, ed i regolamenti urbanistici e edilizi comunali), qualora più restrittivi, i progetti degli interventi di nuova costruzione, di demolizione e ricostruzione e di ristrutturazione importante di primo livello, garantiscono adeguate condizioni di comfort termico negli ambienti interni tramite una delle seguenti opzioni:*

- a. *verifica che la massa superficiale di cui al comma 29 dell'Allegato A del decreto legislativo 19 agosto 2005 n. 192, riferita ad ogni singola struttura opaca verticale dell'involucro esterno sia di almeno 250 kg/m<sup>2</sup>;*
- b. *verifica che la trasmittanza termica periodica  $Y_{ie}$  riferita ad ogni singola struttura opaca dell'involucro esterno, calcolata secondo la UNI EN ISO 13786, risulti inferiore al valore di 0,09 W/m<sup>2</sup>K per le pareti opache verticali (ad eccezione di quelle nel quadrante Nordovest/Nord/Nord-Est) ed inferiore al valore di 0,16 W/m<sup>2</sup>K per le pareti opache orizzontali e inclinate.*
- c. *verifica che il numero di ore di occupazione del locale, in cui la differenza in valore assoluto tra la temperatura operante (in assenza di impianto di raffrescamento) e la temperatura di riferimento è inferiore a 4°C, risulti superiore all'85% delle ore di occupazione del locale tra il 20 giugno e il 21 settembre.*

[...]

##### Verifica

*La Relazione CAM, oltre a quanto chiesto nel criterio "2.2.1-Relazione CAM", include la relazione tecnica di cui al decreto interministeriale 26 giugno 2015 dianzi citato e la relazione tecnica e relativi elaborati di applicazione CAM, nella quale sia evidenziato lo stato ante operam, gli interventi previsti, i conseguenti risultati raggiungibili e lo stato post operam. Per gli edifici storici, la conformità al criterio è verificata tramite gli elaborati indicati nella norma UNI citata. Per la verifica dinamica oraria del comfort termico estivo la temperatura operante estiva ( $\theta_{o,t}$ ) si calcola secondo la procedura descritta dalla UNI EN ISO 52016-1, con riferimento alla stagione estiva (20 giugno – 21 settembre) in tutti gli ambienti principali.*

*La verifica garantisce quanto segue:*

*$|\theta_{o,t} - \theta_{rif}| < 4^\circ\text{C}$  con un numero di ore di comfort > 85%*

*dove:  $\theta_{rif} = (0.33 \theta_{rm}) + 18.8$*

*dove:*

*$\theta_{rm}$  = temperatura esterna media mobile giornaliera secondo UNI EN 16798-1.*

In altre parole il legislatore pone l'attenzione sul controllo della massa superficiale ( $M_s$ ) o della trasmittanza termica periodica ( $Y_{ie}$ ) delle strutture opache perimetrali, oppure della temperatura operante estiva ( $\theta_o$ ) con l'intento di garantire il controllo del rischio di surriscaldamento degli edifici pubblici.

Si tratta di tre parametri presentati come alternativi, ma in realtà concettualmente molto distanti tra loro: il calcolo della massa superficiale e della trasmittanza termica periodica riguarda infatti il comportamento delle singole strutture opache rispetto a una sollecitazione energetica, mentre il calcolo di  $\theta_o$  riguarda l'analisi dell'intera zona termica per ottenere una valutazione della temperatura percepita dagli utenti e confrontare questo dato con i criteri del comfort adattivo.

## 2 PRESTAZIONI ESTIVE DEI MATERIALI

### 2.1 Introduzione

In questo capitolo parliamo di prestazioni dei singoli materiali dal punto di vista estivo. Ovvero ci interroghiamo su come un materiale possa influenzare positivamente il comportamento energetico di una stratigrafia grazie alle sue caratteristiche intrinseche.

In tale contesto i materiali isolanti giocano un ruolo fondamentale grazie alla capacità di limitare il passaggio di energia sia in condizioni invernali che estive. Per ottimizzare la scelta di un prodotto oltre al valore di conduttività è possibile confrontare anche due altri parametri: la **diffusività termica**  $\alpha$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] e la **capacità termica C** volumica [ $\text{kJ}/\text{m}^3\text{K}$ ] o areica [ $\text{kJ}/\text{m}^2\text{K}$ ].

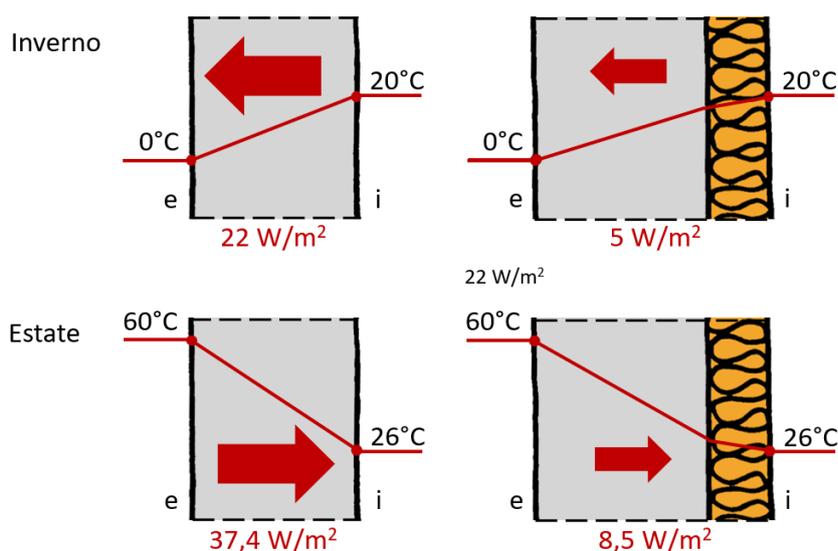
### 2.2 I materiali isolanti funzionano anche d'estate?

Sappiamo che d'inverno il passaggio di energia attraverso l'involucro edilizio è fondamentalmente frenato dalla presenza dei materiali isolanti, ovvero i materiali isolanti sono lo strumento con cui si limitano le dispersioni energetiche per trasmissione. È lecito però chiedersi se questo succede anche in condizioni estive, ovvero: i materiali isolanti sono utili anche d'estate?

Per rispondere proviamo a seguire il seguente esempio. Consideriamo le pareti schematizzate in Figura 1: a sinistra una parete non isolata (con trasmittanza termica pari a  $1.1 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ ) e a destra una parete isolata (con trasmittanza pari a  $0.25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ ).

Ipotizzando una condizione al contorno stazionaria con valori tipici invernali, ovvero una temperatura esterna di  $0^\circ\text{C}$  e una temperatura interna di  $20^\circ\text{C}$ , risulta che le due strutture sono attraversate da un flusso termico proporzionale alla loro trasmittanza:  $22 \text{ W}/\text{m}^2$  nel caso della parete non isolata e  $5 \text{ W}/\text{m}^2$  nel caso della parete isolata. In estate, mantenendo l'ipotesi delle condizioni stazionarie con temperatura aria-sole pari a  $60^\circ\text{C}$  e temperatura interna pari a  $26^\circ\text{C}$ , il flusso di calore entrante attraverso la parete non isolata è di  $37.4 \text{ W}/\text{m}^2$  e attraverso la parete isolata è di  $8.5 \text{ W}/\text{m}^2$ .

Questo esempio mostra che nel caso di stazionarietà climatica, i flussi energetici che attraversano la struttura sono sempre proporzionali alla trasmittanza termica della stessa. E quindi l'isolamento della struttura porta a una riduzione del flusso **con un beneficio sia invernale che estivo**.



**Figura 1** Flussi termici invernali ed estivi in regime stazionario. Il calcolo interessa una parete non isolata con trasmittanza pari a  $1.1 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  (a sinistra) e una parete isolata con trasmittanza pari a  $0.25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  (a destra).

## 2.3 Condizioni al contorno variabili (e non stazionarie)

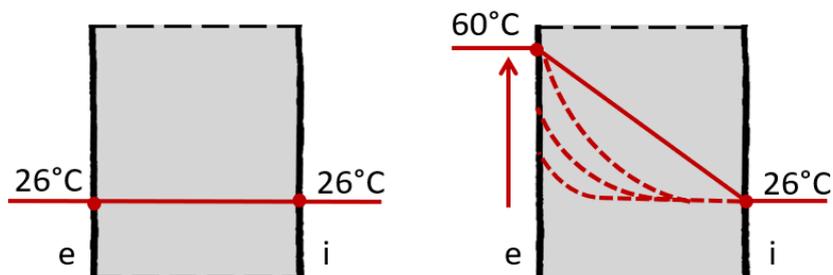
Rispetto all'esempio appena mostrato sorge però una domanda: l'ipotesi climatica stazionaria ha senso sia d'inverno che d'estate?

Se d'inverno possiamo tranquillamente rispondere in modo affermativo (infatti le condizioni stazionarie traducono con buona approssimazione il comportamento medio climatico), d'estate dobbiamo porci dei dubbi. Ovvero la forte oscillazione climatica, tipica di un periodo estivo porta a dover considerare oltre a quanto rappresentato nel precedente esempio, anche l'effetto "nel tempo" dei meccanismi di scambio termico. In altri termini: oltre al contributo resistivo dei materiali presenti nella struttura, è necessario conoscere e valutare anche il contributo inerziale.

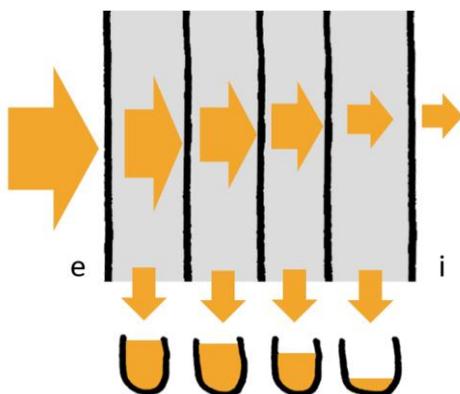
Proviamo a chiarire questo concetto con un secondo esempio: immaginiamo il caso in cui una parete (ad esempio la parete non isolata riportata in Figura 1) riceva una sollecitazione termica crescente sul lato esterno da 26 a 60°C, mentre sul lato interno la temperatura resta ferma sui 26°C. Quello che si verificherebbe è un progressivo riscaldamento della struttura sino al raggiungimento di uno stato di equilibrio sulle condizioni finali, ovvero nel nostro caso una distribuzione lineare della temperatura tra i 60 °C del lato esterno e i 26 °C di quello interno (si veda anche la rappresentazione riportata in Figura 2).

La velocità con cui la struttura raggiunge questo equilibrio dipende dalla capacità di accumulo di energia degli strati che la compongono. Due strutture che necessitano di periodi differenti per raggiungere le condizioni di equilibrio, avranno un comportamento differente ai fini del surriscaldamento estivo degli ambienti.

Quello che succede all'interno della struttura in termini energetici, si può spiegare per mezzo dello schema riportato in Figura 3: suddividendo un materiale in tanti strati e immaginando che sia in atto un meccanismo di trasmissione del calore, solo una parte del flusso attraversa lo strato, mentre la restante parte viene assorbita (immagazzinata) dal materiale.



**Figura 2** La capacità di accumulo e il conseguente periodo necessario al riscaldamento della struttura interna è un aspetto fondamentale durante il periodo estivo. Per andare dalla condizione di equilibrio rappresentata nell'immagine di sinistra (temperature esterna pari a 26°C) alla condizione di equilibrio rappresentata nell'immagine di destra (temperatura esterna pari a 60°C), si passa progressivamente attraverso una molteplicità di stati termici intermedi.



**Figura 3** Meccanismi di trasmissione e accumulo del calore attraverso una struttura. Ogni strato trattiene parte dell'energia in gioco in base alla propria capacità di accumulo.

Una porzione di energia riempie il serbatoio d'accumulo proprio dello strato interessato dall'attraversamento. Di conseguenza il flusso energetico passante si riduce via via per ogni strato.

Il regime stazionario, in questo schema, si può rappresentare considerando il caso in cui tutti i serbatoi siano già pieni e quindi il flusso energetico passante risulta legato esclusivamente alla conduttività termica dei materiali. In regime variabile invece entra in gioco anche il tempo di reazione di ogni strato al passaggio di energia. Materiali con capacità d'accumulo differente innescano comportamenti inerziali e quindi tempi di reazione differenti. Quindi possiamo dire che:

- a parità di trasmittanza termica, una struttura con maggior capacità di accumulo assorbe più energia e impiega più tempo a raggiungere una condizione di equilibrio termico;
- a parità di comportamento inerziale, una struttura con trasmittanza termica più bassa si lascia attraversare da una quantità inferiore di energia anche in condizioni estive.

In conclusione per una corretta progettazione estiva finalizzata alla riduzione della energia entrante nell'edificio **sono necessarie adeguate caratteristiche sia resistive che di accumulo.**

Quindi un buon isolante funziona sia d'inverno che d'estate, ma per ottimizzare le prestazioni estive non basta basarsi sulla sola conduttività termica: è necessario valutare anche altri parametri inerziali come spiegato nel prossimo capitolo.

## 2.4 Diffusività e capacità termica

I parametri che influenzano le prestazioni estive di un materiale sono:

- densità,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]
- spessore,  $s$  [m]
- calore specifico,  $c$  [J/kgK]
- conduttività,  $\lambda$  [W/mK]

Questi a loro volta possono essere sintetizzati attraverso due ulteriori parametri:

- la diffusività termica  $\alpha$  [m<sup>2</sup>/s],
- la capacità termica  $C$  volumica [kJ/m<sup>3</sup>K] o areica [kJ/m<sup>2</sup>K];

calcolati come:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

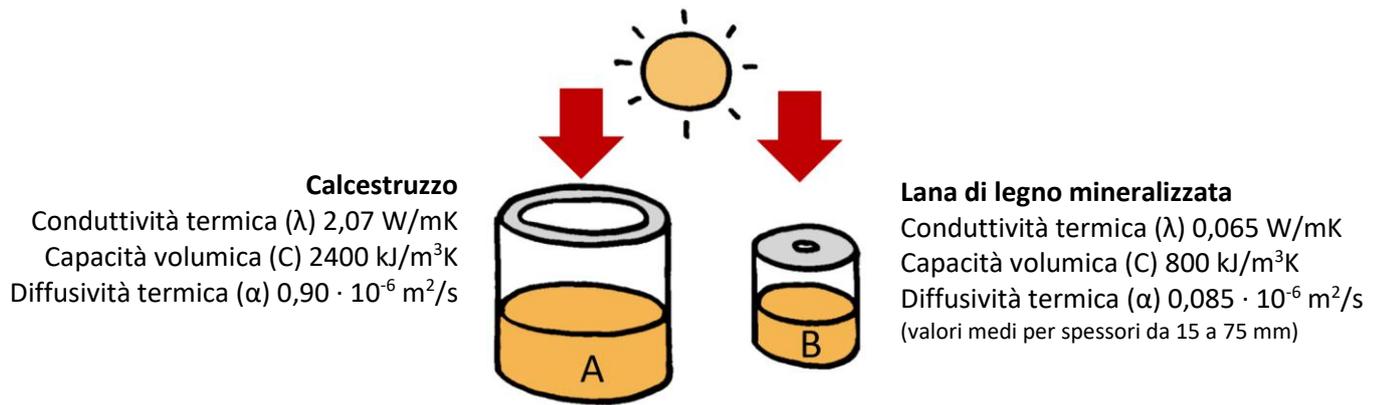
$$C = \rho \cdot c \quad \text{oppure} \quad C = \rho \cdot c \cdot s$$

Per esemplificare questi concetti mettiamo a confronto i valori di due materiali comuni: uno strato calcestruzzo e un pannello di lana di legno mineralizzata. Le differenze tra i due materiali sono riportate nella seguente tabella e sono schematizzate in Figura 4 attraverso un'analogia idraulica.

	Calcestruzzo	Lana di legno mineralizzata
Densità ( $\rho$ )	2400 kg/m <sup>3</sup>	350÷533 kg/m <sup>3</sup> *
Calore specifico ( $c$ )	1000 J/kgK	1810 J/kgK **
Conduttività termica ( $\lambda$ )	2,07 W/mK	0,065 W/mK
Capacità termica volumica ( $C$ )	2400 kJ/m <sup>3</sup> K	634÷965 kJ/m <sup>3</sup> K
Diffusività termica ( $\alpha$ )	<b>0,90 · 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s</b>	<b>0,103÷0,067 · 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s</b>

\* inversamente proporzionale allo spessore, da 75 a 15 mm

\*\* valore certificato dall'Università di Bologna - LEBSC no. 809 del 07.05.2009)



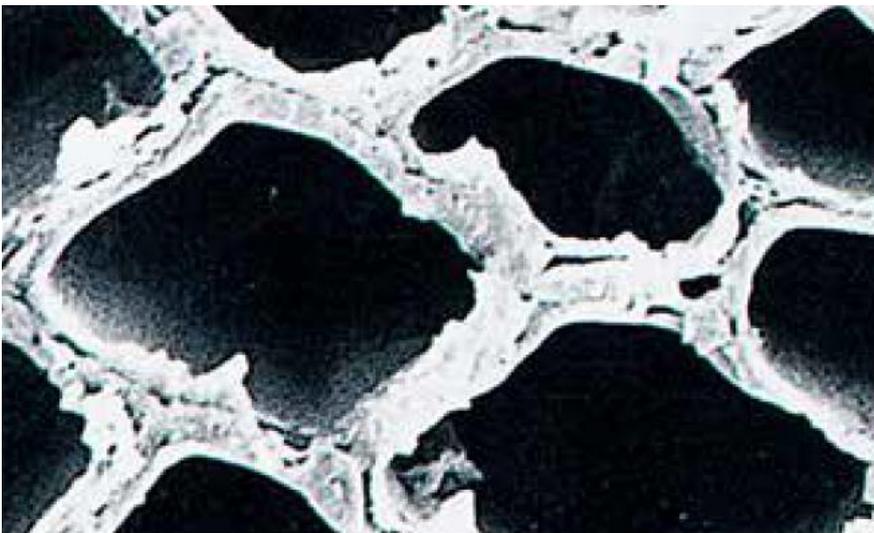
**Figura 4** Confronto tra il comportamento inerte del calcestruzzo (A) e della lana di legno mineralizzata (B). Il serbatoio di sinistra (A) è caratterizzato da una grande capacità termica ma anche da un'elevata velocità di riempimento; invece il serbatoio di destra (B) da una minore capacità termica, ma anche da una ridotta velocità di riempimento.

Il calcestruzzo e la lana di legno mineralizzata sono rappresentati sotto forma di due serbatoi energetici ognuno munito di un coperchio. Guardando la capienza dei due serbatoi è evidente che il calcestruzzo è in grado di accumulare più energia della lana di legno. Questa caratteristica però è compensata dalla dimensione del foro sul coperchio del serbatoio: a parità di sollecitazione energetica il serbatoio del calcestruzzo si "riempie" più velocemente di quello della lana di legno mineralizzata avvicinandosi più rapidamente alla condizione di saturazione.

In altri termini: il serbatoio A, pur avendo una buona capacità termica, ha una bassa capacità di frenare l'energia entrante dovuta alla scarsa conduttività del materiale calcestruzzo. Il serbatoio B al contrario è in grado di limitare il flusso termico entrante in maniera efficace nonostante la minore capacità di accumulo.

**La diffusività termica  $\alpha$  è il parametro che riassume questi fenomeni in un unico dato.** Nel nostro esempio la diffusività termica rappresenta la velocità di riempimento del serbatoio. In generale: minore il valore della diffusività termica, maggiore sarà il contributo del materiale nell'attenuare e sfasare l'onda termica entrante. Sotto questo aspetto la lana di legno mineralizzata ha una diffusività migliore di quella del calcestruzzo ( $0,085$  contro  $0,90 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s).

Pannelli isolanti con un buon comportamento estivo hanno una diffusività termica  $\alpha < 0,15 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.



**Figura 5**

Fibre di lana di legno mineralizzata di un pannello osservate al microscopio. Le proprietà del legno e del cemento Portland conferiscono al pannello elevate prestazioni estive. Fonte Celenit.

## 3 PARAMETRI ESTIVI DI UNA STRATIGRAFIA

### 3.1 Introduzione

La norma UNI EN ISO 13786:2018 “Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo” fornisce le modalità di calcolo per valutare diversi parametri caratterizzanti il comportamento estivo di una stratigrafia opaca. Si tratta di fatto di diverse chiavi di lettura utili a commentare e/o ottimizzare le prestazioni di una stratigrafia.

I parametri descritti dalla norma sono:

- trasmittanza termica periodica ( $Y_{ie}$ );
- sfasamento ( $\varphi$ ) e attenuazione ( $f_a$ );
- capacità termica areica periodica interna ( $C_{ip}$  oppure  $K_i$ );
- ammettenza (interna ed esterna) ( $Y_{ii}$  e  $Y_{ee}$ );
- profondità di penetrazione periodica ( $\delta$ ).

Come visto nel capitolo 1, ad oggi i Requisiti Minimi e i CAM identificano nella trasmittanza termica periodica il principale parametro di controllo estivo delle stratigrafie opache.

Ciò non toglie che per una corretta valutazione estiva sia utile (o necessario) conoscere anche gli altri parametri. A tal fine proponiamo una sintesi dei principali concetti abbinati ad ognuno di essi.

### 3.2 I parametri dinamici della norma UNI EN ISO 13786

La norma UNI EN ISO 13786:2008 descrive i metodi di calcolo per valutare il comportamento termico in regime dinamico dei componenti edilizi e simulare l'effetto di una sollecitazione climatica estiva su una struttura opaca. Non è una norma di facile lettura, richiede infatti dimestichezza col calcolo di matrici di trasferimento composte da numeri complessi. Tralasciando gli aspetti matematici del calcolo, in queste pagine proviamo a sintetizzare i principali concetti utili per progettare e ottimizzare una stratigrafia dal punto di vista estivo.

Come abbiamo visto nel capitolo precedente una struttura soggetta a condizioni stazionarie è attraversata da un flusso termico costante in ogni punto della stratigrafia. In questa situazione la distribuzione della temperatura nella struttura dipende solo dalla conduttività dei materiali e dal loro spessore rispetto alla direzione di flusso.

Il comportamento termico è quindi completamente caratterizzato dalla trasmittanza termica  $U$ .

Durante il periodo estivo (o meglio al di fuori di quello invernale) le condizioni climatiche però non sono riconducibili a un modello stazionario: la variabilità nel tempo dei parametri climatici non è più trascurabile ed è pertanto utile studiare i fenomeni rispetto a una fluttuazione oraria almeno giornaliera.

Da qui la necessità di affiancare alla trasmittanza termica stazionaria  $U$  altri parametri di natura dinamica come quelli di seguito elencati:

#### Trasmittanza termica periodica ( $Y_{ie}$ )

Secondo la norma è definita come rapporto tra il flusso termico periodico che attraversa l'unità di superficie su un lato del componente e la sollecitazione termica periodica sull'altro lato nell'ipotesi che la temperatura ambiente sul primo lato sia costante.

Rappresenta la capacità di una struttura opaca di sfasare e attenuare il flusso termico che la attraversa nell'arco delle 24 ore. È un parametro che ben sintetizza il comportamento resistivo e inerziale della stratigrafia ed è stato scelto dal legislatore per il controllo estivo delle stratigrafie colpite da un'irradiazione solare maggiore di  $290 \text{ W/m}^2$ . L'unità di misura della trasmittanza periodica è la stessa della trasmittanza stazionaria, ovvero  $\text{W/m}^2\text{K}$ . Il comportamento di una struttura è tanto migliore quanto minore è la sua trasmittanza termica periodica.

### Attenuazione ( $f_a$ )

Il parametro è definito come rapporto tra la trasmittanza termica periodica e la trasmittanza termica stazionaria. L'attenuazione restituisce un'indicazione sulla variazione di flusso e temperatura passando dal regime stazionario a quello dinamico. L'attenuazione è un parametro adimensionale.

Si ha un buon comportamento estivo quando il valore di  $f_a$  è inferiore a 0,3.

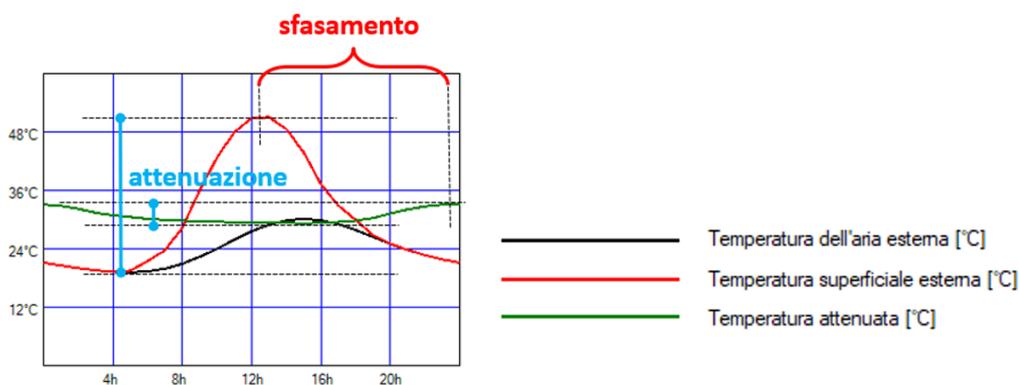
### Sfasamento ( $\varphi$ )

È valutato come periodo di tempo tra il valore massimo della sollecitazione termica sul lato esterno del componente e il massimo del suo effetto inteso come variazione sul lato interno.

In altri termini lo sfasamento rappresenta il ritardo temporale dell'onda termica entrante in una struttura colpita da una sollecitazione energetica estiva. Lo sfasamento si misura in ore e minuti.

Un buon valore di sfasamento si ha quando il dato supera le 8 ore.

Nei casi in cui la stratigrafia ha prestazioni estive particolarmente elevate, il valore di sfasamento può avvicinarsi anche alle 24 ore, e per assurdo tornare "in fase" con il picco delle condizioni climatiche esterne. Questo dato però non è problematico e rappresenta semplicemente il risultato matematico della simulazione: se la struttura ha uno sfasamento di 24 ore, il valore dell'attenuazione è prossimo a 0 e quindi non ha senso interrogarsi sulla posizione del picco nell'arco della giornata.



**Figura 6** Rappresentazione grafica dei concetti di sfasamento e dell'attenuazione per una parete perimetrale orientata a sud. L'immagine mette a confronto la variazione in una giornata tipica estiva della temperatura dell'aria esterna (in nero), della temperatura superficiale esterna (in rosso) e della temperatura attenuata, ovvero il risultato dell'effetto inerziale della stratigrafia rispetto al passaggio di calore (in verde). Lo sfasamento rappresenta la distanza misurata in ore tra i picchi della curva rossa e verde, nell'esempio circa 11 ore. L'attenuazione invece rappresenta la riduzione dell'oscillazione della curva verde rispetto a quella rossa, nell'esempio pari a circa 0,2. Fonte: software PAN.

### Capacità termica areica periodica interna ( $C_{ip}$ oppure $K_i$ )

Questo parametro è dato dal rapporto tra la variazione di energia accumulata per unità di superficie in un componente in un dato periodo di tempo e la sollecitazione termica periodica sul lato interno, nell'ipotesi che la temperatura ambiente sull'altro lato sia costante.

Il valore di  $C_{ip}$  (indicato anche col simbolo  $k_i$ ) rappresenta l'attitudine di una struttura ad accumulare calore derivante da una repentina sollecitazione energetica superficiale.

Questo parametro non va confuso con la capacità termica  $C$  (volumica o areica) descritta nel capitolo 2 del manuale. Quest'ultima è una caratteristica del singolo materiale e rappresenta la quantità di energia necessaria per far aumentare (o di diminuire) di un grado la temperatura dell'elemento. La capacità areica periodica interna  $C_{ip}$  invece è una caratteristica "stratigrafica": descrive la reazione degli strati più esposti alla sollecitazione energetica dinamica. Questi primi strati, e non tutta la struttura, possono o meno essere in grado di assorbire elevate quantità di energia a seconda del valore di  $C_{ip}$ .

La capacità termica areica periodica interna si misura in  $\text{kJ/m}^2\text{K}$ .

**Ammettenza interna ( $Y_{ii}$ ) ed esterna ( $Y_{ee}$ )**

È data dal rapporto tra il flusso termico periodico che attraversa l'unità di superficie su un lato del componente e la sollecitazione termica periodica sullo stesso lato nell'ipotesi che la temperatura ambiente sull'altro lato sia costante. In generale si hanno due ammettenze diverse sui due lati di un componente, e quindi si parla di ammettenza interna ( $Y_{ii}$ ) e ammettenza esterna ( $Y_{ee}$ ). Tra tutti i parametri dinamica è forse quello meno utilizzato. Il valore dell'ammettenza è espresso in  $W/m^2K$ .

**Profondità di penetrazione periodica ( $\delta$ )**

La norma UNI NE ISO 13786 definisce la profondità di penetrazione periodica come la profondità alla quale l'ampiezza delle variazioni di temperatura è ridotta di un fattore  $e$  (ovvero di 2,718 volte) in un materiale omogeneo di spessore infinito soggetto a variazioni sinusoidali di temperatura sulla sua superficie.

Come per l'ammettenza, anche in questo caso si tratta di un parametro poco in uso, anche se può essere utile conoscere in alcuni casi a che profondità della stratigrafia si raggiunge una relativa "quiete termica". La profondità di penetrazione periodica si misura in m.

<b>Esempio di copertura con alte caratteristiche estive</b>		
Copertura in legno con doppio CELENIT N e CELENIT FL/150, $R_w$ 45 dB		
	Trasmittanza termica stazionaria	$U = 0,221 W/m^2K$
	Trasmittanza termica periodica	$Y_{ie} = 0,048 W/m^2K$
	Attenuazione	$f_a = 0,211$
	Sfasamento	$\varphi = 13h 42'$
	Capacità termica areica periodica interna estiva	$C_{ip} = 31 kJ/m^2K$
	Copertura con struttura in legno e isolamento all'estradosso. La stratigrafia prevede (dall'interno): doppio assito in legno, la posa di un freno vapore, lo strato isolante composto da CELENIT N, 30 mm + CELENIT FL/150, 120 mm + CELENIT N, 20 mm, e a completamento finale un telo traspirante impermeabilizzante, l'orditura di listelli in legno e il manto di copertura.	

<b>Esempio di parete perimetrale con alte caratteristiche estive</b>		
Parete perimetrale in blocchi di laterizio forato con cappotto in CELENIT F2/C		
	Trasmittanza termica stazionaria	$U = 0,211 W/m^2K$
	Trasmittanza termica periodica	$Y_{ie} = 0,008 W/m^2K$
	Attenuazione	$f_a = 0,037$
	Sfasamento	$\varphi = 20h 33'$
	Capacità termica areica periodica interna estiva	$C_{ip} = 52 kJ/m^2K$
	Parete perimetrale in muratura in blocchi di laterizio forato e isolamento a cappotto esterno con pannelli CELENIT F2/C, composti costituiti da uno strato in lana di legno mineralizzata da 25 mm e uno strato in fibra di legno da 120 mm. Finitura ad intonaco.	

## 4 ANALISI ESTIVA DELLA ZONA TERMICA

### 4.1 Il comfort estivo all'interno di un edificio

Prevedere attraverso una simulazione energetica se un edificio raggiungerà o meno determinate condizioni di comfort, come si può immaginare non è un problema banale. Si tratta infatti di creare un modello energetico complesso in grado di analizzare e mettere in relazione fra loro numerosi fenomeni di scambio termico.

Se parliamo di comfort estivo, i riferimenti ufficiali che ci guidano in questa operazione sono:

- la norma **UNI EN ISO 52016-1:2018** "Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 1: Procedure di calcolo";
- la norma **UNI EN 16798-1:2019** "Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica - Modulo M1-6".

La prima norma fornisce le istruzioni per creare il modello energetico e simularlo attraverso un'analisi dinamica oraria, la seconda norma fornisce un criterio di valutazione dei risultati rispetto al comfort estivo. Di seguito proponiamo un approfondimento sui suddetti aspetti.

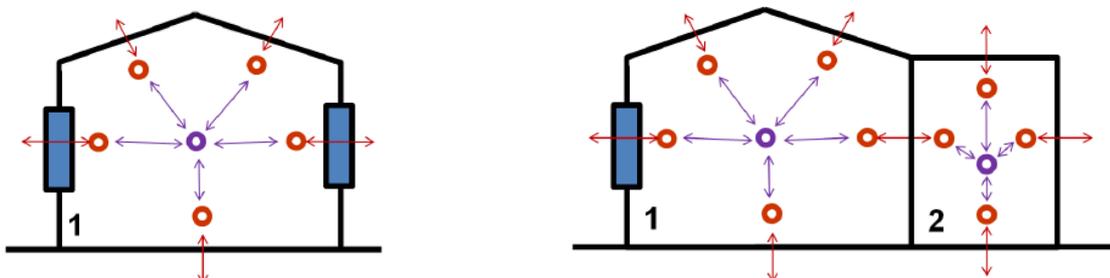
### 4.2 Simulazione dinamica oraria secondo UNI EN ISO 52016-1

Una simulazione energetica dinamica si differenzia da una simulazione tradizionale semi-stazionaria perché è in grado di stimare e valutare l'effetto "nel tempo" dei vari fenomeni fisici.

Infatti una simulazione dinamica tiene conto sia dell'effetto assoluto di un fenomeno che il suo effetto relativo nel breve, medio e lungo periodo. Ad esempio quando una facciata si scalda per via dell'irraggiamento solare la simulazione è in grado di stimare sia la temperatura raggiunta istante per istante dagli strati esterni che la distribuzione termica raggiunta nelle ore successive all'interno della parete; oppure quando le temperature giornaliere esterne scendono e raggiungono un valore minimo nelle prime ore del mattino, la simulazione è in grado di valutare i tempi di reazione dell'involucro edilizio che di giorno ha accumulato energia.

Limitandoci a trattare il tema dell'involucro opaco, la norma UNI EN ISO 52016-1 propone un modello di analisi delle stratigrafie basato su un sistema "resistenze-condensatori" a nodi concentrati. Ovvero gli effetti resistivi e inerziali di ogni materiale all'interno di una stratigrafia vengono prima analizzati separatamente o poi messi in relazione l'uno con l'altro.

Il risultato è la creazione di una rete di nodi ognuno portatore di un'informazione termica e ognuno sensibile alla variazione delle informazioni nei punti vicini della rete.



**Figura 7** *Rappresentazione semplificata della rete di nodi di un modello energetico con 1 o 2 zone termiche. I cerchi rossi rappresentano i nodi delle superfici affacciate sugli ambienti interni mentre il cerchio viola il nodo della temperatura dell'aria interna. Questi nodi sono influenzati dal comportamento energetico delle strutture dell'involucro a loro volta connesse con l'ambiente esterno (qui non rappresentato).*

### 4.3 Il modello del comfort adattivo secondo UNI EN 16798-1

Lo studio previsionale del comfort in condizioni non controllate ha portato a teorizzare un modello denominato "comfort adattivo". Tale modello risulta particolarmente utile allo studio del comfort estivo perché si basa sulla convinzione che le persone si adattino naturalmente alle condizioni ambientali attraverso alcune modifiche al loro ambiente di vita e alle loro abitudini. In altri termini, un individuo posto in un ambiente qualsiasi in periodi o in climi caldi, raggiunge più facilmente condizioni di benessere se può operare sui sistemi di controllo ambientale in grado di cambiare il microclima interno in relazione alle proprie sensazioni.

Il metodo si basa sulla definizione di una temperatura di comfort legata in modo semplice alle condizioni climatiche esterne e alla definizione di un intervallo di accettabilità – fascia di comfort – tra tale valore e la temperatura dell'ambiente analizzato. Si tratta di un metodo che combina insieme:

- la temperatura operante di una stanza non climatizzata,
- le condizioni climatiche giornaliere medie esterne,
- la sensazione di accettabilità da parte degli utilizzatori dell'ambiente interno.

Secondo la norma tali principi sono riconducibili alla seguente formula:

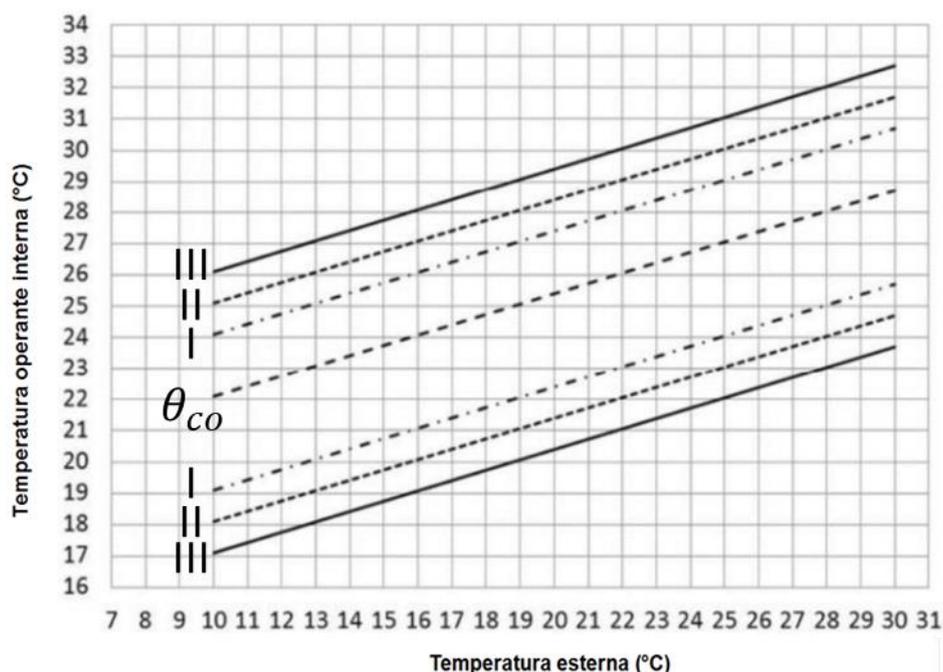
$$\theta_c = 0.33 \theta_{rm} + 18.8 + \Delta\theta_c$$

dove:

$\theta_c$  è la temperatura di comfort [°C];

$\theta_{rm}$  è la temperatura esterna continua media giornaliera [°C];

$\Delta\theta_c$  è l'intervallo di accettabilità per le diverse categorie di comfort [°C], ovvero +2°C/−3°C per la Categoria I, +3°C/−4°C per la Categoria II e +4°C/−5°C per la Categoria III<sup>1</sup>.

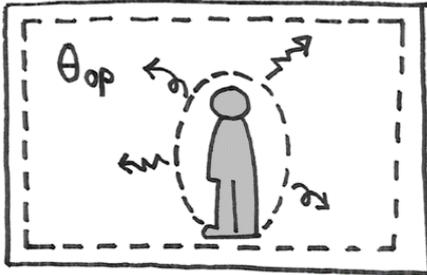


**Figura 8** Rappresentazione grafica del modello di comfort adattivo. Sono visualizzati i confini delle categorie di comfort I, II, III che si discostano da  $\theta_c$  (linea tratteggiata) per intervalli di 2, 3, 4 oppure 5°C; sull'asse orizzontale è rappresentata la temperatura esterna continua media giornaliera [°C], mentre sull'asse verticale la temperatura operante interna [°C].

<sup>1</sup> È bene precisare che, come evidenziato anche nella normativa, tali limiti sono validi solo quando la temperatura esterna continua media giornaliera è compresa tra i 10 e i 30°C, ovvero  $10^\circ\text{C} < \theta_{rm} < 30^\circ\text{C}$ .

### Temperatura di comfort $\theta_c$ e la temperatura operante

La temperatura di comfort è la temperatura operante che ricade nella fascia di comfort della Categoria I, II o III considerata. La temperatura operante è definita come la temperatura uniforme di un ambiente nel quale un occupante scambierebbe per irraggiamento e convezione la stessa potenza termica scambiata nell'ambiente in esame teoricamente non uniforme. Essa è dunque un parametro fittizio utile a semplificare la complessità della realtà e ha a che fare con il benessere degli occupanti perché legata alle sensazioni termiche di un utente all'interno della zona considerata. Di conseguenza può essere utilizzata per l'analisi del comfort e in particolar modo per il modello adattivo.



**Figura 9**

Rappresentazione schematica della temperatura operante secondo la definizione di norma.

### Temperatura esterna continua media giornaliera $\theta_{rm}$

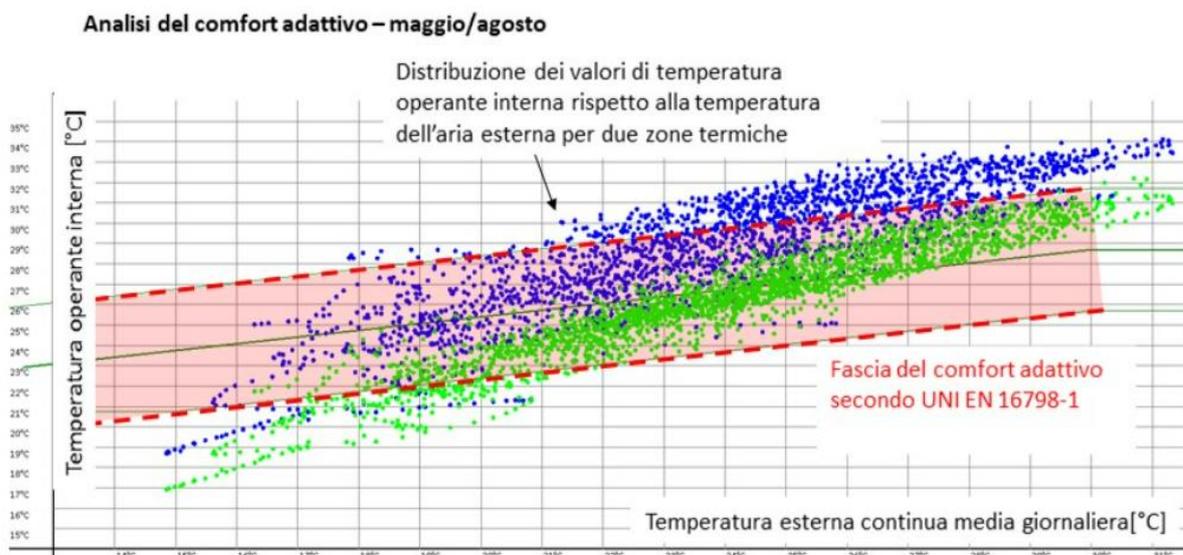
Lo studio del comfort adattivo prevede il calcolo di una temperatura esterna cosiddetta "running mean external temperature", ovvero la temperatura esterna continua media giornaliera. Essa non è altro che il valore della temperatura esterna media di un giorno dell'anno, influenzata però dai valori medi dei giorni che la precedono.

### Esempio di analisi

In sintesi:

1. attraverso una simulazione dinamica è possibile ricavare la distribuzione ora per ora della temperatura operante;
2. attraverso un'analisi dei risultati con un modello adattivo è possibile dare un giudizio sul raggiungimento o meno delle condizioni di comfort.

Nella figura seguente è mostrato un esempio di analisi del comfort adattivo per due varianti progettuali della stessa zona termica: si vede che la variante in verde cade meglio nella fascia di comfort rispetto a quella in blu.



**Figura 10** Esempio di valutazione del comfort adattivo per due varianti dello stesso progetto. Il grafico propone la diffusione dei valori di temperatura operante ricavata da simulazioni dinamiche rispetto alla temperatura climatica esterna. La condizione di benessere è verificata se il risultato cade all'interno della fascia tratteggiata.

## 5 ESEMPI DI SOLUZIONI AD ALTE PRESTAZIONI ESTIVE

### 5.1 Inerzia e isolamento

I pannelli isolanti in lana di legno mineralizzata sia singoli che compositi (ad esempio accoppiati con fibra di legno o di lana di roccia) garantiscono alte prestazioni sia d'inerzia che di isolamento.

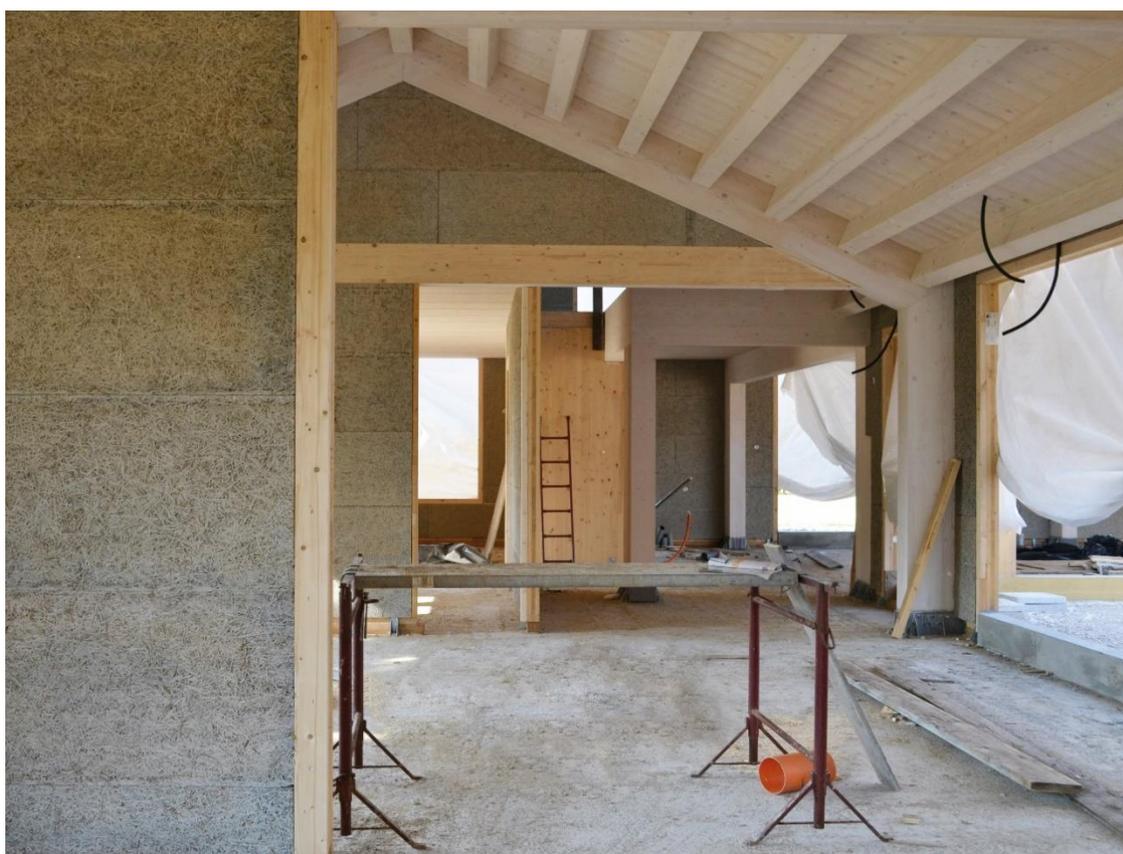
Le stratigrafie che adottano queste soluzioni infatti, grazie al mix dato dall'elevata capacità di accumulo termico e dalle eccellenti prestazioni di isolamento, ottengono ottimi risultati sia invernali che estivi in tutte le zone climatiche, verificando sia i limiti di trasmittanza termica che valori ottimali di sfasamento ed attenuazione.

I pannelli CELENIT da oltre cinquant'anni forniscono soluzioni edili che garantiscono prestazioni di isolamento termo-acustico ecocompatibili volte a migliorare le condizioni interne degli edifici.

I pannelli di legno e cemento sono stati i primi isolanti industriali ad essere usati in edilizia e la loro versatilità ne permette l'impiego in molteplici applicazioni.

Oltre a prestazioni inerziali e di isolamento termico, i prodotti in lana di legno forniscono un vantaggio anche per la progettazione dell'isolamento acustico, della traspirabilità, del comportamento al fuoco e della durabilità, e insieme alle certificazioni ambientali, al rispetto dei protocolli di sostenibilità e all'idoneità ai CAM, consentono di massimizzare le prestazioni delle stratigrafie nelle quali sono inclusi.

Nelle pagine che seguono mostriamo 5 esempi di stratigrafie con alte prestazioni estive.



**Figura 11** *Esempio di un cantiere con soluzioni CELENIT per l'isolamento delle strutture d'involucro.*

## 5.2 Esempi di stratigrafie

### SOLUZIONE 1: COPERTURA CON CELENIT F2

Soluzione con tavolato a vista, isolamento ad estradosso

Isolamento ad estradosso di coperture inclinate in legno. Stratigrafia costituita da freno al vapore come strato di tenuta all'aria in aderenza all'assito, opportunamente sigillato e nastrato. Pacchetto isolante termoacustico composto da CELENIT F2 (pannelli compositi costituiti da uno strato in lana di legno mineralizzata sp. 50 mm e uno strato in fibra di legno). Chiusura della stratigrafia con membrana traspirante per garantire la naturale migrazione del vapore e la tenuta all'acqua. Ventilazione realizzata con doppia orditura di listelli in legno incrociati, avvistati alla struttura sottostante, per permettere il corretto posizionamento del manto di copertura.



#### Stratigrafia

1	Manto di copertura
2	Ventilazione
3	Membrana traspirante
4	CELENIT F2 sp. 190 mm 4a: lana di legno, 50 mm 4b: fibra di legno, 140 mm
5	Freno al vapore
6	Assito in legno sp. 25 mm

**R<sub>w</sub> 41 dB** (certificato n. 480 del 18/08/2008)

#### Dati dei singoli materiali nella stratigrafia

	s [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	M <sub>s</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	R [m <sup>2</sup> K/W]	S <sub>D</sub> [m]	α [m <sup>2</sup> /Ms]
							0,04		
1	0,020	1800	0,800	837	1	36,0	0,025	0,020	0,531
2	0,050	1	0,497	1004	1	0,1	0,101	0,050	0,000
3	0,000	709	0,220	1399	114	0,1	0,001	0,020	0,222
4a	0,050	360	0,065	1809	5	18,0	0,769	0,250	0,100
4b	0,140	110	0,037	2099	3	15,4	3,784	0,420	0,160
5	0,001	229	0,230	1399	4286	0,2	0,003	3,000	0,718
6	0,025	450	0,120	2720	60	11,3	0,208	1,500	0,098
							0,10		

#### Parametri della stratigrafia

Spessore totale	s	= 0,286	m	
Massa superficiale	M <sub>s</sub>	= 81,0	kg/m <sup>2</sup>	
Trasmittanza	U	= 0,199	W/m <sup>2</sup> K	✓
Trasmittanza periodica (valore estivo)	Y <sub>ie</sub>	= 0,052	W/m <sup>2</sup> K	✓
Fattore di attenuazione (valore estivo)	f <sub>a</sub>	= 0,257	-	✓
Sfasamento (valore estivo)	φ	= 12h 40'		✓

#### Legenda

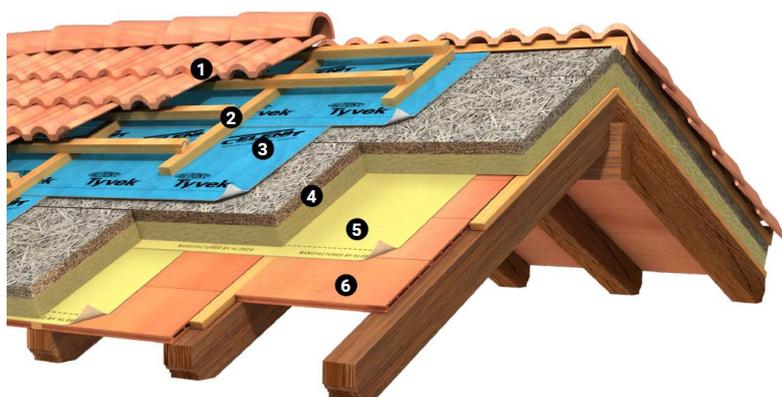
s=spessore; ρ=densità; λ=conduttività termica; c=calore specifico; μ=fattore di resistenza al vapore; M<sub>s</sub>=massa superficiale; R=resistenza termica; S<sub>D</sub>=spessore equivalente d'aria; α=diffusività termica.

Calcoli eseguiti con il software PAN, [www.anit.it/pan](http://www.anit.it/pan)

**SOLUZIONE 2: COPERTURA CON CELENIT L2**

Soluzione con tavelle in laterizio a vista, isolamento ad estradosso

Isolamento ad estradosso di coperture inclinate in legno. Stratigrafia costituita da freno al vapore come strato di tenuta all'aria in aderenza all'assito, opportunamente sigillato e nastrato. Pacchetto isolante termoacustico composto da CELENIT L2 (pannelli compositi costituiti da uno strato in lana di legno mineralizzata sp. 50 mm e uno strato in lana minerale). Chiusura della stratigrafia con membrana traspirante per garantire la naturale migrazione del vapore e la tenuta all'acqua. Ventilazione realizzata con doppia orditura di listelli in legno incrociati, avvitati alla struttura sottostante, per permettere il corretto posizionamento del manto di copertura.



**Stratigrafia**

1	Manto di copertura
2	Ventilazione
3	Membrana traspirante
4	CELENIT L2 sp. 210 mm 4a: lana di legno, 50 mm 4b: lana di roccia, 160 mm
5	Freno al vapore
6	Assito in legno sp. 25 mm

**Dati dei singoli materiali nella stratigrafia**

	s [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]	$\mu$ [-]	M <sub>s</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	R [m <sup>2</sup> K/W]	S <sub>D</sub> [m]	$\alpha$ [m <sup>2</sup> /Ms]
							0,04		
1	0,020	1800	0,800	837	1	36,0	0,025	0,020	0,531
2	0,050	1	0,497	1004	1	0,1	0,101	0,050	0,000
3	0,000	709	0,220	1399	114	0,1	0,001	0,020	0,222
4a	0,050	360	0,065	1809	5	18,0	0,769	0,250	0,100
4b	0,160	110	0,038	1029	1	17,6	4,211	0,160	0,336
5	0,001	229	0,230	1399	4286	0,2	0,003	3,000	0,718
6	0,030	1300	0,333	841	20	39,0	0,090	0,600	0,305
							0,10		

**Parametri della stratigrafia**

Spessore totale	s	= 0,331	m	
Massa superficiale	M <sub>s</sub>	= 110,9	kg/m <sup>2</sup>	
Trasmittanza	U	= 0,187	W/m <sup>2</sup> K	✓
Trasmittanza periodica (valore estivo)	Y <sub>ie</sub>	= 0,072	W/m <sup>2</sup> K	✓
Fattore di attenuazione (valore estivo)	f <sub>a</sub>	= 0,378	-	✓
Sfasamento (valore estivo)	$\varphi$	= 10h 29'		✓

**Legenda**

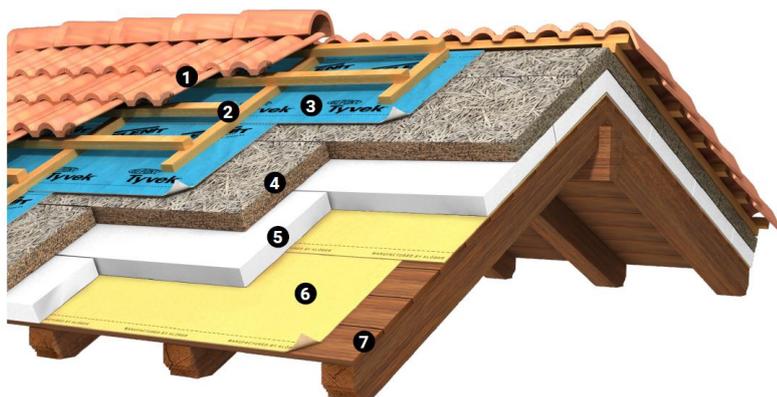
s=spessore;  $\rho$ =densità;  $\lambda$ =conduttività termica; c=calore specifico;  $\mu$ =fattore di resistenza al vapore; M<sub>s</sub>=massa superficiale; R=resistenza termica; S<sub>D</sub>=spessore equivalente d'aria;  $\alpha$ =diffusività termica.

Calcoli eseguiti con il software PAN, [www.anit.it/pan](http://www.anit.it/pan)

**SOLUZIONE 3: COPERTURA CON CELENIT N E XPS/EPS/PUR**

Soluzione con tavolato a vista, isolamento ad estradosso

Isolamento ad estradosso di coperture inclinate in legno. Stratigrafia costituita da freno al vapore come strato di tenuta all'aria in aderenza all'assito, opportunamente sigillato e nastrato. Pacchetto isolante termoacustico composto da uno strato in XPS (polistirene espanso estruso), EPS (polistirene espanso sinterizzato) oppure PUR (poliuretano) e uno strato di pannelli CELENIT N sp. 75 mm, in lana di legno mineralizzata. Chiusura della stratigrafia con membrana traspirante per garantire la naturale migrazione del vapore e la tenuta all'acqua. Ventilazione realizzata con doppia orditura di listelli in legno incrociati, avvitati alla struttura sottostante, per permettere il corretto posizionamento del manto di copertura.



**Stratigrafia**

1	Manto di copertura
2	Ventilazione
3	Membrana traspirante
4	CELENIT N sp. 75 mm
5	XPS sp. 100 mm
6	Freno al vapore
7	Assito in legno sp. 25 mm

**Dati dei singoli materiali nella stratigrafia**

	s [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	M <sub>s</sub> [kg/m²]	R [m²K/W]	S <sub>D</sub> [m]	α [m²/Ms]
							0,04		
1	0,020	1800	0,800	837	1	36,0	0,025	0,020	0,531
2	0,050	1	0,497	1004	1	0,1	0,101	0,050	0,000
3	0,000	709	0,220	1399	114	0,1	0,001	0,020	0,222
4	0,075	347	0,065	1809	5	26,0	1,154	0,375	0,104
5	0,100	40	0,035	1464	150	4,0	2,857	15,000	0,598
6	0,001	290	0,230	1399	50000	0,1	0,002	25,000	0,567
7	0,025	450	0,120	2720	60	11,3	0,208	1,500	0,098
							0,10		

**Parametri della stratigrafia**

Spessore totale	s	= 0,271	m	
Massa superficiale	M <sub>s</sub>	= 77,6	kg/m²	
Trasmittanza	U	= 0,223	W/m²K	✓
Trasmittanza periodica (valore estivo)	Y <sub>ie</sub>	= 0,079	W/m²K	✓
Fattore di attenuazione (valore estivo)	f <sub>a</sub>	= 0,351	-	✓
Sfasamento (valore estivo)	φ	= 9h 38'		✓

**Legenda**

s=spessore; ρ=densità; λ=conduttività termica; c=calore specifico; μ=fattore di resistenza al vapore; M<sub>s</sub>=massa superficiale; R=resistenza termica; S<sub>D</sub>=spessore equivalente d'aria; α=diffusività termica.

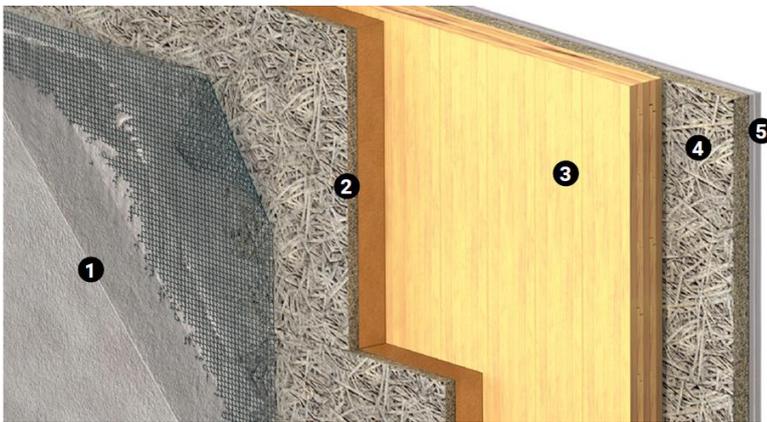
Calcoli eseguiti con il software PAN, [www.anit.it/pan](http://www.anit.it/pan)

**SOLUZIONE 4: PARETE CON CELENIT F2/C e CELENIT N**

Soluzione di isolamento con parete in compensato di tavole

Isolamento termoacustico di pareti perimetrali con struttura in compensato di tavole.

Rivestimento a cappotto esterno con pannelli CELENIT F2/C specifici per l'applicazione a cappotto, costituiti da uno strato in lana di legno mineralizzata sp. 25 mm e uno strato in fibra di legno. Pannelli posizionati verso l'esterno, opportunamente fissati e rifiniti con intonaco. Rivestimento interno con pannelli CELENIT N sp. 40 mm in lana di legno mineralizzata, opportunamente fissati e rifiniti con cartongesso incollato direttamente all'isolante.



**Stratigrafia**

1	1 Intonaco sp. 15 mm
2	CELENIT F2/C sp. 125 mm (2a: lana di legno, 50 mm; 2b: fibra di legno, 140 mm)
3	Compensato di tavole sp. 85 mm
4	CELENIT N sp. 40 mm
5	Cartongesso sp. 12,5 + 12,5 mm

**R<sub>w</sub> 54 dB** (certificato n. 471 del 18/08/2008)

**Dati dei singoli materiali nella stratigrafia**

	s [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	M <sub>s</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	R [m <sup>2</sup> K/W]	S <sub>D</sub> [m]	α [m <sup>2</sup> /Ms]
							0,04		
1	0,015	1800	0,900	837	20	27,0	0,017	0,300	0,598
2a	0,025	460	0,065	1809	5	11,5	0,385	0,125	0,078
2b	0,100	110	0,037	2099	3	11,0	2,703	0,300	0,160
3	0,085	450	0,130	1599	40	38,3	0,654	3,400	0,181
4	0,040	400	0,065	1809	5	16,0	0,615	0,200	0,090
5a	0,013	900	0,210	837	8	11,3	0,060	0,100	0,279
5b	0,013	900	0,210	837	8	11,3	0,060	0,100	0,279
							0,10		

**Parametri della stratigrafia**

Spessore totale	s	= 0,290	m	
Massa superficiale	M <sub>s</sub>	= 126,3	kg/m <sup>2</sup>	
Trasmittanza	U	= 0,214	W/m <sup>2</sup> K	✓
Trasmittanza periodica (valore estivo)	Y <sub>ie</sub>	= 0,028	W/m <sup>2</sup> K	✓
Fattore di attenuazione (valore estivo)	f <sub>a</sub>	= 0,133	-	✓
Sfasamento (valore estivo)	φ	= 14h 41'		✓

**Legenda**

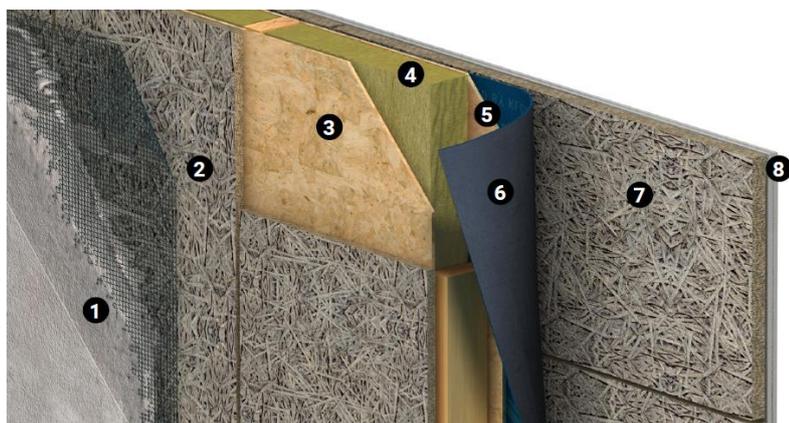
s=spessore; ρ=densità; λ=conduttività termica; c=calore specifico; μ=fattore di resistenza al vapore; M<sub>s</sub>=massa superficiale; R=resistenza termica; S<sub>D</sub>=spessore equivalente d'aria; α=diffusività termica.

Calcoli eseguiti con il software PAN, [www.anit.it/pan](http://www.anit.it/pan)

**SOLUZIONE 5: PARETE CON CELENIT N, LANA DI ROCCIA E CELENIT N/C**

Soluzione di isolamento con sistema a telaio

Isolamento termoacustico di pareti perimetrali con struttura a telaio composta da montanti in legno, controventati da doppio strato in OSB. Coibentazione dell'intercapedine con pannelli in lana di roccia a bassa densità. Rivestimento a cappotto esterno con pannelli CELENIT N/C sp. 25 mm, in lana di legno mineralizzata, specifici per l'applicazione a cappotto. Pannelli posizionati verso l'esterno, opportunamente fissati e rifiniti con intonaco. Applicazione verso l'interno di freno al vapore o barriera al vapore in aderenza alla struttura e rivestimento interno con pannelli CELENIT N sp. 40 mm in lana di legno mineralizzata, opportunamente fissati e rifiniti con cartongesso incollato direttamente all'isolante.

**Stratigrafia**

1	Intonaco sp. 15 mm
2	CELENIT N/C sp. 25 mm
3	OSB sp. 18 mm
4	Lana di roccia (densità 40 kg/m <sup>3</sup> ) sp. 140 mm
5	OSB sp. 18 mm
6	Freno/Barriera al vapore
7	CELENIT N sp. 40 mm
8	Cartongesso sp. 12,5 + 12,5 mm

**R<sub>w</sub> 57 dB** (certificato n. 676 del 15/06/2011)**Dati dei singoli materiali nella stratigrafia**

	s [m]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	M <sub>s</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	R [m <sup>2</sup> K/W]	S <sub>D</sub> [m]	α [m <sup>2</sup> /Ms]
							0,04		
1	0,015	1800	0,900	837	20	27,0	0,017	0,300	0,598
2	0,025	460	0,065	1809	5	11,5	0,385	0,125	0,078
3	0,018	650	0,130	1699	50	11,7	0,138	0,900	0,118
4	0,140	40	0,035	1046	1	5,6	4,000	0,140	0,837
5	0,018	650	0,130	1699	50	11,7	0,138	0,900	0,118
6	0,001	290	0,230	1399	50000	0,1	0,002	25,000	0,567
7	0,040	400	0,065	1809	5	16,0	0,615	0,200	0,090
8a	0,013	900	0,210	837	8	11,3	0,060	0,100	0,279
8b	0,013	900	0,210	837	8	11,3	0,060	0,100	0,279
							0,10		

**Parametri della stratigrafia**

Spessore totale	s	= 0,282	m
Massa superficiale	M <sub>s</sub>	= 106,1	kg/m <sup>2</sup>
Trasmittanza	U	= 0,179	W/m <sup>2</sup> K
Trasmittanza periodica (valore estivo)	Y <sub>ie</sub>	= 0,051	W/m <sup>2</sup> K
Fattore di attenuazione (valore estivo)	f <sub>a</sub>	= 0,286	-
Sfasamento (valore estivo)	φ	= 11h 20'	

✓

✓

✓

✓

**Legenda**

s=spessore; ρ=densità; λ=conduttività termica; c=calore specifico; μ=fattore di resistenza al vapore; M<sub>s</sub>=massa superficiale; R=resistenza termica; S<sub>D</sub>=spessore equivalente d'aria; α=diffusività termica.

Calcoli eseguiti con il software PAN, [www.anit.it/pan](http://www.anit.it/pan)

## CONTATTI

- ANIT, Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico e acustico  
[www.anit.it](http://www.anit.it)  
[info@anit.it](mailto:info@anit.it)
- CELENIT  
[www.celenit.com](http://www.celenit.com)  
[assistenzonecnica@celenit.com](mailto:assistenzonecnica@celenit.com)

## BIBLIOGRAFIA

- [1] **Decreto Ministeriale 26 giugno 2015**, *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*, GU n. 162 del 15 luglio 2015
- [2] **Decreto Ministeriale 23 Giugno 2022**, *Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi*, GU Serie Generale n.183 del 6 agosto 2022
- [3] **Guida ANIT - Requisiti minimi e certificazione energetica degli edifici**, 16 giugno 2022
- [4] **Guida ANIT - CAM Criteri Ambientali Minimi**, 3 febbraio 2023
- [5] R. Esposti, G. Galbusera, A. Panzeri, C. Salani, **Volume 5, Prestazioni estive degli edifici**, Guida pratica per capire e progettare il comfort e il fabbisogno estivo degli edifici, Ed. TEP srl, novembre 2017
- [6] **UNI EN ISO 13786:2018**, *Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo*
- [7] **UNI EN ISO 52016-1:2018**, *Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 1: Procedure di calcolo*
- [8] **UNI EN 16798-1:2019**, *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica - Modulo M1-6*

# ANIT



ASSOCIAZIONE  
NAZIONALE  
PER L'ISOLAMENTO  
TERMICO E ACUSTICO

**ANIT**, Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico e acustico, ha tra gli obiettivi generali la diffusione, la promozione e lo sviluppo dell'isolamento termico ed acustico nell'edilizia e nell'industria come mezzo per salvaguardare l'ambiente e il benessere delle persone.

## ANIT

- diffonde la corretta informazione sull'isolamento termico e acustico degli edifici,
- promuove la normativa legislativa e tecnica,
- raccoglie, verifica e diffonde le informazioni scientifiche relative all'isolamento termico ed acustico,
- promuove ricerche e studi di carattere tecnico, normativo, economico e di mercato.

I soci **ANIT** si dividono nelle categorie

- **SOCI INDIVIDUALI**: Professionisti e studi di progettazione,
- **SOCI AZIENDA**: Produttori di materiali e sistemi per l'isolamento termico e acustico,
- **SOCI ONORARI**: Enti pubblici e privati, Università e Scuole Edili, Ordini e Collegi professionali.

## STRUMENTI PER I SOCI

I soci ricevono



Costante  
**aggiornamento sulle  
norme in vigore** con le  
GUIDE



I software per calcolare  
**tutti i parametri**  
energetici, igrotermici e  
acustici degli edifici



Servizio di  
**chiarimento tecnico**  
da parte dello Staff



Abbonamento alla rivista  
specializzata **Neo-Eubios**

[www.anit.it](http://www.anit.it)

[info@anit.it](mailto:info@anit.it)

Tel. 0289415126