



**MANUALI
DI PROGETTAZIONE
SOSTENIBILE**

ALESSANDRO FASSI E LAURA MAINA

L'ISOLAMENTO ECOEFFICIENTE



- FIBRA DI LEGNO
- FIBRA DI LEGNO MINERALIZZATA
- SUGHERO
- CANNA PALUSTRE
- FIBRA DI CELLULOSA
- FIBRA DI KENAF
- FIBRA DI CANAPA
- FIBRA DI LINO
- FIBRA DI MAIS
- FIBRA DI COCCO
- FIBRA DI JUTA
- LANA DI PECORA
- ARGILLA ESPANSA
- PERLITE ESPANSA
- VERMICULITE ESPANSA
- VETRO GRANULARE ESPANSO
- POMICE NATURALE
- CALCE-CEMENTO CELLULARE
- VETRO CELLULARE

GUIDA ALL'USO DEI MATERIALI NATURALI

PREFAZIONE DI **FEDERICO M. BUTERA**

Edizioni Ambiente



1. IL MATERIALE ISOLANTE

I MATERIALI ISOLANTI: CLASSIFICAZIONE, CARATTERISTICHE E IMPATTI 16

LA CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI ISOLANTI 16

LE CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI 17

Comportamento termico in regime stazionario e variabile	17
Comportamento termoigrometrico	19
Comportamento acustico	19
Comportamento al fuoco	20
Comportamento in presenza d'acqua	20
Comportamento alla compressione	21

GLI IMPATTI SULL'AMBIENTE E SULLA SALUTE 21

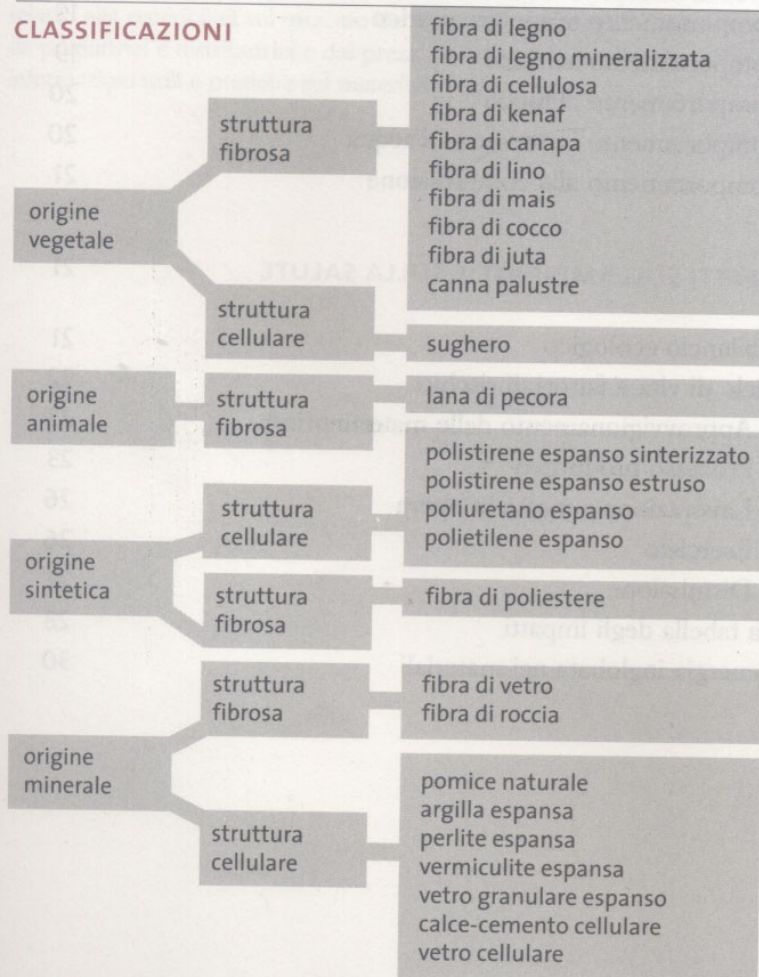
Il bilancio ecologico	21
Ciclo di vita e fattori di rischio	22
1. Approvvigionamento delle materie prime	22
2. Processo produttivo	23
3. Lavorazione e messa in opera	26
4. Esercizio	26
5. Dismissione	27
La tabella degli impatti	28
L'energia inglobata nei materiali	30

I MATERIALI ISOLANTI: CLASSIFICAZIONE, CARATTERISTICHE E IMPATTI

LA CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI ISOLANTI

Una classificazione dei materiali isolanti può essere fatta in base a diversi aspetti, a seconda dei quali vengono messe in evidenza alcune caratteristiche; possono essere suddivisi in base alla loro origine, che può essere sintetica, minerale, vegetale o animale, e in base alla loro struttura, che può essere fibrosa o cellulare.

CLASSIFICAZIONI



Questa prima suddivisione, però, non descrive in modo sufficientemente completo e approfondito la vasta gamma di materiali presenti oggi sul mercato.

Vi sono infatti:

- materiali totalmente sintetici, principalmente

fibra di poliestere, polistirene espanso sinterizzato, polistirene espanso estruso, poliuretano espanso e polietilene espanso, che sono polimeri termoplastici o termoindurenti ottenuti da un lungo e complesso processo di lavorazione del petrolio, materia prima di partenza;

- materiali totalmente minerali, principalmente materiali granulari naturali (pomice) ed espansi (argilla, perlite, vermiculite e vetro granulare). l'isolante in calce-cemento cellulare e il vetro cellulare, che derivano dalla lavorazione di materie prime minerali come l'argilla, il calcare, le rocce di origine vulcanica, le sabbie quarzifere, il vetro riciclato, senza l'aggiunta di resine e leganti;

- materiali totalmente vegetali, come sughero, canna palustre, fibra di legno, cocco, juta, mais e alcuni prodotti in kenaf e lino, in cui la materia prima vegetale subisce una lavorazione che non prevede l'aggiunta di leganti e fibre sintetiche di sostegno.

Vi sono poi una vasta gamma di materiali misti che nascono dall'unione di materie prime di origine diversa, per migliorare il loro comportamento prestazionale:

- misti minerali-sintetici, in particolare le lane minerali (lana di vetro e di roccia), in cui alla materia prima minerale (anche qui sabbie quarzifere, vetro riciclato, rocce di origine vulcanica) viene aggiunta una percentuale di resine sintetiche con funzione di legante;

- misti vegetali-sintetici e animali-sintetici, in particolare pannelli di fibre morbide (fibre di cellulosa, canapa, lana di pecora e in alcuni casi kenaf e lino) ai quali viene aggiunta una fibra sintetica (in genere nella misura del 10-15%, in alcuni casi anche 30-50%) che lega il materiale e conferisce maggior stabilità;

- misti vegetali-minerali, in particolare la lana di legno mineralizzata, in cui alla materia prima vegetale viene aggiunta una percentuale di legante minerale (magnesite o cemento Portland) per conferire al materiale maggior resistenza meccanica.

Un'ulteriore suddivisione è quella basata sul processo produttivo:

- materiali naturali: vengono impiegati così co-

me sono offerti dalla natura, senza trasformazioni sostanziali, pur essendo anch'essi oggetto, prima della posa in opera, di alcune lavorazioni tendenti a dotarli dei requisiti appropriati a un determinato impiego (taglio, lavaggio ecc.);

- materiali artificiali: sono ottenuti mediante specifico processo produttivo tendente ad attribuire a una miscela di materie prime, opportunamente dosate, determinate caratteristiche. Nella maggior parte dei casi, dunque, non è corretto parlare di materiali naturali, in quanto tutti i materiali isolanti subiscono un processo di trasformazione più o meno complesso; a seconda della consistenza possiamo avere pannelli, materassini, feltri, trecce, fiocchi e granuli.

LE CARATTERIZZAZIONI PRESTAZIONALI

a cura di Valentina Serra*

L'isolamento termico degli edifici è diventato uno dei temi centrali del progettare secondo i principi dell'*energy conscious design*. Da circa trent'anni costituisce l'elemento chiave per il miglioramento del comportamento energetico dell'edificio; l'adozione di materiali isolanti – dal punto di vista termico e termoigrometrico – comporta infatti numerosi benefici, quali:

- la riduzione dei flussi termici attraverso l'involucro edilizio, flussi dispersi nel periodo invernale ed entranti nel periodo estivo;
- il controllo delle temperature superficiali interne, finalizzato al soddisfacimento delle esigenze di comfort termico;
- il controllo dei fenomeni di condensa superficiale;
- la riduzione delle fluttuazioni di temperatura in ambienti non climatizzati.

Fino a qualche tempo fa i materiali isolanti venivano valutati in base ai benefici apportati soprattutto, se non unicamente, nel periodo di riscaldamento; oggi, ormai evidenti i costi energetici del raffrescamento, l'attenzione si è focalizzata anche sulla prestazione nel periodo estivo. Diventano quindi importanti varie proprietà termofisiche che caratterizzano la prestazione degli isolanti nelle diverse condizioni come, in particolare: la massa volumica, la conducibilità termica, il calore specifico.

* Professore associato per il settore scientifico disciplinare Fisica Tecnica Ambientale presso la Facoltà di Architettura II del Politecnico di Torino.

È importante sottolineare che il comportamento dell'elemento di involucro in cui è inserito uno strato di materiale isolante è fortemente correlato alle caratteristiche complessive della stratigrafia e al posizionamento dell'isolante rispetto alla massa.

Oltre al comportamento termico e termoigrometrico, i materiali isolanti devono essere valutati anche rispetto ad altri aspetti. Questi sono i principali:

- il comportamento acustico;
- il comportamento al fuoco;
- il comportamento in presenza d'acqua;
- il comportamento alla compressione.

Nei paragrafi che seguono vengono brevemente descritte le principali proprietà che caratterizzano i materiali isolanti nei diversi aspetti.

COMPORTAMENTO TERMICO IN REGIME STAZIONARIO E VARIABILE

L'analisi termica dei componenti di un involucro edilizio può essere affrontata secondo un approccio semplificato, cioè adottando un regime termico stazionario con grandezze costanti nel tempo e trascurando gli effetti legati all'accumulo termico della struttura o in regime variabile, in cui le grandezze sollecitanti variano nel tempo e la struttura interviene attenuando o ritardando l'onda termica grazie alle proprie caratteristiche di accumulo termico.

Il regime stazionario è sicuramente rappresentativo dei fenomeni di trasmissione del calore in periodo invernale o in presenza di edifici con bassa inerzia termica; ma quando le oscillazioni di temperatura giornaliere e la radiazione solare sono di entità rilevante risulta fondamentale passare a un'analisi in regime variabile. In regime stazionario, il parametro fondamentale che esprime la potenzialità della parete nel ridurre i flussi termici entranti o uscenti e nel controllare le temperature superficiali interne per soddisfare i requisiti di comfort termico ed evitare l'insorgenza di fenomeni di condensa superficiale è la trasmittanza termica.

Il parametro trasmittanza termica U-value (indicato spesso con il simbolo K), espresso in $[W/(m^2K)]$ o $[W/(m^2C)]$, indica il flusso termico che in condizioni stazionarie attraversa l'unità di area di componente di involucro per differenza unitaria di temperatura interna (ϑ_{si})

ed esterna (ϑ_{se}). Si determina con la relazione:

$$U = \frac{1}{R_T}$$

con

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$$

dove:

R_{si} = resistenza termica superficiale interna
 $[(m^2K)/W]$, $[(m^2C)/W]$

R_1, R_2, \dots, R_n = resistenze termiche di progetto
 dei vari strati $[(m^2K)/W]$, $[(m^2C)/W]$

R_{se} = resistenza termica superficiale esterna
 $[(m^2K)/W]$, $[(m^2C)/W]$

Le specifiche per il calcolo di tale parametro si trovano nella norma UNI EN ISO 6946.

In particolare la resistenza termica di uno strato isolante si ottiene dalla relazione:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

dove:

d = spessore dello strato [m]

λ = conducibilità termica dello strato $[W/mK]$

La conducibilità termica è quindi la proprietà fondamentale che caratterizza la prestazione termica di un materiale isolante, rappresentando il flusso termico indotto da una differenza di temperatura unitaria che, in regime stazionario, attraversa l'unità di spessore di un materiale omogeneo in direzione perpendicolare alle linee isoterme.

La conduttività dei materiali dipende, infatti, da numerosi fattori: ad esempio le condizioni di esercizio (temperatura e umidità in primo luogo), l'invecchiamento, le modalità di posa e le caratteristiche di produzione. Risulta, pertanto, fondamentale assumere nei calcoli un valore corretto.

A questo proposito esiste una norma, la UNI EN ISO 10456, che specifica i metodi per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto per materiali edilizi termicamente omogenei e permette inoltre, attraverso opportuni coefficienti, di convertire i valori di conducibilità ottenuti in determinate condizioni di temperatura e umidità nei rispettivi valori rela-

tivi a condizioni termoigrometriche differenti e, per alcuni materiali, di tenere conto di possibili effetti di invecchiamento.

Per molti materiali isolanti è, inoltre, possibile fare riferimento ai valori utili di calcolo (λ_m) riportati nella norma UNI 10351 che tengono conto di una maggiorazione percentuale rispetto ai valori misurati in laboratorio.

Purtroppo, se tali norme risultano piuttosto complete per i materiali isolanti convenzionali, mancano del tutto informazioni sulla maggioranza degli isolanti ecocompatibili presentati in questo testo, per i quali ci si deve affidare ai valori dichiarati dal produttore, che nella maggioranza dei casi non tengono conto di eventuali maggiorazioni.

L'analisi termica in regime variabile è particolarmente complessa. Nel corso degli ultimi anni sono stati elaborati alcuni metodi semplificati, in particolare basati sull'analisi armonica, cioè con variazione sinusoidale, in un periodo di tempo definito, delle grandezze sollecitanti la parete (temperature e flussi termici).

Relativamente a questo tipo di trattazione del fenomeno è stata messa a punto la norma UNI EN ISO 13786, che definisce le caratteristiche termiche dinamiche dei componenti edilizi. In questo tipo di analisi diventa fondamentale la conoscenza, oltre che della conducibilità termica, anche dei valori di massa volumica e di calore specifico di ogni singolo materiale. La norma specifica che la prestazione dinamica dipende dal modo in cui i materiali sono accoppiati a livello stratigrafico, e quindi la metodologia non è applicabile ai singoli materiali. Le caratteristiche dinamiche sono rappresentate da numeri complessi, caratterizzati da un modulo e da una fase.

In generale, nel periodo estivo diventa importante l'effetto combinato delle tre proprietà prima citate (massa volumica, calore specifico e conducibilità termica). Un parametro che fornisce alcune importanti indicazioni sul comportamento termico del materiale in regime dinamico è la diffusività termica, che si ottiene dalla relazione:

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

dove:

a = diffusività termica $[m^2/s]$

λ = conducibilità termica $[W/(mK)]$, $[W/(m^{\circ}C)]$

ρ = massa volumica $[kg/m^3]$

c = calore specifico $[J/(kgK)]$, $[J/(kg^{\circ}C)]$

Questo parametro permette, quindi, di tenere conto non solo delle proprietà isolanti ma anche di quelle di accumulo del calore in un certo volume di materiale. Poiché tanto più è bassa la diffusività tanto più rapidamente e per distanze brevi si estingue al suo interno l'onda termica prodotta sulla superficie di un materiale, a parità di conducibilità termica e spessore, i materiali che presentano elevati calore specifico e massa volumica si comportano meglio in regime estivo.

COMPORTAMENTO TERMOIGROMETRICO

Una verifica importante, quando nella stratigrafia di un componente edilizio sia presente un materiale isolante, è quella relativa ai fenomeni di condensazione.

I componenti edilizi, infatti, sono interessati da fenomeni di diffusione del vapore acqueo a causa della naturale migrazione del vapore acqueo da ambienti a pressione di vapore maggiore verso ambienti a pressione di vapore minore. Nel periodo invernale e in ambienti riscaldati, la differenza di pressione che si genera tra ambiente interno ed esterno causa la diffusione del vapore acqueo nelle pareti.

Tale fenomeno non presenta alcun inconveniente purché nel suo migrare il vapore acqueo non entri in contatto con materiali a temperatura tale da causarne la condensazione. Per una determinata temperatura la pressione di vapore non deve quindi raggiungere il valore di saturazione. Il fenomeno è estremamente complesso; tuttavia l'approccio convenzionale si basa sul metodo della temperatura di rugiada e di Glaser, che, seppur introducendo drastiche semplificazioni (non sempre accettabili) permette di effettuare l'analisi partendo dalla conoscenza delle proprietà termiche e igrometriche principali degli strati componenti.

Il metodo è oggetto della norma UNI EN ISO 13788, che permette di valutare il rischio di condensazione interstiziale dovuta alla diffusione del vapore acqueo e le relative condizioni al contorno da utilizzare nei calcoli.

La proprietà che caratterizza il comportamento igrometrico di un materiale è la permeabilità al vapore acqueo, definita come la portata di vapore acqueo che si diffonde attraverso un materiale omogeneo di spessore unitario in direzione perpendicolare alle isobare, per una differenza di pressione parziale di vapore unitaria, in determinate condizioni di temperatura e umidità [kg/msPa]. Alcuni valori si possono

trovare nella norma UNI 10351.

Generalmente i produttori forniscono il valore del fattore di resistenza alla diffusione del vapore, indicato con il simbolo μ , dato dal rapporto tra la resistenza alla diffusione del vapore del materiale considerato e quella di uno strato d'aria di uguale spessore, avente fattore di resistenza alla diffusione del vapore pari a 1. Esso è, quindi, un indice di quante volte è più grande la resistenza di un determinato strato di materiale rispetto a uno strato d'aria dello stesso spessore.

Materiali con μ inferiore a 10 consentono una diffusione elevatissima; da 10 a 50 una diffusione media; da 50 a 500 una diffusione limitata (freni al vapore, relativamente impermeabili); da 500 a infinito una diffusione tendente a zero (barriere al vapore, assolutamente impermeabili). Il fattore μ è un numero che non dipende dallo spessore dell'elemento considerato, ma è proprio del materiale.

Dal valore μ si può calcolare la resistenza complessiva al vapore dello strato, indicato con il simbolo s_d e misurata in metri, data dal fattore μ moltiplicato per lo spessore del materiale, che rappresenta lo spessore d'aria equivalente, cioè lo spessore d'aria che offrirebbe alla diffusione del vapore la stessa resistenza del materiale in questione.

COMPORTAMENTO ACUSTICO

Dal punto di vista acustico un materiale isolante interviene a tre diversi livelli:

- sul fonoassorbimento;
- sul fonoisolamento per rumori che si propagano per via aerea;
- sul fonoisolamento per rumori che si trasmettono attraverso le strutture.

In relazione al fonoassorbimento, cioè alla capacità di assorbire il suono o rumore incidente il parametro caratterizzante è il coefficiente di assorbimento acustico, indicato con il simbolo α e adimensionale, che esprime il rapporto tra l'energia sonora assorbita e l'energia sonora incidente. Sono fonoassorbenti i materiali porosi dotati di struttura fibrosa o alveolare aperta; determinante risulta lo spessore del materiale e la sua applicazione.

Un materiale assorbe in modo diverso suoni gravi, medi o acuti, per cui è necessario conoscere il coefficiente di assorbimento per le diverse frequenze (chiamato coefficiente di assorbimento acustico pratico, α_p , determinato alle frequenze di 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz,

2000 Hz e 4000 Hz). Al fine di un primo confronto tra materiali è possibile utilizzare un indice unico, rappresentato dal coefficiente di assorbimento acustico ponderato α_w .

Il parametro che caratterizza, invece, il comportamento di un componente in merito alla sua capacità di ridurre la trasmissione del rumore aereo dall'ambiente disturbante all'ambiente disturbato (dall'esterno verso l'interno e tra ambienti contigui) è il potere fonoisolante R , espresso in dB e dato dalla relazione:

$$R = 10 \log \frac{1}{t}$$

in cui t è il coefficiente di trasmissione, ottenuto dal rapporto tra l'energia sonora trasmessa e l'energia sonora incidente.

Il potere fonoisolante indica dunque l'attitudine di un elemento costruttivo a impedire la propagazione del suono nell'aria; dipende essenzialmente dalla sua massa frontale, ma sono parametri influenti anche la stratigrafia, la permeabilità all'aria, la presenza e dimensione dei pori, il tipo di posa e ancoraggio. Esso varia in funzione della frequenza e quindi spesso viene riportato un valore unico dato dall'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w .

I materiali isolanti più adeguati per il fonoisolamento sono quelli ad alta densità. È importante sottolineare però che non ha senso riportare il potere fonoisolante riferito al singolo materiale, poiché è la stratigrafia complessiva che ne determina il valore.

Per quanto riguarda il fonoisolamento da rumori che si propagano per via strutturale, un aspetto importante è il rumore prodotto sui solai dal calpestio. A tal fine il parametro che indica il grado di isolamento di un orizzontamento da rumori impattivi trasmessi per via strutturale è il livello di pressione sonora di calpestio, definito come il livello medio di pressione sonora nell'ambiente disturbato quando sul pavimento di quello disturbante agisce un generatore di calpestio normalizzato.

Per valutare il grado di isolamento da rumore di calpestio di un rivestimento di pavimento si definisce l'attenuazione del livello di rumore di calpestio ΔL , misurata sempre in dB e particolarmente utile per valutare l'effetto dell'isolamento rispetto al rumore trasmesso in assenza di esso. Come il livello di pressione sonora di calpestio, varia alle diverse frequenze; tuttavia, anche in questo caso si può fare riferimento al-

l'indice unico ΔL_w .

Come per il potere fonoisolante, anche per l'indice di attenuazione del rumore di calpestio non è, quindi, corretto riferirsi al singolo materiale ma sempre all'intero elemento costruttivo, poiché il valore può essere più o meno elevato a seconda dei diversi materiali che fanno parte del "pacchetto". In particolare, un confronto tra isolanti è significativo solo a parità di caratteristiche dell'orizzontamento. Testare il materiale all'interno di una struttura poco isolata acusticamente ha come risultato un indice di attenuazione più elevato; al contrario, se il materiale è inserito in una struttura già di per sé isolata, l'attenuazione è di minore entità.

COMPORTAMENTO AL FUOCO

Tutti i materiali da costruzione, e dunque anche i materiali isolanti, ai fini della prevenzione incendi sono soggetti a una classificazione di reazione al fuoco, caratteristica che indica il grado di partecipazione di un materiale al fuoco cui è sottoposto. Dal 2005 si sostituisce alla classificazione italiana espressa numericamente – classe 0, 1 ecc. – quella europea (Euroclassi) in lettere: A, B ecc.

Oltre alla classe di reazione al fuoco vera e propria vengono attribuiti altri codici che identificano il comportamento dei materiali in termini di livello di produzione di fumo (s – da *smoke* – seguito da numero) e di rilascio di gocce o particelle ardenti (d – da *drops* – seguito da numero) e di applicabilità (ad esempio FL – da *floor* – se utilizzabili come rivestimenti di pavimenti).

La reazione al fuoco dei materiali isolanti e il loro comportamento in caso di incendio è estremamente varia, a seconda del materiale di base e delle sostanze a questo aggiunte (resine, leganti, additivi, agenti espandenti).

Di fondamentale importanza, inoltre, sono l'applicazione e la modalità di messa in opera del materiale: un materiale combustibile può, infatti, presentare un buon comportamento al fuoco se collocato correttamente all'interno dell'elemento edilizio.

COMPORTAMENTO IN PRESENZA D'ACQUA

La valutazione del comportamento del materiale isolante in presenza di acqua o umidità è estremamente importante, poiché il materiale può subire modificazioni sia dal punto di vista

fisico, – riguardanti ad esempio il peso, la resistenza meccanica, la conducibilità termica – sia per la maggiore attaccabilità chimica e biologica che si verifica in ambienti umidi.

In presenza di acqua i parametri da considerare sono:

- l'assorbimento d'acqua per immersione per lungo periodo (28 giorni), con immersione del provino parziale (espresso in kg/m^2), per simulare l'assorbimento causato da esposizione all'acqua per lungo periodo, o totale (espresso in volume percentuale), caso non direttamente correlato alle condizioni in loco, ma riconosciuto rilevante per alcuni prodotti in alcune applicazioni;
- l'assorbimento d'acqua per immersione parziale dei provini per breve periodo (24 ore), che intende simulare l'assorbimento d'acqua, calcolato in kg/m^2 , causato da un periodo di pioggia di 24 ore durante i lavori di costruzione;
- l'assorbimento d'acqua per diffusione per lungo periodo (28 giorni), espressa in kg/m^2 o in volume percentuale, che intende simulare l'assorbimento d'acqua da parte di prodotti sottoposti a elevate umidità relative (prossime al 100%) su entrambi i lati, e soggetti a gradiente di pressione di vapore acqueo per lungo periodo, per esempio nel caso di tetto rovescio o di isolamento non protetto dal terreno.

Il comportamento in presenza di umidità è estremamente complesso e dipende fortemente dalle caratteristiche del materiale.

L'assorbimento espresso in volume percentuale che un materiale subisce quando è posto in un ambiente saturo di umidità si definisce igroscopicità.

Materiali diversi definiti igroscopici possono avere in presenza di umidità un comportamento assai diverso, poiché diverso è il fenomeno fisico che si genera. In alcuni materiali, infatti, la singola fibra è impermeabile e l'acqua va a riempire gli interstizi tra le fibre sostituendosi all'aria, con conseguente drastica riduzione della capacità isolante del materiale; in altri l'acqua viene assorbita dalle singole fibre e l'aria rimane negli spazi interstiziali tra le fibre, con conseguente incremento di volume ma minore effetto sulle caratteristiche di isolamento termico.

COMPORTAMENTO ALLA COMPRESSIONE

Nelle applicazioni in cui il materiale isolante è soggetto a carichi, cioè soprattutto quando impiegato in copertura e a pavimento, la conoscenza del comportamento a compressione è estremamente importante. I parametri che caratterizzano tale comportamento sono la sollecitazione a compressione al 10% di deformazione, indicata con il simbolo σ_{10} ed espressa in kPa e la resistenza a compressione σ_m , espressa sempre in kPa.

In generale la resistenza a compressione aumenta al crescere della massa volumica del materiale.

GLI IMPATTI SULL'AMBIENTE E SULLA SALUTE

IL BILANCIO ECOLOGICO

Un bilancio è, per definizione, un prospetto riassuntivo degli aspetti positivi e negativi di una determinata situazione; il termine "bilancio ecologico" indica un prospetto complessivo e comparato degli effetti, positivi e negativi, di un determinato prodotto sull'ambiente.

Esso si fonda sull'analisi dell'intero ciclo di vita di un materiale, dal reperimento delle materie prime al processo produttivo, dai trasporti alla lavorazione, dall'utilizzo alla dismissione. Emerge dunque l'assoluta importanza della dimensione temporale: un prodotto nasce, cresce, si trasforma, invecchia e muore, e in questo processo lascia dei segni sull'ambiente e su di noi.

Esaminare il ciclo di vita di un materiale può mettere in evidenza un miglioramento ecologico attuato in una particolare fase del suo ciclo di vita, o in più fasi del ciclo di vita, anche tutte. Ma è bene ricordare che la verifica di un effettivo miglioramento rispetto a una fase non ci mette affatto al riparo da condizioni di insostenibilità possibili in altre fasi.

Per un materiale da costruzione è fondamentale approfondire la fase di utilizzo, poiché all'interno di questa specifica fase rientra il problema della salubrità degli ambienti interni. Durante il periodo di vita utile si evidenziano

aspetti che rendono tali materiali differenti da altre tipologie di prodotto.

In particolare:

- la durata di vita del materiale incorporato nella costruzione è molto più lunga di quella rilevabile per gli altri prodotti industriali;
- la quantità di energia incorporata nel prodotto edilizio va esaminata, oltre che in relazione alla quantità di energia necessaria per l'acquisizione delle materie prime, per la produzione, l'uso e lo smaltimento del prodotto, anche in relazione ai risparmi energetici che tale prodotto consente di ottenere una volta incorporato alla costruzione. Proprio i materiali isolanti, a fronte di rilevanti consumi energetici necessari per la produzione, possono consentire risparmi sui costi di esercizio dell'edificio;
- nella valutazione devono essere prese in considerazione le modalità di posa e installazione, che possono modificare le prestazioni, cosa che non avviene necessariamente per altri prodotti industriali.

CICLO DI VITA E FATTORI DI RISCHIO

Il ciclo di vita di un materiale isolante può essere suddiviso nelle seguenti fasi principali:

1. approvvigionamento delle materie prime;
2. processo produttivo;
3. lavorazione e messa in opera;
4. esercizio;
5. dismissione.

Impatti sull'ambiente e sulla salute possono verificarsi in ogni fase.

Per quanto riguarda gli impatti sulla salute, nelle fasi di approvvigionamento delle materie prime (fase 1), di produzione (fase 2), di lavorazione e messa in opera (fase 3) e dismissione (fase 5) prevalgono quelli riguardanti la salute dei lavoratori, mentre rischi per la salute degli abitanti sono concentrati durante la fase di esercizio, ossia di permanenza del materiale nell'edificio (fase 4), che è tuttavia la fase più lunga.

I principali fattori di rischio che si possono riscontrare nelle diverse fasi del ciclo di vita di un materiale isolante possono essere così evidenziati:

1. approvvigionamento delle materie prime:
 - consumo di risorse naturali e trasporti;
 - degrado del territorio;
2. processo produttivo:
 - consumo di energia (processo produttivo e trasporti/distribuzione);

- inquinamento (aria, acqua e suolo);

- insorgenza di disturbi per gli addetti alla produzione;

3. lavorazione e messa in opera:

- emissioni nocive per maneggiamento o inalazione;

- produzione di sfridi e scarti di lavorazione;

4. esercizio:

- emissioni nocive a breve o lungo termine;

5. dismissione:

- perdita di risorse naturali parziale o totale (dovuta all'impossibilità o alla difficoltà di riutilizzo, recupero, riciclaggio o reinserimento nell'ambiente);

- consumo di energia per la dismissione;

- inquinamento (aria, acqua e suolo);

- degrado del territorio (discariche e impianti di incenerimento).

La valutazione di questi fattori è estremamente difficile, poiché deve tener conto di aspetti tra loro assai diversi. Può essere di tipo qualitativo – ossia basata su pareri di esperti – oppure quantitativa, cioè relativa a misurazioni precise delle quantità in gioco: materie prime utilizzate, energia consumata, emissioni e rifiuti.

Quest'ultimo tipo di valutazione risulta molto complessa perché richiede una grande quantità di dati difficilmente quantificabili, che le aziende fanno fatica a produrre. Inoltre si corre il rischio che un tipo di valutazione quantitativa possa nascondere comunque tra i numeri situazioni ambientalmente non sostenibili.

Una combinazione dunque di valutazioni qualitative (con il monitoraggio delle aree di impatto più importanti e la valutazione dei loro potenziali effetti) e dell'analisi quantitativa di parametri selezionati sembra essere la via più promettente per un approccio alla valutazione del ciclo di vita di prodotti e materiali.

Il tentativo che qui è stato fatto è quello di individuare i fattori di rischio più significativi per i diversi materiali e di comporli in seguito in una tabella comparativa.

Vediamo nel dettaglio i principali fattori di rischio legati al ciclo di vita dei materiali isolanti.

1. APPROVVIGIONAMENTO DELLE MATERIE PRIME

Consumo di risorse naturali e trasporti.

Un problema molto urgente è quello dell'utilizzo irrazionale delle risorse naturali, con il conseguente rischio di esaurimento.

Le risorse non rinnovabili sono quelle la cui di-

sponibilità sul pianeta è sempre più scarsa, perché non sono rigenerabili se non in tempi geologici (petrolio, olii, gas naturale, carbone, materiali rocciosi). In particolare, lo sfruttamento del petrolio non solo implica il rischio di un suo esaurimento e di grave inquinamento ambientale legato ai processi di trasformazione; implica anche una lotta spietata tra Stati, potenze economiche, multinazionali ed eserciti perché l'approvvigionamento del petrolio è stato, ed è, la causa prima dei tanti conflitti di questi ultimi anni.

Dire che è necessario ridurre drasticamente l'utilizzo di risorse non rinnovabili a favore di quelle rinnovabili è importante ma non sufficiente, perché:

- una risorsa può essere non rinnovabile ma di disponibilità pressoché illimitata, non ancora utilizzata o distribuita ampiamente sulla crosta terrestre;
- una risorsa rinnovabile, come nel caso di alcuni legnami, può essere di limitata disponibilità, non essere presente localmente e avere tempi di rigenerazione molto lunghi.

È dunque importante considerare anche la disponibilità della materia prima e la facilità di reperimento, incoraggiando l'utilizzo di materiali di produzione locale al fine di ridurre in maniera consistente i costi di trasporto e di distribuzione.

L'utilizzo di materie prime riciclate e il riutilizzo degli inevitabili sfridi di lavorazione all'interno della fase produttiva possono concorrere in modo determinante al risparmio delle risorse.

ISOLANTI SINTETICI: impatto molto elevato, perché derivano dall'estrazione e dalla lavorazione del petrolio. Però i prodotti isolanti in fibra di poliestere, che derivano per gran parte da poliestere riciclato (bottiglie in PET provenienti dalla raccolta urbana differenziata) hanno un impatto di modesta entità.

ISOLANTI MINERALI: impatto modesto, in quanto derivano da materie prime molto diffuse e disponibili in abbondanza (sabbie quarzifere, argilla, minerali di origine vulcanica).

L'approvvigionamento della materia prima può essere causa di deturpamento del territorio; alcune cave vengono ripristinate a verde, ma il ripristino ambientale non è sempre possibile e concretamente realizzato. L'estrazione dovrebbe essere limitata e si dovrebbe prevedere la chiusura e l'idoneo rinverdimento delle cave prima di intaccare l'immagine paesaggistica del territorio.

ISOLANTI VEGETALI: alcuni materiali derivano da materie prime facilmente rigenerabili (canapa, kenaf, lino, mais, canna palustre, cocco, juta); altri da materie prime riciclate e da scarti di lavorazione (cellulosa e legno). Per la fibra di legno è importante verificare che non vengano utilizzati legnami provenienti da fore-

ste tropicali; il sughero è una materia prima rigenerabile ma di limitata disponibilità, poiché la pianta può essere decorticata solo ogni 8-10 anni.

È importante segnalare che per la produzione di alcuni particolari prodotti (canapa, kenaf, cellulosa e in alcuni casi lino) viene aggiunta alla fibra vegetale una percentuale di fibra sintetica (generalmente poliestere) in misura del 10-15% (anche se in alcuni casi si arriva al 30-50%) con funzione di sostegno e rinforzo; questo è un aspetto da considerare in un bilancio ambientale, pur essendo la quantità di petrolio usata per produrre la fibra di poliestere proporzionalmente trascurabile.

ISOLANTI ANIMALI: la lana di pecora è una materia prima rigenerabile; può però provenire da luoghi molto lontani (Nuova Zelanda). Alcuni prodotti contengono una griglia di rinforzo in polipropilene.

2. PROCESSO PRODUTTIVO

Consumo di energia. Il processo produttivo del materiale è la fase che richiede il maggior dispendio di energia, utilizzata per i processi termici necessari per la lavorazione delle materie prime. I forni (di espansione, essiccazione ecc.) vengono alimentati quasi del tutto da combustibili fossili non rinnovabili; in pochissimi casi vengono utilizzati forni elettrici.

Inoltre, di tutta l'energia consumata solo una piccola parte viene effettivamente utilizzata per la trasformazione del materiale; la maggior parte va persa, generalmente sotto forma di calore di dispersione. La quantità di energia perduta risulta essere un buon indicatore dell'efficienza del processo. Alcuni produttori cercano di ridurre i consumi utilizzando forni con sistema di recupero del calore e in grado di funzionare a temperature inferiori (es. vetro cellulare) e forni che operano a ciclo continuo (es. argilla espansa).

La distribuzione dei semilavorati e dei prodotti finiti può comportare ingenti consumi energetici, anche superiori a quelli relativi alla fase di produzione.

ISOLANTI SINTETICI: il processo produttivo, pur essendo lungo e complesso, non comporta dispendi energetici così elevati.

ISOLANTI MINERALI: consumo molto elevato dovuto ai processi termici di produzione.

La produzione del vetro cellulare comporta un consumo di energia estremamente elevato, dovuto al processo di fusione della materia prima e successiva espansione ad alta temperatura (il consumo viene in parte ridotto dall'utilizzo di vetro riciclato in misura del 50-70%). Può essere elevato il consumo dovuto alla distribuzione del prodotto finito, poiché gli stabilimenti di produzione dell'azienda produttrice sono uno in Belgio e uno, da poco in funzione, nell'est europeo.

Hanno un consumo di energia elevato le lane mine-

rali (processo di fusione a 1400-1600°C) e medio-alto i minerali granulari espansi (processo di espansione a 850-1200°C).

Il consumo di energia per la produzione dell'isolante in calce-cemento cellulare è medio-alto perché l'energia assorbita per la produzione della calce e del cemento è rilevante; la formatura dei pannelli comporta invece un dispendio energetico contenuto poiché non richiede elevate temperature (semplice consolidamento e asciugatura del materiale).

A differenza degli altri materiali minerali, la pomice ha un consumo di energia non rilevante, poiché non subisce espansione.

ISOLANTI VEGETALI E ANIMALI: basso consumo di energia. Si evidenziano però differenze nel processo produttivo. Da segnalare è il consumo di energia per i materiali che subiscono trattamenti termici: maggiore per la fibra di legno mineralizzata con magnesite e per il sughero espanso in pannelli (350-450°C), minore per i pannelli realizzati mediante termofissaggio con fibra sintetica (fibra di cellulosa, canapa, kenaf, mais) o compressione a caldo e asciugatura (fibra di legno e sughero compresso) a 160-180°C. Inoltre i pannelli in fibra di legno mineralizzata hanno un consumo rilevante determinato dalla realizzazione del legante (magnesite o cemento Portland); lo stesso vale per la fibra di legno impermeabilizzata con bitume, sostanza di derivazione petrolchimica.

Inquinamento. Si tratta di un fattore di rischio largamente riconosciuto, legato in maniera inscindibile a ogni produzione industriale. In particolare, si possono evidenziare i seguenti effetti.

- **Riduzione della fascia di ozono:** lo strato di ozono è situato nella stratosfera, 15-35 km sopra alla superficie terrestre. Esso protegge la vita sulla Terra dalle radiazioni solari ultraviolette a onde corte (UV-B); un eccesso di radiazioni può determinare gravi danni agli ecosistemi e alla salute dell'uomo (tumori della pelle, cataratte del cristallino, indebolimento del sistema immunitario).

Lo strato di ozono nella stratosfera si forma e si decompone senza sosta, in quanto la luce ultravioletta del sole colpisce le molecole di ossigeno (O_2) trasformandole in ozono (O_3) e viceversa; di norma il tenore di ozono rimane costante, poiché i due processi si annullano a vicenda. L'ozono può però essere ricondotto più rapidamente allo stato di ossigeno tramite sostanze altamente reattive immesse nell'atmosfera: in particolare i gas CFC, HCFC e HFC, utilizzati per l'espansione di alcuni materiali isolanti.

Nel 1995 l'Unione europea ha vietato l'uso e la produzione dei CFC; a questi si sono sostituiti gli HCFC, il cui potenziale di riduzione dell'ozono è stimato pari al 5-20% in meno di quello dei CFC (comunque ancora molto elevato). Anche gli HCFC sono oggetto di divieto dal

2000. Alcuni produttori hanno introdotto l'utilizzo degli HFC, che hanno un contenuto di cloro sufficientemente basso da non essere dannoso per la fascia di ozono, ma un impatto sull'effetto serra molto alto (3.000 volte superiore a quello dell'anidride carbonica).

ISOLANTI SINTETICI: impatto molto elevato per i materiali espansi; per il polistirene espanso estruso, il poliuretano espanso e il polietilene espanso vengono utilizzati HCFC o altri agenti espandenti, come pentano (idrocarburo ottenuto dalla raffinazione della nafta), agenti contenenti azoto (causa di incremento dello smog fotochimico), CO_2 . Per il polistirene espanso sinterizzato si usano pentano o CO_2 . I gas CFC, HCFC e HFC utilizzati per l'espansione continuano a essere emessi nell'atmosfera anche dal materiale installato.

- **Effetto serra:** il fenomeno dell'effetto serra è sempre esistito. I gas serra naturali che si producono spontaneamente, come l'anidride carbonica (CO_2), il vapore acqueo, il metano (CH_4), il protossido di azoto (N_2O), consentono all'energia a onde corte emessa dal sole di attraversarli, ma trattengono le radiazioni infrarosse a onde lunghe riflesse dalla superficie terrestre; essi hanno consentito di mantenere la temperatura terrestre entro valori adatti allo sviluppo della vita sulla Terra.

L'aggiungersi dei gas serra di origine antropica, prodotti cioè dalle attività umane, ha alterato l'equilibrio naturale del pianeta; in particolare responsabili dell'effetto serra risultano l'anidride carbonica, aumentata rapidamente a causa della combustione di combustibili fossili e della deforestazione, i clorofluorocarburi (CFC) e i gas ad essi correlati (HCFC e HFC).

ISOLANTI SINTETICI: l'elevato impatto dei materiali espansi è dovuto principalmente all'utilizzo di HCFC e HFC come agenti espandenti; dunque non riguarda la fibra di poliestere. È inoltre dovuto, in misura meno rilevante, alle emissioni generate dai processi termici per la trasformazione del petrolio e dei diversi idrocarburi.

ISOLANTI MINERALI: il loro impatto è invece determinato fondamentalmente dai processi termici per la lavorazione dei minerali, perché i processi produttivi ottenuti dalla combustione dei combustibili fossili in forni per la fusione e l'espansione della materia prima incidono sull'aumento delle emissioni di CO_2 nell'atmosfera.

Per il vetro cellulare è necessaria la fusione della materia prima e la successiva espansione (1000-1200°C); per le lane minerali è necessaria la fusione della materia prima a temperature molto elevate (1400°C per la lana di vetro, fino a 1600°C per la lana di roccia); per i materiali granulari espansi il processo di fusione raggiunge temperature che oscillano tra gli 850°C e i 1200. L'impatto di modesta entità dell'isolante in calce-cemento cellulare è dovuto non al processo termico di produzione (che non richiede elevate tempera-

ture) ma all'impatto determinato dalla realizzazione del cemento e della calce.

ISOLANTI VEGETALI E ANIMALI: il loro impatto è irrilevante. Per i pannelli in fibra di legno mineralizzata va segnalato l'impatto determinato dalla realizzazione del legante (magnesite o cemento Portland); l'industria del cemento ha in particolare un impatto elevatissimo, pari all'8-10% di quello totale.

Per i pannelli in fibra di legno si segnala l'impatto dovuto al bitume (sostanza di derivazione petrolchimica) come impermeabilizzante.

- **Acidificazione:** anche il fenomeno delle piogge acide è naturale ed essenziale: l'anidride solforosa (SO_2) reagisce con l'acqua contenuta nelle nuvole formando acido solforoso (H_2SO_3), che rende acida la pioggia. Le attività antropiche, e in particolare la combustione di combustibili fossili, hanno aumentato enormemente le emissioni di anidride solforosa (SO_2) e vari composti contenenti zolfo e azoto; questo ha determinato l'abbassamento del pH di laghi, foreste, suoli agricoli, con gravi conseguenze per gli organismi viventi.

- **Formazione di smog fotochimico:** la principale causa della formazione di smog fotochimico, le fitte nebbie tossiche presenti nelle aree urbanizzate, è la presenza di ozono nei bassi strati dell'atmosfera; benché nella stratosfera l'ozono protegga la vita, a livello del suolo è estremamente dannoso per la salute dell'uomo. A bassa quota l'ozono si forma grazie all'azione della radiazione solare sugli idrocarburi incombusti combinati con gli ossidi di azoto generati dalla combustione dei combustibili fossili (scarichi dei veicoli a motore, scarichi industriali).

ISOLANTI SINTETICI: impatto molto elevato. L'industria petrolchimica è responsabile della maggior quantità di emissioni di anidride solforosa e composti azotati.

ISOLANTI MINERALI: hanno impatto molto elevato i materiali ottenuti dal processo di fusione ad alta temperatura della materia prima (vetro cellulare, lane minerali); minore quello relativo ai materiali granulari espansi. Da segnalare l'impatto dell'isolante in calce-cemento cellulare (la produzione di cemento genera l'emissione di elevate quantità di anidride solforosa e protossido di azoto).

ISOLANTI VEGETALI E ANIMALI: modesto l'impatto dei pannelli in fibra di legno impermeabilizzati con bitume e dei pannelli in fibra di legno mineralizzata con cemento Portland e in misura minore con magnesite (per i quali è però significativo l'impatto determinato dalla realizzazione del legante). Gli altri materiali non presentano impatto significativo.

Insorgenza di disturbi negli addetti alla produzione. È un aspetto importante ma spesso trascurato, perché poco si viene a sapere di ciò

che avviene durante le fasi di trasformazione delle materie prime e del loro trasporto. L'esposizione a sostanze tossiche per gli addetti alla produzione si può notevolmente ridurre con l'introduzione di tecnologie avanzate, regolamenti di sicurezza e severe normative tese a proteggere la salute dei lavoratori. Questo avviene però generalmente solo nei paesi industrializzati; nei paesi emergenti, dove sono state trasferite molte produzioni, c'è una minore regolamentazione e i controlli sono meno efficaci.

ISOLANTI SINTETICI: il processo produttivo è estremamente lungo e complesso e consiste nella lavorazione di sostanze altamente tossiche. Comporta rischio di incendi ed esplosioni a causa delle sostanze altamente infiammabili e pericolo di insorgenza di disturbi (malattie della pelle, disturbi del sistema nervoso, epatotossicità, tumori) per gli addetti negli stabilimenti, dovuti a contatto o a inalazione delle sostanze altamente tossiche coinvolte nella produzione come stirolo, benzene, isocianati, fosgene, fenoli. Questo in particolare per la produzione dei materiali espansi e, in misura minore, per la fibra di poliestere.

Un altro aspetto problematico è il trasporto di queste sostanze ai luoghi di trasformazione: lo stirolo allo stato liquido e le miscele da espandere vengono immagazzinate in taniche e serbatoi e trasportate in cisterne su strada o su rotaia.

ISOLANTI MINERALI: l'impatto più elevato è quello legato alla produzione delle lane minerali, che presentano il problema del rilascio di polveri di fibra inalabili dagli addetti alla lavorazione. Quelle prodotte prima del 1995, caratterizzate da spessore pari a 1-20 micron e da elevata persistenza biologica nel corpo umano (periodo superiore a 40 giorni) sono fortemente sospettate di essere cancerogene. Le fibre prodotte dopo il 1995 sono state modificate, conferendo loro un sufficiente grado di "biodegradabilità" in modo da garantire una permanenza breve nell'organismo umano; queste vengono ufficialmente considerate non cancerogene.

La manipolazione delle fibre in fase produttiva è tutelata nei paesi occidentali da disposizioni per la sicurezza negli ambienti di lavoro. Malattie professionali tipiche di queste lavorazioni sono l'asbestosi (per esposizioni medio-alte) e il carcinoma polmonare (anche per esposizioni a basse dosi). Da tenere presente che le malattie dell'apparato respiratorio e delle membrane sierose determinate da fibre sottili si manifestano 10-40 anni dopo l'esposizione.

Di lieve entità è l'impatto relativo all'escavazione e alla produzione dei materiali granulari: l'emissione di polveri fini che può verificarsi risulta meno problematica rispetto alle lane minerali, in quanto sono polveri a struttura non fibrosa.

Una certa pericolosità per gli addetti alla produzione del vetro cellulare può verificarsi per effetto dell'idrogeno solforato sprigionato durante il processo di espansione.

ISOLANTI VEGETALI E ANIMALI: in genere non presentano situazioni particolarmente problematiche.

Può verificarsi il sollevamento di polveri e fibre fini, in particolare per legno, cellulosa, canapa, lino, lana di pecora, cocco e juta, ma è un problema di limitata entità.

3. LAVORAZIONE E MESSA IN OPERA

Nocività per maneggiamento o inalazione. Bisogna prestare molta attenzione a questa fase. Alcuni materiali isolanti, infatti, necessitano di speciali operazioni di messa in opera che possono richiedere l'utilizzo di sostanze pericolose per l'ambiente e per la salute degli addetti (collanti, additivi ecc.).

I responsabili della posa devono curare con la massima attenzione la prevenzione legata alla salute propria e degli utenti: leggere accuratamente le istruzioni relative alle modalità di applicazione, fare uso di guanti e mascherine protettive, favorire la ventilazione durante la manipolazione, il taglio e la lavorazione degli elementi, areare bene e a lungo gli ambienti anche al termine della posa.

ISOLANTI SINTETICI: la fase di posa non comporta rischi di carattere sanitario, a condizione che non vengano effettuati trattamenti a caldo, poiché l'elevata temperatura alla quale si sottopone il materiale può provocare lo sprigionamento di stirolo e altri prodotti di scomposizione (taglio con filo a caldo, trattamenti con fiamma). Fortemente nociva è l'applicazione di schiume poliuretaniche; vengono emessi isocianati liberi durante l'espansione in situ e nell'arco di alcune ore successive. Questo può causare irritazione alle mucose e problemi alle vie respiratorie.

ISOLANTI MINERALI: l'inalazione di microfibre cancerogene dovute alla manipolazione delle lane minerali può avvenire anche nella fase di messa in opera; anche se le esposizioni sono di molto inferiori rispetto ai luoghi di produzione, non sono da sottovalutare. Inoltre l'azione meccanica delle polveri di fibra (non cancerogene perché di maggior spessore) può causare irritazione a pelle e mucose. Per questo è necessario maneggiare il materiale protetti da guanti, mascherina e occhiali protettivi.

La lavorazione e messa in opera del vetro cellulare generalmente non comporta problemi; due aspetti critici da considerare sono, però, il taglio dei pannelli, in cui la distruzione delle celle chiuse causa la liberazione dell'idrogeno solforato imprigionato nel processo di espansione, e la posa a caldo con collanti bituminosi.

La messa in opera dei materiali granulari non genera emissioni gassose per via della superficie sinterizzata. In presenza di granuli di minute dimensioni può verificarsi un eccessivo sviluppo di polveri.

Per quanto riguarda l'isolante in calce-cemento cellulare è da segnalare la possibile generazione di polveri durante il taglio dei pannelli e l'applicazione con collanti che possono rilasciare sostanze nocive.

ISOLANTI VEGETALI E ANIMALI: non si evidenziano aspetti di particolare pericolosità.

Nondimeno è da segnalare il possibile sollevamento di polveri e fibre fini durante la messa in opera di materiali sfusi (fiocchi di cellulosa, lino, lana di pecora e legno mineralizzato) e nel taglio di pannelli e materassini (legno, cellulosa, canapa, kenaf, lino, lana di pecora, cocco e juta).

I pannelli applicati con collanti possono rilasciare so-

stanze tossiche (sughero, fibra di legno).

Inoltre, per alcuni materiali non è da escludere la presenza di residui di insetticidi e antiparassitari utilizzati in coltivazioni e allevamenti intensivi (lino, canapa, lana di pecora), di trattamenti preservanti per proteggere il materiale nei lunghi trasporti (cocco e juta).

4. ESERCIZIO

Emissioni nocive. La questione riguardante l'emissione di sostanze tossiche, a breve o a lungo termine, durante la fase di vita utile del materiale all'interno dell'involucro edilizio è molto problematica.

ISOLANTI SINTETICI: per quanto riguarda i materiali espansi, nei primi mesi successivi alla posa possono venir rilasciati nell'ambiente interno composti organici; in seguito i valori scendono a un livello contenuto, tale da non causare danno alla salute. Per tutti i sintetici è necessario ricordare il pericolo, in caso di incendio, di emissioni altamente tossiche (monossido e biossido di carbonio, stirolo, benzene, fenoli, acido cianidrico, isocianati, fumi densi e opachi).

ISOLANTI MINERALI: le lane minerali vengono realizzate utilizzando collanti e resine fenoliche o melamminiche che possono rilasciare fenolo e formaldeide negli ambienti se applicate in interno; le emissioni sono di minore entità ma comunque rilevanti se applicate in intercapedine.

La presenza di formaldeide è più accentuata quanto più la lana si presenta di colore giallo.

Il vetro cellulare, l'isolante in calce-cemento cellulare applicati a secco e i materiali granulari non trattati o additivati non presentano problemi durante la fase di esercizio. Problemi potrebbero insorgere per i materiali granulari bitumati e i pannelli di vetro cellulare incollati con bitume, che se applicati in ambiente interno potrebbero rilasciare sostanze tossiche (come il benzopirene, potenzialmente cancerogeno).

Tutti i materiali di origine minerale, inoltre, possono essere caratterizzati da una modesta radioattività naturale, dovuta al loro contenuto variabile di radon e di altri elementi radioattivi. Lana di vetro, vetro cellulare e isolante in calce-cemento cellulare evidenziano i valori più bassi; lana di roccia e materiali granulari di origine vulcanica (pomice naturale, vermiculite e perlite espansa) evidenziano di solito valori maggiori. L'emanazione di radioattività è legata principalmente alla concentrazione di radioelementi nei materiali, ma anche allo stato di aggregazione, alla granulometria e alla porosità degli stessi.

L'inquinamento radioattivo da parte dei materiali isolanti appare, comunque, poco significativo in quanto la loro presenza all'interno della massa dell'edificio può variare dallo 0,1 all'1% e la loro applicazione avviene per lo più in situazioni esterne o confinate.

ISOLANTI VEGETALI E ANIMALI: i pannelli bitumati o applicati con collanti in ambienti interni possono rilasciare sostanze tossiche (sughero, fibra di legno) anche nella fase di esercizio.

5. DISMISSIONE

Perdita di risorse naturali parziale o totale.

Alla fine della vita utile del materiale si presentano quattro possibilità: il riutilizzo, il recupero, il riciclaggio e l'eliminazione.

Le prime due possibilità non causano perdita di risorse; il riciclaggio può causare una parziale perdita di risorse; l'eliminazione ne determina una perdita totale (è anche vero, però, che se un materiale si biodegrada si trasforma in compost e torna alla terra; in questo caso torna a essere una risorsa).

Entrando più nel dettaglio, è possibile distinguere:

- **riutilizzo:** il materiale, se integro e intatto, viene reimpiegato per lo stesso scopo dopo un trattamento di pulizia;
 - **recupero:** il materiale, integro e intatto, viene impiegato per uno scopo diverso; anche in questo caso, senza subire particolari trattamenti se non quello della pulizia. Materiali applicati mediante incollaggio non possono essere smontati senza danneggiamento, dunque non possono essere riutilizzati e recuperati; lo stesso vale per i materiali granulari impastati con leganti. In generale l'elevato costo della manodopera rende antieconomico il riutilizzo e il recupero, se non per componenti studiati allo scopo;
 - **riciclaggio:** il materiale viene reinserito nel ciclo produttivo come nuova materia prima; lo stesso può avvenire per i cascami della produzione. Per poter essere riciclati, i materiali edili devono subire pretrattamenti più o meno complessi, che vanno dalla semplice frantumazione dei materiali minerali al trattamento chimico-fisico per i materiali plastici, con conseguente consumo di energia.
- Nell'edilizia la quota di riciclaggio è solo del 40% circa, poiché l'eterogeneità dei componenti rende estremamente difficile la separazione e la rielaborazione dei materiali;
- **eliminazione:** i materiali biodegradabili, totalmente vegetali o animali, possono essere convogliati ai siti di compostaggio dove avviene la decomposizione a opera di microrganismi presenti in natura e la reintegrazione della materia prima nell'ecosistema; altrimenti possono venir bruciati. I materiali non biodegradabili di origine totalmente minerale possono essere depositati in discariche ordinarie o per scarti di materiali da costruzione; quelli di origine sintetica, la cui biodegradabilità richiede tempi estremamente lunghi, devono essere smaltiti come ri-

futi speciali o inviati all'incenerimento, processo fortemente problematico per l'inquinamento che genera.

I materiali misti, che accoppiano vegetale-sintetico o minerale-sintetico al fine di migliorare alcune prestazioni e che trovano oggi ampia diffusione, sono e saranno difficilmente smaltibili poiché non si potranno compostare né convogliare in centri di riciclaggio per materiali sintetici; la combustione per recupero di energia è problematica per la presenza della fibra sintetica.

Consumo di energia. La fase di dismissione può comportare un considerevole dispendio di energia, utilizzata per la maggior parte nei processi di riciclaggio, e in misura minore per il funzionamento dei macchinari adibiti al prelevamento e deposito in discarica dei materiali.

Inquinamento. La fase di dismissione, e in particolare quella del riciclaggio, possono essere causa di inquinamento anche significativo. Riciclare un prodotto, infatti, non significa necessariamente ottenere materiali a basso impatto ambientale, in particolare per quanto riguarda i materiali plastici.

In questi anni si è praticata soprattutto la strada del cosiddetto "riciclaggio termico", ossia la combustione dei rifiuti plastici negli inceneritori per produrre energia termica. Questa soluzione presenta però alcune controindicazioni:

- la plastica non viene valorizzata come importante fonte di carbonio;
- il potere calorifico del materiale viene così utilizzato una sola volta, come avviene per il petrolio, e tutta l'energia impiegata nella fabbricazione del prodotto finale va così perduta;
- la combustione delle materie plastiche genera emissioni fortemente inquinanti.

È possibile lavorare nuovamente le materie plastiche per ottenere nuovi prodotti d'alto valore, cosa però ancora poco realizzata nel concreto.

Da segnalare l'utilizzo del PET da riciclo come materia prima innovativa che trova in campo industriale innumerevoli usi, tra cui anche quello in edilizia. Dalla lavorazione delle bottiglie in plastica post consumo si ottengono, infatti, scaglie in PET di elevata qualità che vengono utilizzate, in alternativa al polimero vergine, per la produzione di pannelli in fibra di poliestere.

Si dovrebbe comunque considerare che il pos-

sibile riutilizzo prima – e il riciclaggio poi – terminano inevitabilmente, dopo un numero definito di cicli energetici, con la produzione di rifiuti, quale ultimo passaggio del processo di degradazione e perdita di qualità dell'energia.

Inoltre il principio del riciclaggio presuppone l'esistenza e la disponibilità di rifiuti; divenendo un vero e proprio business, può portare alla giustificazione di una sempre maggior produzione di rifiuti e di un consumo inconsapevole di risorse preziose.

Un aspetto importante da considerare è la durata di vita del materiale: una scarsa durabilità comporta, oltre alla perdita di prestazione del materiale, la necessità di manutenzione e l'eventuale sostituzione dello stesso; un materiale ad elevata durabilità, oltre a mantenere inalterato nel tempo il proprio comportamento prestazionale, permette di ridurre la presenza di rifiuti da smaltire.

Degrado del territorio. La creazione di discariche e di impianti di incenerimento deturpa fortemente il territorio e sarà sempre più difficile trovare aree da adibire a tali funzioni.

ISOLANTI SINTETICI: se correttamente applicati, possono avere una durata di vita che va dai 30 ai 50 anni. Il riutilizzo è possibile se il materiale non è accoppiato, incollato o sporco.

Il riciclaggio per fusione è possibile per il polistirene espanso sinterizzato ed estruso (polimero termoplastico che può essere nuovamente fuso e formato) ma di fatto avviene solo in pochi casi; il poliuretano, polimero termoindurente, non può più essere fuso. Possono essere riciclati, dopo granulazione, come materiale di riempimento o per agglomerati.

L'incenerimento consente notevoli recuperi energetici, ma la combustione deve avvenire a temperature molto elevate per limitare le inevitabili emissioni di composti tossici incombusti (diossine, furani, acido cianidrico).

La fibra di poliestere, in buona parte già proveniente da poliestere riciclato, è riciclabile al 100%.

ISOLANTI MINERALI: il maggior impatto è quello relativo alle lane minerali. Il riutilizzo è teoricamente possibile, a condizione che il materiale sia in buono stato di conservazione (non imbrattato, danneggiato, impregnato di umidità); di fatto viene poco praticato poiché quasi tutte le lane minerali prodotte prima del 1995 sono fortemente sospette di essere cancerogene. Questo rende difficile anche il riciclaggio; alcuni produttori (in Svizzera) reinseriscono il materiale smontato nel ciclo produttivo. Le lane minerali non sono compostabili né combustibili; possono solo essere depositate in discarica.

Minore è l'impatto del vetro cellulare e dell'isolante in calce-cemento cellulare, poiché hanno una durata di vita estremamente lunga. Se montati a secco possono essere riutilizzati e riciclati per frantumazione nella realizzazione di rilevati stradali o riporti, in sostituzione della sabbia; non è possibile il riciclaggio

per recupero di energia perché incombustibili; possono essere depositati in discarica. La problematicità riguarda i prodotti applicati con bitume spalmato e collanti sintetici.

I materiali granulari non presentano impatti significativi, ad eccezione dei prodotti trattati con bitume.

ISOLANTI VEGETALI E ANIMALI: da segnalare l'impatto relativo ai pannelli di fibra di legno mineralizzata, poiché la presenza del legante rende impossibile la combustione per recupero di energia e difficile la riciclabilità; una forma possibile di riciclo è l'utilizzo come inerte per calcestruzzo dopo frantumazione. Problematici sono i materiali trattati con bitume o applicati mediante colle e adesivi (sughero, fibra di legno).

Rilevante il problema dei materiali misti realizzati mediante aggiunta di fibra sintetica, perché non sono compostabili e devono essere bruciati (inquinamento dovuto alla combustione della componente sintetica, seppur in poca quantità) o portati in apposita discarica.

I trattamenti ignifuganti e antiparassitari (sali di boro, soda, sostanze a base di urea per la lana di pecora) rendono critico il compostaggio e lo smaltimento in discarica per le conseguenti lisciviazioni nel terreno.

LA TABELLA DEGLI IMPATTI

Al fine di consentire un immediato confronto, gli impatti che i materiali isolanti hanno a seconda dei diversi fattori di rischio relativi al loro ciclo di vita sono stati inseriti in una tabella riassuntiva, per la compilazione della quale si è fatto riferimento al testo *Green Building Handbook* (Aa.Vv., Spon Press, London, 2001, vol.1). È stata però ampliata la panoramica dei materiali presi in esame e data una diversa e più completa valutazione degli impatti, frutto dell'approfondito studio del materiale disponibile in letteratura e della documentazione fornita direttamente dalle aziende produttrici.

Per semplicità di presentazione, le fasi del ciclo di vita sono state ridotte a quattro (approvvigionamento, produzione, uso e dismissione) accorpando nella terza fase lavorazione messa in opera ed esercizio.

I diversi impatti sono stati valutati da un punto di vista qualitativo; ogni impatto viene evidenziato da un pallino, la cui grandezza è proporzionale all'entità dell'impatto stesso ed è vista in relazione all'impatto degli altri materiali.

La scala di valutazione degli impatti va da 0 a 6 ed è rappresentata dai simboli riportati in legenda.

Non è stato assegnato un particolare peso ai diversi impatti, poiché questo è un problema non solo scientifico, ma anche politico; la grandezza del pallino è un modo semplice e pratico per leggere la tabella.

TABELLA DEGLI IMPATTI		approvvigionamento		produzione						uso		dismissione
		consumo di risorse rinnovabili	consumo di risorse non rinnovabili	consumo di energia	riduzione ozono	effetto serra	acidificazione	smog fotochimico	rischi per gli addetti alla produzione	nocività nella messa in opera	nocività in esercizio	riuso / riciclo / smaltimento
origine vegetale	fibra di cellulosa - pannelli		●	●						●		●
	fibra cellulosa - fiocchi									●		
	sughero espanso - pannelli	●		●						●	●	●
	sughero granulare	●										
	fibra di legno			●						●		
	fibra di legno - con bitume		●	●		●	●	●		●	●	●
	fibra di legno mineralizzata		●	●		●	●	●		●		●
	canapa, kenaf		●	●						●		●
	lino, mais									●		
	cocco, juta									●		
	canna palustre											
origine animale	lana di pecora		●	●						●		●
origine minerale	pomice naturale		●						●	●		
	minerali granulari espansi		●	●		●	●	●	●	●	●	
	calce-cemento cellulare		●	●		●	●	●		●	●	●
	vetro cellulare		●	●		●	●	●	●	●	●	●
	lane minerali		●	●		●	●	●	●	●	●	●
origine sintetica	fibra di poliestere		●	●		●	●	●	●	●	●	
	fibra di poliestere da riciclo		●	●		●	●	●		●	●	
	polistirene espanso sinterizzato (EPS)		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	polistirene espanso estruso (XPS)		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	poliuretano espanso (PUR)		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	polietilene espanso		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

LEGENDA

- nessun impatto significativo
- impatto molto elevato
- impatto lieve
- impatto elevatissimo
- impatto modesto
-
- impatto elevato

L'ENERGIA INGLOBATA NEI MATERIALI

Con il termine energia inglobata, o energia primaria, si intende il quantitativo di energia utilizzata per la realizzazione di un dato materiale o prodotto finito. Esso è dato dalla somma delle quote di energia spese per:

- l'approvvigionamento delle materie prime;
- il trasporto delle materie prime al luogo di produzione;
- il processo produttivo per la realizzazione del materiale;
- il trasporto e la distribuzione del materiale fino al luogo in cui verrà messo in opera.

Per poter fare un bilancio complessivo, il valore dell'energia inglobata deve essere confrontato con l'energia di esercizio e con l'energia di dismissione.

Per un materiale isolante il valore dell'energia inglobata è di molto inferiore alla quantità di energia che permette di risparmiare durante la fase di esercizio; come è già stato detto, infatti, la maggior parte dell'energia utilizzata nel settore delle costruzioni è quella relativa alla climatizzazione degli edifici. Se pensiamo al fatto che un materiale isolante consentirà di risparmiare molta più energia durante la sua vita di quella che è stata consumata per la sua produzione, allora la valutazione dell'energia inglobata può sembrare relativamente insignificante. Ma tra due materiali con analogo potere isolante e confrontabili caratteristiche prestazionali, quello caratterizzato da un più basso valore di energia inglobata sarà preferibile dal punto di vista ambientale.

Il calcolo quantitativo dell'energia inglobata costituisce uno degli elementi caratterizzanti l'analisi del ciclo di vita di un materiale e permette di dare una valutazione di impatto importante. Qualitativamente possiamo infatti intuire che il consumo di energia è direttamente proporzionale all'impatto sull'ambiente, poiché maggiore è l'energia consumata, maggiori sono le emissioni di sostanze inquinanti emesse nell'aria o riversate nell'acqua o nel suolo. La valutazione è però parziale, poiché il valore numerico riferito all'energia non può dare un'indicazione quantitativa delle conseguenti emissioni.

Quello dell'energia inglobata è un tema molto discusso. Al momento attuale se ne riconosce la priorità ma non c'è ancora un metodo di calcolo unico riconosciuto a livello internazio-

nale; ricercatori ed esperti sono restii a divulgare dati e cifre al riguardo, spesso sono in disaccordo sul quantitativo di energia da considerare per le varie fasi, altrettanto spesso non è chiaro a quali fasi si riferisca nel dettaglio il valore indicato.

Fino a quando gli enti di ricerca e gli organismi competenti a livello internazionale non riconosceranno l'estrema importanza di promuovere e sostenere la ricerca, il progresso in questo campo sarà lento e l'informazione per gli utenti finali difficilmente accessibile.

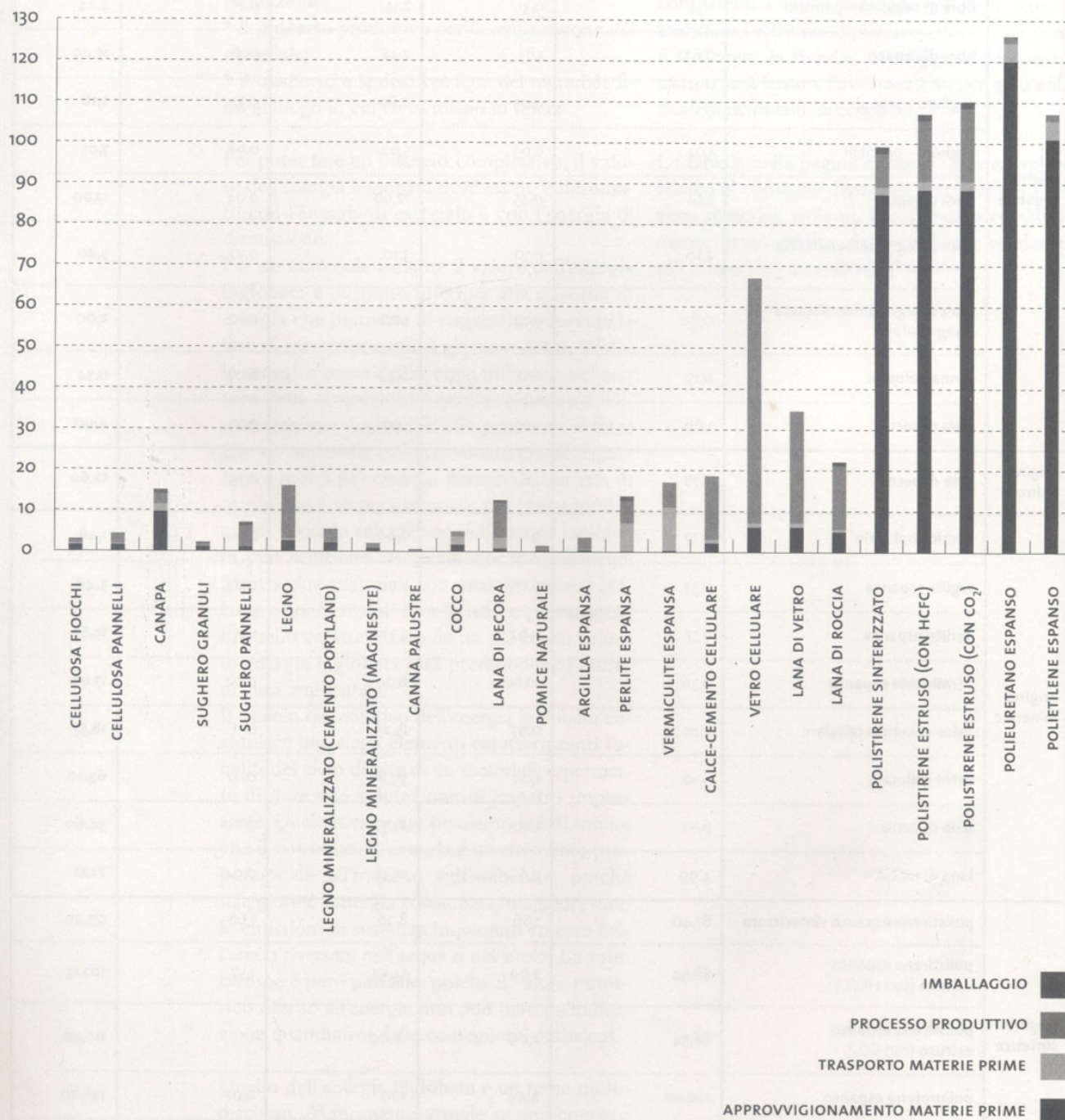
La tabella nella pagina a fianco riporta i valori relativi al consumo di energia primaria per i diversi materiali isolanti, rielaborati successivamente in un grafico riassuntivo per renderne più immediato il confronto.

CONSUMO DI ENERGIA PRIMARIA (MJ/kg)

MATERIALI ISOLANTI		reperimento materie prime		processo produttivo	imballaggio	consumo totale
		approvvigionamento	trasporto			
origine vegetale	fibra di cellulosa - fiocchi	1,54	0,31	0,84	0,25	2,94
	fibra di cellulosa - pannelli	1,54	0,31	2,14	0,25	4,24
	fibra di canapa	9,63	1,83	2,48	1,06	15,00
	sughero - granuli	1,02	0,03	0,80	0,31	2,16
	sughero - pannelli	1,02	0,03	5,02	0,98	7,05
	fibra di legno	2,61	0,45	12,90	0,04	17,00
	fibra di legno mineralizzata (cemento Portland)	2,10	0,10	3,10	0,10	5,40
	fibra di legno mineralizzata (magnesite)	0,80	0,10	1,00	0,10	2,00
	canna palustre	0,15	0,12	0,20	0,07	0,54
	fibra di cocco	1,66	2,05	1,09	0,10	4,90
origine animale	lana di pecora	0,78	2,64	8,45	0,73	12,60
origine minerale	pomice naturale	0,37	0,17	0,90	0,04	1,48
	argilla espansa	0,37	0,17	2,90	0,04	3,48
	perlite espansa	0,17	6,92	5,37	1,14	13,62
	vermiculite espansa	0,36	10,60	6,00	0,04	17,00
	calce-cemento cellulare	2,20	0,97	15,29	0,11	18,57
	vetro cellulare	6,10	1,00	59,89	0,01	67,00
	lana di vetro	6,10	1,00	27,50	0,00	34,60
	lana di roccia	4,99	0,63	15,56	0,94	22,12
origine sintetica	polistirene espanso sinterizzato	87,40	1,86	8,26	1,68	99,20
	polistirene espanso estruso (con HCFC)	88,54	2,09	14,95	1,57	107,15
	polistirene espanso estruso (con CO ₂)	88,54	2,09	18,00	1,57	110,20
	poliuretano espanso	120,00	4,49	1,70	0,01	126,20
	polietilene espanso	101,00	4,49	1,70	0,01	107,20

Fonte dati: Beck K. (1999); König H., Müller P. (2000); Mötzl H., Zelger T. (2000)

CONSUMO DI ENERGIA PRIMARIA (MJ/kg)



CONFRONTO TRA LE PRINCIPALI CARATTERISTICHE TECNICHE DEI MATERIALI ISOLANTI

MATERIALI ISOLANTI		λ conducibilità termica (W/mK) (1)	C calore specifico (kJ/kgK) (2)	μ fattore di resistenza alla diffusione del vapore
origine vegetale	fibra di cellulosa fiocchi	0,040	1,9	1-5
	fibra di cellulosa pannelli	0,039		
	fibra di cellulosa granuli sfusi	0,069		
	fibra di legno	0,042	2,1	5-10
	fibra di legno mineralizzata	0,095	2	5-10
	fibra di canapa	0,040	1,7	1-5
	fibra di kenaf	0,039	1,7	1-5
	fibra di lino	0,040	1,6	1-5
	fibra di mais	0,040	1,9	1-5
	canna palustre	0,050	1,3	1-5
	sughero pannelli	0,041	1,85	5-10
	sughero granuli sfusi	0,040		
	sughero granuli impastati	0,048-0,10		
	fibra di cocco	0,045	1,45	1-5
origine animale	lana di pecora	0,040	1,7	1-5
origine minerale	perlite espansa pannelli	0,055	0,9	1-10
	perlite espansa sfusa	0,051		
	perlite espansa impastata	0,094-0,15		
	vermiculite espansa sfusa	0,067	0,8	5-10
	vermiculite espansa impastata	0,084-0,095		
	argilla espansa sfusa	0,11	0,9	5-10
	argilla espansa impastata	0,16-0,31		
	vetro granulare espanso sfuso	0,075	0,85	5-10
	pomice sfusa	0,10	0,9	1-5
	pomice impastata	0,16-0,21		
	calce-cemento cellulare pannelli	0,045	1	5-10
	calce-cemento cellulare granuli sfusi	0,12		
	calce-cemento cellulare granuli impastati	0,15-0,18		
	vetro cellulare	0,040	0,85	1000
	lana di vetro	0,040	0,8	1-5
	lana di roccia			
origine sintetica	fibra di poliestere	0,040	0,24	1-5
	polistirene espanso sinterizzato (EPS)	0,040	1,4	20-80
	polistirene espanso estruso (XPS)	0,035	1,45	80-300
	poliuretano espanso (PUR)	0,030	1,3	30-100
	polietilene espanso	0,040	1,2	2000

(1) Pannelli: il valore si riferisce a pannelli standard per isolamento termico e acustico ed è medio tra quelli dichiarati dalle aziende e confrontato con i valori disponibili in letteratura. Granuli applicati sfusi: valore medio tra quelli dichiarati dalle aziende e confrontato con i valori disponibili in letteratura.

Granuli applicati impastati: l'intervallo di valori è determinato dalla variabile quantità di legante utilizzato nell'impasto.

(2) Valore medio tra quelli dichiarati dalle aziende e confrontato con i valori disponibili in letteratura.