

# **Materiali per l'isolamento termico degli edifici**

Alessandro Fraleoni Morgera  
afraleoni@units.it

A.A. 2017-2018

# Perché isolare termicamente un edificio?

Gli edifici utilizzano ca. il 33% dell'energia consumata nel mondo, e generano ca. il 35% dei gas serra (dati 2016 IEA).

Il tasso di rimpiazzo degli edifici in Europa è molto basso (1-2% all'anno), e se si vuole rapidamente abbattere la quantità di energia consumata occorre lavorare sull'efficientamento energetico degli edifici esistenti.

Inoltre dal punto di vista economico di chi abita in un palazzo da efficientare l'intervento può essere molto vantaggioso.

BEFORE	AFTER
	
<b>BUILDING DATA</b> Type of building: Residential Building Year of construction: 1975 Total m <sup>2</sup> : 4.000 Location: North Italy Energy use before renovation*: 130 kWh/m <sup>2</sup> year Technologies used: Thermal Insulation system on the external walls	Investment: 50 €/m <sup>2</sup> Energy use after renovation*: 23 kWh/m <sup>2</sup> year Payback time: 6 years Energy savings (year) : 9,50 €/m <sup>2</sup> Energy savings: 80%

# Il lato macroeconomico dell'efficiamento energetico

Il settore europeo delle costruzioni vale circa 1.2 T€/anno (1.200 Mld€/anno), contribuisce per quasi il 10% al PIL continentale e fornisce lavoro a quasi 15 milioni di persone, impiegate in più di 3 milioni di aziende, nonché a quasi 50 milioni di persone nell'indotto (dati 2011).

L'investimento stimato per realizzare un grado cospicuo di efficientamento energetico in Europa da qui al 2050 è stimato in circa 12 T€ (12.000 miliardi di euro).



# Utilità dell'isolamento termico per l'utente

I vantaggi dell'isolamento termico di un edificio per l'utente sono:

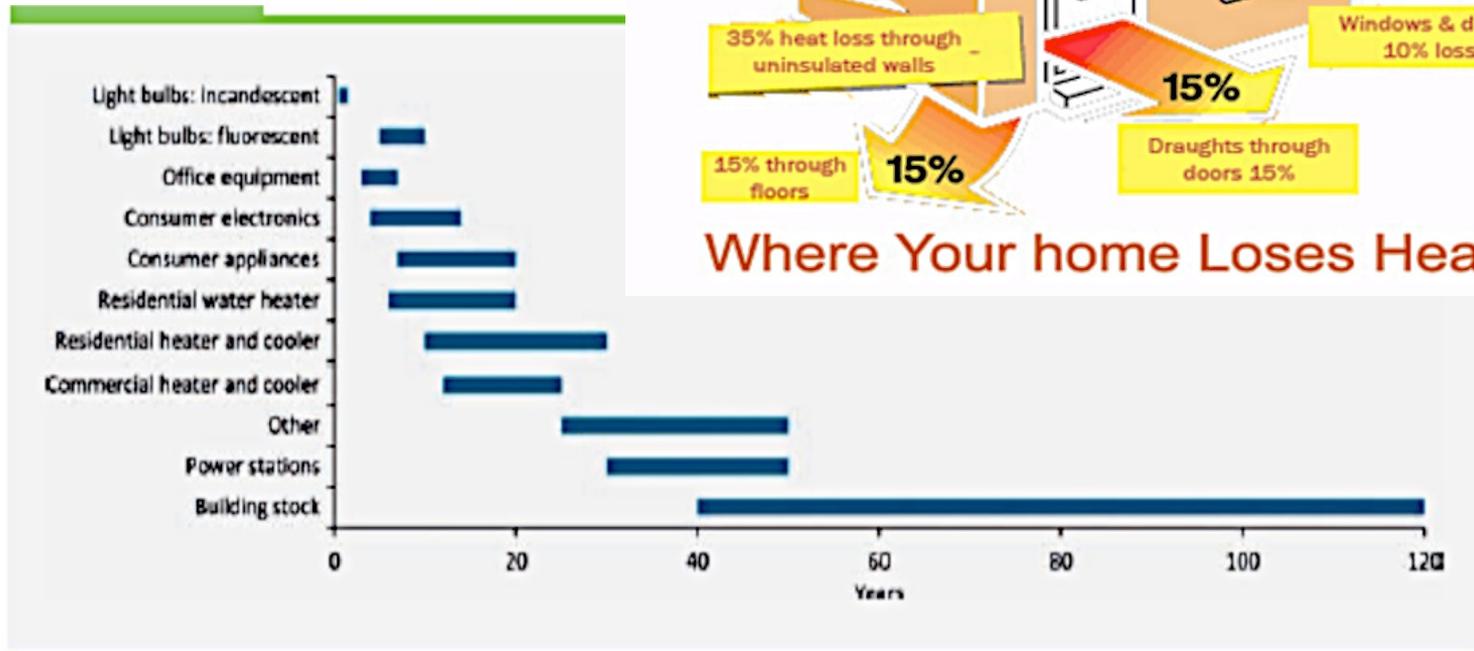
1. **Comfort:** minori sbalzi di temperatura in casa
2. **Risparmio energetico:** i minori costi energetici permettono un più alto tenore di vita.
3. **Migliori condizioni di conservazione degli edifici:** i minori sbalzi termici allungano la vita delle varie parti dell'edificio, e impediscono la formazione di condensa, muffe, ecc.. A sua volta, questo permette di preservare al meglio il valore di mercato dell'edificio.
4. **Migliore capacità di utilizzo dell'acqua:** le gelate non creano problemi al circuito di distribuzione dell'acqua, e il calore dell'acqua calda non viene disperso.

# Punti termicamente critici degli edifici

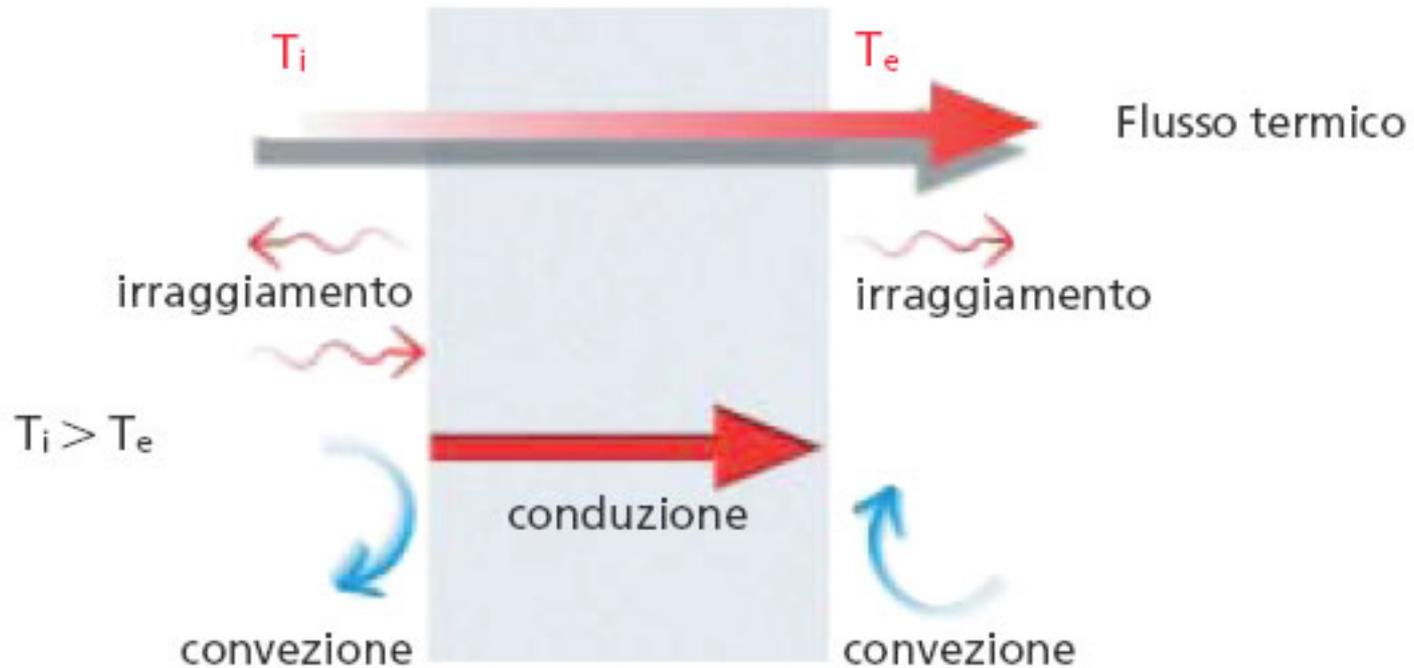
Su quale parte degli edifici conviene lavorare in prima istanza?

Considerazioni su:

- caratteristiche termiche dei materiali che compongono l'edificio
- durata dei componenti dell'edificio.



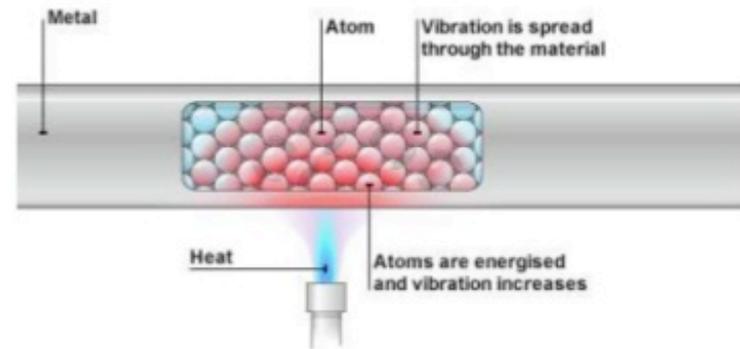
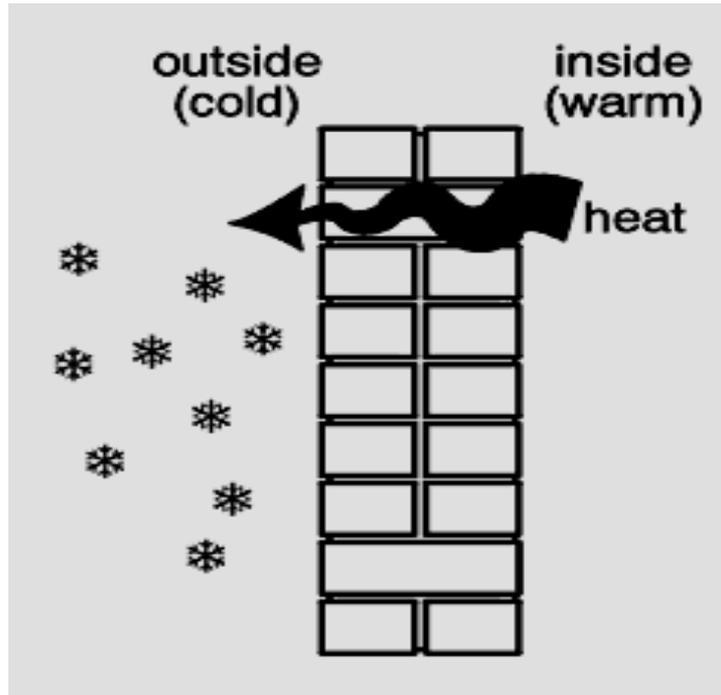
# Modalità di trasporto del calore



Il calore viene trasportato per:

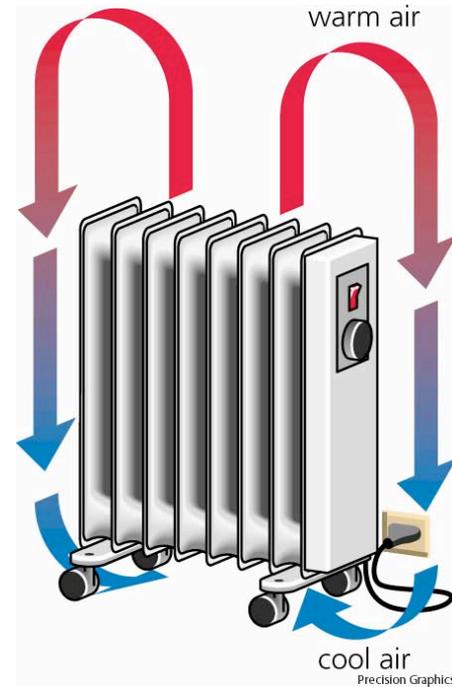
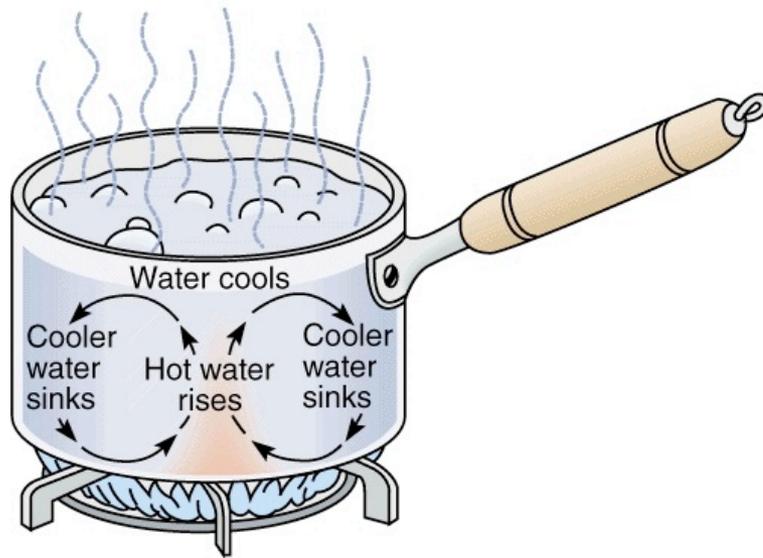
- conduzione
- convezione
- irraggiamento

# Trasporto per conduzione



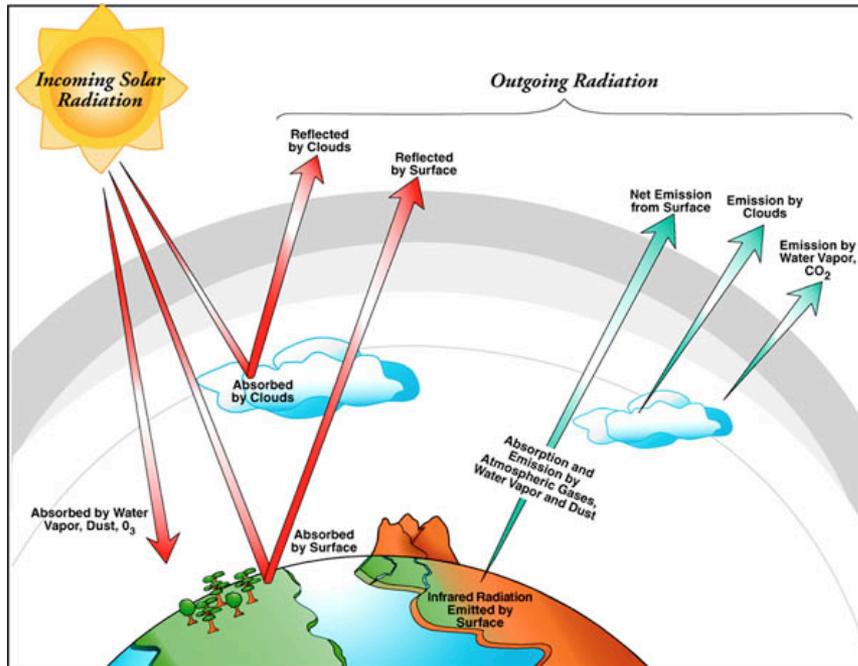
La conduzione di calore avviene attraverso il passaggio di energia cinetica tra molecole vicine che si urtano, e si trasferiscono così energia.

# Trasporto per convezione



Nella convezione il calore viene trasportato dalle molecole di liquido o gas che si muovono lungo percorsi circolari: quando il fluido è caldo (alta energia cinetica) tende ad andare verso l'alto, sfuggendo alla forza di gravità; quando è freddo tende a riscendere. In questo modo le molecole "calde" trasportano la loro energia cinetica per lunghi tratti prima di urtarne altre e cederla definitivamente.

# Trasporto per irraggiamento



Nel trasporto per irraggiamento il calore viene veicolato attraverso radiazione elettromagnetica (nello spettro infrarosso). Questa radiazione interagisce con i legami covalenti delle molecole, eccitandone la vibrazione e causandone così il “riscaldamento”.

# Alcune definizioni tecniche - I

## Conduktività (o conducibilità) termica ( $\lambda$ o $k$ )

E' tecnicamente definita come rapporto tra il flusso di calore (cioè la quantità di calore trasferita nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie) e il gradiente di temperatura stabilito per sola conduzione termica (trascurando i contributi di convezione e irraggiamento) tra due superfici del materiale considerato.

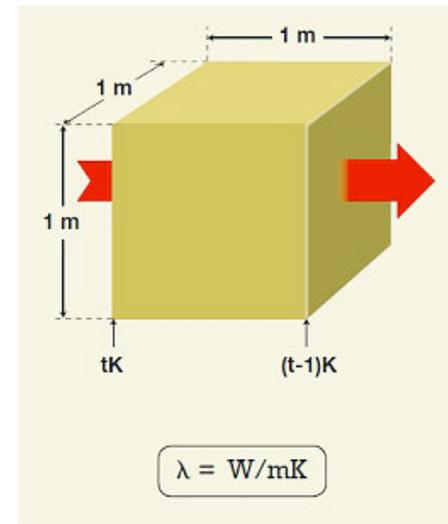
$$\lambda = \frac{\vec{q}}{\nabla T} \quad \text{con } q = \text{vettore di flusso termico,} \\ \nabla T = \text{gradiente di temperatura.}$$

Sperimentalmente si determina come ammontare di calore che passa attraverso l'unità di area del materiale ed uno spessore unitario quando la differenza di temperatura alle due estremità è di 1 K.

$$\lambda = q \frac{L}{\Delta T}$$

Unità di misura: W/m•K (SI);  
(Btu•ln)/(h•ft<sup>2</sup>•°F) (sistema anglosassone)

La *conducibilità termica* è quindi una *proprietà intrinseca* del materiale.  
Più è basso il valore di  $k$  ( $\lambda$ ), migliore è l'isolamento termico esercitato dal materiale.



# Alcune definizioni tecniche - II

## Conduttanza termica (C, o c, o G, o K) e Resistenza Termica (R)

Il termine “conduttanza termica” identifica la quantità di calore che passa nell’unità di tempo attraverso un dato spessore di materiale (L) quando tra le due superfici esiste un gradiente di temperatura. Lo scambio termico è considerato avvenire unicamente per via conduttiva all’interno del solido (o dei solidi) in esame tra due superfici parallele (convezione e irraggiamento trascurati).

$$C = \frac{q}{\Delta T} = \frac{1}{R} = \frac{\lambda}{L} \quad \text{con } q = \text{quantità di calore trasmesso nell’unità di tempo (flusso termico), } R = \text{resistenza termica}$$

Unità di misura: W/m<sup>2</sup>•K (SI); (Btu)/(h•ft<sup>2</sup>•°F) (sistema anglosassone)

E’ una definizione importata dagli standard ASTM ed è ad oggi quella di riferimento per il settore dell’isolamento termico nelle costruzioni.

La *conduttanza termica* è una proprietà *legata alla forma (spessore) del materiale* che si sta considerando, e non intrinseca allo stesso.

La **Resistenza termica** è l’inverso della Conduttanza termica, ovvero

$$R = 1/C = L/k$$

Unità di misura: m<sup>2</sup>•K/W (SI)

# Alcune definizioni tecniche - III

## Trasmittanza termica (U, o u)

*Flusso di calore che attraversa una superficie di 1 m<sup>2</sup> sottoposta ad un gradiente di temperatura  $\Delta T$  lungo uno spessore. E' simile alla conduttanza perché anch'essa dipende dallo spessore del materiale considerato, e ha quindi le stesse unità di misura. Diversamente da C, U (c.d. U-value) include nel computo il calore trasferito per via convettiva e per irraggiamento.*

$$U = q / (A \Delta T)$$

*Unità di misura: W/m<sup>2</sup>K (SI).*

La *trasmittanza termica* è una proprietà di trasporto del calore *legata alla somma dei materiali* che si stanno considerando. Per questo è spesso espressa come inverso della sommatoria delle resistenze termiche di una struttura complessa:

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

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

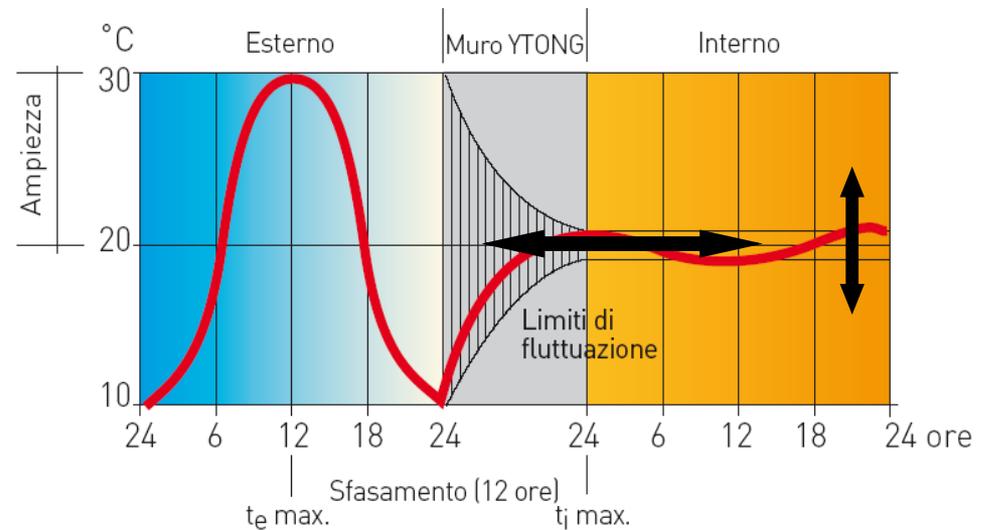
# Inerzia termica (I)

L'inerzia termica è importante nel considerare le possibili opzioni in termini di materiali per l'isolamento:

- effetto di **smorzamento** dell'ampiezza dell'onda termica esterna:
- effetto di **sfasamento** dell'onda termica (ritardo tra l'impatto dell'onda termica sulla superficie esterna del muro ed il suo apparire, con intensità smorzata, sulla faccia interna del muro stesso).

L'inerzia termica dipende dalla massa del corpo considerato, dal suo calore specifico e dalla natura stessa del materiale.

Materiali ad alto calore specifico, a parità di massa, hanno inerzia termica più elevata.



# Inerzia termica (II)

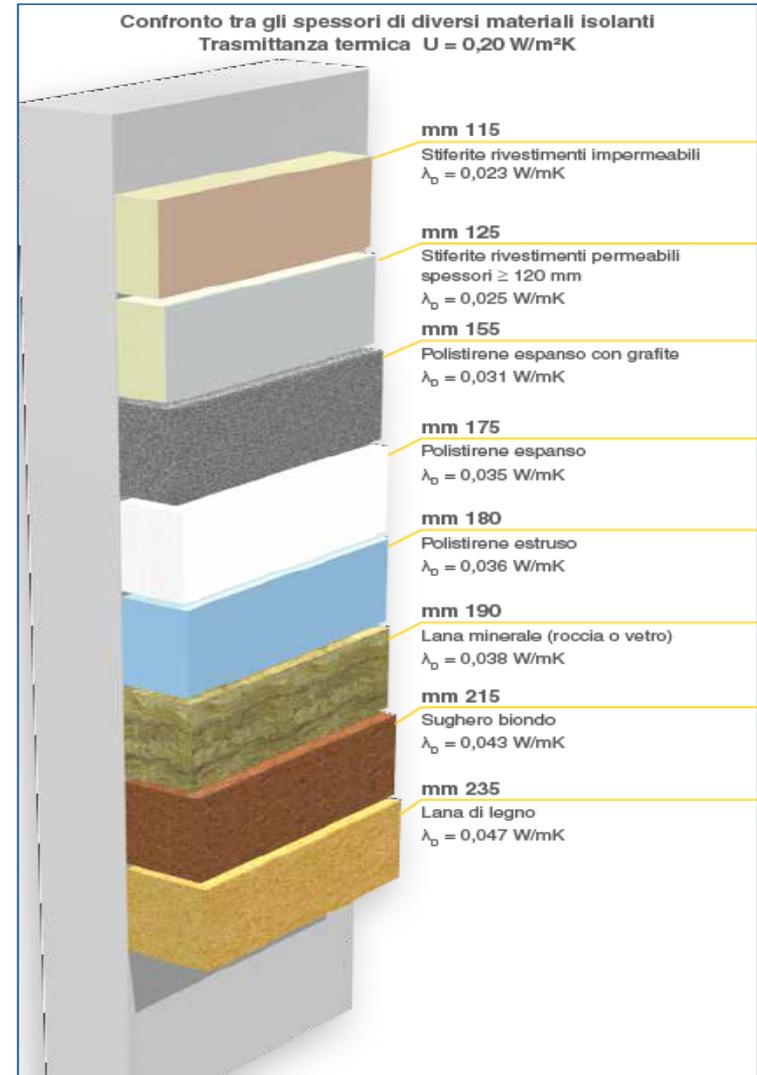
L'andamento dei calori specifici dei materiali va visto con attenzione.

Substance	Phase	Isobaric mass heat capacity $C_p$ $J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$	Isobaric molar heat capacity $C_{P,m}$ $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$	Isochore molar heat capacity $C_{V,m}$ $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$	Isobaric volumetric heat capacity $C_{P,v}$ $J \cdot cm^{-3} \cdot K^{-1}$	Isochore atom-molar heat capacity in units of R $C_{V,am}$ atom-mol <sup>-1</sup>
Air (Sea level, dry, 0 °C (273.15 K))	gas	1.0035	29.07	20.7643	0.001297	~ 1.25 R
Air (typical room conditions <sup>A</sup> )	gas	1.012	29.19	20.85	0.00121	~ 1.25 R
Aluminium	solid	0.897	24.2		2.422	2.91 R
Ammonia	liquid	4.700	<b>80.08</b>		3.263	3.21 R
Animal tissue (incl. human) <sup>[30]</sup>	mixed	<b>3.5</b>			3.7*	
Antimony	solid	0.207	25.2		1.386	3.03 R
Copper	solid	0.385	24.47		3.45	2.94 R
Diamond	solid	0.5091	<b>6.115</b>		1.782	0.74 R
Ethanol	liquid	2.44	112		1.925	1.50 R
Gasoline (octane)	liquid	2.22	228		1.64	1.05 R
Glass <sup>[31]</sup>	solid	0.84			2.1	
Gold	solid	0.129	25.42		2.492	3.05 R
Water at 100 °C	liquid	<b>4.1813</b>	<b>75.327</b>	<b>74.53</b>	<b>4.2160</b>	3.02 R
Water at 100 °C (steam)	gas	<b>2.080</b>	<b>37.47</b>	<b>28.03</b>		1.12 R
Water at 25 °C	liquid	<b>4.1813</b>	<b>75.327</b>	<b>74.53</b>	<b>4.1796</b>	3.02 R
Water at -10 °C (ice) <sup>[31]</sup>	solid	<b>2.05</b>	<b>38.09</b>		<b>1.938</b>	1.53 R
Zinc <sup>[31]</sup>	solid	0.387	25.2		2.76	3.03 R
Polyethylene (rotomolding grade) <sup>[36][37]</sup>	solid	2.3027				
Silica (fused)	solid	0.703	42.2		1.547	1.69 R

# Principi fisici di isolamento termico

- limitare o annullare la conduzione
- limitare o annullare la convezione
- riflettere la radiazione infrarossa
- aumentare l'inerzia termica.

La maggior parte dei materiali isolanti utilizzati di solito sfrutta almeno due di questi meccanismi in contemporanea.



# Classificazione dei materiali per isolamento termico

I materiali per isolamento termico si possono classificare in vari modi:

- per metodo di applicazione (pannelli, schiume, riempitivi non impacchettati)
- per natura chimica del materiale (minerali, organici, misti)
- per tipologia del materiale (lana di vetro, di roccia, sughero, polistirene, ecc)

Ai nostri scopi analizzeremo i materiali dal punto di vista della *tipologia* e delle *proprietà* dettate dalla loro *composizione chimica* e dalla loro *morfologia*.

# Materiali fibrosi (I)

I materiali fibrosi per isolamento termico sono classificabili in:

- lane minerali (roccia, basalto, vetro)
- fibre naturali (canapa, lana di legno, lana di pecora, ...)

Le fibre possono essere depositate come “balle” pressate, pannelli rigidi o flessibili, oppure come “loose fill”, ovvero sparse sulla superficie da isolare senza alcuna costrizione di forma e quindi opportunamente coperte.

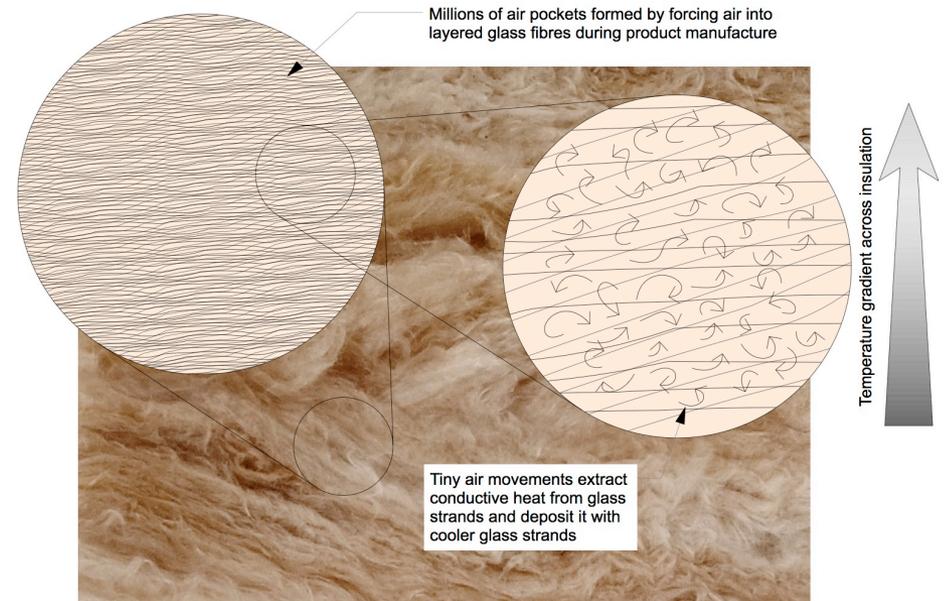


CertainTeed Corporation



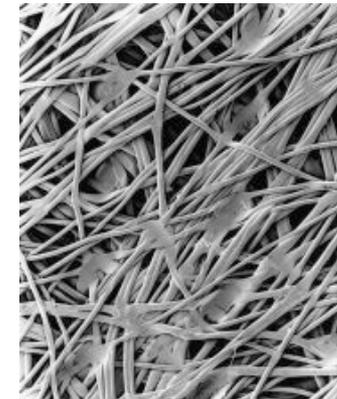
# Materiali fibrosi (II)

I materiali fibrosi per isolamento termico agiscono sulla base della formazione di una struttura porosa a celle aperte, comprimibile.



Open cell insulation - glass wool

I pori aperti forniscono una buona traspirabilità al vapore acqueo, e abbattano il trasporto per convezione e in buona parte quello per irraggiamento (grazie alla continua alternanza di aria e materiale fibroso).



# Fibre minerali (I)

## Lana di vetro

Di aspetto simile a ovatta, ha composizione variabile ma sempre a base di silicati addizionati con calcio, sodio, magnesio e altri minerali in piccola quantità. Un esempio di composizione di lana di vetro è il seguente:

- 65% sabbia quarzosa/vetro di riciclo (Si,O)
- 14% soda (Na)
- 7% dolomite (CaCO<sub>3</sub>/MgCO<sub>3</sub>)
- 4% feldspato (Si, O, Al, Na, K, Ca e Ba)
- 4% calcare (CaCO<sub>3</sub>)

La miscela di materiali viene riscaldata a ca. 1500°C e “filata” attraverso estrusione centrifuga. Le fibre così formate vengono quindi addizionate di resine organiche (tipicamente fenolo-formaldeide) e passate attraverso un forno ad aria calda (ca. 250°C) per stabilizzare il prodotto, che viene poi formato in fiocchi, balle o pannelli in step successivi. Le fibre hanno diametro omogeneo.



# Fibre minerali (II)

## Lana di vetro

DATI CARATTERISTICI		
Peso specifico	20 ÷ 150	Kg/m <sup>3</sup>
Conduktività termica $\lambda$	0.05-0.03	W/mK
Capacità termica specifica c	850-950	J/kgK

Utilizzata per cappotti esterni, interni, isolamenti di soffitti, solai e pavimenti.  
Resistenza al fuoco buona (utilizzata fino a ca. 400-500°C, max 650 °C), esistono anche versioni per utilizzi industriali con resistenza fino ad oltre 1000°C.

Efficace anche per isolamento acustico.

Potenziale problema di carcinogenicità per fibre con diametro < 5  $\mu\text{m}$ .

In generale sono fibre "biosolubili" (ovvero degradabili in vivo).



Problema di emissione di formaldeide nell'ambiente, sia durante l'installazione che negli ambienti in cui è installata.

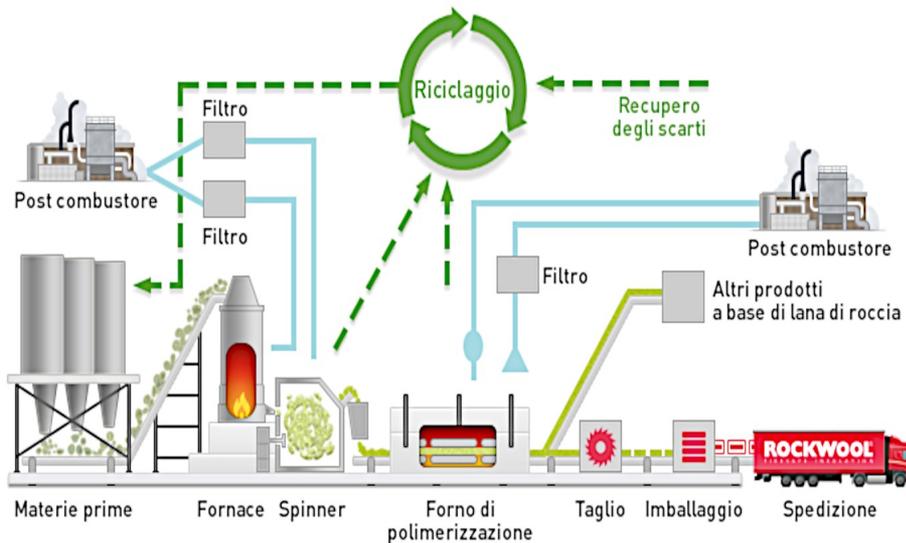
Costo: ca. 400-500 €/100 m<sup>2</sup> (R11)

# Fibre minerali (III)

## Lana di roccia

Componenti principali: roccia vulcanica (tipicamente basaltica, contenente  $\text{SiO}_2$  - 45-52%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 14%,  $\text{CaO}$  - 10%,  $\text{FeO}$  - 5-14%,  $\text{MgO}$  - 5-12%,  $\text{Na}$  o  $\text{K}$  - 2-6%,  $\text{TiO}_2$  - 0,5-2%), calcare ( $\text{CaCO}_3$  con piccole percentuali di  $\text{MgCO}_3$ ), coke e “bricchette” (impasti composti da vari elementi minerali dosati in quantità controllate, in modo da bilanciare la composizione finale del minerale per ottenere le caratteristiche desiderate).

I vari elementi vengono fusi a ca.  $1500^\circ\text{C}$  (il calcare funge da fondente, cioè abbassa la temperatura di fusione della miscela, mentre il coke aiuta a raggiungere la temperatura desiderata). Anche qui si utilizzano leganti organici (in genere resine), per stabilizzare le dimensioni delle fibre e garantirne la flessibilità.



La *lana di roccia* è caratterizzata da fibre di diametro disomogeneo, variabile tra i 5 ed i 20  $\mu\text{m}$ . È chimicamente inerte e resiste alla degradazione biologica. È permeabile al vapore acqueo e resistente ai raggi UV, e le fibre hanno prestazioni meccaniche superiori a quelle della lana di vetro. Data la sua alcalinità di base, a contatto con acciaio non protetto tende a innescarne la corrosione.

# Fibre minerali (IV)

## Lana di roccia

DATI CARATTERISTICI		
Peso specifico $\gamma$	25 ÷ 200	Kg/m <sup>3</sup>
Conduttività termica $\lambda$	0.035-0.045	W/mK
Capacità termica specifica c	850-1050	J/kgK

Utilizzata per cappotti esterni, interni, isolamenti di soffitti, solai e pavimenti. Resistenza al fuoco ottima (utilizzata fino a ca. 600-700°C, max 850°C), in genere è più pesante della lana di vetro. Proprio per questo è più efficace anche per isolamento acustico e da vibrazioni a bassa frequenza (calpestio).

Potenziale problema di carcinogenicità per fibre con diametro < 5  $\mu\text{m}$ .

In generale sono fibre “biosolubili” (ovvero deteriorabili in vivo), anche se in tempi lunghi (sono molto stabili in assenza di processi metabolici, i.e. persistono nell’ambiente).

Problema di emissione di formaldeide nell’ambiente, sia durante l’installazione che negli ambienti in cui è installata.

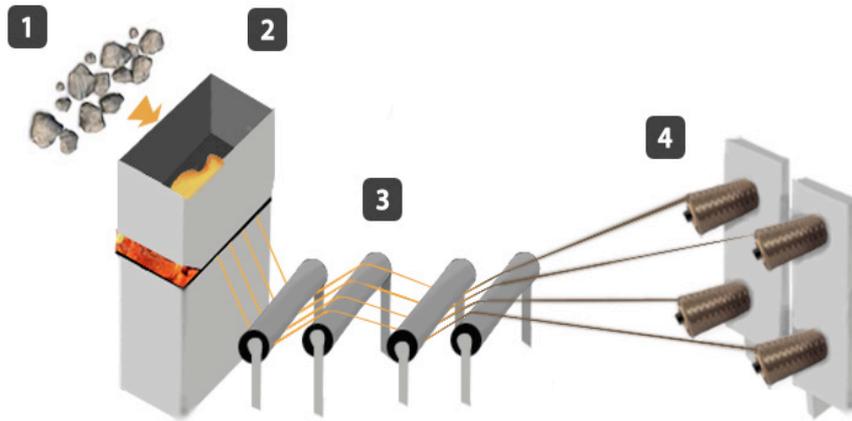


Costo: ca. 600-700 €/100 m<sup>2</sup> (R11)

# Fibre minerali (V)

## Lana di basalto

Basata su sola roccia basaltica (contenente SiO<sub>2</sub> - 45-52%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 14%, CaO - 10%, FeO - 5-14%, MgO - 5-12%, Na o K - 2-6%, TiO<sub>2</sub> - 0,5-2%), che viene fusa a ca. 1400°C e poi estrusa per forza centrifuga in fibre di ca 10 µm di diametro, senza addizione di ulteriori materiali (niente leganti organici).



E' chimicamente inerte e resiste alla degradazione biologica ambientale (di fatto è fibra costituita da materiale lavico), molto resistente alla temperatura.

Thermal Properties	SI Units	Basalt Filaments	Fiberglass
Maximum application temperature	(°C)	982	650
Sustained operating temperature	(°C)	820	480
Minimum operating temperature	(°C)	-260	-60
Thermal conductivity	(W/mK)	0.031 ÷ 0.038	0.034 ÷ 0.04
Melting temperature	(°C)	1450	1120

# Fibre minerali (VI)

## Lana di basalto

DATI CARATTERISTICI		
Peso specifico	25-27	Kg/m <sup>3</sup>
Conduttività termica $\lambda$	0,031-0.038	W/mK
Capacità termica specifica c	840-860	J/kgK

Utilizzata per cappotti esterni, interni, isolamenti di soffitti, solai e pavimenti.

Resistenza al fuoco ottima (utilizzata fino a ca. 700°C, con temperatura di rammollimento oltre i 1000 °C), buona capacità strutturale (abbastanza rigida), più pesante della lana di vetro e quindi utile per l'isolamento acustico e da vibrazioni a bassa frequenza (calpestio).

Potenziale problema di carcinogenicità per fibre con diametro < 5  $\mu$ m.

Biosolubilità migliore a quella della lana di roccia (assenza di resine leganti), nessuna emissione di formaldeide.



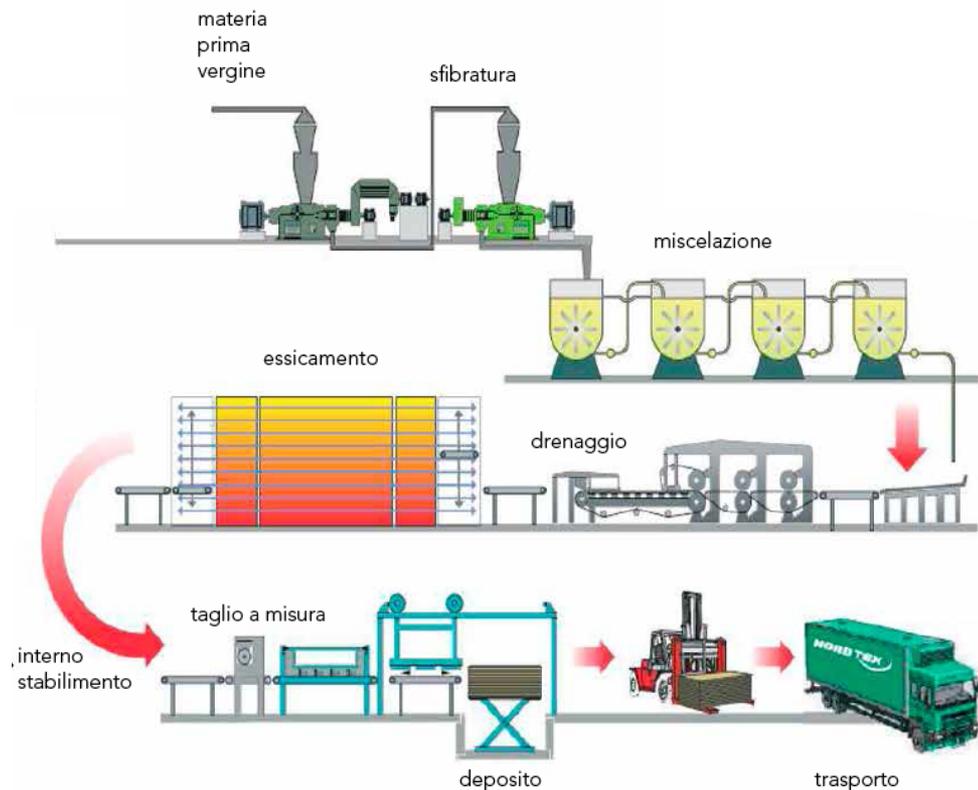
Costo: ca. 750 €/100 m<sup>2</sup> (non per pannelli, solo per tessuti di spessore di ca. ½ cm)

# Fibre naturali (I)

## Canapa

La canapa è una fibra tessile che si ottiene da una pianta erbacea annua coltivabile in climi temperati. Ha una buona stabilità dimensionale nel tempo (ad umidità costante), e non viene attaccata da parassiti come i tarli, o da roditori. E' altamente riciclabile e totalmente biocompatibile. Ottima per l'isolamento acustico. Ha una bassa resistenza alla compressione.

A volte miscelata con fibre polimeriche (tipicamente poliesteri) per migliorarne la posabilità. Garantisce una buona traspirazione di pareti e solai, e la sua natura vegetale le permette di agire come "polmone" di umidità (in fase di assorbimento di umidità si rigonfia, ma senza perdere le sue caratteristiche di isolamento termico; dopo aver riemesso l'umidità torna alla sua dimensione originaria).



# Fibre naturali (II)

## Canapa

### DATI CARATTERISTICI

Peso specifico $\gamma$	20 ÷ 100	Kg/m <sup>3</sup>
Conduktività termica $\lambda$	ca. 0,045	W/mK
Capacità termica specifica c	1500-2000	J/kgK

Spesso usata in sostituzione del polistirolo per alleggerire conglomerati cementizi, sia in solai che in strutture portanti, grazie ad un elevato contenuto in biopolimeri strutturali (lignina, cellulosa cristallina, ecc). Anche usata per cappotti interni, isolamenti di soffitti, solai e pavimenti (meno verso l'esterno, a causa della tendenza al rigonfiamento quando assorbe umidità).

Come tutte le fibre naturali è infiammabile. Per ridurre l'infiammabilità spesso viene impregnata di sali di boro (ritardante di fiamma). Ha un altissimo calore specifico, ed è utile anche per l'isolamento acustico e da vibrazioni a bassa frequenza (calpestio).



Costo: ca. 1000 €/100 m<sup>2</sup> (R2.5-10 cm)

# Fibre naturali (III)

## Lana di legno

Il legno ridotto in fibre viene addizionato di emulsioni idrorepellenti e solfato di alluminio/altri sali minerali per aumentarne la resistenza contro i funghi e più in generale contro la marcescenza, e impartire resistenza alla fiamma.

Il pannello in fibra di legno è permeabile al vapore acqueo e consente quindi la respirazione dei muri. Ha buona capacità di accumulo del calore (alto calore specifico), buona stabilità dimensionale e un buon potere fono-isolante.

I pannelli sono resistenti alla compressione, ma non sono flessibili. Le fibre sono macroscopiche (diametro in genere  $> 500 \mu\text{m}$ ), e sono incollate usando o colle poliuretatiche oppure colle a base di amido (più sostenibili).

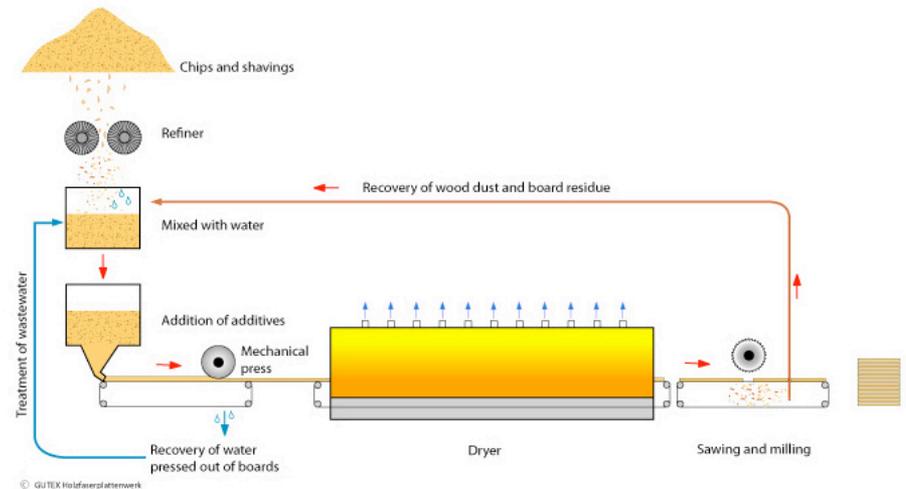


# Fibre naturali (IV)

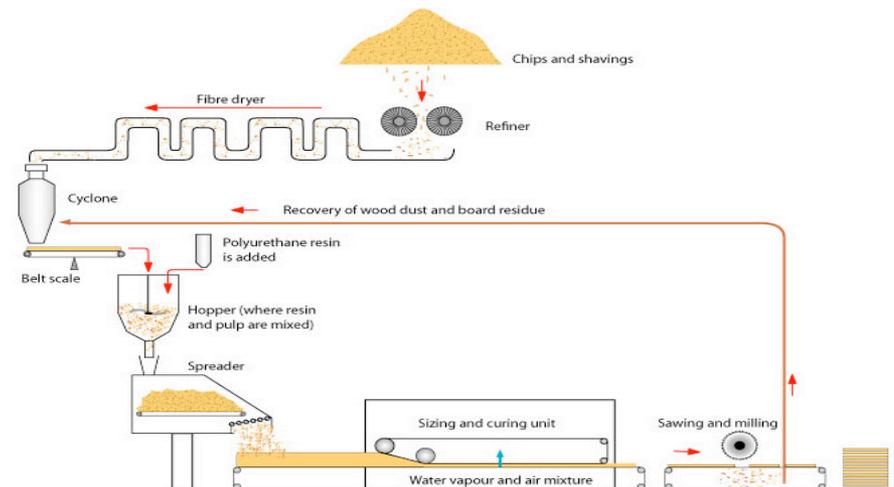
## Lana di legno

Due principali processi di produzione:

- **processo “umido”**: il legno viene triturato, vagliato e quindi addizionato prima di acqua e poi di additivi (colle, ignifughi, conservanti). L’impiastro così ottenuto viene poi pressato su un nastro per espellere parte dell’acqua in eccesso, ed il tutto viene essiccato in forno.



- **processo “secco”**: il legno viene triturato, vagliato ed essiccato. Ai chips vengono poi aggiunti colla e additivi. Segue miscelazione e deposizione su un nastro, lungo il quale la miscela è compressa e subisce l’essiccazione finale.



# Fibre naturali (V)

## Lana di legno

DATI CARATTERISTICI		
Peso specifico $\gamma$	130 ÷ 2800	Kg/m <sup>3</sup>
Conduktività termica $\lambda$	0.038-0.045	W/mK
Capacità termica specifica c	2100-2500	J/kgK

I pannelli in lana di legno sono abbastanza rigidi da avere proprietà strutturali. Vengono quindi utilizzati come elemento sia isolante che strutturale, per esempio in sostituzione del tavolato di un solaio. Hanno anche buone performances di insonorizzazione anti-calpestio acustica (tipicamente in tramezzi). Possono essere utilizzati anche come cappotto esterno (ma devono essere ben impermeabilizzati). La loro grande capacità termica li rende ideali per aumentare l'inerzia termica di una struttura.

Per ridurre l'infiammabilità vengono addizionati di sali di boro o di altri ritardanti minerali.

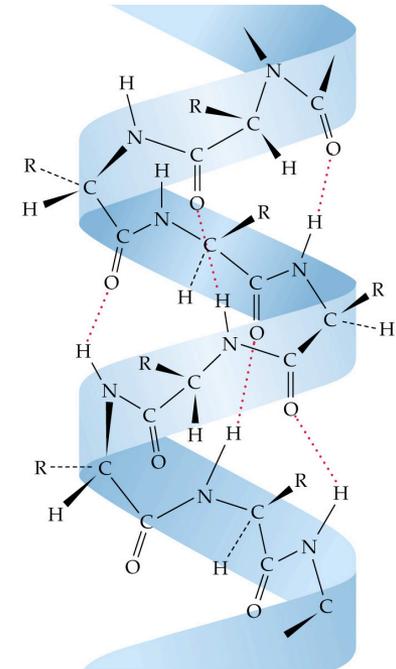
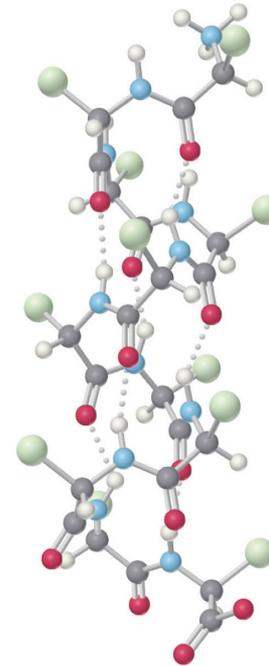
Costo: ca. 1200-1500 €/100 m<sup>2</sup> (R2.5-10 cm)

# Fibre naturali (VI)

## Lana di pecora

La lana di pecora è altamente igroscopica ed è in grado di assorbire umidità fino ad un terzo del suo peso senza rigonfiarsi in modo macroscopico; è poi in grado di cedere lentamente all'ambiente l'umidità assorbita.

Dal punto di vista chimico la lana di pecora è basata sulla  $\alpha$ -cheratina, un biopolimero con conformazione ad elica caratterizzato da elevata resistenza meccanica grazie ai numerosi ponti idrogeno intramolecolari sviluppati lungo l'asse principale dell'elica tra gruppi carbonilici e gruppi amminici.

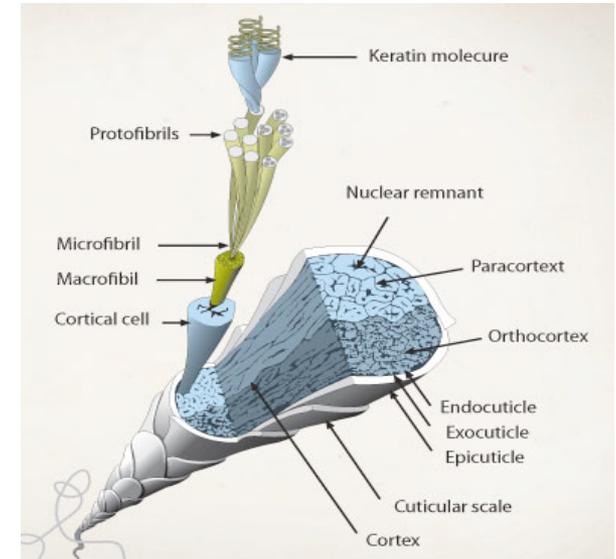


# Fibre naturali (VII)

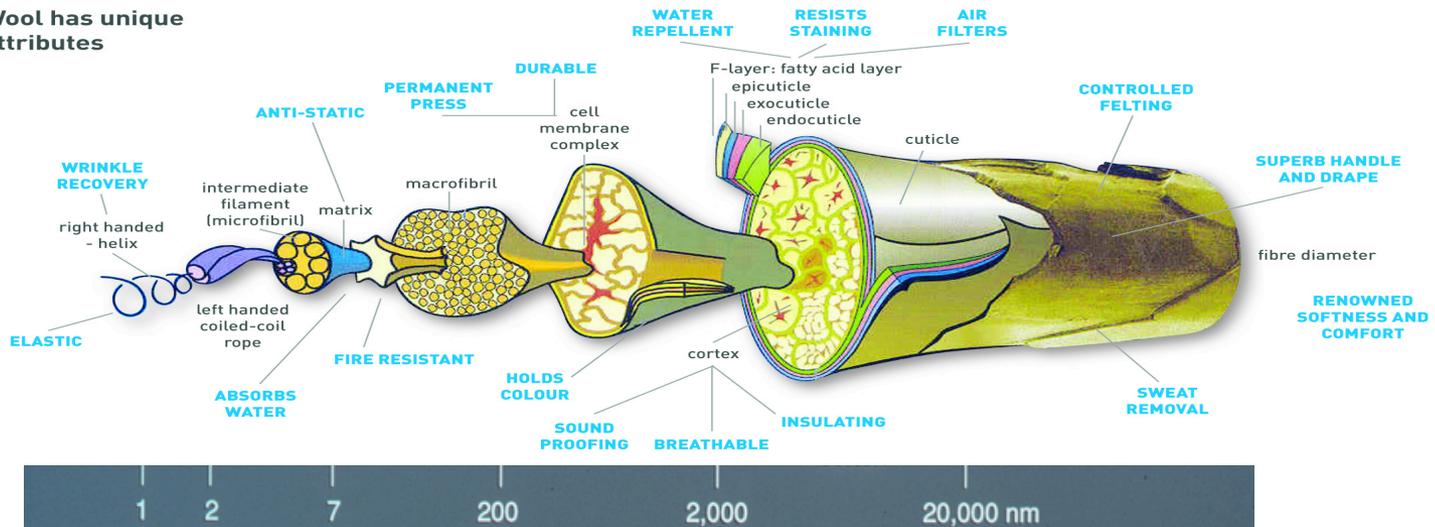
## Lana di pecora

La struttura di un filamento di lana di pecora è estremamente complessa:

- l' $\alpha$ -cheratina si avvolge in protofibrille, che a loro volta si organizzano in microfibrille, che a loro volta si aggregano a formare macrofibrille. Le macrofibrille sono parte delle cellule corticali, che formano il cuore della fibra, idrofile.
- la fibra di lana è ricoperta da strati più duri chiamati cuticole, disposti a scaglie l'uno sull'altro.
- le cuticole sono separate dalle cellule corticali da due membrane diverse, e riparate dall'esterno da una terza membrana (epicuticola), che le rende idrofobe.



Wool has unique attributes



# Fibre naturali (VIII)

## Lana di pecora

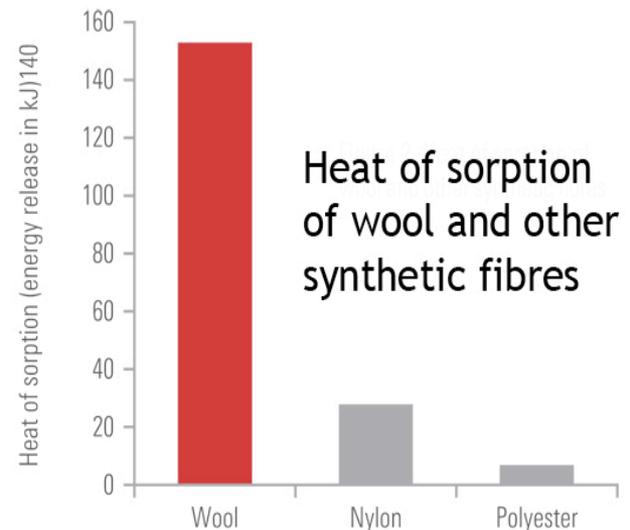
I pori tra le cellule corticali hanno diametro di ca. 4 nm, e possono ospitare numerose molecole d'acqua. L'adsorbimento è rapido, e genera un calore di adsorbimento cospicuo, che viene restituito quando l'acqua è desorbita.

Il risultato di questi processi è duplice:

- l'umidità adsorbita dalla lana non si traduce in condensa sulla superficie del filato, ma rimane all'interno delle fibre;
- l'aumentata umidità esterna, finché non satura le fibre (fino a ca. il 30-35% del peso della lana secca), causa un riscaldamento della fibra di lana.



Effetto “tampone” della lana in termini sia di costanza di umidità che di calore (quando l'umidità ambientale cala, la lana restituisce l'acqua adsorbita sottraendo calore all'ambiente). Utile sia in termini di qualità delle condizioni microclimatiche che di riduzione sensibile delle possibilità di formazione di muffe e danni da umidità ristagnante.



# Fibre naturali (IX)

## Lana di pecora

DATI CARATTERISTICI		
Peso specifico $\gamma$	18-20	Kg/m <sup>3</sup>
Conduktività termica $\lambda$	0.036-0.038	W/mK
Capacità termica specifica c	1600-1700	J/kgK

Flessibile e leggera, quindi facile da trasportare e da posare all'interno delle intercapedini delle pareti esterne e interne.

Totalmente biocompatibile, tutto il ciclo di lavorazione (tosa, lavaggio, cardatura) avviene senza emissioni inquinanti e senza impiego di sostanze chimiche. Non si polverizza, non innesca reazioni allergiche e in fase di applicazione non genera polveri irritanti. Ottimo isolante acustico e antivibrazioni. Non brucia (ma si decompone carbonizzandosi senza fiamma), perché richiede una percentuale di ossigeno nell'aria del 25.2%, mentre l'aria ne contiene circa il 21%, quindi si infiamma intorno a 580°C. Viene sempre trattata con antitarre. A volte viene addizionata con fibre di polistirene per aumentarne la stabilità dimensionale.

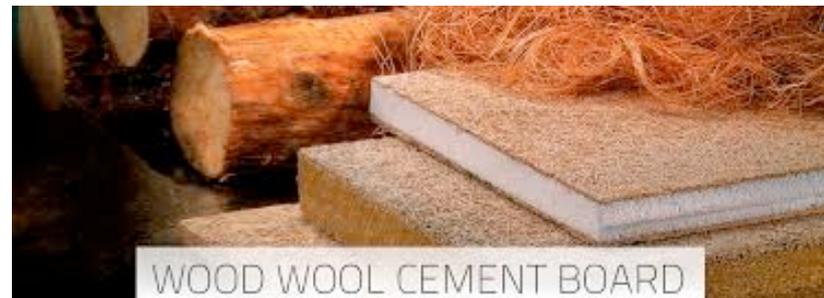
Costo: ca. 700-900 €/100 m<sup>2</sup> (R2.5-10 cm)

# Fibre ibride (II)

## Lana di legno mineralizzata

La fibra di legno può essere mineralizzata (e quindi resa incombustibile) mediante trattamento con ossido di magnesio/solfato di magnesio, oppure cemento Portland, realizzando un processo di fossilizzazione artificiale. I chips di legno vengono pressati a freddo se il legante/mineralizzante è il cemento Portland, pressati a caldo se si usano composti di Magnesio.

Il prodotto così ottenuto ha peggiori caratteristiche termoisolanti rispetto alla lana di legno, ma oltre alla resistenza al fuoco acquisisce inattaccabilità da insetti e roditori, migliore inerzia termica, migliore performance fonoisolante, minore igroscopicità, maggiore stabilità dimensionale e migliori proprietà meccaniche. Si possono realizzare solo strutture rigide, eventualmente già accoppiate a materiale gessoso/cementizio.



# Fibre ibride (II)

## Lana di legno mineralizzata

DATI CARATTERISTICI		
Peso specifico $\gamma$	360 ÷ 570	Kg/m <sup>3</sup>
Conduktività termica $\lambda$	0.065-0.1	W/mK
Capacità termica specifica c	1500-2000	J/kgK

Vengono utilizzati per coibentare in genere tutto l'involucro. In particolare, data la superficie rugosa e l'inerzia rispetto all'umidità, sono ottimi accoppiati alle strutture in c.a., oppure come supporto dell'intonaco. Grazie all'elevato calore specifico conferiscono elevata inerzia termica.



Costo: ca. 2000 €/100 m<sup>2</sup> (R1.15-7.5 cm)

# Altri isolanti fibrosi naturali

1. Fibra di cocco
2. Cellulosa
3. Lino
4. Cotone
5. Paglia



In generale:

- $\lambda = 0.04-0.05 \text{ W/mK}$
- bassa densità (30-60 Kg/m<sup>3</sup>)
- alto calore specifico (1000-2000 J/Kg)
- ottima traspirabilità
- buone/discrete capacità di regolare l'umidità
- ambientalmente sostenibili
- infiammabili, di solito trattati con acido borico o altri ritardanti minerali

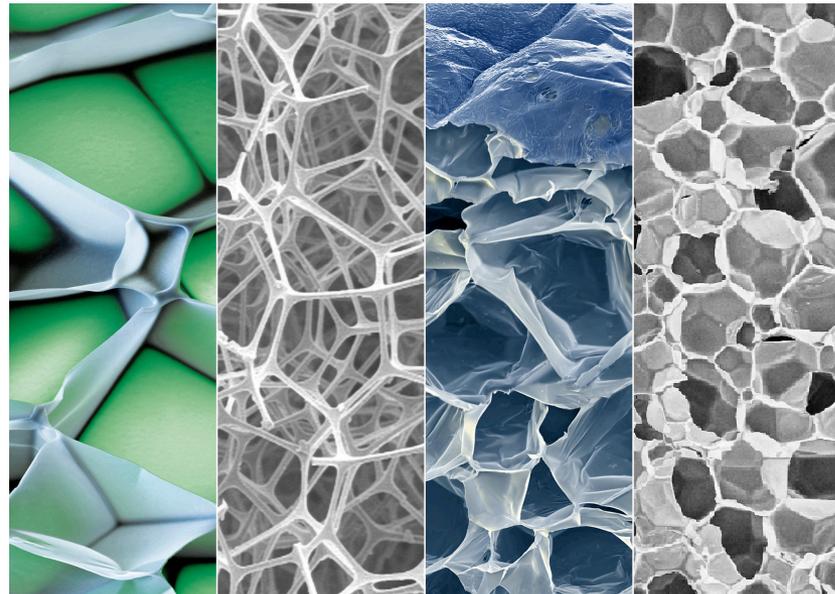
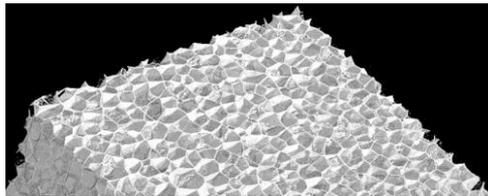


# Materiali continui porosi (I)

Sono caratterizzati da una matrice continua che contiene pori, che possono essere chiusi o aperti.

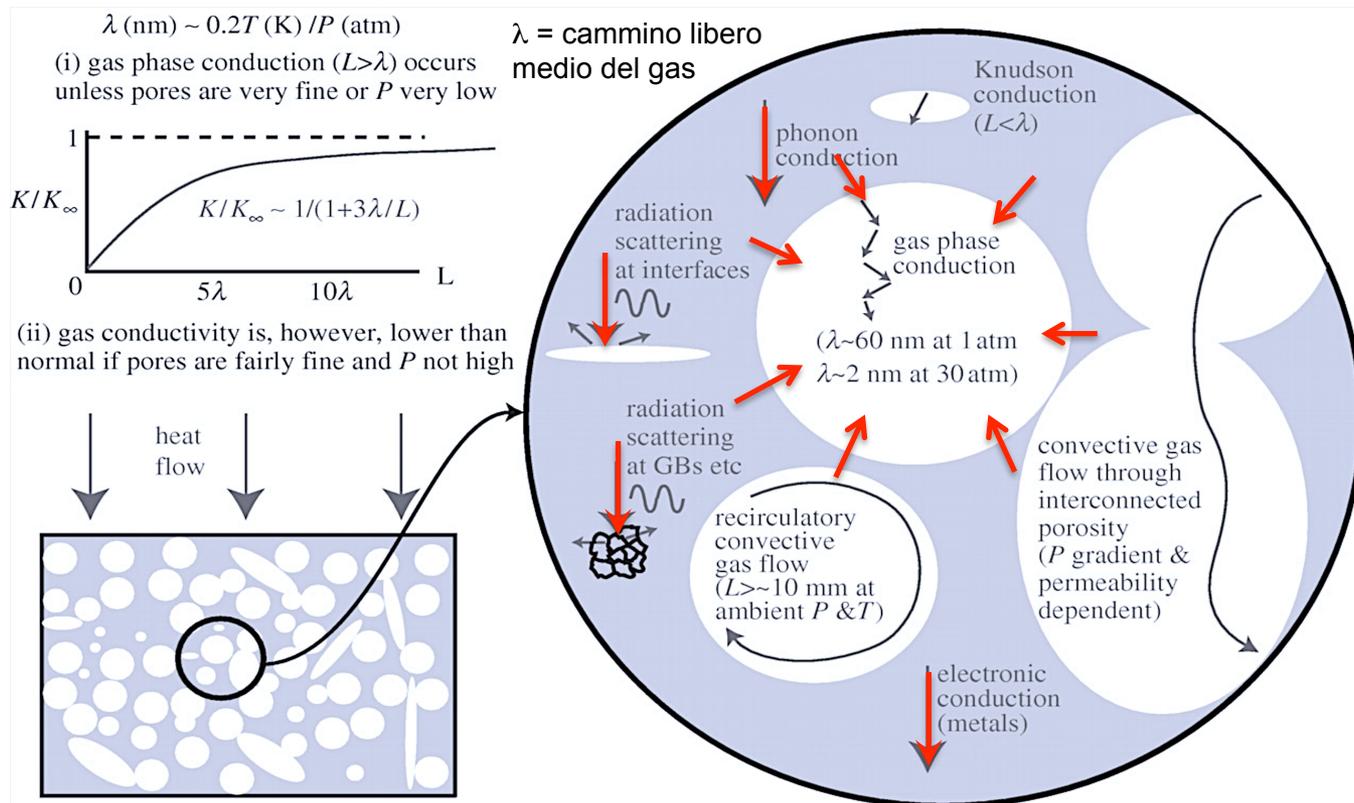
Le porosità si ottengono con agenti schiumogeni/generatori di gas/porogeni, che vengono attivati tipicamente con aumenti di temperatura o abbassamento di pressione, oppure gorgogliando gas all'interno della miscela di formazione del materiale (sia esso organico o inorganico).

Il diametro dei pori è variabile (a seconda del materiale, del tipo di porogeno, delle condizioni di processo) da qualche mm a qualche decina di nm.



# Materiali continui porosi (II)

La presenza di pori in un materiale continuo (anche granulare, ma che conservi una sua coerenza spaziale in assenza di elementi contenitivi) realizza una serie di condizioni che abbattano o annullano i meccanismi di trasporto del calore per convezione: effetto Knudsen (per pori molto piccoli,  $<80$  nm), assorbimento ed “intrappolamento” del calore nel gas confinato nei pori.



# Materiali continui porosi (III)

Utilizzando come riempimento dei gas più pesanti di quelli che costituiscono l'aria, come l'argon, riduciamo la conduttività termica della massa di gas intrappolata nei pori (indicativamente fino al 30% in meno).

<b>Gas</b>	<b>Formula</b>	<b>Molecular weight</b>	<b>Specific gravity (g/l) at STP</b>	<b>Thermal conductivity (k) (W/g/°C)</b>	<b>Cv=Specific Heat Constant Volume at</b>
Helium	He	4.02	0.176	0.1513	0.7463
Neon	Ne	20.18	0.899	0.0491	0.1487
Argon	Ar	39.95	1.782	0.01772	0.0250
Krypton	Kr	83.80	3.75	0.00943	0.0119
Xenon	Xe	131.01	5.761	0.00565	0.0229
Radon	Rn	222.00	9.730	0.00361	0.0135
Hydrogen	H <sub>2</sub>	2.01	0.088	0.1805	2.4876
Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.03	1.165	0.02583	0.1783
Air	-	28.97	1.293	0.02574	

# Materiali continui porosi (IV)

## Vetro cellulare/alveolare

Il vetro cellulare è un materiale alveolare leggero a celle chiuse. Viene ottenuto attraverso macinatura del vetro, spesso di riciclo, a cui viene aggiunto carbonio polverizzato che ad una temperatura di circa 1000°-1300°C in aria provoca la formazione di CO<sub>2</sub> in bollicine (diametri in genere sotto il mm), che espande la massa conferendole struttura alveolare.

In genere il vetro cellulare è caratterizzato da rigidità, fragilità, durezza, ottima resistenza meccanica, coefficiente di dilatazione termica pressoché identico all'acciaio o al calcestruzzo.

I pannelli in vetro cellulare sono impermeabili ai liquidi, con sbarramento totale al vapore, sono resistenti agli agenti aggressivi ed agli attacchi di parassiti e roditori, stabili dimensionalmente, resistenti alla compressione, incombustibili, facilmente lavorabili.



# Materiali continui porosi (V)

## Vetro cellulare/alveolare

DATI CARATTERISTICI		
Peso specifico $\gamma$	120	Kg/m <sup>3</sup>
Conduktività termica $\lambda$	0,05	W/mK
Capacità termica specifica c	830	K/kgK

E' impermeabile e trova impiego ottimale in ambienti umidi, come barriera al vapore. Grazie all'ottima resistenza a compressione viene usato come elemento di taglio del ponte termico al piede delle murature. Poco usato come coibente da parete a causa dei costi molto elevati.



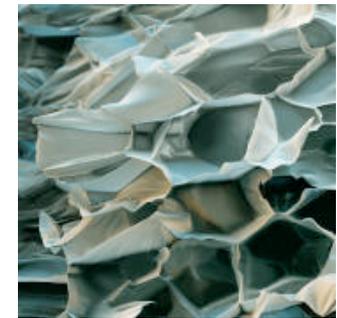
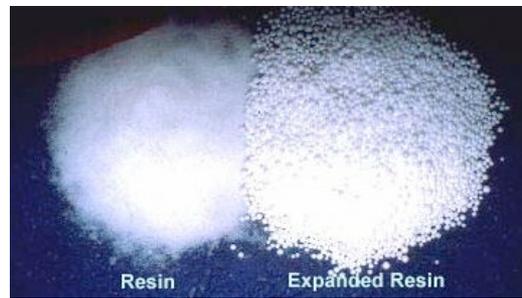
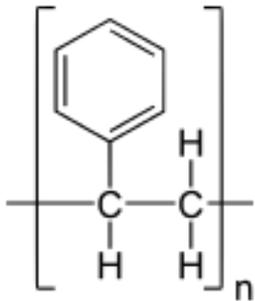
Costo: ca. 7000-8000 €/100 m<sup>2</sup> (R2.5-8 cm)

# Materiali continui porosi (VI)

## Polistirolo/polistirene espanso

Il polistirolo (o polistirene) espanso è un polimero termoplastico, ottenuto dallo stiolo (stirene). “Perle” compatte di polistirolo vengono imbibite a bassa temperatura con pentano, un idrocarburo che bolle a 36°C. La miscela viene esposta a vapore acqueo ( $T > 90^{\circ}\text{C}$ ), causando il rapido passaggio del pentano da liquido a gas, e la conseguente espansione delle perle, fino a 20-50 volte il loro volume iniziale. Le perle espanse vengono poi sinterizzate in blocchi delle dimensioni e forme volute.

Il PSE (EPS) ha buone capacità termoisolanti e fonoisolanti, e resiste discretamente agli insetti. Il basso costo e la leggerezza, unitamente alle buone prestazioni coibenti, lo rendono molto utilizzato. Traspira poco e la condensa ne inficia le caratteristiche coibenti. Ottima stabilità dimensionale e buona resistenza meccanica. Infiammabile, può essere reso autoestinguente.



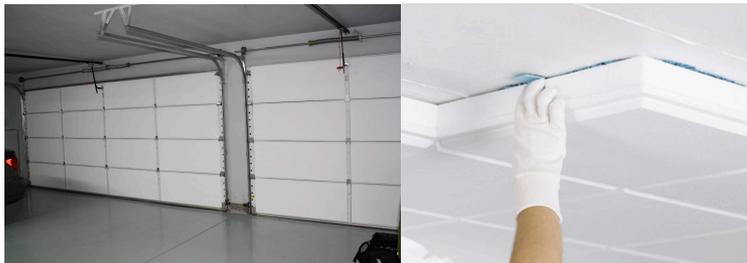
# Materiali continui porosi (VII)

## Polistirolo/polistirene espanso

### DATI CARATTERISTICI

Peso specifico $\gamma$	15 ÷ 30	Kg/m <sup>3</sup>
Conduktività termica $\lambda$	0,04	W/mK
Capacità termica specifica c	1480	J/kgK

Il polistirolo espanso in edilizia è molto usato in intercapedini, sottopavimenti, pareti ventilate, controsoffittature, pannelli radianti. L'utilizzo più frequente è come pannelli nelle chiusure e nelle partizioni orizzontali e verticali, in abbinamento all'intonaco nell'isolamento a cappotto, nell'isolamento perimetrale controterra.



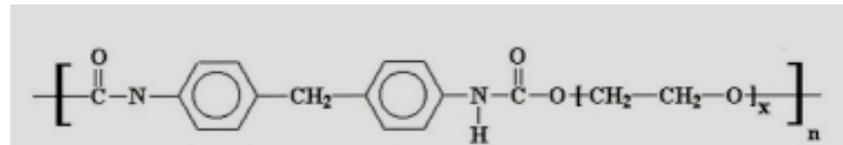
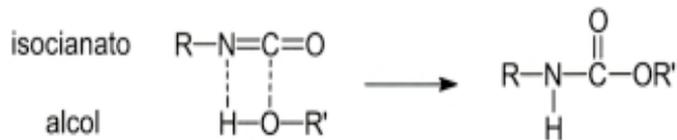
Costo: ca. 400 €/100 m<sup>2</sup> (R1.1 - 4 cm)

# Materiali continui porosi (VIII)

## Poliuretano espanso

Il poliuretano espanso (PUE) è un materiale sintetico termoindurente, con pori a celle aperte. Si ottiene dalla reazione tra polioli e poliisocianati, in presenza di un agente espandente (generalmente idrocarburi, CO<sub>2</sub> o altre miscele) e di altri additivi (estinguenti di fiamma, plastificanti). I PUE sono essenzialmente dei copolimeri a blocchi alternati, lungo le cui catene si succedono blocchi rigidi (di tipo A) e blocchi flessibili/elastomerici (di tipo B), secondo lo schema [-A-B-A-B-A-B-A-B-]<sub>n</sub>.

La schiuma in polimerizzazione manifesta elevate proprietà di adesione a quasi tutti i tipi di supporti, permettendone l'accoppiamento con rivestimenti sia flessibili che rigidi. Ha ottimi valori di isolamento termico, tra i più elevati fra i materiali di normale commercializzazione. Estremamente leggero, buone caratteristiche meccaniche, facilità di accoppiamento ad altri materiali, inerzia ai più comuni agenti chimici. Le celle aperte e l'intrinseca struttura chimica permettono ai PUE un'ottima flessibilità e compressibilità, e una buona traspirabilità.

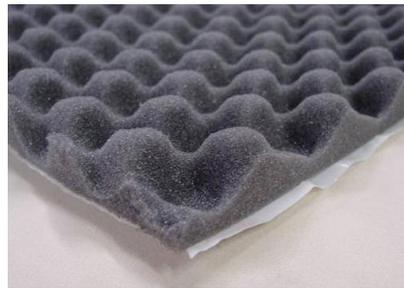


# Materiali continui porosi (IX)

## Poliuretano espanso

DATI CARATTERISTICI		
Peso specifico $\gamma$	35-40	Kg/m <sup>3</sup>
Conduktività termica $\lambda$	0.02-0.025	W/mK
Capacità termica specifica c	1400	J/kgK

Il PUE viene usato in pannelli flessibili o rigidi, come isolamento continuo su strutture portanti di tetti o per cappotti esterni mediante incollaggio diretto alla parete, nonché a pavimento. Quest'ultimo utilizzo si avvantaggia delle buone prestazioni del PUE anche in termini di isolamento acustico contro il calpestio. Grazie alle celle aperte ha grande traspirabilità.



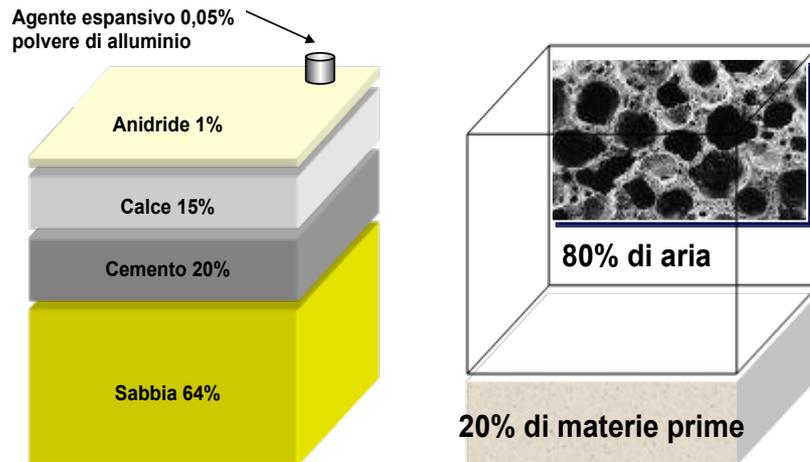
Costo: ca. 1000-1200 €/100 m<sup>2</sup> (R1.3 - 3 cm)

# Materiali continui porosi (X)

## Calcestruzzo aerato o cellulare

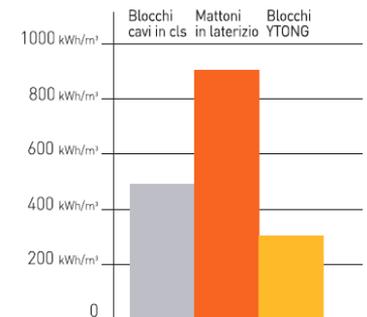
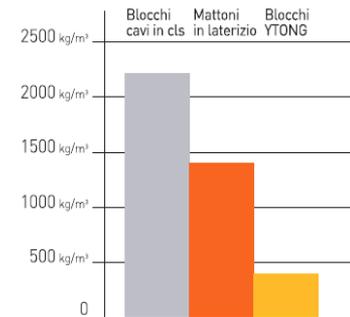
Il calcestruzzo cellulare, brevettato dall'Architetto Svedese J. A. Eriksson nel 1924, viene preparato a partire da cemento, calce, acqua, sabbia e polvere di alluminio.

Quest'ultima, reagendo con l'idrossido di calcio, forma microbolle di idrogeno che fanno aumentare il volume del prodotto (una specie di lievitazione). Una volta raggiunta una consistenza solida, l'idrogeno viene rilasciato nell'atmosfera (permea attraverso il cemento) e sostituito dall'aria, conferendo al materiale ottime proprietà di isolamento termico. La maturazione avviene in autoclave con una pressione tra i 9 e i 12 bar, una temperatura che può variare dai 170° ai 190°, per circa 12 ore.



1/5 del materiale per la produzione...

... e 1/3 di energia!



# Materiali continui porosi (XI)

## Calcestruzzo aerato o cellulare

### DATI CARATTERISTICI

Peso specifico $\gamma$	300-600	Kg/m <sup>3</sup>
Conduktività termica $\lambda$	0.065-0.1	W/mK
Capacità termica specifica c	1000	J/kgK

Viene usato come materiale strutturale anche per l'alleggerimento che conferisce alle strutture (la sua resistenza alla compressione permette la costruzione di edifici fino a tre piani fuori terra senza l'utilizzo di strutture in cemento armato). Adatto alla realizzazione di solai, tetti e quant'altro serve alla costruzione di un edificio, anche in zona sismica.



Costo: 10000-30000 €/100 m<sup>2</sup> (spess. 10 cm)

# Materiali continui porosi (XII)

## Aerogel

L'aerogel è un gel in cui il componente liquido è sostituito da un gas, realizzando una schiuma solida a densità bassissima e composta, in peso, quasi esclusivamente dal gas.

Questa peculiare composizione porta l'aerogel ad avere una conducibilità termica minore rispetto a quella dell'aria (0.015-0.020 rispetto a 0.024 W/mK), da cui pure è composto per il 97-98% in volume. Questo è dovuto alla dimensione nanometrica dei suoi pori (effetto Knudsen).

L'aerogel utilizzato in edilizia è quello basato sulla silice, e la silice è di per se' un pessimo conduttore di calore. L'unione di queste due proprietà rende l'aerogel di silice un materiale molto efficace ai fini dell'isolamento termico, pur mantenendo una buona resistenza strutturale (ma è molto friabile).

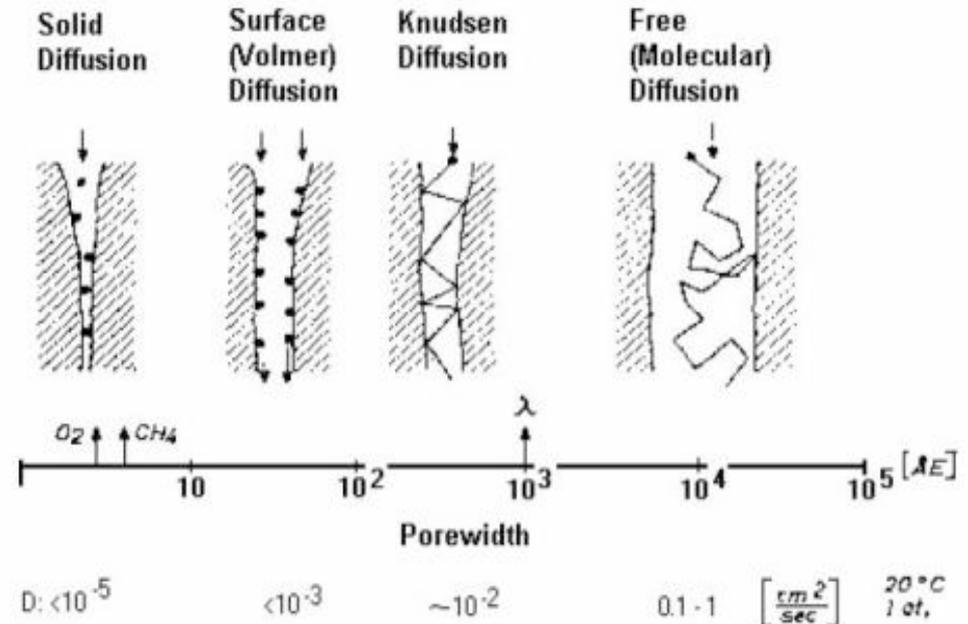


# Materiali continui porosi (XIII)

## Aerogel

L'effetto Knudsen è dovuto alla dimensione nanometrica dei pori dell'aerogel, in genere tra i 6-7 ed i 40-50 nm di diametro. In queste cavità le molecole gassose collidono con maggiore frequenza con le pareti piuttosto che con le altre molecole presenti. Poiché gli urti tra molecole e pareti sono elastici (mentre quelli tra molecole e molecole sono più anelastici), le molecole scambiano con le pareti relativamente poca energia cinetica.

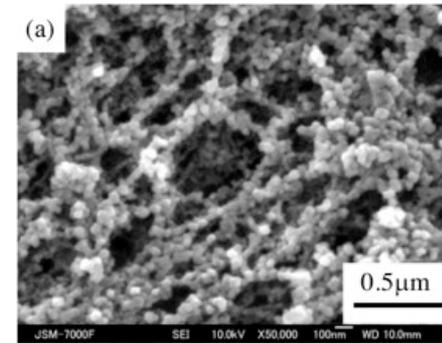
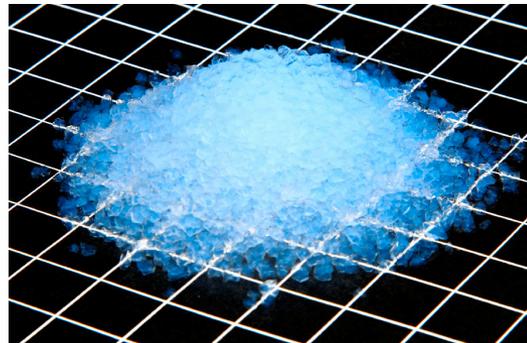
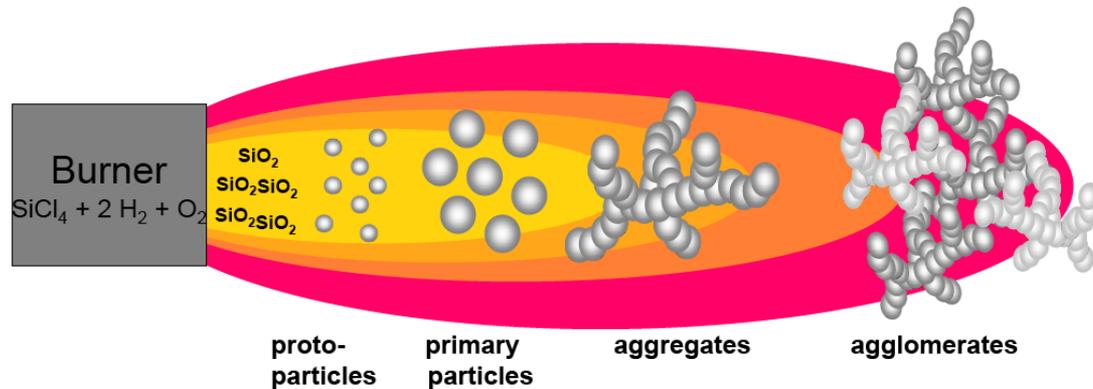
Questo meccanismo fa decrescere la trasmissione del calore in sistemi nanoporosi, portando ad un abbattimento quantitativo della convezione e della conduzione.



# Materiali continui porosi (XIV)

## Aerogel

L'aerogel viene prodotto in laboratorio per via umida, ma a livello industriale si utilizzano metodi pirolitici.



# Materiali continui porosi (XV)

## Aerogel

DATI CARATTERISTICI		
Peso specifico $\gamma$	2-5	Kg/m <sup>3</sup>
Conduktività termica $\lambda$	0.015-0.020	W/mK
Capacità termica specifica c	1000-2000	J/kgK

I pannelli isolanti rigidi vengono utilizzati soprattutto come isolamento continuo sopra la struttura portante di tetti, o per realizzare cappotti esterni mediante incollaggio diretto alla parete. Per l'isolamento termico a pavimento vengono utilizzati pannelli in versione flessibile, con buone prestazioni anche in termini di isolamento acustico contro il calpestio.



Problema: sia durante la produzione che durante l'applicazione si producono quantità enormi di polveri finissime, non pericolose per la salute ma comunque fastidiose, e letali per gli attrezzi.

Costo: ca. 4200 €/100 m<sup>2</sup> (1 cm)

# Altri materiali continui porosi

Esistono ovviamente molti altri materiali porosi per la coibentazione termica, commercializzati come materiali continui (pannelli o mattoni), che però hanno una minore diffusione e reperibilità.

Esempi:

- perlite (una roccia effusiva vulcanica) agglomerata in mattoni (con discreto coefficiente di conducibilità termica, 0.5-0.7 W/mK)
- Sughero (corteccia di albero), disponibile in pannelli o rotoli flessibili, con ottime prestazioni di isolamento termico (0.04-0.06 W/mK).



# Materiali granulari/sfusi (I)

I materiali granulari sono materiali “sciolti” (“loose fill”), che vengono depositati sulla superficie o nelle intercapedini da coibentare sotto forma di granelli o fiocchi, e poi (non sempre) ricoperti con un piano di calpestio o sigillatura opportuno. Assumono quindi la forma delle cavità che vanno a riempire.

Vengono applicati o direttamente da sacchi, per esempio su fondi di solai, oppure utilizzando appositi distributori collegati a compressori. Possono poi essere immobilizzati con cementizio, coperture rigide (per esempio in pannelli in fibra di legno), oppure essere semplicemente lasciati a vista (tipico dei solai sottotetto). Spesso sono incorporati direttamente nel materiale cementizio, per alleggerirlo e migliorarne le prestazioni termoisolanti. Forniscono un livello di coibentazione medio, ma l'installazione è semplice e rapida.

Tra i materiali granulari più diffusi ci sono:

- argilla espansa
- sughero
- fibra di cellulosa
- vermiculite
- perlite
- lana di roccia
- lana di vetro



# Materiali granulari/sfusi (II)

## Argilla espansa

L'argilla espansa si ottiene dalla cottura di minerali argillosi ad alta temperatura, ed è costituita da granuli di forma approssimativamente sferica, con una dura scorza esterna che protegge la struttura alveolare interna a celle chiuse vetrificate.

I granuli possono essere pressati e parzialmente incollati tra loro a formare manufatti continui (mattoni, tavolette), oppure, come di solito avviene, semplicemente ricoperti con cemento.

Bassa densità, conduttività termica relativamente alta, ma le sue prestazioni non cambiano con l'esposizione ai raggi UV, i cicli stagionali, il gelo ed il disgelo. E' minimamente igroscopica, e resistente al fuoco (incombustibile).



# Materiali granulari/sfusi (III)

## Argilla espansa

### DATI CARATTERISTICI

Peso specifico $\gamma$	325 ÷ 500	Kg/m <sup>3</sup>
Conduktività termica $\lambda$	0,09	W/mK
Capacità termica specifica c	940	J/kgK

Visto il peso specifico relativamente alto, possiede una buona inerzia termica rispetto ad altri isolanti. Può essere utilizzata anche in luoghi moderatamente umidi vista la bassa igroscopicità. L'uso più frequente è come elemento di alleggerimento del calcestruzzo (in granuli).

Viene utilizzata anche come strato drenante di superfici verdi, oppure in ambiti che ne sfruttino le caratteristiche di resistenza al fuoco. Può essere usato in mattoni di aggregato come pavimentazioni drenanti per il verde o per esterni.



Costo: ca. 150 €/100 m<sup>2</sup> (spessore ca. 10 cm)

# Materiali granulari/sfusi (IV)

## Sughero granulare

Il sughero è una parte della corteccia della Quercia da Sughero, tipica del sud Europa (Sardegna, Spagna, Grecia, sud Italia). E' fortemente idrofobo, leggero, elastico. Ha anche eccellenti proprietà fonoisolanti, ed è resistente a graffi, urti, insetti e funghi.

### DATI CARATTERISTICI

Peso specifico $\gamma$	200-350	Kg/m <sup>3</sup>
Conduttività termica $\lambda$	0,05	W/mK
Capacità termica specifica c	1600-1800	J/kgK

Nella sua forma sfusa viene usato come fondo per solai o riempimento di intercapedini. Come tutti i materiali granulari, può essere incorporato in cementizi per alleggerirli. Viene addizionato di ritardanti di fiamma.



Costo: ca. 1200-1500 €/100 m<sup>2</sup> (spessore ca. 30 cm)

# Materiali granulari/sfusi (V)

## Fibra di cellulosa

La fibra di cellulosa è ricavata dai giornali vecchi. E' un coibente molto economico e abbastanza sostenibile (come tutti i materiali a base organica è addizionato di ritardanti di fiamma), e ha prestazioni sorprendenti in termini di isolamento termico e di inerzia termica.

### DATI CARATTERISTICI

Peso specifico $\gamma$	35-65	Kg/m <sup>3</sup>
Conduktività termica $\lambda$	0,039	W/mK
Capacità termica specifica c	2000	J/kgK

Usato come fondo per solai o riempimento di intercapedini. Come tutti i materiali granulari, può essere incorporato in cementizi per alleggerirli, ed in quanto di origine vegetale può fungere da "polmone" di umidità.



Costo: ca. 500 €/100 m<sup>2</sup> (spessore ca. 30 cm)

# Materiali schiumosi (I)

I materiali isolanti schiumosi vengono utilizzati per coibentare le cavità dell'edificio (intercapedini, spazi tra travi, ecc.) non accessibili con altri materiali.

La formazione della schiuma avviene in genere attraverso gas espandenti come idrofluorocarburi (HFC) o idrocarburi (pentano o simili), che subendo la depressurizzazione all'uscita del contenitore passano da liquidi a gas, generando una prima espansione del materiale che li ospita. Il calore liberato dalla polimerizzazione dei componenti la schiuma finalizza l'espansione.

Il materiale, una volta a contatto con l'ossigeno e l'acqua atmosferici, subisce una reazione di indurimento che ne stabilizza la forma esterna. In genere il risultato finale è un riempimento a celle miste chiuse/aperte.

Tipicamente le schiume coibentanti sono poliuretani, e possono essere rigide o flessibili.



# Materiali schiumosi (II)

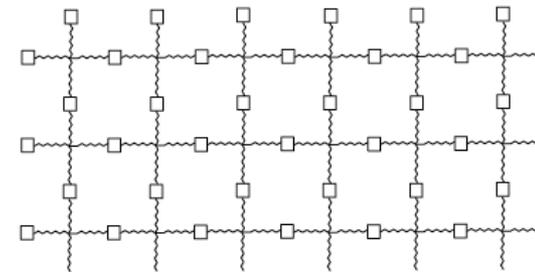
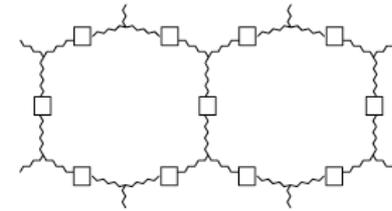
## Schiume poliuretaniche

Le schiume poliuretaniche sono di gran lunga le più usate in termini di schiume coibenti. Possono essere rigide o flessibili, a seconda della loro struttura molecolare.

Le schiume flessibili contengono una quantità cospicua di catene alchiliche, che donano mobilità molecolare, mentre nelle schiume rigide la componente alchilica è molto minoritaria.

Sono generalmente idrofobe e impermeabilizzanti, quindi da utilizzare solo se l'ambiente è adeguatamente ventilato, specie se le strutture sono in legno. Spesso usate per coibentare tubi del riscaldamento o canaline dell'aria condizionata.

Solidificano rapidamente, e possono essere risagomate al termine dell'asciugatura, se è necessario.



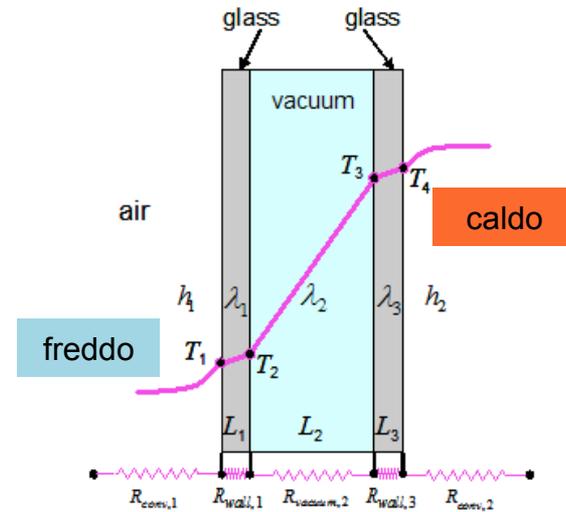
□ isocianato

~~~~~ poliolo

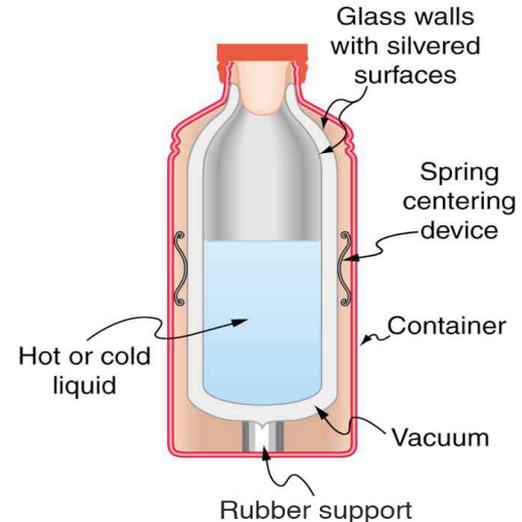


# Altri concetti di isolamento termico (I)

**Usare il vuoto come elemento isolante:** il limite massimo a cui può arrivare la strategia di abbattimento di convezione e conduzione è eliminare il tramite fisico per cui avvengono questi due fenomeni, ovvero le molecole. Questo può essere parzialmente fatto realizzando il vuoto all'interno di un'intercapedine.



Questo è il principio alla base del comune "thermos".

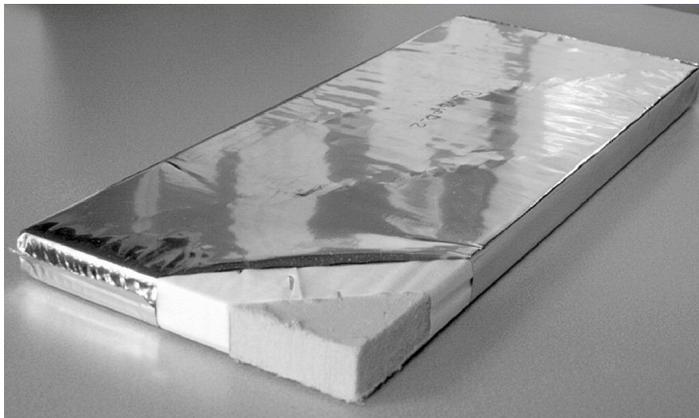
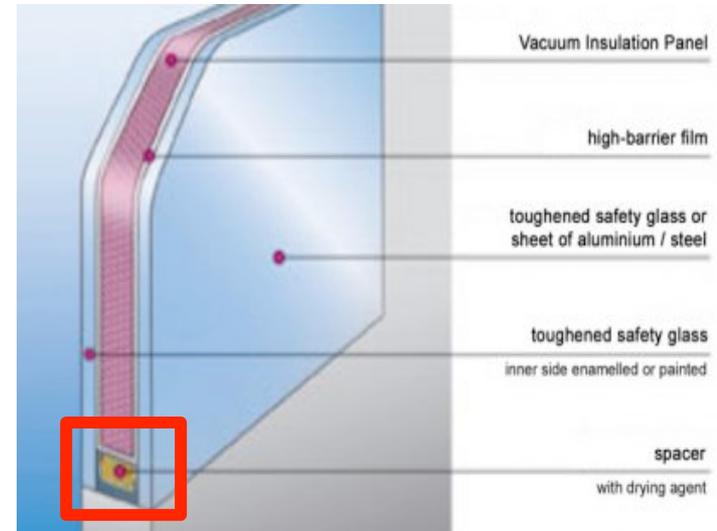


# Pannelli sotto vuoto (I)

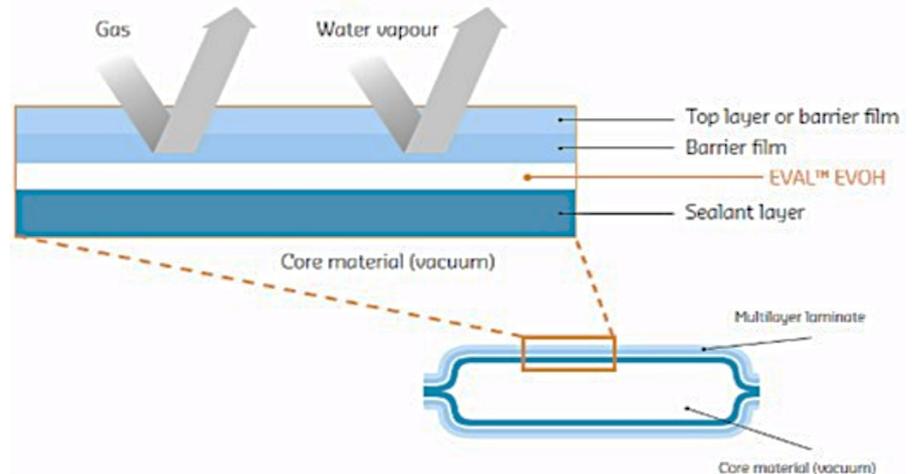
Sono costituiti da una matrice strutturale di supporto (in genere aerogel o schiuma poliuretanicca a bassissima densità), entro la quale viene fatto il vuoto (non spinto, è sufficiente ca. 40-50 mbar).

Il vuoto è mantenuto da multipli strati con diverse funzioni (barriera ai gas, riflessione radiazione infrarossa, tenuta meccanica).

E' inoltre aggiunto un "getter", materiale che assorbe l'acqua reagendo con essa e intrappolandola.



## EVAL™ EVOH in multilayer laminates for VIP



# Pannelli sotto vuoto (II)

Con questo approccio i VIPs (Vacuum Insulation Panels) ottengono conducibilità termiche sotto lo 0.01 W/mK, riuscendo a realizzare isolamenti a spessori di 1/5-1/10 rispetto agli isolanti tradizionali.

Grazie agli strati barriera e al getter il vuoto dovrebbe conservarsi per vent'anni.

Il vuoto, oltre ad abbattere drasticamente la trasmittanza termica, li rende anche acusticamente isolanti.

| DATI CARATTERISTICI            |             |                   |
|--------------------------------|-------------|-------------------|
| Peso specifico $\gamma$        | 150-300     | Kg/m <sup>3</sup> |
| Conduktività termica $\lambda$ | 0.003-0.008 | W/mK              |
| Capacità termica specifica c   | 800         | J/kgK             |

La buona capacità termica impartita dall'aerogel permette una buona inerzia termica. Richiedono molta attenzione durante il trasporto e la manipolazione in cantiere (se l'involucro dei pannelli viene danneggiato l'efficacia isolante si abbatte a quella del cuore di aerogel).

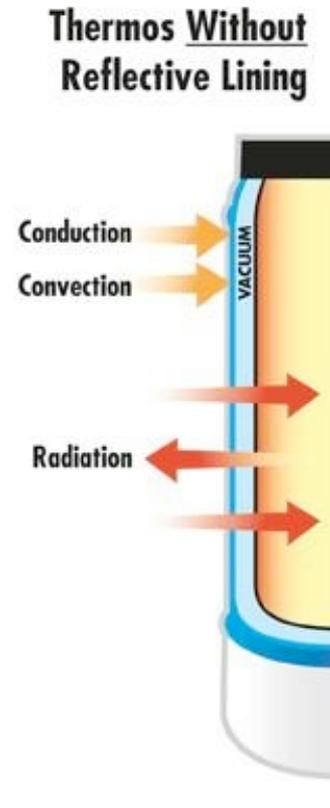
Non possono essere tagliati in cantiere: i pezzi devono essere messi in opera così come vengono consegnati dal produttore (che li taglia sulle misure fornite dal cliente).

Costo: ca. 2000-8000 €/100 m<sup>2</sup> (R39, spess. 2.5 cm)

# Isolamento per riflessione infrarossa (I)

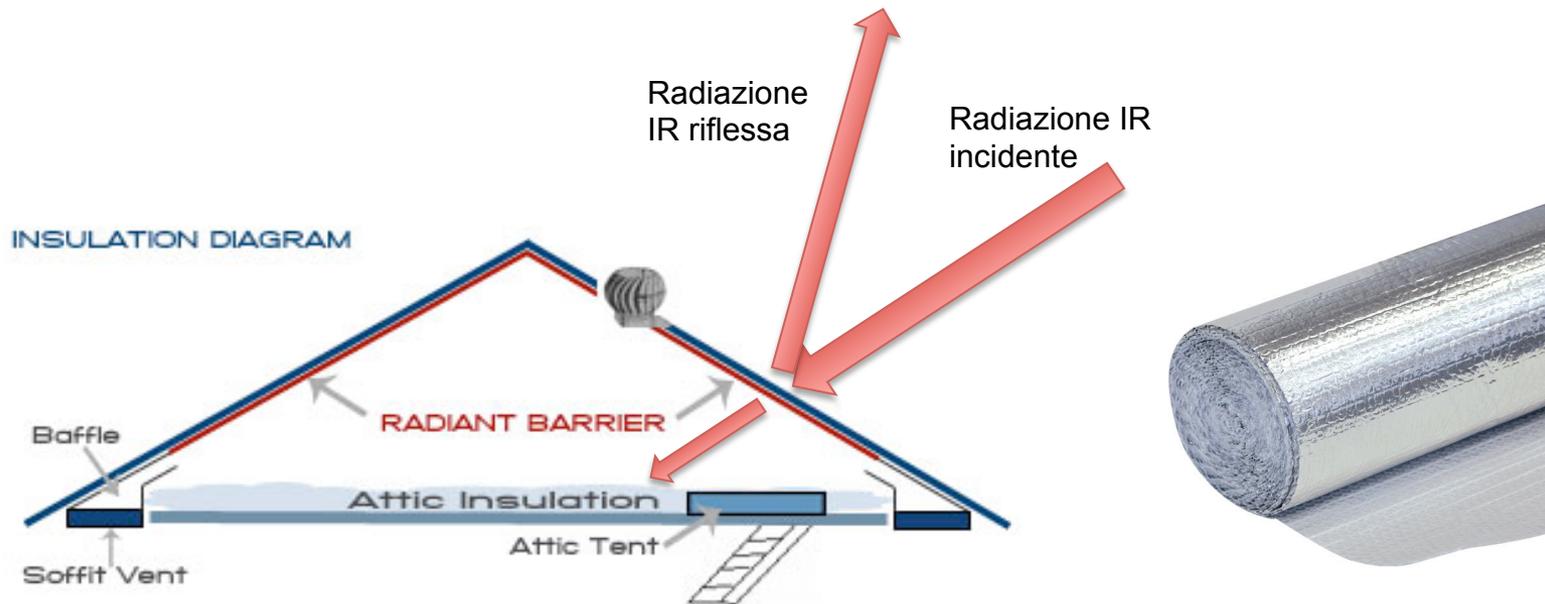
**Riflettere l'infrarosso:** oltre alle strategie di limitazione del trasporto termico inibendo conduzione e convezione, è possibile limitare l'irraggiamento attraverso materiali che riflettano l'infrarosso.

Tipicamente, i materiali che riflettono l'infrarosso sono i metalli. Isolanti termici a base di metallo? Paradosso?



# Isolamento per riflessione infrarossa (II)

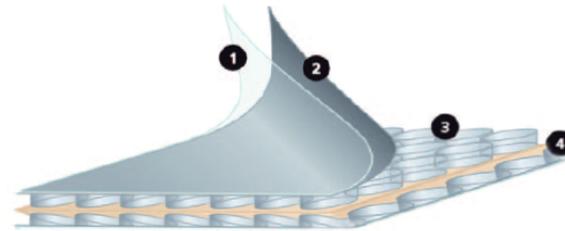
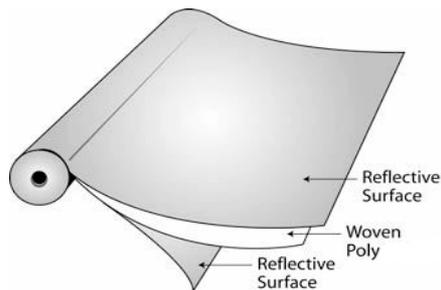
L'installazione di pannelli riflettenti la radiazione infrarossa subito sotto il tetto permette di lasciar fuori dal tetto una quota consistente di radiazione infrarossa (fino al 97%), riducendo in modo sensibile l'apporto di calore dall'esterno.



La parte riflettente dei pannelli è in genere costituita da alluminio, supportato da un foglio plastico che conferisce robustezza meccanica e riduce l'emissività infrarossa del metallo verso il basso.

# Isolamento per riflessione infrarossa (III)

E' possibile abbinare al foglio riflettente sistemi di coibentazione più articolati (lana, bolle d'aria). Sempre più spesso i pannelli in fibra di legno o vegetale sono abbinati ad una superficie riflettente.



In climi freddi il foglio metallico è orientato verso l'interno del solaio, in modo da conservare il calore all'interno.

Il materiale riflettente può anche essere depositato sul solaio come loose fill.

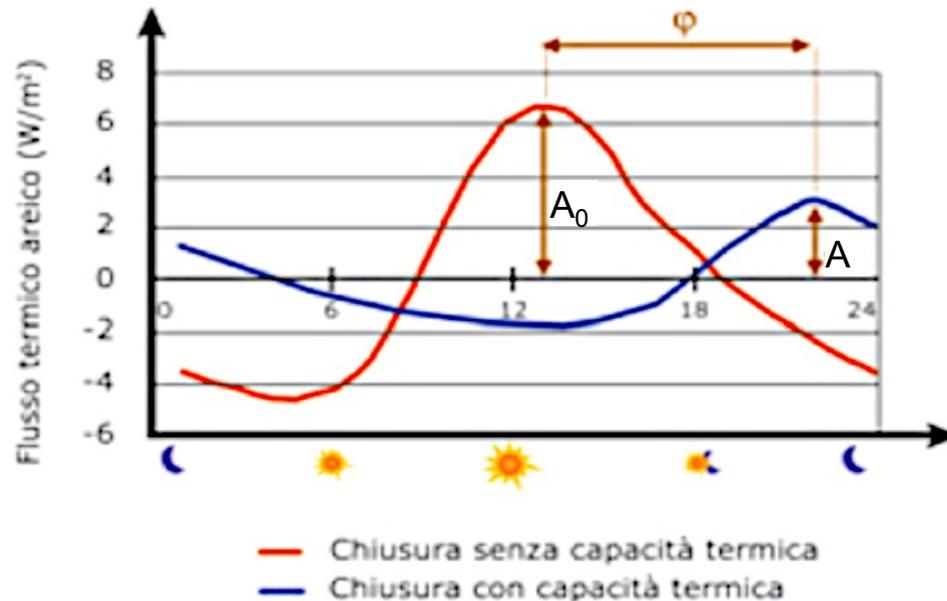


Vantaggi: spessore e peso limitati, facile da installare e da ispezionare.

Costo: ca. 600-1500 €/100 m<sup>2</sup> (a seconda del supporto)

# Inerzia termica (I)

Strutture edilizie più pesanti hanno inerzia termica maggiore. Questo aiuta a limitare le fluttuazioni della temperatura interna dovute alle escursioni giornaliere e stagionali della temperatura esterna.



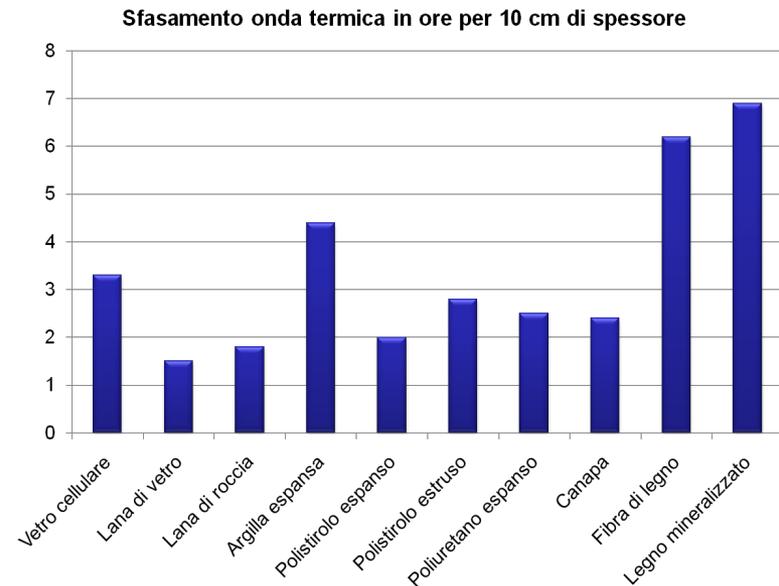
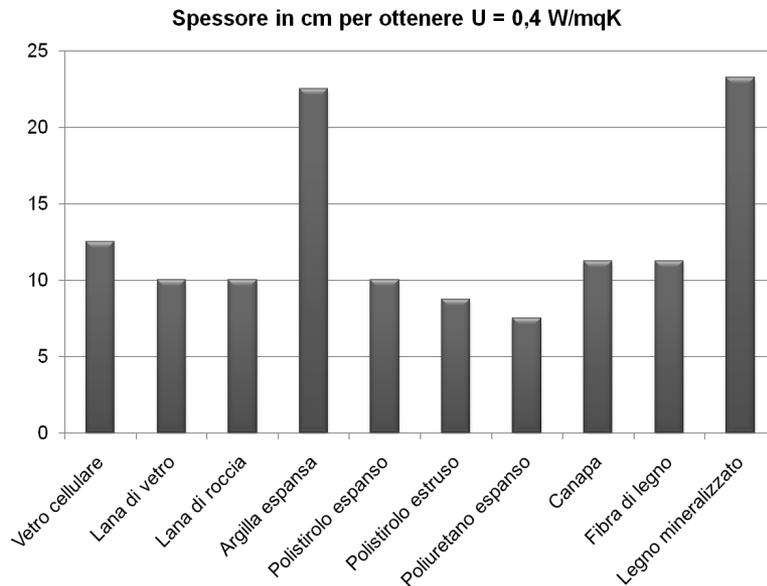
Lo sfasamento (time lag)  $\phi$  è il ritardo temporale del massimo flusso di calore della parete in esame rispetto al flusso istantaneo di un muro a capacità termica nulla. Il fattore di attenuazione (decrement factor)  $\mu = A/A_0$  rappresenta il rapporto fra il massimo flusso di calore del muro in esame e il flusso massimo di un muro a capacità termica nulla.

# Inerzia termica (II)

Se tenuta in debito conto, l'inerzia termica può essere sfruttata per ridurre sensibilmente i consumi energetici di un edificio.



Occorre incrociare i dati di capacità termica, R desiderato, spessori e masse a disposizione, caratteristiche dell'edificio di partenza ed ovviamente costi del materiale...



## Thermal insulation materials in comparison

**Thermal conductivity**  
[ $10^{-3} \text{ W}/(\text{mK})$ ]

