

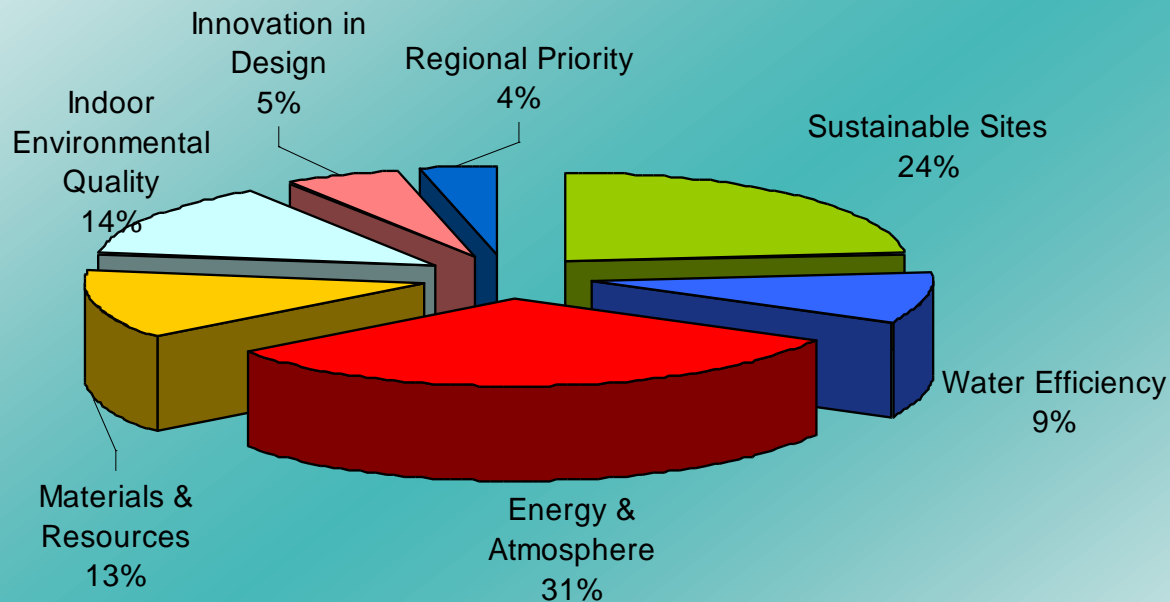
Isolanti e sostenibilità degli edifici: efficienza energetica nel periodo estivo ed invernale

prof. ing. Paolo Baggio - Univ. di Trento
DICA - Dip. di Ingegneria Civile e Ambientale

Una premessa:

- La sostenibilità ha vari aspetti: materiali, uso del territorio, acqua, aria, energia.
- Questo intervento tratterà l'uso sostenibile delle energia !

I TEMI PROGETTUALI (es. LEED 2009)



Il 31% del punteggio riguarda l'energia
Il 45% riguarda energia più IAQ

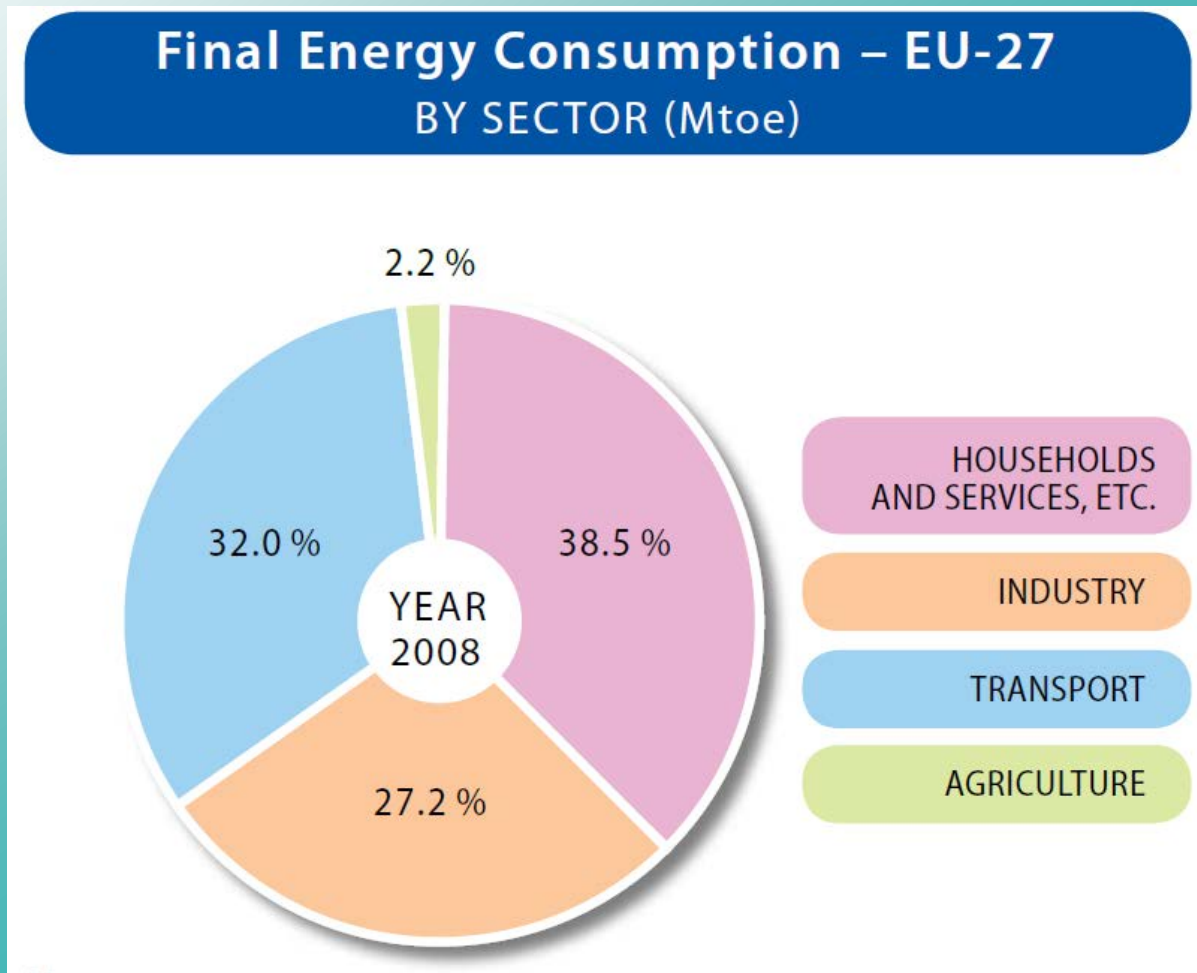
La Sostenibilità Energetica

- L'Unione Europea e gli USA sono attualmente concentrati sul miglioramento della **prestazione energetica** degli edifici
- Anche i maggiori protocolli di certificazione assegnano a questo aspetto un'importanza rilevante

Il traguardo: Near Zero Energy Building

"near zero energy building" «edificio a energia quasi zero»: edificio ad altissima prestazione energetica, Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze (dalla Direttiva 2010/31/UE)

PERCHE' "LOW ENERGY BUILDINGS" ?



Final energy consumption in Europe

(source: EU energy and transport in figures 2011 - © European Communities, 2011)

Paolo Baggio - ANPE - 2013

Resistenza termica di strati omogenei

- I dati termici utili possono essere espressi sia sotto forma di conduttività termica utile che di resistenza termica utile. Se è nota la conduttività termica, determinare la resistenza termica R dello strato con la formula:

$$R = d/\lambda$$

dove:

d è lo spessore dello strato di materiale nel componente;

λ è la conduttività termica utile calcolata secondo UNI EN ISO 10456:2008 oppure ricavata da certificati di prova.

Conduktivität thermisch λ (lambda)

- **materiali da costruzione:** valori compresi tra circa 0,2 W/(m K), (legnami - calore trasmesso in direzione perpendicolare alle fibre) e 1,9 W/(m K) (calcestruzzo con densità pari a 2400 kg/m³)
- **laterizi:** valori intermedi compresi tra 0,25 W/(m K) (mattoni forati con densità 600 kg/m³) e 0,9 W/(m K) (mattoni pieni con densità 2000 kg/m³)
- I valori da utilizzare per i calcoli relativi alle dispersioni termiche degli edifici sono reperibili anche nella norme più vecchie UNI 10351 “Materiali da costruzione -: Conduktivität termisch e permeabilità al vapore e nella norma UNI EN 12524:2001 “Materiali e prodotti per edilizia Proprietà igrometriche Valori tabulati di progetto”.

Struttura materiali edili

q_{eg} densità di flusso termico dovuto alla conduzione nel gas

q_{es} densità di flusso termico dovuto alla conduzione nel solido

q_{el} densità di flusso termico dovuto alla conduzione nel liquido

q_r densità di flusso termico dovuto alla radiazione

$\rho_v v_v h_v$ densità di flusso termico convettivo dovuto al movimento del vapor d'acqua

$\rho_a v_a h_a$ densità di flusso termico convettivo dovuto al movimento dell'aria secca

$\rho_l v_l h_l$ densità di flusso termico convettivo dovuto al movimento dell'acqua

Materiali Isolanti 1/3

- **Materiali isolanti:** costituiti da una matrice solida a struttura fibrosa, granulare, cellulare o porosa ricca di cavità piene d'aria.
- densità molto bassa, (compresa tra 20 kg/m^3 e 300 kg/m^3) perché lo spazio interno è per la maggior parte riempito d'aria
- trasmissione del calore avviene per mezzo di meccanismi diversi: conduzione attraverso la parte solida e attraverso il gas intrappolato, convezione e radiazione nel gas
- La trasmissione termica è il risultato della combinazione dei vari meccanismi: nei materiali isolanti si definisce la ***conduttività apparente***

Materiali Isolanti 2/3

- Dal momento che l'aria ha una **conduttività termica** molto bassa, pari a **0,026 W/(m K)**, e che la matrice solida dei materiali isolanti ne impedisce il movimento (altrimenti insorgerebbe il meccanismo della convezione termica) i materiali isolanti (come fibra di legno, fibra di vetro, lana minerale, polistirolo o poliuretano) hanno conduttività apparente bassa, usualmente compresa tra **0,035 e 0,055 W/(m K)**.
- Se la densità scende a valori troppo bassi ($< 20 \text{ kg/m}^3$) le prestazioni dei materiali degradano perché aumenta la trasparenza e quindi aumenta lo scambio termico per radiazione

Materiali Isolanti 3/3

- Nel caso di materiali isolanti costituiti da cellule chiuse, è possibile sostituire l'aria con altri gas ad alto peso molecolare (**ovviamente non tossici e non dannosi per l'atmosfera**) e bassa conducibilità termica, tipicamente **λ compresa nell'intervallo 0,0124 - 0,0145 W/(m K)** – circa metà dell'aria, per ridurre ulteriormente la conduttività termica apparente.
- Tali isolanti, però, sono esposti al rischio di degrado per invecchiamento in seguito ai processi di diffusione del gas con conseguente diminuzione della resistenza termica.

Il Poliuretano (PUR)

- **Il Poliuretano** è un materiale isolante espanso a cellule chiuse con un elevato grado di resistenza alla diffusione dei gas (e del vapore).
- Si presta, pertanto, particolarmente bene a venire espanso con gas a bassa conducibilità termica perché resiste ai fenomeni di diffusione. Tale prestazione può essere ulteriormente migliorata rivestendo l'isolante con una pellicola metallica.

Il Poliuretano (PUR)

- La norma UNI EN 13165:2009 “ Isolanti termici per edilizia - Prodotti di poliuretano espanso rigido (PUR) ottenuti in fabbrica - Specificazione “ fornisce le metodologie per valutare il valore utile **di progetto**, tenendo conto dell'invecchiamento, della conduttività λ_D
- La **conduttività apparente** di progetto λ_D per i pannelli di poliuretano non rivestiti è nel range 25-28 mW/(m K), per quelli rivestiti con pellicola metallica è nel range 23-25 mW/(m K)

Resistenza superficiale

- Secondo la norma UNI EN ISO 6946 I valori da utilizzare per la resistenza superficiale di una parete sono I seguenti:

Resistenze termiche superficiali (in $m^2 \cdot K/W$)

	Direzione del flusso termico		
	Ascendente	Orizzontale	Discendente
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

I valori del prospetto 1 sono valori di calcolo. Per la dichiarazione della trasmittanza termica di componenti e negli altri casi in cui sono richiesti valori indipendenti dal senso del flusso termico, si raccomanda di scegliere valori corrispondenti al flusso orizzontale.

Resistenza Termica totale

- La resistenza termica totale R_T di un componente piano per edilizia, costituito da strati termicamente omogenei perpendicolari al flusso termico, è dato da:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_n + R_{se} \quad [(\text{m}^2 \text{ K}) / \text{W}]$$

- La trasmittanza termica U vale:

$$U = 1 / R_T \quad [\text{W} / (\text{m}^2 \text{ K})]$$

Qualche numero

$$U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K} \rightarrow R = 3,33 \text{ m}^2\text{K} / \text{W}$$

$$25 \text{ cm mattoni pieni } (\lambda = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}) \rightarrow R = 0,31 \text{ m}^2\text{K} / \text{W}$$

$$25 \text{ cm mattoni forati } (\lambda = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}) \rightarrow R = 1,00 \text{ m}^2\text{K} / \text{W}$$

$$10 \text{ cm isolante } (\lambda = 0,04 \text{ W/m}^2\text{K}) \rightarrow R = 2,50 \text{ m}^2\text{K} / \text{W}$$

$$10 \text{ cm isolante } (\lambda = 0,025 \text{ W/m}^2\text{K}) \rightarrow R = 4,00 \text{ m}^2\text{K} / \text{W}$$

Parametri (ritenuti) rilevanti nel comportamento estivo

- Massa unitaria
- Trasmittanza periodica (o dinamica)
- Ritardo

Capacità termica 1/2

Il calore specifico c è il rapporto tra la quantità di calore somministrato ΔQ e la variazione di temperatura ΔT :

$$c = \Delta Q / \Delta T$$

(o più correttamente in termini infinitesimi

$$c = dQ/dT)$$

Capacità termica 2/2

- Il calore specifico dei materiali da costruzione si aggira intorno a:

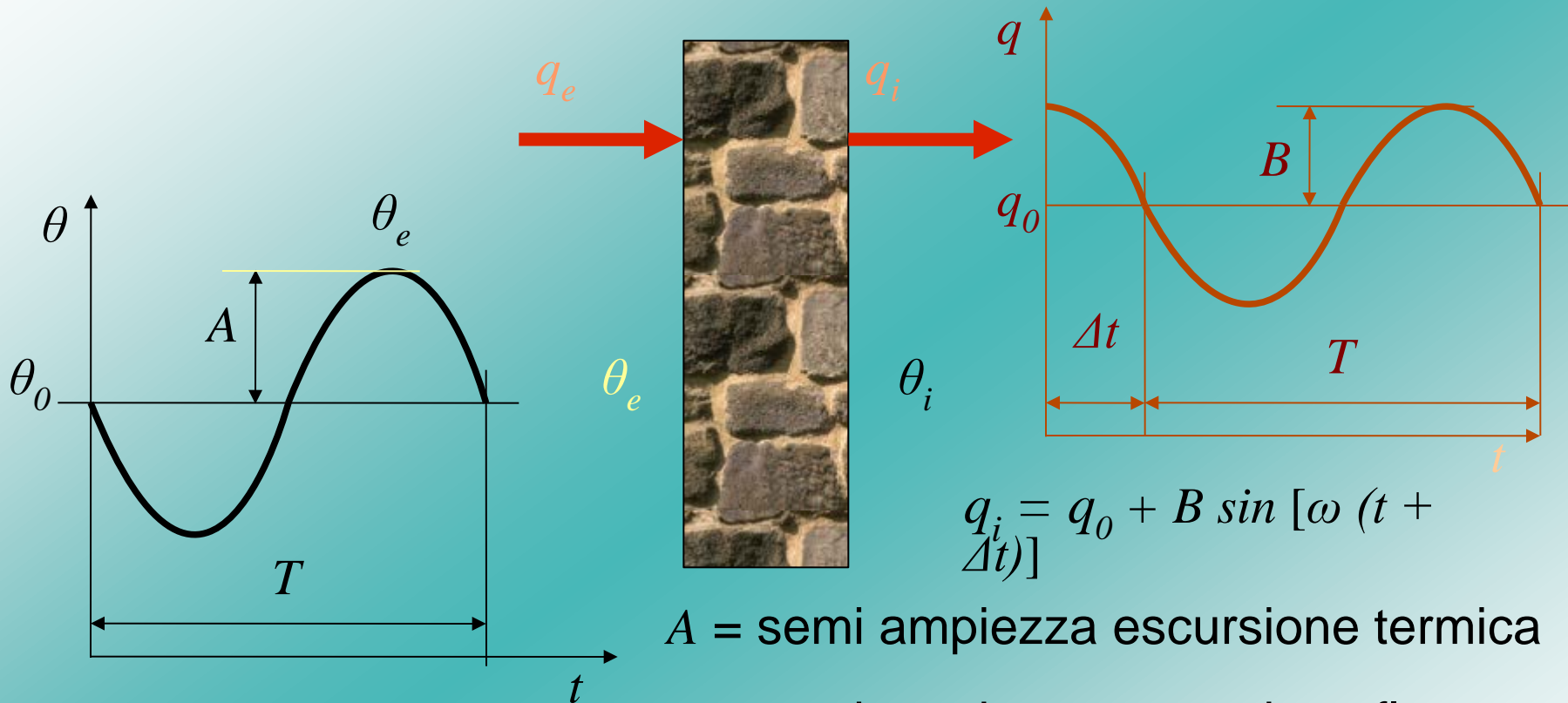
$$c = 1 \text{ kJ / (kg K)}$$

- La capacità termica:

$$C_t = c m = c \rho V$$

- dipende quindi dalla densità ρ del materiale

Trasmittanza Termica Periodica (1/3)



$$\theta_e = \theta_0 + A \sin(\omega t)$$

$$q_i = q_0 + B \sin[\omega(t + \Delta t)]$$

A = semi ampiezza escursione termica

B = semi ampiezza escursione flusso

T = periodo (24 h)

$\omega = 2\pi/T = \text{freq. ang.}$

Trasmittanza Termica Periodica (2/3)

La **trasmittanza termica periodica** tra esterno ed interno è definita come:

$$Y_{ie} = B / A = U f \quad [\text{W} / (\text{m}^2 \text{K})]$$

La potenza termica max trasmessa è quindi pari a:

$$q_{max} = U (\theta_e - \theta_i) + A Y_{ie} \quad [\text{W} / \text{m}^2]$$
$$q_{max} = U [(\theta_e - \theta_i) + A f] \quad [\text{W} / \text{m}^2]$$

Trasmittanza Termica Periodica (3/3)

In altre parole, in regime estivo (quando la temperatura media esterna è circa eguale a quella interna) è “*come se*” la trasmittanza termica stazionaria U venisse *diminuita* di una quantità pari a:

$$Y_{ie} A / (\theta_e - \theta_i) = U f A / (\theta_e - \theta_i)$$

Y_{ie} = trasmittanza termica periodica

f = fattore di attenuazione

A = semiampiezza dell'escursione termica

Involucro e capacità termica (1/3)

Con i livelli di isolamento attualmente previsti, il flusso termico attraverso l'involucro assume valori modesti (sia d'inverno , quando l'unico parametro è U , sia d'estate, quando contano anche f e Y_{ie})

Pertanto è necessaria la presenza di adeguata **capacità termica**, ma non è indispensabile che la stessa sia dovuta soltanto alla massa dell'involucro, anche le strutture interne possono contribuire.

Involucro e capacità termica (2/3)

Va ricordato che per evitare il surriscaldamento interno, il contributo usualmente cercato è dato solamente dalla capacità termica disponibile all'interno dell'edificio. In altre parole contribuisce alla capacità termica soltanto:

il lato interno delle pareti per uno spessore massimo di 10 cm;

tale spessore non può superare quello compreso tra la superficie interna ed il primo strato di isolante;

non può comunque essere conteggiato più di metà dello spessore della parete.

Involucro e capacità termica (3/3)

Nel clima del Nord Italia, usualmente il contributo della parte opaca dell'involucro al surriscaldamento estivo risulta inferiore al 10%

Solamente le strutture orizzontali (tetti), particolarmente esposte alla radiazione solare, beneficiano in misura apprezzabile della capacità termica dovuta al materiale presente.

Umidità 1/2

- L'umidità è sempre presente nell'aria che, in effetti, può essere considerata una miscela di aria secca e vapore.
- All'interno di un edificio sono quasi sempre presenti sorgenti di vapore.

Umidità 2/2

- L'umidità può causare danni alle strutture (specialmente al legno ed ai materiali isolanti) e favorire la crescita di muffe.
- Occorre pertanto tenerla sotto controllo.

Bilancio di massa di un edificio

All'interno di un edificio sono presenti sorgenti di vapore quali:

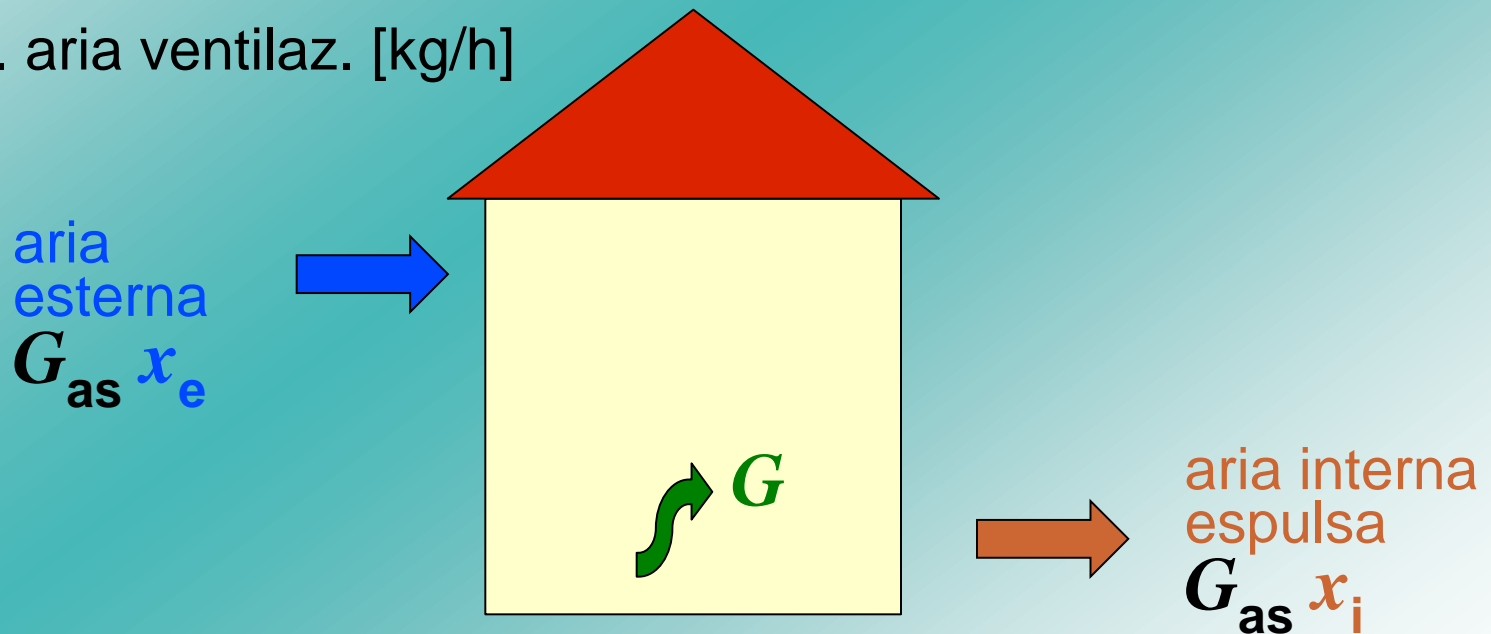
- Persone
- Igiene personale
- Cottura cibi
- Lavaggio indumenti
- Asciugatura panni

Bilancio di massa di un edificio

$$G_{as} x_e + G = G_{as} x_i \quad \Rightarrow \quad x_i = x_e + G / G_{as}$$

G = produz. vapore [kg/h]

G_{as} = port. aria ventilaz. [kg/h]



Bilancio di massa di un edificio

- Dal bilancio si deduce che normalmente l'umidità all'interno dell'edificio è maggiore rispetto all'esterno.
- Un altro modo di esprimere il bilancio è:

$$p_i = p_e + \Delta p$$

- La sovrappressione Δp è inversamente proporzionale alla portata di ventilazione G_{as}

Bilancio di massa di un edificio

Stima Δp

- Il valore di Δp può, in alternativa, essere stimato a partire dalla temperatura esterna come indicato nell'Appendice A della UNI EN ISO 13788

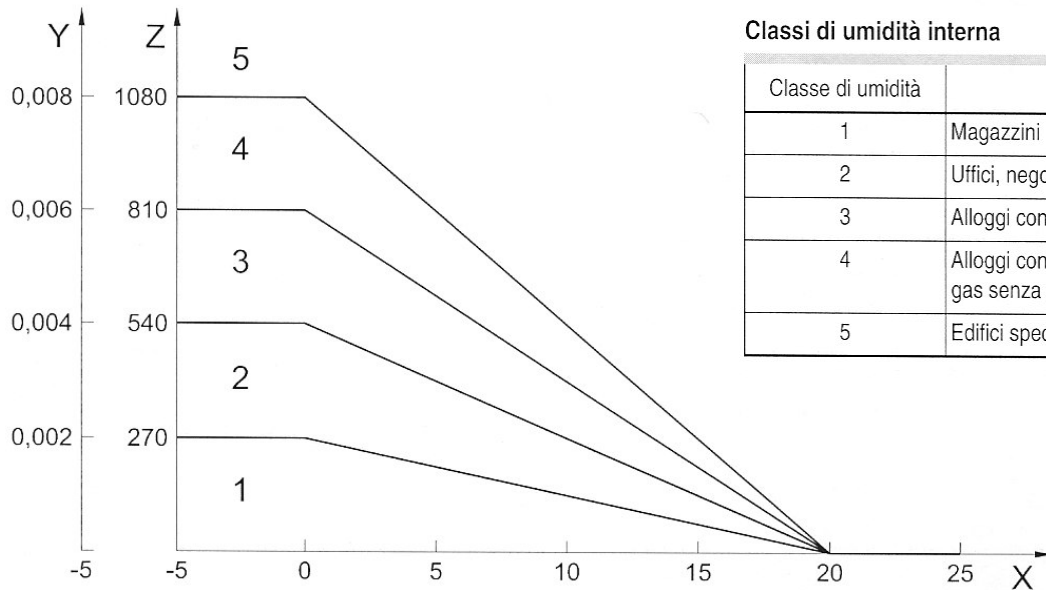
Variazione delle classi di umidità interna in funzione della temperatura esterna

Legenda

X Temperatura media mensile dell'aria esterna, θ_e in °C

Y Δv in kg/m^3

Z Δp in Pa



Classi di umidità interna

Classe di umidità	Edificio
1	Magazzini
2	Uffici, negozi
3	Alloggi con basso indice di affollamento
4	Alloggi con alto indice di affollamento, palestre, cucine, cantine; edifici riscaldati con sistemi a gas senza camino
5	Edifici speciali, per esempio lavanderie, distillerie, piscine

Bilancio energetico dell'edificio (ante 2005)

Bilancio energetico dell'edificio (post 2006)

Evoluzione del bilancio energetico dell'edificio

- La ventilazione diviene una quota importante del fabbisogno complessivo (può incidere per 20- 30 kWh/m²)

Sistemi di ventilazione controllata con recupero termico

Ventilazione controllata (1/4)

- In uso da tempo per edifici commerciali e uffici con indici di affollamento elevati (i.e. impianti di condizionamento) dove è ormai prassi consolidata il recupero termico (ruote entalpiche, etc.).
- Ultimamente vengono proposti anche per gli edifici residenziali

Ventilazione controllata (2/4)

- Negli edifici residenziali occorre prestare attenzione a:
 - portata aria non inferiore a 0,5 vol./h (sorgenti interne di inquinamento: cucina, persone, candele)
 - compatibilità con cucine, stufe (in maiolica), caminetti, e **le indispensabili prese d'aria (UNI 7129) !**
 - i consumi elettrici dovuti a ventilatori pompe di circolazione ed eventuale piastra di cottura

Ventilazione controllata (3/4)

- Negli edifici residenziali occorre prestare attenzione a:
 - manutenzione (pulizia e sostituzione filtri): chi la fa, chi la paga ?
 - il funzionamento nelle mezze stagioni: nei climi umidi potrebbero essere necessarie portate più elevate (o l'apertura delle finestre)
 - il funzionamento estivo: il ventilatore può facilmente surriscaldare l'aria ed il raffrescamento geotermico potrebbe non essere sufficiente !

Ventilazione controllata (4/4)

- Va in ogni caso progettata anche la ventilazione dell'edificio
- Nei casi più complessi è opportuno procedere a simulazioni

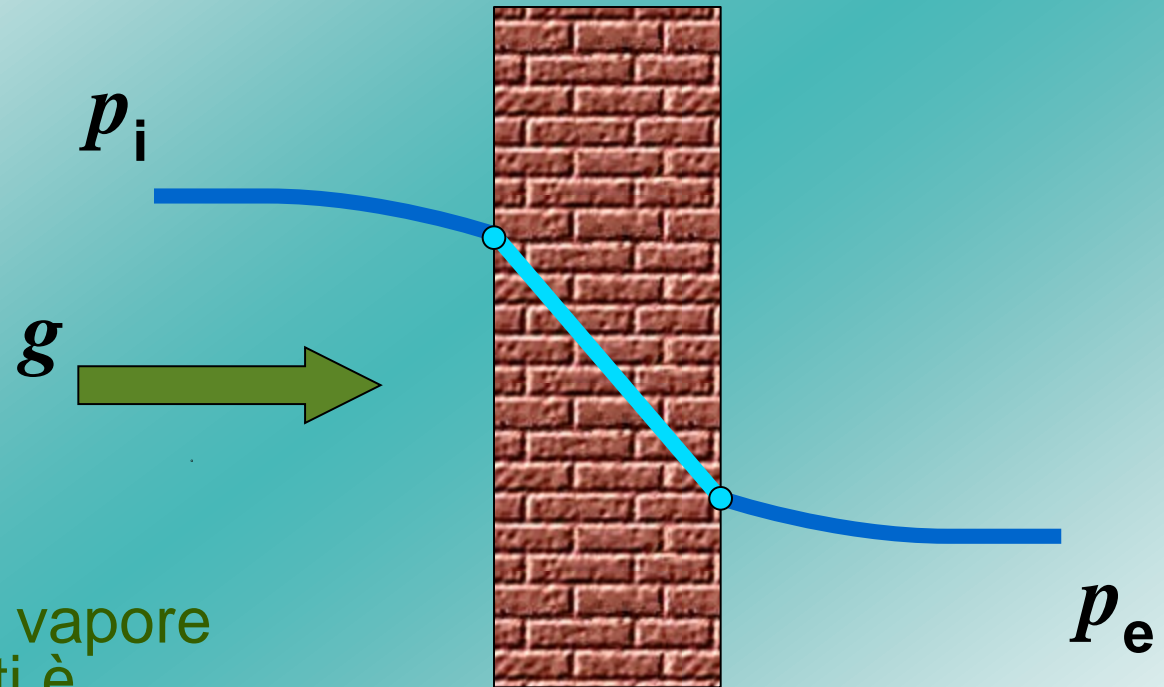
Condensazione interstiziale (1/2)

- La maggior parte dei materiali impiegati in edilizia è costituita da una matrice solida attraversata da un reticolo di pori interconnessi (microstruttura porosa o fibrosa).
- A causa della differenza tra la pressione di vapore interna ed esterna ($p_i > p_e$) si instaura un flusso di vapore che migra attraverso le pareti (il flusso per unità di area, o densità di flusso, espresso in $[\text{kg} / \text{m}^2 \text{s}]$, viene indicato con la lettera g).

Condensazione interstiziale (2/2)

- Tale flusso di vapore è, in termini assoluti, **di entità molto modesta** e tale da non modificare apprezzabilmente il bilancio di vapore degli ambienti.
- Il flusso di vapore può però, in alcune situazioni, **condensare internamente alle strutture** portando, nel tempo, all'**accumulo di acqua all'interno** delle stesse.
- La condensa accumulata provoca fenomeni di degrado e peggiora le proprietà isolanti.

Condensazione interstiziale Migrazione del vapore



La migrazione del vapore
attraverso le pareti è
approssimabile con un
processo di diffusione
governato dalla legge di Fick .

Caratteristiche dei rivestimenti superficiali esterni

- I rivestimenti superficiali esterni debbono proteggere dagli agenti atmosferici, in particolare dalla pioggia.
- **Ma, per avere un buon funzionamento della struttura, debbono anche permettere la fuoriuscita del vapore** (talvolta viene utilizzato il termine, tecnicamente impreciso, *traspirabilità*).

Osservazioni conclusive

- Nessun materiale è adatto per tutti gli usi !
- Il **poliuretano espanso** è particolarmente indicato dove occorre ottenere una resistenza termica elevata con spessori ridotti ed a costi ragionevoli !
- Essendo un materiale a cellule chiuse, è inoltre poco suscettibile a fenomeni di degrado dovuti alla migrazione dell'umidità

**Grazie a tutti voi per
l'attenzione !**