

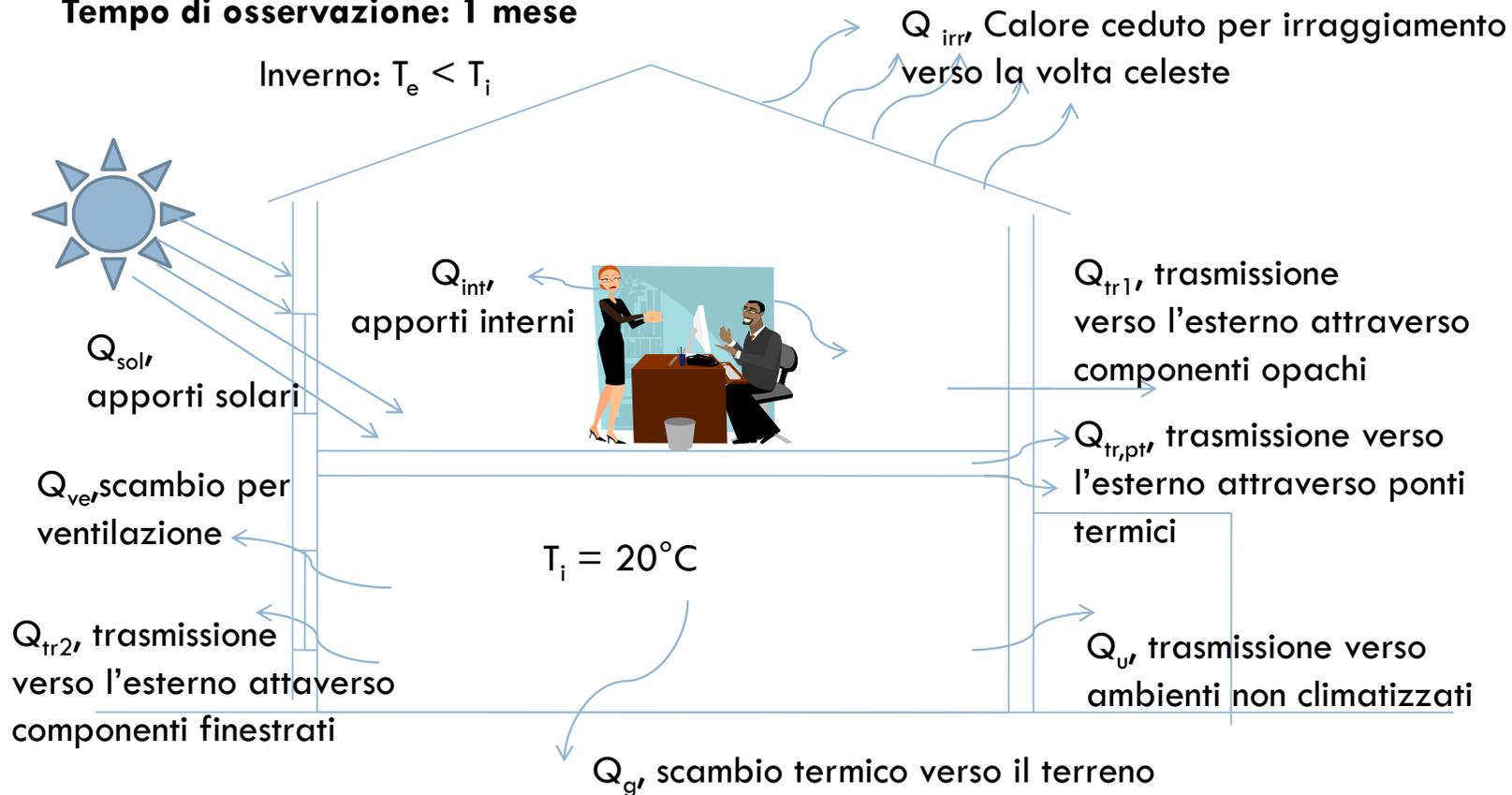
TRANSITORIO TERMICO DEGLI EDIFICI

Corso di Fisica Tecnica Ambientale
A.A. 2010-11

Le interazioni termiche tra l'edificio e l'ambiente circostante

Tempo di osservazione: 1 mese

Inverno: $T_e < T_i$



$$Q_{tr} = Q_{tr1} + Q_{tr2} + Q_{tr,pt} + Q_u + Q_g + Q_{irr} \text{ scambio termico per trasmissione [MJ]}$$

$$Q_{ve} \text{ scambio termico per ventilazione [MJ]}$$

$$Q_{gn} = Q_{int} + Q_{sol} \text{ appalti termici totali [MJ]}$$

$$\text{In inverno solitamente si ha: } Q_{gn} + Q_{ve} - \eta_{tr} Q_{tr} > 0$$

Il fabbisogno termico dell'edificio

$$\overset{\text{uscita}}{Q_{tr} + Q_{ve}} - \underset{\text{ingresso}}{\eta_{Hgn} Q_{gn}} > 0$$

η_{Hgn} è il fattore di utilizzazione degli apporti termici.

Per mantenere nell'ambiente climatizzato condizioni stazionarie di temperatura, occorre che la somma algebrica di tutti i contributi energetici sia nulla, ovvero che la somma di tutti i contributi energetici in ingresso sia uguale a quella dei termini in uscita .

Tale condizione si ottiene aggiungendo al bilancio il termine entrante:

$$Q_{H,nd} = Q_{tr} + Q_{ve} - \eta_{Hgn} Q_{gn} , \text{ ossia:}$$

$$Q_{tr} + Q_{ve} - \eta_{Hgn} Q_{gn} - Q_{H,nd} = 0$$

$Q_{H,nd}$ [MJ] è il fabbisogno mensile netto di energia per il riscaldamento.

Il fabbisogno termico dell'edificio

Durante la stagione estiva i termini in ingresso, sostanzialmente dovuti agli apporti solari, assumono un valore maggiore, in valore assoluto, rispetto a quelli in uscita. Pertanto il fabbisogno termico deve essere in uscita (raffrescamento).

$$Q_{gn} - \eta_{C,is}(Q_{tr} + Q_{ve}) > 0$$

ingresso
uscita

$\eta_{C,is}$ è il fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche.

Il fabbisogno mensile netto di energia per il raffrescamento deve bilanciare i carichi termici in ingresso:

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,is}(Q_{tr} + Q_{ve})$$

$Q_{C,nd}$ [MJ] è il fabbisogno mensile netto di energia per il raffrescamento.

Le dispersioni termiche per trasmissione

Riscaldamento :

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t + \left(\sum_k F_{r,k} \Phi_{r,mn,k} \right) \cdot t$$

Coefficiente di scambio termico globale per trasmissione della zona considerata, corretto per tenere conto della differenza di temperatura esterno.interno [W/K]

Temperatura media mensile dell'ambiente esterno

Flusso dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste [W]

Temperatura interna di regolazione

Fattore di forma tra il k-mo componente e la volta celeste

Raffrescamento:

$$Q_{C,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,C} - \theta_e) \cdot t + \left(\sum_k F_{r,k} \Phi_{r,mn,k} \right) \cdot t$$

t è la durata del mese considerato, espressa in Ms

Coefficienti di scambio termico [W/K]:

H_D = verso l'esterno

H_g = verso il suolo

H_U = verso ambienti non climatizzati

H_A = verso altre zone a diversa temperatura

$$H_{tr,adj} = H_D + H_g + H_U + H_A$$

Il coefficiente di dispersione termica

$$H_{tr,adj} = \sum_k A_k U_k b_{tr,k} + \sum_j \Psi_j L_j b_{tr,j} + \sum_i \chi_i b_{tr,i}$$

In cui:

A_k è l'area del k-mo componente opaco o vetrato [m^2]

U_k è la trasmittanza del generico componente opaco o vetrato [W/m^2K]

Ψ_j è la trasmittanza lineica del j-mo ponte termico [W/mK]
(EN ISO 14683 o EN ISO 10211-2)

L_j è la lunghezza del ponte termico [m]

χ_i = trasmittanza termica puntuale del ponte termico i-esimo, [W/K],
(EN ISO 10211-1). Tale valore è solitamente trascurabile.

$b_{tr,i,j,k}$ sono fattori correttivi che tengono conto di diverse differenze di temperatura e condizioni, nel caso di trasmissione verso ambienti non climatizzati, ecc.....

Fattori di correzione nel caso di dispersioni verso il terreno

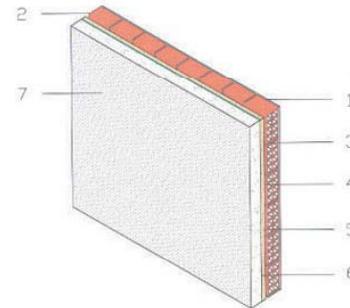
Fattore di correzione $b_{tr,g}$

Ambiente confinante	$b_{tr,g}$
Pavimento controterra	0,45
Parete controterra	0,45
Pavimento su vespaio aerato	0,80

Lo scambio termico per trasmissione attraverso i componenti edilizi

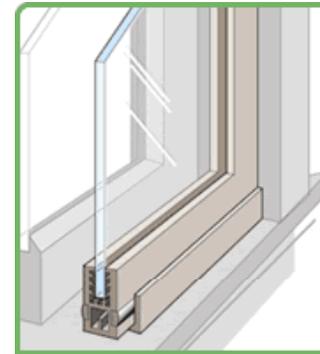
Componenti opachi :

$$U_{op} A_{op}$$

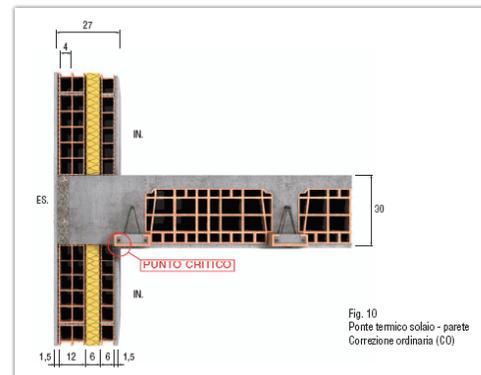


Componenti finestrati

$$U_{fin} A_{fin}$$



Ponti termici Ψ , χ



Il D.lgs .311 ed i limiti alla trasmittanza

Valori limite di trasmittanza [W/m²K]

	Pareti verticali	Coperture	Pavimenti	Chiusure trasparenti	Vetri
A	0.62	0.38	0.65	4.6	3.7
B	0.48	0.38	0.49	3.0	2.7
C	0.40	0.38	0.42	2.6	2.1
D	0.36	0.32	0.36	2.4.	1.9
E	0.34	0.30	0.33	2.2	1.7
F	0.33	0.29	0.32	2.0	1.3

Altre prescrizioni riguardanti l'involucro

Pareti divisorie: Per tutti gli edifici, tranne la categoria E8, da realizzarsi in zona climatica C, D, E ed F, il valore della trasmittanza (U) del divisorio tra alloggi o unità immobiliari confinanti deve essere inferiore o uguale a $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Lo stesso limite vale per le strutture opache che delimitano verso l'ambiente esterno locali non dotati di impianto di riscaldamento (All.1 comma 7)

Verifica alla condensa: Per tutti gli edifici ad eccezione della categoria E.8, si procede alla verifica dell'assenza di condensazioni superficiali e che quelle interstiziali delle pareti opache siano limitate alla quantità rievaporabile (norma UNI EN ISO 13788). Qualora non esista un sistema di controllo della umidità relativa interna, per i calcoli necessari, questa verrà assunta pari al 65% alla temperatura interna di $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Altre prescrizioni riguardanti l'involucro

Allegato 1, comma 9, con esclusione di E.6 ed E.8. Il progettista:

- valuta e documenta l'efficacia dei sistemi schermanti delle superfici vetrate, esterni o interni, modo da ridurre l'apporto di calore per irraggiamento solare; sulla massa superficiale delle pareti
- verifica che, in tutte le zone climatiche ad esclusione della F, per le località dove il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale $I_{m,s}$, nel mese di massima insolazione estiva, sia maggiore o uguale a 290 W/m^2 , la massa superficiale MS delle pareti opache, verticali, orizzontali o inclinate, esclusi gli intonaci, sia superiore a 230 kg/m^2 ;
- utilizza al meglio le condizioni ambientali esterne e la distribuzione architettonico-spaziale degli ambienti, al fine di favorire un'adeguata ventilazione naturale la quale, in caso di inefficacia, può prevedere l'impiego di sistemi meccanici nel rispetto del comma 13 articolo 5 DPR 412/93 (adozione di recuperatori).

Allegato 1, comma 10:

Nel caso di edifici di nuova costruzione, di ristrutturazione totale dell'involucro e di ampliamento ($>20\%$) si introduce l'obbligo: "che siano presenti sistemi schermanti esterni" per gli edifici di ogni categoria, ad esclusione di E.6 (sportivi) e E.8 (industriali e artigianali) e per immobili di superficie utile superiore a 1000 m^2 limitatamente a collegi, conventi, case di pena e caserme per la categoria E.1.

Caratteristiche dell'involucro, in base al D.P.R. n.59/2009

All'art.4, comma 18:

Il progettista, al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti.....

a) valuta puntualmente e documenta l'efficacia dei sistemi schermanti delle superfici vetrate, esterni o interni, tali da ridurre l'apporto di calore per irraggiamento solare;

b) esegue, in tutte le zone climatiche ad esclusione della F, per le località nelle quali il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva, $I_{m,s}$, sia maggiore o uguale a 290 W/m^2 :

1) relativamente a tutte le pareti verticali opache con l'eccezione di quelle comprese nel quadrante nord-ovest / nord / nord-est, almeno una delle seguenti verifiche:

1.1 che il valore della **massa superficiale** M_s ... sia superiore a 230 kg/m^2 ;

1.2 che il valore del modulo della **trasmissione termica periodica (YIE)**... sia inferiore a $0,12 \text{ W/m}^2 \text{ K}''$;

2) relativamente a tutte le pareti opache orizzontali ed inclinate che il valore del modulo della trasmissione termica periodica Y_{IE} ...sia inferiore a $0,20 \text{ W/m}^2 \text{ K}''$;

Caratteristiche dell'involucro, in base al D.P.R. n.59/2009:

c) utilizza al meglio le condizioni ambientali esterne e le caratteristiche distributive degli spazi per favorire la ventilazione naturale dell'edificio; nel caso che il ricorso a tale ventilazione non sia efficace, può prevedere l'impiego di sistemi di ventilazione meccanica nel rispetto del comma 13 dell'articolo 5 decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412.

Gli effetti positivi che si ottengono con il rispetto dei valori di massa superficiale o trasmittanza termica periodica delle pareti opache previsti alla lettera b), **possono essere raggiunti, in alternativa, con l'utilizzo di tecniche e materiali, anche innovativi, ovvero coperture a verde, che permettano di contenere le oscillazioni della temperatura degli ambienti in funzione dell'andamento dell'irraggiamento solare.** In tale caso deve essere prodotta una adeguata documentazione e certificazione delle tecnologie e dei materiali che ne attestino l'equivalenza con le predette disposizioni.

Prestazioni dell'involucro in regime estivo secondo le LINEE GUIDA NAZIONALI

Sulla base dei valori assunti dal parametro $EP_{e,inv}$, si definisce la seguente classificazione, valida per tutte le destinazioni d'uso:

Prestazioni	Qualità prestazionale	$EP_{e,inv}$ kWh / (m ² anno)	Sfasamento h	Attenuazione
Ottime	I	$EP_{e,inv} \leq 10$	$S > 12$	$f_a \leq 0.15$
Buone	II	$10 < EP_{e,inv} \leq 20$	$12 \geq S > 10$	$0.15 < f_a \leq 0.30$
Sufficienti	III	$20 < EP_{e,inv} \leq 30$	$10 \geq S > 8$	$0.30 < f_a \leq 0.40$
Mediocri	IV	$30 < EP_{e,inv} \leq 40$	$8 \geq S > 6$	$0.40 < f_a \leq 0.60$
Cattive	V	$EP_{e,inv} > 40$	$6 \geq S$	$0.60 < f_a$

in alternativasi può procedere alla determinazione di indicatori quali: lo sfasamento (S), espresso in ore, ed il fattore di attenuazione (f_a), coefficiente adimensionale. **Il riferimento nazionale per il calcolo** dei predetti indicatori è la norma tecnica UNI EN ISO 13786, dove i predetti parametri rispondono rispettivamente alle seguenti definizioni:

- fattore di attenuazione o fattore di decremento è il rapporto tra il modulo della trasmittanza termica dinamica e la trasmittanza termica in condizioni stazionarie.
- sfasamento è il ritardo temporale tra il massimo del flusso termico entrante nell'ambiente interno ed il massimo della temperatura dell'ambiente esterno.

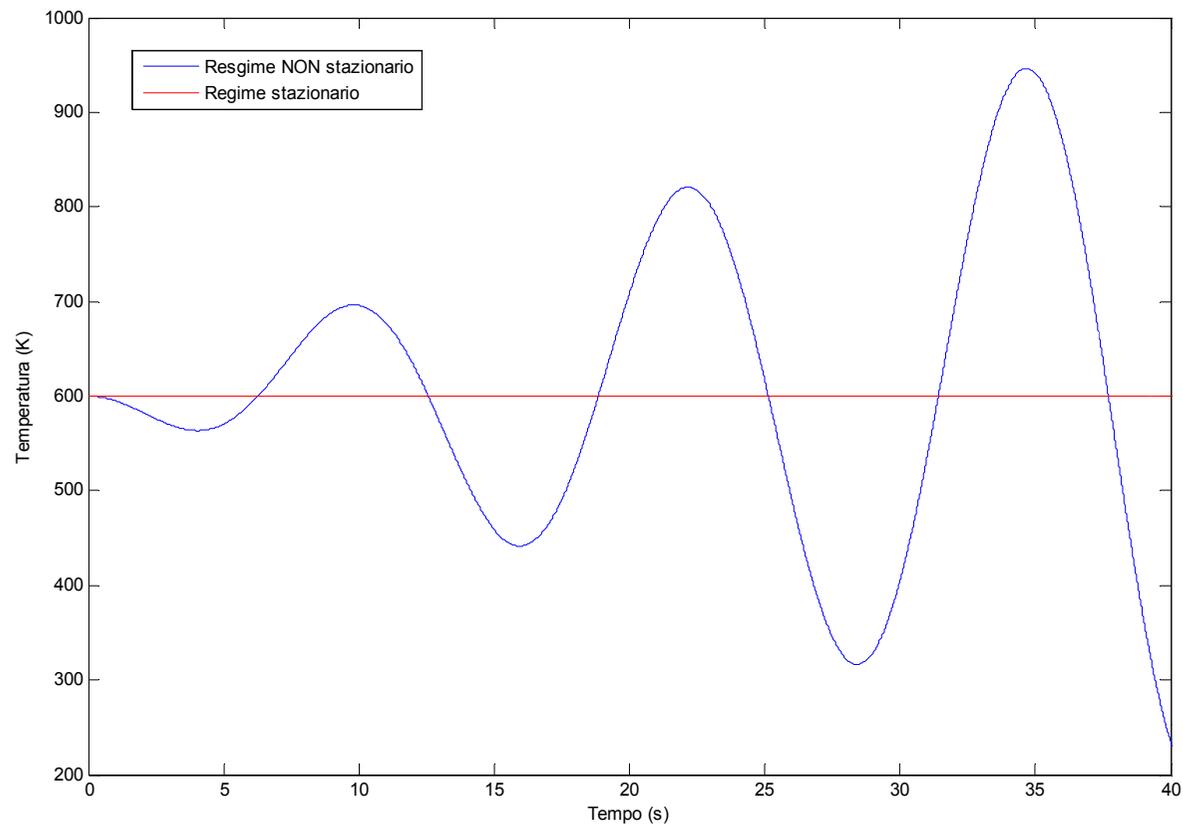
L'ipotesi di regime stazionario

- La trattazione riguardante la trasmissione del calore si fonda sull'ipotesi di regime stazionario.
- Detta G una qualsiasi proprietà do stato del sistema termodinamico, e detto θ il tempo, deve verificarsi che:

$$\frac{\partial G}{\partial \theta} = 0 \Rightarrow G(\theta) = \text{cost}$$

- Qualsiasi grandezza termodinamica si consideri (p , T , v , u , h , etc.) il suo valore deve rimanere inalterato nel tempo

L'ipotesi di regime stazionario



L'ipotesi di regime stazionario

- In base all'ipotesi di stazionarietà, è stata sviluppata tutta la trattazione che consente di pervenire a concetti e procedure molto comunemente adottati (e descritte nei precedenti capitoli) nella pratica tecnica e professionale, quali: trasmittanza termica, carico termico estivo ed invernale, etc.
- Bisogna anche considerare l'utilizzo indiscriminato dell'ipotesi di stazionarietà per qualsivoglia applicazione, può comportare errori notevoli nella valutazione della reale prestazione termica degli edifici.
- Si osservi anche che l'equazione che governa i meccanismi combinati di trasmissione del calore è da ritenersi valida esclusivamente nell'ipotesi di regime stazionario.

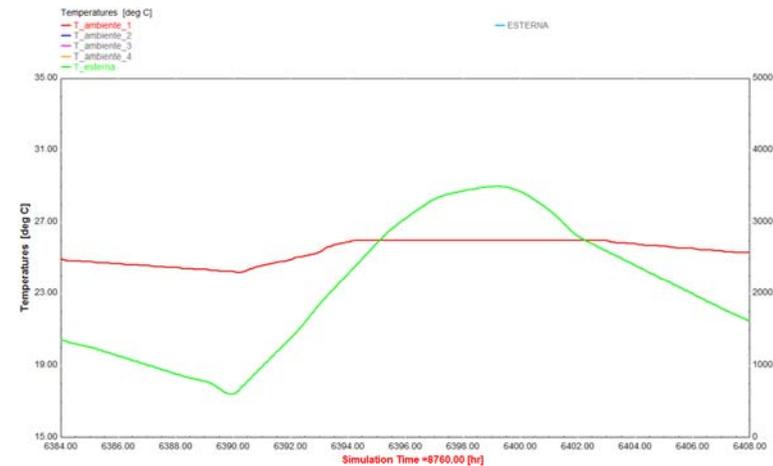
$$\dot{Q} = A \cdot \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} = UA(T_i - T_e)$$

L'ipotesi di regime stazionario

- Per quanto semplice e di facile utilizzo, l'equazione precedente deve essere adoperata in maniera accorta in quanto può comportare errori significativi in tutte le applicazioni in cui non sia possibile ritenere valida l'ipotesi di regime stazionario.
- Per quanto detto in precedenza, non si può ritenere valida l'ipotesi di regime stazionario allorquando esista almeno una grandezza termodinamica il cui valore sia variabile nel tempo.
- È evidente, quindi, che devono essere considerati non stazionari tutti quei fenomeni in cui vi sia almeno una forzante esterna che vari nel tempo, come ad esempio la temperatura esterna oppure l'irraggiamento solare.

Temperature

- Infatti, se è corretto ipotizzare costante nel tempo la temperatura interna, tale ipotesi diviene limitativa per quanto concerne le temperature esterne che, principalmente in regime estivo, sono interessate da ampie escursioni, risultando, nelle ore diurne, superiori alla temperatura interna (flusso termico entrante) e generalmente inferiori nelle ore notturne (flusso termico uscente).



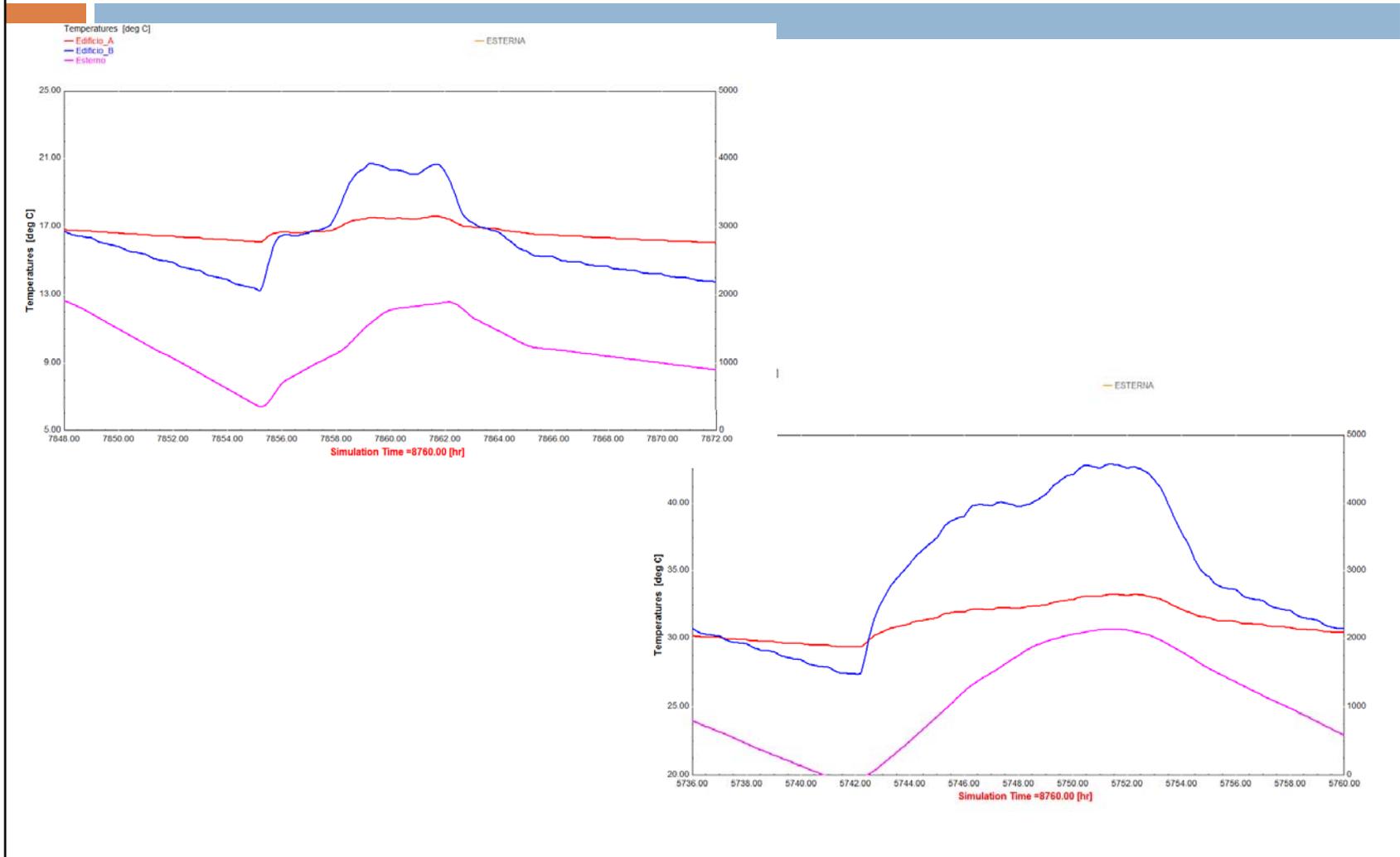
Transitorio termico: fenomenologia

- Alla luce di tali considerazioni, lo scambio termico attraverso le strutture non può basarsi solo sulla trasmittanza dell'elemento edilizio, la quale, come appena detto, costituisce parametro significativo solo nell'ipotesi di costanza nel tempo della differenza di temperatura tra interno ed esterno e quando sussiste ancora un'altra condizione, cioè che il materiale (parete) attraversato dal flusso di calore sia anch'esso andato a regime, e cioè non sia interessato da fenomeni di accumulo di energia ma solo da trasferimento di calore dall'ambiente a temperatura maggiore verso l'ambiente a temperatura minore, in accordo con il secondo principio della termodinamica.
- Molti dei concetti legati al transitorio termico degli edifici sono già noti dall'esperienza comune.
- Infatti, si supponga di considerare due edifici (Edificio A ed Edificio B) identici per geometria ed esposizione, le cui superfici disperdenti abbiano la stessa trasmittanza ($U_A = U_B$) ma con strutture differenti. Nel primo caso (edificio A), la muratura è costituita da una struttura "pesante"; nel secondo caso (edificio B), la muratura è costituita da una struttura "leggera"

Transitorio termico: fenomenologia

- Avendo supposto che le due trasmittanze coincidono, si potrebbe dedurre che i due edifici abbiano comportamento termico identico.
- La realtà invece mostra che i due edifici si comportano in maniera totalmente diversa. L'edificio A, di tipo "massivo", ha una grande capacità di accumulo dell'energia e quindi risente "in ritardo" ed "in maniera attenuata" della variazione di temperatura esterna. Viceversa, l'edificio B, di tipo "leggero", risente quasi istantaneamente dell'effetto delle variazioni delle temperature esterne.

Confronto edifici A & B, impianto spento



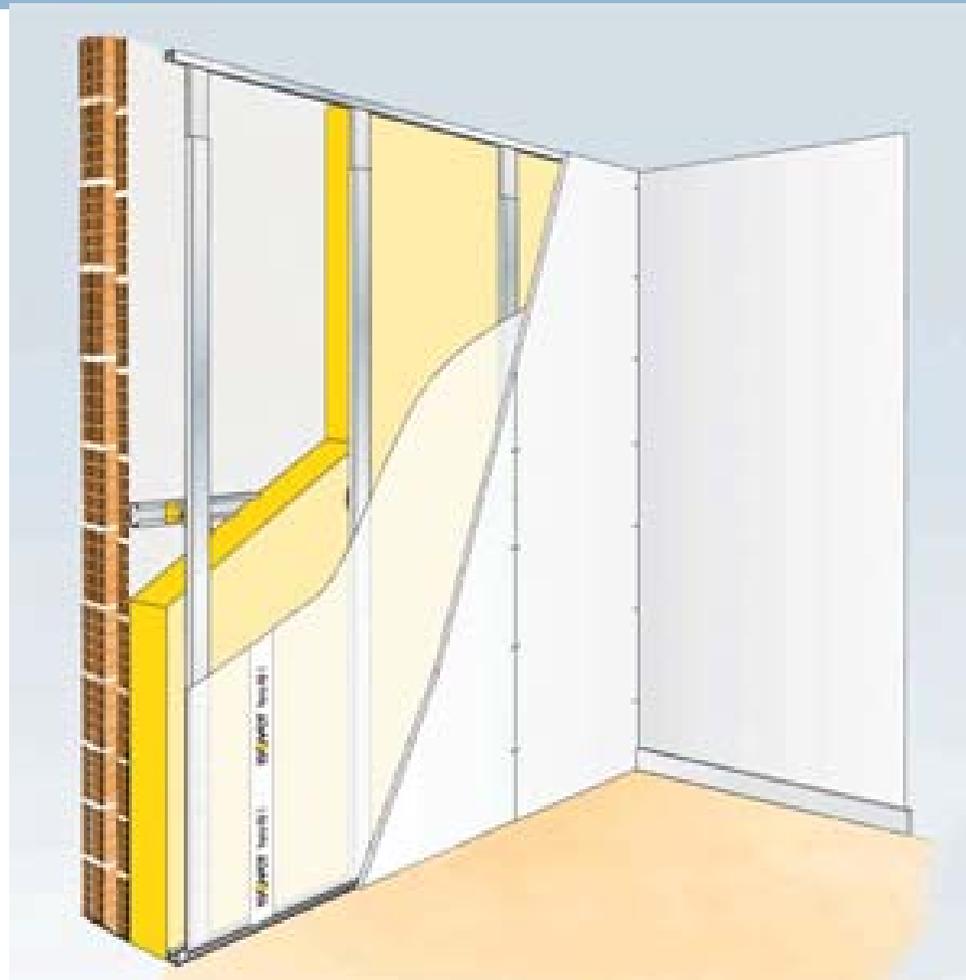
Confronto edifici A & B

- l'edificio A risente in maniera molto meno marcata, rispetto all'edificio B, delle variazioni di temperatura ed irradiazione esterna, mostrando un andamento del profilo di temperatura molto più stabile nel tempo. Questo è tanto più evidente in estate.
- È noto che edifici molto "massivi", di fatto non hanno bisogno di raffrescamento estivo, in quanto la temperatura interna riesce ad essere, in assenza di impianti di climatizzazione, sufficientemente bassa anche nelle ore più calde della giornata.
- Viceversa, in un edificio leggero, in estate, senza impianto di climatizzazione, le temperature possono raggiungere valori assolutamente intollerabili per gli individui.
- Altrettanto noto è il fatto che in una giornata di sole, ma in inverno, l'edificio "massivo" risulta comunque freddo (sempre in assenza di impianti). Viceversa, un edificio leggero, risente in maniera pressoché immediata dell'incremento della temperatura esterna e dell'irraggiamento solare, con conseguente incremento della temperatura al suo interno.
- Si può quindi concludere che pareti di grande spessore e con materiali non conduttori "attenuano" e "ritardano" (o meglio, sfasano) l'effetto della variazione della temperatura esterna e dell'irraggiamento solare. Tale effetto di sfasamento ed attenuazione risulta invece molto modesto per pareti aventi poca massa ("leggere") e con materiali molto conduttivi.

Pareti multi strato

- Le conclusioni appena tratte sono da ritenersi valide esclusivamente per materiali omogenei. La situazione infatti può cambiare in maniera radicale in caso di pareti multistrato.
- In particolare, le caratteristiche di attenuazione delle pareti multistrato dipendono, oltre che dalla massa e dalla trasmittanza della parete, anche dal posizionamento dell'eventuale strato di isolante.
- Un modo semplice, ma efficace, per valutare l'effettiva capacità di attenuazione di una struttura, consiste nel considerare quale massa della struttura esclusivamente quella compresa fra l'aria interna e lo strato di isolante, ovunque esso sia posizionato. Se tale massa risulta elevata, lo saranno anche le sue caratteristiche di attenuazione.
- Lo sfasamento, invece, risente in modo trascurabile dell'ordine degli strati

Parete con scarsa inerzia termica: isolamento interno



Isolamento a cappotto



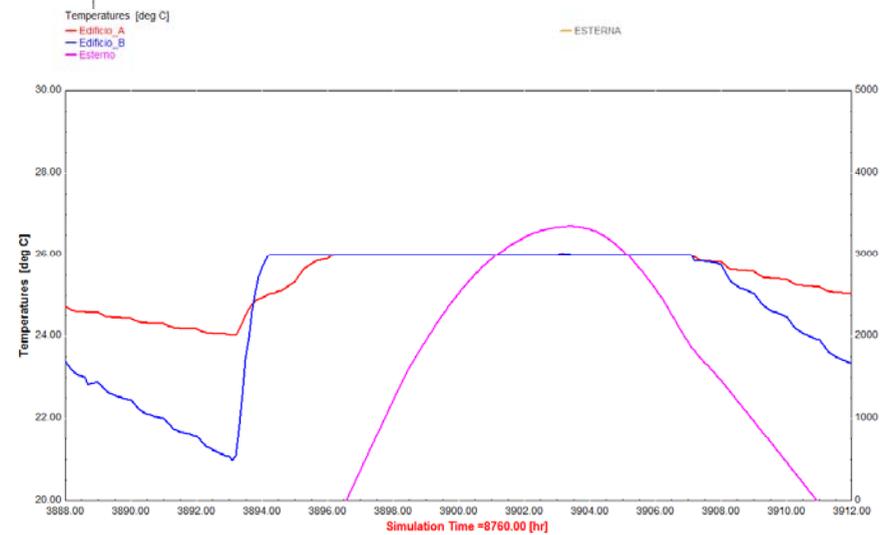
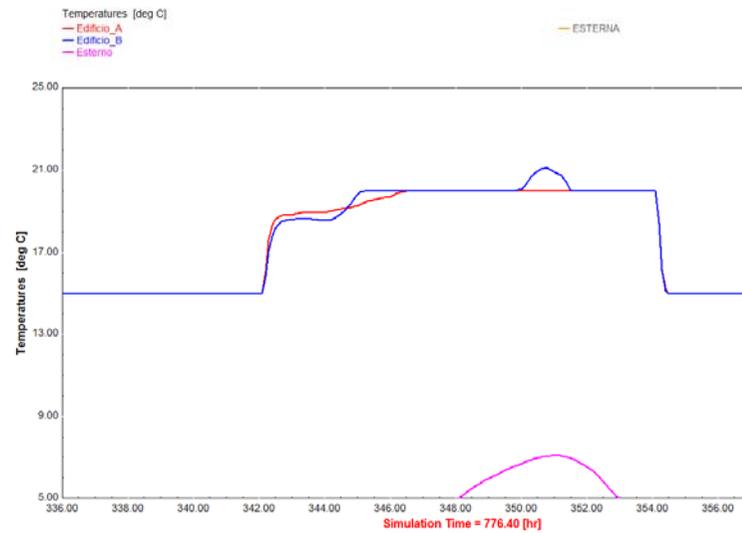
Isolamento in intercapedine



Posizionamento dell'isolante

- Per tutti gli edifici in cui l'utilizzo sia sufficientemente costante nel tempo (scuole, ospedali, etc), è preferibile posare l'isolante all'esterno.
- Nei rari casi in cui, l'utilizzo sia estremamente saltuario (poche ore al giorno) invece è preferibile che l'isolante sia all'interno. Infatti, in questo secondo caso è auspicabile che l'inerzia termica delle strutture sia la minore possibile, per consentire agli impianti di raggiungere rapidamente il valore della temperatura desiderata.
- Negli edifici "massivi" con alta inerzia termica, gli impianti impiegheranno molto più tempo ad andare a regime, rispetto agli edifici "leggeri".
- Il motivo di tale fenomeno è semplice: in edifici "massivi" l'impianto di riscaldamento dovrà riscaldare non solo il volume d'aria delimitato dalle pareti ma anche la massa contenuta nelle pareti stesse (la cui densità è tre ordini di grandezza superiore a quella dell'aria). Viceversa, in edifici leggeri sarà sufficiente riscaldare solo il volume di aria, consentendo un più rapido raggiungimento delle condizioni di set point desiderate.

Confronto edifici A & B, impianto acceso



Capacità Termica

$$C = c \cdot m$$

- L'attitudine del materiale ad accumulare energia termica è descritta dalla CAPACITÀ TERMICA (C), espressa in [kJ/K], definita come prodotto di calore specifico (c) e massa (m) del componente.
- La capacità termica, grandezza estensiva, può essere vista anche come rapporto tra calore somministrato al sistema ed aumento di temperatura che ne consegue.
- Ipotizzando, in regime invernale, di spegnere l'impianto di riscaldamento, un ambiente racchiuso da un involucro leggero (ridotta massa), tenderà, a parità di trasmittanza, a raffreddarsi più velocemente rispetto ad un locale racchiuso da strutture dall'elevata capacità termica;
- Naturalmente è valido anche il discorso contrario, cioè l'ambiente racchiuso da pareti leggere si riscalderà prima in seguito ad accensione dell'impianto di riscaldamento, rispetto ad un ambiente racchiuso da pareti pesanti, le quali, inizialmente, assorbiranno l'energia termica necessaria a riscaldarle e solo in seguito la restituiranno all'ambiente.
- In residenza continuative (le case in cui abitiamo), l'elevata CAPACITÀ TERMICA delle strutture può essere conveniente, poiché rende meno sensibile la T_{INTERNA} rispetto alla variabilità delle T_{ESTERNE} , cosicché, anche nelle ore di spegnimento dell'impianto, in regime invernale l'abitazione si raffredda in tempi dilatati. Al contrario, se la necessità dell'utente è avere un riscaldamento immediato dei locali (residenze discontinue, uffici, ecc.), conviene che le pareti non sottraggano, per riscaldarsi, calore all'ambiente. Si ribadisce che tale esempio è valido a parità di trasmittanza delle strutture dell'involucro.

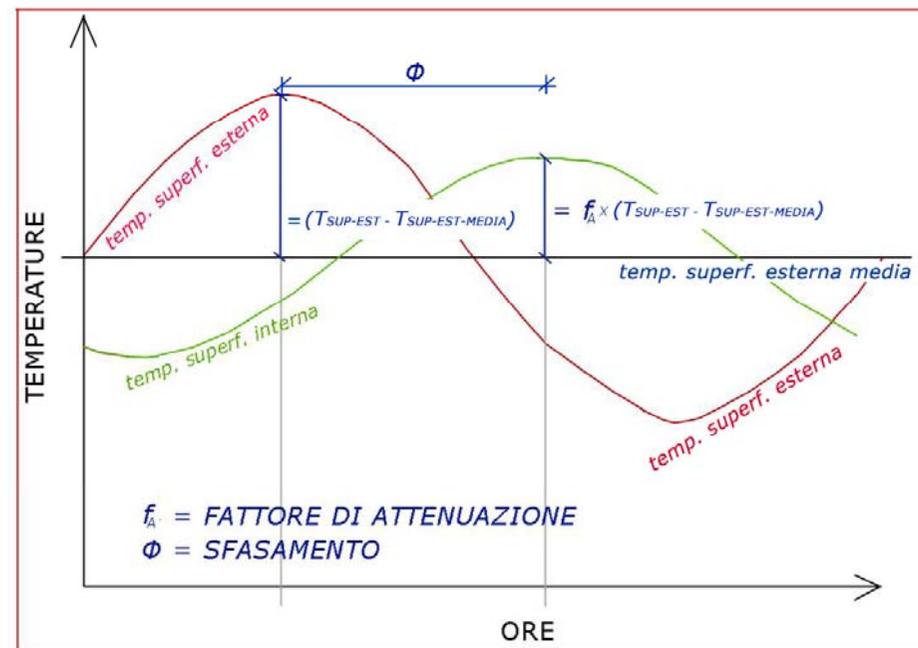
Inerzia termica

$$I = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$$

- L'INERZIA TERMICA è una grandezza definita mediante costruzione di legami funzionali tra calore specifico (c), densità (ρ) e conduttività termica (λ) dei vari strati che costituiscono un componente opaco interessato da flussi di calore; analogamente alla CAPACITÀ TERMICA, descrive l'attitudine ad accumulare energia termica da parte di un elemento edilizio, sfasandone il rilascio nel tempo.
- L'INERZIA TERMICA agisce ritardando e attenuando la trasmissione del calore che è trasferito attraverso le superfici dell'involucro dall'ambiente a temperatura superiore verso quello a temperatura inferiore.
- L'unità di misura dell'INERZIA TERMICA è il TIU (Thermal Inertia Unit), che lega, in un simbolo semplificato, le unità di misura di λ , ρ e c [$\text{J}/(\text{m}^2 \text{K s}^{1/2})$].

Inerzia Termica

- I principali effetti di un'elevata INERZIA TERMICA SONO:
 - ▣ la distanza (temporale) tra il picco della curva della temperatura superficiale esterna ed il picco relativo alla temperatura superficiale interna definisce lo SFASAMENTO (Φ), misurato in ore, dell'onda termica,
 - ▣ l'ATTENUAZIONE, ovvero la riduzione dei picchi di carico termico (in particolare, si vede come il fattore di attenuazione f_A descrive di quanto il picco della temperatura superficiale interna sia ridotto rispetto a quello della temperatura superficiale esterna).



Inerzia Termica

- Una parete caratterizzata da elevata INERZIA TERMICA garantisce elevato SFASAMENTO ed efficace ATTENUAZIONE, ritardando e mitigando gli effetti della variazione del clima esterno rispetto alle condizioni termiche interne.
- Tali caratteristiche risultano utili soprattutto in regime estivo, quando il sole incidente sulle strutture nelle ore centrali della giornata causa, se l'involucro è dotato di elevata inerzia, un riscaldamento serale degli ambienti, quando, nel caso di abitazioni, risulta possibile ventilare mediante apertura dei serramenti (nelle ore in cui l'aria esterna è fresca) o, nel caso di uffici/negozi, non vi è più interesse a garantire condizioni di comfort (si è fuori dagli orari di esercizio).
- SFASAMENTO ed ATTENUAZIONE sono correlati, e conviene avere un fattore di attenuazione quanto più ridotto possibile (a cui corrisponde un'elevata ATTENUAZIONE) ed un fattore di sfasamento superiore alle 8÷12 ore (in modo da avere il picco del flusso termico nelle ore notturne in cui è possibile raffrescare mediante ventilazione)
- In generale al fine di ridurre i carichi termici estivi bisognerebbe che lo sfasamento delle pareti di copertura fosse compreso tra 10 e 12 ore, mentre per le pareti perimetrali opache non minore di 9 ore (10 ore per i climi estivi più impegnativi). Per quanto riguarda fa i valori ottimali si attestano intorno a 0,15.

Pareti verticali con isolamento concentrato

Tipo di parete	Posizione isolamento	f_a [-]	φ [h]
Muratura portante con isolamento concentrato	interno	0,28	11
	intermedio	0,22	11
	esterno	0,20	11
Muratura non portante con isolamento concentrato	interno	0,48	8
	intermedio	0,40	8
	esterno	0,20	8
Pareti di tamponamento	prefabbricate multistrato con spessore isolante 6 cm	0,75	4
	finestrate	1,0	0

Pareti verticali con isolamento ripartito

U [W/m ² K]	M_s [kg/m ²]											
	150		200		250		300		350		400	
	f_a [-]	φ [h]	f_a [-]	φ [h]	f_a [-]	φ [h]	f_a [-]	φ [h]	f_a [-]	φ [h]	f_a [-]	φ [h]
< 0,4	0,45	6	0,35	8	0,25	10	0,15	12	0,10	14	0,07	16
0,4 ÷ 0,6	0,48	6	0,40	8	0,30	9	0,20	10	0,15	12	0,12	14
0,6 ÷ 0,8	0,54	6	0,46	8	0,35	9	0,27	10	0,20	12	0,14	14
> 0,8	0,60	6	0,50	8	0,43	9	0,27	10	0,20	12	0,14	14

M_s è ottenuta dalla somma dei prodotti delle densità dei singoli strati per i rispettivi spessori

Lastrici solari e solai in sottotetto

Tipo di solaio	Isolamento	f_a [-]	φ [h]
Terrazza esterna con isolamento concentrato	calpestabile	0,21	10
	non calpestabile	0,35	6
Solaio di sottotetto	solaio isolato e tetto non isolato	0,35	8
	solaio non isolato e tetto isolato	0,28	8
Solaio in legno con isolamento	spessore isolante 5 cm	0,94	3
	spessore isolante 6 cm	0,93	3

Diffusività termica

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

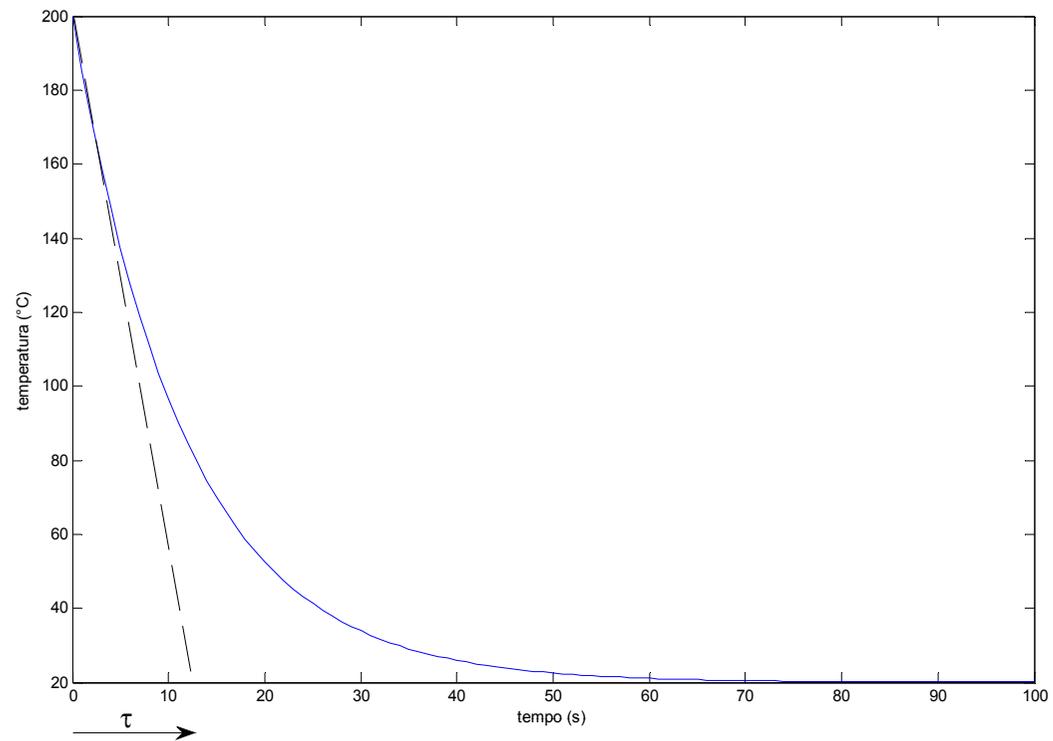
- Informazioni analoghe a quelle forniteci dall'INERZIA TERMICA più semplicemente sono fornite dalla DIFFUSIVITÀ TERMICA (a), misurata in m^2/s , definita come rapporto tra conduttività termica e prodotto di densità e calore specifico.
- Quanto più alto è il numeratore (conduttività termica) e quanto più piccolo il denominatore (densità e calore specifico), tanto più risulta elevata la diffusività termica.
- La DIFFUSIVITÀ TERMICA rappresenta, pertanto, l'attitudine di un materiale a trasmettere flussi di calore (in analogia a λ) e quindi è indice della rapidità secondo cui il calore si propaga all'interno del mezzo.
- La DIFFUSIVITÀ non condiziona il trasferimento di calore in regime stazionario, ma incide sul modo (il transitorio) in cui il sistema raggiunge tale regime.
- In altre parole, è espressione dell'energia trasmessa da un mezzo rispetto a quella accumulata nel mezzo; da quest'ultima definizione si deduce che, in regime stazionario, non essendovi per definizione accumulo, non è definibile tale grandezza fisica.

Costante di tempo

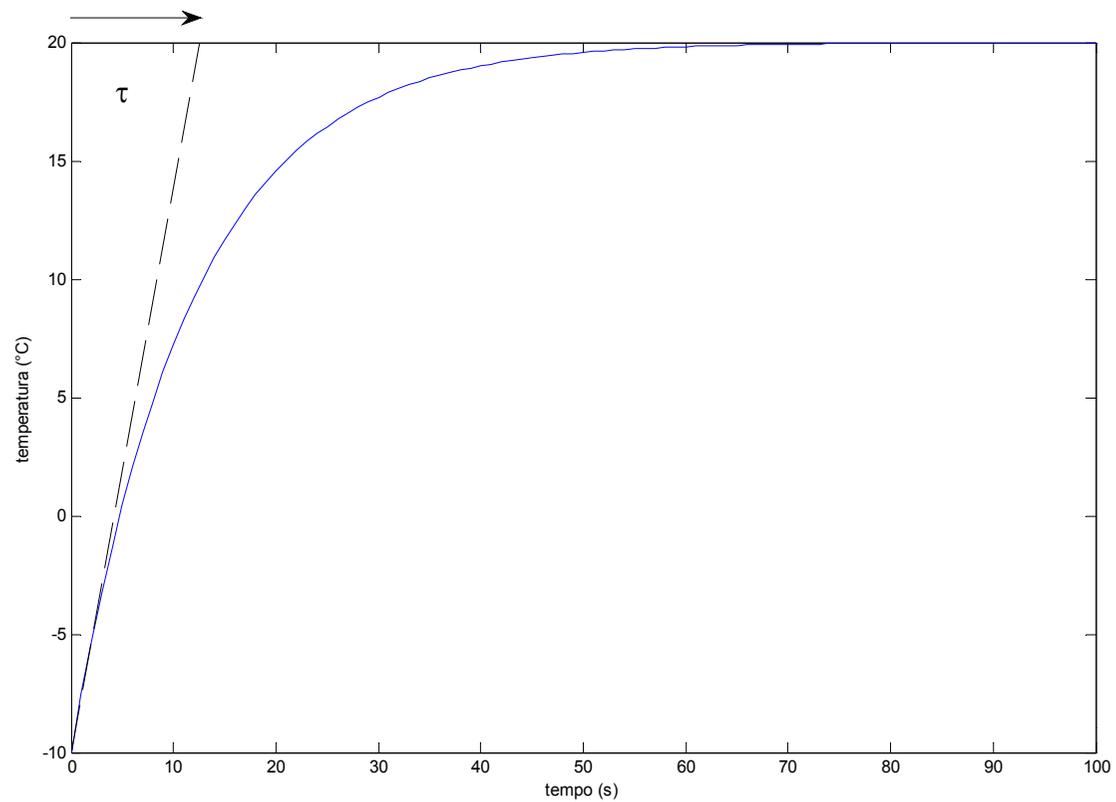
- Si immagini di avere una biglia di acciaio di piccolo diametro (1 cm) ad alta temperatura (ad esempio 200 °C) e di immergere tale biglia in un volume d'acqua molto grande alla temperatura di 20 °C.
- Il volume d'acqua sarà sufficientemente grande che l'immersione della biglia calda non produrrà variazioni apprezzabili della temperatura dell'acqua.
- L'esperienza e le misurazioni sperimentali ci dicono che la biglia si raffredderà raggiungendo gradualmente la temperatura dell'acqua. In particolare, si può dimostrare che l'andamento nel tempo della temperatura della biglia è descritto dalla seguente equazione:

$$t(\mathcal{G}) = t_{amb} + (t_0 - t_{amb}) e^{-\frac{hA}{\rho c V} \mathcal{G}}$$

Costante di tempo: raffreddamento



Costante di tempo: riscaldamento



Costante di tempo

- Dall'equazione precedente è evidente che la biglia si raffredderà tanto più velocemente quanto minore sarà la sua capacità termica ($C=mc=rcV$) e quanto maggiori saranno la sua area di scambio ed il coefficiente di scambio termico.
- La stessa equazione afferma che la biglia raggiungerà la temperatura di $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ asintoticamente solo dopo un tempo infinito. Tuttavia, se si disegna l'andamento della temperatura nel tempo, si può vedere che essa raggiunge valori molto prossimi a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ già dopo 60 secondi.
- Si può dimostrare che l'intersezione fra la tangente alla curva in corrispondenza dell'istante iniziale e l'asse delle ascisse è:

$$\tau = \frac{\rho c V}{hA}$$

- Tale parametro viene detto Costante di Tempo, in quanto fornisce una misura di quanto velocemente il processo va a regime. Maggiore è la costante temporale è più lento sarà il processo, ovvero più tempo impiegherà per raggiungere le condizioni di stazionarietà. Generalmente si assume che dopo un tempo pari a 4 o 5 volte la costante di tempo, il transitorio si sia esaurito ed il fenomeno sia andato a regime.

Costante di tempo

- Dalla formulazione analitica è anche evidente che la costante di tempo è tanto più piccola quanto maggiore è il rapporto fra superficie disperdente e volume (A/V). In altri termini, geometrie con rapporto A/V più elevato avranno transitori più brevi.
- Si definisce COSTANTE DI TEMPO DELL'EDIFICIO (T), espressa in secondi o, più frequentemente, in ore, ed identificativa del periodo necessario affinché il sistema edilizio, interessato da trasferimenti di energia sotto forma di flussi di calore, si porti in condizioni di regime stazionario.
- La COSTANTE DI TEMPO (T), solitamente riferita all'intero involucro e non ad un singolo componente di questo, è funzione della capacità termica C (e quindi dell'attitudine ad accumulare energia termica) e del coefficiente di dispersione termica (H) dell'edificio:

$$\tau = \frac{C}{UA} = \frac{C}{H} = \frac{V}{A} \frac{\rho c}{U}$$

Costante di tempo

- L'equazione precedente fornisce anche alcune importanti indicazioni riguardanti il fattore di forma dell'edificio (A/V), ovvero il rapporto fra la superficie disperdente ed il volume dell'edificio.
- È evidente che fattori di forma più elevati, corrispondono a costanti di tempo più piccole. Viceversa, edifici con fattori di forma bassi, a parità di densità, calore specifico e trasmittanza, presentano costanti di tempo più lunghe.
- Ad esempio, il forno per pizze ha la tipica forma emisferica (quindi con rapporto A/V molto basso), proprio perché si desidera che la struttura disperda calore molto lentamente e che all'atto dello spegnimento, la temperatura diminuisca in maniera estremamente graduale per evitare rotture meccaniche dello stesso.



Costante di tempo

- Similmente, le tipiche abitazioni degli eschimesi (igloo) hanno la forma emisferica per avere le minori dispersioni possibili e per ottenere un maggior transitorio nel raffreddamento.
- Edifici molto articolati, come ad esempio edifici a corte, presentano un rapporto A/V molto elevato. Quindi, mostrano, a parità di volume, dispersioni molto elevate e contemporaneamente hanno costanti di tempo molto ridotte, il che significa che all'atto dello spegnimento degli impianti di riscaldamento (o raffrescamento) la temperatura interna diminuirà (o aumenterà) molto velocemente.

