Università degli Studi di Cagliari

FACOLTÁ DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Laurea in Architettura

DICAAR

LABORATORIO INTEGRATO DI PROGETTAZIONE TECNOLOGICA A.A. 2019-2020

modulo: **Termofisica dell’edificio**

La trasmittanza termica Dinamica

Slide 1-65

Docente: ***ROBERTO RICCIU***

Argomenti della lezione

- **Riferimenti normativi: UNI 13786 / Anna Magrini: soluzioni per l'isolamento termico degli edifici esistenti. EPC ed. 2013**

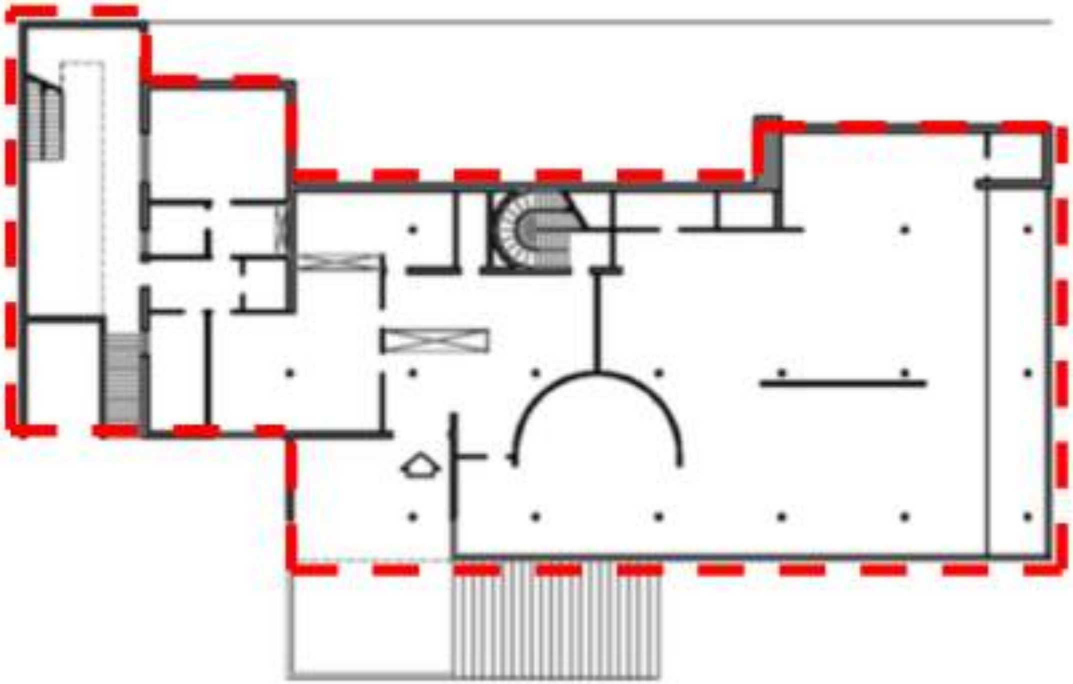
Argomenti trattati:

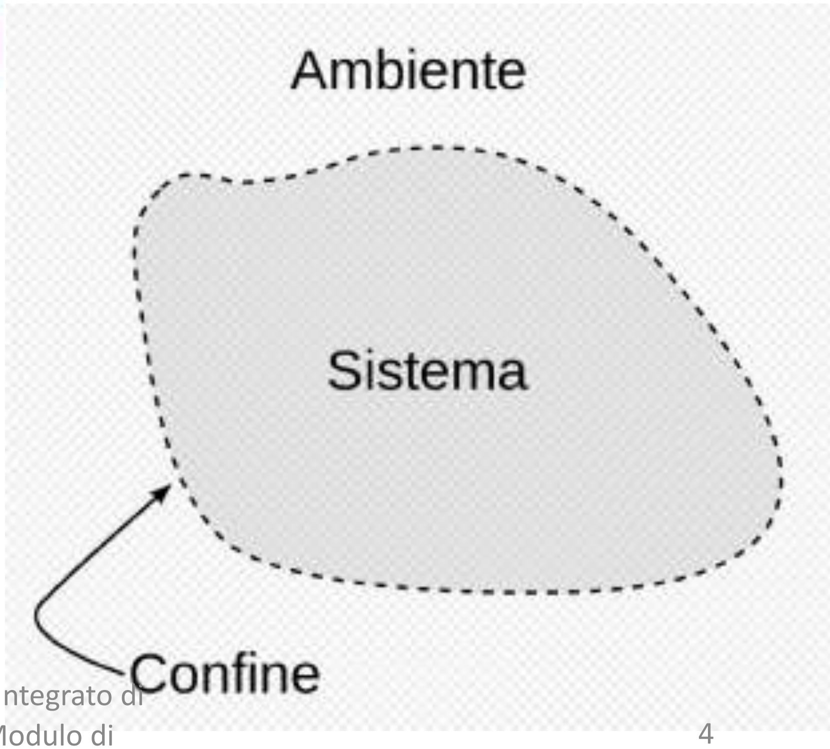
- **Grandezze termofisiche Cp e capacità termica**
- **Equazione generale della conduzione**
- **Parametri dinamici di una parete**

UNI 13786

Introduzione

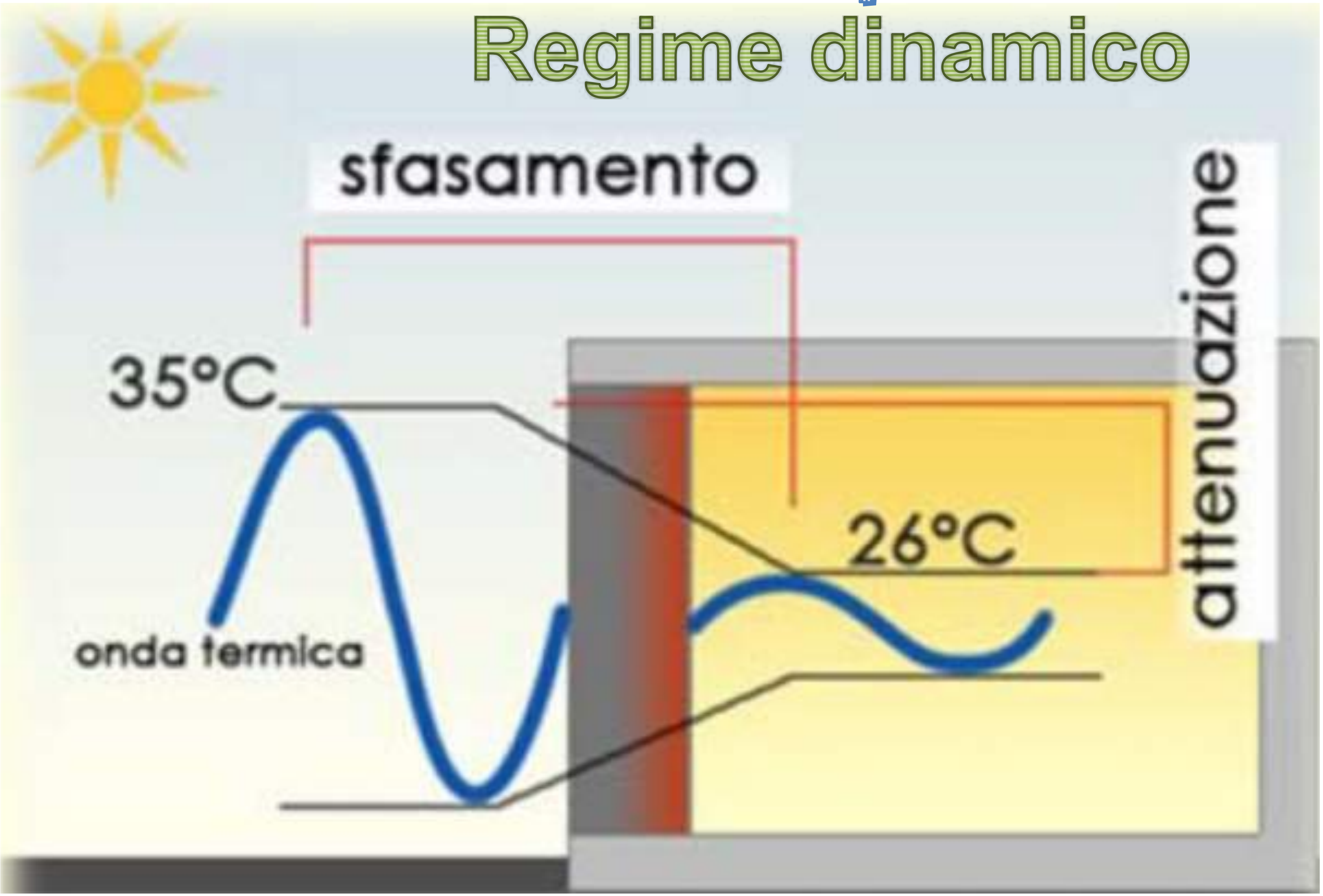
Introduzione





Fluttuazioni di temperatura

Regime dinamico



Stoccaggio di energia

Calore specifico

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \quad \left(\frac{J}{kgK}\right)$$

Capacità termica

$$C = c \cdot m \quad \left(\frac{J}{K}\right)$$

Esempio applicativo

Valutare l'energia termica necessaria ad aumentare di 20° C la temperatura di

- *1 m³ di calcestruzzo normale*
- *1 m³ di aria*

$$c = \frac{q}{m\Delta T} \quad \left(\frac{J}{kgK}\right)$$

$$\boxed{q = c \cdot m \cdot \Delta T}$$

47,5 MJ	1080 J/(kg·K)	2200 (kg·m³)	20° C
24,7 kJ	1008 J/(kg·K)	1,225 (kg·m³)	20° C

Esempio applicativo

47,5 MJ	1080 J/(kg·K)	2200 (kg·m³)	20° C
24,7 kJ	1008 J/(kg·K)	1,225 (kg·m³)	20° C

47 MJ -> 47.000.000 $J = W \cdot s$

1 h = 3600 s; 1kW = 1³ W;

1MW = 1⁶ W

47MJ -> 1,32 x 10⁴ $W \cdot h$ -> 13,2 $kW \cdot h$

24,7 kJ -> 6,86 $W \cdot h$

(conduzione e monodimensionale)

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial t} = a\,\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}}$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

Diffusività

Con T=T(t,x)

(conduzione)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Equazione del calore di Fourier

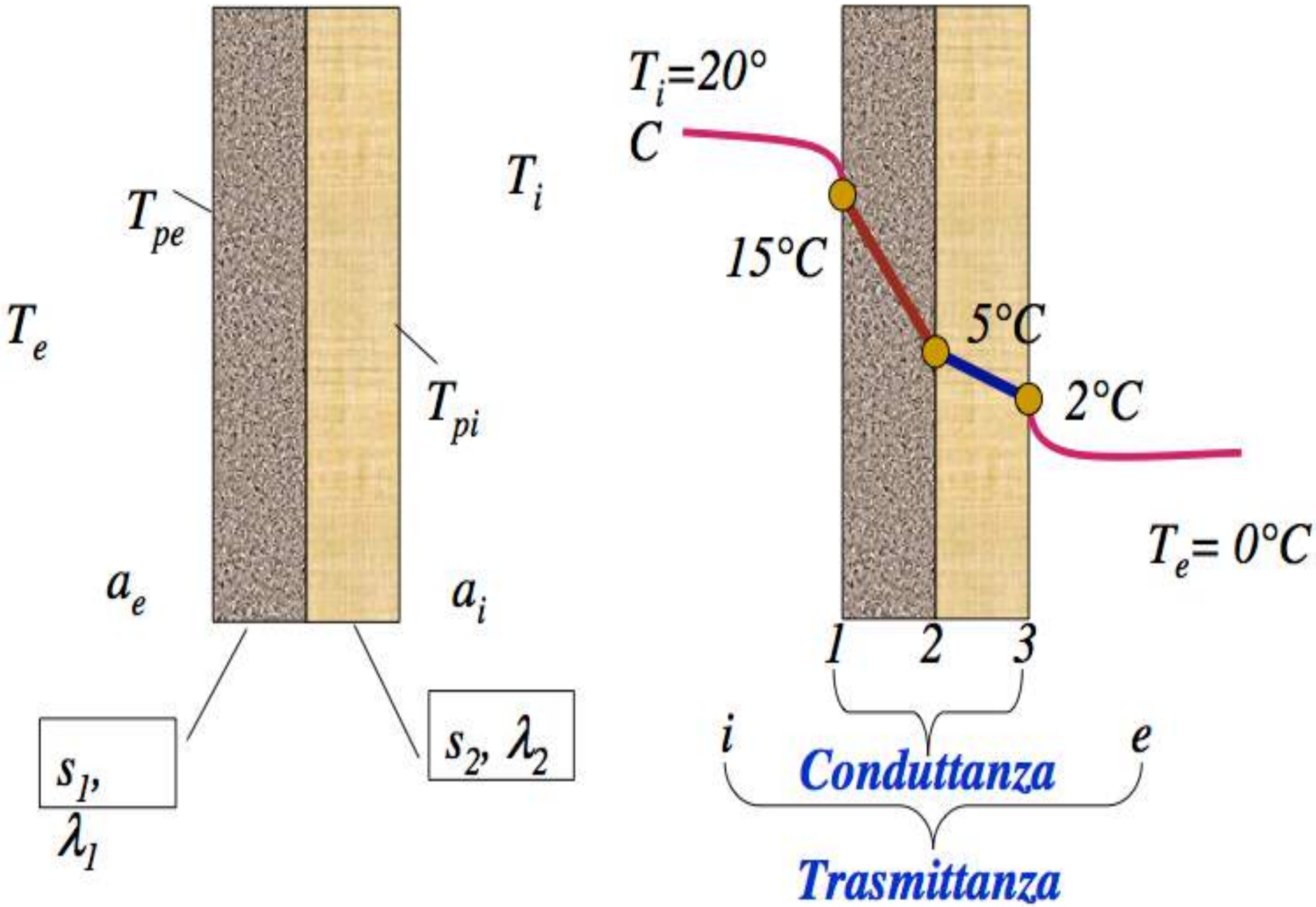
(conduzione)

$$q = -\lambda \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [\mathrm{W}]$$

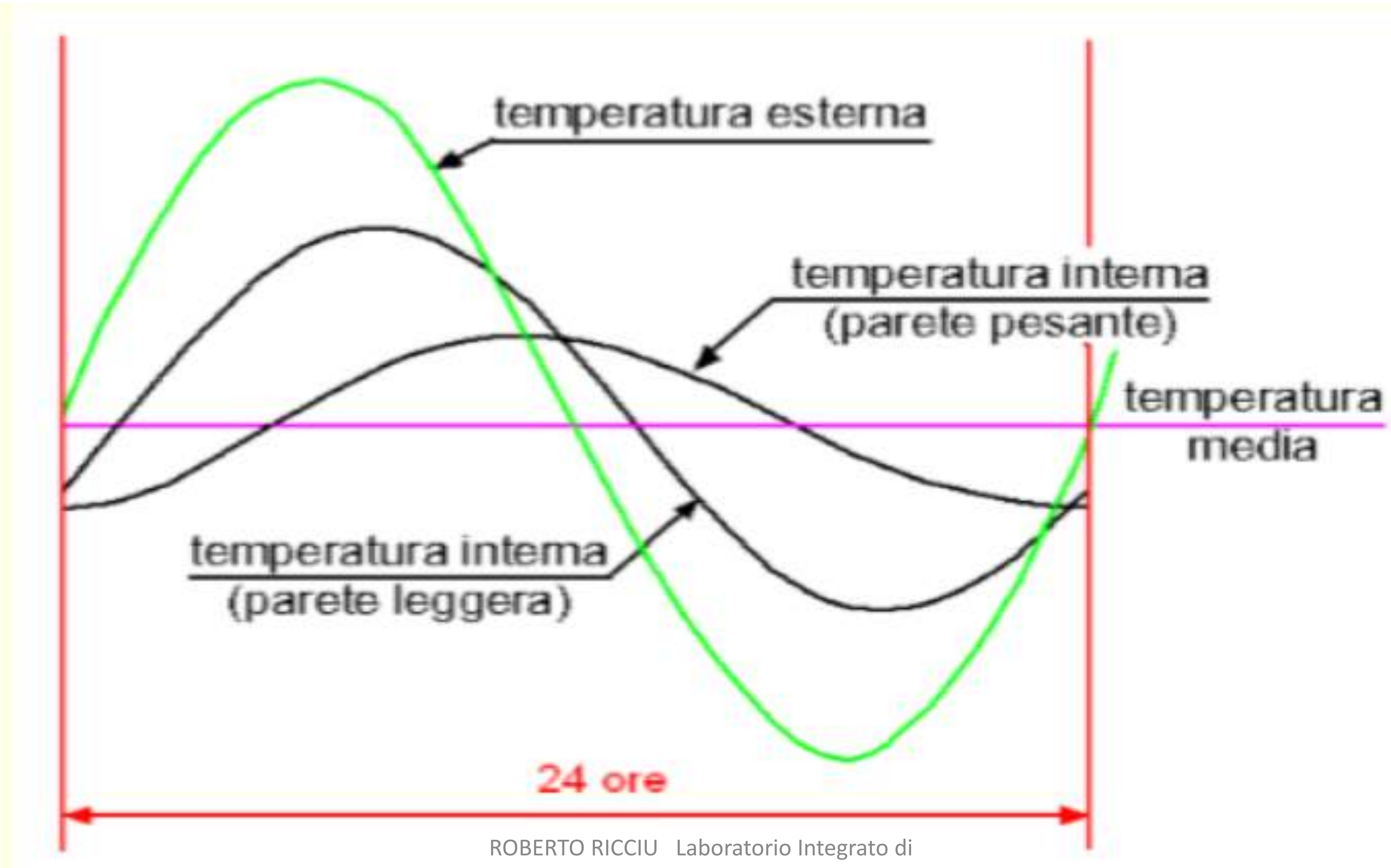
Conduttanza e Trasmittanza Termica

Trasmissione del calore attraverso una parete

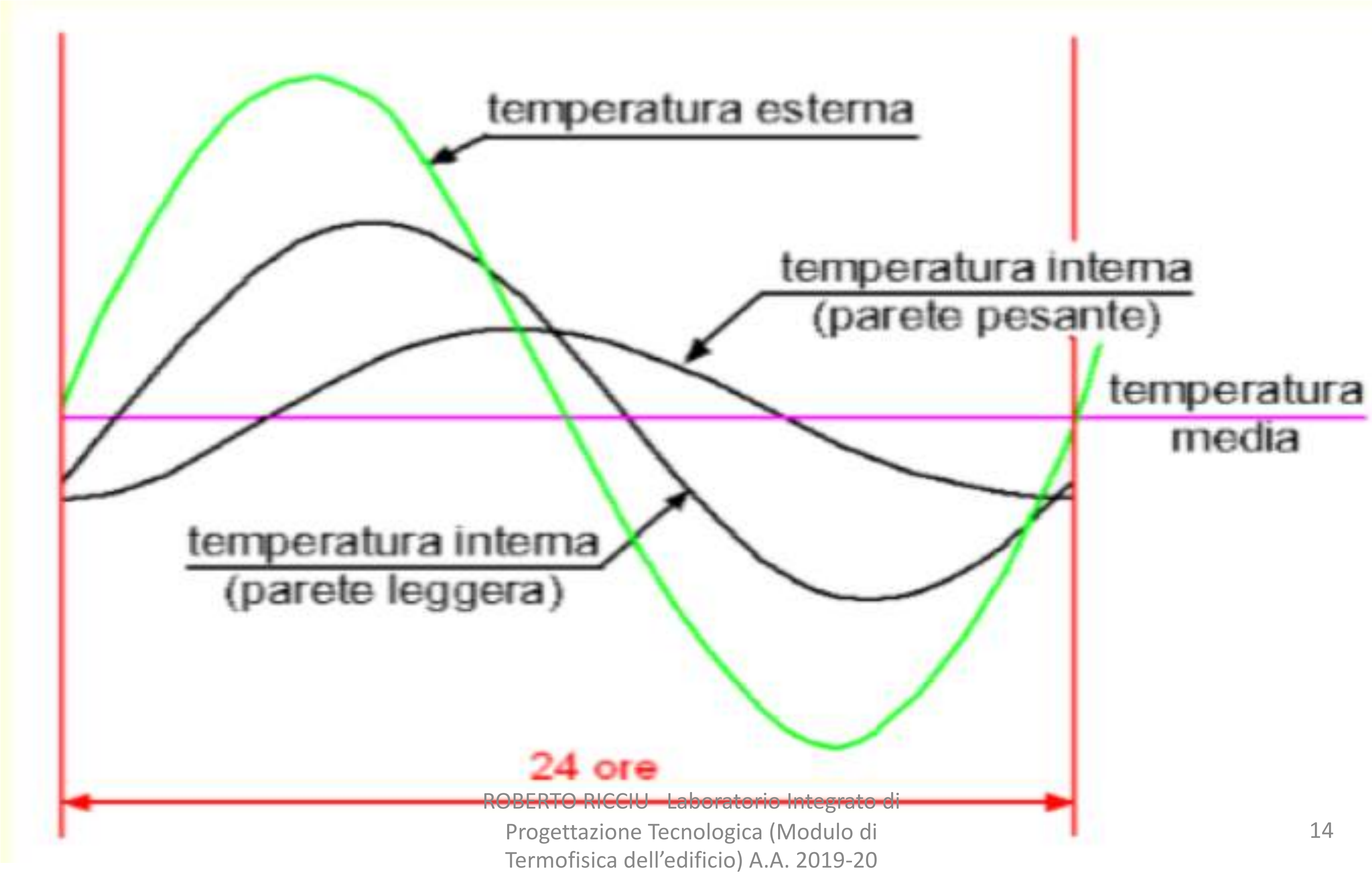
Flusso monodimensionale /Regime stazionario /Pareti omogenee



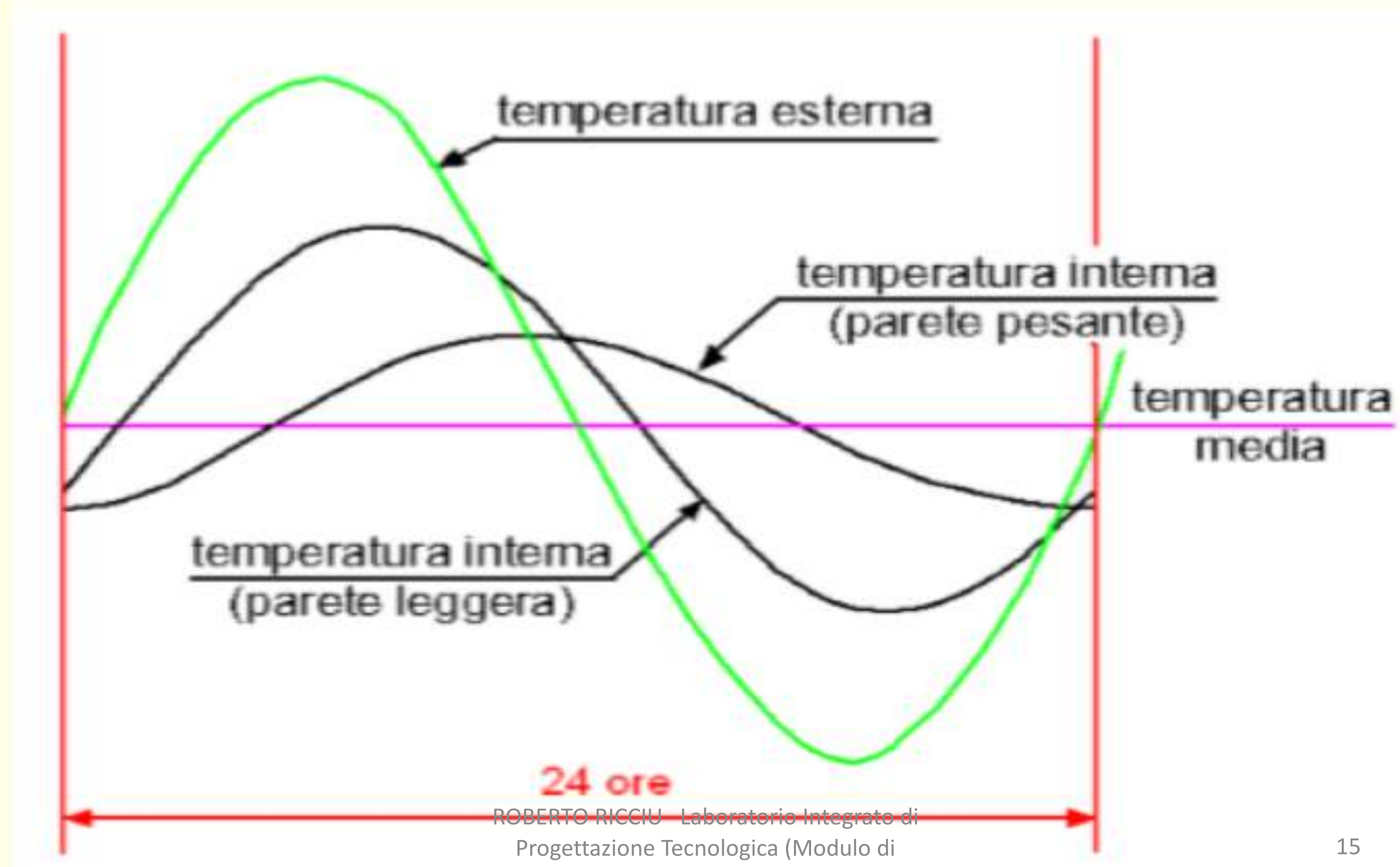
Regime termico dinamico/variabile nel tempo



Capacità termica e resistenza termica



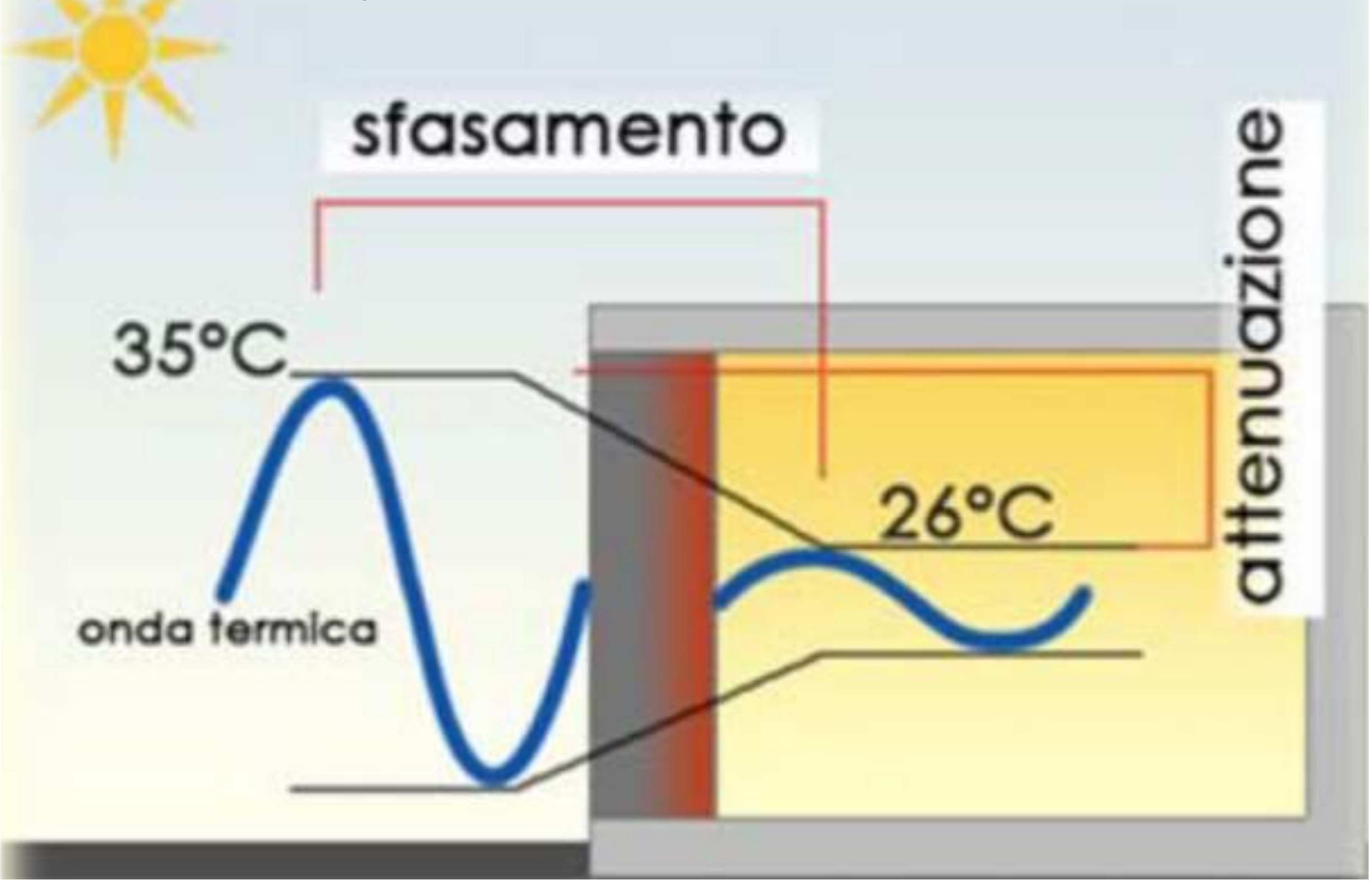
Inerzia termica



Esempi pratici

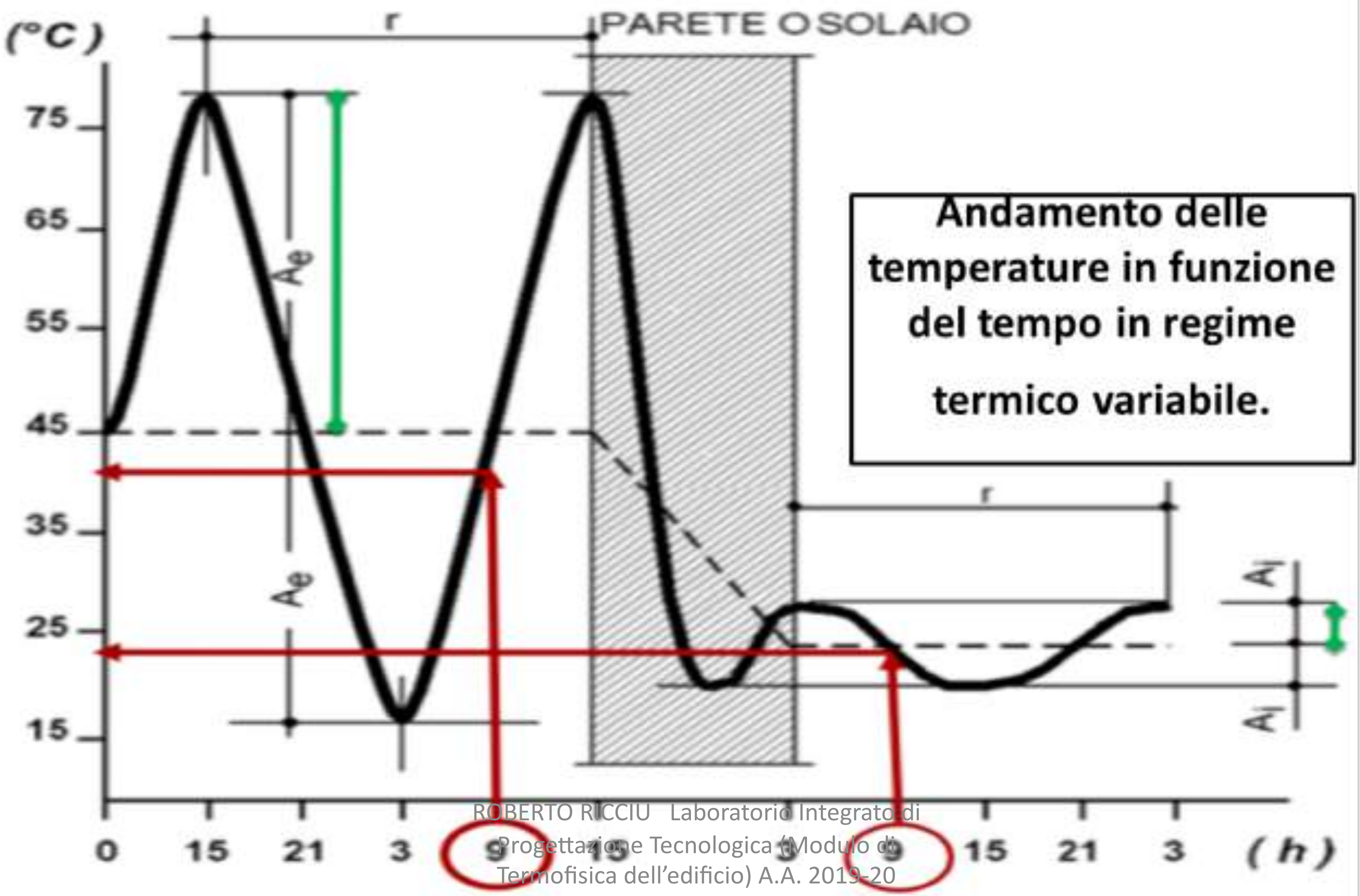
Esempi pratici

Esempio non corretto secondo la UNI EN ISO 13786



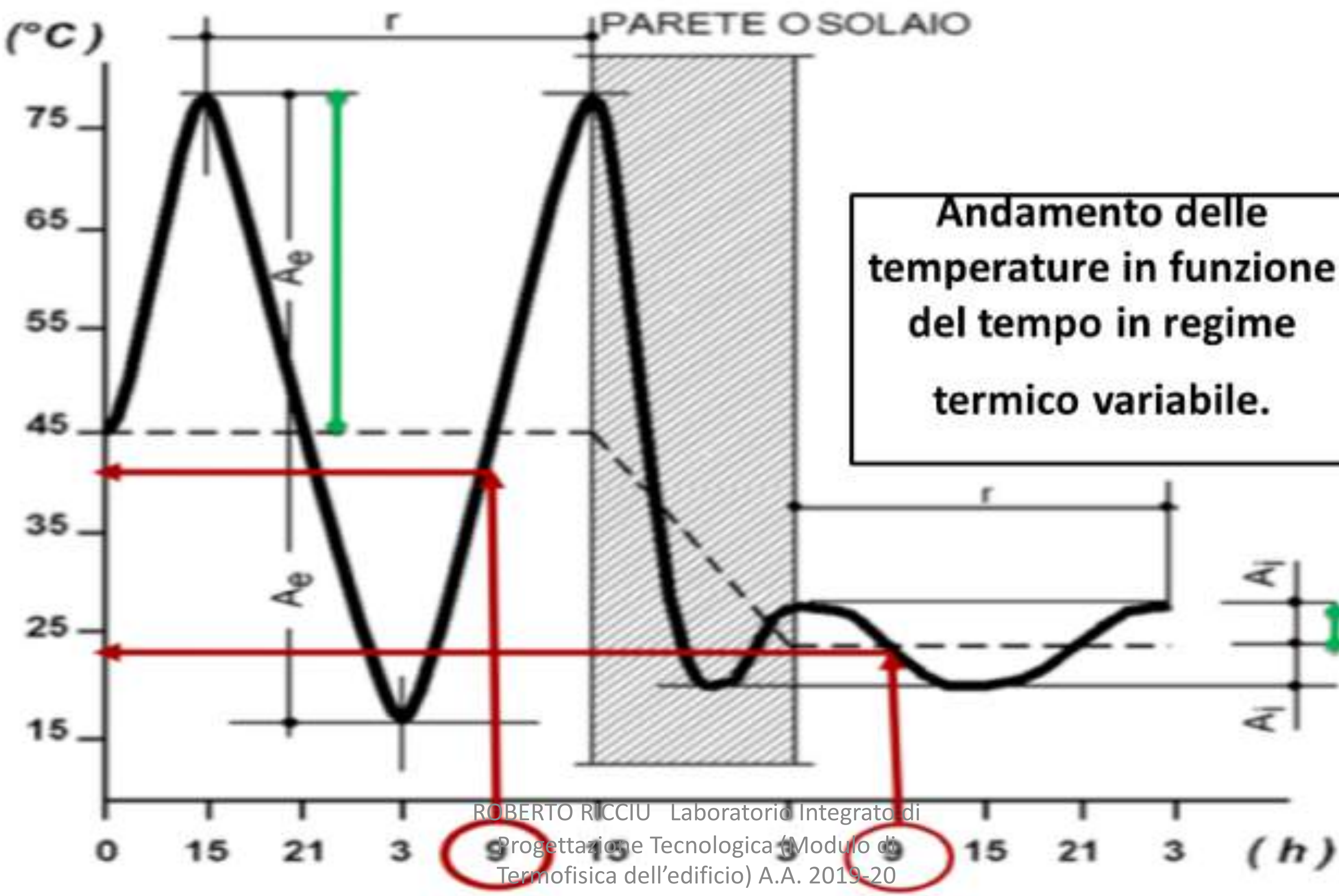
Esempi pratici

- ❑ ***mitigare* le oscillazioni di temperatura nell'ambiente;**
- ❑ realizzare migliori condizioni di ***comfort***;
- ❑ limitare i costi di installazione e di gestione degli impianti.



Esempi pratici

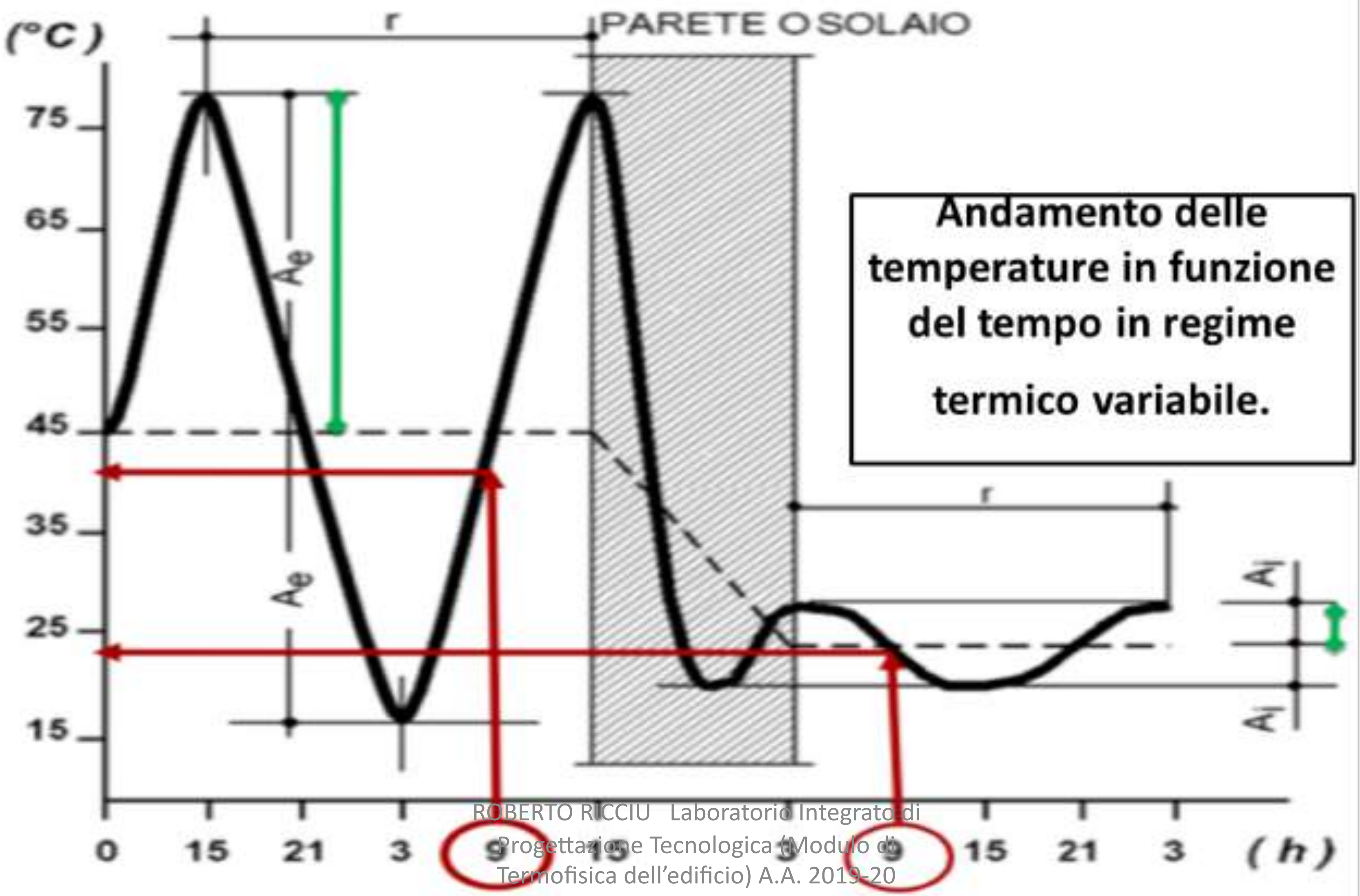
- mitigare le oscillazioni di temperatura nell'ambiente;
- ***realizzare migliori condizioni di comfort;***
- limitare i costi di installazione e di gestione degli impianti.



Andamento delle temperature in funzione del tempo in regime termico variabile.

Esempi pratici

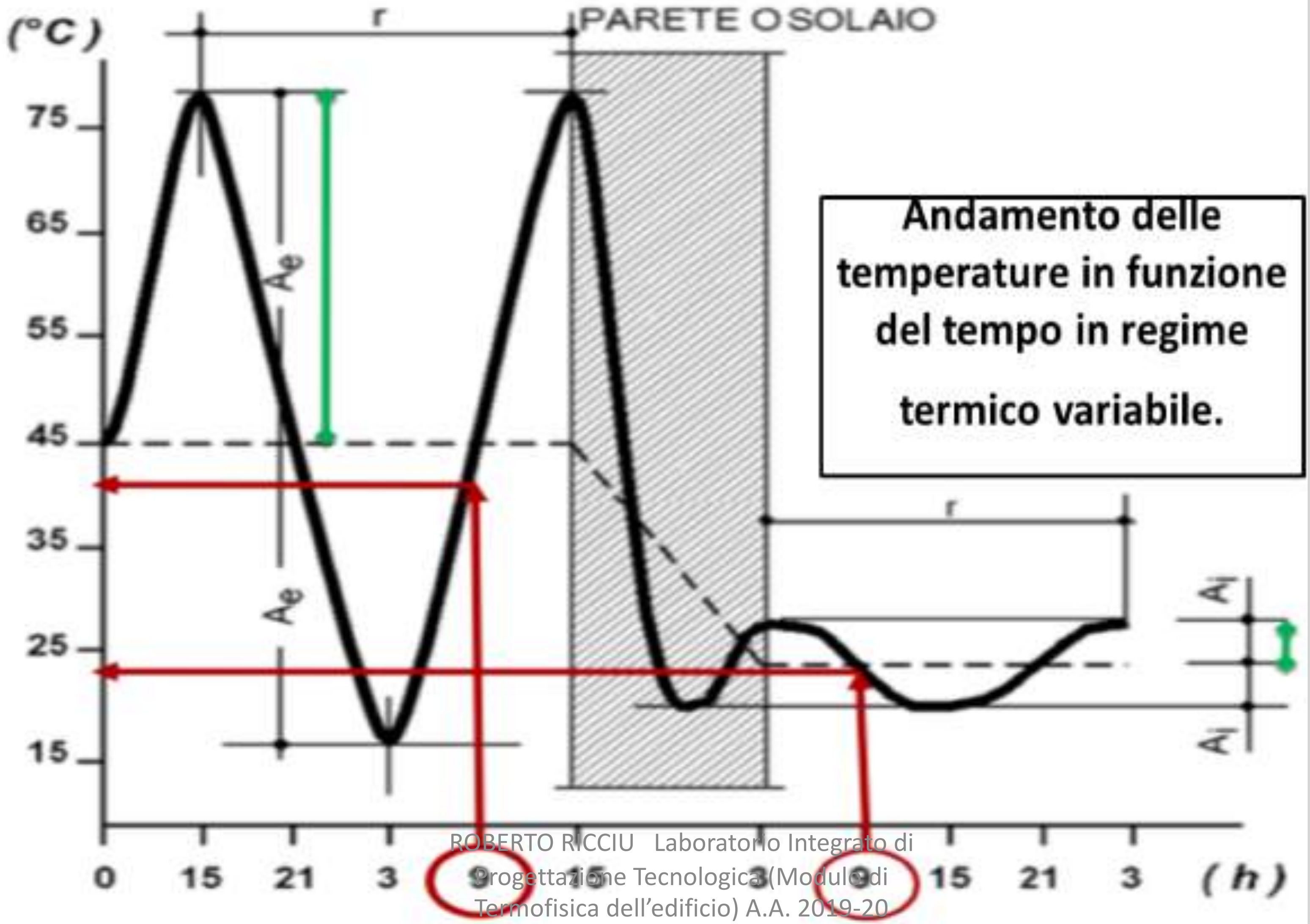
- ❑ mitigare le oscillazioni di temperatura nell'ambiente;
- ❑ realizzare migliori condizioni di comfort;
- ❑ ***limitare i costi di installazione e di gestione degli impianti.***



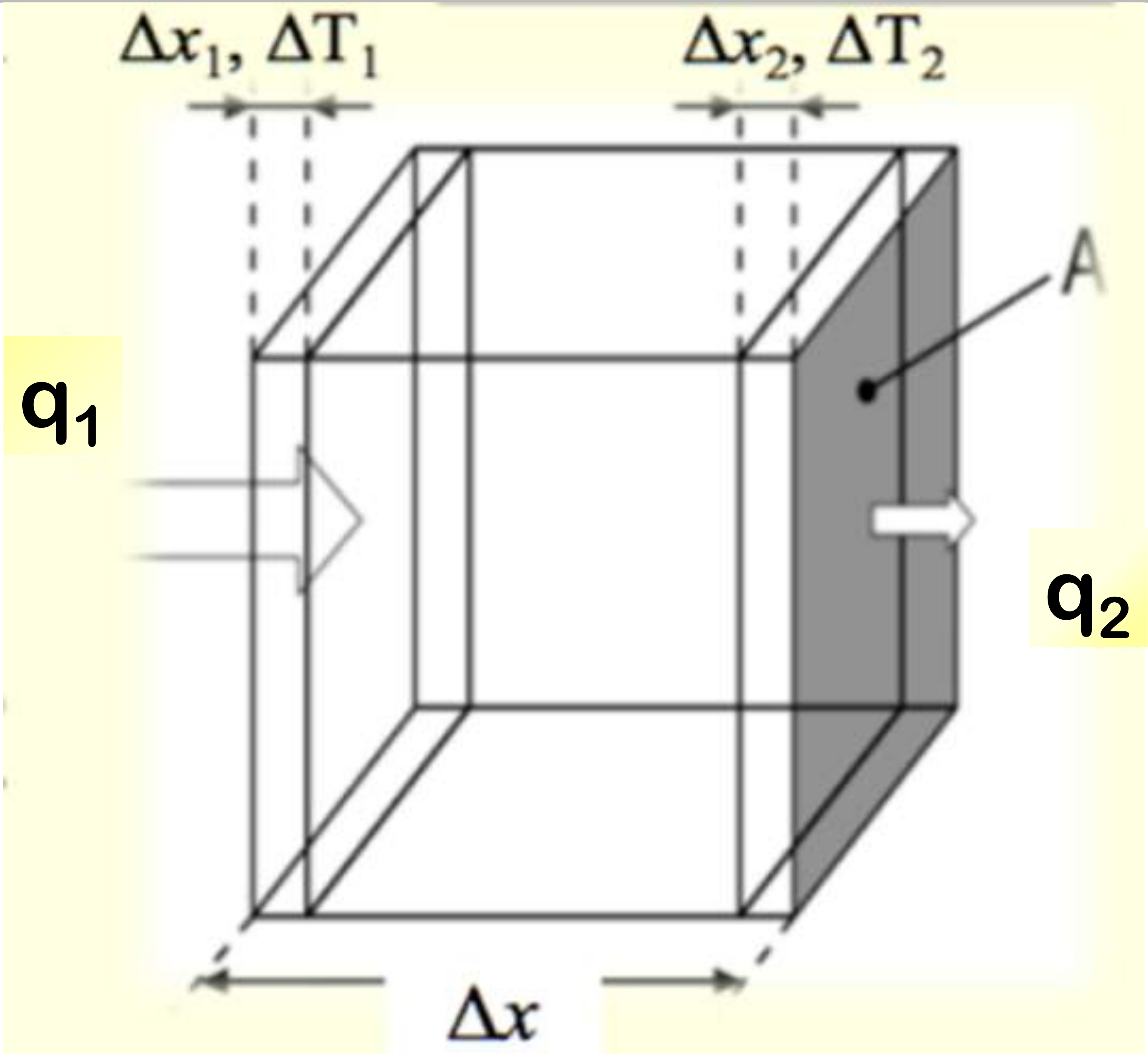
Andamento delle temperature in funzione del tempo in regime termico variabile.

Esempi pratici

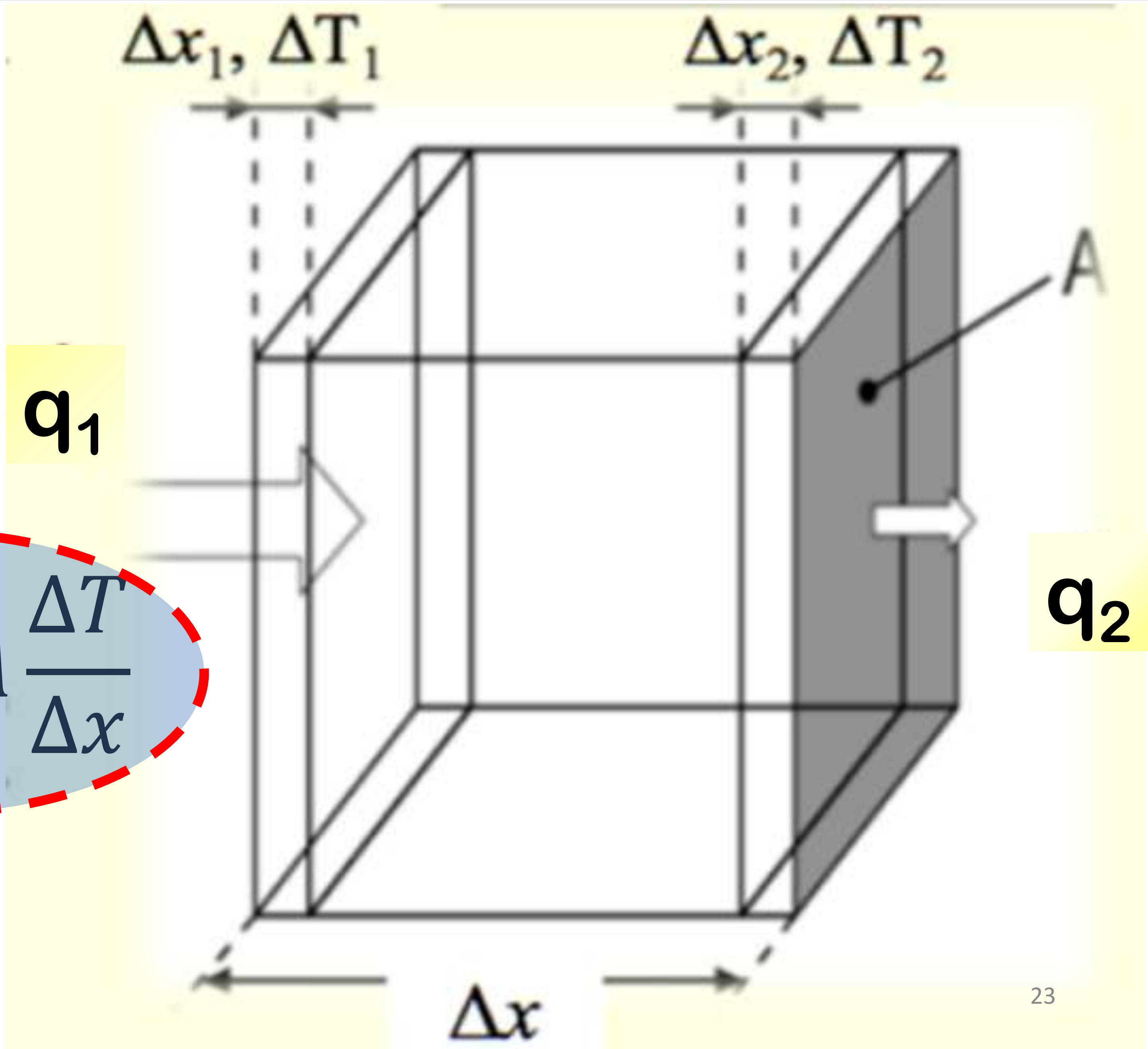
~~Contemporaneità tra massima insolazione e valore più alto della temperatura dell'aria indoor.~~



Esempi pratici



Esempi pratici

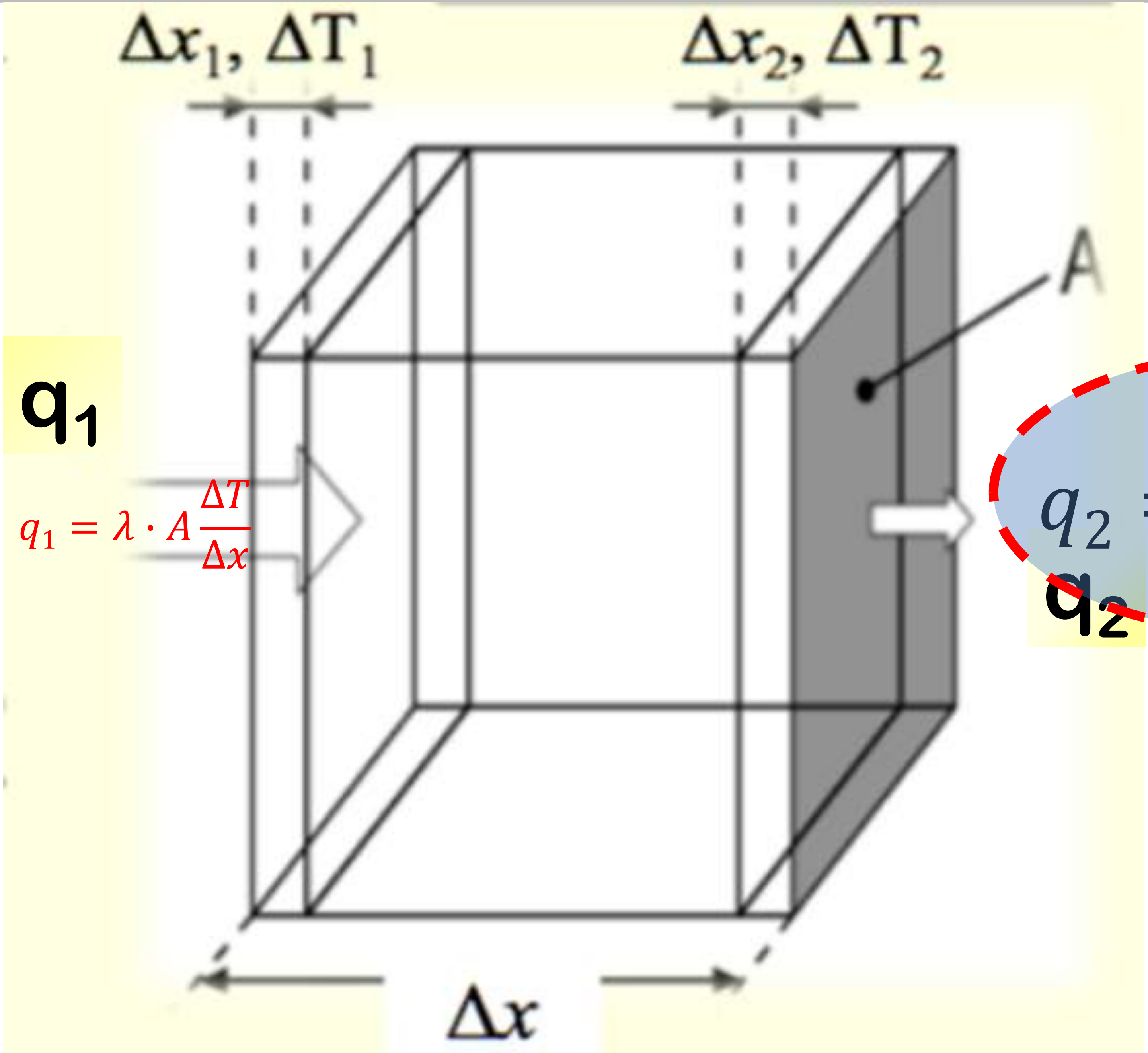


q_1

q_2

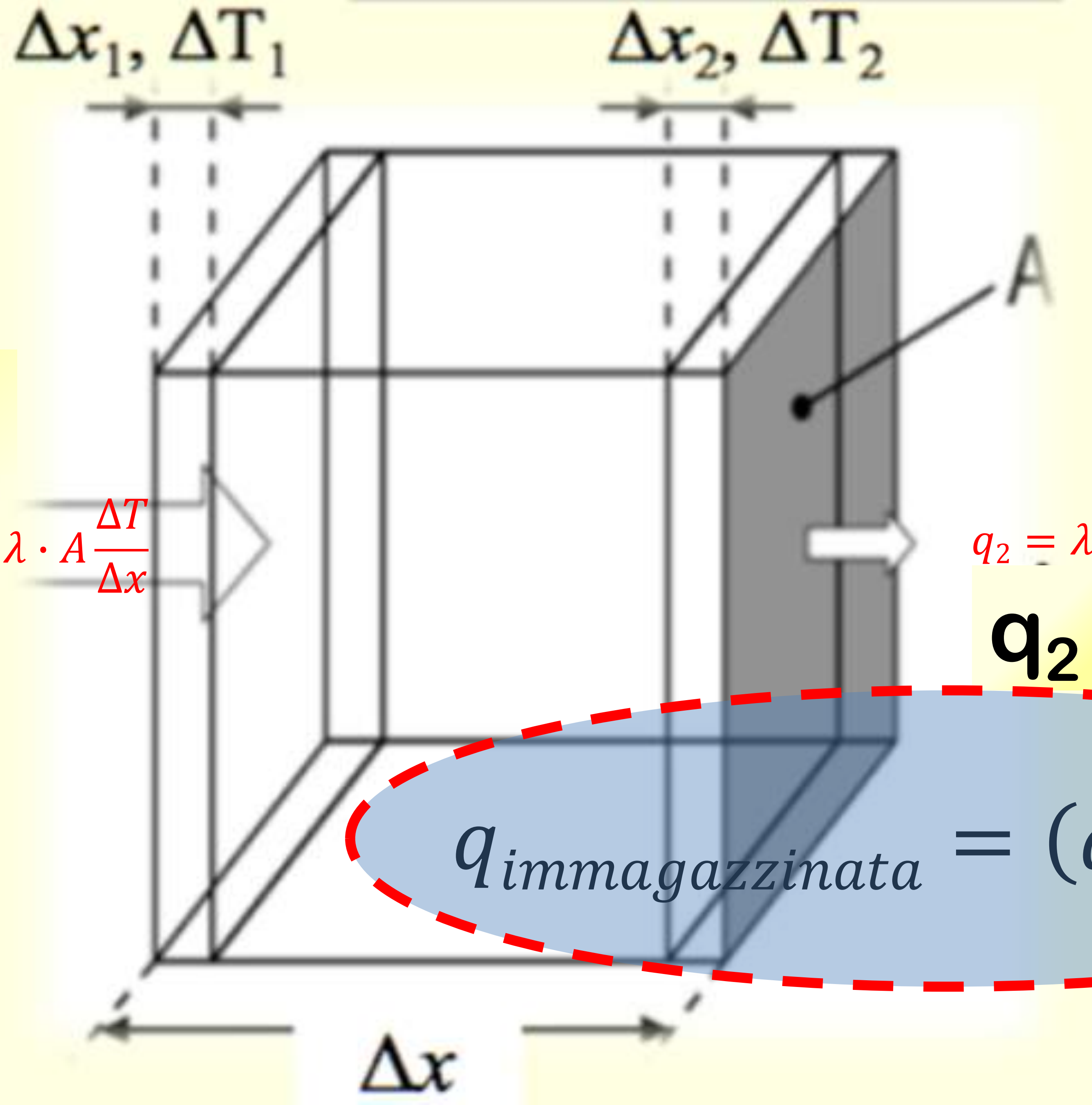
$$q_1 = \lambda \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Esempi pratici



$$q_2 = \lambda \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Esempi pratici



q_1

$q_1 = \lambda \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x}$

$q_2 = \lambda \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x}$

q_2

$q_{immagazzinata} = (q_1 - q_2)\Delta T$

V=AΔx

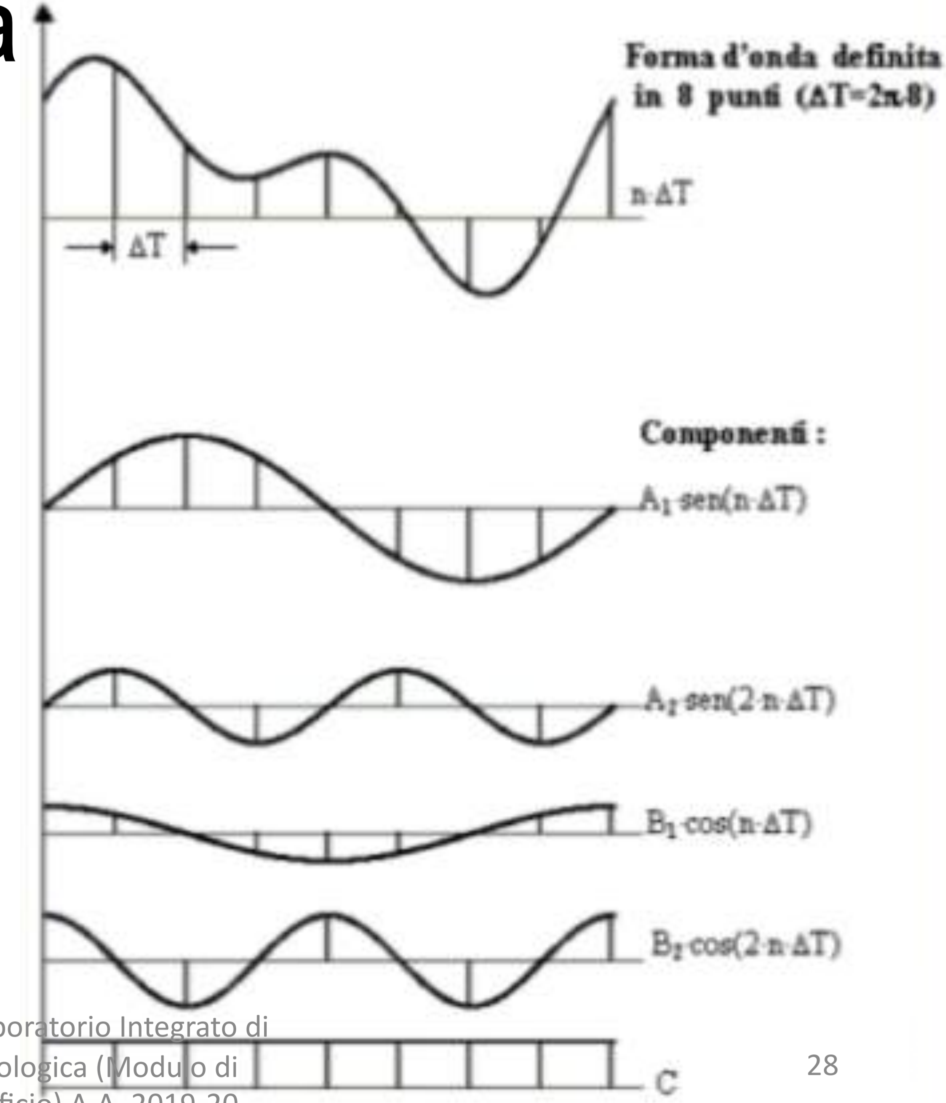
Il modello armonico

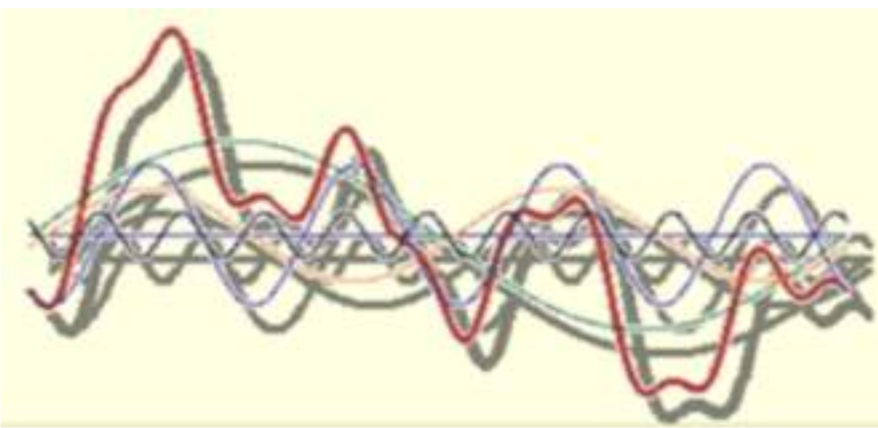
Il regime dinamico e il modello di studio

Temperature ° C

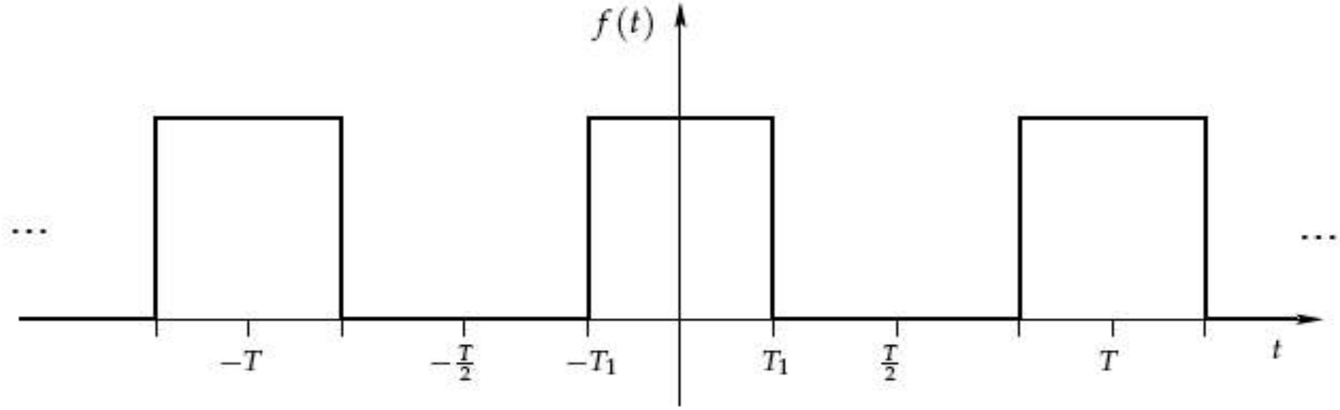
Orario hh:mm

“**Metodi Armonici**” o “Analisi in frequenza”





Il modello armonico



$$f(t) = \begin{cases} 1, & |t| < T_1 \\ 0, & T_1 < |t| < T/2 \end{cases}$$

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_{-T_1}^{T_1} dt = \frac{2T_1}{T}.$$

Rappresentazione della serie di Fourier in forma trigonometrica e cartesiana

$$\boxed{x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos\, n\Omega t + b_n \sin\, n\Omega t)}$$

Con

$$\boxed{a_n = \frac{2}{T}\int_T x(t) \cos\, n\Omega t\; dt\,, \quad b_n = \frac{2}{T}\int_T x(t) \sin\, n\Omega t\; dt}$$

Rappresentazione della serie di Fourier in forma trigonometrica e cartesiana

$$a_0 = 2\,c_0\,, \quad a_n = c_n + c_{-n}\,, \quad b_n = j(c_n - c_{-n})\,, \quad n \geq 0$$

con

$$c_n = \frac{1}{2}\,(a_n - jb_n)\,, \quad c_{-n} = \frac{1}{2}\,(a_n + jb_n)\,, \quad n \geq 0$$

Rappresentazione della serie di Fourier in forma trigonometrica e cartesiana

$$a_0 = 2c_0\,, \quad a_n = c_n + c_{-n}\,, \quad b_n = j(c_n - c_{-n})\,, \quad n \geq 0$$

con

$$c_n = \frac{1}{2}(a_n - jb_n)\,, \quad c_{-n} = \frac{1}{2}(a_n + jb_n)\,, \quad n \geq 0$$

In cui

$$a_n = 2\,\mathrm{Re}\,c_n \qquad b_n = -2\,\mathrm{Im}\,c_n \qquad n \geq 0$$

Il modello armonico

$$\boxed{x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos\ n\Omega t + b_n \sin\ n\Omega t)}$$

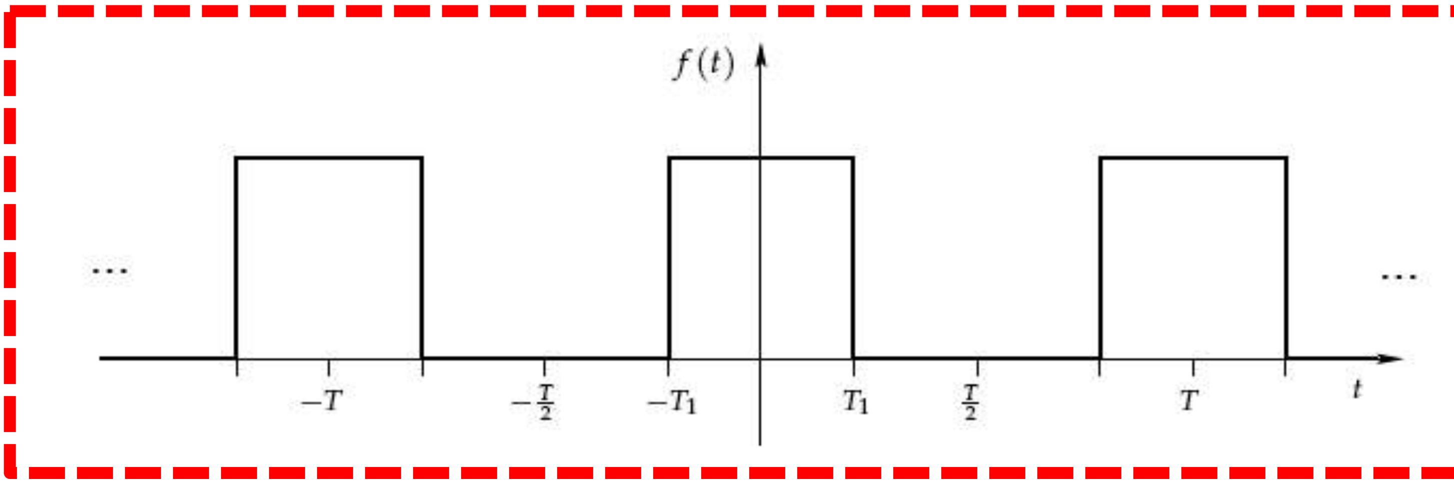
$$\boxed{a_n = \frac{2}{T}\int_T x(t)\cos\ n\Omega t\ dt\,, \quad b_n = \frac{2}{T}\int_T x(t)\sin\ n\Omega t\ dt}$$

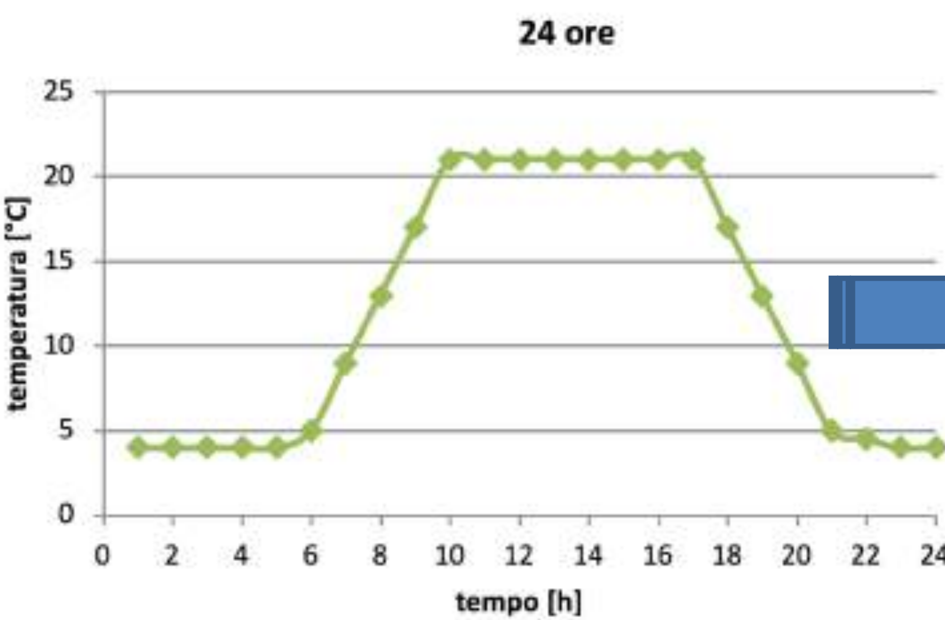
$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\ n\Omega t$$

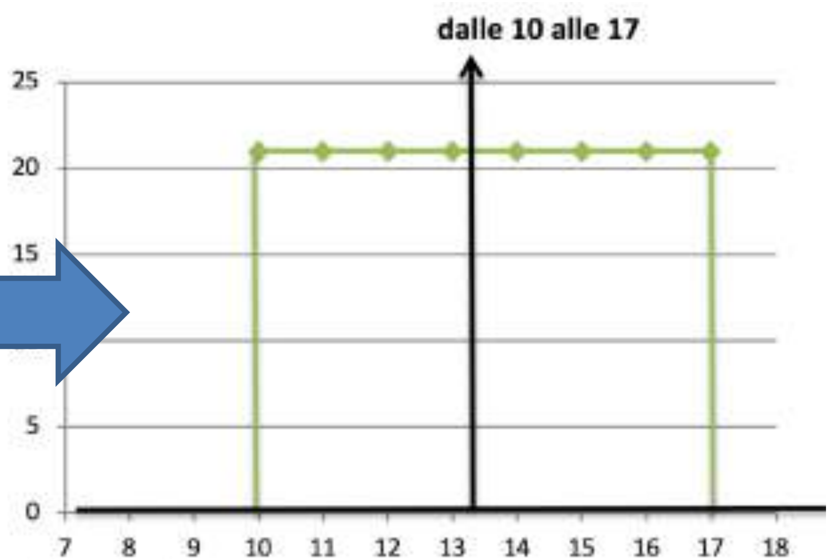
$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\ n\Omega t$$

Il modello armonico

Esempio: Treno di impulsi rettangolari

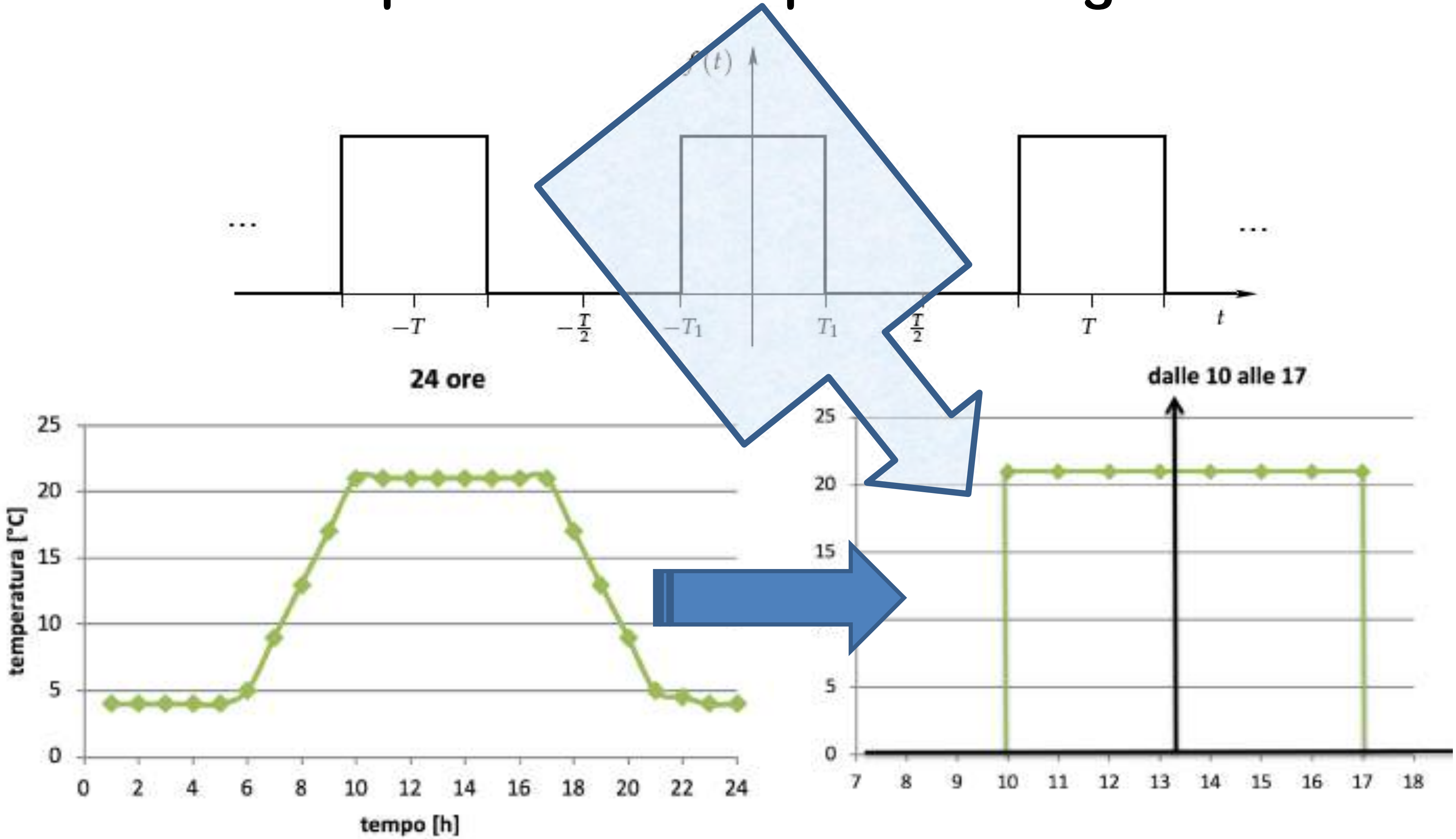




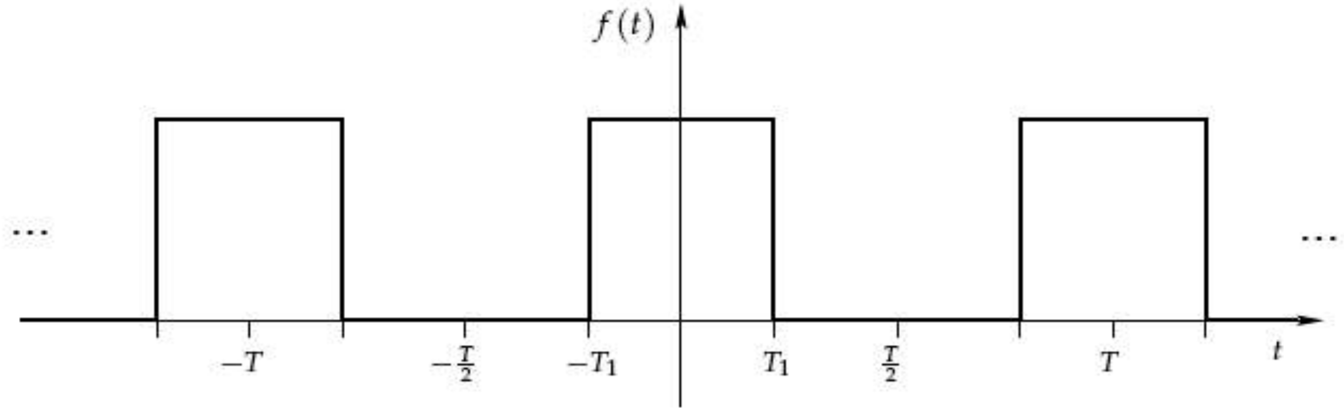


Il modello armonico

Esempio: Treno di impulsi rettangolari



Esempio: Treno di impulsi rettangolari



Per $n \neq 0$ invece otteniamo

$$c_n = \frac{1}{T}\int_{-T_1}^{T_1} e^{-in\omega_0 t}dt = -\frac{1}{in\omega_0 T}e^{-in\omega_0 t}\Big|_{-T_1}^{T_1}$$

$$= \frac{1}{in\omega_0 T}\left(e^{in\omega_0 T_1} - e^{-in\omega_0 T_1}\right)$$

$$= \frac{2\sin(n\omega_0 T_1)}{n\omega_0 T} = \frac{\sin(n\omega_0 T_1)}{n\pi} \qquad \text{(poiché } \omega_0 T = 2\pi\text{).}$$

Il modello armonico

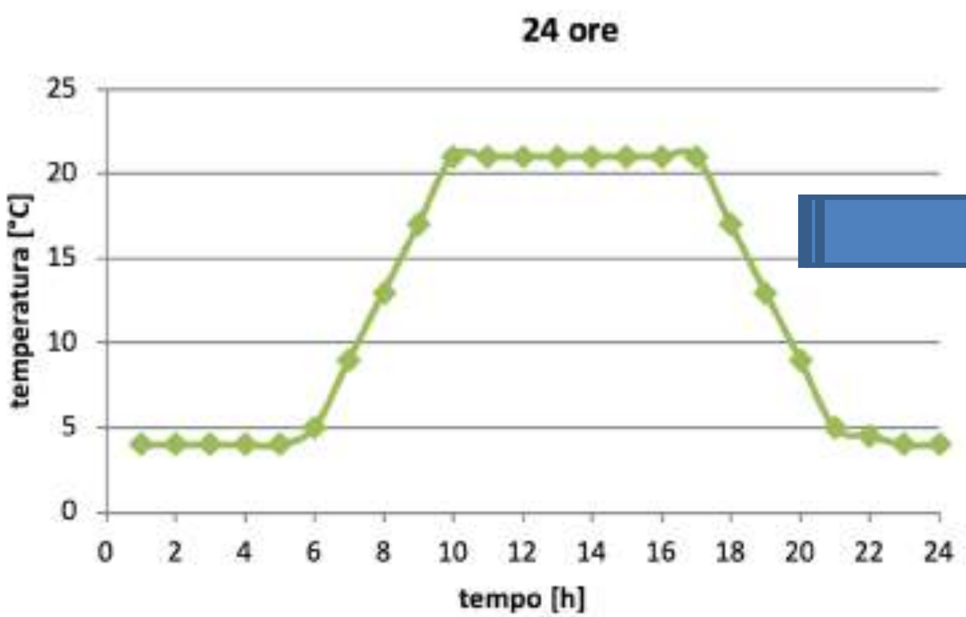
Con:

$n = \pm 1$ con frequenza ω_0 otteniamo le prime armoniche

$n = \pm 2$ con frequenza ω_0 otteniamo le seconde armoniche

$n = \pm 3$ con frequenza ω_0 otteniamo le terze armoniche

……………………



$T_1 = 7\ h < T/2 = 24\ h/2 = 12\ h$

$T_1 = 3{,}5$

$T = 12$

$\Omega = \omega_0 = 2\pi/T = 0{,}523$

Calcolo dei coefficienti

$T_1 =$	3,5
$T =$	12
$\omega_0 =$	0,523

$$c_0 = \frac{2T_1}{T}. = 0{,}583$$

$$c_1 = \frac{\sin(n\omega_0 T_1)}{n\pi} = 0{,}308$$

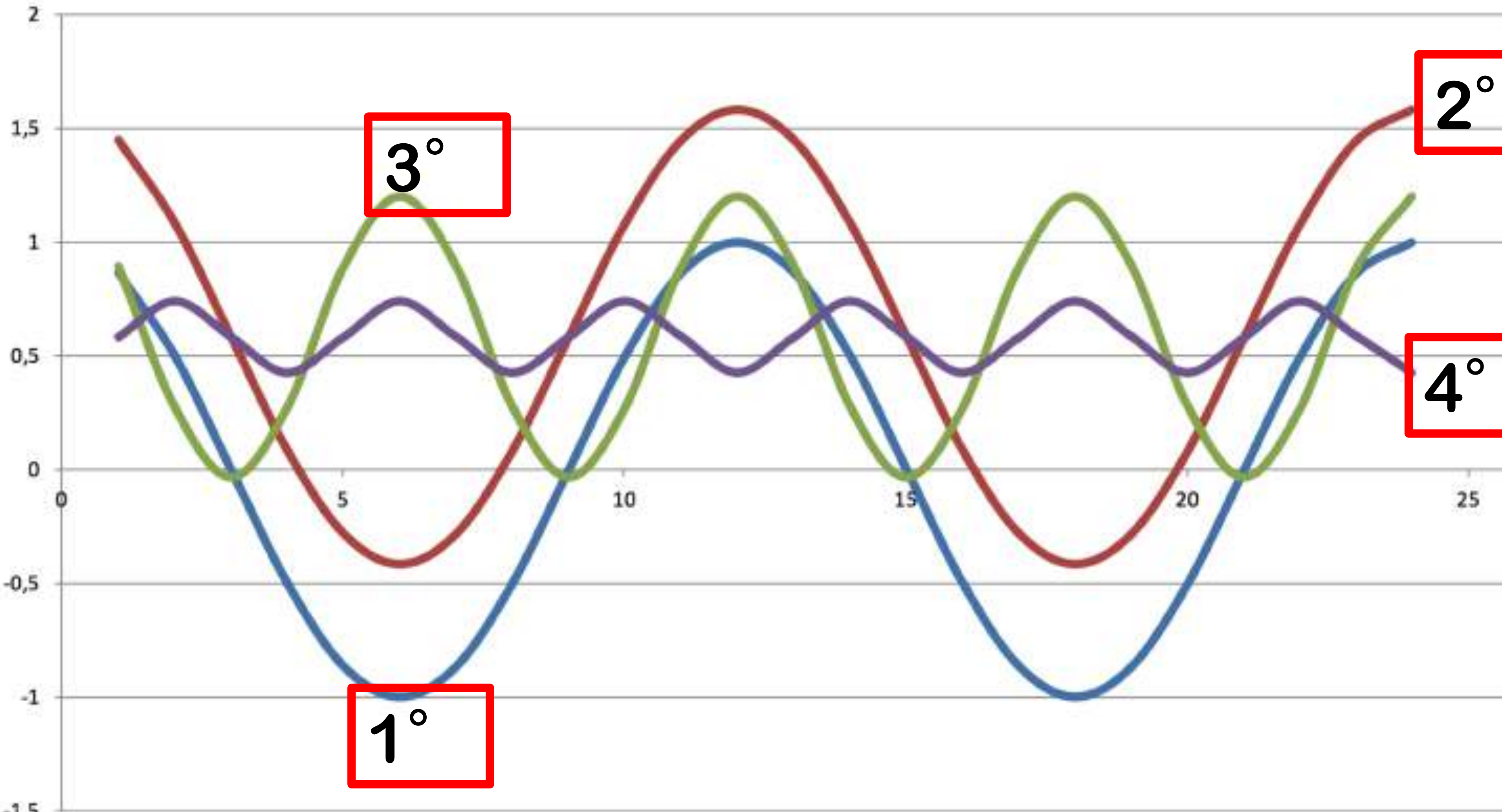
$$a_0 = 2\,c_0 = 1{,}166$$

$$a_1 = a_n = c_n + c_{-n} = 0{,}616$$

$$b_n = j(c_n - c_{-n}),$$

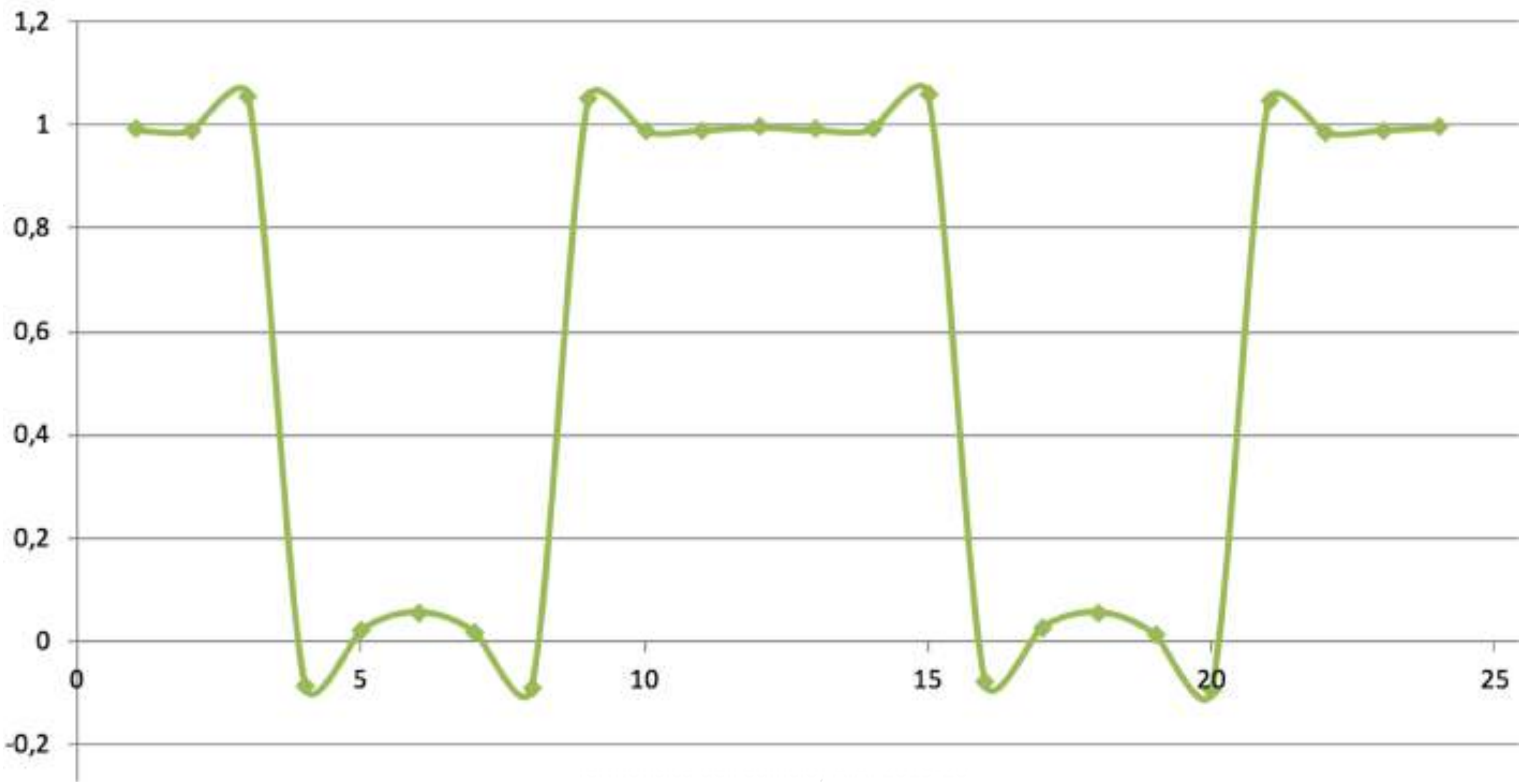
Il modello armonico

ARMONICHE



Serie di Fourier

T(t) =	0,583	+	0,616	cos	0,523	t +	-0,158



L‘effusività

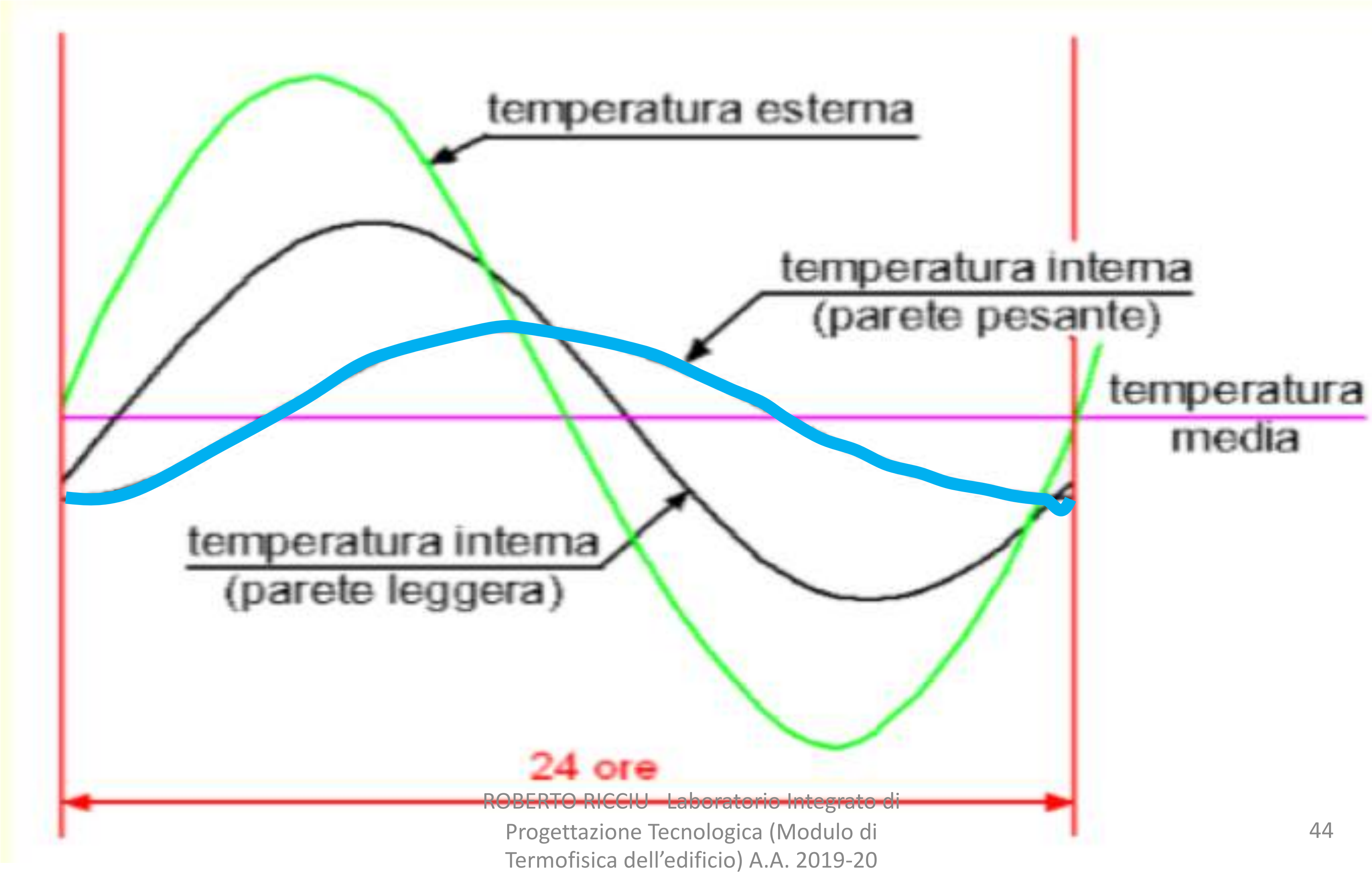
$$q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

L'effusività

$$q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

L'effusività

Parete massiva



L’effusività termica

$$\boxed{e = \sqrt{\lambda\rho c} = (\lambda\rho c)^{0,5}\ [W s^{0,5} m^2 K]}$$

$$\boxed{e = \sqrt{\lambda\rho c} = \frac{\lambda}{\sqrt{a}}}$$

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

L'effusività

Leggera

$$e_m < 325 \quad [Ws^{0,5}m^2K]$$

Media

$$325 < e_m < 750 \quad [Ws^{0,5}m^2K]$$

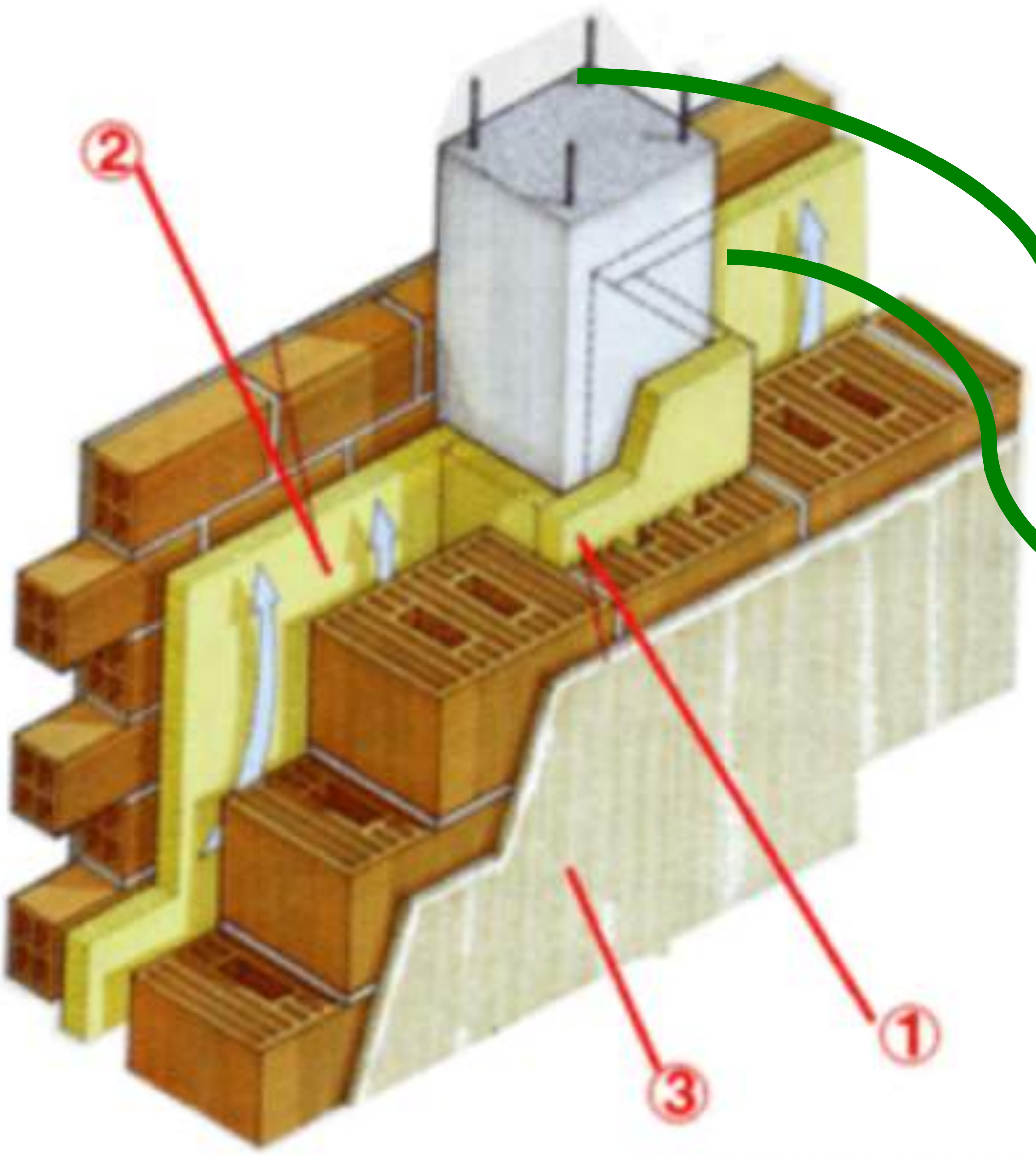
Pesante

$$750 < e_m < 1250 \quad [Ws^{0,5}m^2K]$$

Molto pesante

$$e_m > 1250 \quad [Ws^{0,5}m^2K]$$

L’effusività



$$\rho \boxed{c_p} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

$\boxed{1\ \mathrm{kJ/(kg\ K)}}$

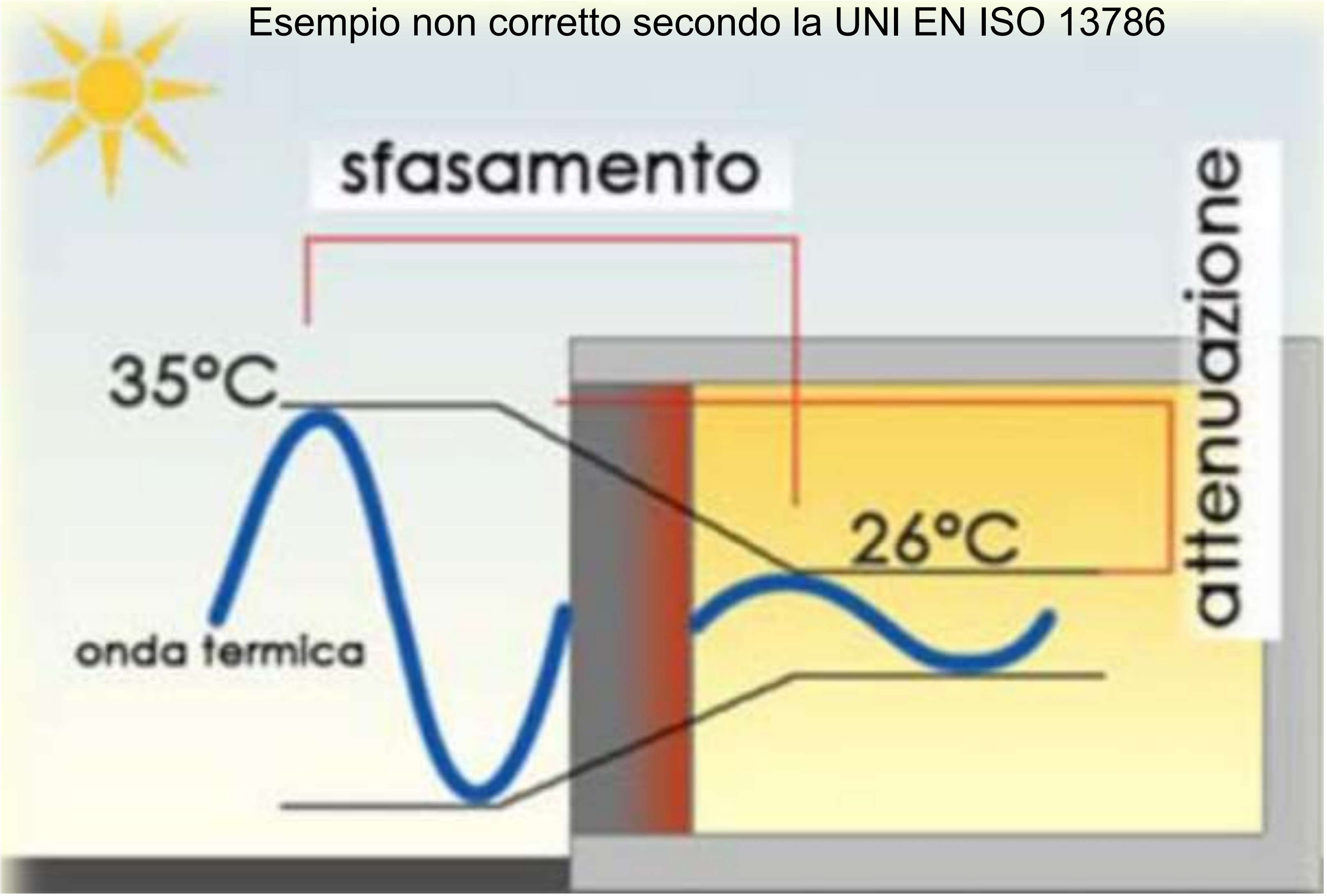
Accumulo termico

Isolamento

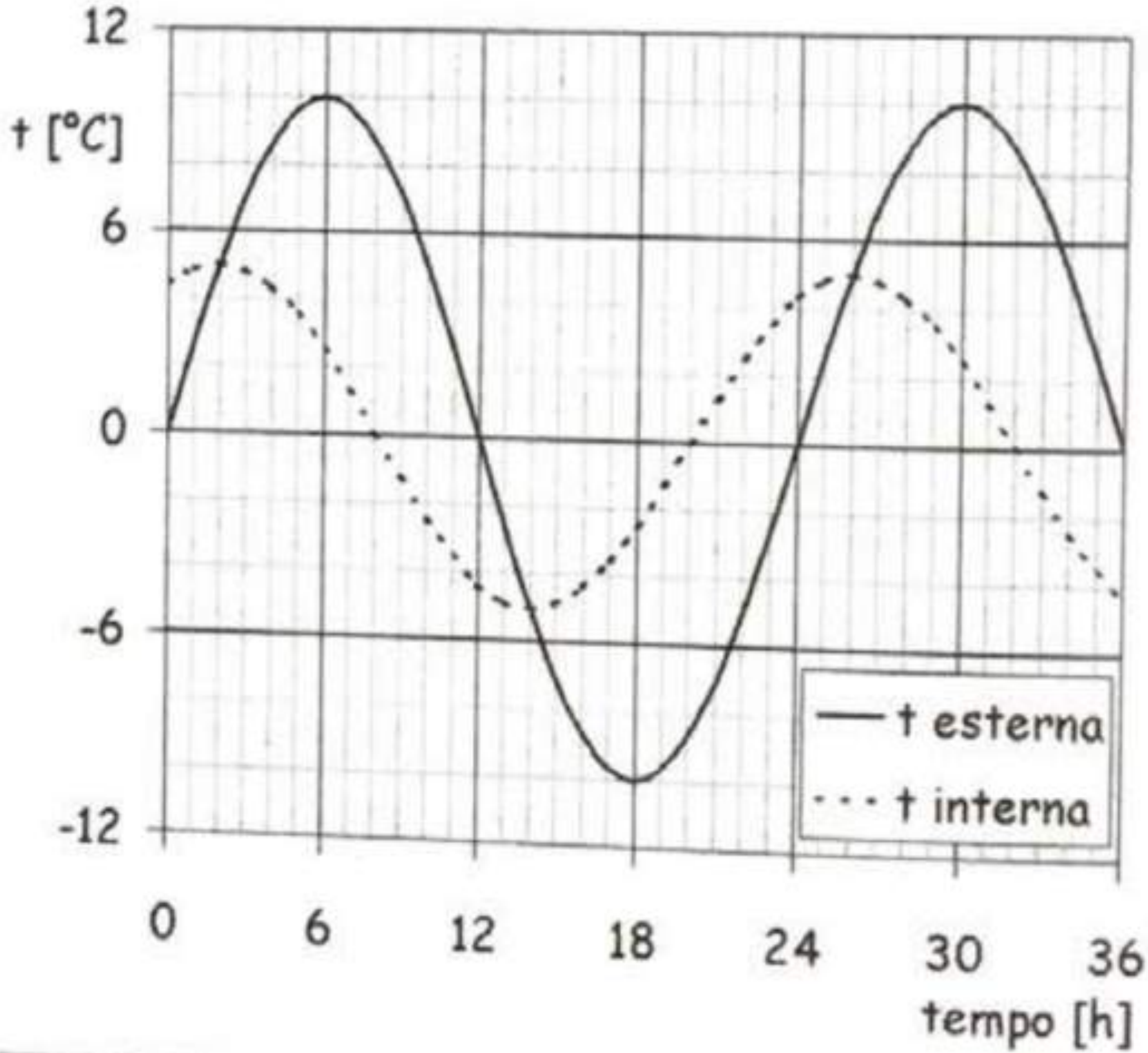
La trasmittanza termica periodica

La trasmittanza termica periodica

Esempio non corretto secondo la UNI EN ISO 13786



La trasmittanza termica periodica



1) Trasmittanza termica periodica Y_{ie} $[\frac{W}{m^2K}]$

La trasmittanza termica periodica

1) Trasmittanza termica periodica $Y_{ie}\ [\frac{W}{m^2K}]$

2) Fattore di attenuazione $\frac{|Y_{ie}|}{U}$

La trasmittanza termica periodica

1) Trasmittanza termica periodica $Y_{ie}\ [\frac{W}{m^2K}]$

2) Fattore di attenuazione $\frac{|Y_{ie}|}{U}$

3) Ammettenze termiche Y_{ii} e Y_{ee}

La trasmittanza termica periodica

1) Trasmittanza termica periodica $Y_{ie}\ [\frac{W}{m^2K}]$

2) Fattore di attenuazione $\frac{|Y_{ie}|}{U}$

3) Ammettenze termiche Y_{ii} e Y_{ee}

4) Capacità termiche areiche k_i e k_e

5) Profondità di penetrazione d

5) Profondità di penetrazione d

6) $$\xi = \frac{L}{d}$$

Il modello di calcolo

Equazione del calore

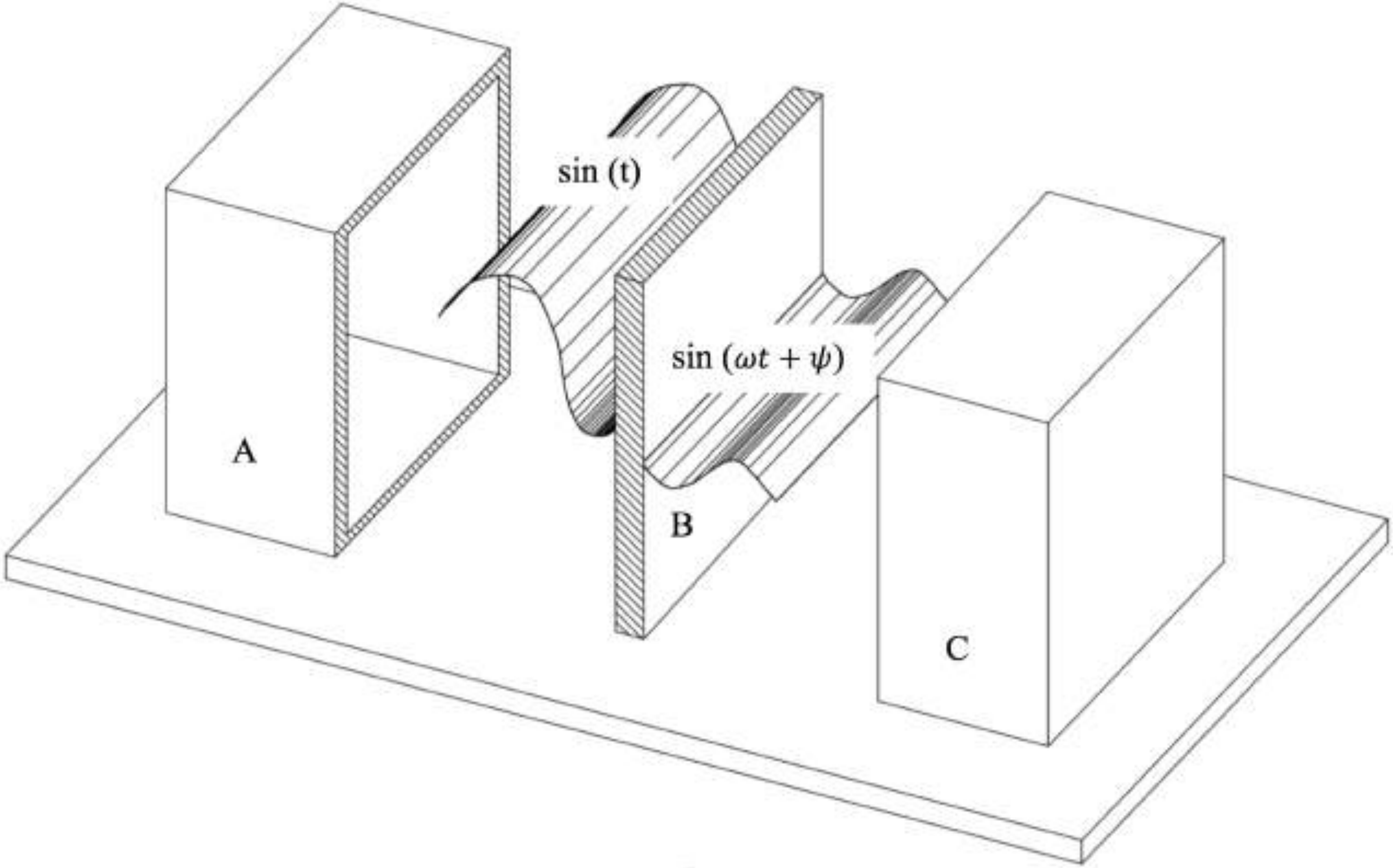
(conduzione e monodimensionale)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

T = temperatura [° C]
x = coordinata spaziale [m]
t = coordinata temporale [s]
a = diffusività termica [m^2/s]
α = conduttività termica [W/(m K)]
ρ = densità volumica [kg / m^3]
c_p = calore specifico [kJ / (kg K)]

Il modello di calcolo



Il modello di calcolo

$$T(t, x = 0) = T_m + |T| \cos(\omega t + \psi)$$

$\mathbf{T_m}$ = temperatura media [° C]

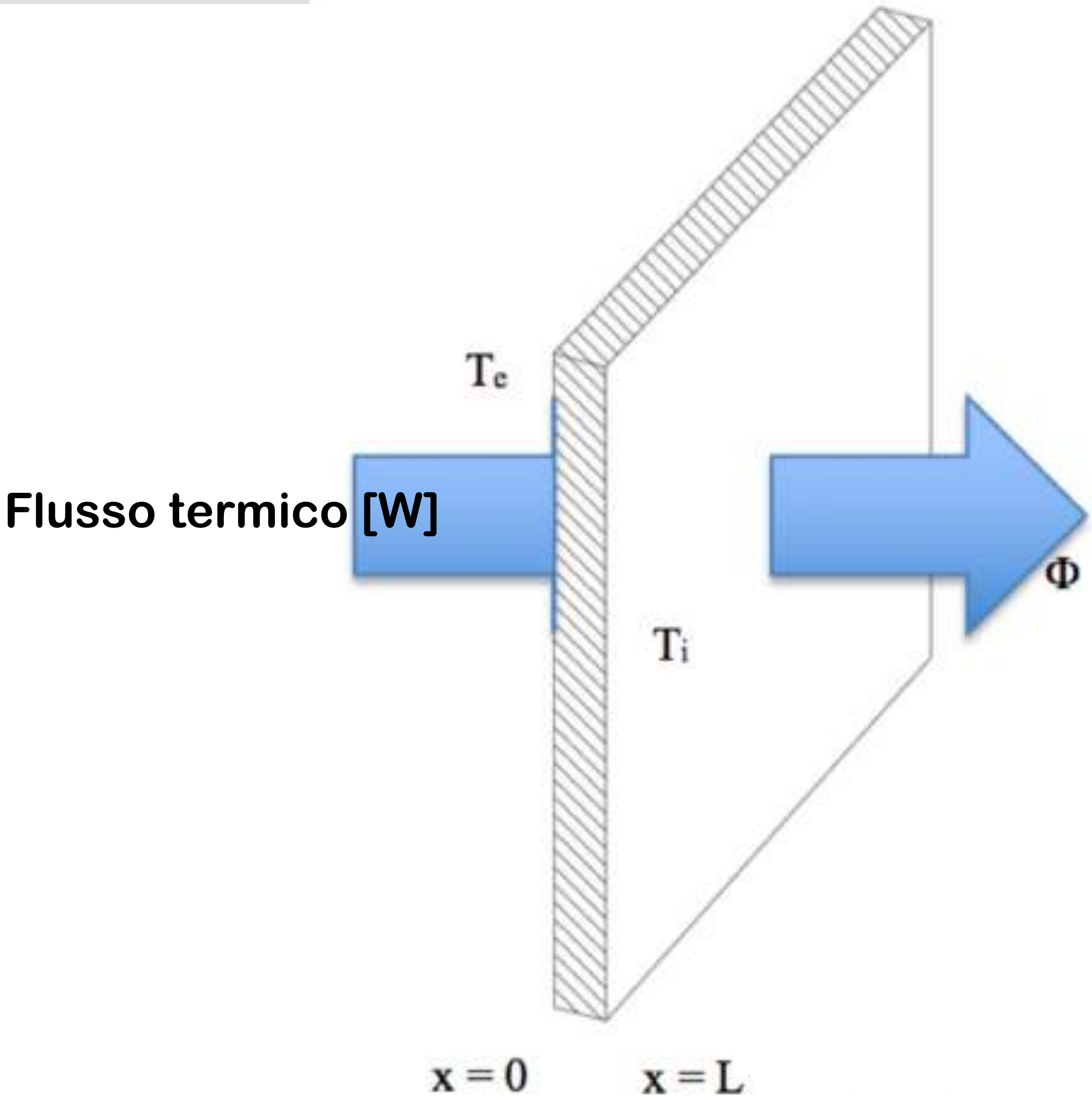
$|\mathbf{T}|$ = semi-ampiezza della variazione della temperatura [° C]

ω = $2\pi/t_p$ pulsazione del fenomeno oscillatorio di periodo t_p [m]

$\mathbf{t_p}$ = periodo considerato [s]

ψ = differenza angolare di fase [rad]

Il modello di calcolo



Il modello di calcolo

$$\phi(t, x = 0) = \phi_m + |\phi| \cos(\omega t + \varphi)$$

Φ_m = temperatura media [° C]

$|\Phi|$ = semi-ampiezza della variazione della temperatura [° C]

ω = $2\pi/t_p$ pulsazione del fenomeno oscillatorio di periodo t_p [m]

t_p = periodo considerato [s]

ϕ = differenza angolare di fase [rad]

La trasmittanza termica dinamica

PAUSA

La trasmittanza termica dinamica

FINE