



FACOLTÀ DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA



Laurea in Ingegneria Civile

DICAAR

L'EDIFICIO SOSTENIBILE

A.A. 2019-2020

modulo: **Le Prestazioni energetiche**

La trasmittanza termica periodica negli edifici

Slide 1-67

Docente: ROBERTO RICCIU



Roberto Ricci:

Education

- Jan 2001 – Jan 2004* **Port Authority of Cagliari**
Post degree Qualification in Naval Engineer
Cagliari, Italy
- Jan 2000 – Jan 2001* **Department of Electrical and Electronic Engineering University of Cagliari**
Post master's degree in Quality Management
Cagliari, Italy
- Oct 1989 – Apr 2000* **Department of Civil Engineering University of Cagliari**
Master's Degree, Civil Engineering
Cagliari, Italy

Research Experience

- May 2019 – May 2019* **Visiting Academic**
Belarussian State University, Department of Energy Physics
Minsk, Belarus
- Mar 2016 – Mar 2016* **Visiting Academic**
University of Chicago, Illinois Institute of Technology
Chicago, Illinois USA
- Jun 2015 – Sep 2015* **Visiting Academic**
Strathclyde University, Department of Mechanical and Aerospace Engineering,
Glasgow, Scotland UK
- Jun 2014 – Jun 2014* **Visiting Academic**
Lebanese University, Industrial Research Institute
Beirut, Lebanon
- Oct 2010 – present* **Researcher and head of the laboratory of Building Energy Efficiency**
University of Cagliari, Department of Civil and Environmental Engineering
and Architecture
Cagliari, Italy
- Feb 2002 – Sep 2010* **Researcher**
University of Cagliari, Department of Mechanical Engineering
Cagliari, Italy

- May 2019 – May 2019* **Visiting Academic**
Thermal properties of multilayer walls: Indirect estimation using the inverse method with a harmonic approach
Belarussian State University, Faculty of Physics
Minsk, Belarus
- Mar 2016 – Mar 2016* **Visiting Academic**
Measure and theory of thermal conductivity in fluids - University of Chicago, Illinois Institute of Technology
Chicago, Illinois USA
- Jun 2015 – Sep 2015* **Visiting Academic**
Optimization system in building energy - Strathclyde University, Department of Mechanical and Aerospace Engineering,
Glasgow, Scotland UK
- Jun 2014 – Jun 2014* **Visiting Academic**
Photo Voltaic integration in cultural heritage - Lebanese University, Industrial Research Institute
Beirut, Lebanon
- Oct 2010 – present* **Professor (Assistant)**
Engineering physics; Building service engineering; Experimental interactive lessons in the university hall - University of Cagliari, Department of Civil and Environmental Engineering and Architecture
Cagliari, Italy
- Feb 2002 – Sep 2010* **Professor (Assistant)**
Measurement system in mechanical Engineering - University of Cagliari, Department of Mechanical Engineering
Cagliari, Italy

**ATTIVITA' SVOLTA PER
L'UNIVERSITA' DI CAGLIARI:**

DIDATTICA:

IMPIANTI PER LA SOSTENIBILITA' ENERGETICA DEGLI EDIFICI

**LABORATORIO INTEGRATO DI PROGETTAZIONE
TECNOLOGICA**

COMPONENTE DEL CONSIGLIO DI DOTTORATO DICAAR

RICERCA:

RESPONSABILE DEL LABEE

Roberto Ricciu:

Sede: via Marengo, 2 palazzina E

Mail: ricciu@unica.it

Tel.: 070 675. 5266

Giorno di ricevimento: venerdì 9 -13

<http://people.unica.it/robertoricciu/>

Argomenti della lezione

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

Argomenti trattati:

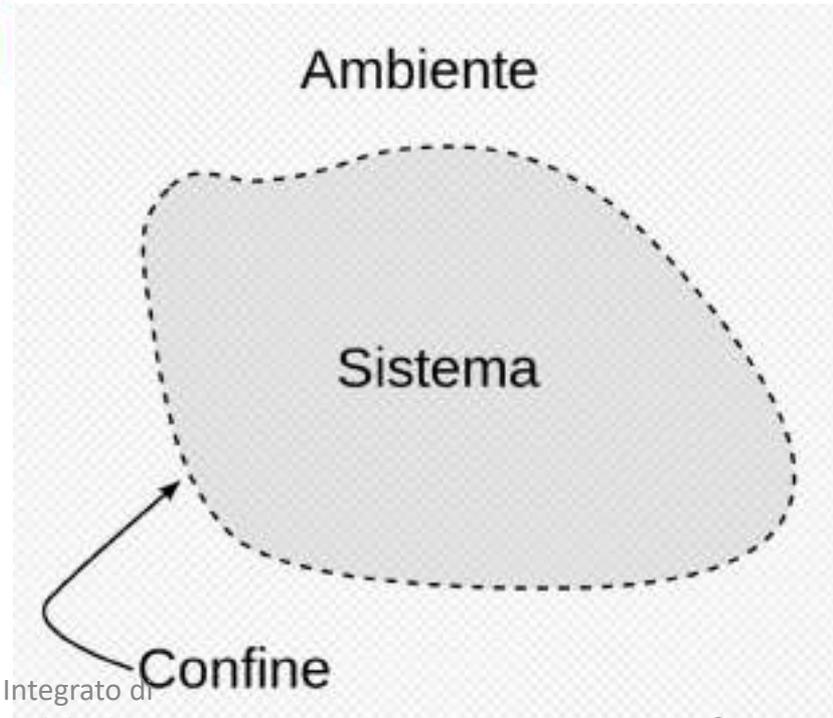
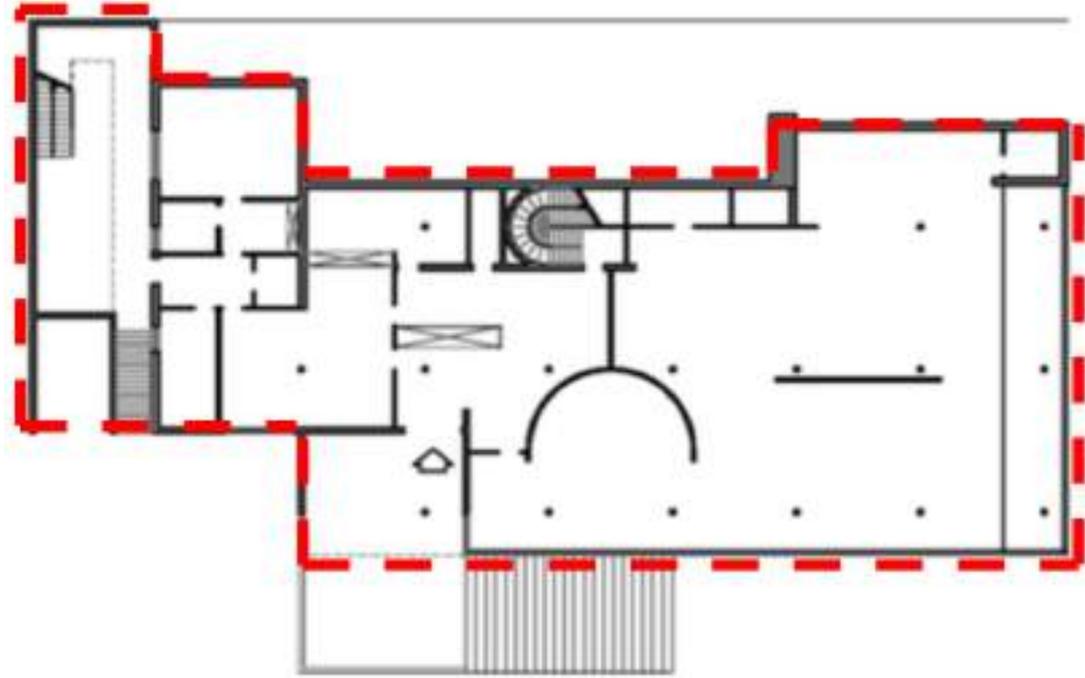
- **Grandezze termofisiche C_p e capacità termica**
- **Equazione generale della conduzione**
- **Parametri dinamici di una parete**

UNI 13786

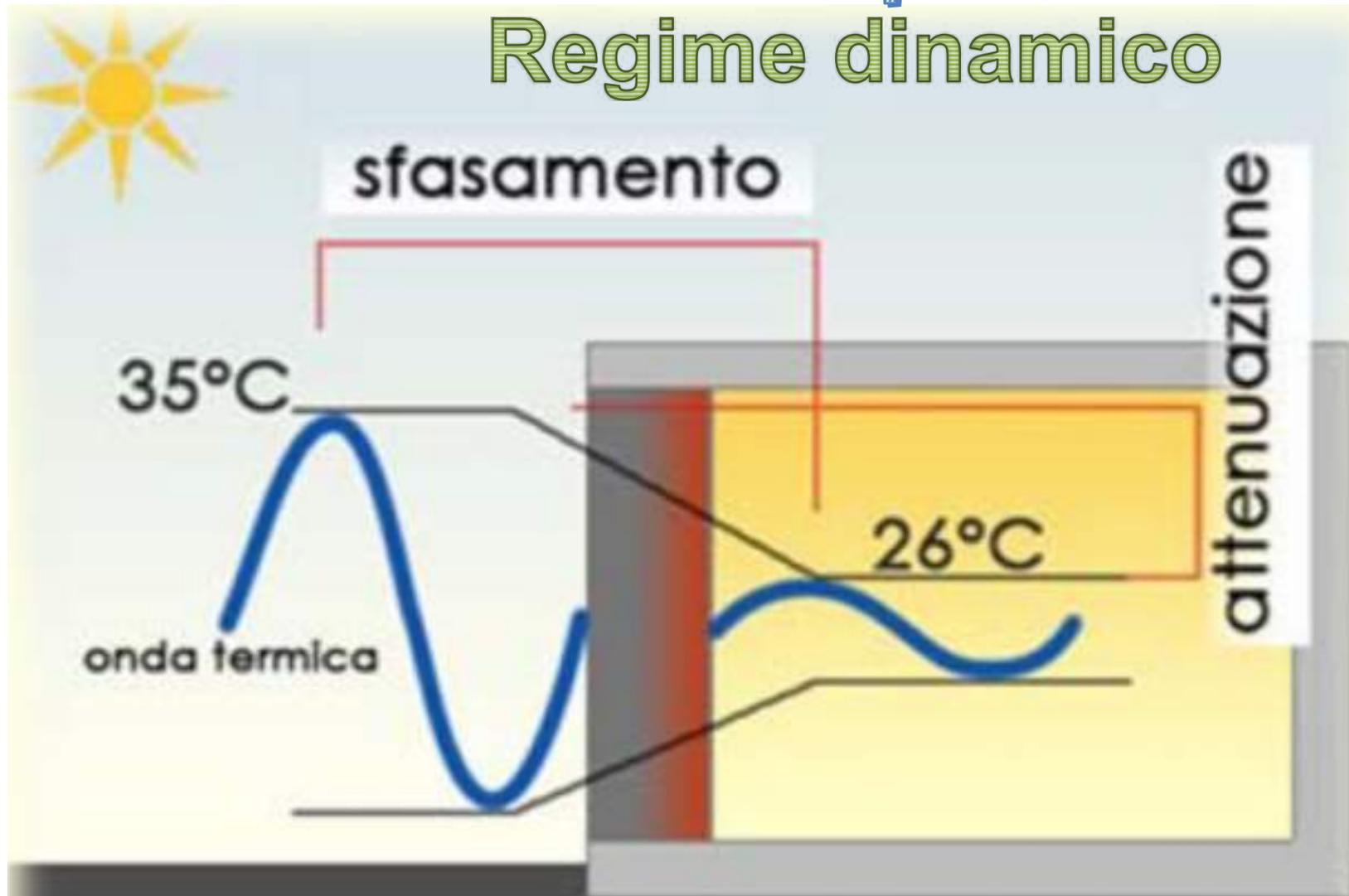


Introduzione

Introduzione



Fluttuazioni di temperatura Regime dinamico



Stoccaggio di energia

Calore specifico

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

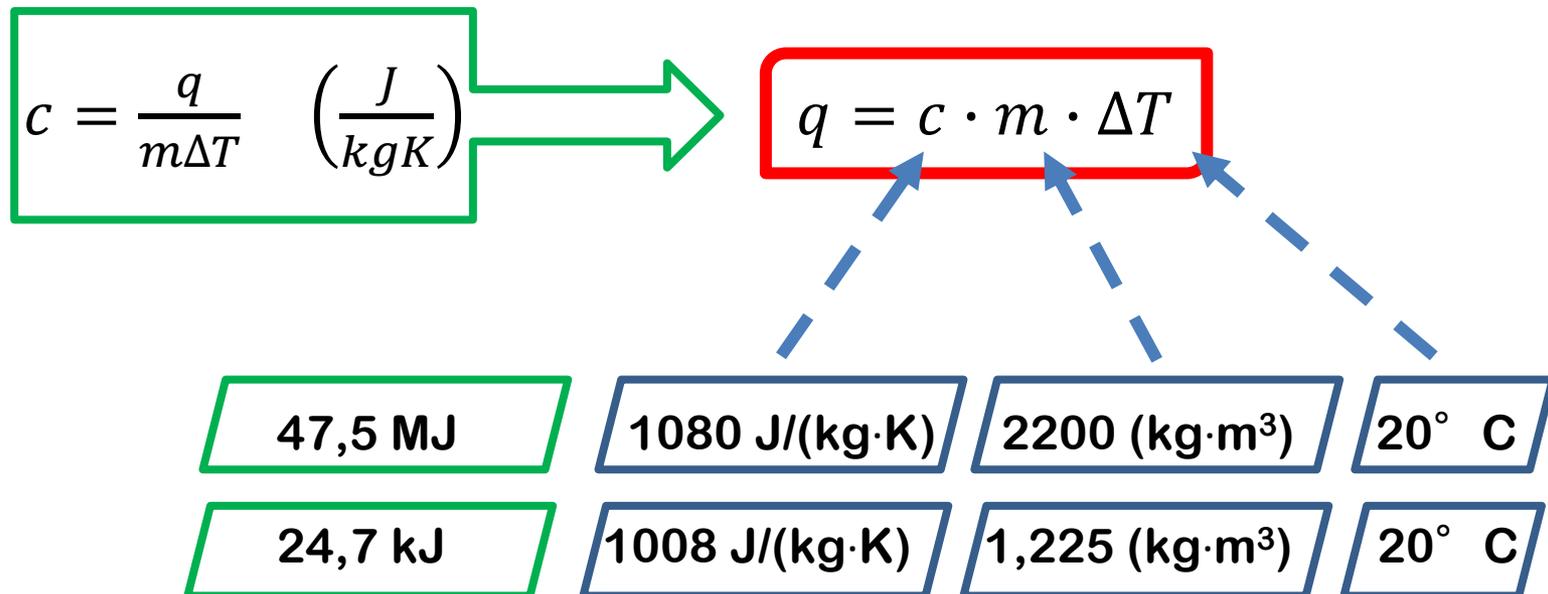
Capacità termica

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

Esempio applicativo

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

- 1 m³ di calcestruzzo normale
- 1 m³ di aria



Grandezze Termiche

Esempio applicativo

47,5 MJ	1080 J/(kg·K)	2200 (kg·m ³)	20° C
24,7 kJ	1008 J/(kg·K)	1,225 (kg·m ³)	20° C

47 MJ → 47.000.000 J = W · s

1 h = 3600 s; 1 kW = 1³ W;
1 MW = 1⁶ W

47 MJ → 1,32 × 10⁴ W · h → 13,2 kW · h

24,7 kJ → 6,86 W · h

(conduzione e monodimensionale)

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

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

Diffusività

Con $T=T(t,x)$

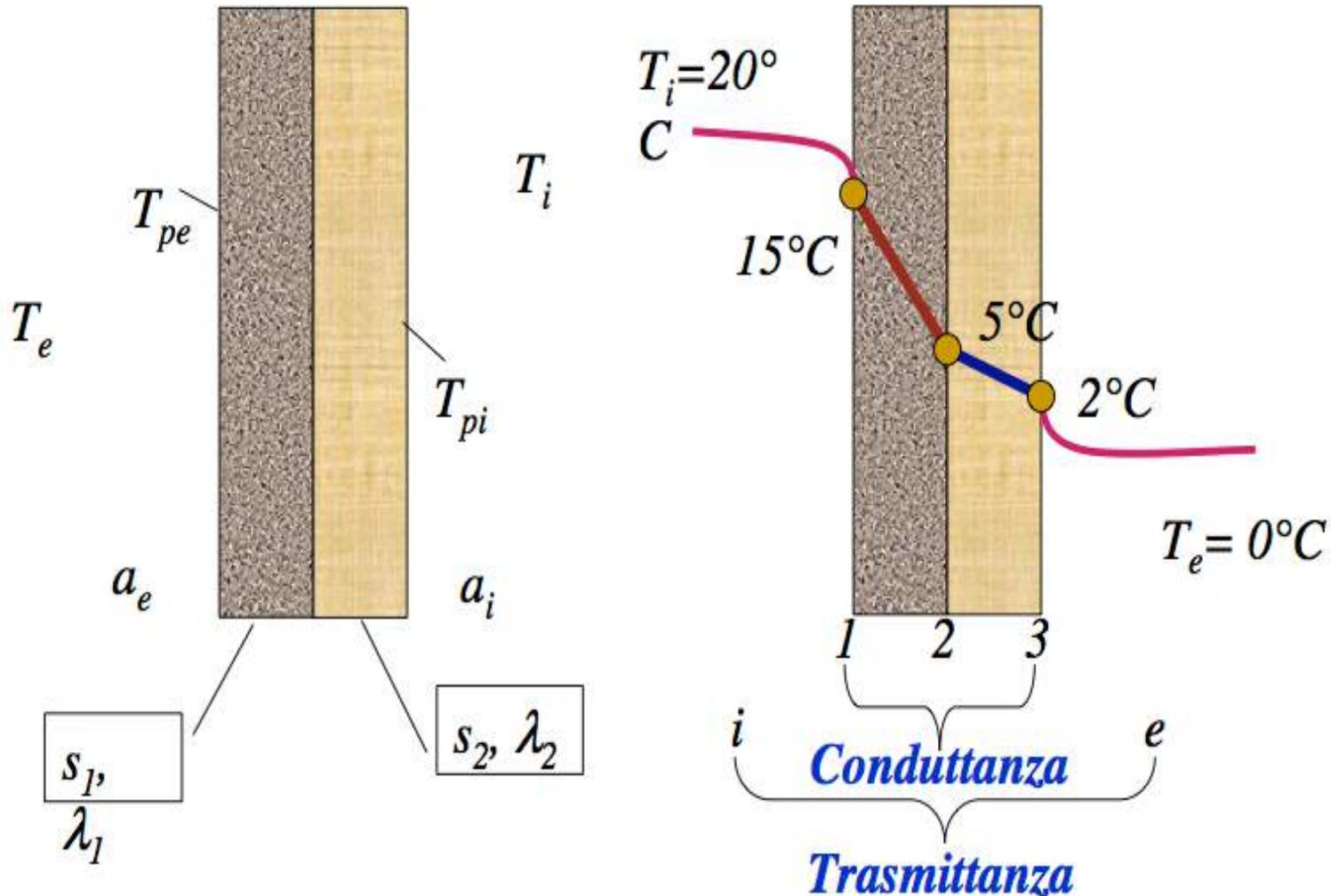
(conduzione)

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

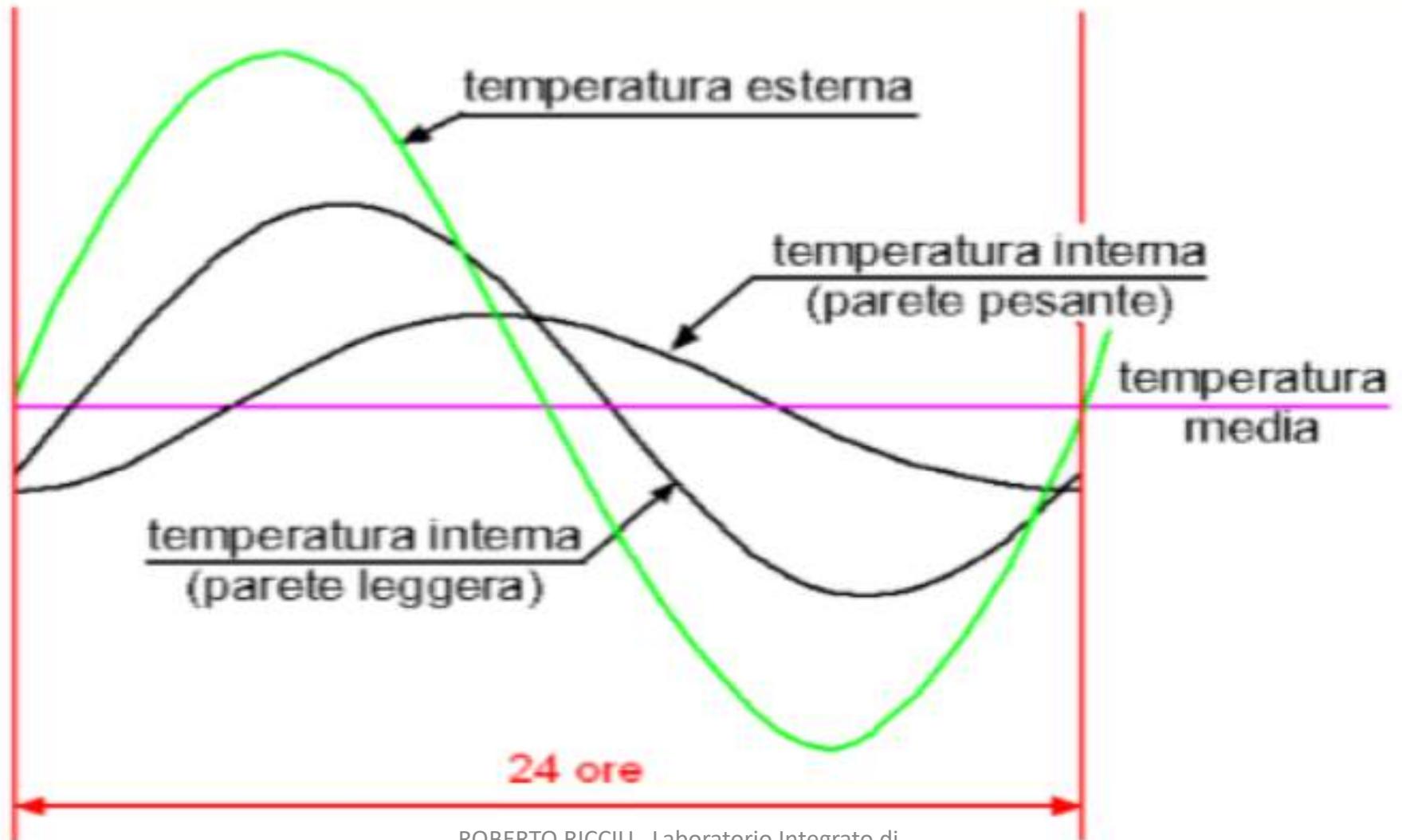
(conduzione)

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

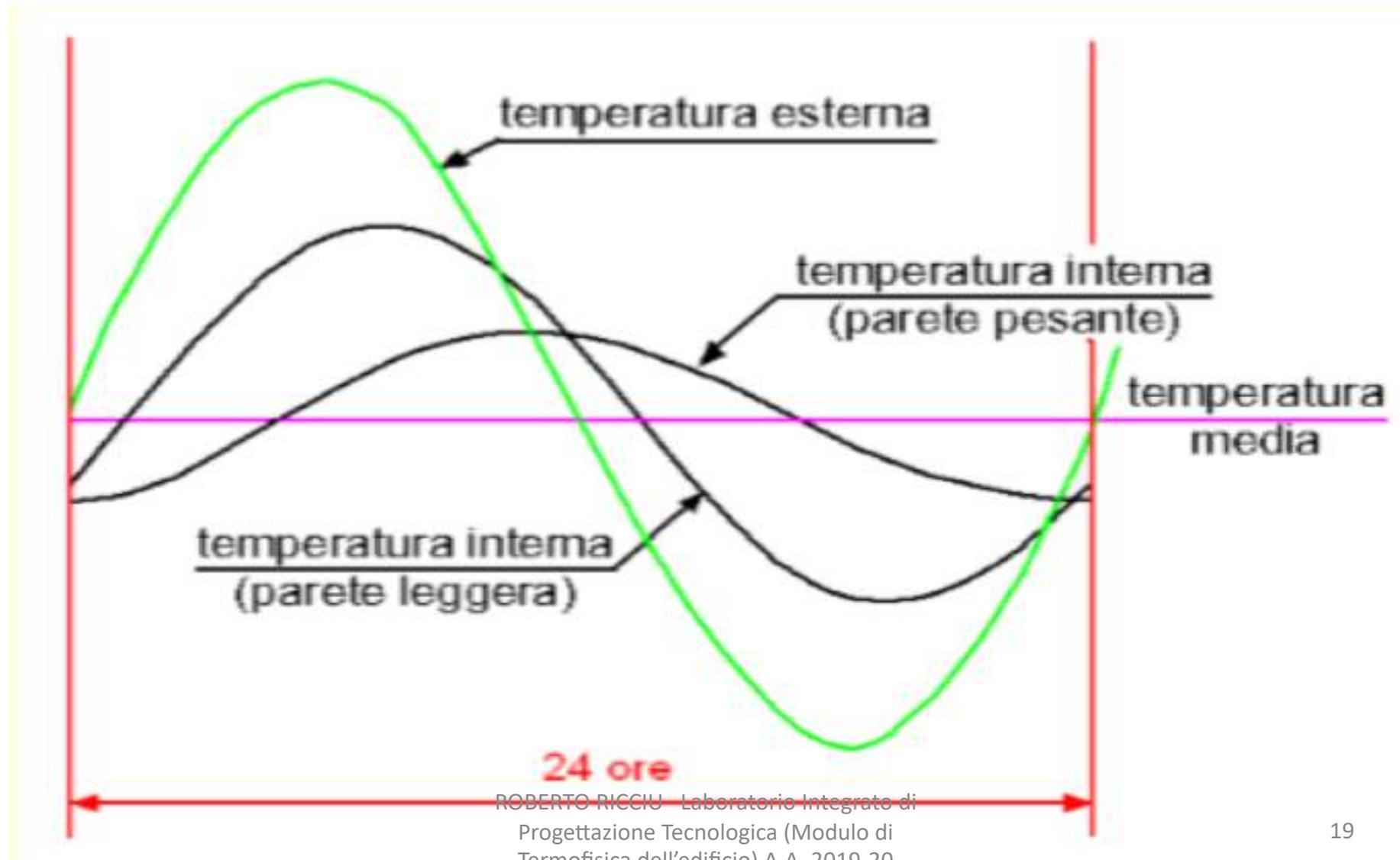
Trasmissione del calore attraverso una parete
 Flusso monodimensionale / Regime stazionario / Pareti omogenee



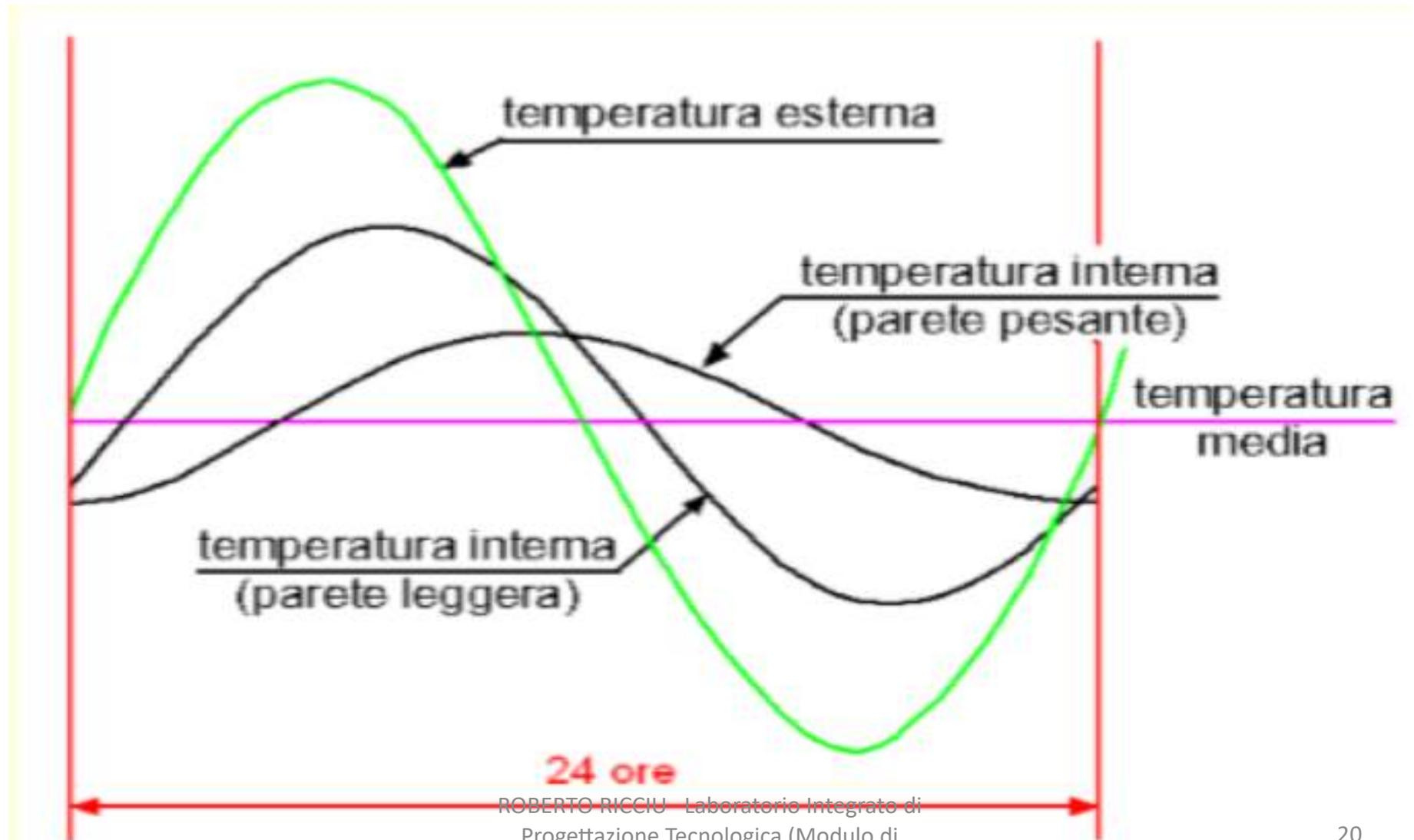
Regime termico dinamico/variabile nel tempo



Capacità termica e resistenza termica



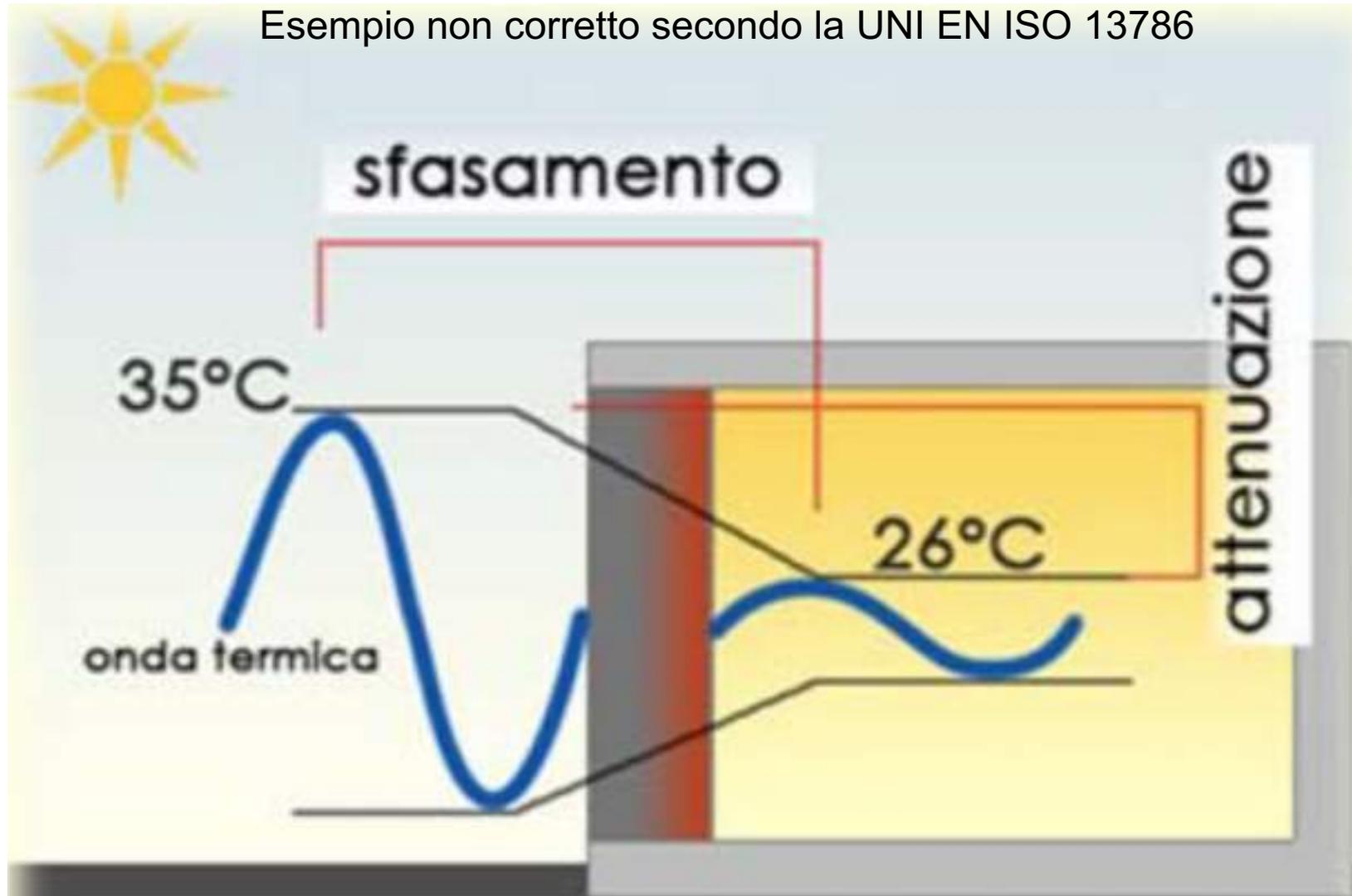
Inerzia termica



Esempi pratici

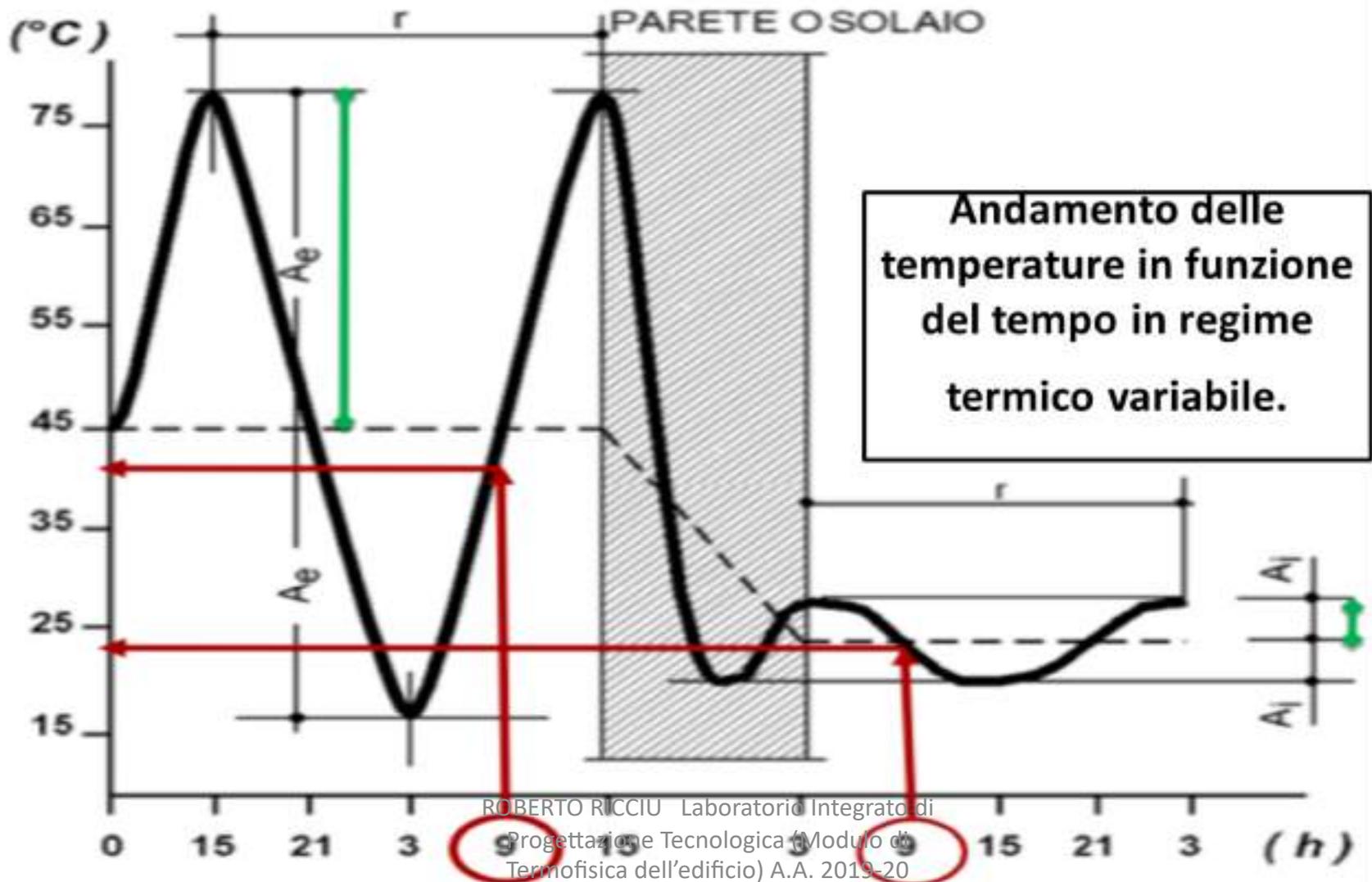
Esempi pratici

Esempio non corretto secondo la UNI EN ISO 13786



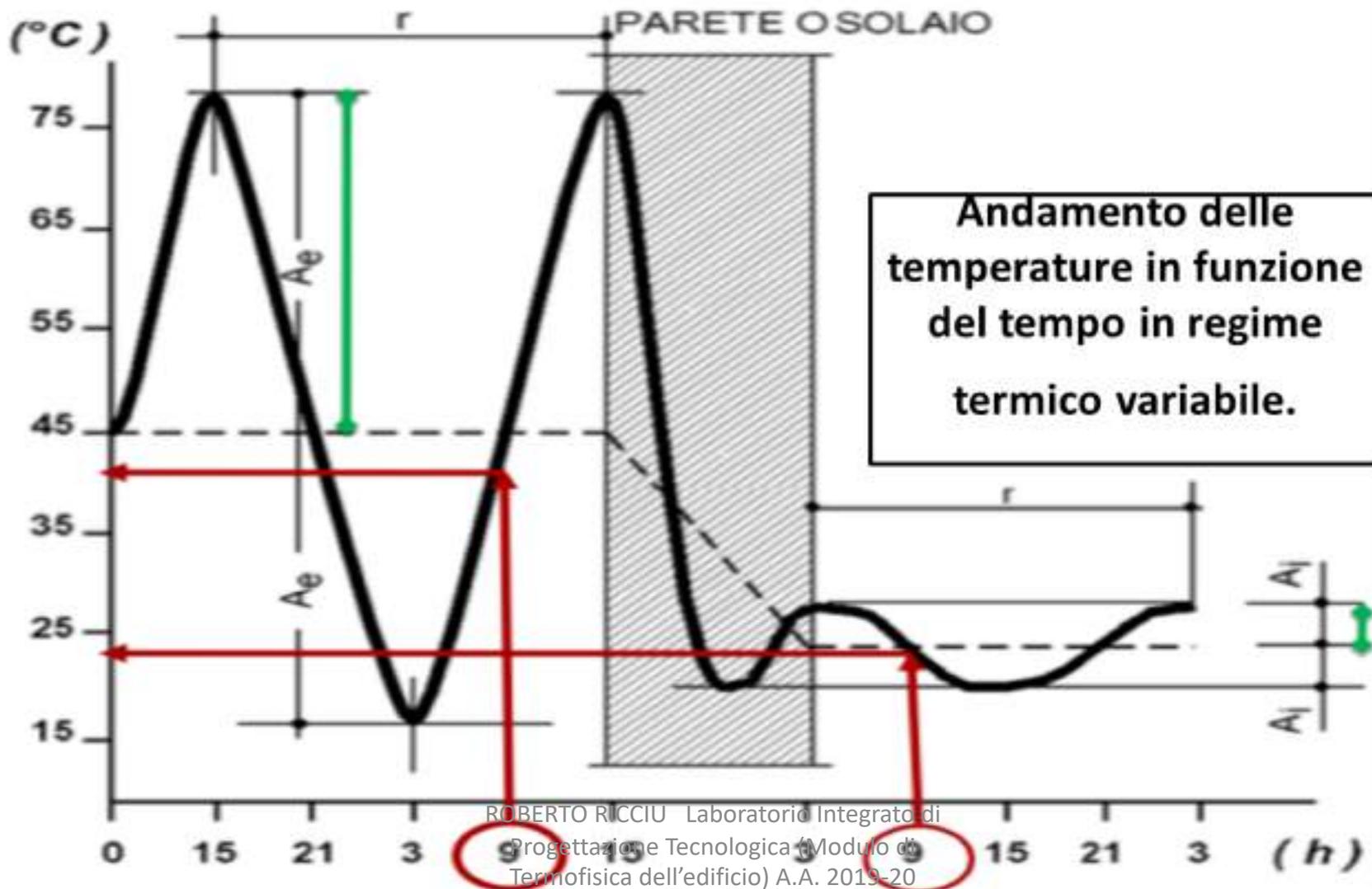
Esempi pratici

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



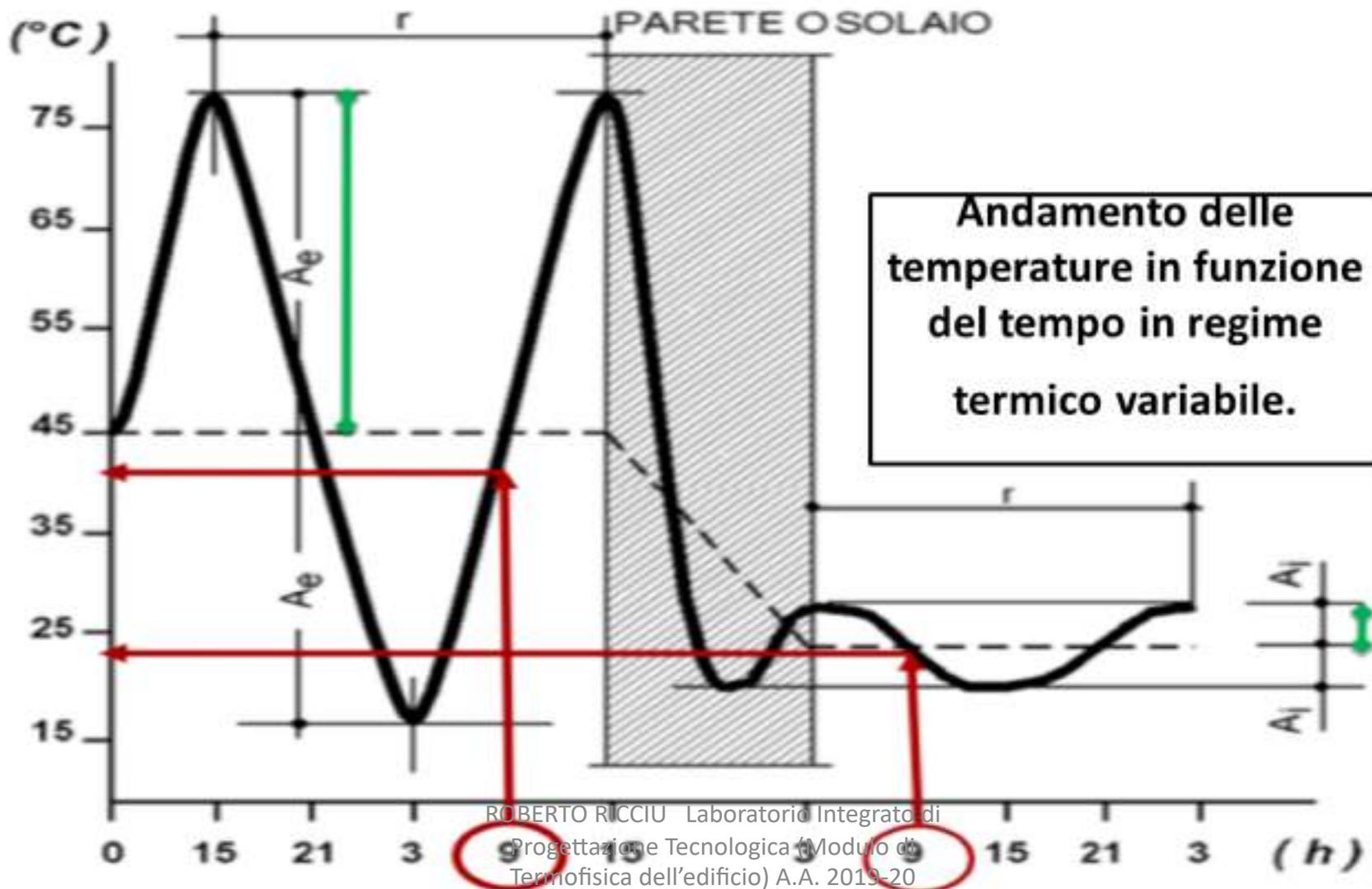
Esempi pratici

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



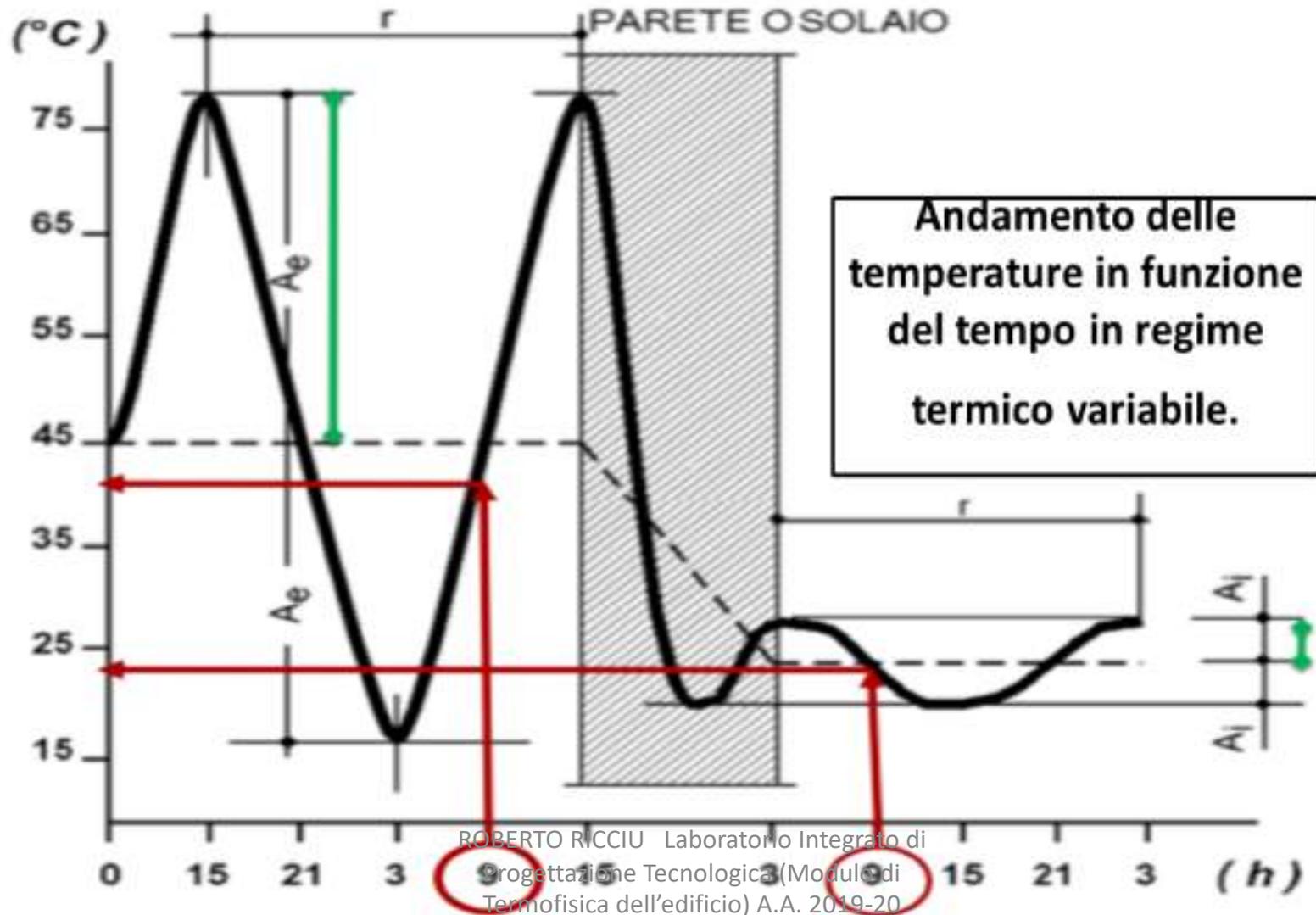
Esempi pratici

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

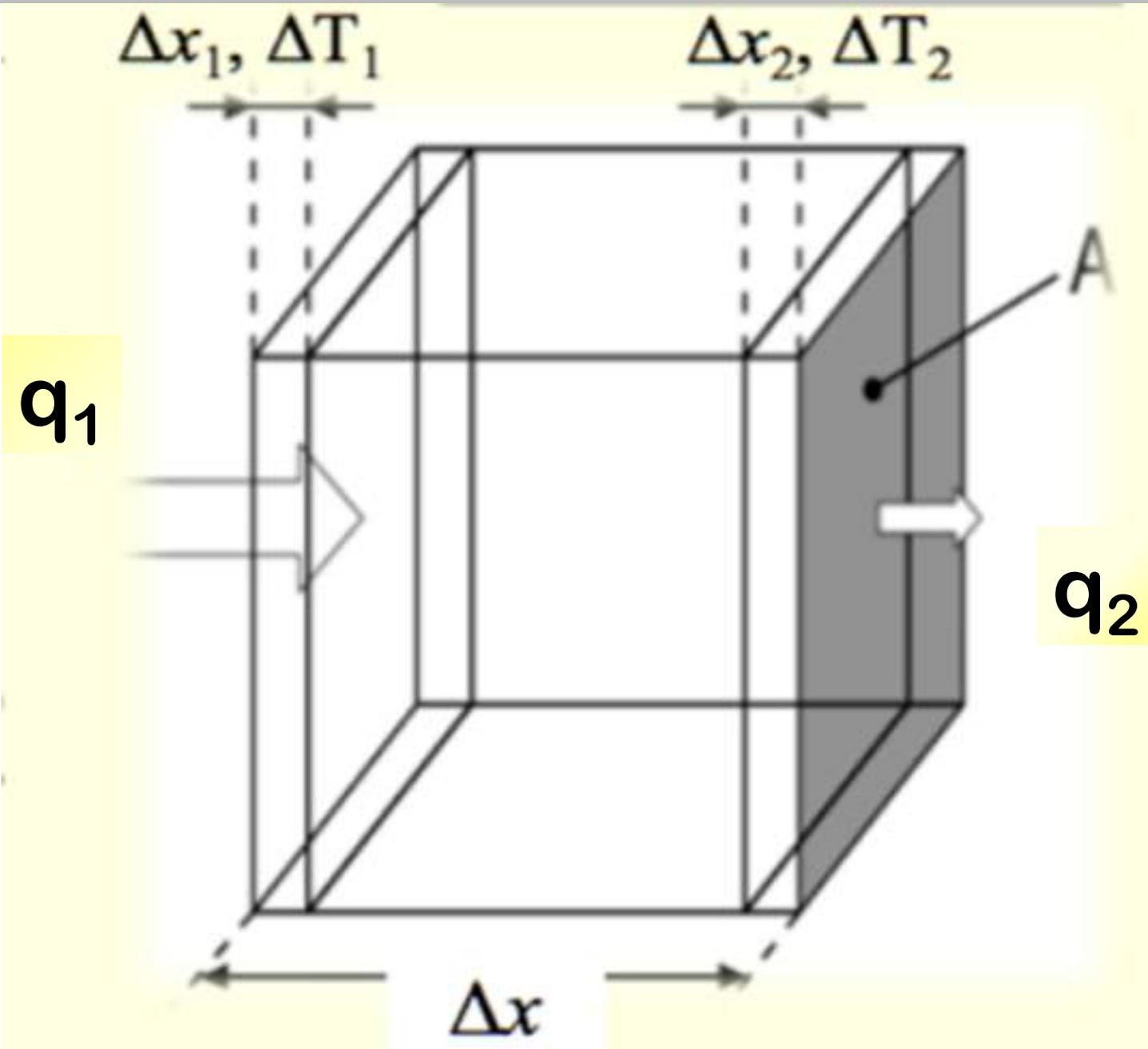


Esempi pratici

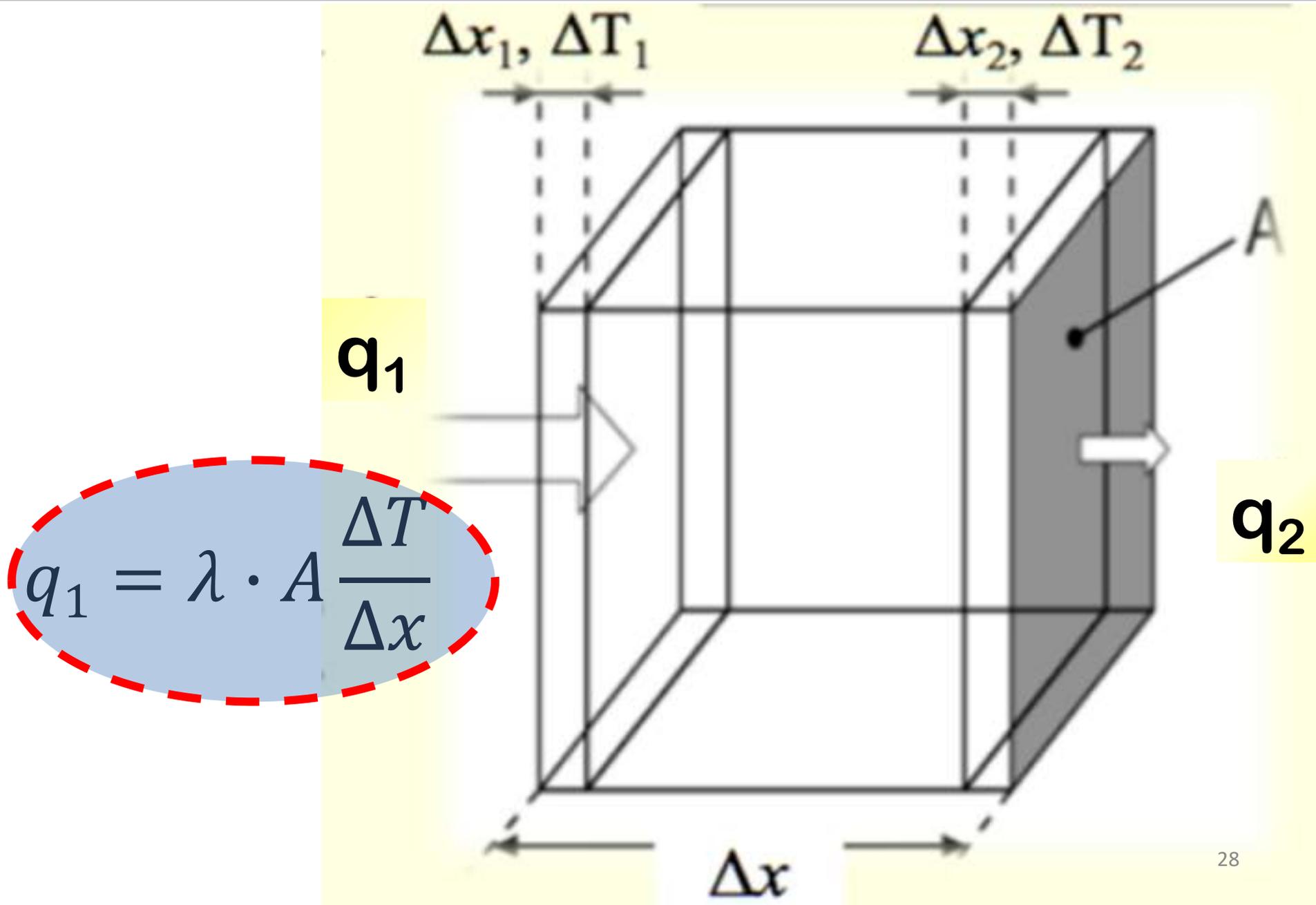
~~Contemporaneità tra massima insolazione e valore più alto della temperatura dell'aria indoor.~~



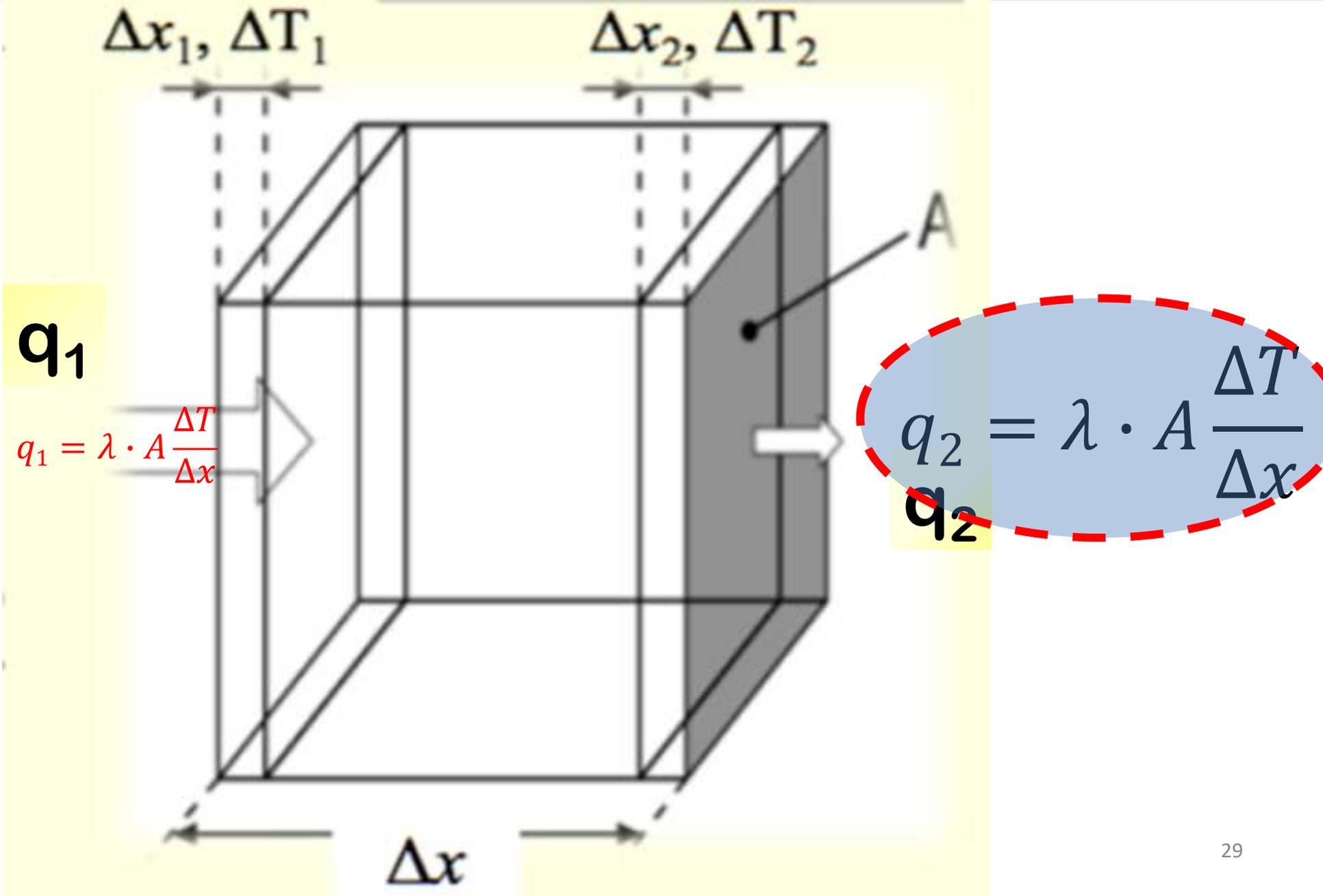
Esempi pratici



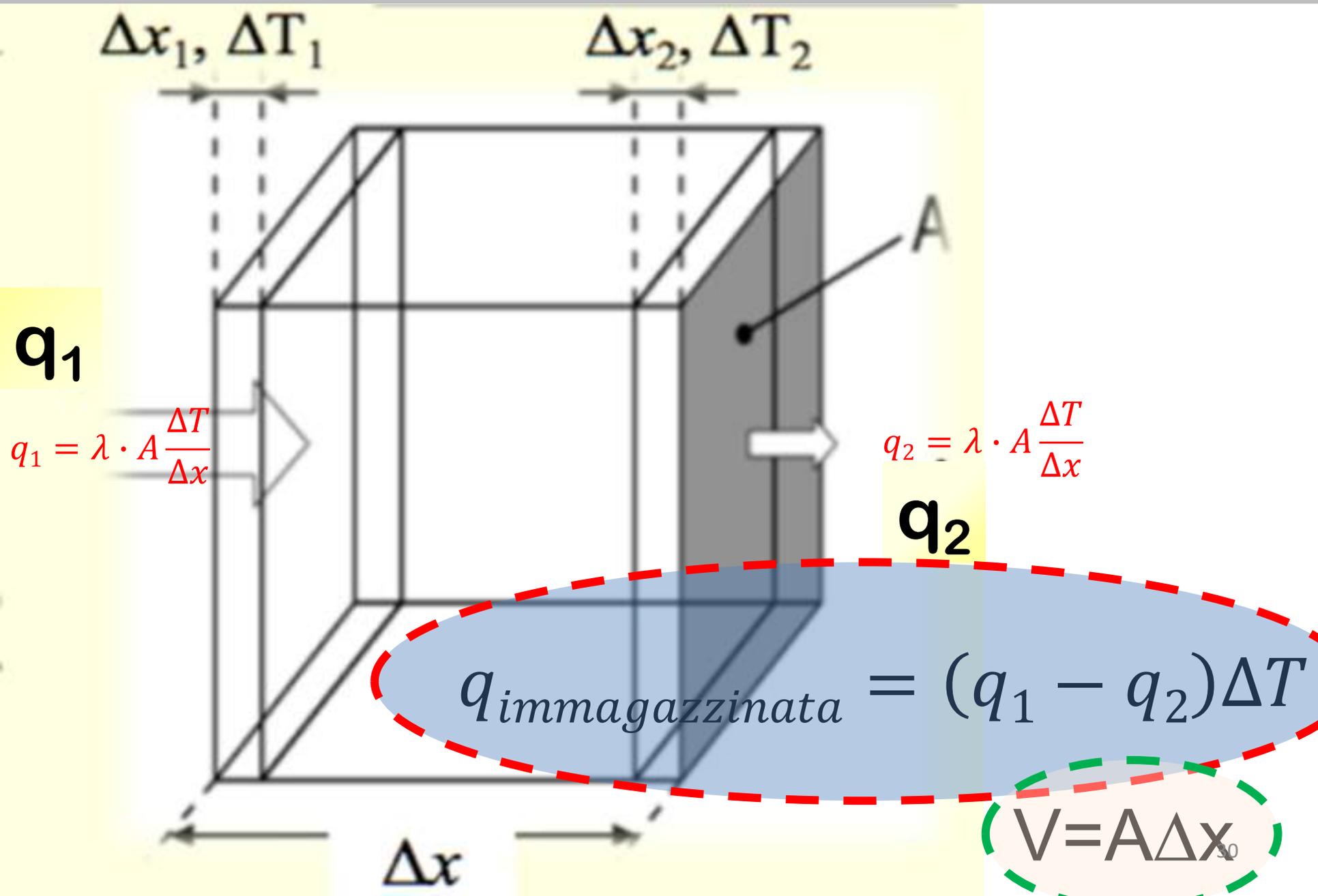
Esempi pratici



Esempi pratici



Esempi pratici



$\Delta x_1, \Delta T_1$

$\Delta x_2, \Delta T_2$

A

q_1

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

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

q_2

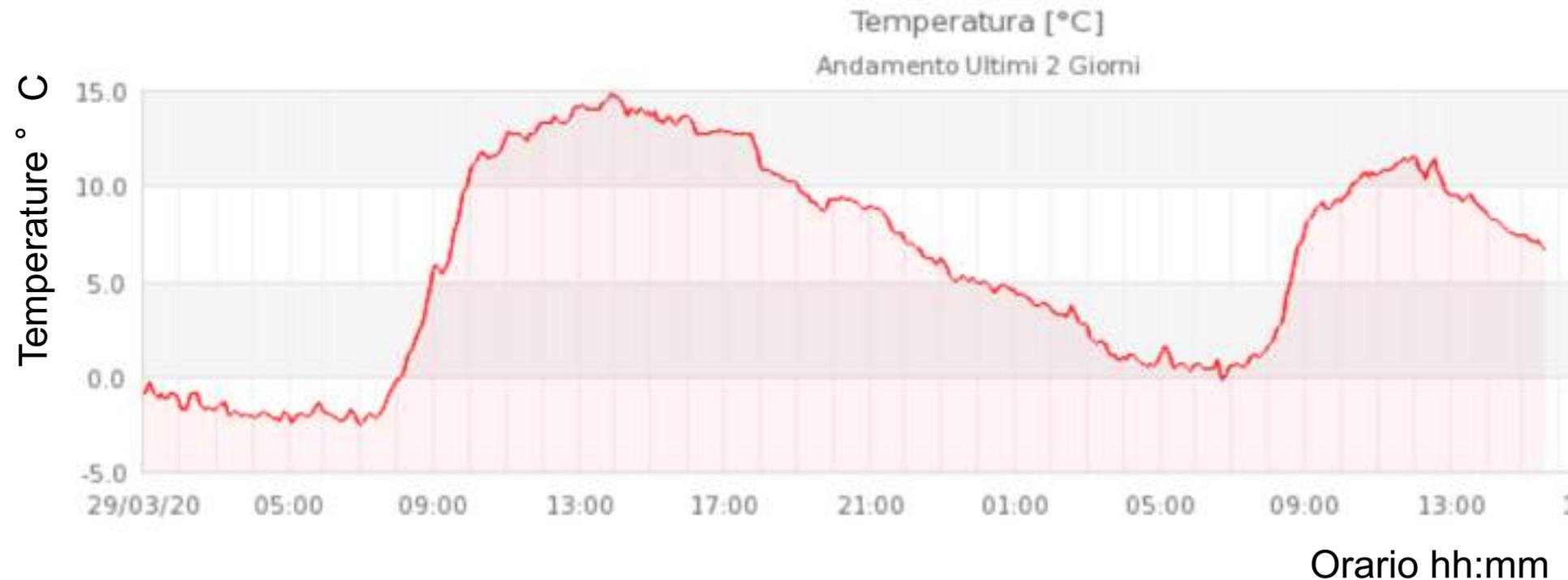
$$q_{immagazzinata} = (q_1 - q_2) \Delta T$$

$$V = A \Delta x$$

Δx

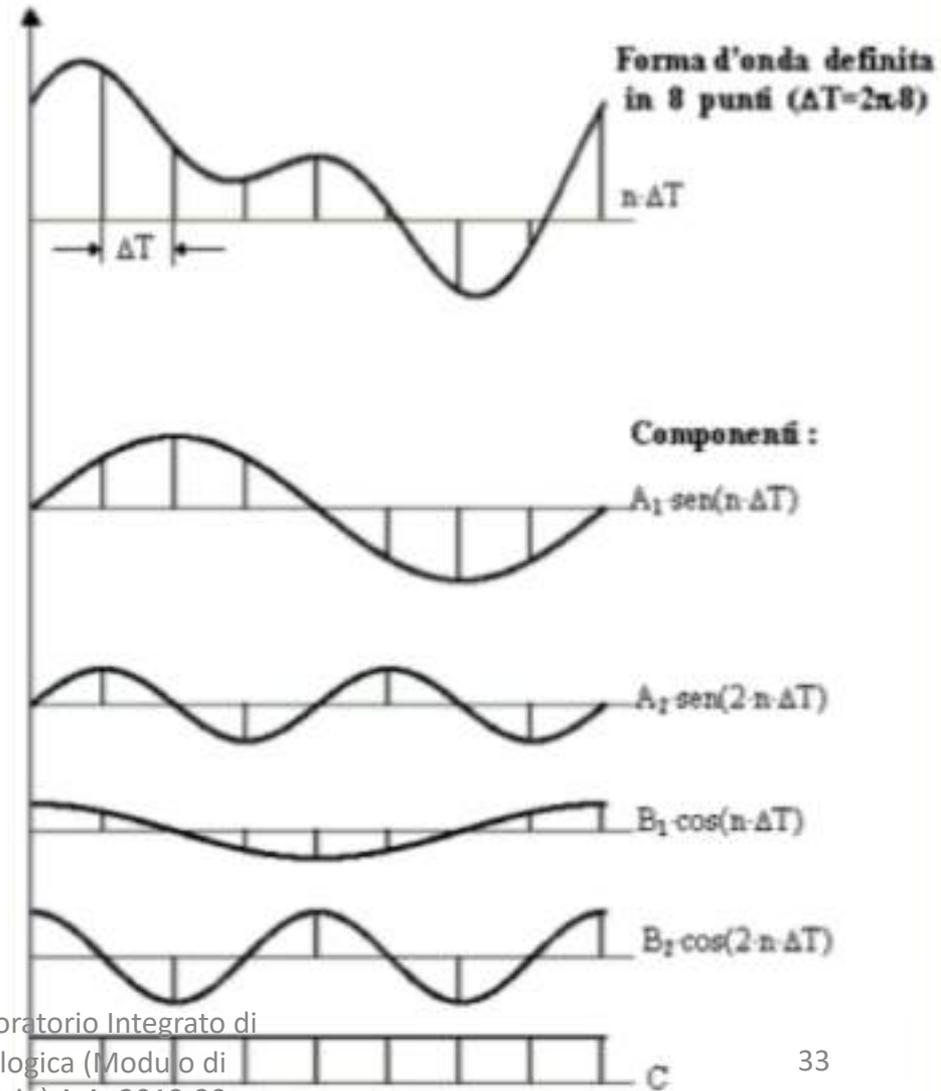
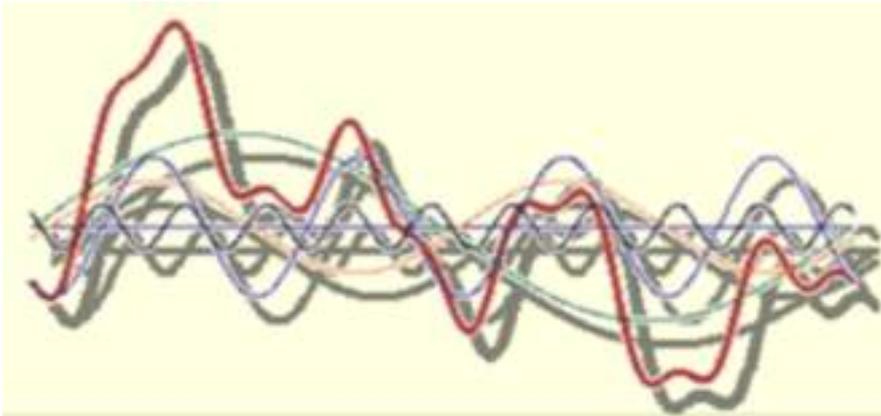
Il modello armonico

Il regime dinamico e il modello di studio



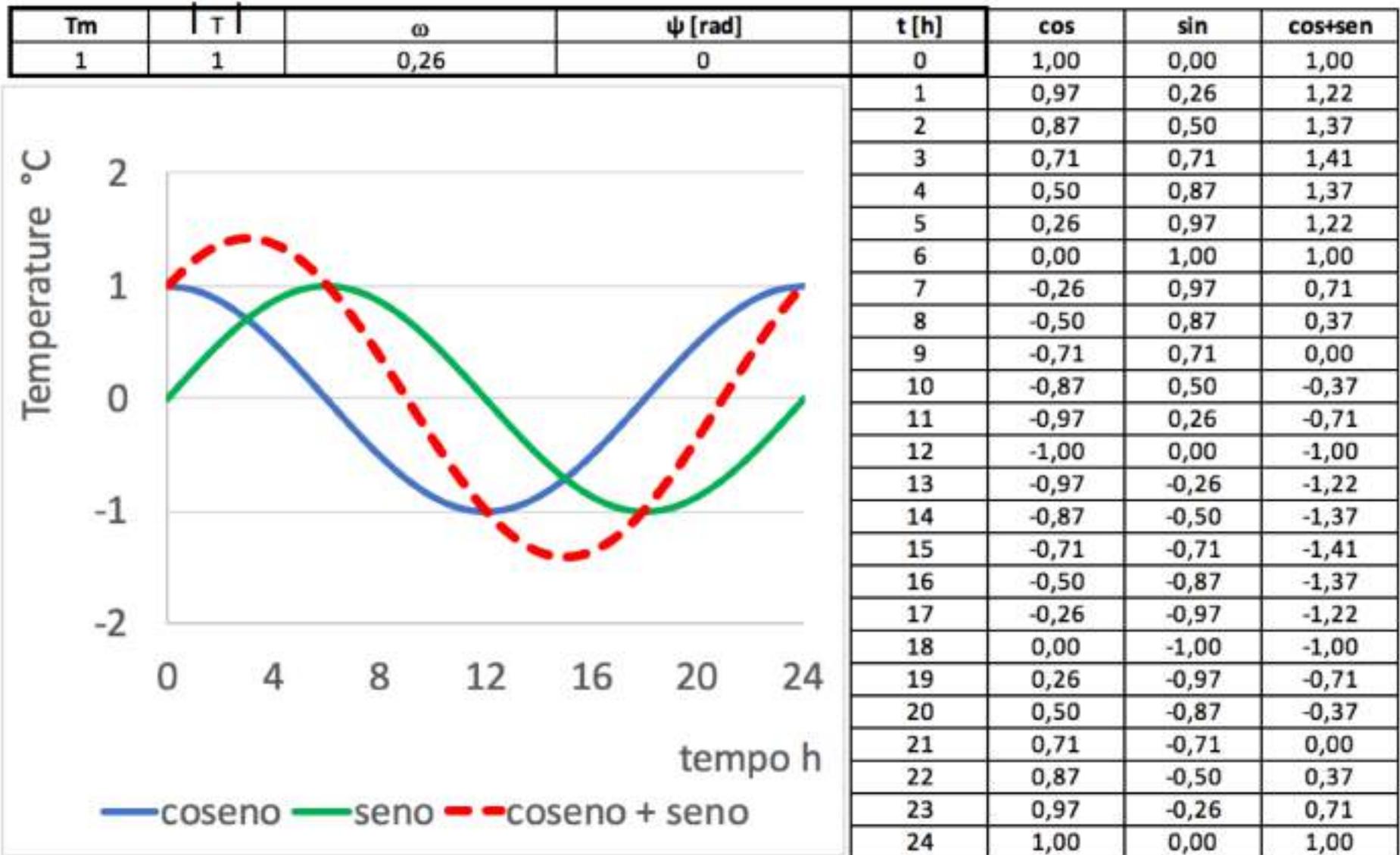
Il regime dinamico e il modello di studio

“Metodi Armonici”



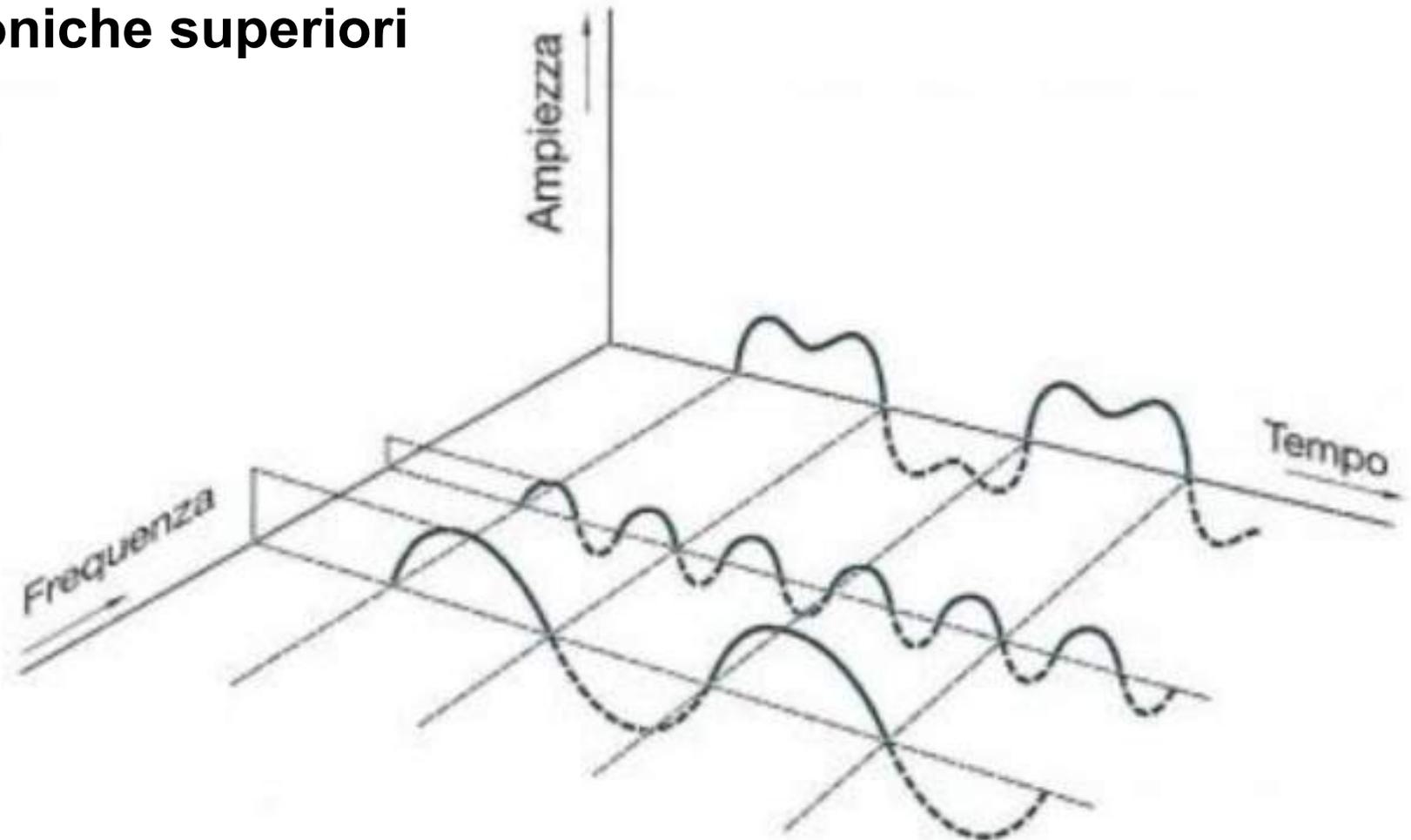
Il regime dinamico e il modello di studio

Esempio di due onde cosinusoidale e sinusoidale sommate



Il regime dinamico e il modello di studio

- Sviluppo in serie di Fourier,
- armoniche
- **prima armonica o fondamentale**
- **armoniche superiori**



Joseph Fourier

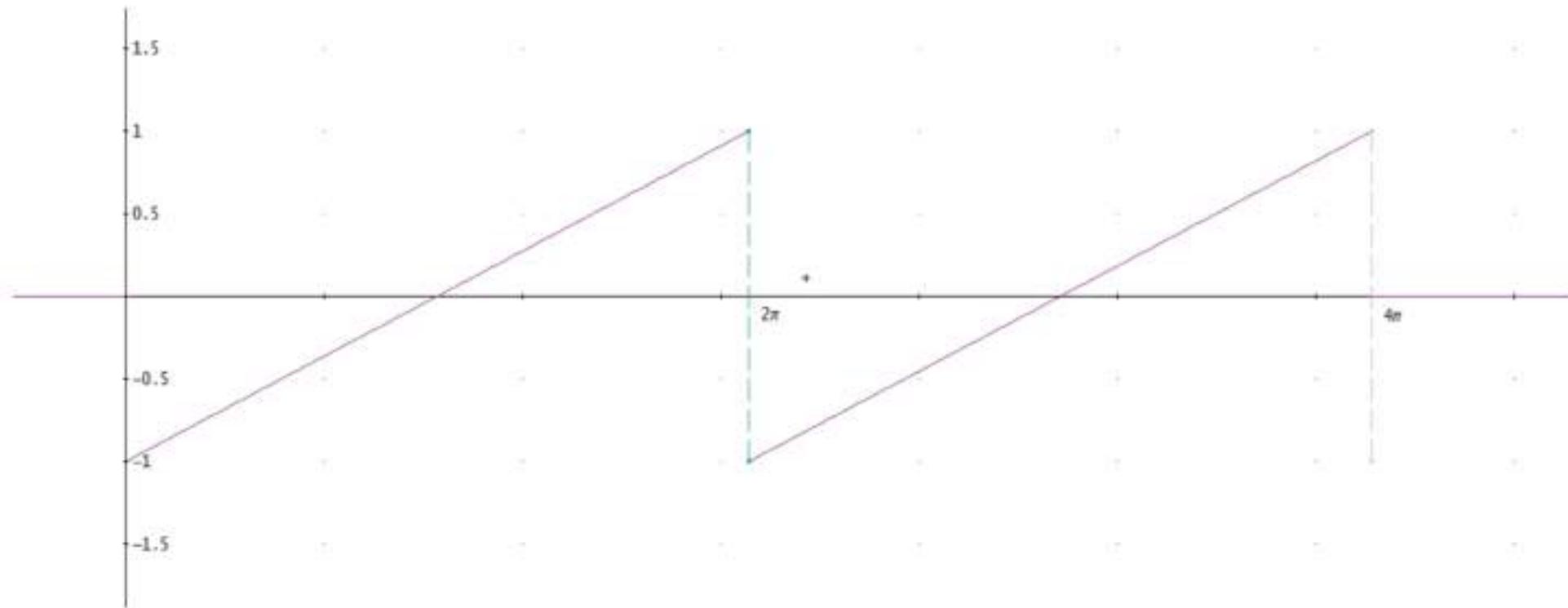
$$\frac{1}{2}a_0 + a_1\cos x + a_2\cos 2x + \dots a_n\cos nx + \dots b_1\sin x + b_2\sin 2x + \dots b_n\sin nx + \dots$$

Ljeune Dirichelet -> funzioni periodiche,

Il regime dinamico e il modello di studio

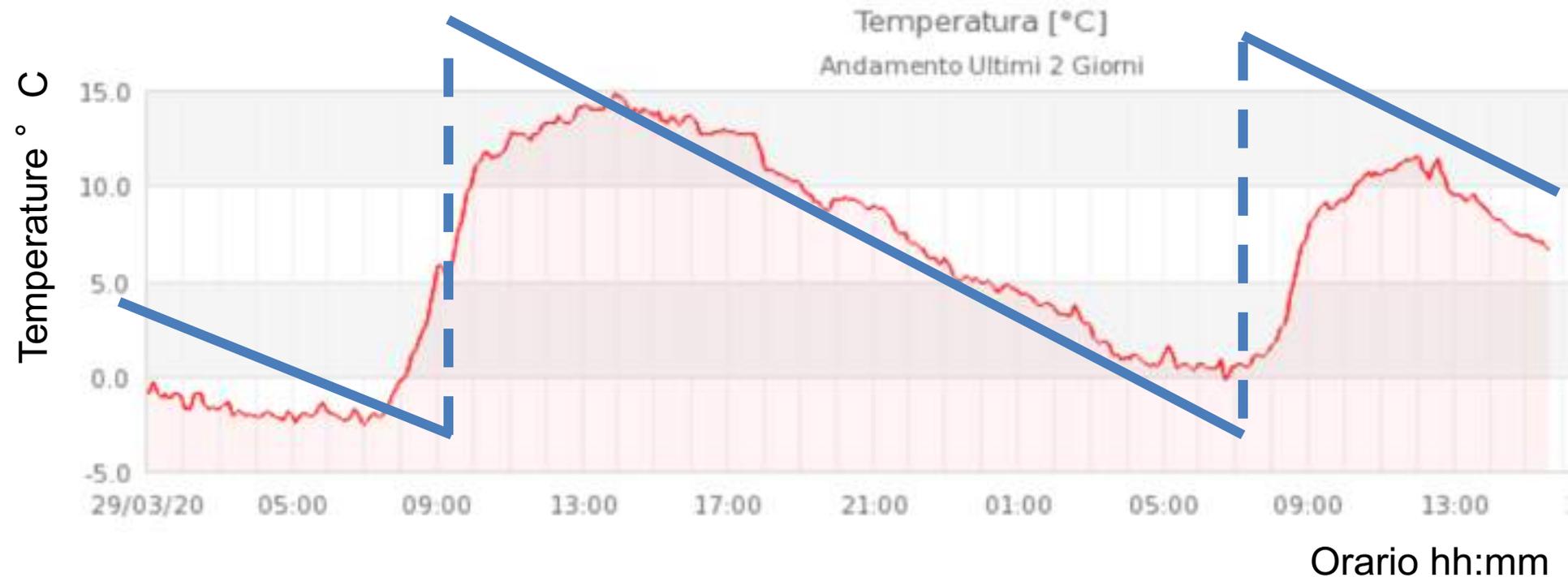
*analizzare un fenomeno ondulatorio attraverso una
combinazione di moti ondulatori più semplici.*

onda a dente di sega



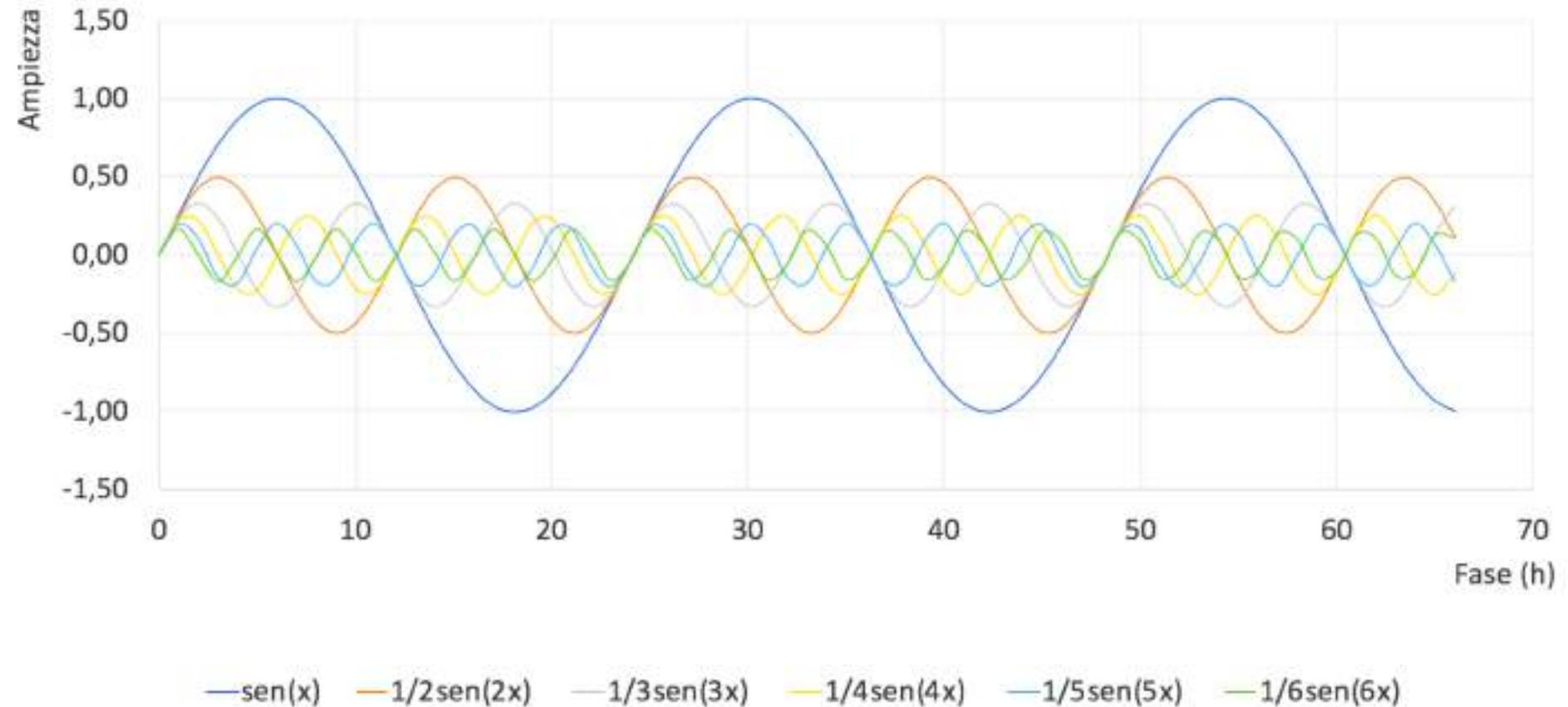
Il regime dinamico e il modello di studio

Sovrapposizione di un'onda termica naturale con una a dente di sega



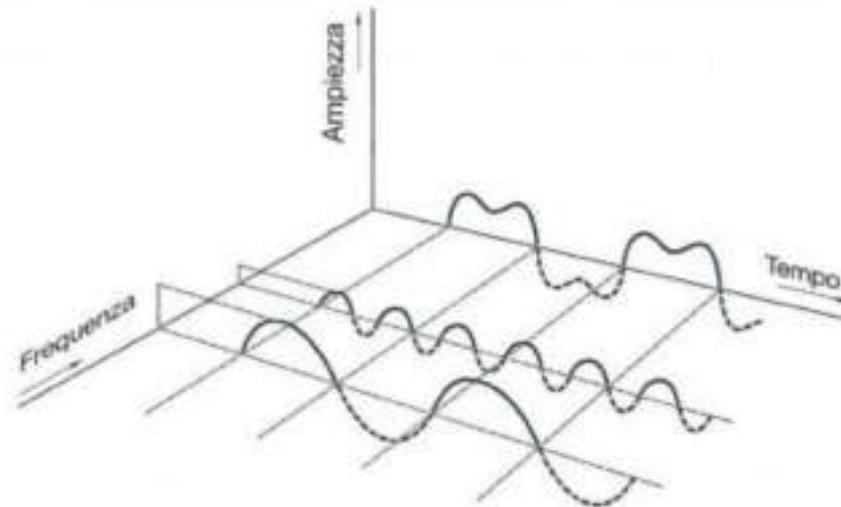
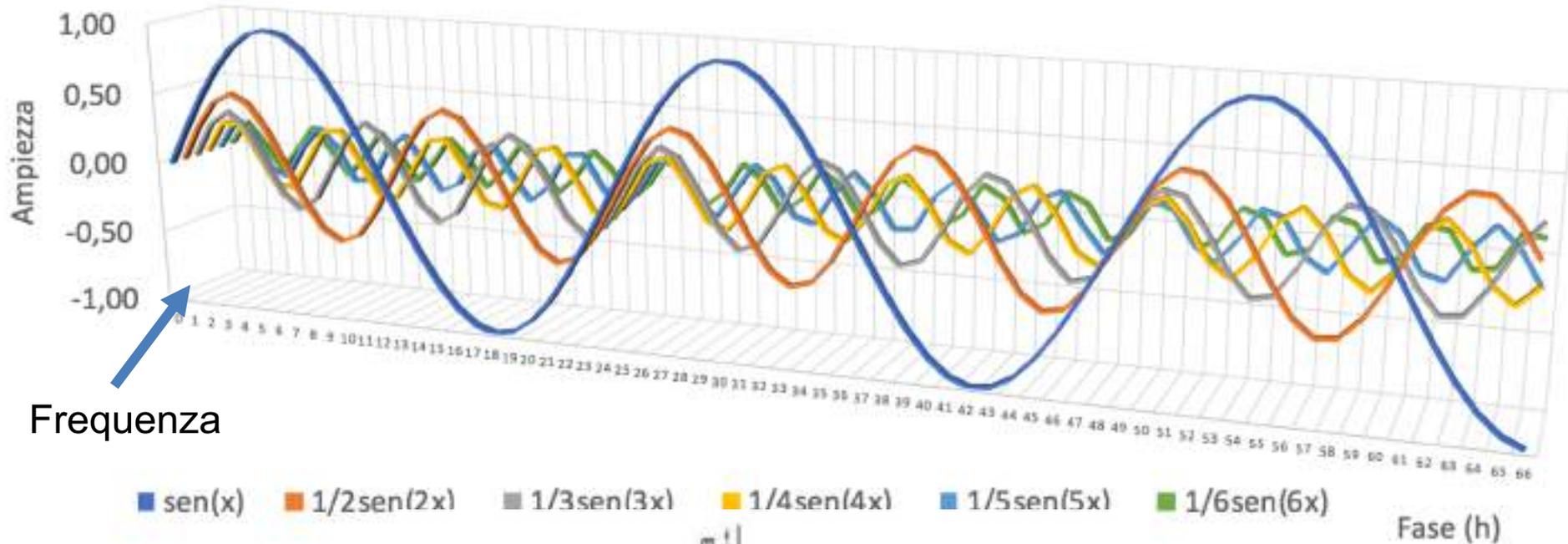
Il regime dinamico e il modello di studio

Esempio di sviluppo in serie di Fourier



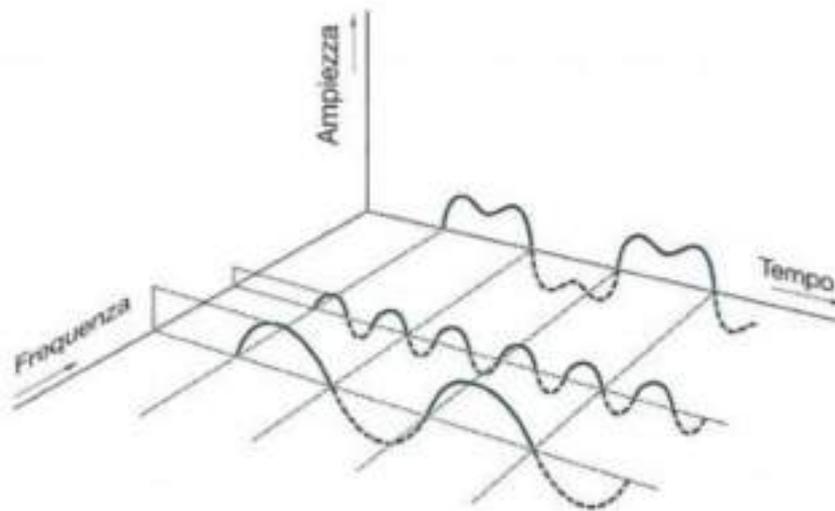
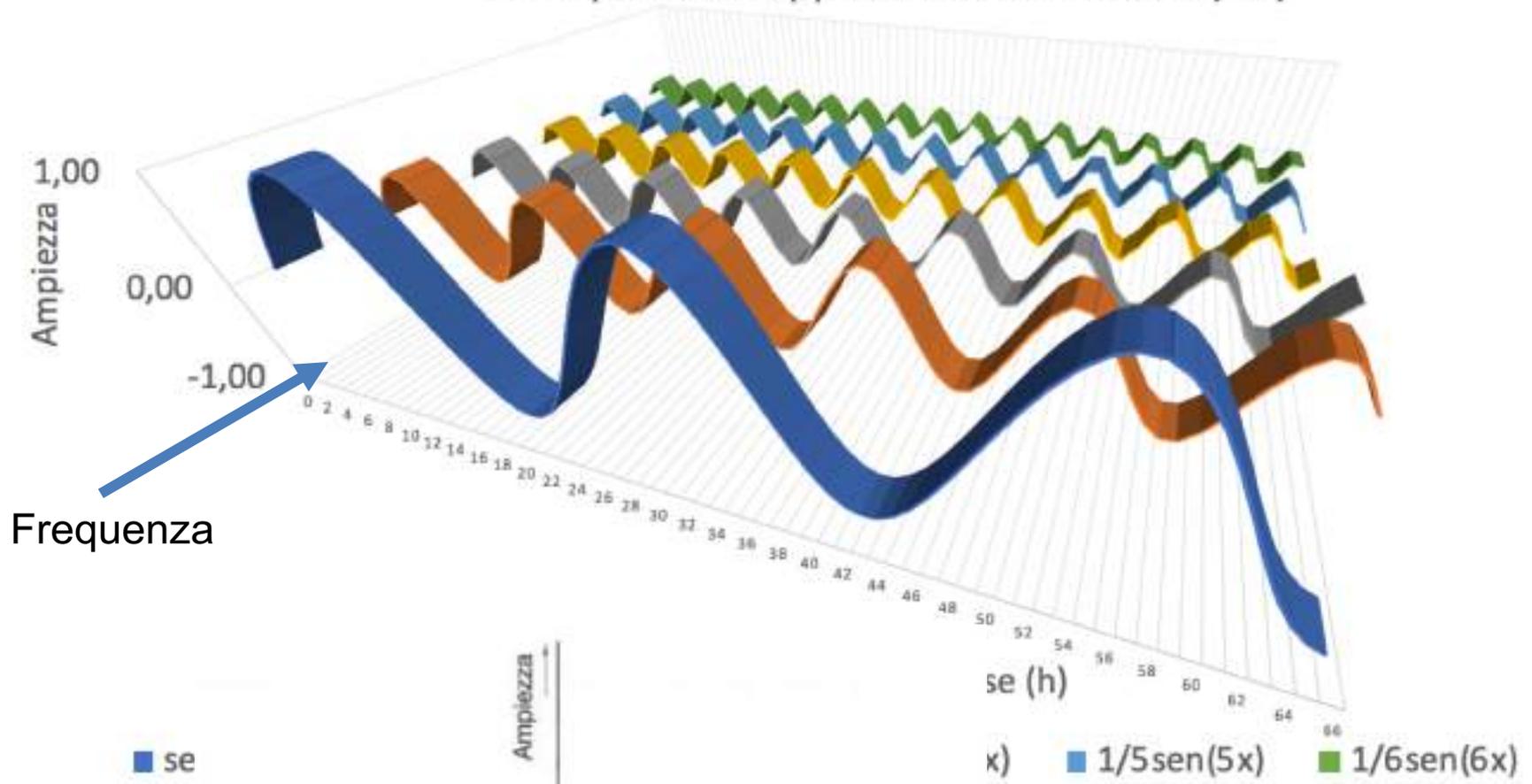
Il regime dinamico e il modello di studio

Esempio di sviluppo in serie di Fourier (3D)



Il regime dinamico e il modello di studio

Esempio di sviluppo in serie di Fourier (3D)

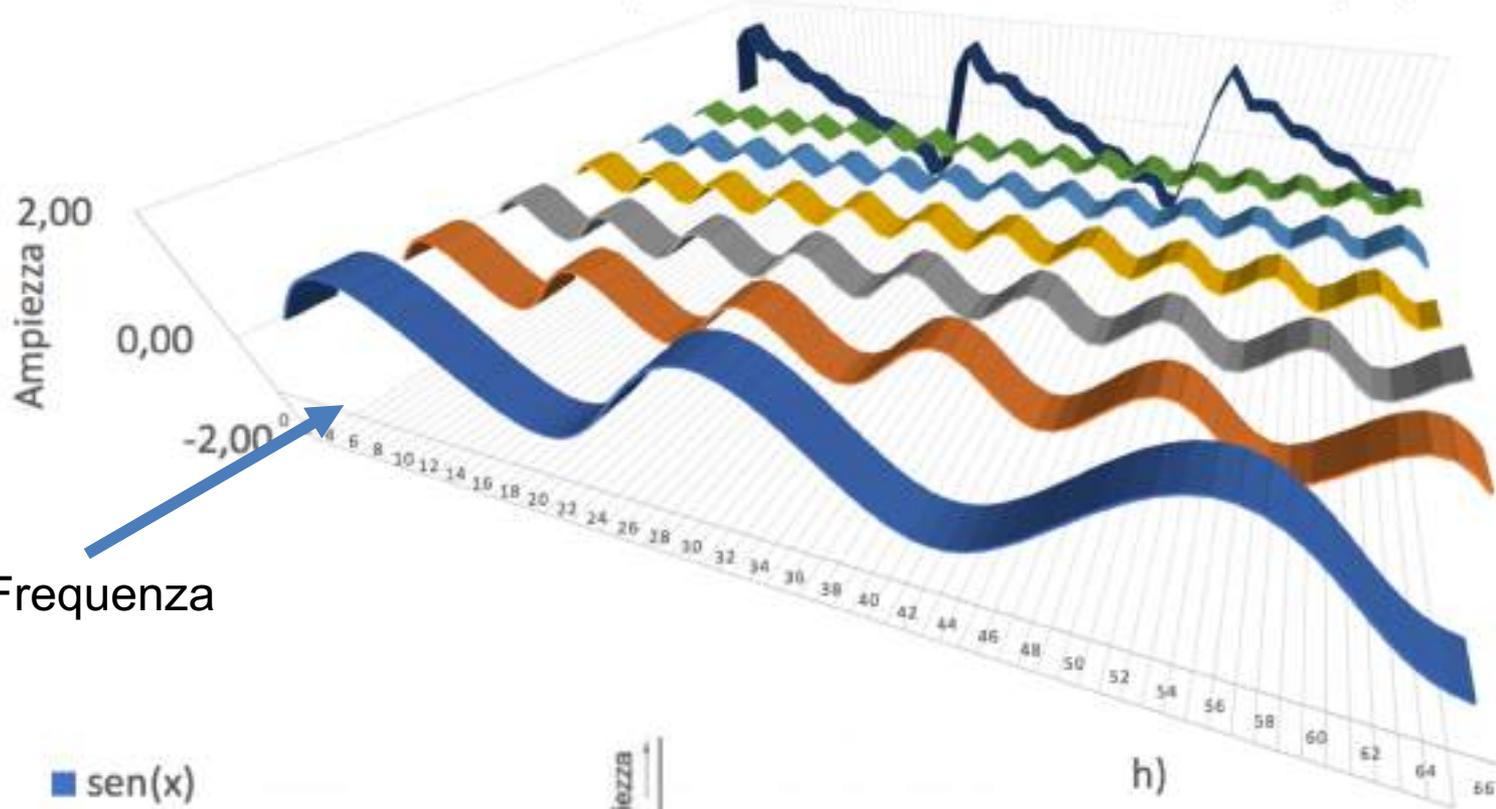


nibile

e
-20

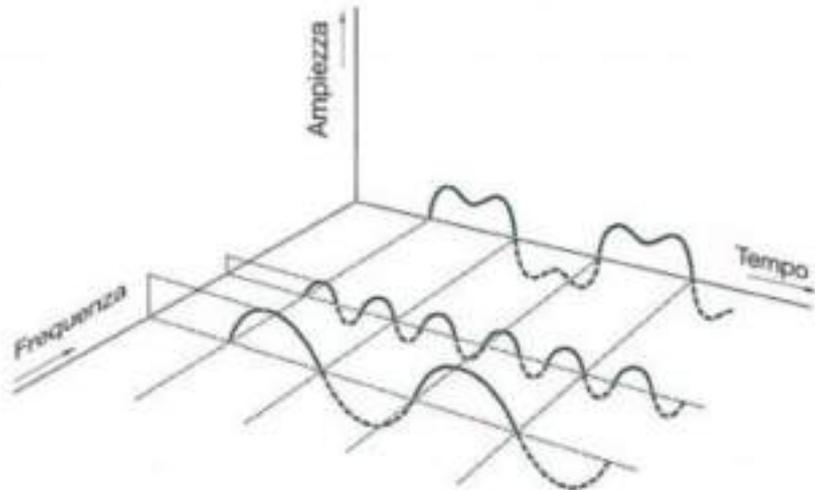
Il regime dinamico e il modello di studio

Esempio di sviluppo in serie di Fourier (3D)



Frequenza

- $\sin(x)$
- $\frac{1}{3}\sin(3x)$
- $\frac{1}{5}\sin(5x)$
- somma de

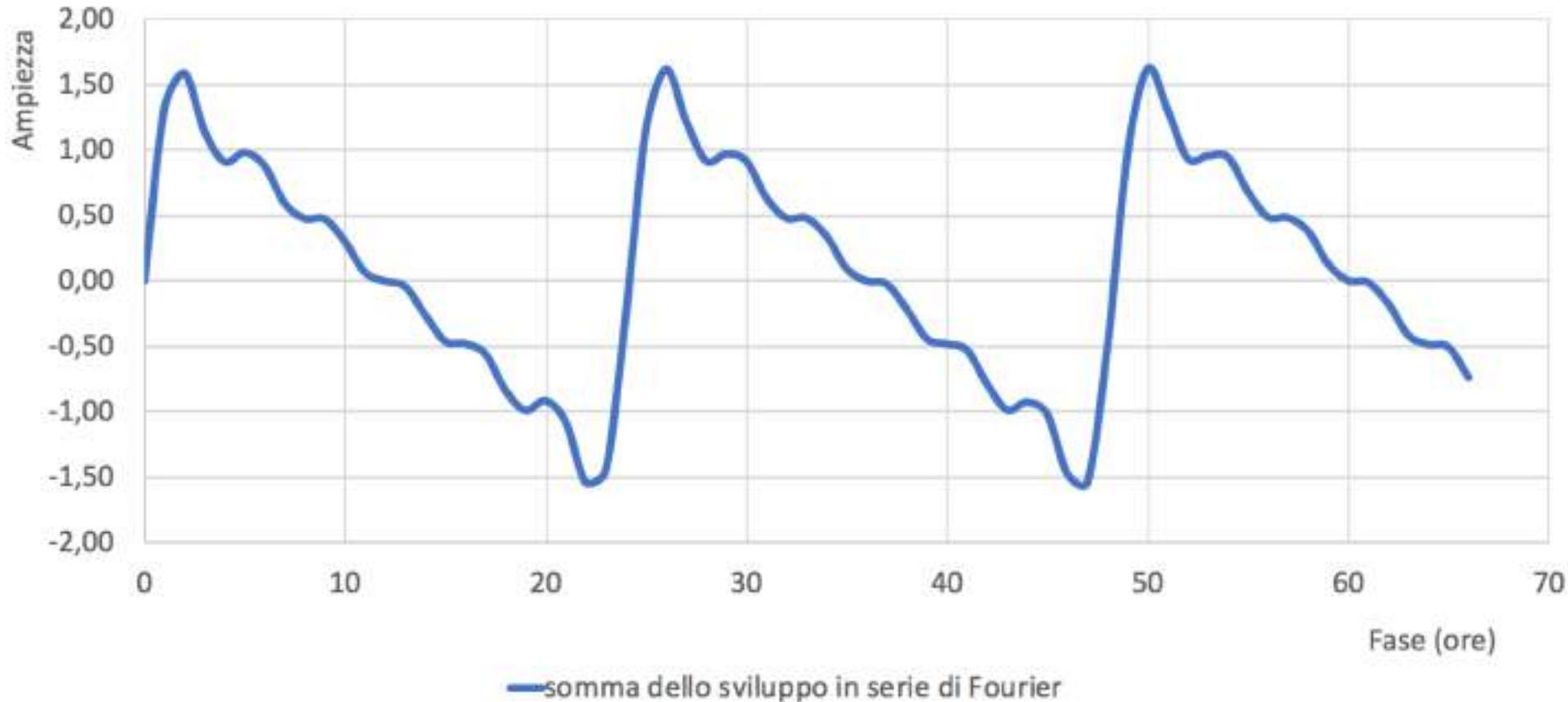


h)

ile

Il regime dinamico e il modello di studio

Modello di evoluzione temporale delle temperature giornaliere



Il regime dinamico e il modello di studio

SVILUPPO IN SERIE DI FOURIER DELLE FUNZIONI PERIODICHE PARI E DISPARI

Se $f(x)$ è pari, il suo sviluppo in serie di Fourier non contiene la funzione seno ed è una funzione di soli coseni:

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos nx$$

SVILUPPO IN SERIE DI FOURIER DELLE FUNZIONI PERIODICHE PARI E DISPARI

Se $f(x)$ è dispari, il suo sviluppo in serie di Fourier non contiene la funzione coseno ed è una funzione di soli seni:

$$\sum_{n=1}^{+\infty} b_n \sin nx$$

Il regime dinamico e il modello di studio

SVILUPPO IN SERIE DI FOURIER DELLE FUNZIONI PERIODICHE PARI E DISPARI

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} \left(a_n \cos \frac{\pi n x}{h} + b_n \sin \frac{\pi n x}{h} \right)$$

$$a_0 = \frac{1}{h} \int_{-h}^h f(x) dx$$

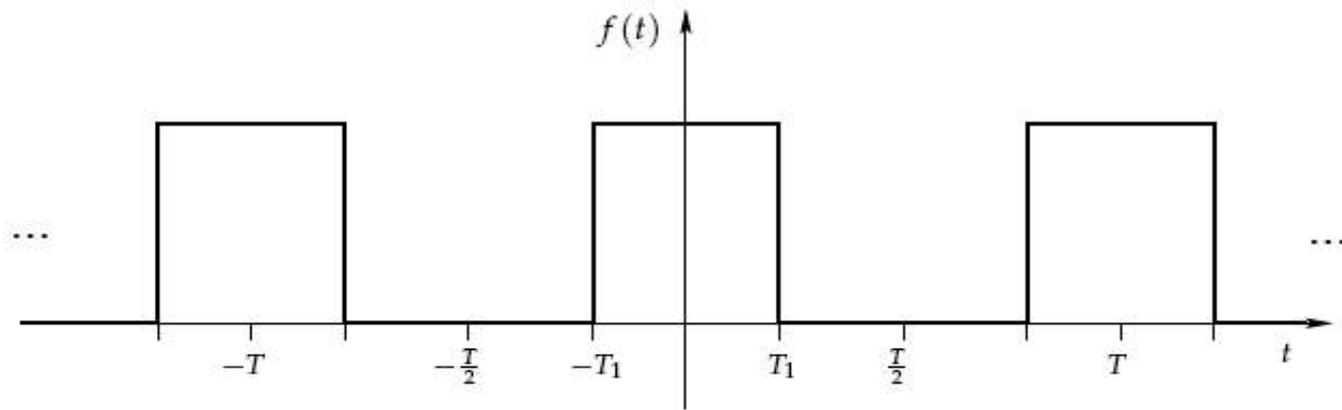
$$a_n = \frac{1}{h} \int_{-h}^h f(x) \cos \frac{\pi n x}{h} dx$$

$$b_n = \frac{1}{h} \int_{-h}^h f(x) \sin \frac{\pi n x}{h} dx$$

**H: intervallo di
definizione della
funzione**

$n \in \mathbb{N}$

Il modello armonico



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

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

Il modello armonico

Rappresentazione della serie di Fourier in forma trigonometrica e cartesiana

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

Con

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

Rappresentazione della serie di Fourier in forma trigonometrica e cartesiana

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

con

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

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

$$a_n = 2 \operatorname{Re} c_n \quad b_n = -2 \operatorname{Im} c_n \quad n \geq 0$$

Il modello armonico

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

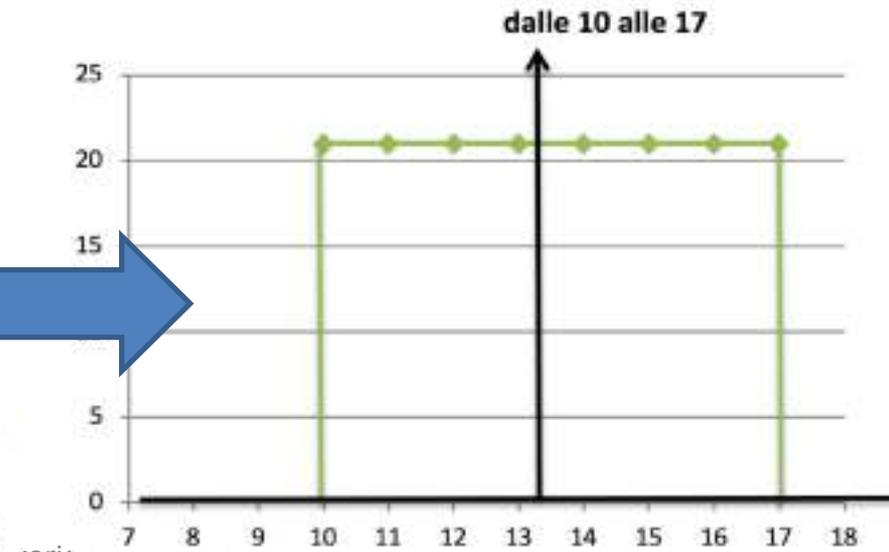
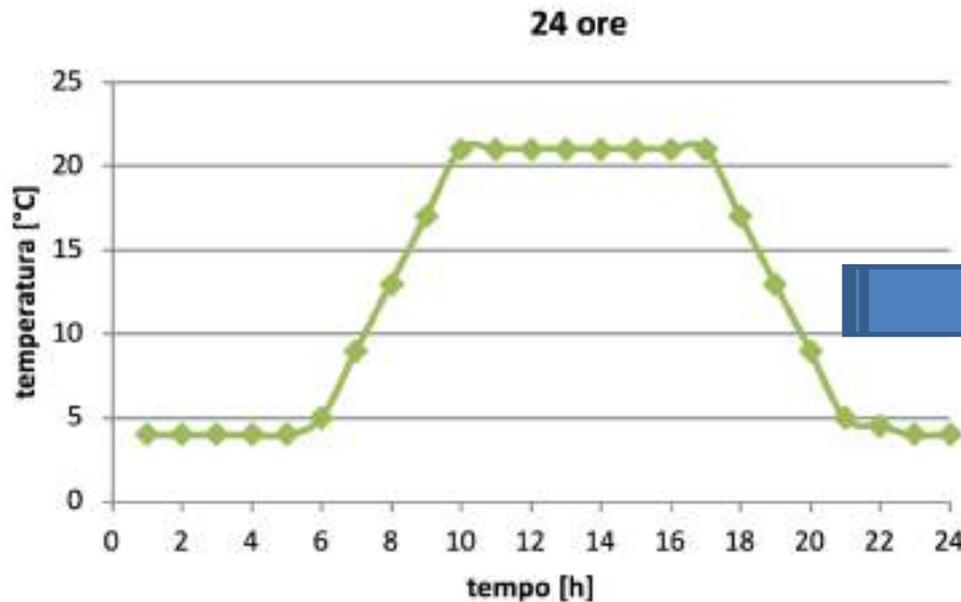
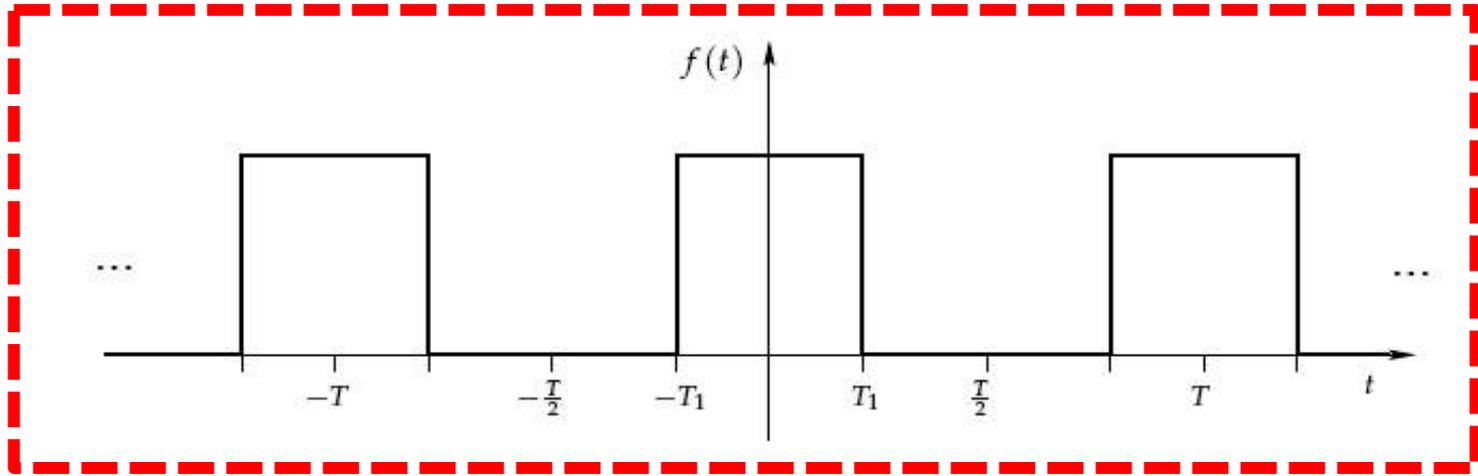
$$a_n = \frac{2}{T} \int_T x(t) \cos n\Omega t dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_T x(t) \sin n\Omega t dt$$

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

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

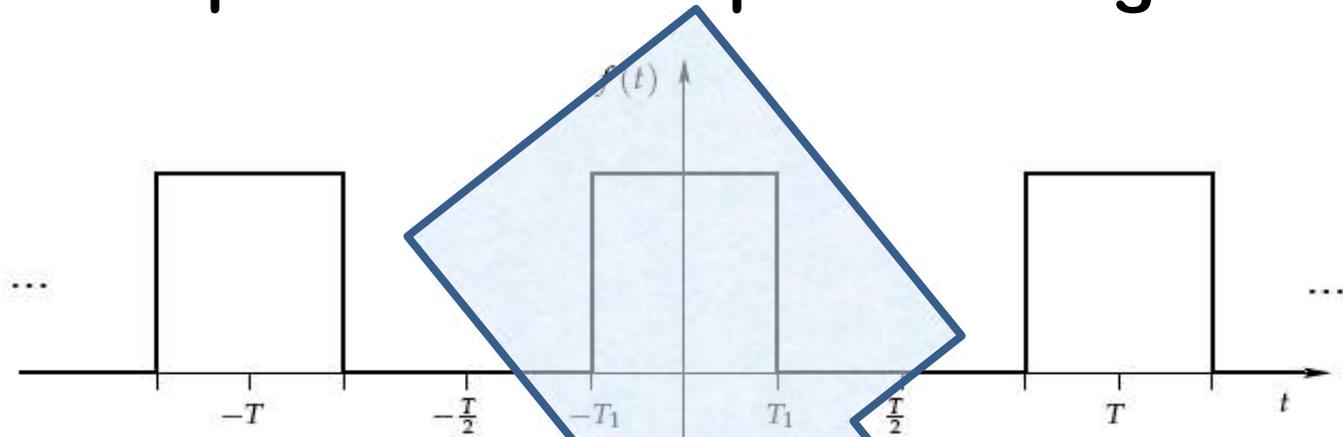
Il modello armonico

Esempio: Treno di impulsi rettangolari

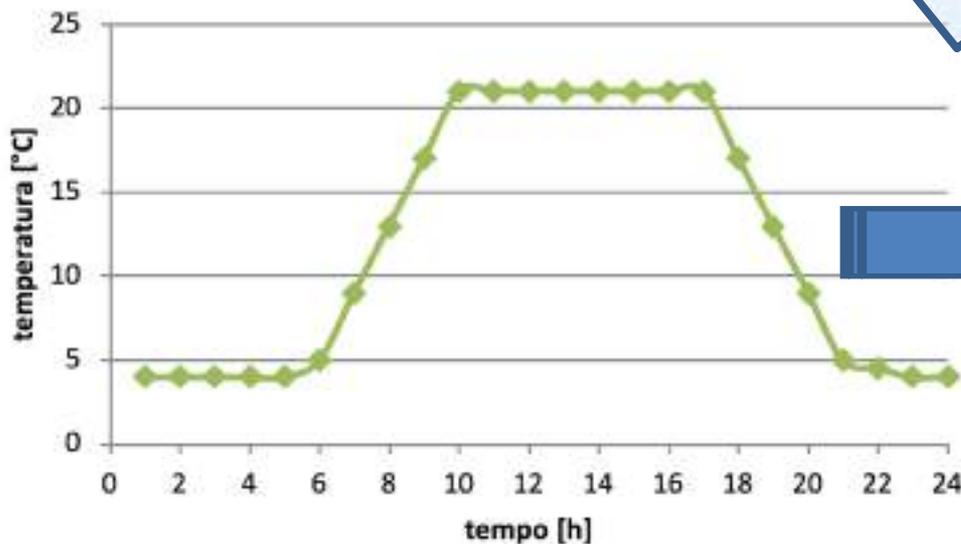


Il modello armonico

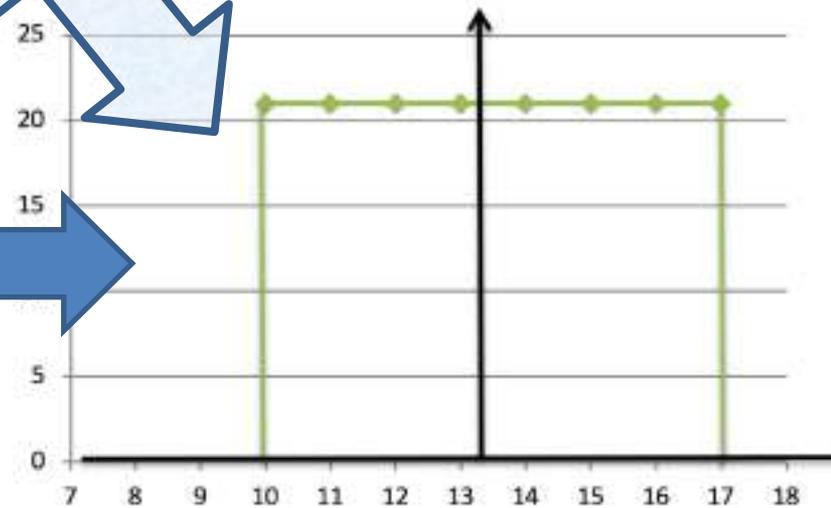
Esempio: Treno di impulsi rettangolari



24 ore

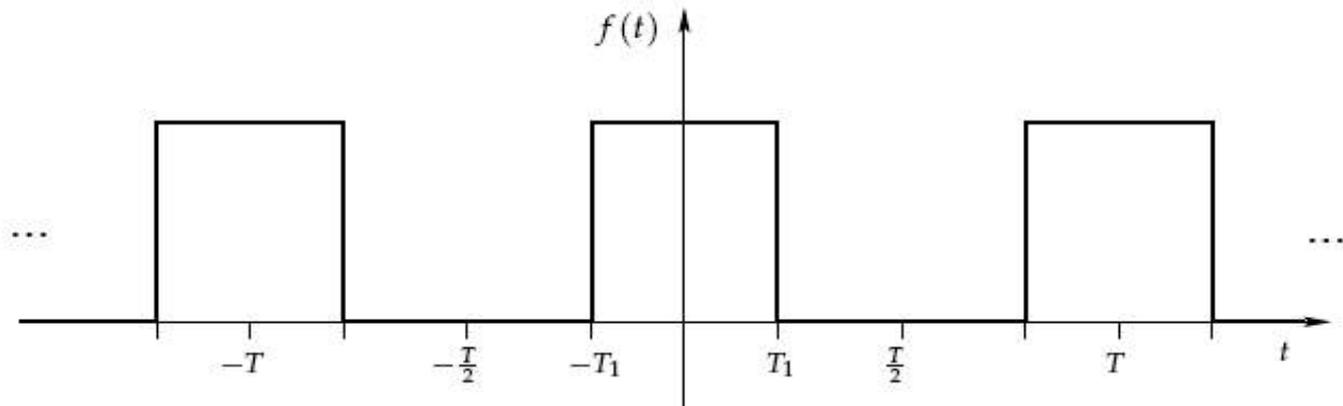


dalle 10 alle 17



Il modello armonico

Esempio: Treno di impulsi rettangolari



Per $n \neq 0$ invece otteniamo

$$\begin{aligned}c_n &= \frac{1}{T} \int_{-T_1}^{T_1} e^{-in\omega_0 t} dt = -\frac{1}{in\omega_0 T} e^{-in\omega_0 t} \Big|_{-T_1}^{T_1} \\ &= \frac{1}{in\omega_0 T} \left(e^{in\omega_0 T_1} - e^{-in\omega_0 T_1} \right) \\ &= \frac{2 \sin(n\omega_0 T_1)}{n\omega_0 T} = \frac{\sin(n\omega_0 T_1)}{n\pi} \quad (\text{poiché } \omega_0 T = 2\pi).\end{aligned}$$

Il modello armonico

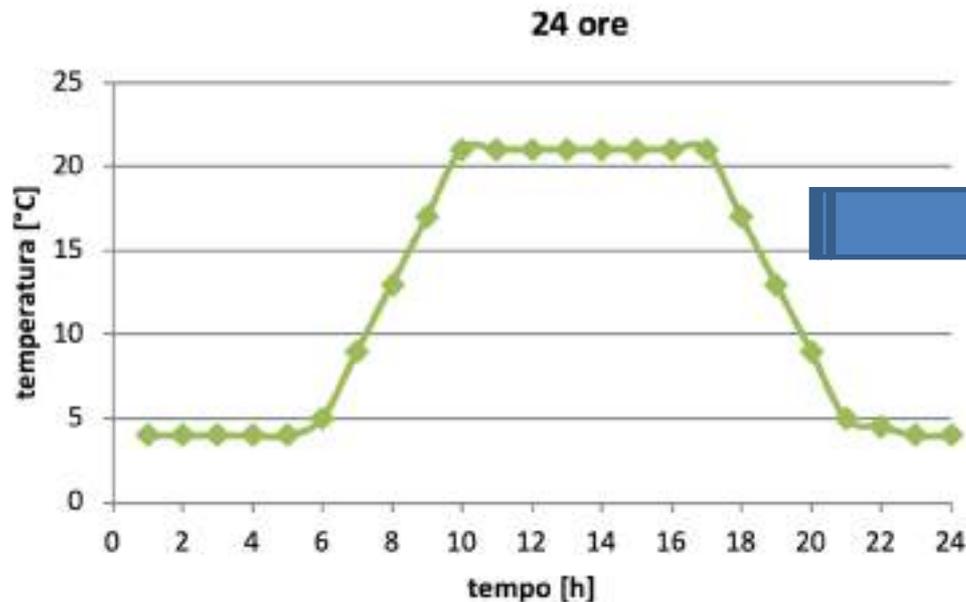
Con:

$n = \pm 1$ 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

.....



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

$$T_1 =$$

$$T =$$

3,5

12

$$\Omega = \omega_0 = 2\pi/T =$$

0,523

io Integrato di
(Modulo di

temponica dell'edificio) A.A. 2019-20

Calcolo dei coefficienti

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

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

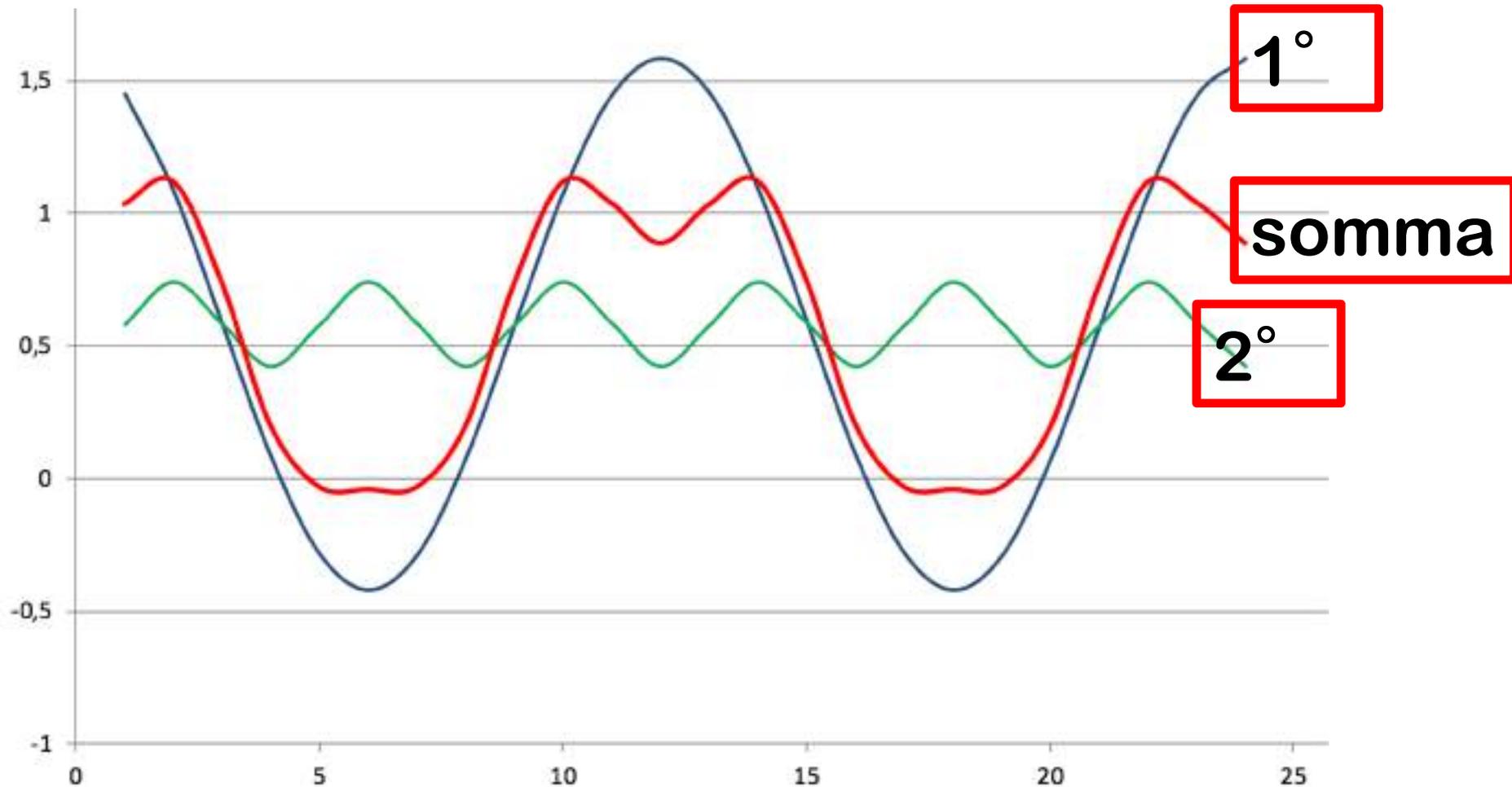
$$c_1 = \frac{\sin(n\omega_0 T_1)}{n\pi} = 0,308$$

$$a_0 = 2c_0 = 1,166$$

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

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

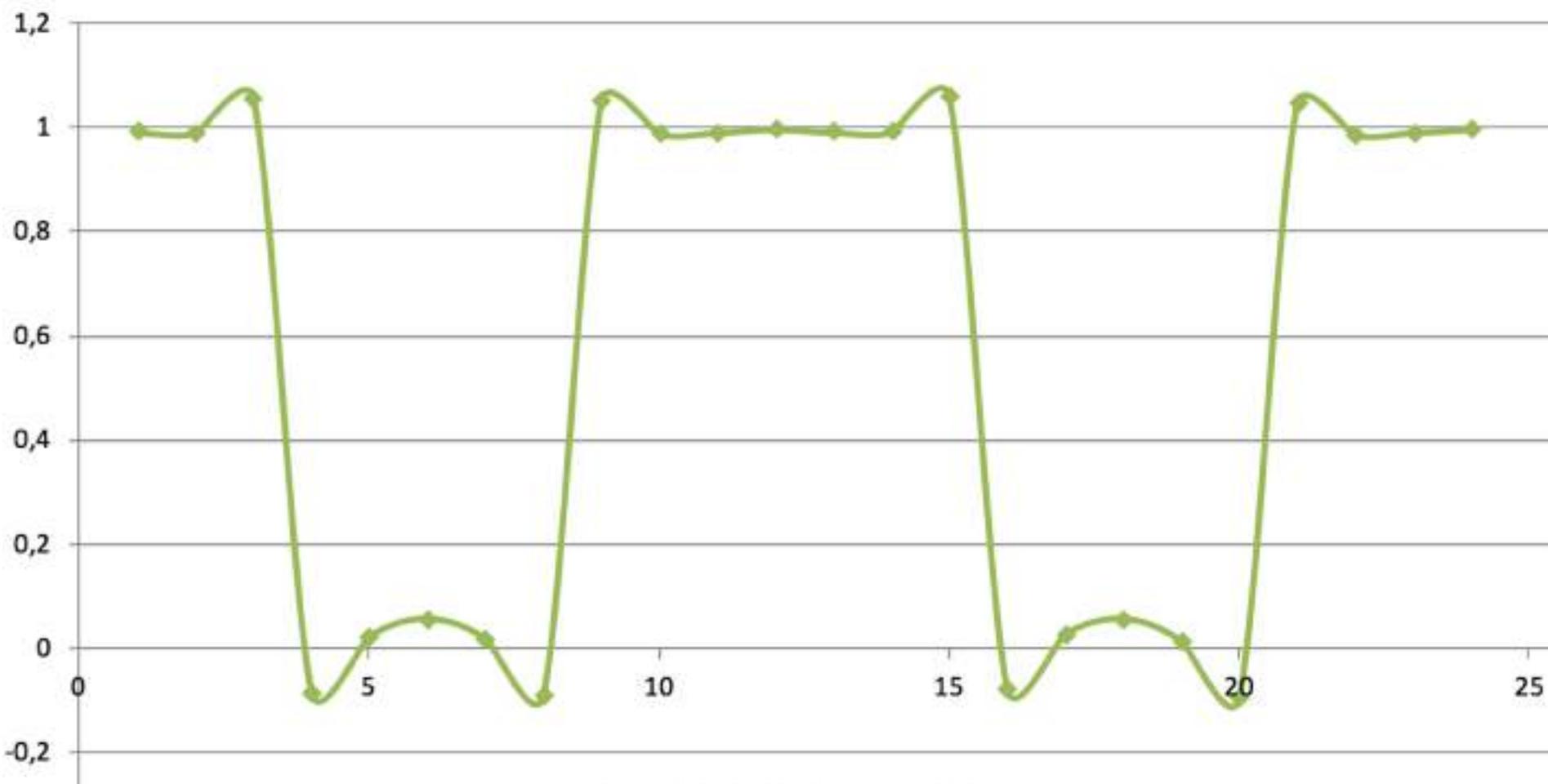
ARMONICHE



Il modello armonico

Serie di Fourier

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



L'effusività

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

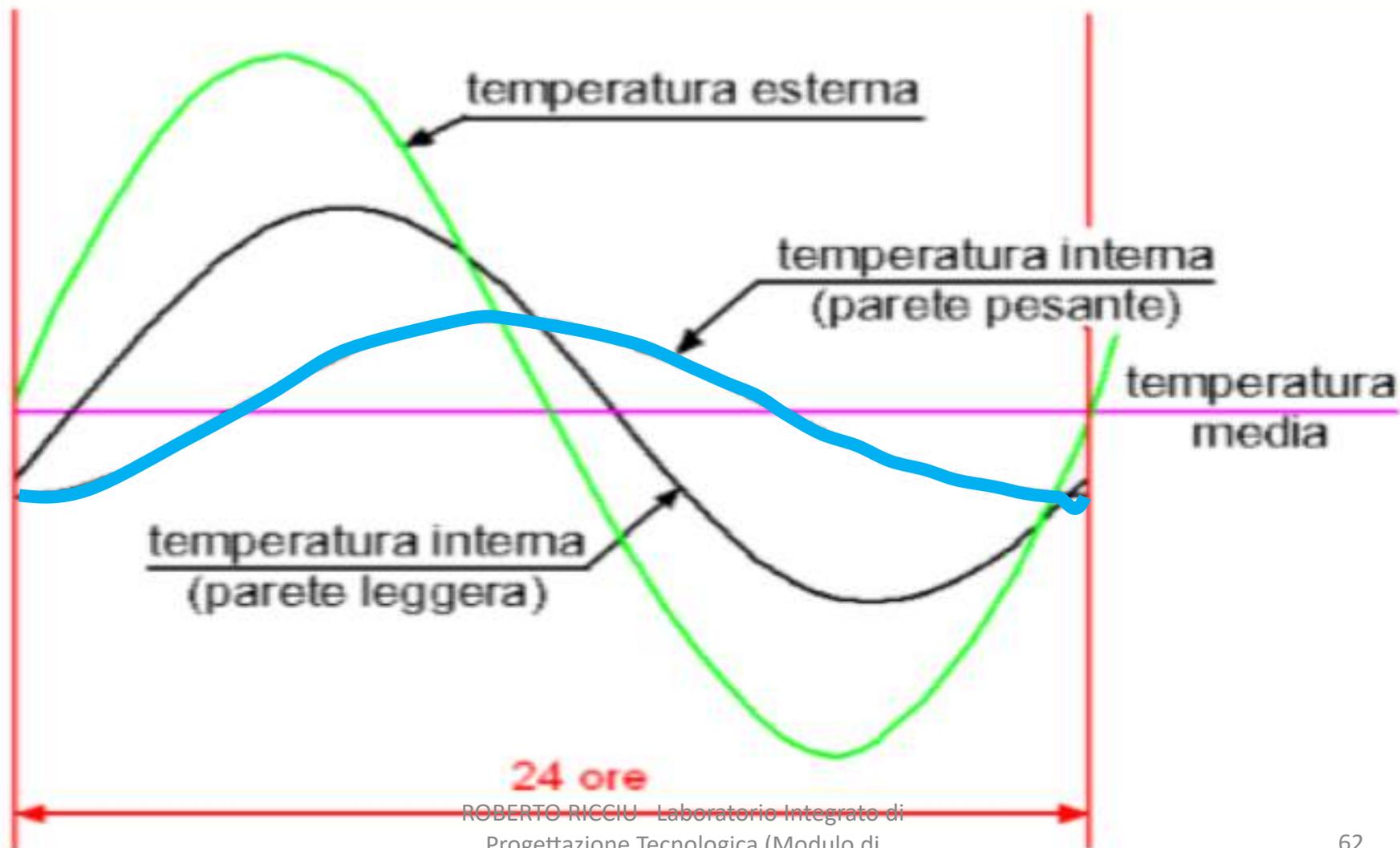


L'effusività

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



Parete massiva



L'effusività termica

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

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

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

Leggera

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

Media

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

Pesante

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

Molto pesante

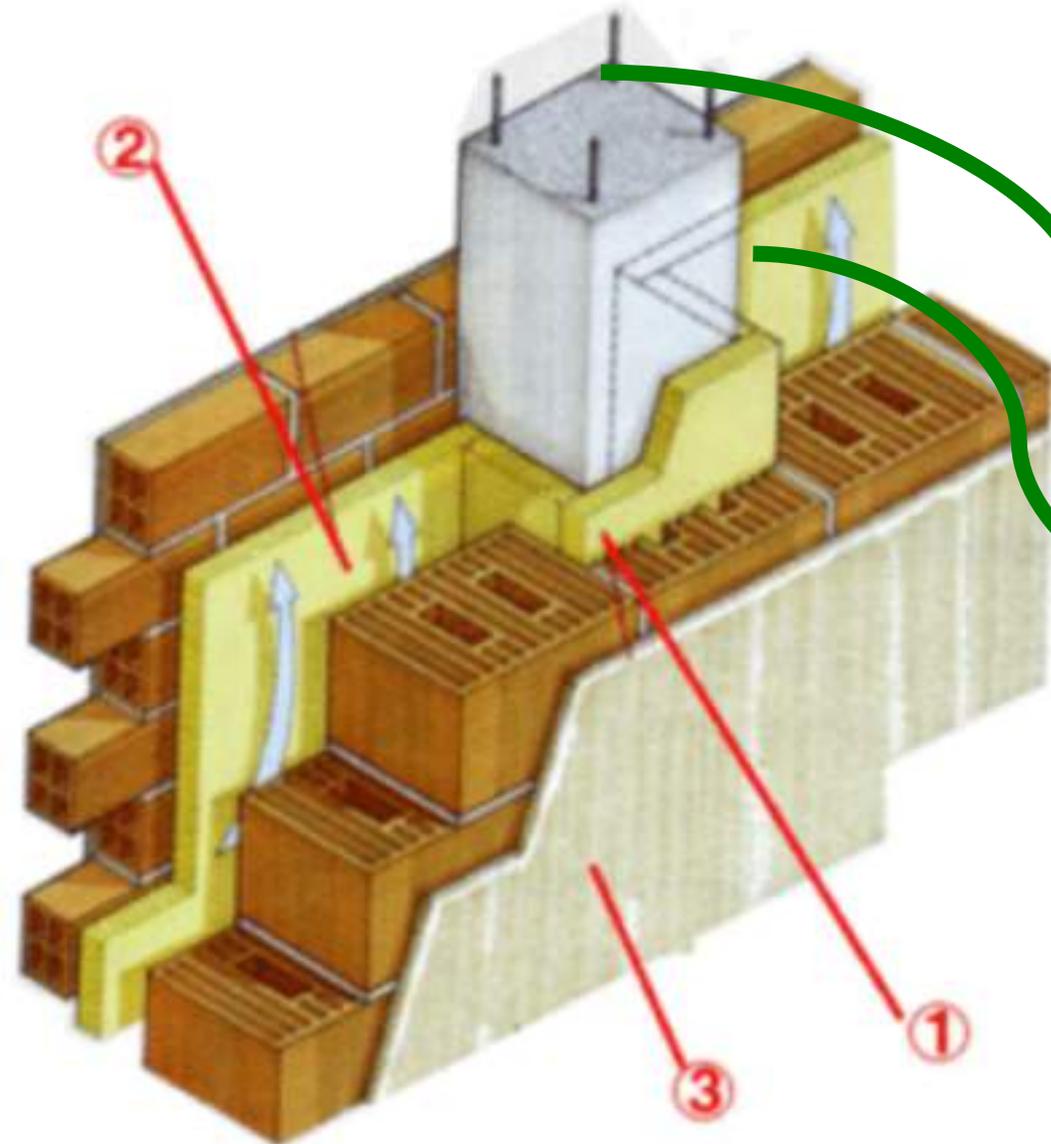
$$e_m > 1250 \quad [W s^{0,5} m^2 K]$$

L'effusività

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

1 kJ/(kg K)

Accumulo termico
Isolamento



La trasmittanza termica periodica

FINE