



Temperature di esercizio delle coperture

Francesca Cappelletti

Piercarlo Romagnoni

OUTLINE

- Premessa
- Obiettivi e metodo
- Indagini sperimentali
- Indagini numeriche
- Discussione dei risultati

ANPE - 2a Conferenza Nazionale

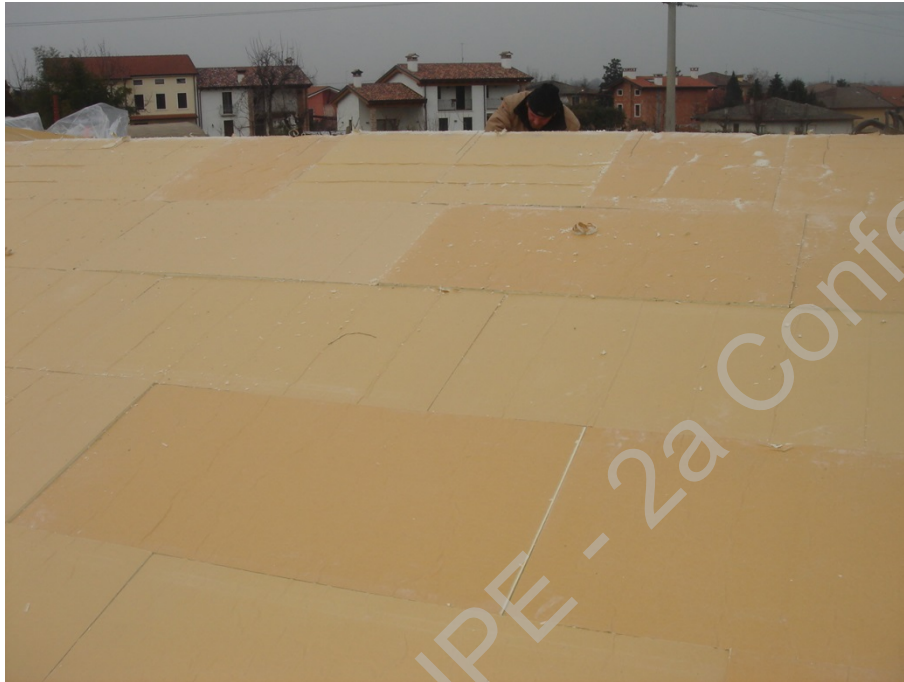
Cosa chiediamo a una copertura?

- Isolamento termico
- Tenuta all'aria
- Tenuta all'acqua
- Durabilità delle proprietà nel tempo



Quali sono le tecnologie?

Isolanti termici

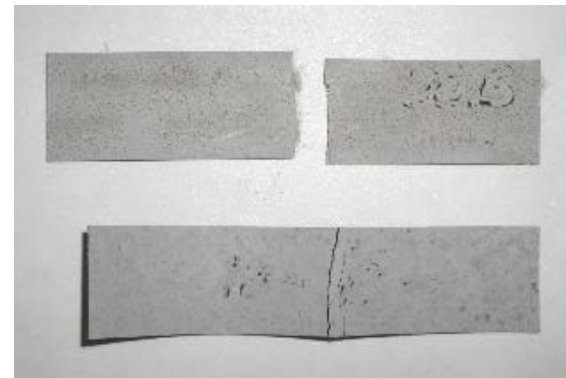
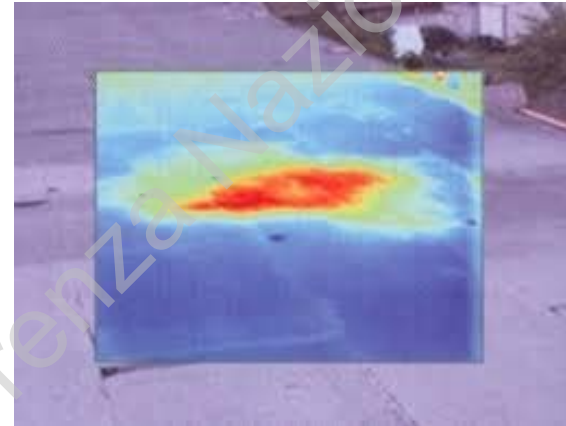


Membrane



Quali sono i problemi delle membrane?

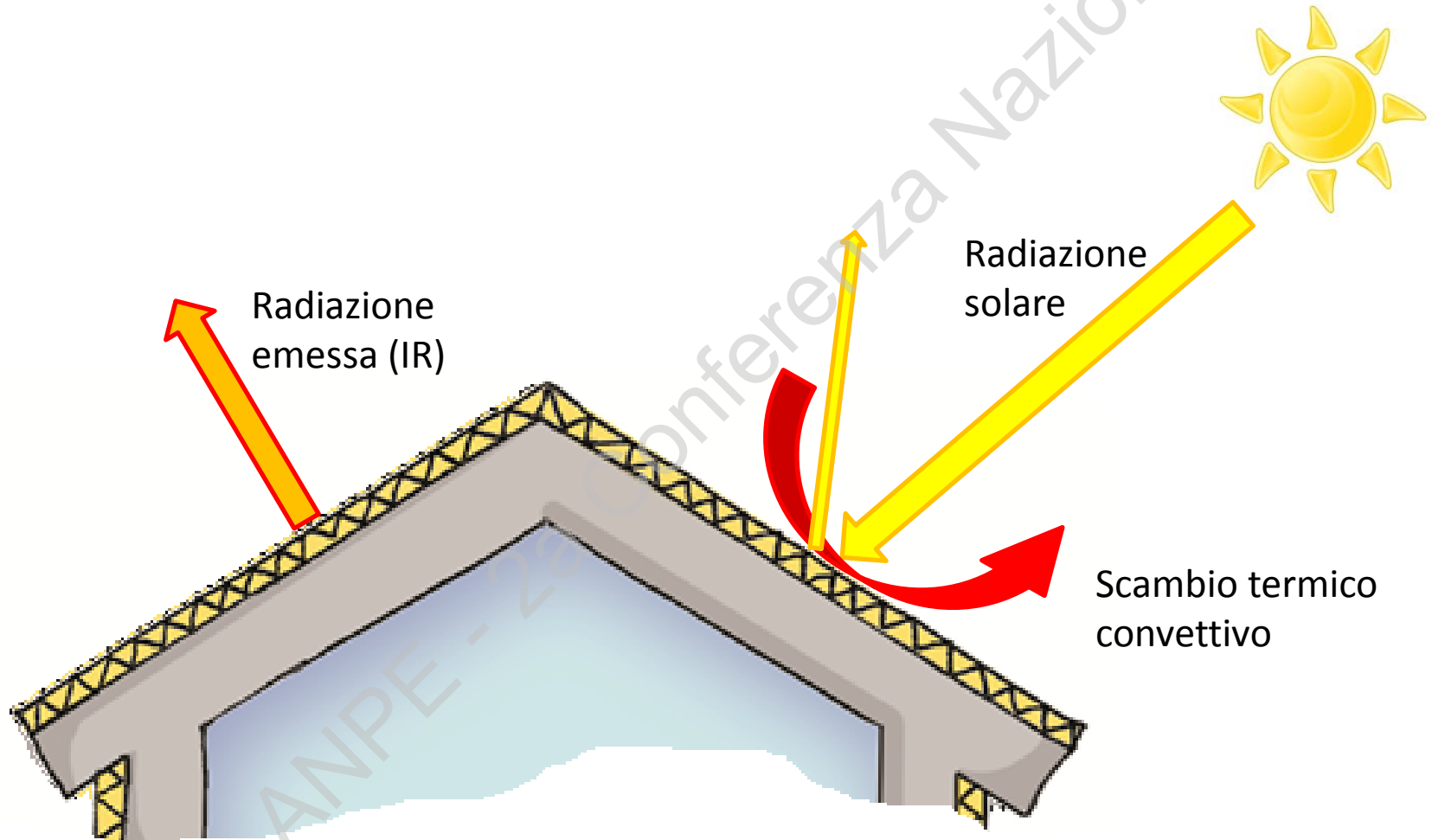
- Bolle
- Slittamento
- Fessurazioni
- Ritiro
- Invecchiamento



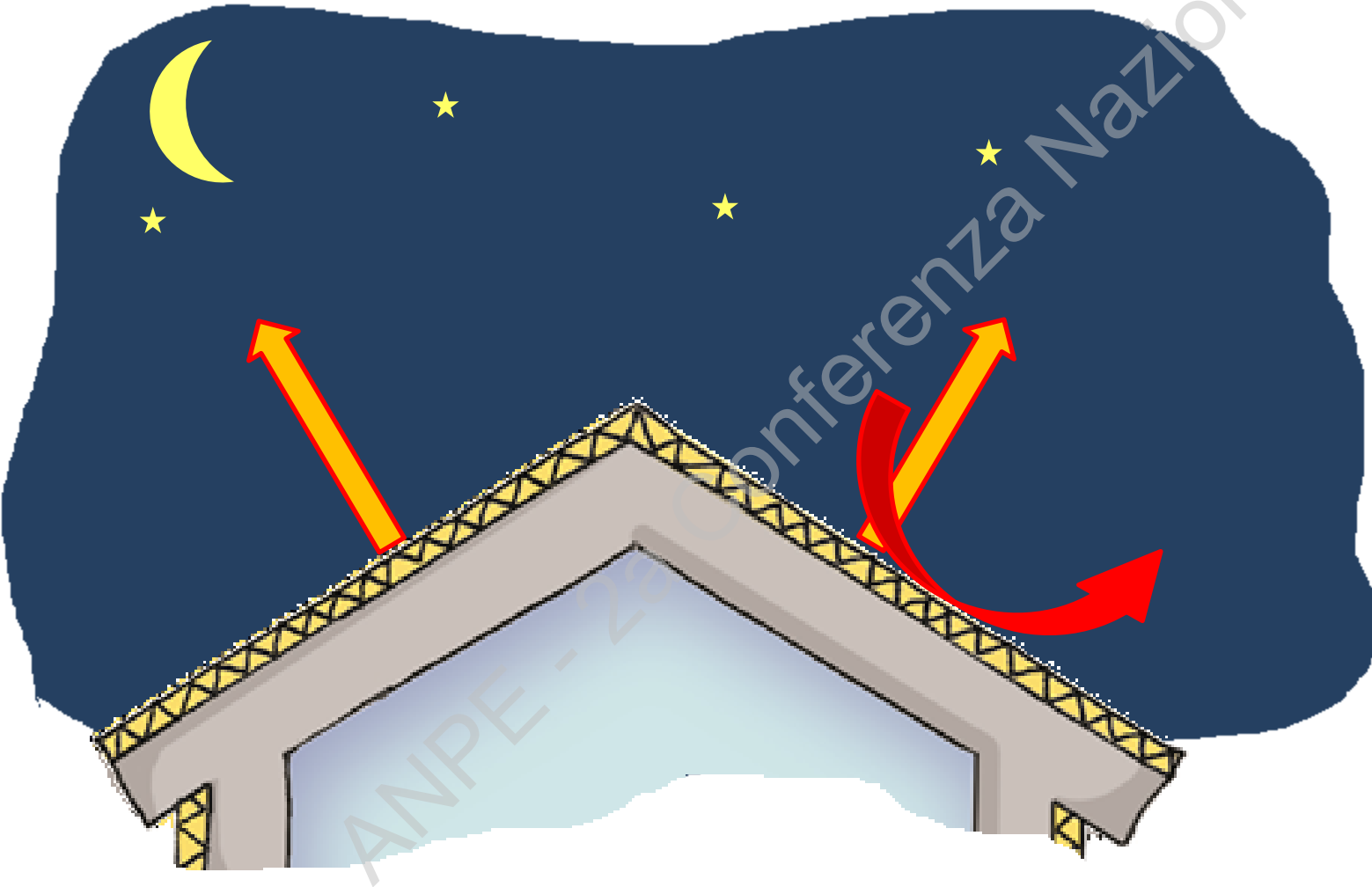
Quali sono le cause? Esiste una soluzione?



Scambi termici



Scambi termici



La temperatura sulla copertura

- Emissività e assorbimento dello strato superficiale esterno
- Coefficiente di scambio convettivo esterno
- Conduttività materiali dei diversi strati
- Variabili climatiche (radiazione solare, temperatura dell'aria, vento)

Scopo e metodo della ricerca

Valutazione delle temperature di esercizio attraverso calcolo numerico

- Caratterizzazione delle proprietà fisiche di 4 tipi di membrana
- Calcolo numerico delle temperature per soluzioni di copertura:
 - 2 tipi di materiali
 - 3 spessori di isolamento
 - 3 coefficienti di assorbimento
 - 3 località
- Analisi dei risultati



Caratterizzazione delle membrane

Caratterizzazione delle membrane: *emissività*

La misura del coefficiente di emissività è stata eseguita secondo la norma ASTM C1371-04 "Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers"

$$\Delta V = k \cdot \frac{\sigma_0 \cdot (T_d^4 - T^4)}{\frac{1}{E} + \frac{1}{E_d} - 1}$$



Caratterizzazione delle membrane: *emissività*

Prova svolta il 27/01/2013

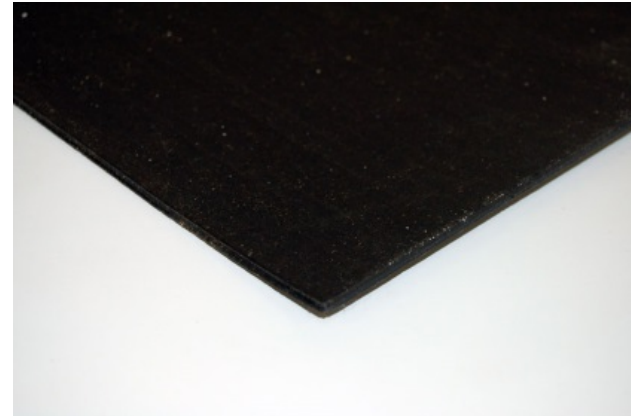
Temperatura e umidità ambiente: 19,5 °C e 40%

Incertezza nella misura: 0,01%

Campione #1

Spessore: 4 mm

Emissività misurata: 91%



Caratterizzazione delle membrane: *emissività*

Prova svolta il 27/01/2013

Temperatura e umidità ambiente: 19,5 °C e 40%

Incertezza nella misura: 0,01%

Campione #2

Spessore: 4.5 mm

Emissività misurata: 94%



Caratterizzazione delle membrane: *emissività*

Prova svolta il 27/01/2013

Temperatura e umidità ambiente: 19,5 °C e 40%

Incertezza nella misura: 0,01%

Campione #3

Spessore: 4.5 mm

Emissività misurata: 92%



Caratterizzazione delle membrane: *emissività*

Prova svolta il 27/01/2013

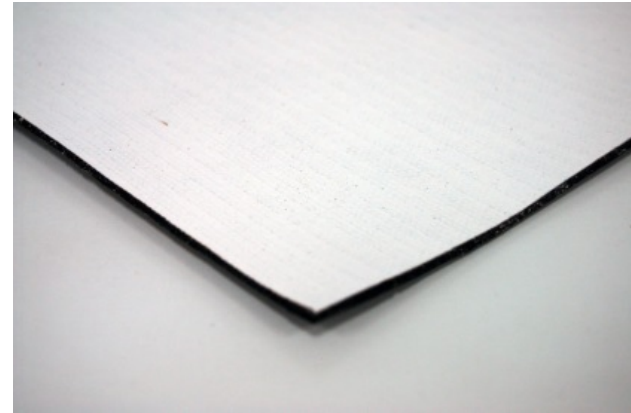
Temperatura e umidità ambiente: 19,5 °C e 40%

Incertezza nella misura: 0,01%

Campione #4

Spessore: 3.5 mm

Emissività misurata: 91%



Caratterizzazione delle membrane: *conduttività*

Metodo di misura della piastra calda con anello di guardia.

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{\phi} A$$



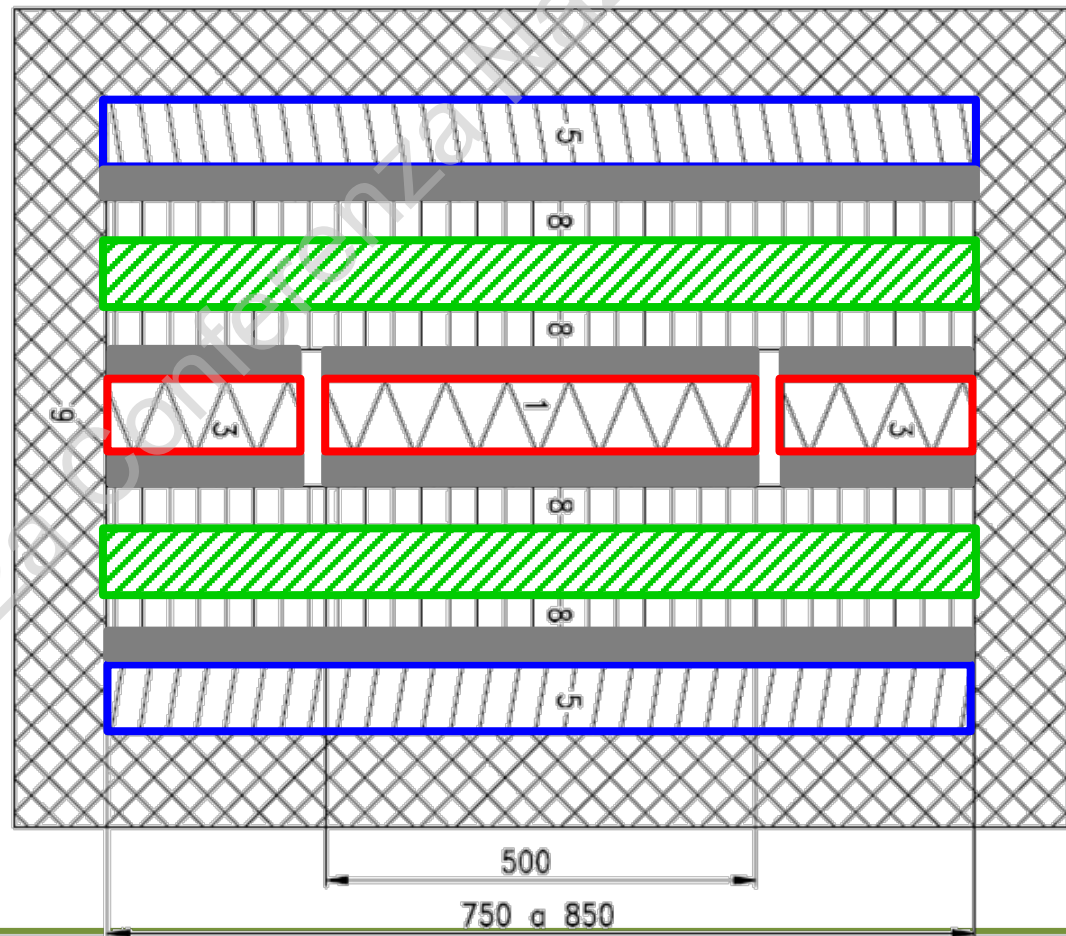
Caratterizzazione delle membrane: *conduttività*

Metodo di misura della piastra calda
con anello di guardia.

UNITA' DI
RAFFREDDAMENTO

RISCALDATORE

PROVINI



Confronto delle *proprietà termiche*

Campione	Spessore medio s	Conducibilità termica λ	Conducibilità termica λ_{10}	Emissività ε
	[mm]	[W/(m K)]	[W/(m K)]	%
#1	4,0	0,1232	0,122	91
#2	4,5	0,1284	0,126	94
#3	4,4	0,1426	0,142	92
#4	3,5	0,1609	0,160	91

Calcolo numerico di soluzioni di copertura

Coperture confrontate

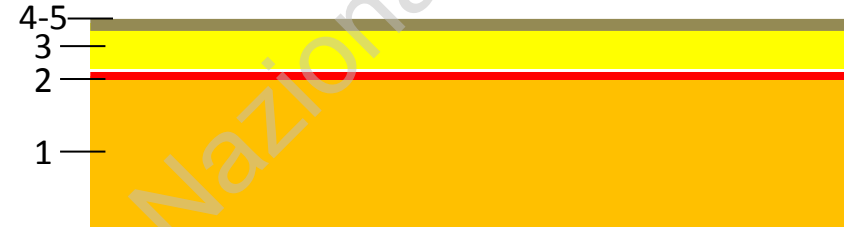
Stratigrafia copertura in calcestruzzo



	Materiale	Spessore s [m]	Conducibilità termica λ [W/(m K)]	Densità ρ [kg/m ³]	Calore specifico c [kJ/(kg K)]	Resistenza igroscopica μ [-]
1	Calcestruzzo	0.055	1.26	2000	1	150
2	Barriera al vapore	0.003	0.2	1030	1.7	54000
3	Isolante termico	variabile	variabile	30	2.1	148
4	Strato di prima impermeabilizzazione e adesivo	0.001	0.6	1000	1.7	40000
5	Impermeabilizzazione	0.004	0.2	1030	1.7	40000

Coperture confrontate

Stratigrafia copertura in laterizio



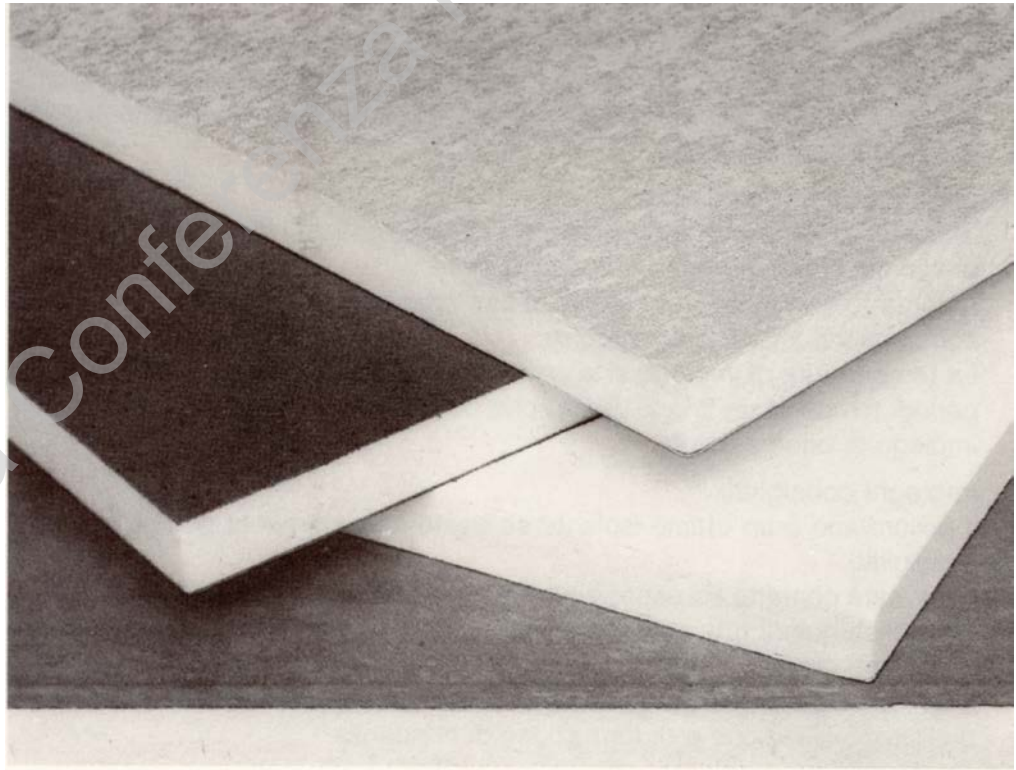
	Materiale	Spessore s [m]	Conducibilità termica λ [W/(m K)]	Densità ρ [kg/m ³]	Calore specifico c [kJ/(kg K)]	Resistenza igroscopica μ [-]
1	Laterizio	0.24	0.67*	1800	1	15
2	Barriera al vapore	0.003	0.2	1030	1.7	54000
3	Isolante termico	variabile	variabile	30	2.1	148
4	Strato di prima impermeabilizzazione e adesivo	0.001	0.6	1000	1.7	40000
5	Impermeabilizzazione	0.004	0.2	1030	1.7	40000

* valore equivalente data una resistenza complessiva di 0.35 m² K /W come indicata in UNI 10355

Livello di isolamento termico analizzato

3 livelli di isolamento termico

Spessore s [m]	Conducibilità termica λ [W/(m K)]
0.05	0.028
0.10	0.026
0.20	0.025



Trasmittanza termica e capacità termica areica

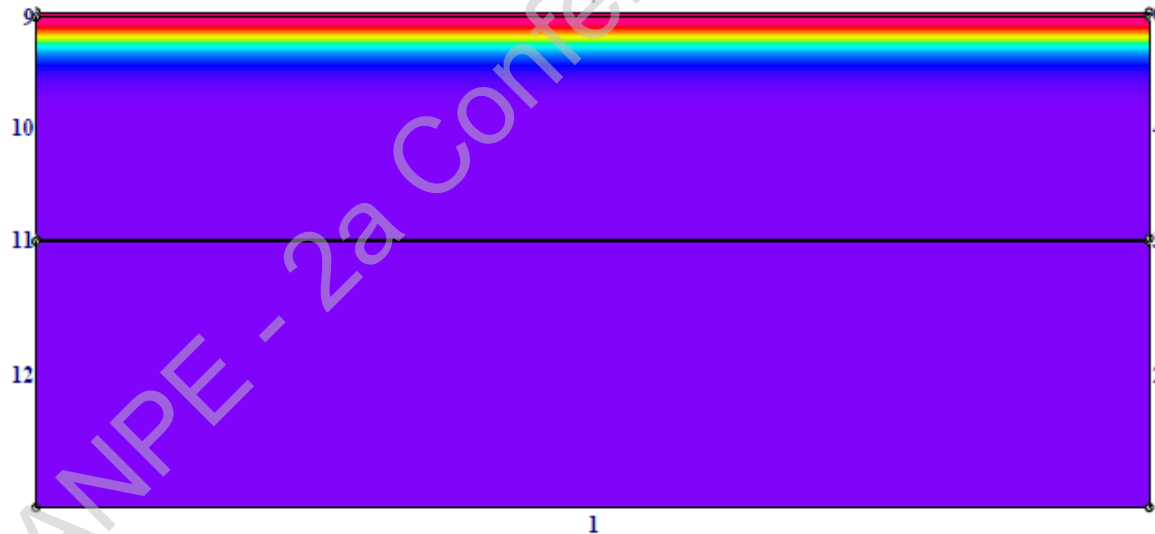
La caratterizzazione delle coperture analizzate
(s = spessore isolante in poliuretano)

Copertura		Trasmittanza [W/(m ² K)]	Capacità termica interna [J/(m ² K)]	Capacità termica esterna [J/(m ² K)]
cls	s = 0,05 m	0,50	81067	14177
	s = 0,1 m	0,25	82869	13111
	s = 0,2 m	0,12	83441	13111
laterizio	s = 0,05 m	0,43	72450	12720
	s = 0,1 m	0,23	72021	11448
	s = 0,2 m	0,12	71743	12135

Il calcolo numerico delle temperature

La copertura è sottoposta a una sollecitazione esterna variabile (lato 7) secondo le condizioni climatiche prescelte.

Il lato interno è stato mantenuto a temperatura costante ($\theta_{\text{int}} = 20^{\circ}\text{C}$)



Condizione al contorno esterna: temperatura sole-aria

$$\theta_{\text{sole-aria}} = \frac{\theta_{\text{out}} h_{\text{conv,out}}}{h_{\text{conv,out}} + \varepsilon h_{\text{rad,out}}} + \frac{T_{\text{sky}} \varepsilon h_{\text{rad,out}}}{h_{\text{conv,out}} + \varepsilon h_{\text{rad,out}}} + \frac{a I_{\text{sun}}}{h_{\text{conv,out}} + \varepsilon h_{\text{rad,out}}}$$

$h_{\text{conv,out}}$ coefficiente di scambio termico per convezione W/(m² K); variabile con la velocità del vento

$h_{\text{rad,out}}$ coefficiente di scambio termico per radiazione 5 W/(m² K)

T_{sky} temperatura della volta celeste [K]

$$T_{\text{sky}} = \theta_{\text{out}} - 11$$

ε emissività della superficie nell'IR; valori dichiarati/misurati

a coefficiente di assorbimento (radiazione visibile); valori dichiarati/misurati

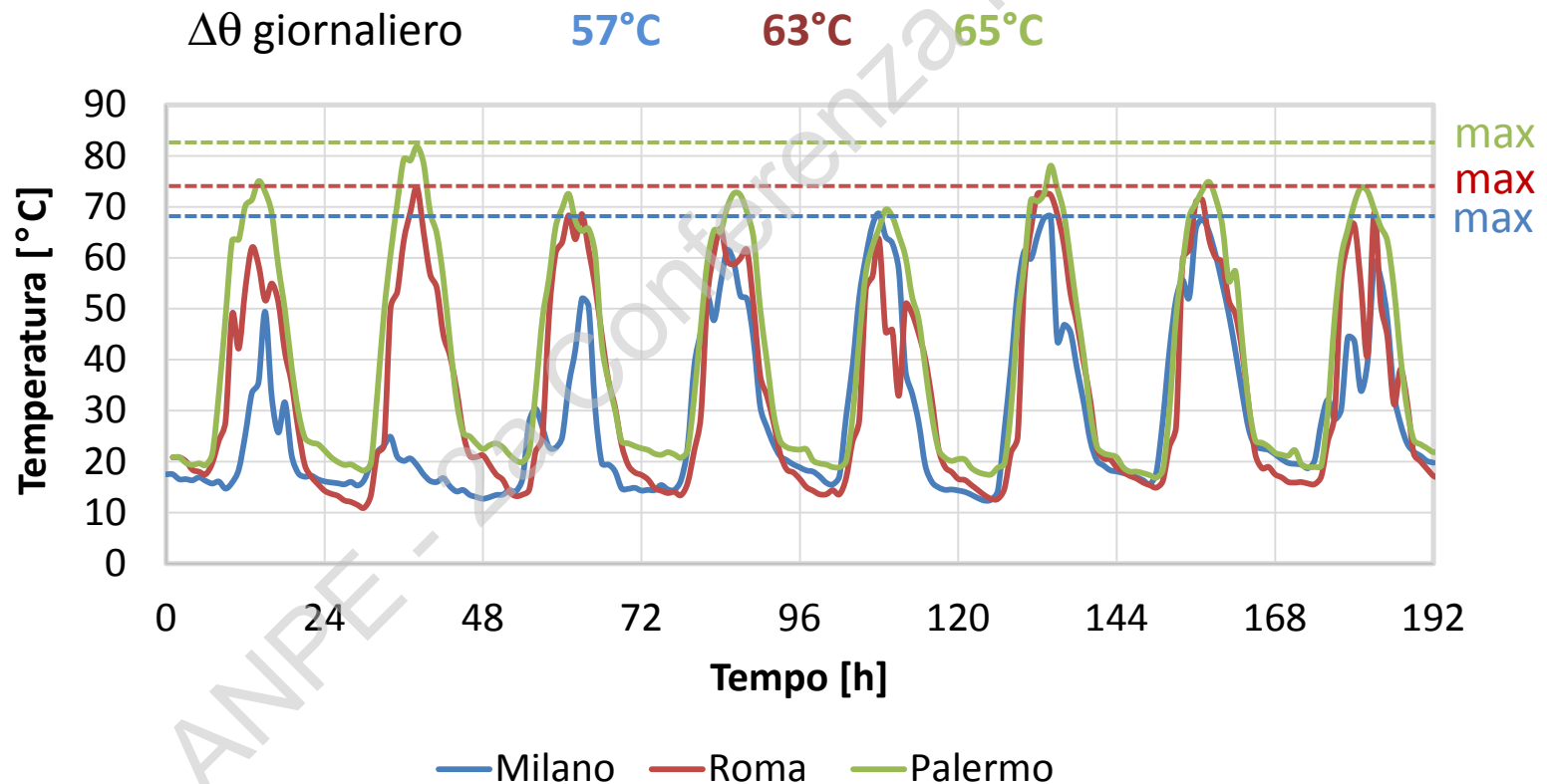
I_{sun} irradiazione solare; dipende dalla località [W/m²]

θ_{out} temperatura aria esterna; dipende dalla località [°C]

La sollecitazione esterna: Temperatura sole-aria

Luglio

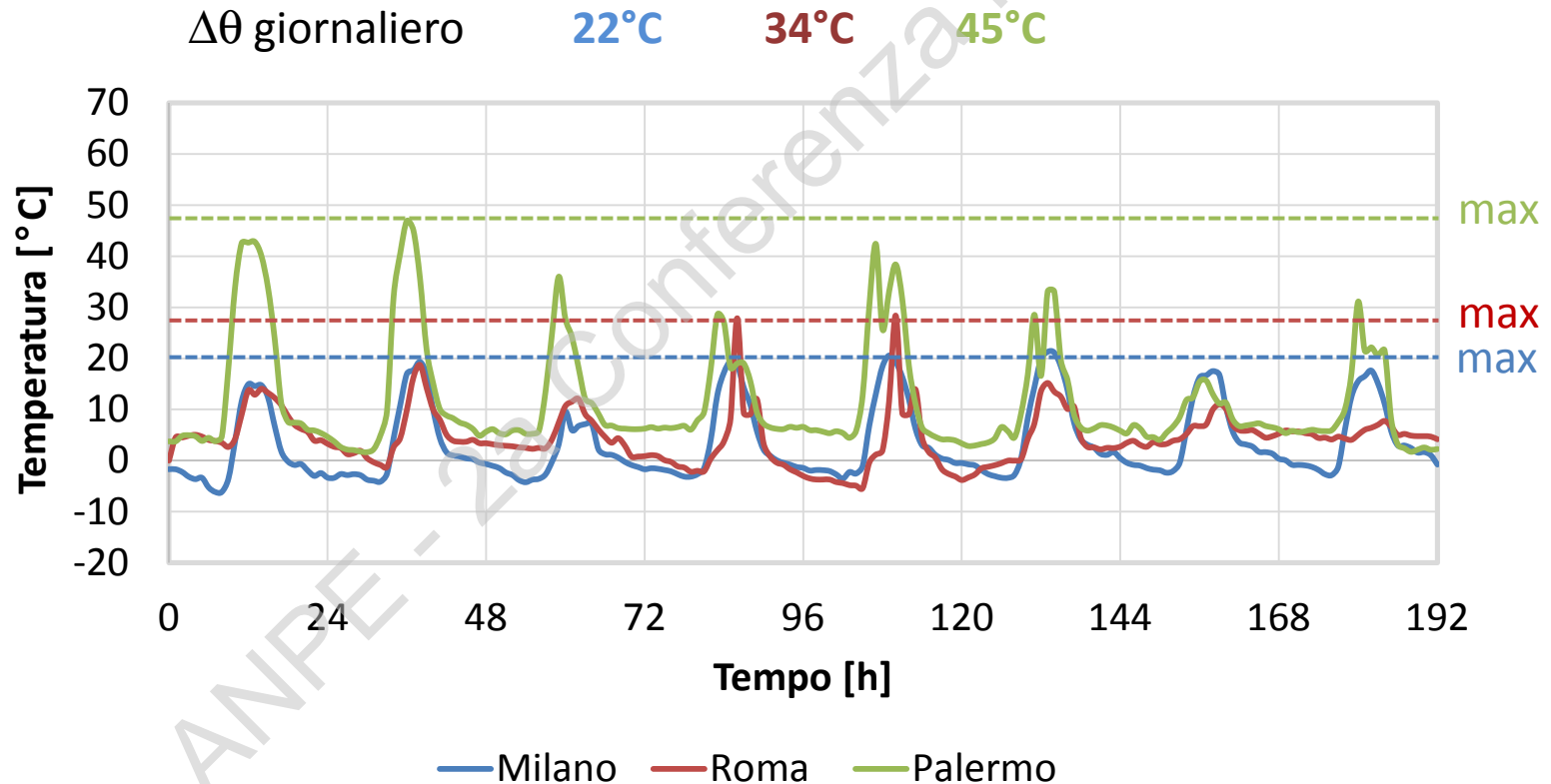
$a = 0.9$



La sollecitazione esterna: Temperatura sole-aria

Gennaio

$a = 0.9$



Analisi dei risultati

ANPE - 2a Conferenza Nazionale

Temperature sole-aria massime e minime annuali

		Massima	Minima	minima laterizio	minima cls
MILANO	Tsol-air [°C] $\varepsilon = 0,9$; $a = 0,9$	68,69	-6,18		
	Tsol-air [°C] $\varepsilon = 0,9$; $a = 0,7$	58,85	-6,18		
	tsurface			-5,66	-5,57
ROMA	Tsol-air [°C] $\varepsilon = 0,9$; $a = 0,9$	73,81	-5,41		
	Tsol-air [°C] $\varepsilon = 0,9$; $a = 0,7$	58,85	-5,41		
	tsurface			-5,02	-4,96
PALERMO	Tsol-air [°C] $\varepsilon = 0,9$; $a = 0,9$	81,9	-0,05		
	Tsol-air [°C] $\varepsilon = 0,9$; $a = 0,7$	70,9	-0,05		
	tsurface			0,37	0,44

Un primo commento

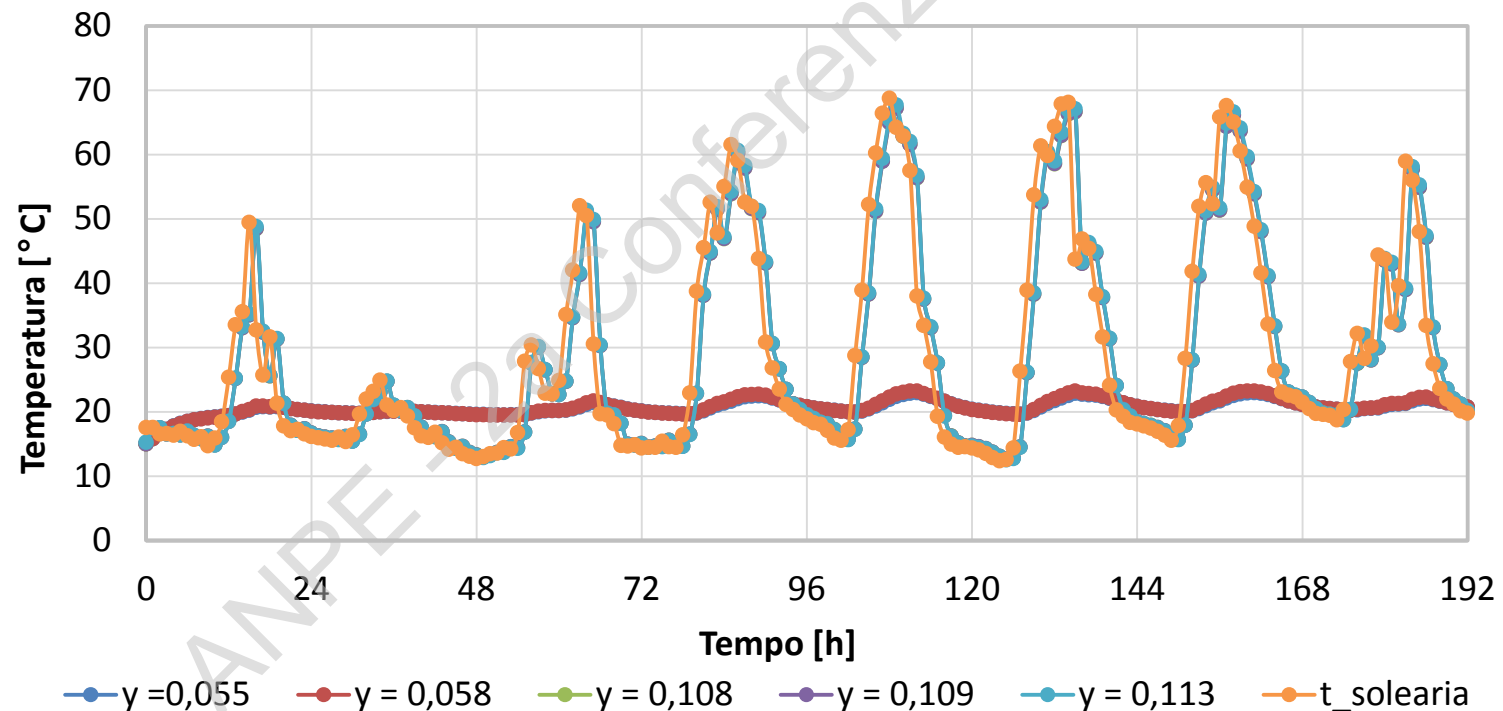
- Le oscillazioni della temperatura superficiale resteranno comprese tra i massimi e minimi della temperatura sol-air determinate; nei casi di Roma e Palermo si potrebbe presentare un differenziale pari a $\Delta \sim 80$ K che non necessariamente si verifica nello stesso giorno, ma certamente nell'arco dell'anno.
- Variazioni importanti possono tuttavia ripetersi in più giorni consecutivi senza soluzione di continuità in particolare per Roma e Palermo.
- Lo *scambio radiante* gioca un ruolo **fondamentale**
- Lo *scambio convettivo* è MOLTO legato al regime di vento: nel caso di superfici piane è inoltre meno incisivo

Andamento delle temperature: incidenza dell'isolamento

Milano – luglio

Calcestruzzo

Isolante termico 5 cm

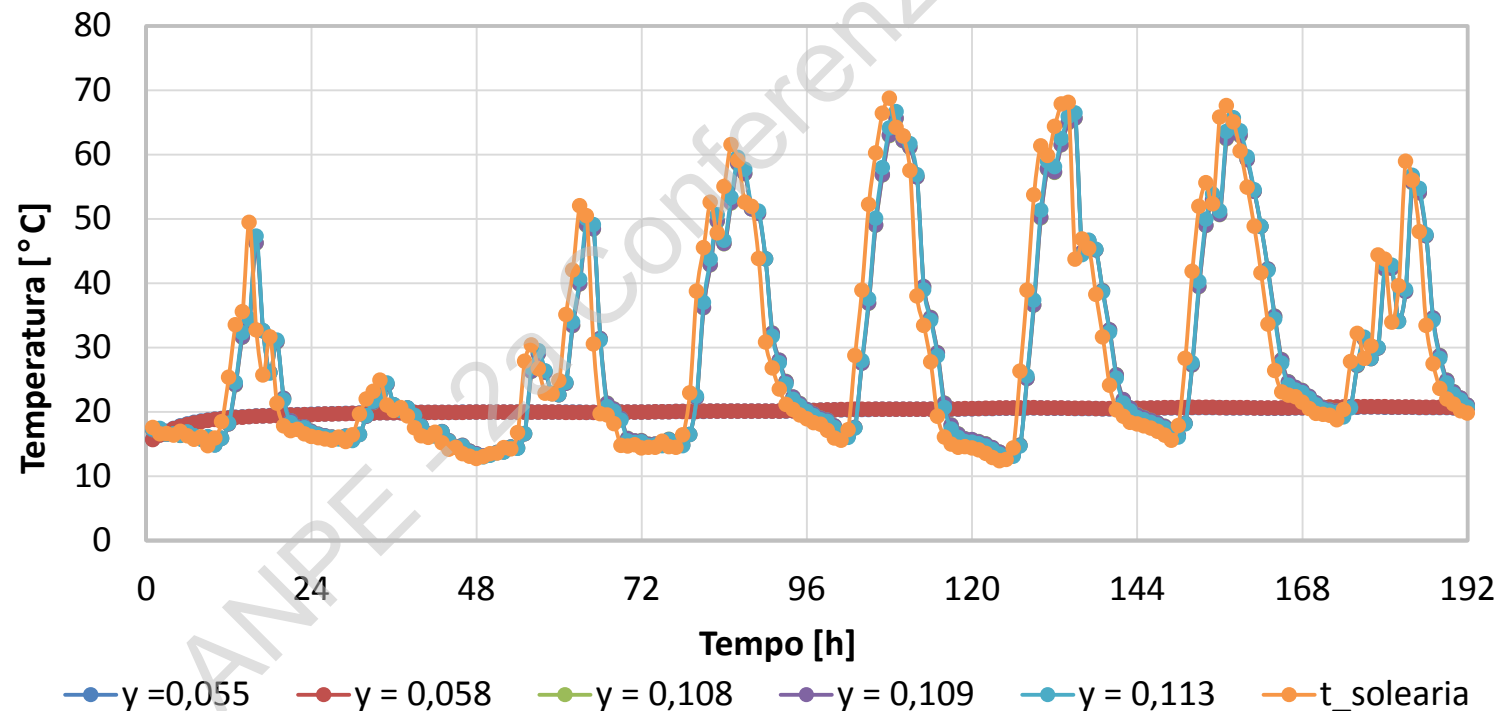


Andamento delle temperature: incidenza dell'isolamento

Milano – luglio

Calcestruzzo

Isolante termico 10 cm

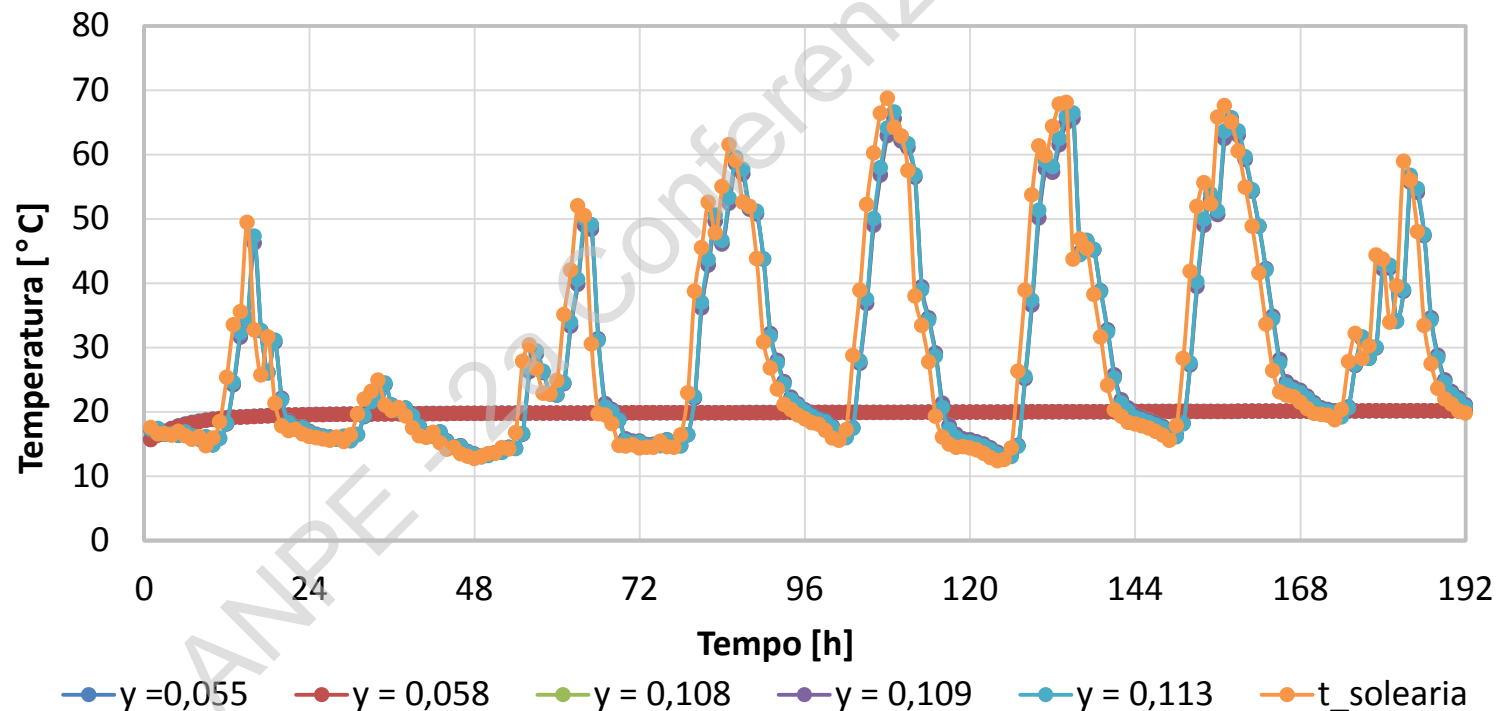


Andamento delle temperature: incidenza dell'isolamento

Milano – luglio

Calcestruzzo

Isolante termico 20 cm

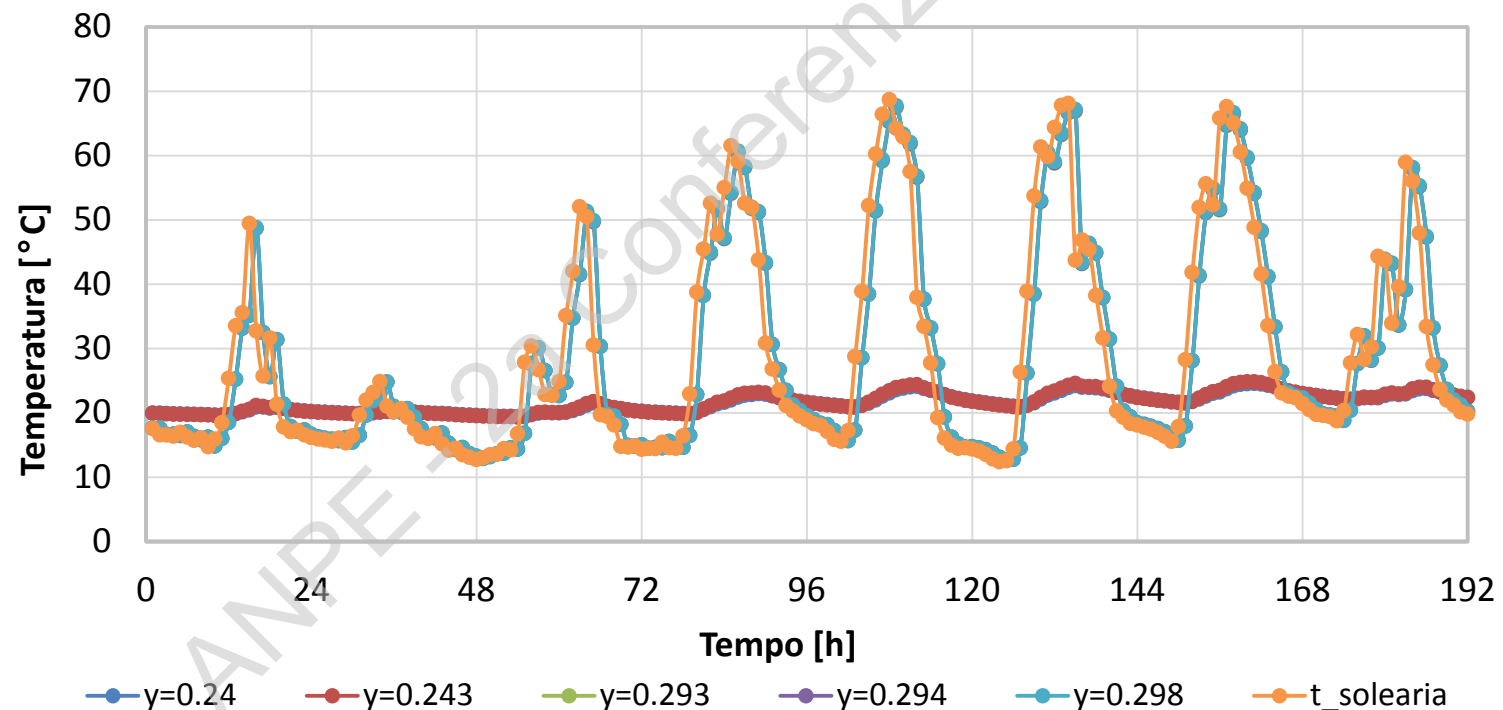


Andamento delle temperature: incidenza dell'isolamento

Milano – luglio

Laterizio

Isolante termico 5 cm

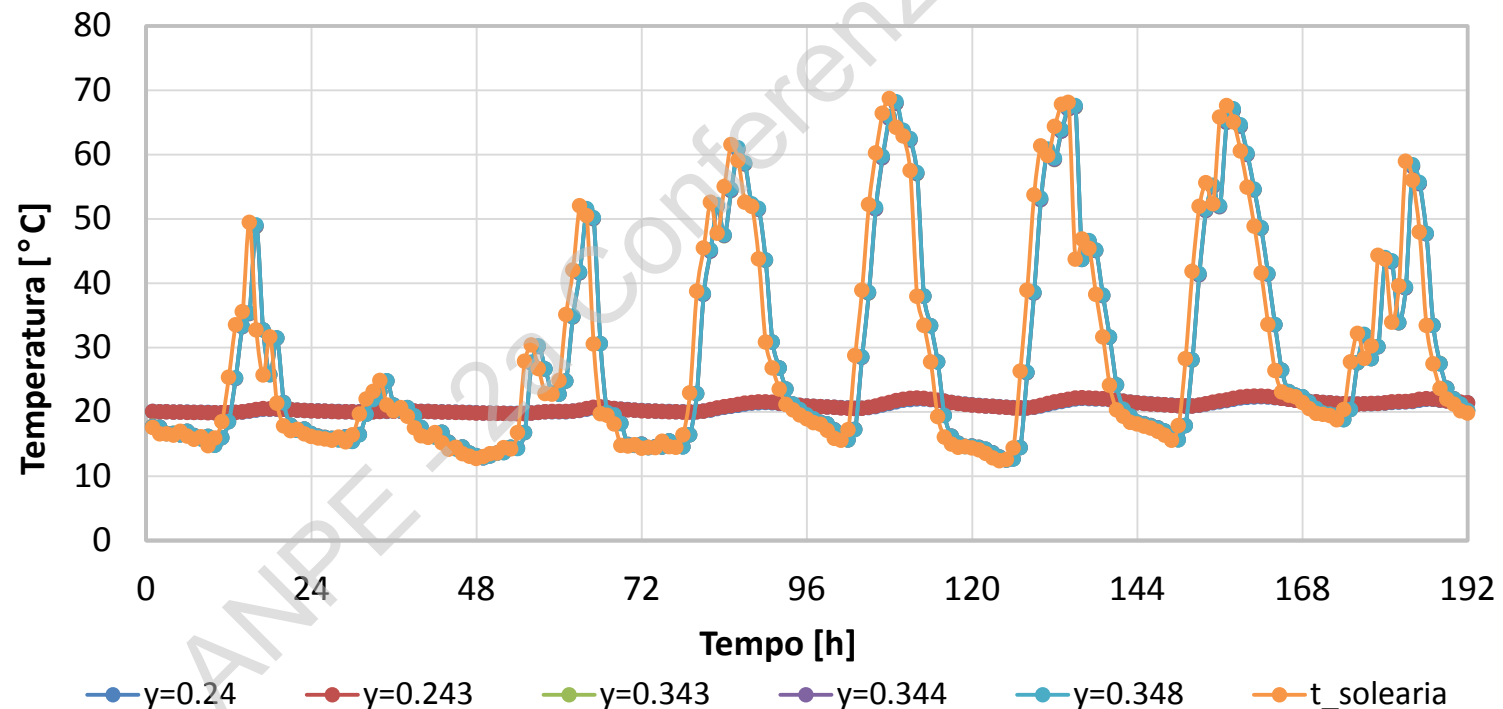


Andamento delle temperature: incidenza dell'isolamento

Milano – luglio

Laterizio

Isolante termico 10 cm

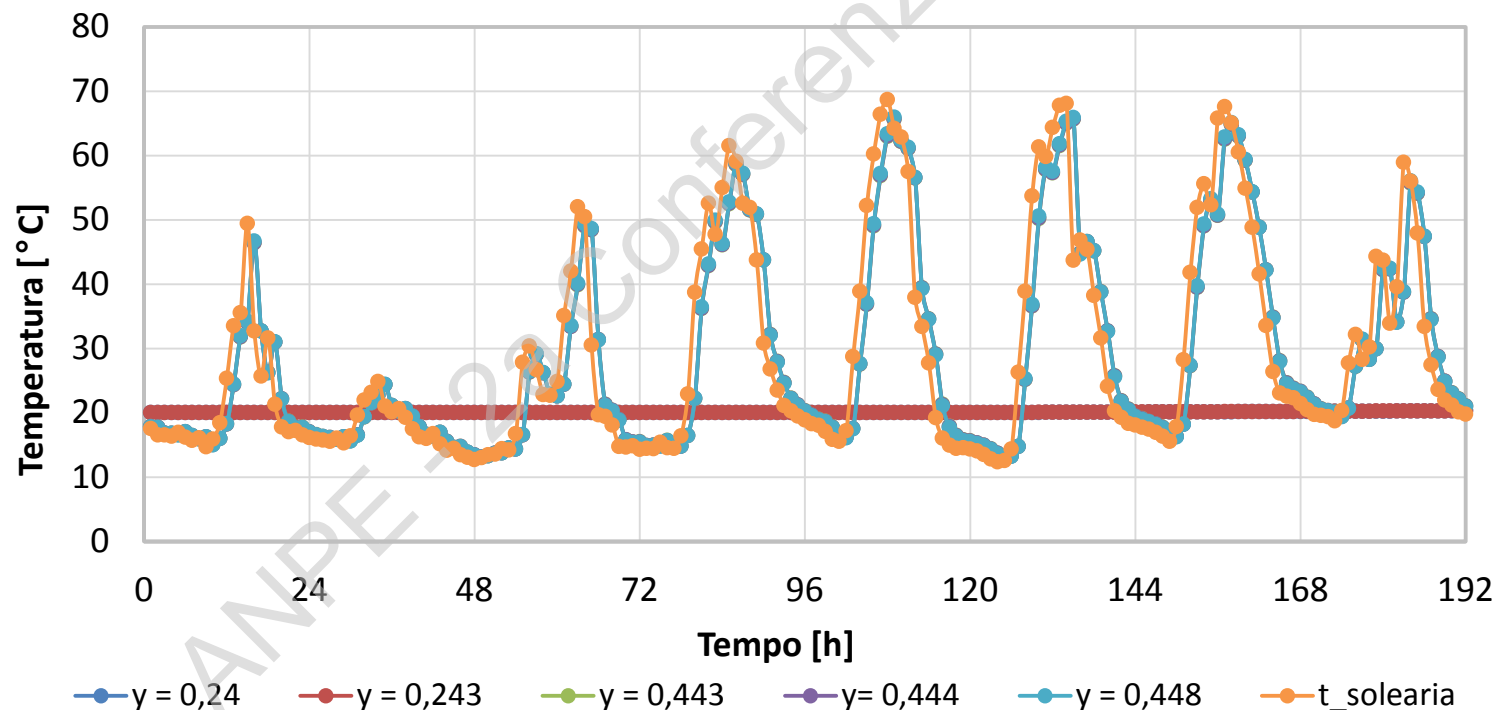


Andamento delle temperature: incidenza dell'isolamento

Milano – luglio

Laterizio

Isolante termico 20 cm

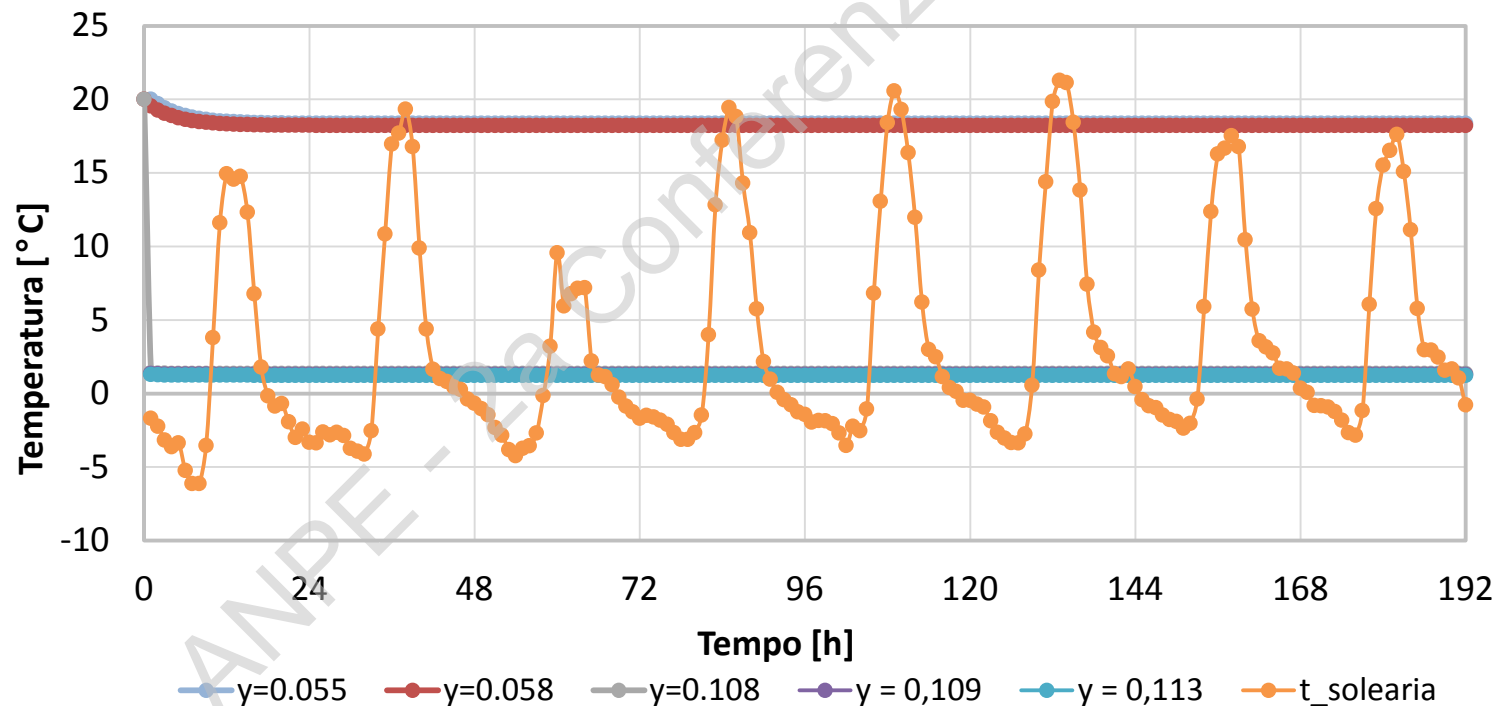


Andamento delle temperature: incidenza dell'isolamento

Milano – gennaio

Calcestruzzo

Isolante termico 5 cm

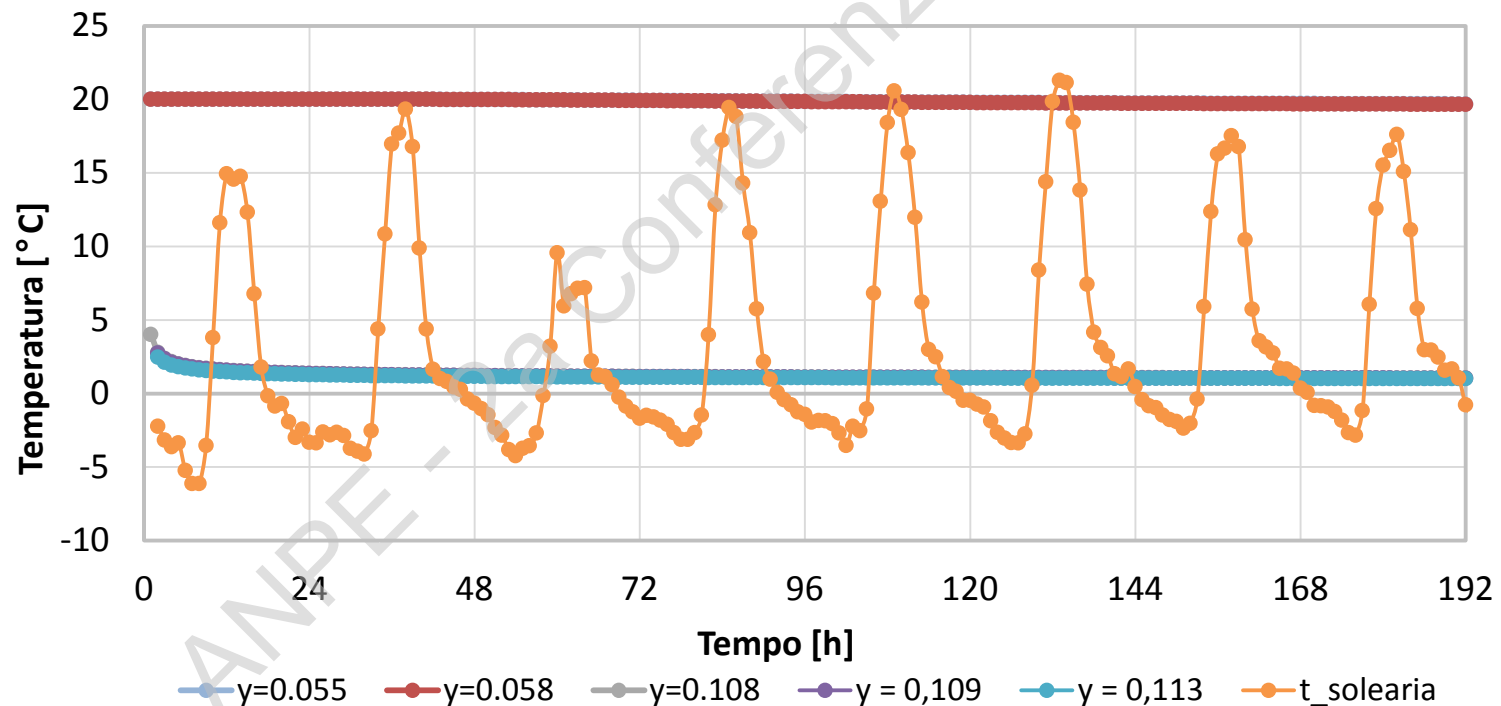


Andamento delle temperature: incidenza dell'isolamento

Milano – gennaio

Calcestruzzo

Isolante termico 20 cm



Escursione termica mensile - Luglio

MILANO

		Temperatura massima [°C]	Temperatura minima [°C]	Escursione [°C]
Calcestruzzo	isolante 5 cm	67,7	12,5	55,2
	isolante 10 cm	66,6	12,9	53,7
	isolante 20 cm	66,6	12,9	53,7
Laterizio	isolante 5 cm	67,7	12,5	55,2
	isolante 10 cm	68,2	12,4	55,8
	isolante 20 cm	65,9	13,1	52,8

Escursione termica mensile - Luglio

ROMA

		Temperatura massima [°C]	Temperatura minima [°C]	Escursione [°C]
Calcestruzzo	isolante 5 cm	72,7	11,1	61,6
	isolante 10 cm	73,2	11,0	62,2
	isolante 20 cm	70,4	11,7	58,7
Laterizio	isolante 5 cm	72,7	11,2	61,5
	isolante 10 cm	73,2	11,0	62,2
	isolante 20 cm	70,6	11,7	58,9

Escursione termica mensile - Luglio

PALERMO

		Temperatura massima [°C]	Temperatura minima [°C]	Escursione [°C]
Calcestruzzo	isolante 5 cm	80,3	17,0	63,3
	isolante 10 cm	80,9	16,9	64,0
	isolante 20 cm	77,4	18,0	59,4
Laterizio	isolante 5 cm	80,3	17,0	63,3
	isolante 10 cm	81,0	17,0	64,0
	isolante 20 cm	78,3	17,8	60,5

Considerazioni

I risultati ottenuti evidenziano come la membrana possa essere sottoposta a stress termici giornalieri minimo - massimo da circa 20 °C a circa 60°C – 80°C, secondo le condizioni climatiche che si verificano.

E' quindi proprio la variabile clima, l'intensità del soleggiamento in particolare, che costituisce il riferimento per ciò che riguarda i possibili scambi termici superficiali e le variazioni di temperatura in particolare.

Un'interessante osservazione deriva dal fatto che i materiali utilizzati come strato strutturale delle coperture analizzate (calcestruzzo o laterizio) fanno sì che le capacità termiche areiche interne risultino assai maggiori rispetto a quelle esterne (anche di 5 – 6 volte inferiori).

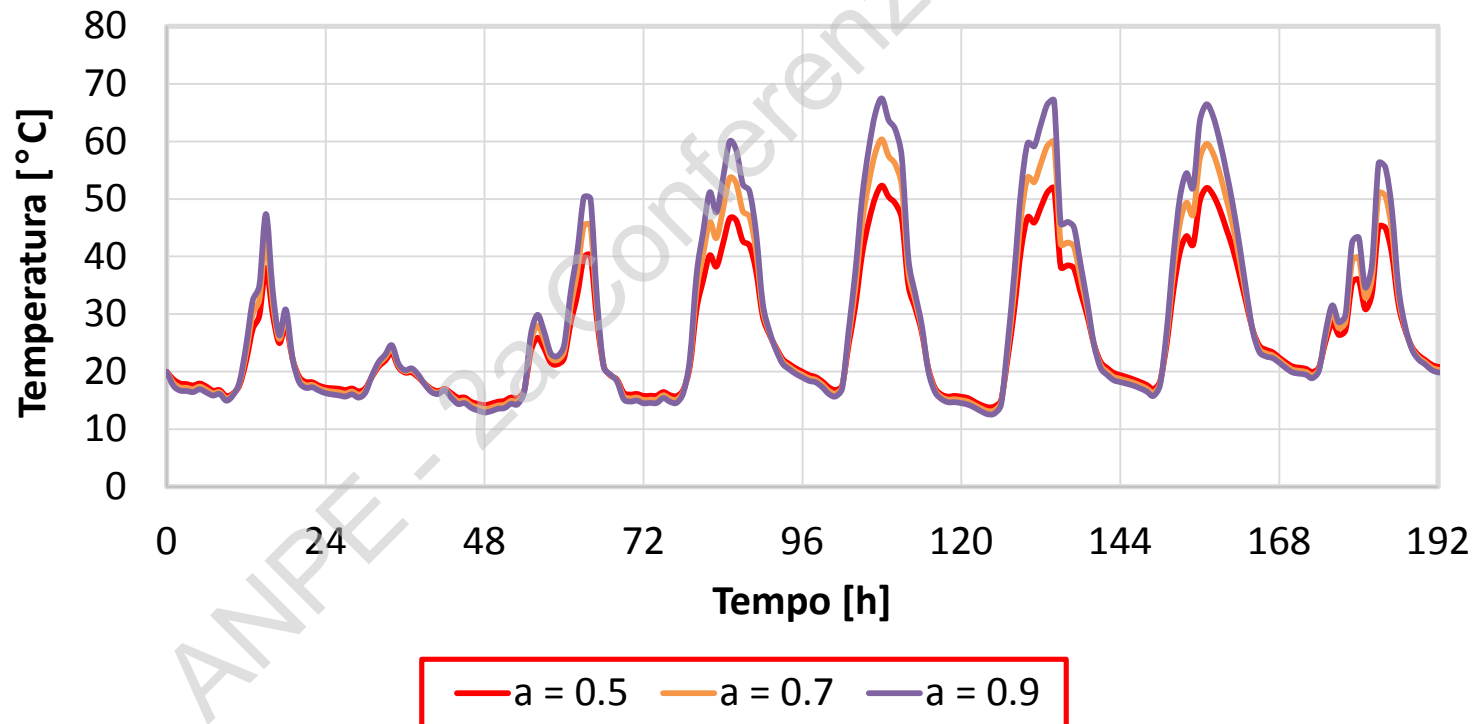
Una conseguenza di questo fatto è che la parte interna della copertura sia maggiormente soggetta a fenomeni di accumulo termico mentre quella esterna tende a seguire con maggiore prontezza le variazioni imposte dagli scambi termici.

Incidenza del coefficiente di assorbimento solare sulla temperatura di membrana

MILANO – Luglio

Copertura in laterizio.

Isolante 5 cm

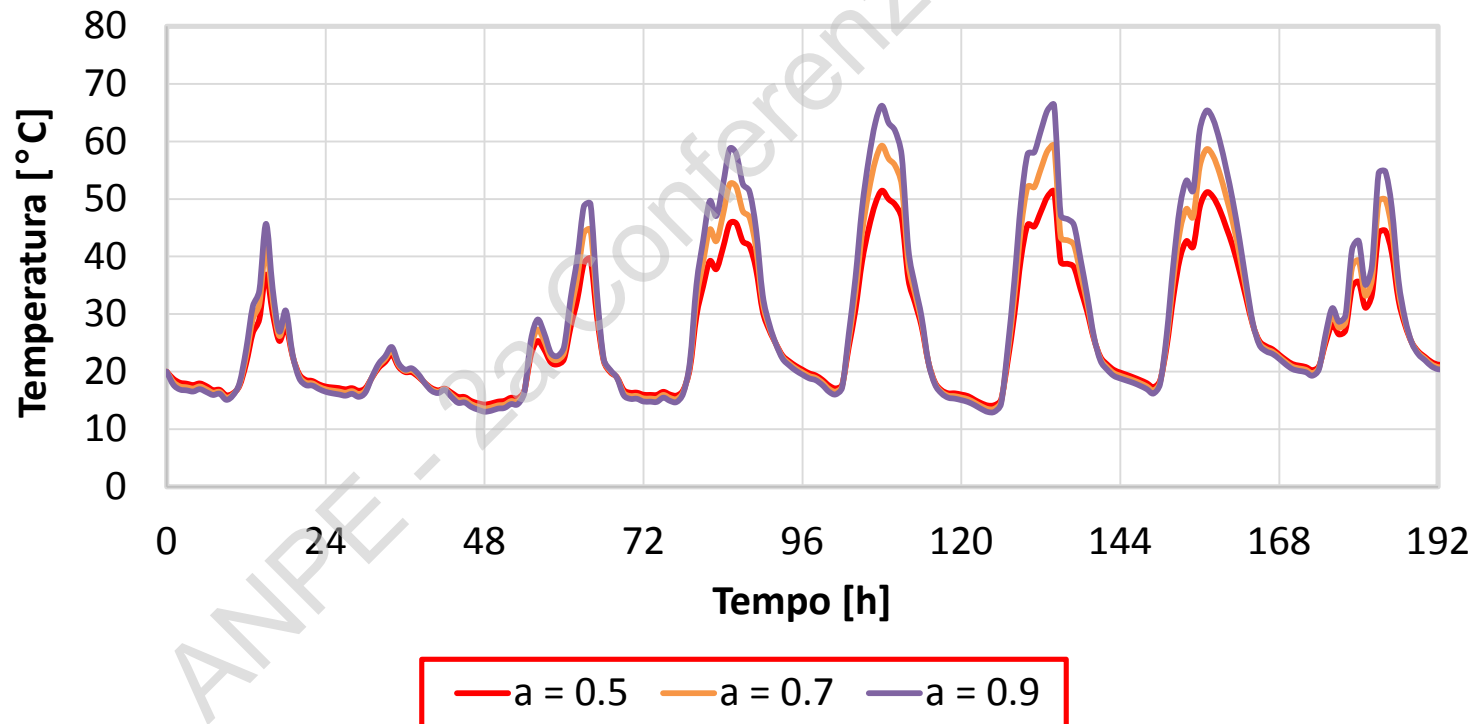


Incidenza del coefficiente di assorbimento solare sulla temperatura di membrana

MILANO – Luglio

Copertura in laterizio.

Isolante termico 20 cm.

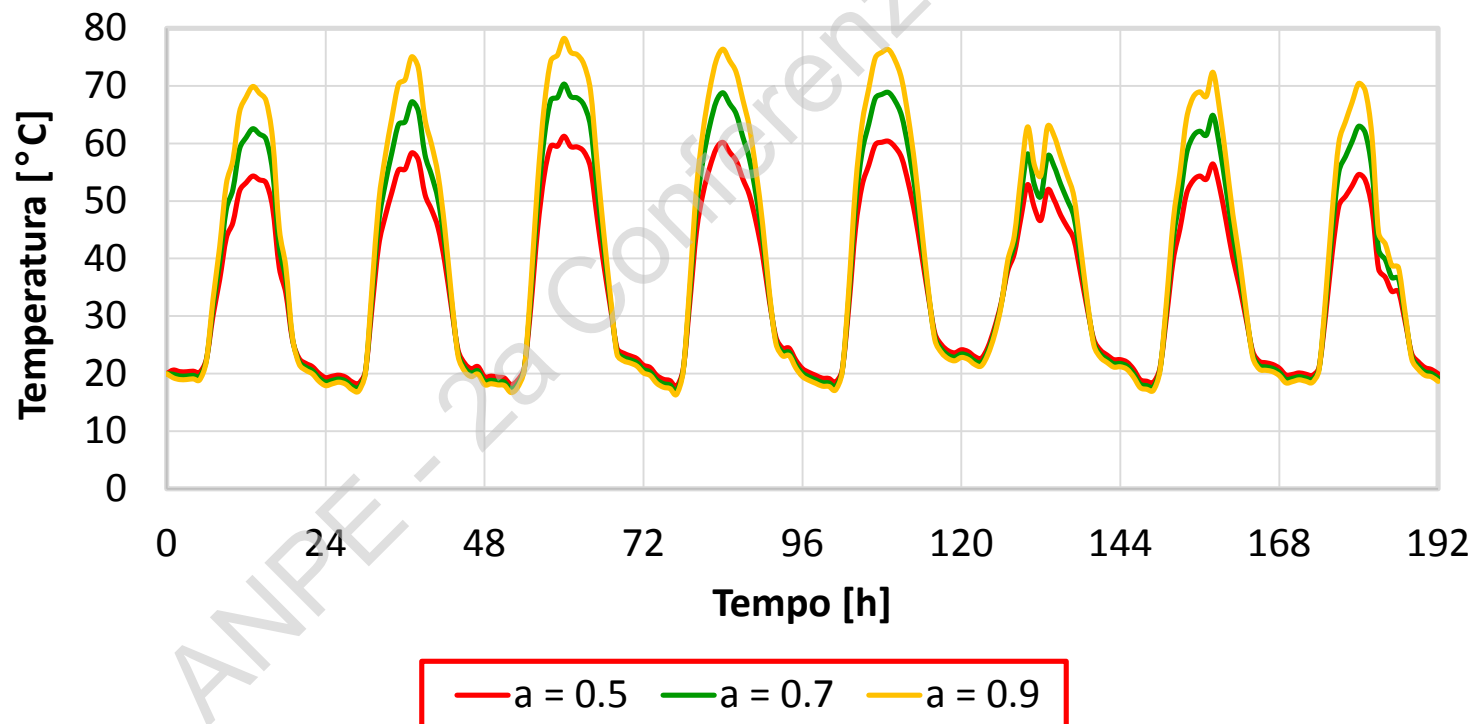


Incidenza del coefficiente di assorbimento solare sulla temperatura di membrana

PALERMO – Luglio

Copertura in laterizio.

Isolante termico 5 cm.

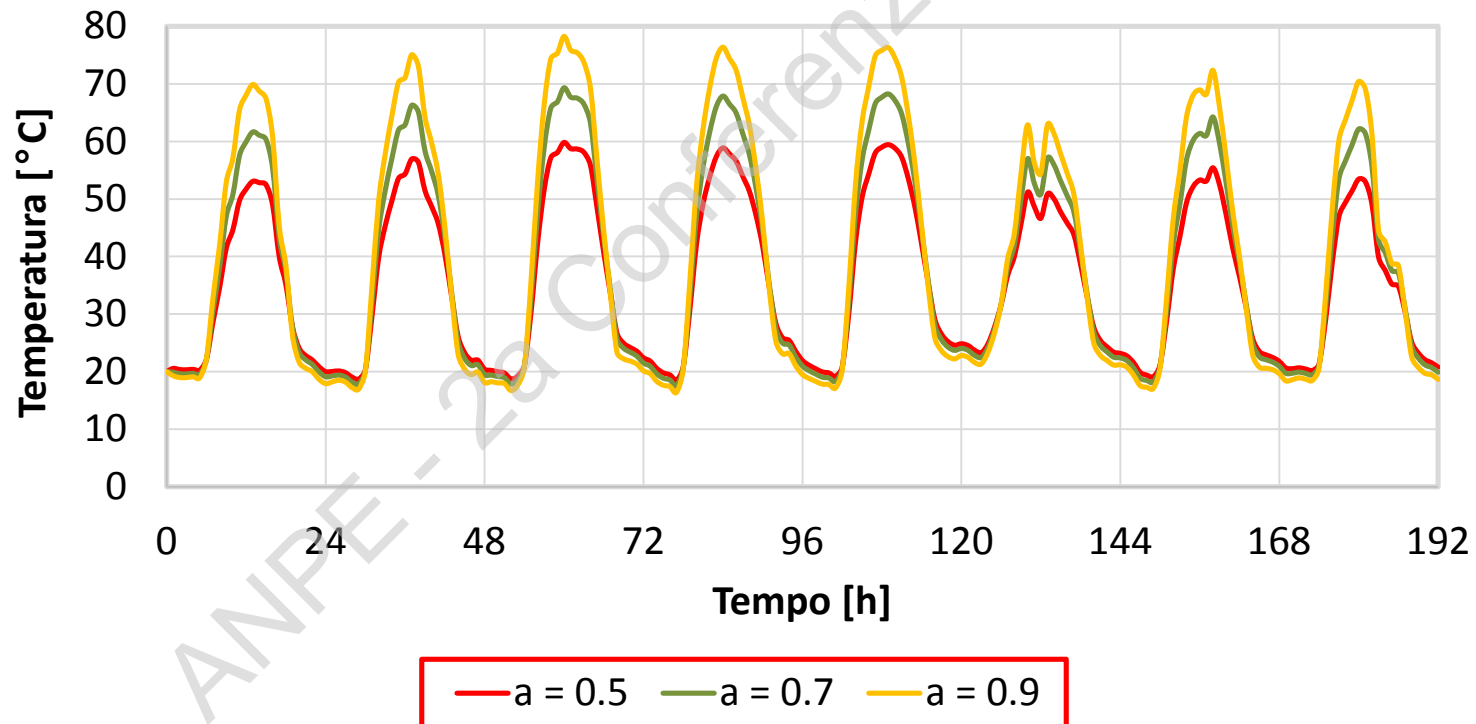


Incidenza del coefficiente di assorbimento solare sulla temperatura di membrana

PALERMO – Luglio

Copertura in laterizio.

Isolante termico 20 cm.

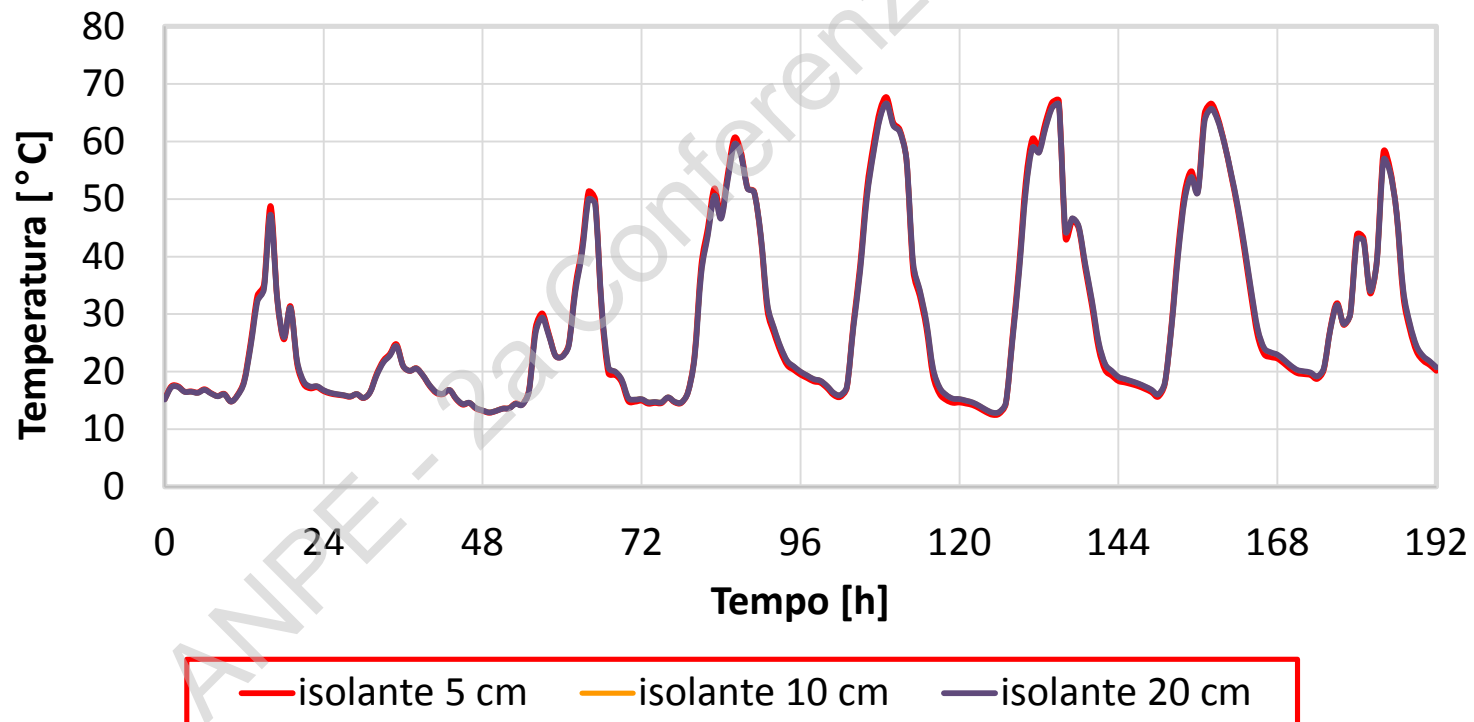


Incidenza dello spessore di isolante sulla temperatura di membrana

MILANO

Copertura in calcestruzzo

$a = 0.9$

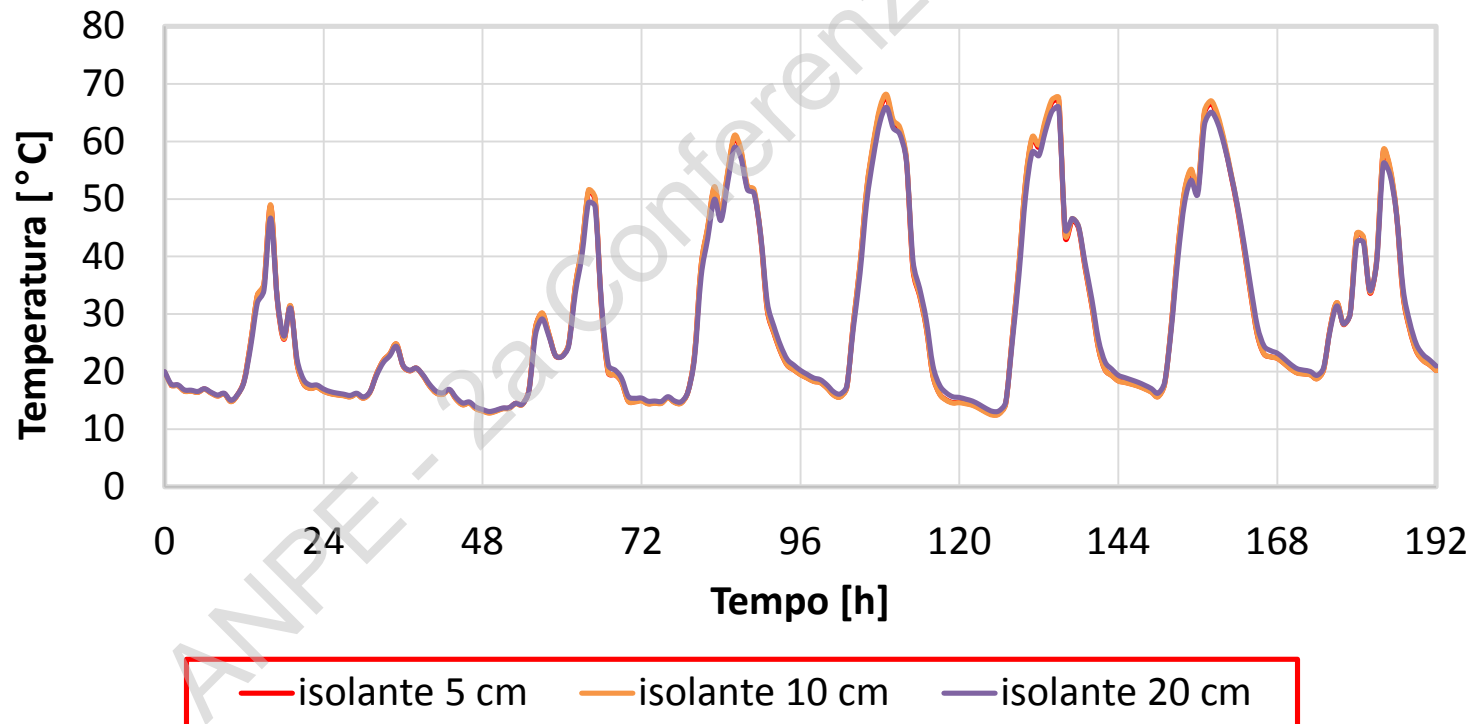


Incidenza dello spessore di isolante sulla temperatura di membrana

MILANO

Copertura in laterizio

$a = 0.9$

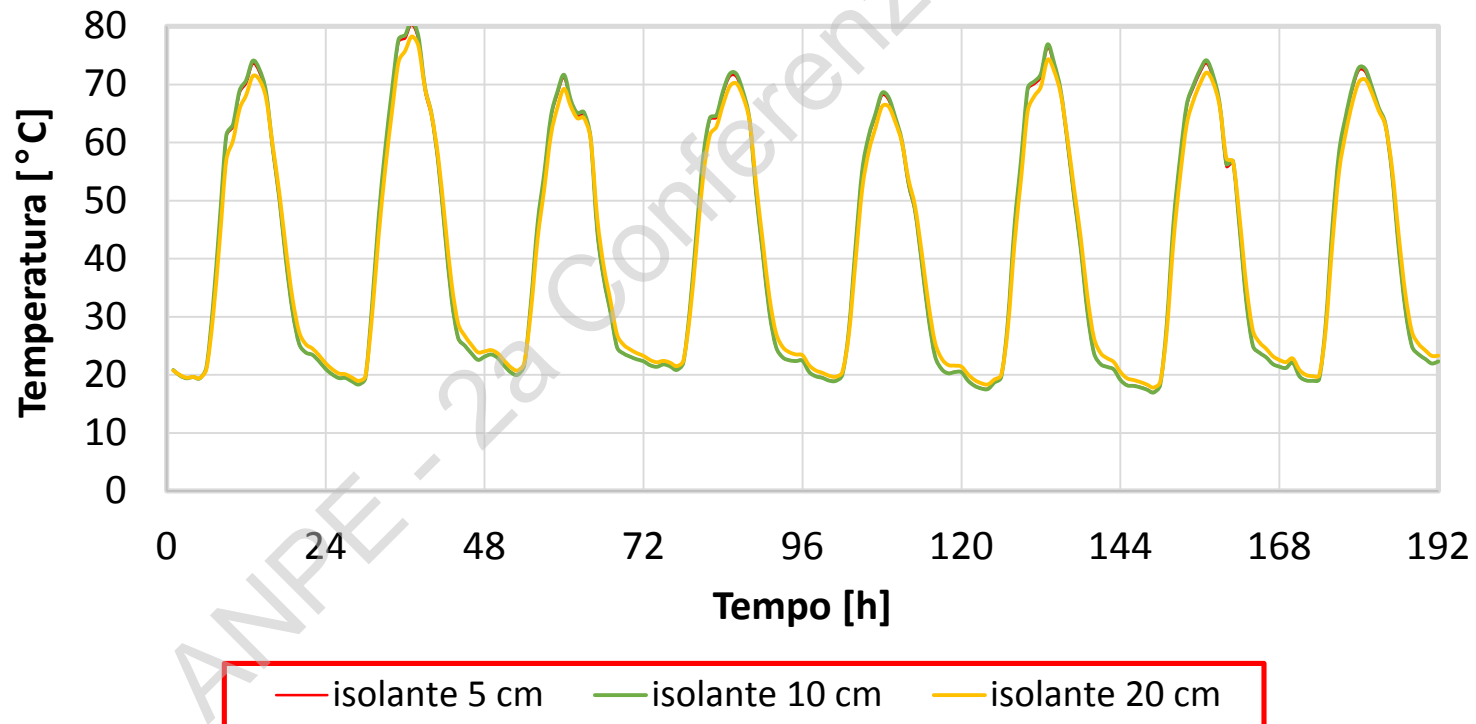


Incidenza dello spessore di isolante sulla temperatura di membrana

PALERMO

Copertura in calcestruzzo

$a = 0.9$

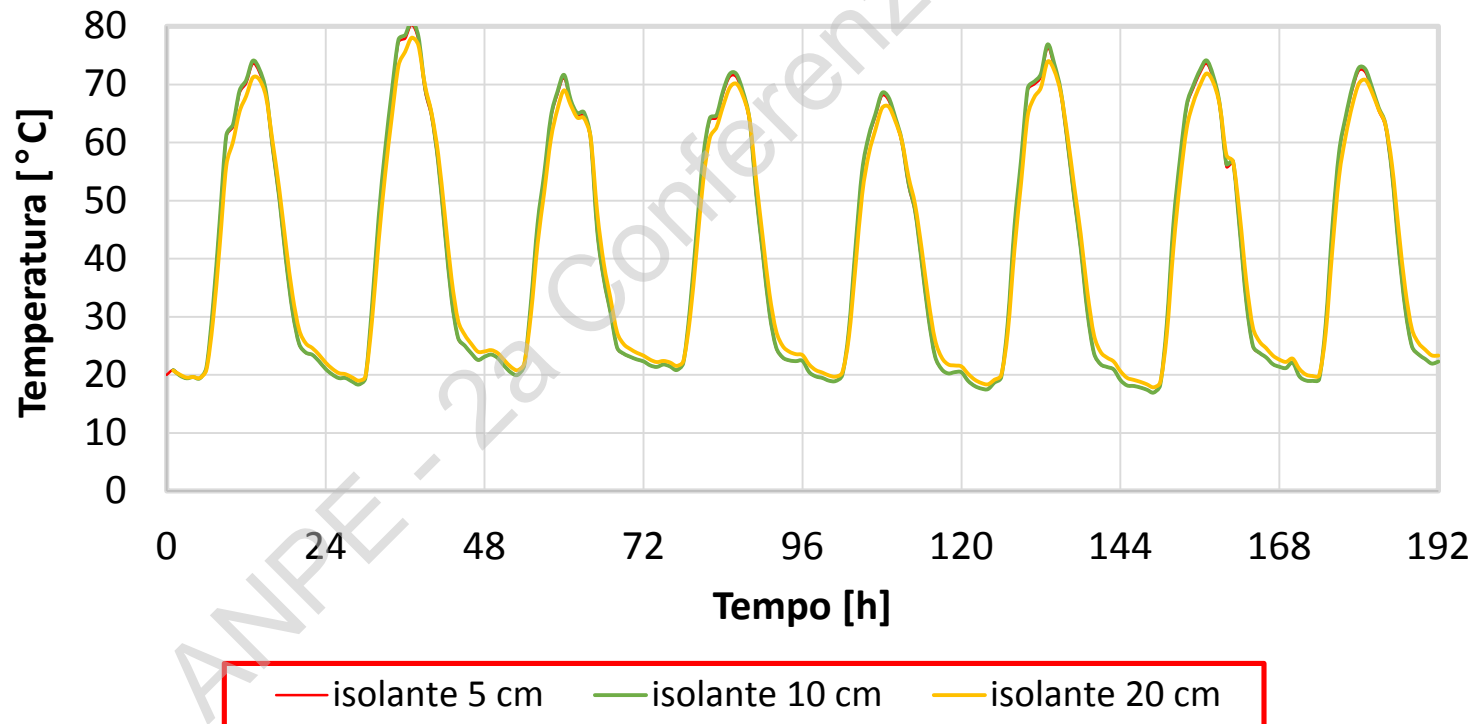


Incidenza dello spessore di isolante sulla temperatura di membrana

PALERMO

Copertura in laterizio

$a = 0.9$



I
- - -
U
- - -
A
- - -
V

Università Iuav di Venezia



**2a Conferenza Nazionale
Poliuretano Espanso rigido**



Bologna

Zanhotel Centergross

26 Maggio 2015

GRAZIE PER LA CORTESE ATTENZIONE!

francesca.cappelletti@iuav.it