



Scuola Politecnica e
delle Scienze di Base
Università degli Studi di Napoli Federico II



DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA
INDUSTRIALE

Edifici ad energia netta zero (NZEBs): gli effetti dell' invecchiamento dei sistemi di isolamento a cappotto in poliuretano espanso

Ricerca a cura di D. D'Agostino, R. Landolfi, F. Minelli

Presenta: ING. FEDERICO MINELLI email: federico.minelli@unina.it

Università degli Studi di Napoli Federico II – Dipartimento di Ingegneria Industriale

OUTLINE DELLA PRESENTAZIONE



Contesto energetico, definizione di Edificio ad Energia Netta Zero (**Net Zero Energy Building – NZEB**) e raggiungimento del target attraverso interventi da *Superbonus 110%*

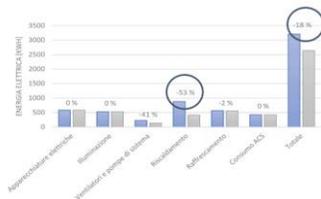


Valutazione degli **effetti dell'invecchiamento di sistemi a cappotto sul bilancio energetico del NZEB**



Caso di studio

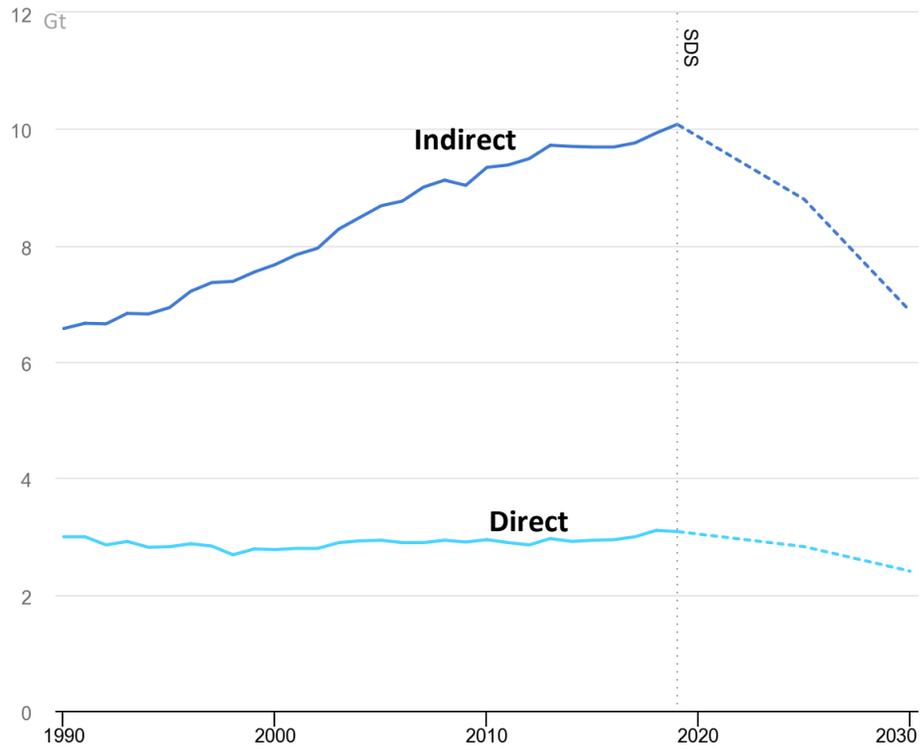
Risultati



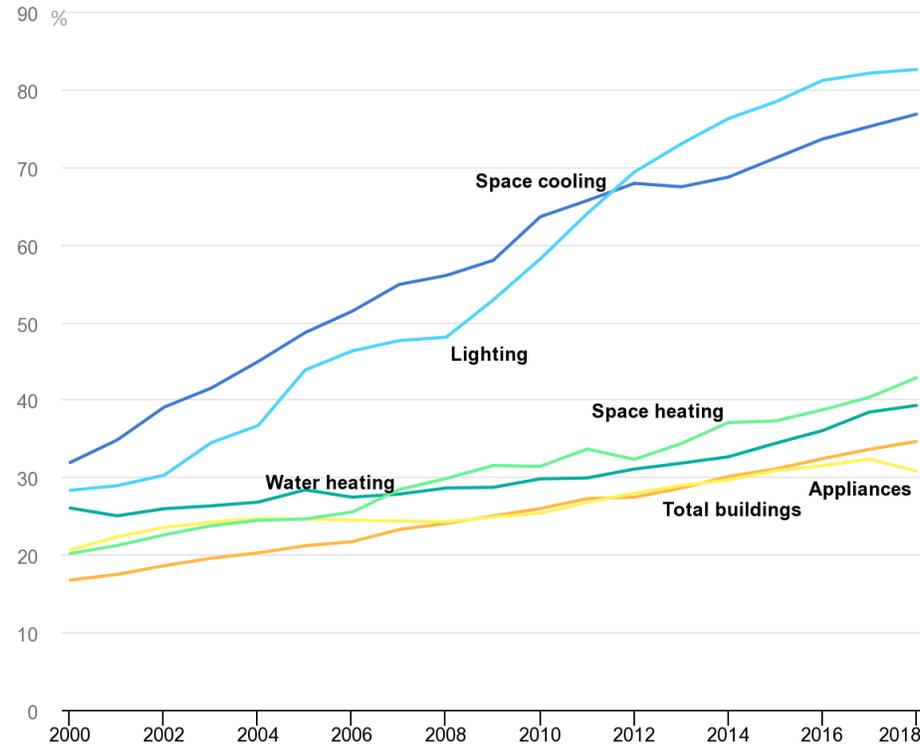
Conclusioni

CONTESTUALIZZAZIONE E DEFINIZIONI

In Europa gli edifici sono responsabili di circa il 40% del consumo totale di energia e per il 39% delle emissioni totali di CO₂.

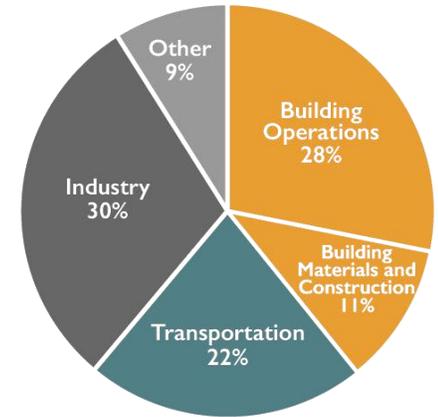


Buildings sector energy-related CO₂ emissions in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030

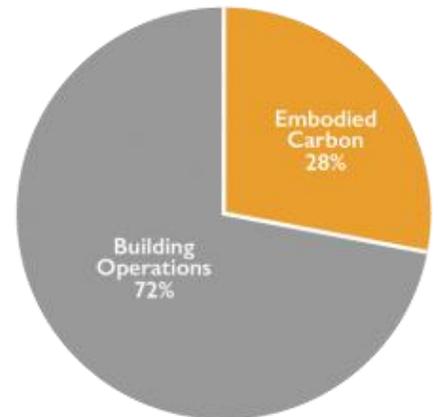


Policy coverage of total final energy consumption in buildings, 2000-2018

Global CO₂ Emissions by Sector



Annual Global Building Sector CO₂ Emission



Fonte: IEA - International Energy Agency

CONTESTUALIZZAZIONE E DEFINIZIONI



EUROPA

Direttiva 2010/31/UE sull'efficienza energetica degli edifici – EPBD recast

nearly Zero Energy Building – nZEB, edificio ad energia quasi zero: «edificio il cui fabbisogno energetico molto basso dev'essere quasi interamente soddisfatto da fonti energetiche rinnovabili»



ITALIA

Decreto Interministeriale 26 giugno 2015 – «Requisiti Minimi»

Criteri secondo cui un edificio viene classificato come nearly Zero Energy Building (nZEB).

OBBLIGO: TUTTI GLI EDIFICI DI NUOVA COSTRUZIONE O SOGGETTI A DEMOLIZIONE E RICOSTRUZIONE (PUBBLICI E NON) A PARTIRE DAL 1° gennaio 2021 DEVONO ESSERE *EDIFICI AD ENERGIA QUASI ZERO*.

CONTESTUALIZZAZIONE E DEFINIZIONI

Quando per la legge Italiana un edificio può essere considerato nearly ZEB?

PRINCIPALI VERIFICHE

$H't$

(W/m²K)

coefficiente di scambio termico minore di un valore limite tabellato funzione della zona climatica e del rapporto di forma.

$A_{sol,est}/A_{sup}$

Area solare equivalente estiva, minore di un valore limite in funzione della destinazione d'uso dell'edificio

$EP_{H,nd} < EP_{H,nd,lim}$

$EP_{C,nd} < EP_{C,nd,lim}$

$EP_{gl,tot} < EP_{gl,tot,lim}$

(kWh/m² anno)

Gli indici di prestazione devono essere inferiori ai corrispondenti valori limite calcolati per l'edificio di riferimento.

$\eta_H > \eta_{H,lim}$

$\eta_w > \eta_{w,lim}$

$\eta_C > \eta_{C,lim}$

Le efficienze degli impianti di riscaldamento, acqua calda sanitaria e raffrescamento devono essere maggiori di un valore limite calcolato per l'edificio di riferimento.

FER

Impiego di fonti energetiche rinnovabili (FER) rispondente agli obblighi del D.Lgs. 199/2021.

CONTESTUALIZZAZIONE E DEFINIZIONI

Su cosa può agire il tecnico per ottenere la «spunta» «edificio a energia quasi zero»?

$H't$ (W/m ² K)	INVOLUCRO EDILIZIO
$A_{sol,est}/A_{sup}$	FINESTRE E SCHERMATURE SOLARI
$EP_{H,nd} < EP_{H,nd,lim}$	INVOLUCRO E SCHERMATURE SOLARI
$EP_{C,nd} < EP_{C,nd,lim}$	INVOLUCRO E SCHERMATURE SOLARI
$EP_{gl,tot} < EP_{gl,tot,lim}$ (kWh/m ² anno)	INVOLUCRO, IMPIANTO, ...
$\eta_H > \eta_{H,lim}$	IMPIANTO CLIMATIZZAZIONE INVERNALE
$\eta_w > \eta_{w,lim}$	IMPIANTO PRODUZIONE ACS
$\eta_C > \eta_{C,lim}$	IMPIANTO CLIMATIZZAZIONE ESTIVA
FER	IMPIANTO FOTOVOLTAICO, MINIEOLICO,

INTERVENTI
INCENTIVABILI AL
110%



NET ZERO ENERGY BUILDINGS

«edificio il cui fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dev'essere TOTALMENTE soddisfatto attraverso fonti energetiche rinnovabili»



NON CI SONO ATTUALMENTE RIFERIMENTI LEGISLATIVI!

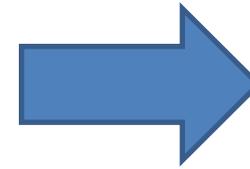
- FORMA COMPATTA
- BASSA TRASMITTANZA TERMICA UNITARIA
- USO DI TECNICHE PASSIVE
- MASSIMIZZAZIONE DEI GUADAGNI INTERNI GRATUITI IN INVERNO
- MASSIMIZZAZIONE DELLA VENTILAZIONE NATURALE
- UTILIZZO DI SISTEMI COSTRUTTIVI INNOVATIVI (impianti di climatizzazione ad alta efficienza, sistemi di automazione, ecc.)
- CONSUMO DI ENERGIA PRIMARIA NON RINNOVABILE INFERIORE A 57 kWh/m²anno (DA BILANCIARE CON FER)
- IMPIEGO DI FER



CONTESTUALIZZAZIONE E DEFINIZIONI

NET ZERO ENERGY BUILDINGS

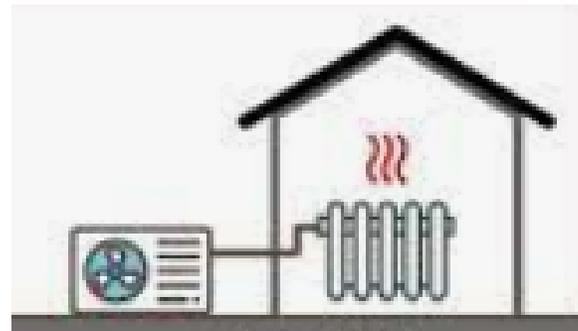
- VALORI OTTIMALI DEI PARAMETRI TERMICI DELL'INVOLUCRO EDILIZIO
- IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE AD ALTA EFFICIENZA
- USO DI FER



110%
Superbonus



NZEB



CONTESTUALIZZAZIONE E DEFINIZIONI

ETICS: External Thermal Insulation Composite System

Il **Decreto Rilancio** (Decreto Legge n. 34/2020) prevede una detrazione fiscale fino al 110% su ALCUNE opere volte a migliorare l'efficienza energetica dell'edificio esistente. Il sistema a cappotto (**ETICS**) assume un ruolo chiave per la dimostrazione di un abbattimento dei consumi energetici e per l'accesso alle detrazioni, in quanto intervento **TRAINANTE**.

Con la Decisione di esecuzione (UE) 2020/1574 del 29.10.2020 è stato pubblicato in GU il documento per la valutazione europea (EAD) **EAD 040083-00-0404** per i prodotti da costruzione "Sistemi/kit complessi per l'isolamento termico esterno (denominati "a cappotto") (**ETICS**)", (che sostituisce la specifica tecnica "ETAG 004").

L'**EAD** (European Assessment Document) è il Documento per la Valutazione Europea utilizzato dai **TABs** (Technical Assessment Bodies) per il rilascio delle Valutazioni Tecniche Europee **ETAs** (European Technical Assessments).

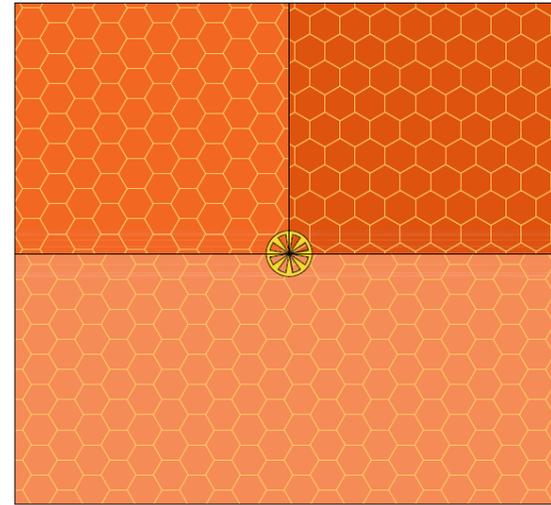
A partire dal 2021, il rilascio dei nuovi certificati ETA per il Sistema a Cappotto non avviene più sulla base dell'ETAG 004, bensì dell'**EAD 040083-00-0404**.

INVECCHIAMENTO SISTEMA ETICS

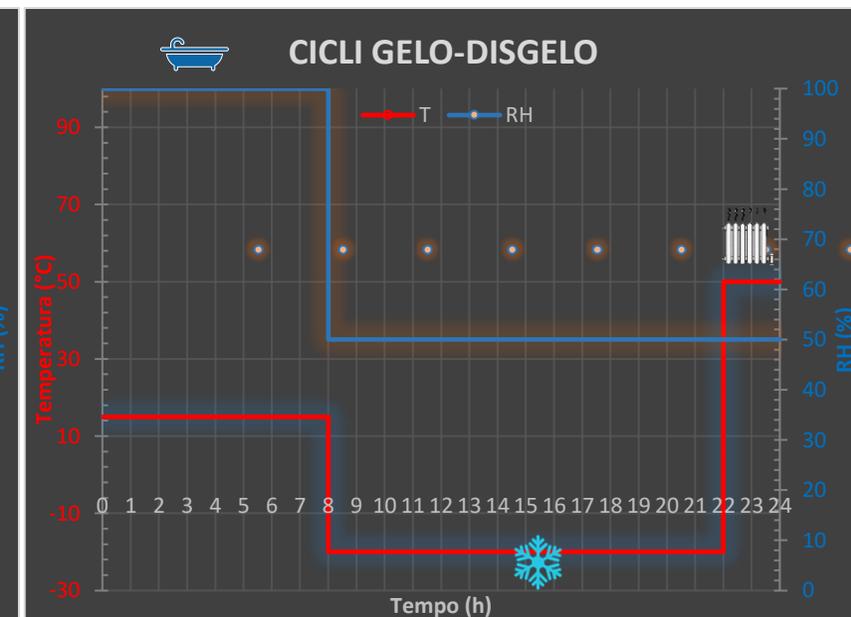
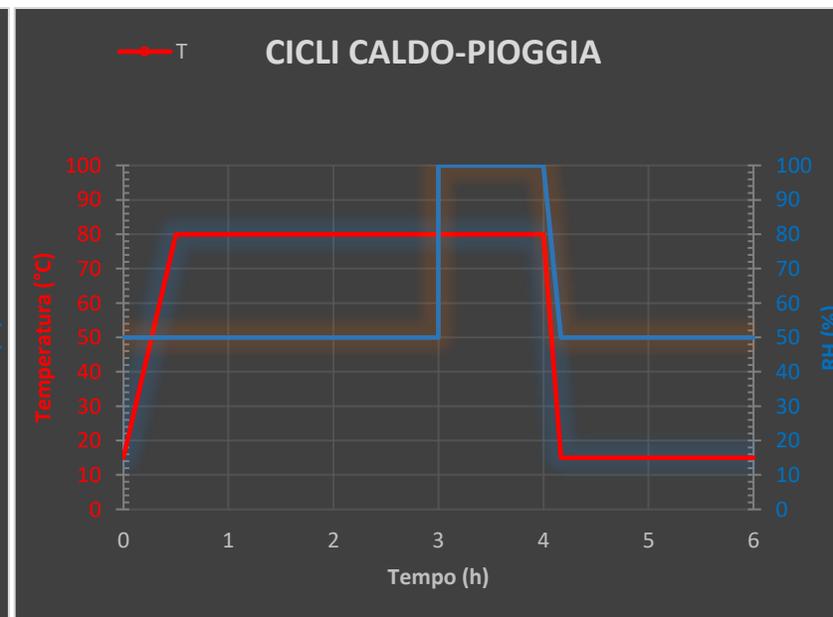
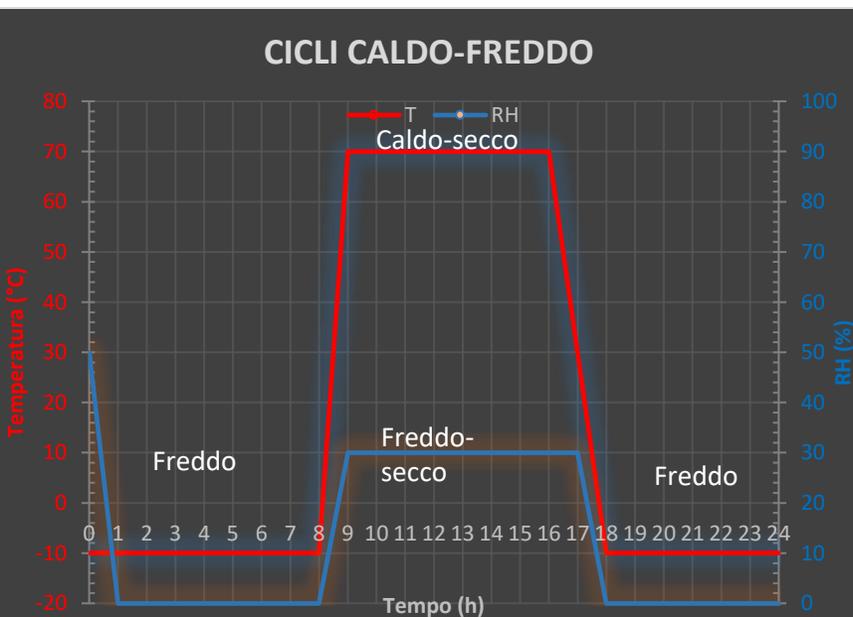
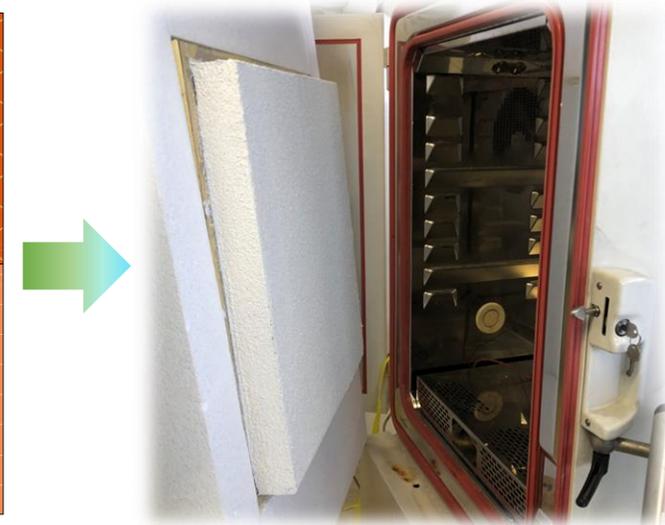
Le prove di invecchiamento accelerato sono state eseguite in laboratorio tramite i cicli proposti dall'EAD 040083-00-0404, ovvero cicli igrometrici e cicli di gelo-disgelo.

Le fasi di tali test, però, sono state rielaborate, per sottoporre a livelli elevati di stress i campioni, al fine di valutare la durabilità del componente edilizio, il decadimento delle prestazioni complessive e l'evoluzione del degrado, considerando uno scenario più estremo

Provino sistema ETICS - PU

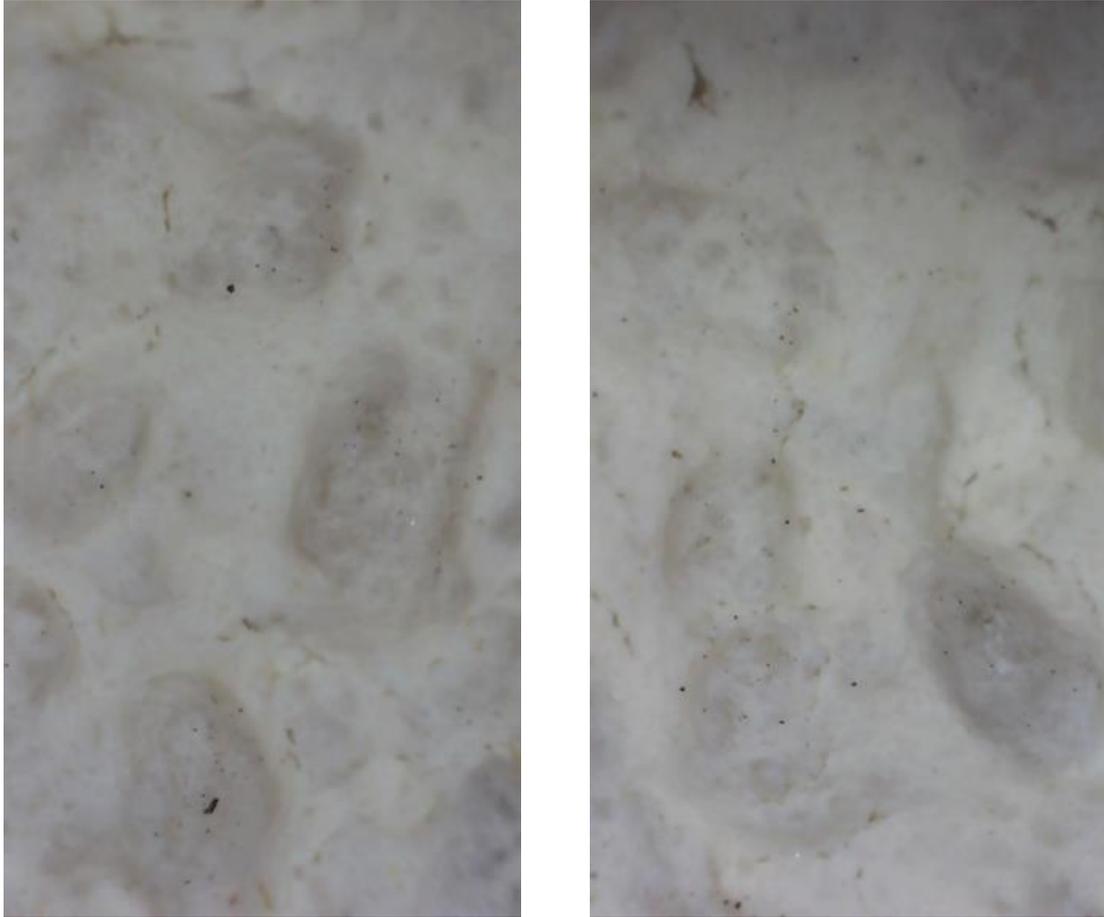


Cella climatica

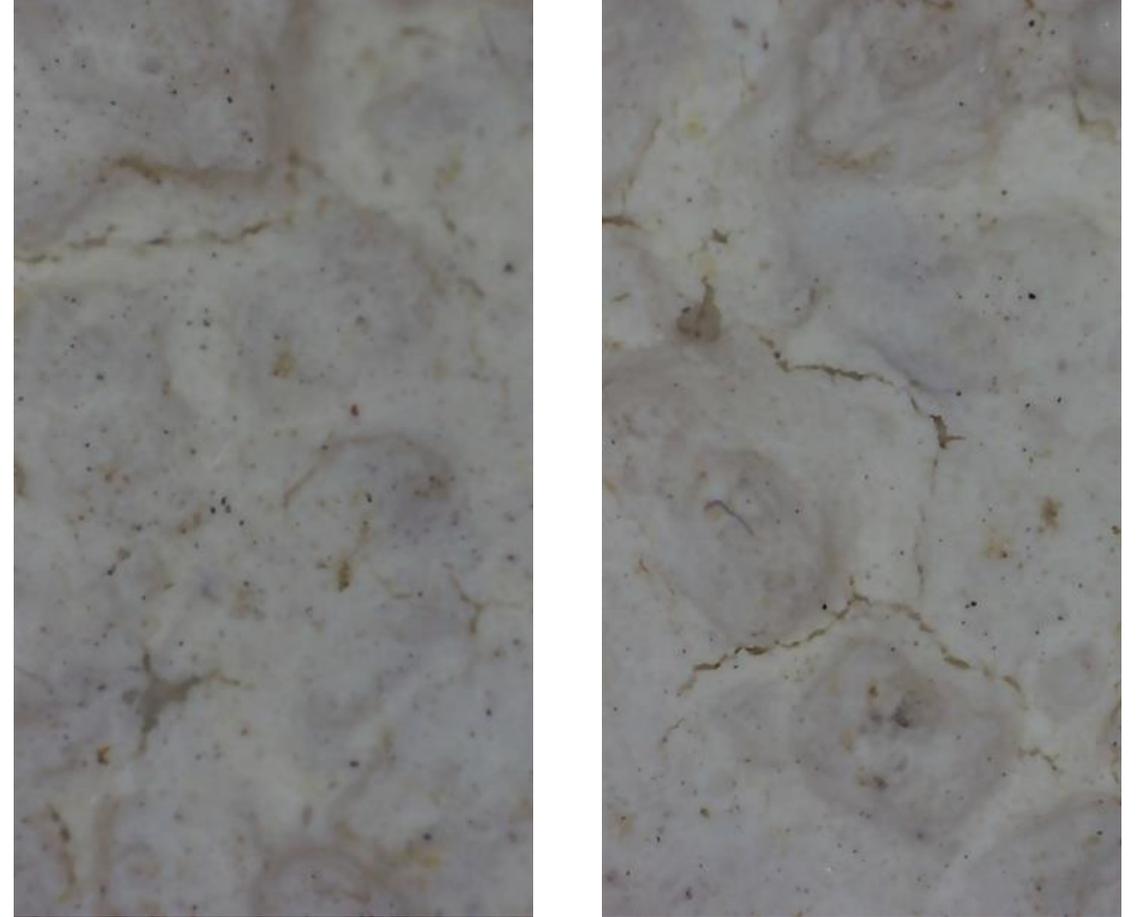


INVECCHIAMENTO SISTEMA ETICS

ANTE Invecchiamento



POST Invecchiamento



Immagini del campione al microscopio ottico

Comparando i risultati dell'invecchiamento accelerato con quelli registrati in casi reali su campioni identicamente realizzati, è stato possibile concludere che l'invecchiamento ricreato in laboratorio corrisponde a circa **8-10 anni** di invecchiamento naturale.

INVECCHIAMENTO SISTEMA ETICS



Valutazione della **resistenza termica R** e della **conducibilità termica λ** del sistema ETICS con il *metodo della piastra calda*, secondo UNI EN 12667.

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\Phi} A$$

$$\lambda = \frac{\Phi d}{A (T_1 - T_2)}$$

T_1 è la temperatura lato caldo del provino;

T_2 è la temperatura lato freddo del provino;

Φ è la potenza media fornita alla sezione di misurazione dell'unità di riscaldamento;

A è l'area di misurazione;

d è lo spessore medio dei provini.

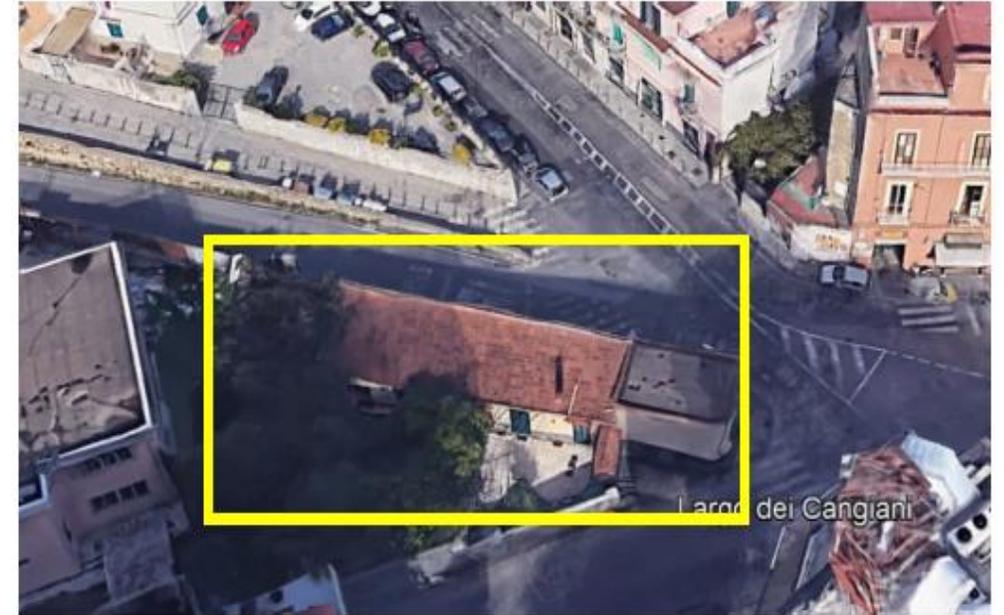
	Caratteristiche termiche	Unità di misura	
ETICS con pannelli isolanti in poliuretano			
ANTE	λ_0	0,025	W/mK
	U_0	0,44	W/m ² K
	R_0	2,28	m ² K/W
POST	λ_1	0,026	W/mK
	U_1	0,46	W/m ² K
	R_1	2,18	m ² K/W

CASO STUDIO

EDIFICIO UNIFAMILIARE ESISTENTE DA RENDERE NET ZERO ENERGY BUILDING

- CHE CONTRIBUTO DA IN TERMINI DI RISPARMIO ENERGETICO UN INTERVENTO DI ISOLAMENTO A CAPOTTO CON POLIURETANO?
- COME CAMBIANO LE PRESTAZIONI DEL NZEB IN RELAZIONE ALL'INVECCHIAMENTO DELL'ISOLANTE TERMICO?

NZEB: «Edificio ad altissima prestazione energetica il cui fabbisogno energetico è interamente soddisfatto attraverso le fonti energetiche rinnovabili»



Napoli
(Sud Italia)

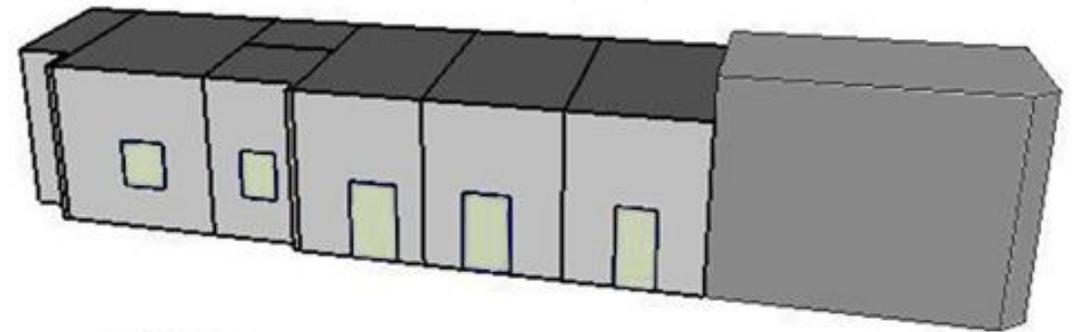
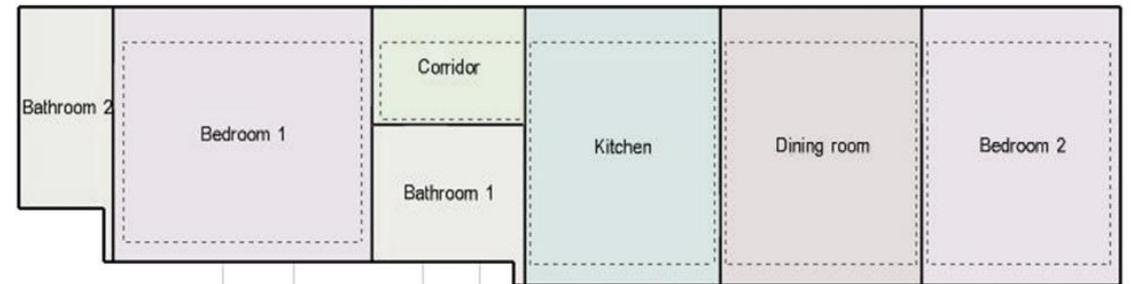
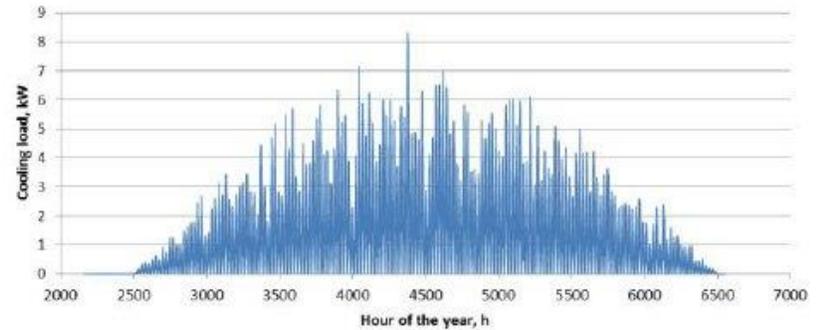
Zona climatica C

Periodo riscaldamento
dal 15 Novembre al 31 Marzo
Max 10 ore al dì



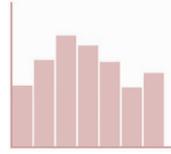
CASO STUDIO: WORKFLOW

1. MODELLAZIONE ED ANALISI MEDIANTE SIMULAZIONE ENERGETICA DINAMICA
2. VALIDAZIONE DEL MODELLO
3. INTRODUZIONE IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE AD ALTA EFFICIENZA
4. INTRODUZIONE SISTEMA ETICS
5. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO CON E SENZA SISTEMA ETICS
6. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO ANTE E POST INVECCHIAMENTO SISTEMA ETICS



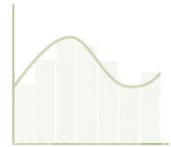
CASO STUDIO: WORKFLOW

1. MODELLAZIONE ED ANALISI MEDIANTE SIMULAZIONE ENERGETICA DINAMICA
2. VALIDAZIONE DEL MODELLO
3. INTRODUZIONE IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE AD ALTA EFFICIENZA
4. INTRODUZIONE SISTEMA ETICS
5. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO CON E SENZA SISTEMA ETICS
6. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO ANTE E POST INVECCHIAMENTO SISTEMA ETICS



METODO (SEMI)STAZIONARIO

Calcolo dei consumi e delle prestazioni secondo un regime stazionario (stagionale) o semi-stazionario (mensile). Vengono usati valori medi per i principali parametri della simulazione e si ottengono risultati significativi ma approssimati.



METODO DINAMICO

La simulazione dinamica eseguita da *EnergyPlus* tiene conto dei fenomeni transitori e di accumulo di calore, per un'analisi altamente dettagliata del comportamento termico dell'intero edificio, su base sub-oraria.

Restituisce consumi energetici molto simili a quelli dell'edificio reale.

CASO STUDIO

1. MODELLAZIONE ED ANALISI MEDIANTE SIMULAZIONE ENERGETICA DINAMICA
2. **VALIDAZIONE DEL MODELLO**
3. INTRODUZIONE IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE AD ALTA EFFICIENZA
4. INTRODUZIONE SISTEMA ETICS
5. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO CON E SENZA SISTEMA ETICS
6. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO ANTE E POST INVECCHIAMENTO SISTEMA ETICS

Calibrazione del modello mediante Mean Bias Error (MBE)

$$\text{MBE: } \frac{\sum_{time} (M - S)}{M}$$

M fabbisogno di energia termica misurato, kWh*
S fabbisogno di energia termica da simulazione, kWh

*Dati disponibili: bollette del consumo di gas per riscaldamento e ACS.

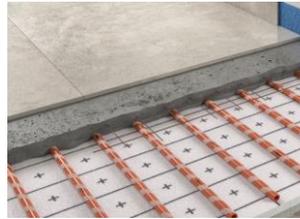
Fabbisogno annuo di energia termica *misurato*: 6'330 kWh
Fabbisogno annuo di energia termica *da simulazione*: 6'489 kWh
Differenza del 3%.

Il MBE calcolato mensilmente risulta pari a
1.20%.

Inferiore al valore indicato dalle linee guida U.S. DOE e ASHRAE per la calibrazione dei modelli ($\pm 5\%$).

CASO STUDIO

1. MODELLAZIONE ED ANALISI MEDIANTE SIMULAZIONE ENERGETICA DINAMICA
2. VALIDAZIONE DEL MODELLO
3. INTRODUZIONE IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE AD ALTA EFFICIENZA
4. INTRODUZIONE SISTEMA ETICS
5. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO CON E SENZA SISTEMA ETICS
6. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO ANTE E POST INVECCHIAMENTO SISTEMA ETICS



CLIMATIZZAZIONE

Pompa di calore reversibile aria-acqua

Potenza termica in riscaldamento: 7 kW

Potenza frigorifera: 12.2 kW

COP (Coefficient Of Performance): 4.6

EER (Energy Efficiency Ratio): 4.7

Pannelli radianti a bassa temperatura

Temperatura acqua M/R: 35/30°C

Sistema integrato nel pavimento

PRODUZIONE ACS

Boiler in pompa di calore

Potenza: 1.9 kW

COP 3.7

RICAMBI D'ARIA

Recuperatore a soffitto

Ventilazione meccanica controllata con recupero di calore

CASO STUDIO

1. MODELLAZIONE ED ANALISI MEDIANTE SIMULAZIONE ENERGETICA DINAMICA
2. VALIDAZIONE DEL MODELLO
3. INTRODUZIONE IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE AD ALTA EFFICIENZA
4. INTRODUZIONE SISTEMA ETICS
5. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO CON E SENZA SISTEMA ETICS
6. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO ANTE E POST INVECCHIAMENTO SISTEMA ETICS

Poliuretano 6 cm			
	Involucro senza isolamento	Stato di progetto ANTE invecchiamento	Stato di progetto POST invecchiamento
Calore specifico [J/kg K]	1464		
Densità [kg/m ³]	35		
Spessore isolante pareti esterne [m]	nessun isolante	0,06	0,06
Conduktività termica [W/mK]	/	0,025	0,026
Trasmittanza termica stazionaria parete esterna spessore 35 cm [W/m ² K]	0,845	0,279	0,286
Trasmittanza termica stazionaria parete esterna spessore 60 cm [W/m ² K]	0,527	0,233	0,238
Carico termico invernale [kW]	5	3,8	3,83
Carico termico invernale [W/m ³]	18,5	14,0	14,1
Carico termico estivo [kW]	7,1	5,58	5,58
Carico termico estivo [W/m ³]	26,2	20,6	20,6

D.M. 26/6/2015
«REQUISITI
MINIMI»



U < 0,36 [W/m²K]

CASO STUDIO

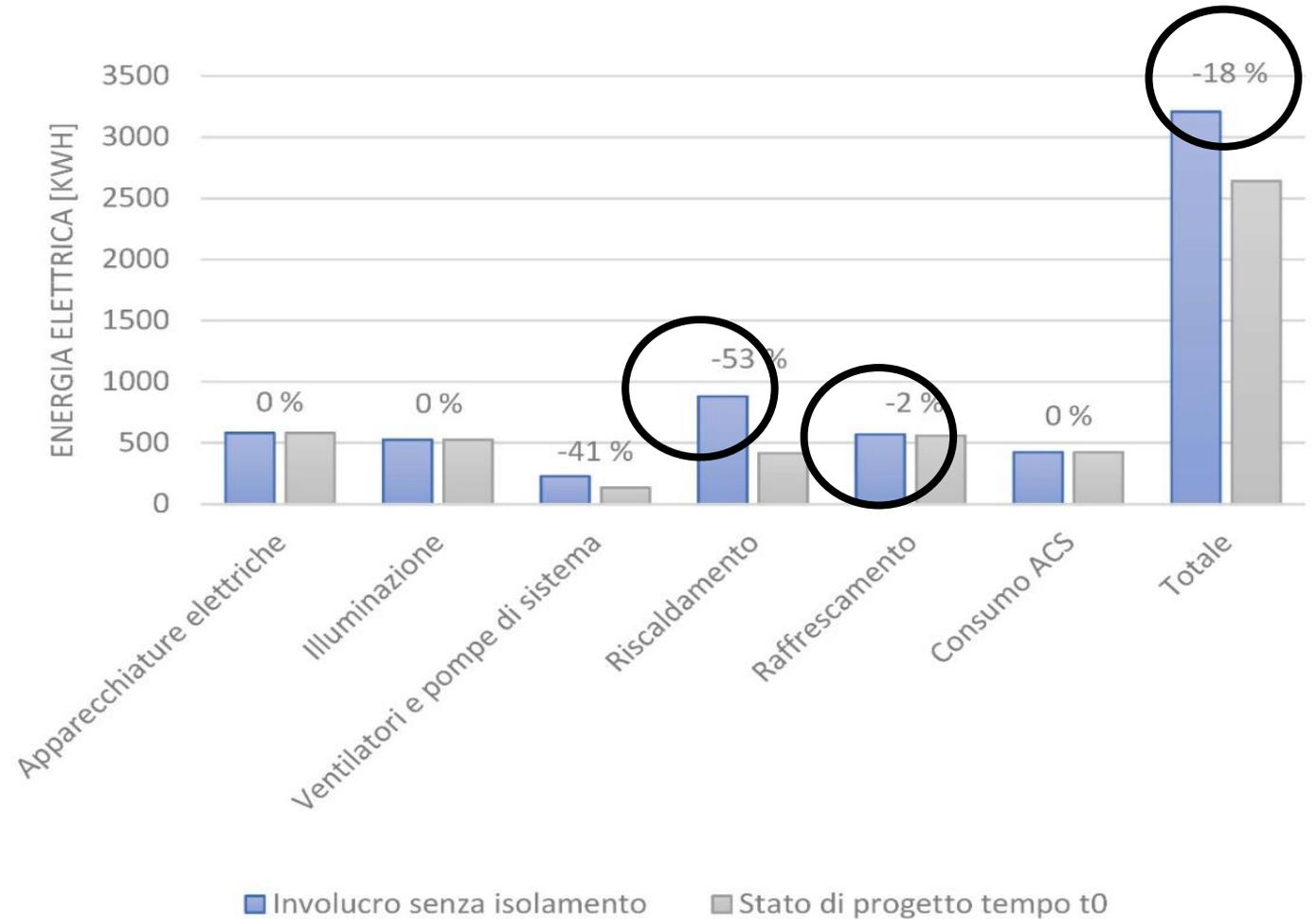
1. MODELLAZIONE ED ANALISI MEDIANTE SIMULAZIONE ENERGETICA DINAMICA
2. VALIDAZIONE DEL MODELLO
3. INTRODUZIONE IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE AD ALTA EFFICIENZA
- 4. INTRODUZIONE SISTEMA ETICS**
5. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO CON E SENZA SISTEMA ETICS
6. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO ANTE E POST INVECCHIAMENTO SISTEMA ETICS

Consumi elettrici dell'edificio nei tre scenari

	Involucro senza isolamento		Stato di progetto ANTE invecchiamento		Stato di progetto POST invecchiamento	
	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²
Apparecchiature elettriche	580,7	7,0	580,7	7,0	580,7	7,0
Illuminazione	526,02	6,3	526,02	6,3	526,02	6,3
Ventilatori e pompe di sistema	227,0	2,7	133,82	1,6	134,16	1,6
Riscaldamento	879,8	10,6	416,64	5,0	423,66	5,1
Raffrescamento	570,4	6,9	560	6,7	559,85	6,7
Consumo ACS	423,9	5,1	423,9	5,1	423,89	5,1
Totale	3207,8	38,6	2641,1	31,8	2648,3	31,9

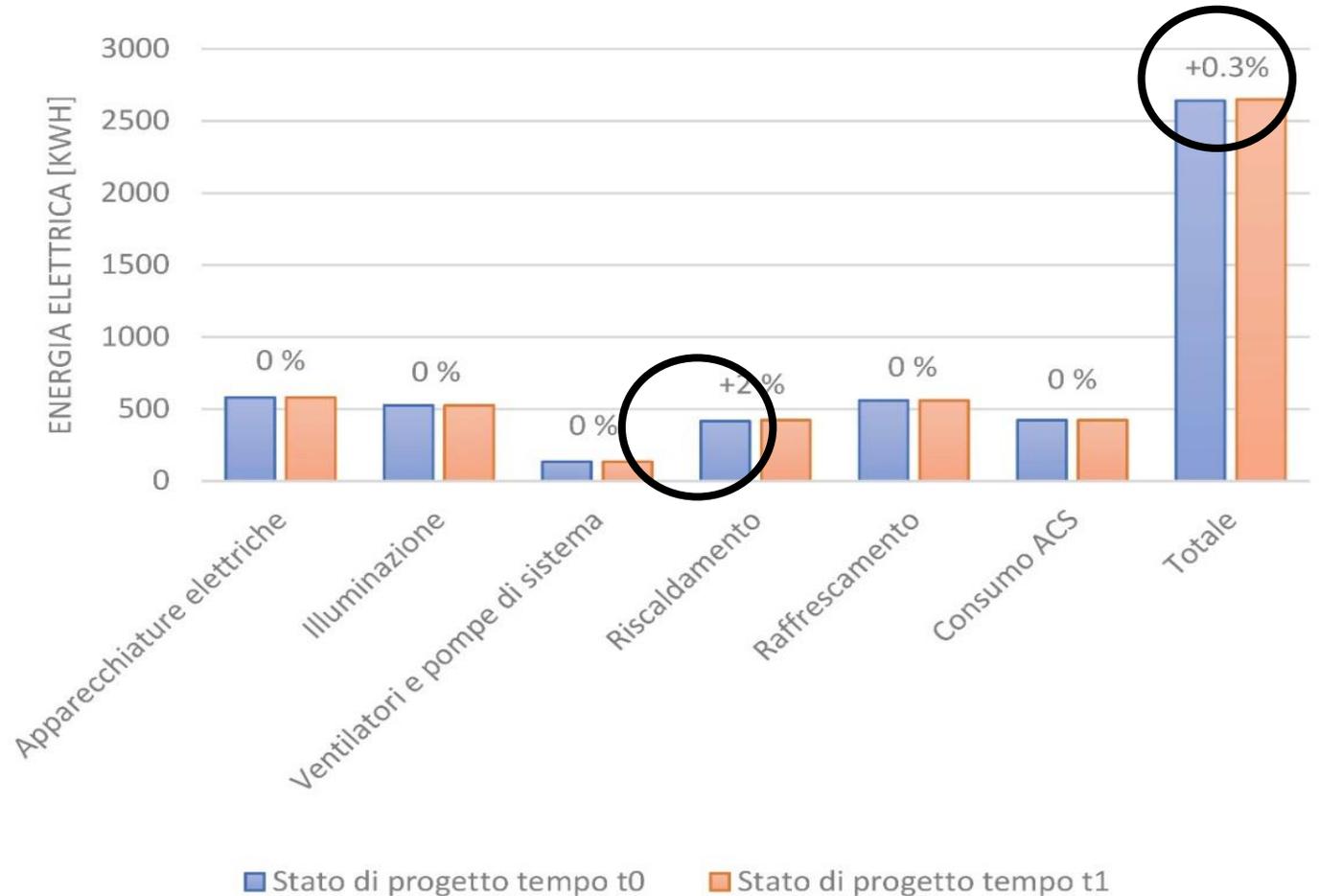
CASO STUDIO

1. MODELLAZIONE ED ANALISI MEDIANTE SIMULAZIONE ENERGETICA DINAMICA
2. VALIDAZIONE DEL MODELLO
3. INTRODUZIONE IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE AD ALTA EFFICIENZA
4. INTRODUZIONE SISTEMA ETICS
5. **CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO CON E SENZA SISTEMA ETICS**
6. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO ANTE E POST INVECCHIAMENTO SISTEMA ETICS



CASO STUDIO

1. MODELLAZIONE ED ANALISI MEDIANTE SIMULAZIONE ENERGETICA DINAMICA
2. VALIDAZIONE DEL MODELLO
3. INTRODUZIONE IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE AD ALTA EFFICIENZA
4. INTRODUZIONE SISTEMA ETICS
5. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO CON E SENZA SISTEMA ETICS
6. CONFRONTO ENERGETICO EDIFICIO ANTE E POST INVECCHIAMENTO SISTEMA ETICS



CASO STUDIO: BILANCIO ENERGETICO NZEB

Le FER solo state introdotte (mediante impianto FV) per rispettare il bilancio energetico di un NZEB:



Fabbisogno energetico – Produzione energetica da FER = 0

	Potenza installata	Fabbisogno di energia elettrica	Produzione da fotovoltaico	Surplus di energia	Deficit di energia
	kW	kWh	kWh	kWh	kWh
Bilancio energetico annuale	2,2	2642,1	2993,0	350,9	0,0

Consumo edificio ANTE invecchiamento 2'642 kWh
Consumo edificio POST invecchiamento 2'648 kWh

<

Produzione da rinnovabile 2'993 kWh

CONCLUSIONI (1 di 3)

- Isolando le pareti perimetrali con sistema ETICS in Pu (6 cm), nel caso in esame si ha una riduzione dei consumi energetici per riscaldamento pari al 53%.
- Tutti i campioni ETICS non hanno subito grosse variazioni durante l'invecchiamento. Questi risultati suggeriscono che gli ETICS, durante la vita utile, subiscono un decadimento prestazionale della resistenza termica quasi nullo, garantendo costanti nel tempo le prestazioni energetiche del cappotto termico.
- Le prove in laboratorio hanno evidenziato che il Pu a causa di processi di invecchiamento peggiora la sua conducibilità termica solo del 4 % in circa 8/10 anni.

CONCLUSIONI (2 di 3)

- La scarsa influenza dell'invecchiamento sulle caratteristiche termiche del poliuretano consente di ottenere dopo 8/10 anni un incremento minimo dei consumi energetici per il riscaldamento, pari al 2%, e un incremento del tutto trascurabile sui consumi energetici totali.
- Nell'edificio progettato per essere un Net Zero Energy Building, il bilancio energetico annuale continua ad essere soddisfatto anche dopo l'invecchiamento (POST).
- Grazie ad un ottimo valore di conduttività termica del Pu, il valore di trasmittanza limite U prescritto dalla normativa italiana per l'edificio esaminato (situato in zona climatica C), viene raggiunto con soli 6 cm di spessore dell'isolante. Invece lo spessore associato ad altri materiali isolanti con conduttività termica pari a 0,03/0,04 W/mK risulterebbe maggiore (8 cm o 10 cm) per l'ottenimento delle medesime performance.

CONCLUSIONI (3 di 3)

Grazie agli interventi di efficientamento energetico agevolabili dal Superbonus 110% il raggiungimento di un target NZEB duraturo nel tempo sembra sempre più facile da ottenere!



**NET ZERO
ENERGY
BUILDINGS**

CONTATTI

Ing. Federico Minelli

Email: federico.minelli@unina.it

Tel: +39 3458205536



Questa ricerca è stata premiata dell'associazione ANPE nell'ambito della 5^a conferenza sul Poliuretano

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

Università degli Studi di Napoli Federico II



DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA
INDUSTRIALE

Grazie per l'attenzione

DETTAGLI CICLI DI INVECCHIAMENTO

Per il ciclo **caldo-pioggia** i campioni ETICS sono stati sottoposti a 80 cicli che comprendevano le seguenti fasi:

- riscaldare a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (per 1 ora) e mantenere a $(70 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ e dal 10 al 30% di umidità relativa UR per 2 ore (totale di 3 ore);
- spruzzare per 1 ora “pioggia” a temperatura di $(+ 15 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ e quantità d’acqua $1\text{ l/m}^2\text{ min}$;
- lasciare riposare per 2 ore, fase di drenaggio.

La durata complessiva di questi passaggi richiede 6 ore, poi ripetuta per un numero di 80 cicli.

Successivamente lo stesso banco di prova è stato esposto a 7 cicli **caldo/freddo** di 24 ore (figura 8) che comprendono le seguenti fasi:

- esposizione a $(70 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ (aumento per 1 ora) e massimo 30% RH per 7 ore (totale di 8 ore),
- esposizione a $(-10 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ (caduta per 2 ore) per 14 ore (totale di 16 ore).

In questo caso il numero di cicli e i valori di temperatura e umidità relativa scelti per la prova sono ben più severi, se confrontati con quelli riportati dall’EAD. La durata complessiva del singolo ciclo su un generico campione è di 24 ore, poi moltiplicato per il numero di cicli previsti (7).

DETTAGLI CICLI DI INVECCHIAMENTO

La successiva prova riguarda il comportamento al gelo-disgelo.

I 15 cicli riprodotti comprendono:

- esposizione all'acqua per 8 ore alla temperatura iniziale di $(23 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ mediante immersione dei campioni, resa rivolta verso il basso, in un bagno d'acqua, con il metodo descritto in 2.2.5.1 (test di capillarità);
- congelamento a $(- 20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ (caduta per 5 ore sulla superficie del campione e per 2 ore nell'aria condizionata) per rispettivamente 11 e 14 ore (totale di 16 ore);
- shock termico, attraverso una stufa che consente il passaggio di temperature del campione da $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Si riporta in Figura 9 la tipologia di ciclo riprodotto a titolo illustrativo.

La durata complessiva di questi passaggi richiede 24 ore, poi moltiplicata per il numero di cicli (15).