

PRESTAZIONI IN USO E CONSUMI ENERGETICI

3.1

Gli edifici convenzionali sono macchine energivore caratterizzate spesso da sprechi: non solo le soluzioni tecniche al momento della costruzione non erano caratterizzate da obiettivi di risparmio energetico, ma anche il degrado nel tempo degli edifici a causa dell'assenza di manutenzione ha incrementato la scarsa efficienza dei sistemi di involucro e degli impianti nel garantire una buona climatizzazione interna.

In inverno la temperatura interna agli edifici è superiore a quella esterna per cui si determina un **flusso di calore** che tende a migrare dall'interno verso l'esterno attraverso l'involucro dell'edificio, ossia attraverso le chiusure verticali (pareti perimetrali verticali), le chiusure orizzontali superiori (coperture) e le chiusure orizzontali inferiori (solai contro terra).

Questo flusso di calore determina delle **dispersioni** di calore per compensare le quali è necessario fornire calore attraverso impianti di riscaldamento, allo scopo di garantire il comfort e benessere termoisometrico negli spazi abitati. La quantità di calore che deve essere fornito all'ambiente interno per mantenere la temperatura di progetto tale da garantire il benessere (in genere 20°C) è definita **fabbisogno di calore** o fabbisogno termico (UNI EN 832).

Per soddisfare il fabbisogno di calore occorre un sistema di riscaldamento che fornisca energia termica: il **fabbisogno energetico** è la quantità di energia che deve essere fornita dal sistema di riscaldamento per soddisfare il fabbisogno di calore e dipende dunque dal rendimento energetico degli impianti.

Il **rendimento energetico di un edificio** (Direttiva 2002/91/CE) è la quantità di energia effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i bisogni di riscaldamento, riscaldamento dell'acqua, raffrescamento, ventilazione e illuminazione. Il rendimento energetico degli edifici deve

indicatori delle prestazioni energetiche di edifici

(fonte: ITC)

prestazione	indicatore	metodo di calcolo
isolamento termico chiusure opache e trasparenti	trasmittanza termica W/m ² K	UNI EN ISO 6946
consumi energetici termici invernali	kWh/m ² anno	UNI EN 832 o modellazione
protezione termica estiva	massa frontale sfalsamento termico	UNI 10375 o prEN ISO 13792

dunque essere calcolato tenendo conto della coibentazione, del tipo di riscaldamento e condizionamento, dell'impiego delle fonti rinnovabili di energia.

Per calcolare il flusso di calore si ipotizza una situazione costante, in corrispondenza del massimo fabbisogno prevedibile, ossia per il valore minimo di temperatura esterna, desunta dalla **temperatura esterna minima di progetto** definita dalla normativa in relazione alle diverse località. Le **temperature interne minime di progetto** da considerare dipendono dalla destinazione d'uso dell'edificio e sono definite dal DPR 412/93.

Le **dispersioni di calore** che devono essere considerate sono relative a:

- trasmissione attraverso l'involucro verso l'esterno
- trasmissione attraverso le chiusure verso ambienti non riscaldati
- ponti termici
- ventilazione dei locali.

La **procedura per il calcolo** del fabbisogno termico per il riscaldamento degli edifici è riportata nella norma UNI 7357/74.

Nel calcolo vengono trascurati gli apporti di calore dovuti all'irraggiamento solare e ai carichi interni (illuminazione, presenza di persone, macchinari, ecc.). Questi contributi vengono invece presi in considerazione nel calcolo del FEN, per la valutazione del fabbisogno energetico annuo dell'edificio (norma UNI 10344), che è uno degli indicatori di prestazione energetica indicato dalla legge 10/91.

La legge 10/91 ha fissato tre criteri per determinare le prestazioni energetiche e i consumi di un edificio:

- il Cd (W/m³K), ossia la potenza dispersa per trasmissione;
- il FEN (kJ/m³Kg), ossia il fabbisogno di energia primaria consumata dall'edificio

flusso di calore attraverso chiusura verticale opaca

flusso di calore (Q)
unità di misura: watt (W)

$$Q = U \cdot A \cdot (T_i - T_e)$$

U è la trasmittanza dell'elemento di chiusura (W/m^2K)

A è l'area dell'elemento di chiusura (m^2)

T_i è la temperatura interna di progetto, normalmente $20^\circ C$

T_e è la temperatura esterna minima di progetto, in relazione alla località

Calcolo della potenza termica unitaria dissipata da una chiusura verticale supponendo di considerare $A = 1 m^2$

ESEMPIO

$$Q = U (T_i - T_e)$$

U è la trasmittanza termica della chiusura verticale
(supponiamo di prendere una chiusura verticale di $0,45 W/m^2K$)

T_i è la temperatura interna di progetto, che per edifici residenziali viene indicata di $20^\circ C$ (stabilita dal DPR 412/93)

T_e è la temperatura esterna di progetto, che dipende dalla località
(supponiamo di essere a Milano: la temperatura esterna di progetto è $-5^\circ C$)

$$Q = U (T_i - T_e) = 0,45 \cdot 25 = 11,27 W/m^2$$

Questo calcolo risulta interessante, poiché mette in relazione il valore della trasmittanza termica con la località climatica. Supponendo che un flusso termico di circa $10 W/m^2$ sia un valore più che accettabile e che $0,45 W/m^2K$ sia un valore minimo adeguato di trasmittanza termica a Milano per garantire l'isolamento termico dell'edificio, tale valore si modifica in relazione alla localizzazione dell'edificio.

A **Roma** la temperatura esterna di progetto è $0^\circ C$, quindi la differenza di temperatura tra interno ed esterno ($T_i - T_e$) è di $20^\circ C$.

Allora è sufficiente $U = 0,5 W/m^2K$ per $Q = 10 W/m^2K$

A **Palermo** la temperatura esterna di progetto è di $5^\circ C$, quindi la differenza di temperatura tra interno ed esterno ($T_i - T_e$) è di $15^\circ C$.

Allora $U = 0,66 W/m^2K$ per $Q = 10 W/m^2K$

A **Belluno** la temperatura esterna di progetto è di $-10^\circ C$, quindi la differenza di temperatura tra interno ed esterno ($T_i - T_e$) è di $30^\circ C$.

Allora $U = 0,33 W/m^2K$ per $Q = 10 W/m^2K$

Questo evidenzia la necessità di definire valori diversi di trasmittanza termica in relazione alle differenti zone climatiche.

flusso di calore attraverso solaio contro terra

la procedura di calcolo dipende dallo scopo

- se l'obiettivo è il calcolo della potenza dispersa e quindi il calcolo di Cd, viene adottata la procedura della norma UNI 7357
- se l'obiettivo è il calcolo dell'energia dispersa su base stagionale e quindi il calcolo del FEN, viene adottata la procedura della norma UNI 10346

MODALITÀ CALCOLO Cd muro controterra

Calcolo delle dispersioni massime (Cd) di un muro controterra secondo la norma UNI 7357

flusso di calore (Q)
unità di misura: watt (W)

$$Q = U_f \cdot A \cdot (T_i - T_e)$$

U_f è la trasmittanza fittizia che tiene in considerazione le dispersioni termiche che avvengono attraverso la parete contro terra e attraverso il terreno (W/m²K)

A è l'area del solaio contro terra (m²)

T_i è la temperatura interna di progetto, normalmente 20°C

T_e è la temperatura esterna minima di progetto, in relazione alla località

la trasmittanza fittizia (U_f)
unità di misura: W/m²K

$$U_f = 1 / (1/U + h/\lambda)$$

U è la trasmittanza unitaria del muro

h è la profondità in metri della parete interrata

λ è la conduttività termica del terreno umido pari a circa 2,5 kcal/hmK (2,90 W/mK)

MODALITÀ CALCOLO Cd solaio controterra

Calcolo delle dispersioni massime (Cd) di un solaio controterra secondo la norma UNI 7357

$$Q = U_f \cdot A \cdot (T_i - T_e)$$

A è l'area del solaio

T_i è la temperatura interna di progetto

T_e è la temperatura dell'acqua delle falde superficiali (10-15°C)

$$U_f = 1 / (1/U + 1/C)$$

U è la trasmittanza unitaria del solaio

C è la conduttanza termica del terreno (1-2 kcal/hm²K = 2,90 W/mK)

- η_g , ossia il rendimento globale medio stagionale (efficienza complessiva del sistema edificio-impianto).

Prima della legge 10/91 l'involucro edilizio e l'impianto di riscaldamento venivano considerati come indipendenti e consequenziali nel processo progettuale: prima venivano definite le caratteristiche dell'involucro edilizio e poi si procedeva al dimensionamento dell'impianto di riscaldamento. La legge 10/91 integra invece il rapporto tra edificio e impianti, ponendo in relazione la potenza dell'impianto con le dispersioni termiche e gli apporti gratuiti.

La prima e più efficace strategia di risparmio energetico è la limitazione delle dispersioni attraverso un efficace isolamento termico delle chiusure. Questa è anche la prima misura indicata dalla legge 10/91 quando introduce il **coefficiente volumico di dispersione termica per trasmissione**, noto come **Cd** (W/m^3K), che indica la potenza massima dispersa per trasmissione attraverso le

Rapporto S/V (Superficie disperdente/Volume)								
Gradi giorno	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
600	0.49	0.59	0.68	0.78	0.87	0.97	1.06	1.16
700	0.48	0.57	0.67	0.76	0.85	0.95	1.04	1.13
800	0.47	0.56	0.65	0.74	0.83	0.92	1.02	1.11
900	0.46	0.55	0.64	0.73	0.81	0.90	0.99	1.08
1000	0.45	0.54	0.62	0.71	0.80	0.88	0.97	1.05
1100	0.44	0.53	0.61	0.69	0.78	0.86	0.94	1.03
1200	0.44	0.52	0.60	0.68	0.76	0.84	0.92	1.00
1300	0.43	0.51	0.58	0.66	0.74	0.82	0.90	0.98
1400	0.42	0.50	0.57	0.65	0.72	0.80	0.87	0.95
1500	0.41	0.48	0.56	0.63	0.70	0.78	0.85	0.93
1600	0.40	0.47	0.54	0.61	0.69	0.76	0.83	0.90
1700	0.39	0.46	0.53	0.60	0.67	0.74	0.81	0.88
1800	0.37	0.44	0.51	0.58	0.65	0.72	0.78	0.85
1900	0.36	0.43	0.50	0.56	0.63	0.70	0.76	0.83
2000	0.35	0.42	0.48	0.55	0.61	0.67	0.74	0.80
2100	0.34	0.40	0.47	0.53	0.59	0.65	0.72	0.78
2200	0.34	0.40	0.46	0.52	0.59	0.65	0.71	0.77
2300	0.33	0.39	0.46	0.52	0.58	0.64	0.71	0.77
2400	0.33	0.39	0.45	0.51	0.58	0.64	0.70	0.76
2500	0.32	0.38	0.45	0.51	0.57	0.63	0.70	0.76
2600	0.32	0.38	0.44	0.50	0.57	0.63	0.69	0.75
2700	0.31	0.37	0.44	0.50	0.56	0.62	0.68	0.75
2800	0.31	0.37	0.43	0.49	0.56	0.62	0.68	0.74
2900	0.30	0.36	0.43	0.49	0.55	0.61	0.67	0.74
3000	0.30	0.36	0.42	0.48	0.55	0.61	0.67	0.73

fig. a. valori del Cd di legge (fonte: Chiesa, Dall'O', 1996)

chiusure opache e trasparenti dell'edificio, in condizioni stazionarie e in corrispondenza del maggiore salto termico di progetto (temperatura minima stagionale esterna). Il Cd di legge si determina in funzione dei gradi giorno della località e del rapporto S/V (superficie disperdente/volume lordo riscaldato). Nel caso di riscaldamento autonomo, il Cd deve essere riferito al singolo alloggio.

Il Cd di progetto, che deve essere inferiore al Cd di legge, si calcola come:

$$\mathbf{Cd\ prog = Q_{tot} / V \cdot (T_i - T_e)}$$

Q_{tot} è la somma delle dispersioni termiche attraverso l'involucro

V volume lordo dell'edificio

Un altro indicatore utilizzato è il **FEN (fabbisogno energetico normalizzato)**. Il FEN rappresenta l'energia primaria necessaria a garantire il benessere termico nell'edificio nell'arco dell'intera stagione di riscaldamento. Il FEN non rappresenta i consumi reali, in quanto si riferisce a condizioni convenzionali di clima, di comportamento degli utenti, di condizioni di esercizio, di prestazioni dei componenti. Si tratta dunque di un bilancio energetico semplificato dove gli apporti gratuiti vengono sottratti alle dispersioni termiche.

Per descrivere il consumo energetico di un edificio nel suo complesso è stato scelto come indicatore il kWh/m²anno. Questo indicatore ha il vantaggio di descrivere in modo adeguato e semplice le prestazioni energetiche di un edificio e consente di riportare in maniera diretta i consumi con i costi del consumo energetico. Inoltre è un indicatore che risulta comprensibile agli utenti che possono leggere in bolletta i propri consumi. Per **consumi termici** si intendono i consumi complessivi di combustibile (gas metano, gasolio, ecc.) necessari per il riscaldamento degli edifici.

il bilancio energetico

Il calcolo dell'energia primaria necessaria per mantenere le condizioni di comfort all'interno dell'edificio si basa sulla valutazione del bilancio energetico, che prende in considerazione:

- energia dispersa per trasmissione con l'ambiente esterno
- energia dispersa per trasmissione con il terreno
- energia dispersa per ventilazione
- energia immessa (apporti gratuiti) dovuta a sorgenti interne (luci, persone, apparecchiature)
- energia immessa (apporti gratuiti) per radiazione solare attraverso le superfici opache
- energia immessa (apporti gratuiti) per radiazione solare attraverso le superfici vetrate

VALUTAZIONE ENERGETICA E AMBIENTALE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DI UN EDIFICIO

3.2

Tutte le fonti energetiche sono produttrici di inquinamento (anche quelle apparentemente 'pulite' negli usi finali come l'energia elettrica), anche se ogni tipo di fonte energetica è diversamente inquinante. Questo giustifica gli interventi volti al risparmio energetico attribuendo un sicuro vantaggio in termini anche ambientali. Ma questo non è sempre vero: esiste un limite per ciascuna strategia di efficienza energetica oltre il quale risulta vantaggioso spostare l'attenzione verso altri fattori.

Dal momento che uno degli obiettivi fondamentali del risparmio energetico è la riduzione degli impatti ambientali (soprattutto in termini di produzione di CO₂), diventa di estremo interesse cercare di capire qual è il rapporto tra aumento di impatti ambientali in fase di produzione (per l'aumento del materiale impiegato per incrementare le prestazioni in fase d'uso, soprattutto nel caso dell'isolamento termico) e diminuzione degli impatti in fase d'uso (grazie al risparmio energetico garantito dall'iperisolamento). Occorre sottoporre a verifica gli interventi di risparmio energetico per constatarne il grado di efficacia (e dunque di necessità), ma anche i limiti.

Se appare quasi scontato dire che nel passaggio da edifici debolmente isolati a edifici isolati il risparmio energetico consente di sopperire ai maggiori impatti prodotti in fase di produzione dell'isolante, più complessa è la valutazione se si prende a riferimento l'incremento di risparmio energetico che passa da edifici ben isolati (*low energy building*) a edifici iperisolati (*passivhaus*).

Gli obiettivi di risparmio energetico stanno infatti introducendo in Italia modelli di costruzione e soluzioni tecniche appartenenti al nord Europa, dove la cultura del progetto già da diversi anni è orientata all'efficienza energetica e dove è diffusa una coscienza etica ambientale. Ma l'importazione acritica di modelli tecnico-costruttivi, come le *passivhaus* e gli edifici a doppio involucro tra-

sparente, nati in condizioni climatiche, produttive e culturali differenti, suscita alcune perplessità.

Nello stesso tempo l'attuale parco edilizio italiano dimostra tutta la sua carenza in termini di comportamento energetico proprio per i ridotti livelli di isolamento termico che caratterizzano le soluzioni tecniche di involucro correnti.

In particolare risulta importante, se l'obiettivo del risparmio energetico è in ultima istanza un obiettivo di sostenibilità ambientale, sottoporre la costruzione e l'uso dell'edificio a un'analisi del ciclo di vita, in modo da verificare gli impatti ambientali complessivi generati dall'intero processo edilizio. I due elementi a maggiore impatto sull'ambiente sono infatti da un lato l'energia impiegata per la climatizzazione degli edifici e dall'altro i materiali impiegati nella costruzione dell'edificio. Per questo viene condotta in questo paragrafo una valutazione ambientale LCA (*Life Cycle Assessment*) applicata alla scala del prodotto edilizio e alla scala dell'edificio nel suo complesso.

La valutazione alla scala del prodotto ha avuto come oggetto il materiale isolante (lana di roccia) e la valutazione alla scala dell'edificio ha avuto come oggetto il consumo energetico per il riscaldamento invernale (che per adesso è la fase di climatizzazione dell'edificio a maggiore impatto e rispetto alla quale l'isolamento termico può costituire la soluzione più semplice ed economica).

Assunte tre tipologie di edifici come riferimento, sono state messe a confronto diverse stratificazioni di involucro (da iperisolata a debolmente isolata) con la potenza dissipata e i relativi consumi energetici dovuti alla climatizzazione, evidenziando da un lato i vantaggi ambientali ottenuti grazie al risparmio energetico conseguito per le migliori prestazioni dell'involucro in termini di isolamento termico e dall'altro l'incremento degli impatti ambientali generati in fase di produzione dell'isolante dovuti alla maggior quantità di materiale utilizzata per aumentare le prestazioni dell'involucro.

Nell'analisi sono state individuate tre tipologie di edificio, per evidenziare il ruolo del fattore di forma (superficie disperdente/volume) nei confronti della potenza termica dissipata dalle chiusure.

Lo studio si concentra sull'edilizia residenziale, sia per la sua maggiore diffusione e dunque rappresentatività nel diffuso, sia per la maggiore stabilità nelle condizioni d'uso rispetto a edifici terziari in cui diventa difficile stabilire le condizioni 'tipiche' (soprattutto di apporti interni e ore d'uso).

Le tre tipologie sono:

- edificio bifamiliare,
- edificio plurifamiliare in linea,
- edificio plurifamiliare alto.

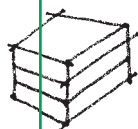
È stato preso in considerazione anche l'edificio bifamiliare (nonostante la sua superficie utile interna sia inferiore ai 1.000 m² e dunque non sia interessato dalla entrata in vigore della Direttiva sull'efficienza energetica degli edifici) per dimostrare come si tratti della tipologia in realtà più disperdente dal punto di vista energetico e in considerazione del fatto che costituisce la tipologia più diffusa.

Per ciascuna tipologia edilizia sono stati ipotizzati sei pacchetti tecnici di chiusura verticale e sei pacchetti tecnici di chiusura orizzontale, prendendone in considera-

tipologie edilizie oggetto dello studio

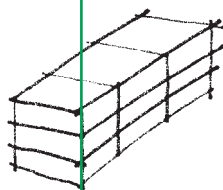
tipologia 1 - edificio bifamiliare

superficie coperta: 144 m² (12x12 m)
altezza: 10 m (tre piani)
superficie utile: 432 m²
volume complessivo: 1.440 m³
area chiusure verticali: 480 m²
area complessiva involucro: 768 m²
superfici trasparenti (apribili): 54 m²
rapporto S/V: 0,53



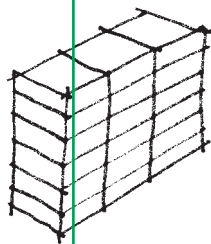
tipologia 2 - edificio plurifamiliare in linea

superficie coperta: 360 m² (12x30 m)
altezza: 10 m (tre piani)
superficie utile: 1.080 m²
volume complessivo: 3.600 m³
area chiusure verticali: 840 m²
area complessiva involucro: 1.560 m²
superfici trasparenti (apribili): 135 m²
rapporto S/V: 0,43



tipologia 3 - edificio plurifamiliare alto

superficie coperta: 360 m² (12x30 m)
altezza: 20 m (sei piani)
superficie utile: 2.160 m²
volume complessivo: 7.200 m³
area chiusure verticali: 1.680 m²
area complessiva involucro: 2.400 m²
superfici trasparenti (apribili): 270 m²
rapporto S/V: 0,33



tipologie e trasmittanze termiche

tipologia 1
12 x 12 x 10 M2 = 432 superfici trasparenti = 1/8 * 432 = 54 m2
480-54

	W/m2K		A U
	U ch vert	A ch vert	
non isolato	1,00	426	426,0
tradizionale	0,60	426	255,6
energ effic	0,50	426	213,0
energ effic	0,40	426	170,4
low energy	0,30	426	127,8
iperisolato	0,20	426	85,2
passivhaus	0,15	426	63,9

	W/m2K		A U
	U ch oriz sup	A ch oriz sup	
non isolato	1,20	144	172,8
tradizionale	0,80	144	115,2
energ effic	0,45	144	64,8
energ effic	0,35	144	50,4
low energy	0,25	144	36,0
iperisolato	0,15	144	21,6
passivhaus	0,10	144	14,4

	W/m2K		A U
	U ch oriz inf	A ch oriz inf	
non isolato	1,40	144	201,6
tradizionale	1,00	144	144,0
energ effic	0,55	144	79,2
energ effic	0,45	144	64,8
low energy	0,35	144	50,4
iperisolato	0,25	144	36,0
passivhaus	0,20	144	28,8

somma A U	
	800,4
	514,8
	357,0
	285,6
	214,2
	142,8
	107,1

tipologia 2
12 x 30 x 10 M2 = 1080 superfici trasparenti = 1/8 * 1080 = 135 m2
840-135

	W/m2K		A U
	U ch vert	A ch vert	
non isolato	1,00	705	705,0
tradizionale	0,60	705	423,0
energ effic	0,50	705	352,5
energ effic	0,40	705	282,0
low energy	0,30	705	211,5
iperisolato	0,20	705	141,0
passivhaus	0,15	705	105,8

	W/m2K		A U
	U ch oriz sup	A ch oriz sup	
non isolato	1,20	360	432,0
tradizionale	0,80	360	288,0
energ effic	0,45	360	162,0
energ effic	0,35	360	126,0
low energy	0,25	360	90,0
iperisolato	0,15	360	54,0
passivhaus	0,10	360	36,0

	W/m2K		A U
	U ch oriz inf	A ch oriz inf	
non isolato	1,40	360	504,0
tradizionale	1,00	360	360,0
energ effic	0,55	360	198,0
energ effic	0,45	360	162,0
low energy	0,35	360	126,0
iperisolato	0,25	360	90,0
passivhaus	0,20	360	72,0

somma A U	
	1641,0
	1071,0
	712,5
	570,0
	427,5
	285,0
	213,8

tipologia 3
12 x 30 x 20 M2 = 2160 superfici trasparenti = 1/8 * 2160 = 270 m2
1680-270

	W/m2K		A U
	U ch vert	A ch vert	
non isolato	1,00	1410	1410,0
tradizionale	0,60	1410	846,0
energ effic	0,50	1410	705,0
energ effic	0,40	1410	564,0
low energy	0,30	1410	423,0
iperisolato	0,20	1410	282,0
passivhaus	0,15	1410	211,5

	W/m2K		A U
	U ch oriz sup	A ch oriz sup	
non isolato	1,20	360	432,0
tradizionale	0,80	360	288,0
energ effic	0,45	360	162,0
energ effic	0,35	360	126,0
low energy	0,25	360	90,0
iperisolato	0,15	360	54,0
passivhaus	0,10	360	36,0

	W/m2K		A U
	U ch oriz inf	A ch oriz inf	
non isolato	1,40	360	504,0
tradizionale	1,00	360	360,0
energ effic	0,55	360	198,0
energ effic	0,45	360	162,0
low energy	0,35	360	126,0
iperisolato	0,25	360	90,0
passivhaus	0,20	360	72,0

somma A U	
	2346,0
	1494,0
	1065,0
	852,0
	639,0
	426,0
	319,5

zione le trasmittanze termiche:

- edificio non isolato:	$U_{ch\ vert} = 1,00\ W/m^2K$	$U_{ch\ oriz} = 1,20\ W/m^2K$
- edificio tradizionale:	$U_{ch\ vert} = 0,60\ W/m^2K$	$U_{ch\ oriz} = 0,80\ W/m^2K$
- edificio energ. efficiente:	$U_{ch\ vert} = 0,50\ W/m^2K$	$U_{ch\ oriz} = 0,45\ W/m^2K$
- edificio energ. efficiente:	$U_{ch\ vert} = 0,40\ W/m^2K$	$U_{ch\ oriz} = 0,35\ W/m^2K$
- edificio low energy:	$U_{ch\ vert} = 0,30\ W/m^2K$	$U_{ch\ oriz} = 0,25\ W/m^2K$
- edificio iperisolato:	$U_{ch\ vert} = 0,20\ W/m^2K$	$U_{ch\ oriz} = 0,15\ W/m^2K$
- passivhaus:	$U_{ch\ vert} = 0,15\ W/m^2K$	$U_{ch\ oriz} = 0,10\ W/m^2K$

È stata ipotizzata una soluzione tecnica "base" non isolata che potrebbe corrispondere a un blocco in laterizio da 25 cm intonacato con trasmittanza termica 1,0 W/m²K per le chiusure verticali e un solaio in laterocemento di 25 cm con massetto di 10 cm con trasmittanza termica 1,20 W/m²K per le chiusure orizzontali. Le altre soluzioni tecniche sono state ipotizzate come incrementi prestazionali di questa soluzione base tramite l'integrazione con strato isolante in lana di roccia.

Sono stati confrontati gli impatti ambientali dovuti all'isolamento (e dunque alla produzione, trasporto e dismissione del materiale isolante) e gli impatti ambientali dovuti ai consumi energetici per il riscaldamento.

Gli oggetti analizzati nella valutazione ambientale sono stati l'involucro (chiusure verticali e orizzontali) e l'energia necessaria per riscaldare il volume. Sono stati dunque trascurati nell'inventario degli impatti ambientali tutti gli altri componenti dell'edificio, che rimangono uguali nelle due ipotesi.

Per quanto riguarda la valutazione dell'energia necessaria per riscaldare, non sono stati calcolati i consumi energetici complessivi dell'edificio (che avrebbero dovuto

calcolo spessore isolante

calcolo spessore isolante

$\lambda=0,039$

chiusure verticali

	U	$\Delta R=R_{in}-R_{fin}$	$s = \Delta R \cdot \lambda$	
non isolato	1,00	$R_{in} = 1$		m
tradizionale	0,60	0,667	0,026	m
energ. efficc.	0,50	1,000	0,039	m
energ. efficc.	0,40	1,500	0,059	m
low energy	0,30	2,333	0,091	m
iperisolato	0,20	4,000	0,156	m
passivhaus	0,15	5,667	0,221	m

spessore	
	0 m
	0,03 m
	0,04 m
	0,06 m
	0,09 m
	0,16 m
	0,22 m

chiusure orizzontali superiori (copertura)

	U	$\Delta R=R_{in}-R_{fin}$	$s = \Delta R \cdot \lambda$	
non isolato	1,20	$R_{in} = 0,83$		m
tradizionale	0,80	0,420	0,016	m
energ. efficc.	0,45	1,392	0,054	m
energ. efficc.	0,35	2,027	0,079	m
low energy	0,25	3,170	0,124	m
iperisolato	0,15	5,837	0,228	m
passivhaus	0,10	9,170	0,358	m

spessore	
	0 m
	0,02 m
	0,05 m
	0,08 m
	0,12 m
	0,22 m
	0,36 m

chiusure orizzontali inferiori (solaio contro terra)

	U	$\Delta R=R_{in}-R_{fin}$	$s = \Delta R \cdot \lambda$	
non isolato	1,40	$R_{in} = 0,83$		m
tradizionale	1,00	0,170	0,007	m
energ. efficc.	0,55	0,988	0,039	m
energ. efficc.	0,45	1,392	0,054	m
low energy	0,35	2,027	0,079	m
iperisolato	0,25	3,170	0,124	m
passivhaus	0,20	4,170	0,163	m

spessore	
	0 m
	0,01 m
	0,04 m
	0,06 m
	0,08 m
	0,12 m
	0,16 m

energia termica annuale dissipata per trasmissione

Per calcolare la potenza termica mensile dissipata per dispersioni termiche attraverso le chiusure opache è stata applicata la formula

$$Q = 86400 \cdot gg \cdot \Delta t \cdot \Sigma A U \quad [J]$$

86400 sono i secondi del giorno

gg sono il numero di giorni del mese di riscaldamento

Δt è la differenza tra temperatura interna di progetto (20°C) e la temperatura esterna media del mese di riferimento (t_m)

$\Sigma A U$ è la sommatoria tra tutte le trasmittanze termiche per le relative superfici di involucro

tenendo conto che **$gg \cdot \Delta t = GG$** (gradi-giorno), è possibile determinare la potenza termica annuale dissipata per dispersioni termiche attraverso le chiusure opache applicando la formula

$$Q = 24 \cdot GG \cdot \Sigma A U \quad [Wh/a]$$

24 sono le ore del giorno

GG sono i gradi giorno

$\Sigma A U$ è la sommatoria tra tutte le trasmittanze termiche per le relative superfici di involucro

Per semplificare il calcolo per le chiusure orizzontali contro terra è stato utilizzato un fattore 0,5 ipotizzando che la differenza di temperatura tra interno e terreno sia la metà della differenza di temperatura tra interno ed esterno.

I parametri di confronto in questa valutazione sono:

- le diverse tipologie edilizie, per valutare l'incidenza del fattore di forma (edificio bifamiliare, edificio plurifamiliare in linea, edificio plurifamiliare alto)
- le diverse trasmittanze termiche dell'involucro (non isolato, tradizionale, energeticamente efficiente, low energy, iperisolato)
- le diverse collocazioni geografiche, con scelte appartenenti alle diverse zone climatiche (Milano, Roma, Napoli, Palermo).

tenere conto delle dispersioni dovute alla ventilazione e degli apporti gratuiti dovuti alle finestre e ai carichi interni), ma sono state calcolate solo le potenze termiche disperse tramite le superfici di involucro opaco: è stato infatti ipotizzato di 'tenere ferma' una soluzione base e di variare solo la trasmittanza delle chiusure opache.

140 Di conseguenza il valore considerato significativo è la variazione della potenza ter-

mica dissipata dalla chiusure opache, che determina un incremento o una riduzione dei consumi energetici degli edifici relazionata allo spessore del materiale isolante. La potenza termica non indica i consumi energetici, ma i carichi termici; per trasformarla in consumi energetici occorre definire un impianto e dunque calcolarne il rendimento: il rendimento di un impianto è comunque inferiore a 1 e quindi i consumi energetici sono sempre superiori ai carichi termici (per produrre 1 MJ di energia termica dissipata occorre un consumo energetico superiore a 1 MJ, poiché occorre tenere conto del rendimento dell'impianto). Nelle valutazioni è stato ipotizzato un rendimento degli impianti di 0,75 in modo da trasformare i carichi termici (potenza termica dissipata) in consumi energetici e in modo da stimare gli impatti ambientali del consumo di combustibile (gasolio o metano) per garantire il fabbisogno energetico per il riscaldamento invernale degli edifici studiati. L'ecoefficienza dell'impianto o l'uso di impianti che producano energia da fonti rinnovabili esula da questo studio, che si pone l'obiettivo di determinare semplicemente il ruolo dell'iperisolamento. Nella valutazione degli impatti ambientali sono stati ipotizzati due scenari: il consumo di gasolio e il consumo di gas metano per il riscaldamento invernale. Non sono stati considerati i consumi relativi all'illuminazione e alla produzione di acqua calda sanitaria.

È stata ipotizzata una geometria delle diverse tipologie di edificio, con superfici trasparenti apribili dell'edificio pari a 1/8 della superficie utile (ossia strettamente legate al rispetto del rapporto di aeroilluminazione previsto per legge). Le prestazioni e le dimensioni delle superfici trasparenti sono state considerate costanti in tutte le valutazioni fatte e dunque trascurate nel calcolo dei carichi termici.

La valutazione della potenza termica dissipata attraverso gli involucri è stata determinata indicando come temperatura interna di riferimento 20°C d'inverno. Sono stati definiti i carichi termici invernali in MJ/a e in kWh/m²a.

Per quanto riguarda la valutazione degli impatti ambientali del materiale isolante in lana di roccia si è fatto ricorso a dati primari, ma relativi a uno studio svolto in Danimarca sullo stabilimento della Rockwool danese. La contestualizzazione degli impatti, e dunque l'identificazione degli effettivi impatti dello stabilimento italiano di Iglesias, permetterebbero di raffinare i dati e dunque i risultati della valutazione. In mancanza di dati specifici nazionali appare comunque opportuno avvalersi di dati primari che fanno riferimento a uno stesso procedimento produttivo anche se relativi a una localizzazione produttiva differente. Va tenuto in considerazione che la finalità dello studio non è il confronto con altri prodotti, ma il confronto tra fase di produzione e fase d'uso: i risultati esprimono ordini di grandezza talmente macroscopici che non incide la differenza che si potrebbe ottenere con la contestua-

lizzazione degli impatti sul territorio italiano.

Per poter rendere confrontabili i risultati delle valutazioni tra tipologie edilizie differenti, i dati relativi agli impatti ambientali sono stati ricondotti a una unità funzionale a livello di edificio, ossia al metro quadrato di superficie utile interna. Infatti i valori degli impatti ambientali relativi alla tipologia 3 (edificio plurifamiliare alto) in termini assoluti sono ovviamente maggiori rispetto alla tipologia 1 (edificio bifamiliare) perchè si tratta di un edificio più grande e quindi richiede maggiori consumi per il riscaldamento e maggiore materiale isolante impiegato per l'estensione dell'involucro. Per poter porre a paragone il comportamento delle diverse tipologie occorre ricondursi al metro quadrato di superficie utile: emerge a questo punto il vantaggio del fattore di forma, per cui la tipologia 3 risulta in realtà la meno impattante.

Complessivamente questa valutazione ha messo in evidenza che l'incidenza della produzione dell'isolante è veramente trascurabile rispetto agli impatti ambientali generati dal consumo di riscaldamento.

Dunque isolare consente di ridurre gli impatti ambientali complessivi e costituisce una strategia di contenimento dei consumi energetici e degli impatti ambientali tra le più efficaci.

bilancio energetico

Per introdurre la valutazione occorre fare una precisazione: i valori ottenuti non sono i consumi energetici complessivi, ma solo l'incidenza della potenza termica dissipata per dispersione tramite le chiusure opache (preso in considerazione come valore isolato). Dal calcolo si ottiene un valore espresso in MJ all'anno, che è stato convertito in kWh/m²a per rendere confrontabili le tipologie edilizie tra di loro.



Questa semplificazione e valutazione parziale del comportamento energetico che tiene conto solo delle dispersioni termiche dell'involucro opaco e trascura gli altri fattori non si discosta comunque molto dal bilancio termico complessivo, quindi, con una certa approssimazione, si può quasi paragonare al bilancio termico e dunque tradurre in consumo energetico (tenendo conto del rendimento degli impianti, ipotizzato di 0,75).

Infatti analizzando per esempio il bilancio energetico complessivo della tipologia 1, si può notare innanzitutto che le dispersioni termiche per trasmissione (sia tramite le superfici opache che tramite le superfici trasparenti) sono le più significative nella determinazione della potenza termica dissipata e quindi dei consumi energetici complessivi. Si può inoltre approssimare che apporti solari, apporti interni, dispersioni per trasmissione tramite le superfici vetrate e dispersioni per ventilazione quasi si compensano (nell'ipotesi considerata, quindi con le scelte progettuali operate in questo specifico caso). L'incidenza maggiore sui carichi termici invernali per riscaldamento è dovuta alle dispersioni attraverso l'involucro opaco (soprattutto in questa ipotesi che prevede che le superfici vetrate rispettino solamente il rapporto minimo di aeroilluminazione, quindi siano solo 1/8 della superficie interna calpestabile).

tipologia 1 432 m²

Milano

perdite per trasmissione

$24 \cdot GG \cdot \Sigma A \cdot U / 1000 = \text{kWh/a}$

	A m ²	U value W/m ² K	fattore	GG	24/1000	perdite kWh/a
chiusure verticali	480	0,2	1	2404	0,024	5538,82
copertura	144	0,15	1	2404	0,024	1246,23
soalco contro terra	144	0,15	0,5	2404	0,024	623,12

totale **7408,17**

17,15
kWh/m²a

chiusure trasparenti	54	1,7	1	2404	0,024	5296,49
----------------------	----	-----	---	------	-------	---------

12,26
kWh/m²a

	lunghezza m	W/mK		GG	24/1000	perdite kWh/a
ponti termici	136	0,024	1	2404	0,024	188,32

0,6 * U * s
angolo pareti

0,41
kWh/m²a

perdite per ventilazione

$n \cdot V \cdot c \cdot GG \cdot 24 / 1000 = \text{kWh/a}$

n 1/h	V m ³	c Wh/m ³ K	GG	24/1000	perdite kWh/a
0,1	1440	0,35	2404	0,024	2907,878

6,73
kWh/m²a

residenziale
0,5 * 20%
80% recupero calore

apporti gratuiti tramite superfici trasparenti

$f \cdot g \cdot A \cdot R$

	fatt riduz	g	A m ²	rad glob kWh/m ² a	guadagni kWh/a
est	0,45	0,7	13,5	268	1139,67
sud	0,45	0,7	13,5	413	1756,28
ovest	0,45	0,7	13,5	268	1139,67
nord	0,45	0,7	13,5	125	531,56

totale **4567,19**

10,57
kWh/m²a

apporti gratuiti interni

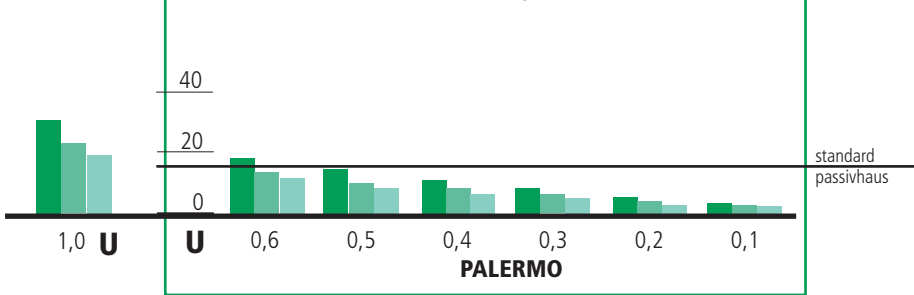
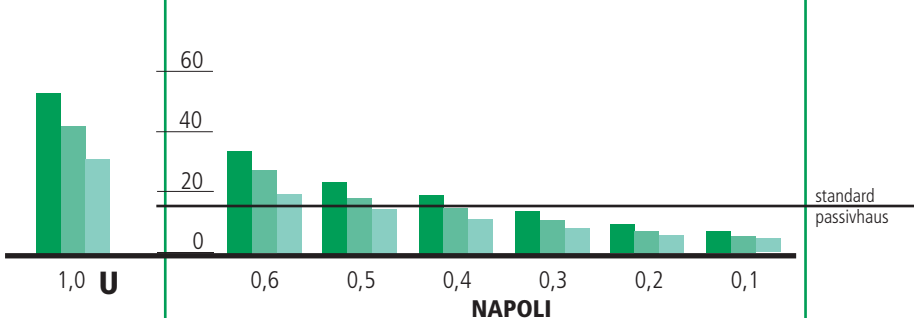
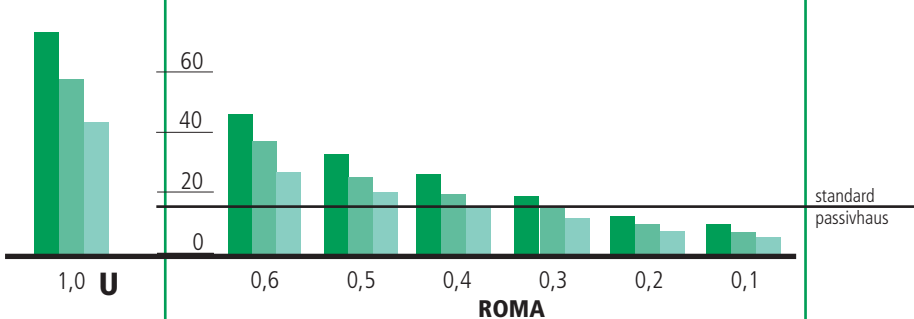
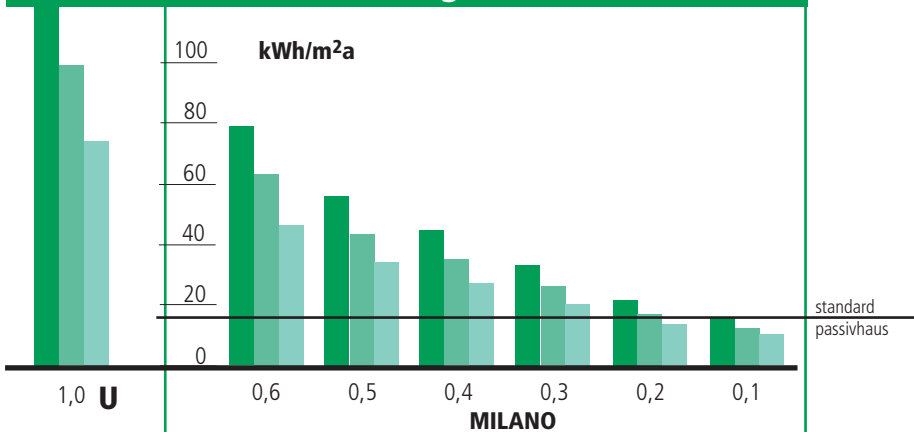
kh/d	giorni	apporti W/m ²	A m ²	guadagni kWh/a
0,024	180	2	432	3732,48

8,64
kWh/m²a

bilancio termico

perdite trasmis 7408,17	perdite trasmis 5296,49	perdite ponti 188,32	perdite ventilaz 2907,88	guadagni vetrate 4567,19	guadagni interni 3732,48
7408,17	8392,69			8299,67	

confronto dei consumi energetici (potenze termiche dissipate)



calcolo quantità materiale isolante impiegato

chiusure verticali

	144	360	360
	tipologia 1	tipologia 2	tipologia 3
non isolato	0	0	0
tradizionale	12,8	21,2	42,3
energ effic	17,0	28,2	56,4
energ effic	25,6	42,3	84,6
low energy	33,3	63,5	126,9
iperisolato	68,2	112,8	225,6
passivhaus	93,7	155,1	310,2

chiusure orizzontali superiori (copertura)

	144	360	360
	tipologia 1	tipologia 2	tipologia 3
non isolato	0	0	0
tradizionale	2,88	7,20	7,20
energ effic	8,64	21,60	21,60
energ effic	11,52	28,80	28,80
low energy	17,28	43,20	43,20
iperisolato	31,68	79,20	79,20
passivhaus	51,84	129,60	129,60

chiusure orizzontali inferiori (solaio contro terra)

	144	360	360
	tipologia 1	tipologia 2	tipologia 3
non isolato	0	0	0
tradizionale	1,44	3,60	3,60
energ effic	5,76	14,40	14,40
energ effic	8,64	21,60	21,60
low energy	11,52	28,80	28,80
iperisolato	17,28	43,20	43,20
passivhaus	23,04	57,60	57,60

calcolo kg di isolante per l'intero involucro

	tipologia 1		
	chius vert	chius oriz sup	chius oriz inf
	$\rho=70 \text{ kg/m}^3$	$\rho=100 \text{ kg/m}^3$	$\rho=100 \text{ kg/m}^3$
non isolato	0	0	0
tradizionale	895	288	144
energ effic	1.193	864	576
energ effic	1.789	1.152	864
low energy	2.684	1.728	1.152
iperisolato	4.771	3.168	1.728
passivhaus	6.560	5.184	2.304

	tipologia 2		
	chius vert	chius oriz sup	chius oriz inf
	$\rho=70 \text{ kg/m}^3$	$\rho=100 \text{ kg/m}^3$	$\rho=100 \text{ kg/m}^3$
non isolato	0	0	0
tradizionale	1.481	720	360
energ effic	1.974	2.160	1.440
energ effic	2.961	2.880	2.160
low energy	4.442	4.320	2.880
iperisolato	7.896	7.920	4.320
passivhaus	10.857	12.960	5.760

	tipologia 3		
	chius vert	chius oriz sup	chius oriz inf
	$\rho=70 \text{ kg/m}^3$	$\rho=100 \text{ kg/m}^3$	$\rho=100 \text{ kg/m}^3$
non isolato	0	0	0
tradizionale	2.961	720	360
energ effic	3.948	2.160	1.440
energ effic	5.922	2.880	2.160
low energy	8.883	4.320	2.880
iperisolato	15.792	7.920	4.320
passivhaus	21.714	12.960	5.760

In particolare il passaggio da casa tradizionale, con trasmittanza termica pari a 0,6 W/m²K (3 cm di isolante) nelle chiusure verticali e 0,8 W/m²K (2 cm di isolante) in copertura, a casa isolata (low energy building) con 0,3 W/m²K (10 cm di isolante) nelle chiusure verticali e 0,25 W/m²K (12 cm di isolante) in copertura permette di dimezzare i consumi energetici annuali. Gli impatti generati sull'ambiente dalla produzione del materiale isolante nel caso del low energy building vengono recuperati nell'arco di soli tre anni.

Più problematico è però il passaggio da casa isolata (low energy building), con trasmittanza termica pari a 0,3 W/m²K (10 cm di isolante) nelle chiusure verticali e 0,25 W/m²K (12 cm di isolante) in copertura, a casa iperisolata con 0,2 W/m²K (16

LCA pannello in lana di roccia - analisi d'inventario

INVENTARIO DEI DATI							
relativi alla produzione della lana di roccia							
CATEGORIE DI DATI	TIPOLOGIA DI DATI	ANNO	ZONA	DATI	PER KG	UNITA DI MISURA	
energia	primari	2003	DNMK	PRIMARIA NON RINNOVABILE (TOTALE)	14,000	MJ	
	primari	2003	DNMK	feedstock non rinnovabile	2,100	MJ	
	primari	2003	DNMK	PRIMARIA RINNOVABILE (TOTALE)	0,900	MJ	
	primari	2003	DNMK	feedstock rinnovabile	0,800	MJ	
	primari	2003	DNMK	ENERGIA ELETTRICA	2,600	MJ	
	primari	2003	DNMK	ENERGIA PRIMARIA TOTALE	17,500	MJ	
consumo materie prime	primari	2003	DNMK	RISORSE NON RINNOVABILI (COMBUSTIBILI TOT)	652,000	g	
	primari	2003	DNMK	carbone	476,000	g	
	primari	2003	DNMK	gas naturale	111,000	g	
	primari	2003	DNMK	olio combustibile	65,000	g	
	primari	2003	DNMK	RISORSE NON RINNOVABILI (MINERALI)	780,000	g	
	primari	2003	DNMK	dolomia	230,000	g	
	primari	2003	DNMK	basalto	550,000	g	
	primari	2003	DNMK	RISORSE RICICLATE	220,000	g	
	primari	2003	DNMK	bauxite	99,000	g	
	primari	2003	DNMK	basalto	57,200	g	
	primari	2003	DNMK	dolomia	33,000	g	
	primari	2003	DNMK	cemento	30,800	g	
	primari	2003	DNMK	resina fenolica	40,000	g	
	primari	2003	DNMK	ammoniacca	4,000	g	
	primari	2003	DNMK	RISORSE RINNOVABILI (TOTALE)	35,000	g	
	primari	2003	DNMK	biomassa (legno)	35,000	g	
	primari	2003	DNMK	CONSUMO DI ACQUA	3.300,000	g	
	-	-	-	CONSUMO DI SUOLO	-	m ²	
	emissioni in aria	primari	2003	DNMK	CO ₂ anidride carbonica	1.200,000	g
		primari	2003	DNMK	CO monossido di carbonio	88,98	g
primari		2003	DNMK	CH ₄ metano	0,88	g	
primari		2003	DNMK	SO _x ossidi di zolfo	5,13	g	
primari		2003	DNMK	NO _x ossidi di azoto	2,09	g	
primari		2003	DNMK	HCl acido cloridrico	0,05	g	
primari		2003	DNMK	HF acido fluoridrico	0,01	g	
primari		2003	DNMK	NH ₃ ammoniacca	2,00	g	
-		-	-	HCFC idrofluoroclorocarburi	-	g	
-		-	-	idrocarburi alogenati	-	g	
-		-	-	PAH idrocarburi policiclici aromatici	-	g	
-		-	-	BOD (biological oxygen demand)	-	g	
primari		2003	DNMK	VOC composti organici volatili	0,59	g	
second		1990	SWITZ	NMVOG (COV non metanogeni)	1,10	g	
primari		2003	DNMK	particolato (PM10)	1,01	g	
-		-	-	Hg mercurio	-	g	
second		1990	SWITZ	C ₆ H ₅ OH fenolo	0,12	g	
second		1990	SWITZ	CH ₂ O formaldeide	0,029	g	
-		-	-	As arsenico	-	g	
-		-	-	Pb piombo	-	g	
primari	2003	DNMK	N ₂ O ossido d'azoto	0,02	g		
primari	2003	DNMK	H ₂ S acido solfidrico	0,02	g		
primari	2003	DNMK	idrocarburi	0,18	g		
-	-	-	O ₂	-	g		
emissioni in acqua	primari	2003	DNMK	elementi solidi sospesi	0,02	g	
	primari	2003	DNMK	BOD	0	g	
	primari	2003	DNMK	COD	0,04	g	
	primari	2003	DNMK	azoto (N)	0,01	g	
rifiuti solidi	primari	2003	DNMK	pericolosi	0,4	g	
	primari	2003	DNMK	non pericolosi	45	g	
	primari	2003	DNMK	RIFIUTI SOLIDI TOTALI	45,4	g	

fonte: primari 2003 DNMK (Schmidt, 2003)
second 1990 SWITZ banca dati I-LCA; banca dati ETH-ESU, 1990

LCA pannello in lana di roccia - impatti ambientali

IMPATTI AMBIENTALI		
relativi alla produzione della lana di roccia		
CATEGORIE DI IMPATTO	PER KG	UNITÀ DI MISURA
surriscaldamento del globo (effetto serra) GWP Global Warming Potential	1.402,64	g di CO2 eq
acidificazione AP Acidification Potential	11,21	g di SO2 eq
formazione di ossidanti fotochimici POCP Photochemical Ozone Creation Potential	2,97	g di C2H4 eq
eutrofizzazione Eutrophication	44,54	g di O2
	0,97	g di PO4 eq
assottigliamento strato ozono ODP Ozone Depletion Potential	-	g di CFC-11 eq
smog	1,10	g
sostanze pericolose	-	g di Hg
	-	g di PAH
tossicità permante TP Permanent Toxicity	-	m³ di aria
	-	m³ di acqua
	-	m³ di suolo
tossicità per l'uomo	1,02	g di 14-DBC eq
salute umana	0,59	g di VOC
	1,01	g di PM10

CONSUMO DI RISORSE			
TIPOLOGIA DI CONSUMO	TIPOLOGIA	PER KG	UNITÀ DI MISURA
consumo di energia	rinnovabili	0,900	MJ
	non rinnovabili	14,000	MJ
	elettricità	2,600	MJ
consumo di materie prime	riciclate	220,00	g
	rinnovabili	35,00	g
	non rinnovabili	1.436,00	g
consumo di acqua		3.300,00	g

PRODUZIONE DI RIFIUTI			
	TIPOLOGIA	PER KG	UNITÀ DI MISURA
rifiuti solidi	pericolosi	0,40	g
	non pericolosi	45,00	g

caratterizzazione degli impatti secondo la procedura (MSR:1999) stabilita dal Swedish Environmental Management Council per la realizzazione delle EPD (Environmental Product Declaration).

cm di isolante) nelle chiusure verticali e $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ (23 cm di isolante) in copertura: in questo caso l'incremento di risparmio energetico è ridotto mentre la quantità di materiale isolante impiegata è quasi il doppio. Gli impatti ambientali generati dalla produzione di materiale isolante nel caso dell'edificio iperisolato vengono recuperati in 8 anni.

Esiste cioè una soglia oltre alla quale la strategia dell'incremento di isolamento termico perde la sua efficacia e occorre dunque attivare altre strategie di risparmio energetico. Il rischio è addirittura quello di determinare un incremento degli impatti ambientali complessivi, poichè l'incremento di risparmio si ottiene con un incremento notevole di materiale isolante impiegato.

Lo studio dimostra che in Italia, a Milano sarebbe opportuno isolare con standard attorno ai $0,2-0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ di trasmittanza termica (a seconda della tipologia edilizia), a Roma con standard attorno ai $0,3-0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$, a Napoli con standard attorno ai $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, a Palermo con standard attorno ai $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Gli incrementi di isolamento oltre queste soglie diventano complessivamente impattanti per l'ambiente poichè si determina un incremento degli impatti in fase di produzione per il maggiore consumo di materiale isolante per diminuire la trasmittanza termica senza un significativo incremento del risparmio energetico.

Per contro spessori di isolamento insufficienti a garantire i livelli di trasmittanza termica indicati determinano edifici disperdenti: l'incremento dei consumi energetici determina un incremento significativo degli impatti ambientali.

Va messo in evidenza inoltre che un incremento di spessore isolante nella fascia 10-20 cm porta a un recupero degli impatti ambientali, dovuti alla produzione di materiale isolante, in un periodo di circa 10 anni, un incremento dello spessore isolante nella fascia 5-10 cm porta a un recupero degli impatti ambientali dovuti alla produzione di materiale isolante nell'arco di 4-5 anni, mentre un incremento dello spessore isolante nella fascia 0-5 cm porta a un recupero degli impatti ambientali dovuti alla produzione di materiale isolante nell'arco dell'anno.

Dunque garantire 6-8 cm di materiale isolante in un edificio appare opera minima e doverosa; spostarsi a un range tra 10-15 cm consente di andare verso standard di risparmio energetico molto alti, salvaguardando gli impatti complessivi, ma iperisolare (20-30 cm), almeno alle nostre latitudini, rischia di generare un incremento degli impatti ambientali (dovuti alla produzione di materiale isolante) senza un significativo beneficio in termini di risparmio energetico.

Del resto il decremento della trasmittanza termica in relazione all'aumento dello spessore isolante dimostra come occorra aumentare notevolmente (raddoppiare) lo spessore isolante per ottenere un miglioramento di $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ (per passare da un low

gasolio e metano - impatti ambientali

impatti di produzione e uso gasolio

	1 kWh	1 MJ	
GWP	23,281	83,812	g di CO2 eq
AP	0,354	1,277	g di SO2 eq
POPC	0,1	0,362	g di C2H4 eq
NP	1,486	5,352	g di O2

impatti di produzione e uso metano

	1 kWh	1 MJ	
GWP	18,972	68,302	g di CO2 eq
AP	0,238	0,858	g di SO2 eq
POPC	0,006	0,024	g di C2H4 eq
NP	1,29	4,644	g di O2

legenda:

- GWP Global Warming Potenzial
effetto serra
- AP Acidification Potential
acidificazione
- POPC Photochemical Ozone Creation Potential
formazione di ossidanti fotochimici
- NP Eutrophication
eutrofizzazione

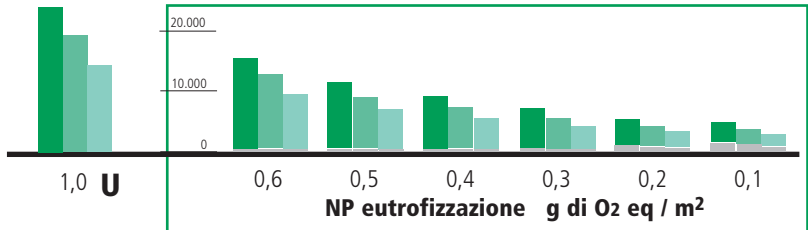
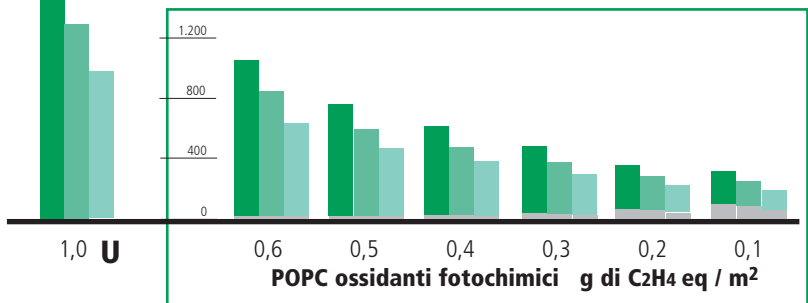
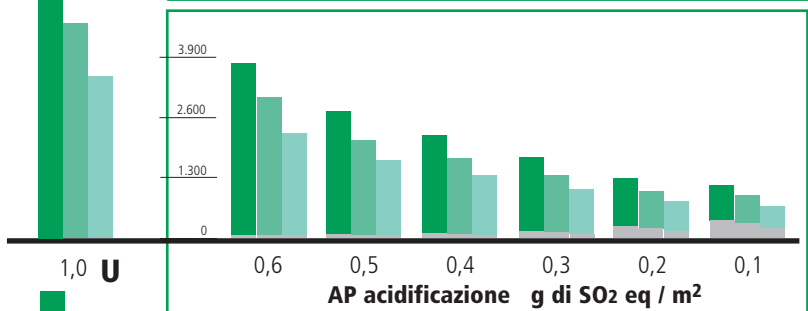
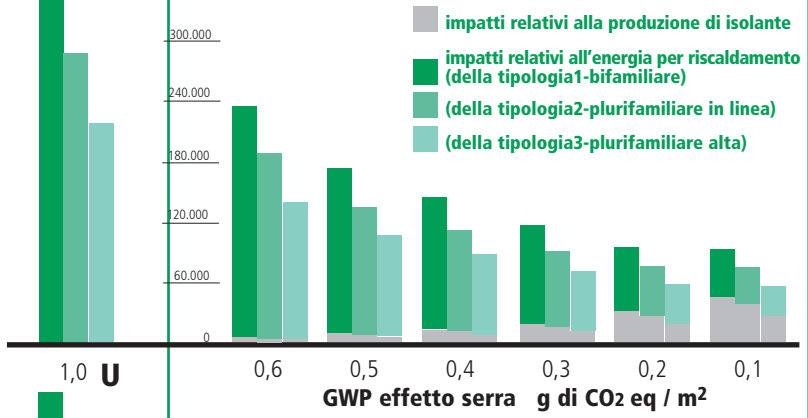
fonte dati d'inventario: banca dati Boustead (2002)

Si è dimostrato che il vantaggio conseguibile con una soluzione tecnica (in questo caso l'isolamento termico) appare progredire all'infinito se si prende a riferimento il solo parametro del risparmio energetico (più isolato, più risparmio, teoricamente all'infinito). Ma se si estende lo sguardo alla valutazione ambientale si individua il limite del vantaggio ottenibile con tale soluzione (oltre 0,2 W/m²K) e soprattutto i confini di una effettiva efficacia (notevole nel passaggio da 1,00 a 0,4 W/m²K e man mano in decremento), in modo da ricercare un incremento di risparmio energetico grazie alla sinergia con altre soluzioni tecniche (per esempio un maggiore potere isolante delle superfici vetrate).

Nello stesso tempo la valutazione ambientale dimostra il notevole disequilibrio tra impatti ambientali in fase di produzione e impatti ambientali in fase d'uso: la fase d'uso risulta essere attualmente la più problematica, soprattutto dal momento che gli edifici convenzionali hanno trasmittanze termiche raramente attorno ai 0,6 W/m²K e spesso superiori. L'incremento dell'uso del materiale isolante appare dunque più che opportuno. Zona limite è però la soglia che passa da 0,2 a 0,1 W/m²K: 149

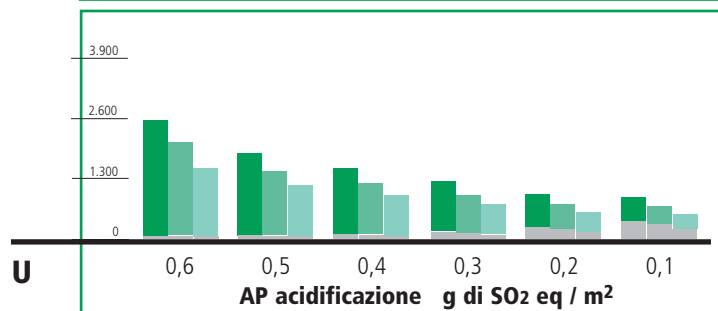
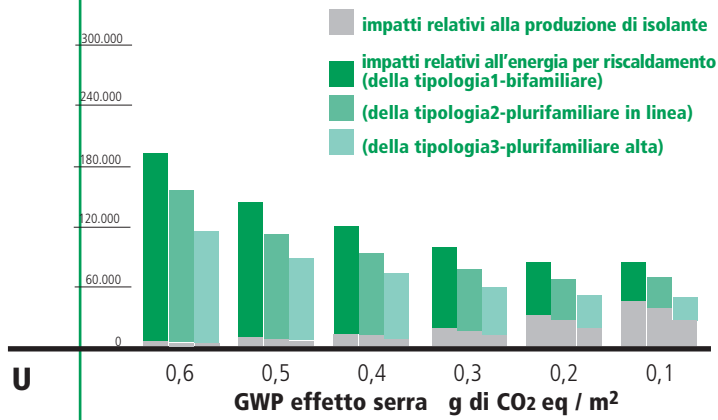
impatti ambientali di 10 anni di vita - Milano

energia utilizzata: gasolio

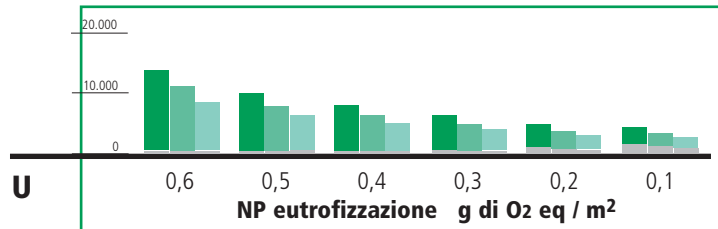
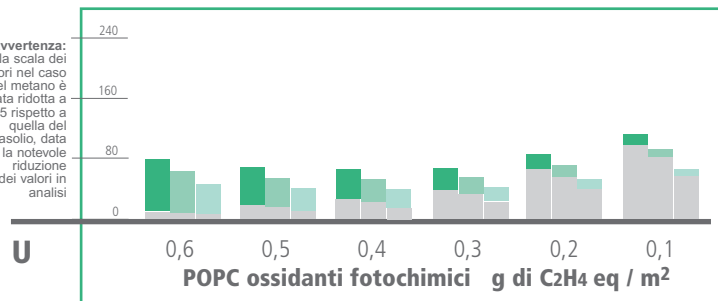


impatti ambientali di 10 anni di vita - Milano

energia utilizzata: metano

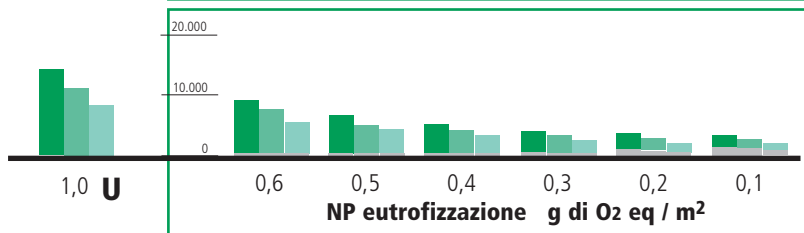
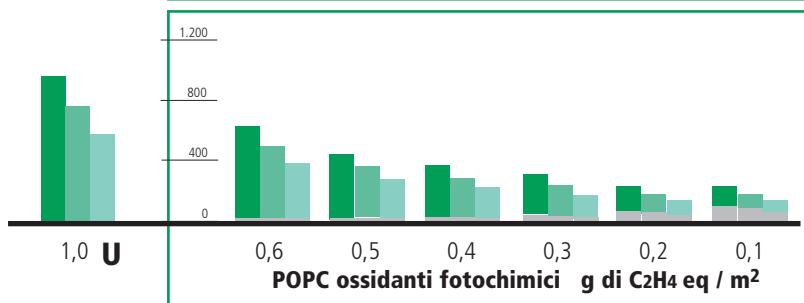
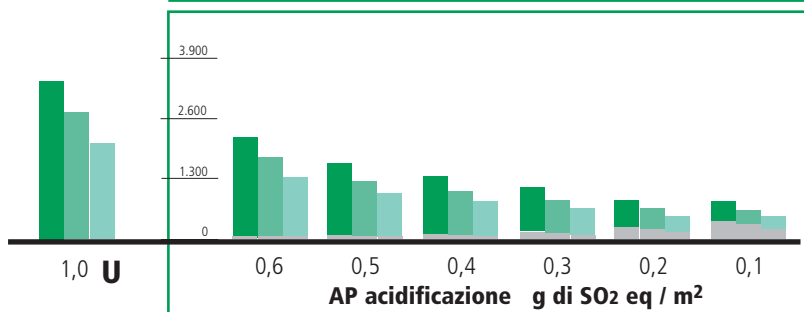
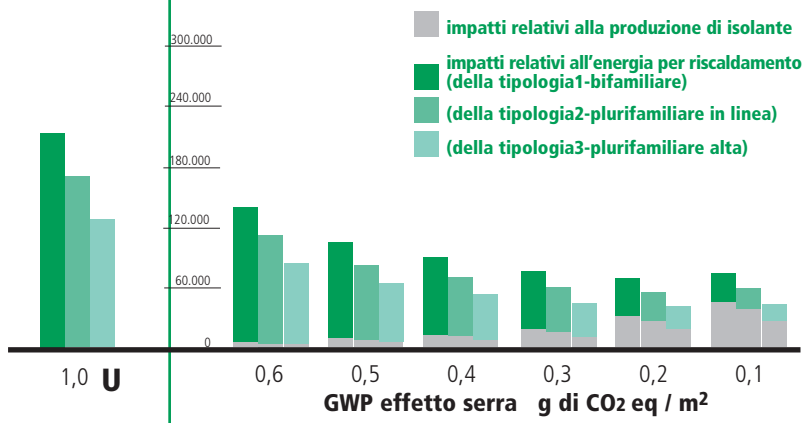


avvertenza:
la scala dei
valori nel caso
del metano è
stata ridotta a
1/5 rispetto a
quella del
gasolio, data
la notevole
riduzione
dei valori in
analisi



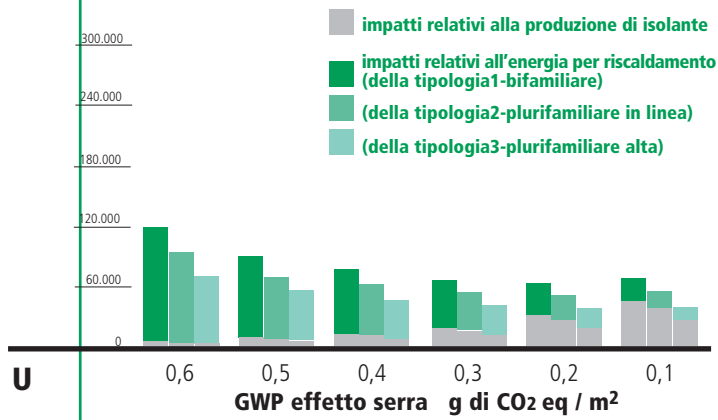
impatti ambientali di 10 anni di vita - Roma

energia utilizzata: gasolio

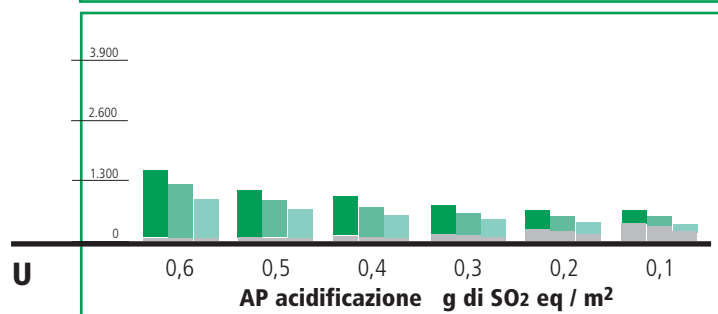


impatti ambientali di 10 anni di vita - Roma

energia utilizzata: metano

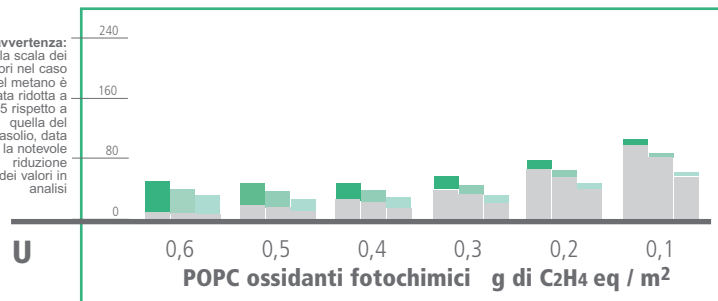


U

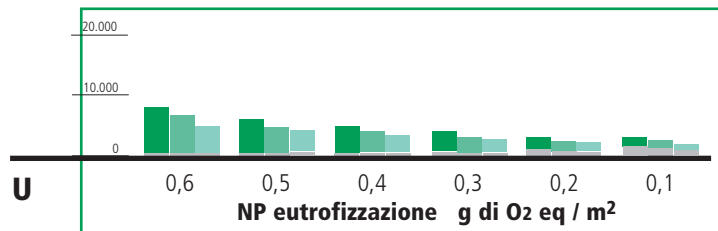


U

avvertenza:
la scala dei
valori nel caso
del metano è
stata ridotta a
1/5 rispetto a
quella del
gasolio, data
la notevole
riduzione
dei valori in
analisi



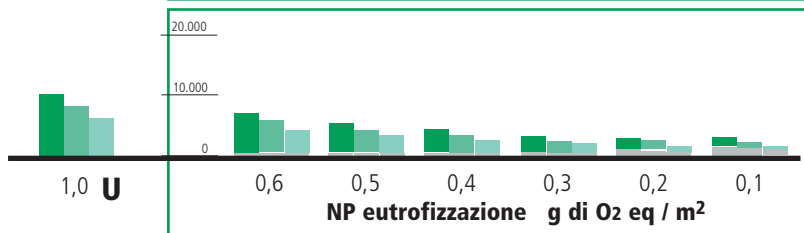
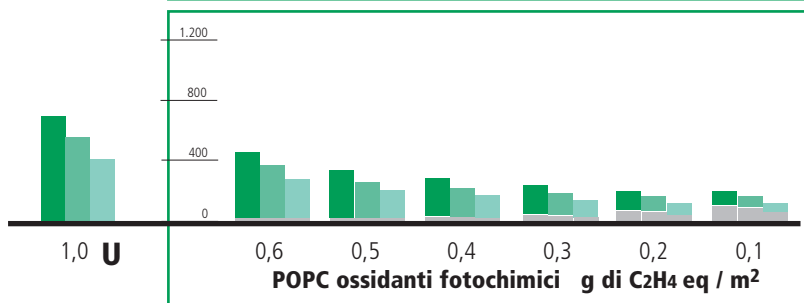
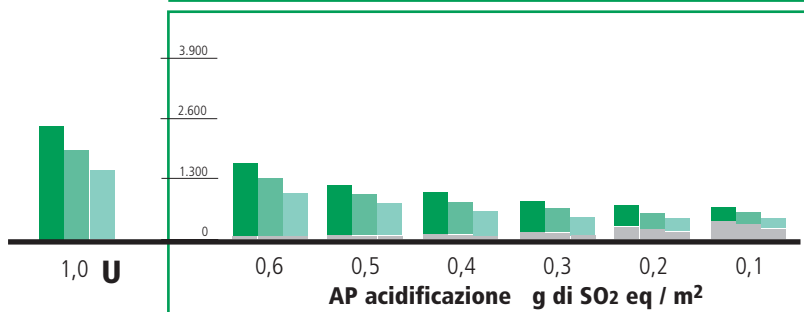
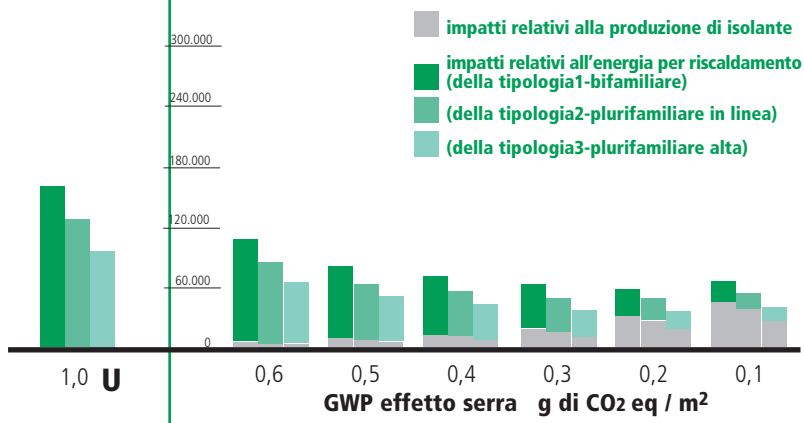
U



U

impatti ambientali di 10 anni di vita - Napoli

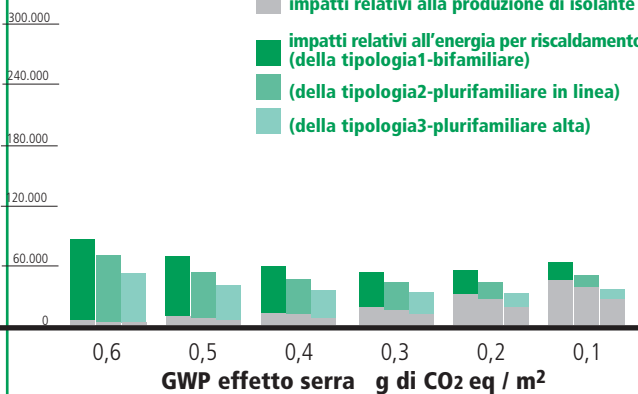
energia utilizzata: gasolio



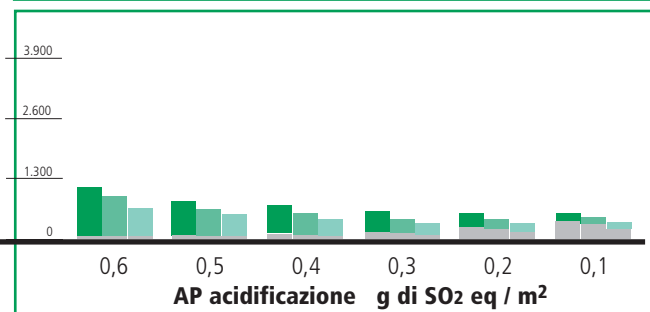
impatti ambientali di 10 anni di vita - Napoli

energia utilizzata: metano

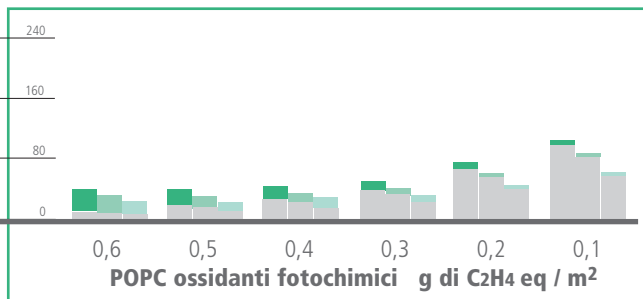
impatti relativi alla produzione di isolante
 impatti relativi all'energia per riscaldamento (della tipologia1-bifamiliare)
 (della tipologia2-plurifamiliare in linea)
 (della tipologia3-plurifamiliare alta)



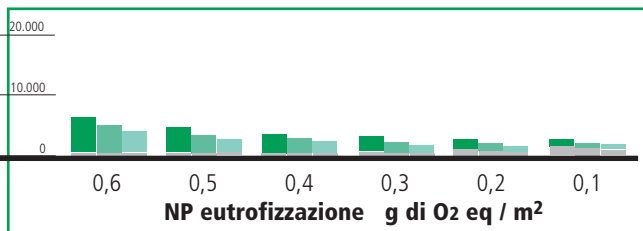
U



U



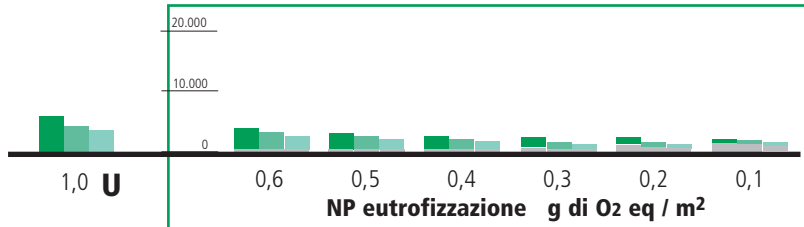
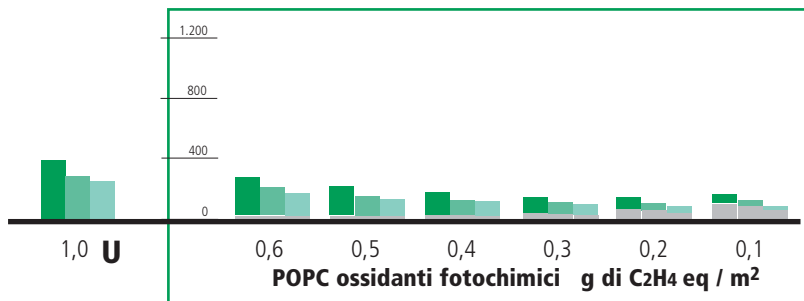
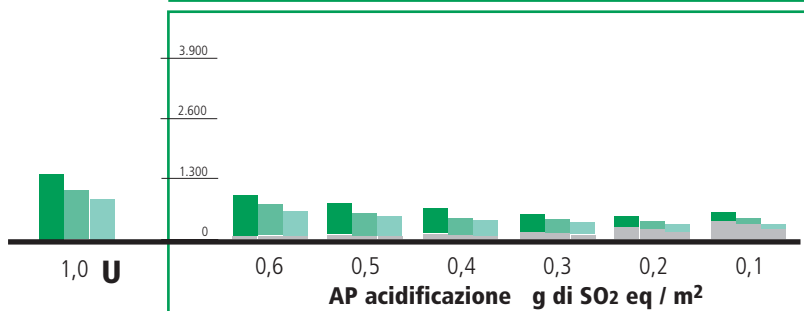
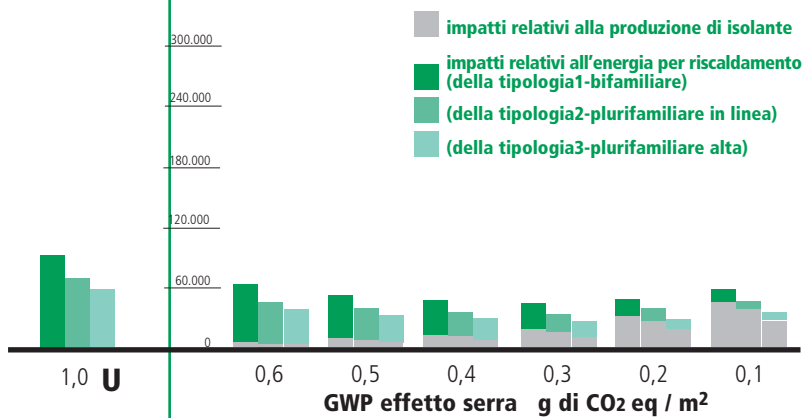
U



U

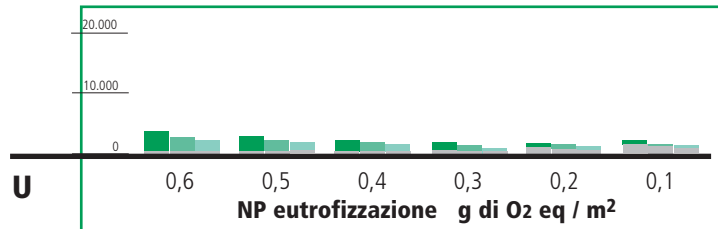
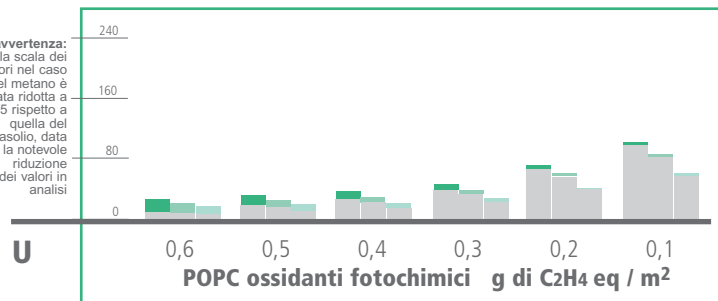
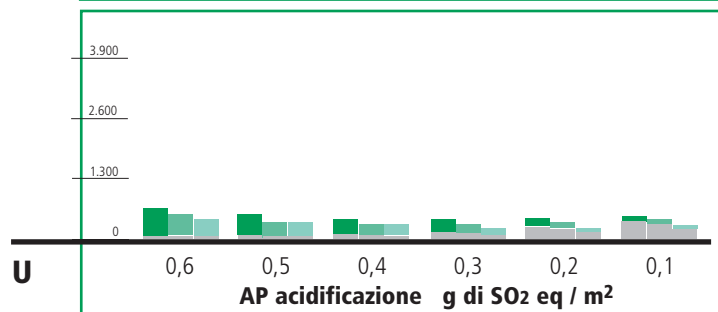
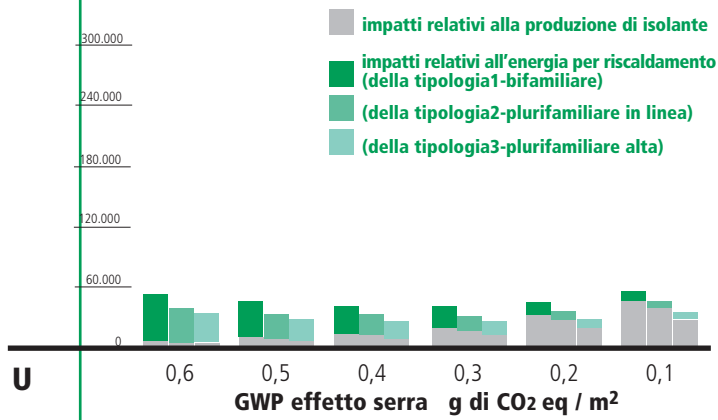
impatti ambientali di 10 anni di vita - Palermo

energia utilizzata: gasolio



impatti ambientali di 10 anni di vita - Palermo

energia utilizzata: metano



qui il risparmio energetico si riduce a tal punto che gli impatti ambientali relativi alla produzione diventano significativi. Tale soglia si modifica in relazione alla zona climatica e si modifica in relazione alla tipologia edilizia considerata. Inoltre risulta fondamentale la scelta del combustibile utilizzato per produrre l'energia termica: la differenza di impatti generati tra gasolio e metano è notevole.

La lettura dei grafici dunque va soppesata rispetto alle variabili espresse e non può essere ricondotta a un risultato preciso, quanto a una tendenza.

Lo studio presentato si rivolge ai progettisti ed è stato concepito come strumento di supporto alle scelte progettuali. Infatti i risultati che ne scaturiscono dovrebbero essere letti come informazione tecnica e ambientale orientativa.

L'obiettivo della valutazione non era la ricerca di un dato 'certo', ma l'individuazione di ordini di grandezza per definire orientamenti progettuali. Infatti il dato certo è difficilmente ottenibile per l'elevato numero di variabili in gioco che rendono comunque 'parziale' e 'manipolato' qualsiasi risultato. Quello che si può ottenere da valutazioni di questo tipo è solo una visione d'insieme e uno scenario complessivo di comportamento energetico e ambientale, in modo da avere informazioni di supporto e orientamento nella progettazione energeticamente e ambientalmente consapevole. Di conseguenza la semplificazione di alcune operazioni valutative è stata scelta per consentire anche a un 'non esperto' di valutazioni energetico-ambientali di poter seguire i passaggi della valutazione e dunque poter capire quali sono i fattori di rilievo e l'incidenza dei vari fattori sul risultato. Il 'contesto' dei dati è fondamentale per leggere correttamente le valutazioni, poichè il risultato di una valutazione è condizionato dalle scelte e condizioni stabilite durante la valutazione.

ANALISI COSTI-BENEFICI DELL'INCREMENTO DI ISOLANTE

3.3

La consapevolezza del potenziale di riduzione degli impatti ambientali insito nella riduzione dei consumi energetici grazie a un incremento dei livelli di isolamento termico degli edifici non necessariamente porta a mutamenti nella pratica costruttiva.

Spesso la normativa fatica a recepire gli orientamenti dettati dalla ricerca a causa di freni politici ed economici. Appare dunque opportuno evidenziare quali possono essere i vantaggi economici di alcune scelte volte al risparmio energetico, in modo che la pressione degli utenti finali sia maggiore. I costi aggiuntivi per la costruzione di edifici a basso consumo energetico si stanno progressivamente abbassando, grazie alla disponibilità di tecniche evolute prodotte ormai a catalogo. Se fino al 1992 si parlava di un incremento dei costi di costruzione del 20%, oggi si parla del 10% (Gallo, 2000).

I costi di costruzione degli edifici energeticamente efficienti vengono considerati troppo elevati, per l'elevato numero di tecnologie e impianti innovativi che dovrebbero essere adottati. Perciò è necessario che nella progettazione vengano affrontati non solo gli aspetti energetici, ma anche quelli di natura economica. Il compito non è solo quello di ottenere un'alta efficienza energetica ed un elevato comfort abitativo, ma anche di poterli realizzare a un prezzo ragionevole e competitivo.

Per questo motivo, i sistemi di certificazione energetica, quali "Minergie" e "Passivhaus", prevedono che il metro quadrato di superficie utile di un edificio ad alta efficienza energetica non debba costare più del 10% di quello di un normale edificio corrispondente alle norme sul risparmio energetico.

Il maggiore costo è normalmente recuperabile tramite i risparmi energetici ottenuti in meno di 10 anni.

Il contenimento dei costi è un obiettivo che ha validità generale, non solo per l'Europa centrale, ma anche per regioni con un clima

più mite come quello mediterraneo. Anzi, in climi miti un'alta efficienza energetica dell'edificio si raggiunge più facilmente e con minori oneri economici. Per esempio, l'isolamento termico delle chiusure opache e delle finestre, che sono gli elementi più incisivi per l'ottenimento del risparmio energetico, possono essere inferiori e quindi meno costosi; gli apporti solari sono più alti e l'acqua calda prodotta da un collettore solare è spesso già sufficiente per fornire il calore anche per il riscaldamento. Nonostante questi potenziali vantaggi, in Italia la realizzazione di edifici ad alta efficienza energetica incontra ancora alcune difficoltà. La principale delle quali deriva dalle normative. Si può capire meglio questo aspetto illustrando un esempio fatto su un edificio residenziale. A Francoforte, dove i gradi giorno sono 3.500, la WSVO tedesca impone un fabbisogno termico massimo annuale inferiore a 72 kWh/m²a, mentre per lo stesso edificio situato a Roma (1.415 gradi giorno), la legge 10/91 consente 140 kWh/m²a (Wienke, 2002). Alla luce di tale esempio dob-

analisi costi-benefici dell'iperisolamento

Riprendendo le tipologie edilizie analizzate nel paragrafo precedente, viene qui affrontata l'analisi economica dei costi-benefici tra incremento dello spessore isolante impiegato e risparmio di energia durante la fase d'uso, per verificare l'incidenza in fase di costruzione del costo integrativo del materiale isolante e il periodo di ritorno economico per assorbire tale incremento di costo.

Il costo dei pannelli varia a seconda della tipologia (e in particolare della densità). Prendendo in considerazione pannelli in lana di roccia (Rockwool, 2004), i costi **per il nord Italia** sono di:

- 2,99 al m² per un pannello di spessore 5 cm e densità 70 kg/m³
- 4,10 al m² per un pannello di spessore 5 cm e densità 100 kg/m³

Il costo si riferisce al prezzo effettuato all'utilizzatore finale (posatore, impresa edile) per il pannello isolante. Si esclude infatti il costo di posa in opera che non cambia al variare dello spessore di isolante.

Per quanto riguarda il risparmio energetico, è stato calcolato il risparmio in kWh/m²a rispetto alla soluzione non isolata (1,0 W/m²K), che era stato calcolato come potenza termica dissipata dalle superfici opache per un rendimento degli impianti di 0,75. Per tradurre il consumo energetico in consumo di combustibile si è ipotizzato un potere calorifico inferiore (PCI) di 9,4 kWh/m³ per il gas metano. Il costo del combustibile è stato ipotizzato di 0,42 € al m³ (Enel, 2004).

Dal confronto della valutazione dell'incremento dei costi dovuto ai diversi livelli di isolamento termico con la valutazione del risparmio di combustibile conseguito grazie al maggiore isolamento è stato possibile desumere il tempo di ritorno economico dell'incremento di costo in fase di costruzione per l'impiego di materiale isolante.

analisi costi-benefici dell'iperisolamento

tipologia 1 - Milano edificio bifamiliare

area chiusure verticali opache: 426 m²

spes isolante 6 cm	trasm (0,40 W/m ² K) energ effic	1.530 €
spes isolante 10 cm	trasm (0,30 W/m ² K) low energy	2.550 €
spes isolante 16 cm	trasm (0,20 W/m ² K) iperisolato	4.070 €
spes isolante 22 cm	trasm (0,15 W/m ² K) passivhaus	13.160 €

area copertura: 144 m²

spes isolante 8 cm	trasm (0,35 W/m ² K) energ effic	940 €
spes isolante 12 cm	trasm (0,25 W/m ² K) low energy	1.420 €
spes isolante 22 cm	trasm (0,15 W/m ² K) iperisolato	2.600 €
spes isolante 36 cm	trasm (0,10 W/m ² K) passivhaus	4.250 €

area solaio contro terra: 144 m²

spes isolante 6 cm	trasm (0,45 W/m ² K) energ effic	700 €
spes isolante 8 cm	trasm (0,35 W/m ² K) low energy	950 €
spes isolante 12 cm	trasm (0,25 W/m ² K) iperisolato	1.420 €
spes isolante 16 cm	trasm (0,20 W/m ² K) passivhaus	1.890 €

I costi complessivi (e ripartiti per metro quadrato di superficie utile - 432 m²) di isolamento termico delle diverse soluzioni di involucro sono:

trasm (0,4 W/m ² K) energ effic	3.170 €	7,30 €/m ²
trasm (0,3 W/m ² K) low energy	4.920 €	11,40 €/m ²
trasm (0,2 W/m ² K) iperisolato	8.090 €	18,70 €/m ²
trasm (0,1 W/m ² K) passivhaus	19.300 €	44,70 €/m ²

Il risparmio di energia (ed economico) ottenuto grazie ai diversi livelli di isolamento termico (ipotizzando la localizzazione a Milano e un consumo di gas metano) è di:

trasm (0,4 W/m ² K) energ effic	79,5 kWh/m ² a	3,46 €/m ² a
trasm (0,3 W/m ² K) low energy	90,9 kWh/m ² a	4,06 €/m ² a
trasm (0,2 W/m ² K) iperisolato	102,4 kWh/m ² a	4,57 €/m ² a
trasm (0,1 W/m ² K) passivhaus	108,1 kWh/m ² a	4,83 €/m ² a

Il tempo di ritorno economico è di:

trasm (0,4 W/m ² K) energ effic	2,1 anno
trasm (0,3 W/m ² K) low energy	2,8 anni
trasm (0,2 W/m ² K) iperisolato	4,1 anni
trasm (0,1 W/m ² K) passivhaus	9,2 anni

tipologia 2 - Milano edificio plurifamiliare in linea

area chiusure verticali opache:	840 m ²	
spes isolante 6 cm	trasm (0,4 W/m ² K) energ effic	3.010 €
spes isolante 10 cm	trasm (0,3 W/m ² K) low energy	5.020 €
spes isolante 16 cm	trasm (0,2 W/m ² K) iperisolato	8.040 €
spes isolante 22 cm	trasm (0,1 W/m ² K) passivhaus	11.050 €

area copertura:	720 m ²	
spes isolante 8 cm	trasm (0,35 W/m ² K) energ effic	4.720 €
spes isolante 12 cm	trasm (0,25 W/m ² K) low energy	7.080 €
spes isolante 22 cm	trasm (0,15 W/m ² K) iperisolato	12.990 €
spes isolante 36 cm	trasm (0,10 W/m ² K) passivhaus	21.250 €

area solaio contro terra:	720 m ²	
spes isolante 6 cm	trasm (0,45 W/m ² K) energ effic	3.540 €
spes isolante 8 cm	trasm (0,35 W/m ² K) low energy	4.720 €
spes isolante 12 cm	trasm (0,25 W/m ² K) iperisolato	7.080 €
spes isolante 16 cm	trasm (0,20 W/m ² K) passivhaus	9.450 €

I costi complessivi (e ripartiti per metro quadrato di superficie utile - 1.080 m²) di isolamento termico delle diverse soluzioni di involucro sono:

trasm (0,4 W/m ² K) energ effic	11.270 €	10,40 €/m ²
trasm (0,3 W/m ² K) low energy	16.820 €	15,60 €/m ²
trasm (0,2 W/m ² K) iperisolato	28.110 €	26,00 €/m ²
trasm (0,1 W/m ² K) passivhaus	41.750 €	38,70 €/m ²

Il risparmio di energia (ed economico) ottenuto grazie ai diversi livelli di isolamento termico (ipotizzando la localizzazione a Milano e un consumo di gas metano) è di:

trasm (0,4 W/m ² K) energ effic	64,1 kWh/m ² a	2,86 €/m ² a
trasm (0,3 W/m ² K) low energy	73,0 kWh/m ² a	3,26 €/m ² a
trasm (0,2 W/m ² K) iperisolato	81,8 kWh/m ² a	3,65 €/m ² a
trasm (0,1 W/m ² K) passivhaus	86,3 kWh/m ² a	3,85 €/m ² a

Il tempo di ritorno economico è di:

trasm (0,4 W/m ² K) energ effic	3,6 anno
trasm (0,3 W/m ² K) low energy	4,8 anni
trasm (0,2 W/m ² K) iperisolato	7,1 anni
trasm (0,1 W/m ² K) passivhaus	10,1 anni

tipologia 3 - Milano edificio plurifamiliare alto

area chiusure verticali opache: 1.680 m²

spes isolante 6 cm	trasm (0,4 W/m ² K) energ effic	6.030 €
spes isolante 10 cm	trasm (0,3 W/m ² K) low energy	10.050 €
spes isolante 16 cm	trasm (0,2 W/m ² K) iperisolato	16.070 €
spes isolante 22 cm	trasm (0,1 W/m ² K) passivhaus	22.100 €

area copertura: 720 m²

spes isolante 8 cm	trasm (0,35 W/m ² K) energ effic	4.720 €
spes isolante 12 cm	trasm (0,25 W/m ² K) low energy	7.080 €
spes isolante 22 cm	trasm (0,15 W/m ² K) iperisolato	12.990 €
spes isolante 36 cm	trasm (0,10 W/m ² K) passivhaus	21.250 €

area solaio contro terra: 720 m²

spes isolante 6 cm	trasm (0,45 W/m ² K) energ effic	3.540 €
spes isolante 8 cm	trasm (0,35 W/m ² K) low energy	4.720 €
spes isolante 12 cm	trasm (0,25 W/m ² K) iperisolato	7.080 €
spes isolante 16 cm	trasm (0,20 W/m ² K) passivhaus	9.450 €

I costi complessivi (e ripartiti per metro quadrato di superficie utile - 2.160 m²) di isolamento termico delle diverse soluzioni di involucro sono:

trasm (0,4 W/m ² K) energ effic	14.290 €	6,60 €/m ²
trasm (0,3 W/m ² K) low energy	21.850 €	10,10 €/m ²
trasm (0,2 W/m ² K) iperisolato	36.140 €	16,70 €/m ²
trasm (0,1 W/m ² K) passivhaus	52.800 €	24,40 €/m ²

Il risparmio di energia (ed economico) ottenuto grazie ai diversi livelli di isolamento termico (ipotizzando la localizzazione a Milano e un consumo di gas metano) è di:

trasm (0,4 W/m ² K) energ effic	47,1 kWh/m ² a	2,10 €/m ² a
trasm (0,3 W/m ² K) low energy	54,1 kWh/m ² a	2,42 €/m ² a
trasm (0,2 W/m ² K) iperisolato	61,0 kWh/m ² a	2,72 €/m ² a
trasm (0,1 W/m ² K) passivhaus	64,5 kWh/m ² a	2,88 €/m ² a

Il tempo di ritorno economico è di:

trasm (0,4 W/m ² K) energ effic	3,1 anno
trasm (0,3 W/m ² K) low energy	4,1 anni
trasm (0,2 W/m ² K) iperisolato	6,1 anni
trasm (0,1 W/m ² K) passivhaus	8,5 anni

biamo chiederci perché un costruttore italiano dovrebbe impegnarsi a ridurre il fabbisogno della metà visto che sarà poi il proprietario a pagare la bolletta energetica.

Un'altra difficoltà è da individuare nell'aspetto economico e riguarda i costi di costruzione. In Italia ancora oggi si costruisce una palazzina residenziale popolare, conforme alla legge 10/91, al costo di 650-750 euro al metro quadrato abitabile. In Germania, invece, il costo di un simile fabbricato, conforme alla WSVÖ, è di circa 1.100-1.450 euro (esclusa la progettazione ed altre spese accessorie) (Wienke, 2002). Questa differenza è attribuibile non solo ai differenti costi della manodopera e dei materiali, ma soprattutto alla differenza dello standard energetico che il clima (e la WSVÖ) esige.

Secondo le esperienze fatte in Germania, un edificio a basso consumo energetico o una passivhaus hanno un costo che supera quello di un edificio conforme alla WSVÖ nella misura di circa il 10%. Il salto da uno standard all'altro è quindi sopportabile.

Anche in Italia sarebbe possibile costruire un edificio ad alta prestazione energetica a un costo ragionevole e sopportabile.

Tra tutti gli interventi attuabili per diminuire i consumi energetici degli edifici il più economico e il più semplice è l'aumento dello spessore isolante.

Va sottolineato che il maggiore costo determinato dall'incremento dello spessore isolante non è tanto attribuibile al costo del materiale isolante quanto allo spazio che l'ingombro del materiale isolante erode alla superficie utile vendibile e che computa nella volumetria costruita oggetto degli oneri di urbanizzazione. Per questo appaiono particolarmente importanti gli incentivi e gli sgravi che gli enti pubblici hanno stabilito a favore dell'iperisolamento (cfr. § 1.4).

Infatti se si realizza una valutazione costi-benefici ponendo in relazione i maggiori costi dovuti all'incremento di isolante con i risparmi di combustibile grazie alla minor energia impiegata negli edifici ben isolati, si riscontra che i tempi di ritorno economico dell'investimento iniziale sono collocati nell'arco dei 10 anni. Rispetto dunque al ciclo di vita di un edificio risulta più che vantaggioso dal punto di vista economico attuare interventi di isolamento termico che consentano di risparmiare energia. L'incidenza sui costi di costruzione si differenzia a seconda della tipologia edilizia e del grado di isolamento, ma si aggira comunque attorno al 5%. Si tratta dunque di un tipo di intervento particolarmente economico ma che consente elevati risparmi in fase d'uso, che entrano in opportuna sinergia con i vantaggi ambientali per le minori emissioni.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BADINO VANNI, BALDO GIAN LUCA, *LCA: istruzioni per l'uso*, Esculapio, Bologna, 1998.
- BAGLIONI ADRIANA, *Qualità abitativa e compatibilità ambientale*, in *Manuale di progettazione edilizia. Fondamenti, strumenti, norme*, vol. 3 *Progetto tecnico e qualità*, Hoepli, Milano, 1994, pp. 225-256.
- BANHAM REYNER, *The Architecture of the Well-Tempered Environment*, Architectural Press, London, 1969 (tr. it. di Giovanni Morabito, *Ambiente e tecnica nell'architettura moderna*, Laterza, Roma-Bari, 1995).
- BASSI ANDREA, *Prezzi informativi delle costruzioni*, Maggioli, Rimini,
- BIANCHI DUCCIO, a cura di, *Ambiente Italia 2003. 100 indicatori sullo stato del paese il mondo tra clima che cambia e povertà*, Edizioni Ambiente, Milano, 2003.
- BRUNDTLAND GRO HARLEM, a cura di, *Our Common Future*, World Commission on Environment and Development, Ginevra, 1987 (tr. it. di Francesco Saba Sardi, *Il futuro di noi tutti. Rapporto della Commissione mondiale per l'ambiente e lo sviluppo*, Bompiani, Milano, 1988).
- BUTERA FEDERICO, *Architettura e ambiente. Manuale per il controllo della qualità termica, luminosa e acustica degli edifici*, Etaslibri, Milano, 1995.
- CANGELLI ELIANA, PAOLELLA ADRIANO, *Il progetto ambientale degli edifici. LCA, EMAS, Ecolabel, gli standard ISO applicati al processo edilizio*, Alinea, Firenze, 2001.
- CHAMBERS N., SIMMONS C., WACKERNAGEL M., *Manuale delle impronte ecologiche. Principi, applicazioni, esempi*, Edizioni Ambiente, Milano, 2002.
- CHIAPPONI MEDARDO, MANZINI EZIO, COSTA FIAMMETTA, MANGIAROTTI RAFFAELLA, PRATESI COSTANZA, *Life Cycle Assessment. Valutare e incrementare la qualità ambientale dei prodotti e dei servizi*, Quaderni Associazione Impresa Politecnico, Milano, 1996.
- CHIAPPONI MEDARDO, *Progettazione ambientale e disegno industriale*, in Virginia Gangemi, a cura di, *Emergenza ambiente. Teorie e sperimentazioni della progettazione ambientale*, Clean Napoli, 2001, pp. 27-35.
- CHIESA GIANCARLO, DALL'O' GIULIANO, *Risparmio energetico in edilizia. Criteri e norme*, Masson, Milano, 1996.

- COMANDINI STEFANO, DAL FIUME ANDREA, RATTI ANDREA, *Architettura sostenibile*, Pitagora Editrice, Bologna, 1998.
- DANIELS KLAUS, *Low-tech Light-tech High-tech. Building in the Information Age*, Birkhäuser, Basilea, 1998.
- DE CAPUA ALBERTO, *Strategia progettuale integrata per la qualità ambientale tecnologica: controllo ambientale*, in Adriano Paoletta, a cura di, *L'edificio ecologico: Obiettivi, riconoscibilità, Caratteri, Tecnologia*, Gangemi, Roma, 2001, pp. 65-78.
- DE MAIO DIANA, *Verso un quadro normativo per il design eco-orientato*, in Virginia Gangemi, a cura di, *Emergenza ambiente. Teorie e sperimentazioni della progettazione ambientale*, Clean Napoli, 2001, pp. 216-223.
- DIAPPI LIDIA, a cura di, *Sostenibilità urbana. Dai principi ai metodi di analisi. Forma urbana, energia e ambiente*, Paravia, Torino, 2000.
- ECOFYS, a cura di, *Mitigation of CO2. Emission from the building stock*, Germany, 2003.
- ENEA, a cura di, *Edifici bioclimatici in Italia. 151 edifici solari passivi*, Roma, 1992.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, *Greenhouse gas emission trends and projections in Europe*, Copenhagen, 2002. (<http://reports.eea.eu.int>)
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, *Signals 2004*, Copenhagen, 2004. (<http://reports.eea.eu.int>)
- FACONTI DANIELA, PIARDI SILVIA, a cura di, *La qualità ambientale degli edifici*, Maggioli, Rimini, 1998.
- FREGOLENT LAURA, INDOVINA FRANCESCO, a cura di, *Un futuro amico. Sostenibilità ed equità*, FrancoAngeli, Milano, 2002.
- GALLO C., *La qualità energetica e ambientale nell'architettura sostenibile*, Il Sole24ore, Milano, 2000.
- GAUZIN-MÜLLER DOMINIQUE, *L'architecture écologique*, Le Moniteur, Paris, 2001 (tr. it. a cura di Marco Moro, *Architettura sostenibile. 29 esempi di edifici e insediamenti ad alta qualità ambientale*, Edizioni Ambiente, Milano, 2003).
- GOTTFRIED ARIE, a cura di, *Le chiusure verticali. Quaderni del Manuale di progettazione edilizia*, Hoepli, Milano, 2002.
- LANZAVECCHIA CARLA, *Il fare ecologico. Il prodotto industriale e i suoi requisiti ambientali*, Paravia, Torino, 2000.
- LOVINS L. HUNTER, LOVINS AMORY B., VON WEIZSACHER ERNST ULRICH, *Fattore 4. Come ridurre l'impatto ambientale moltiplicando per quattro l'efficienza della produzione*, Edizione Ambiente, Milano, 1998.
- MANGIAROTTI RAFFAELLA, *Il DfE in impresa. Design for Environment: il progetto di prodotti eco-compatibili*, Maggioli, Rimini, 2000.
- MALANGA RAFFAELE, *L'Environmental Management*, in Virginia Gangemi, a cura di, *Emergenza ambiente. Teorie e sperimentazioni della progettazione ambientale*, Clean Napoli, 2001, pp. 114-128.
- MANZINI EZIO, *Quando la manutenzione diventa trasformazione: il caso della riqualificazione energetica*, in Claudio Molinari, a cura di, *Manutenzione in edilizia. Nozioni, problemi, prospettive*, FrancoAngeli, Milano, 1989.
- MANZINI EZIO, VEZZOLI CARLO, *Lo sviluppo di prodotti sostenibili. I requisiti ambientali dei prodotti industriali*, Maggioli, Rimini, 1998.

- MEADOWS, DONELLA H., DENNIS L. MEADOWS, JORGEN RANDERS, *Oltre i limiti dello sviluppo*, Il saggiatore, Milano, 1993.
- MONTI CARLO, RODA RICCARDO, TORRICELLI MARIA CHIARA, LUCCHINI ANGELO, a cura di, *Costruire sostenibile*, Alinea, Firenze, 2002.
- MORENO RAMÓN QUERALTÒ, *Il nuovo rapporto tra il naturale e l'artificiale*, in *Razionalità tecnica e mondo futuro. Una eredità per il terzo millennio*, FrancoAngeli, Milano, 2002, pp. 145-151.
- NEBBIA GIORGIO, *Lo sviluppo sostenibile*, Edizioni Cultura della Pace, S. Domenico di Fiesole, 1991.
- NOVI FAUSTO, a cura di, *La riqualificazione sostenibile. Applicazioni, sistemi e strategie di controllo climatico naturale*, Alinea, Firenze, 1999.
- PAOLELLA ADRIANO, a cura di, *L'edificio ecologico: Obiettivi, riconoscibilità, Caratteri, Tecnologie*, Gangemi, Roma, 2001.
- PAOLELLA ADRIANO, *Tecnologia delle costruzioni e cambiamenti climatici*, in Adriano Paoella, Rita Minucci, a cura di, *Cambiamenti climatici ed edilizia*, Edicomprint, Roma, 2003.
- PASSARO ANTONIO, *Costruire e dismettere. Nuove strategie per il riciclaggio in edilizia*, Arte Tipografica, Napoli, 1996.
- PASSARO ANTONIO, *La problematica del riciclaggio di materiali e componenti edilizi*, in Virginia Gangemi, a cura di, *Emergenza ambiente. Teorie e sperimentazioni della progettazione ambientale*, Clean Napoli, 2001, pp. 209-215.
- PEARCE DAVID W., TURNER R. KERRY, *Economics of Natural Resources and the Environment*, Hemel Hempstead, Harvester and Wheatsheaf, 1989 (tr. it. di Maristella Botticini, *Economia delle risorse naturali e dell'ambiente*, il Mulino, 1991).
- PIARDI SILVIA, *Inquinamento degli ambienti interni*, in *Manuale di progettazione edilizia. Fondamenti, strumenti, norme*, vol. 3 *Progetto tecnico e qualità*, Hoepli, Milano, 1994, pp. 173-194.
- RAFFAELLINI GIORGIO, *Architettura ed energia, Manuale di progettazione edilizia. Fondamenti, strumenti, norme*, vol. 2. *Criteri ambientali e impianti*, Hoepli, Milano, 1994, p. 3.
- RAIMONDI ATTILIO, *Fonti di energia e usi finali, Manuale di progettazione edilizia. Fondamenti, strumenti, norme*, vol. 2. *Criteri ambientali e impianti*, Hoepli, Milano, 1994a, pp. 6-21.
- RAIMONDI ATTILIO, *Risparmio e recupero dell'energia nel settore edilizio, Manuale di progettazione edilizia. Fondamenti, strumenti, norme*, vol. 2. *Criteri ambientali e impianti*, Hoepli, Milano, 1994b, pp. 22-39.
- SCHMIDT ANDERA C., CLAUSEN ANDERS U., KAMSTRUP OLE, JENSEN ALLAN A., *Comparative Life Cycle Assessment of Three Insulation Materials; Stone Wool, Flax and Paper Wool*, Eco-Infoma, Austria, 2003.
- SCUDO GIANNI, PIARDI SILVIA, *Edilizia sostenibile. 44 progetti dimostrativi*, Esselibri, Napoli, 2002.
- SERRA FLORENSA RAFAEL, COCH ROURA MELENA, *Arquitectura y energia natural*, Edicions UPC, Catalunya, 1995 (tr. it. di Gianni Scudo e Alessandro Rogora, *L'energia nel progetto di architettura*, CittàStudiEdizioni, Milano, 1997).
- SMITH PETER F., *Architecture in a Climate Change. A guide to sustainable design*, Architectural Press, Oxford, 2001.

- TIEZZI ENZO, MARCHETTINI NADIA, *Che cos'è lo sviluppo sostenibile? Le basi scientifiche della sostenibilità e i guasti del pensiero unico*, Donzelli, Roma, 1999.
- WACKERNAGEL MATHIS, REES WILLIAM, *Our Ecological Footprinting. Reducing Human Impact on the Earth*, 1996 (tr. it. di Anna Bruno Ventre et alii, *L'impronta ecologica. Come ridurre l'impatto dell'uomo sulla terra*, Edizioni Ambiente, Milano, 1996).
- WIENKE UWE, *L'edificio passivo. Standard Requisiti Esempi*, Alinea, Firenze, 2002.