

L'impatto energetico ed economico dell'isolamento termico degli edifici in Italia

Renato Lazzarin, Filippo Busato, Francesco Castellotti

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali
Università degli Studi di Padova
Str.la S.Nicola, 3
36100 Vicenza (VI)

SOMMARIO

Il fabbisogno energetico per il riscaldamento degli edifici, siano essi civili o industriali, rappresenta il 33% del fabbisogno energetico totale nazionale che, invece di diminuire come previsto dal protocollo di Kyoto, è aumentato dal 1990 ad oggi del 5.6%. Ciò è dovuto sia all'aumento della volumetria climatizzata sia, nella maggior parte dei casi, alla mancanza di un adeguato spessore di isolamento. All'estero la legislazione ha prodotto dei documenti che fissano in maniera assai stringente i requisiti termofisici minimi per gli edifici, in particolare per quanto riguarda l'isolamento. Il presente lavoro valuta quale potrebbe essere l'impatto delle diverse soluzioni di isolamento termico degli edifici; a livello energetico stimando il possibile risparmio in termini di fonte primaria, che include anche il consumo di energia necessario a produrre gli isolanti, e a livello economico valutando la convenienza dell'investimento. Il quadro che emerge da questa analisi *Life Cycle Oriented* è che uno spessore di isolante anche considerevole (> 20 cm) consente dei risparmi che ne giustificano sempre la produzione. Dal punto di vista economico risulta che uno spessore di isolante minimo è quello che si ripaga nel modo migliore, mentre spessori più elevati ottimizzano il Valore Attuale Netto (VAN) dell'investimento.

1 INTRODUZIONE

Quando anni fa a valle delle crisi energetiche si cominciò a parlare di sostenibilità ambientale, la percezione comune associò ad essa la scelta di materiali ecologici e naturali. L'idea era buona, ma la prospettiva forse era limitata.

Un esempio chiarificatore è quello della messa al bando dei gas *CFC* e poi *HCFC* per la salvaguardia dello strato di ozono stratosferico: non vi è nulla da obiettare sulla necessità di promuovere sostanze alternative per l'utilizzo negli erogatori spray, ma qualche riflessione più approfondita invece si può spendere riguardo il loro utilizzo come fluidi frigoriferi o come gas di riempimento dei materiali termoisolanti. Infatti, se da una parte la ricerca si è indirizzata verso sostanze con *ODP* (*Ozone Depletion Potential*) nullo, dall'altra ci si è trovati ad impiegare nei gruppi frigoriferi i fluidi "naturali", con efficienza minore, consumi elettrici maggiori, immissioni di anidride carbonica in atmosfera aumentate; in sintesi si è aumentato indirettamente il riscaldamento globale del pianeta dovuto all'effetto serra. Lo stesso si può dire per i materiali isolanti: l'effetto diretto di salvaguardia dell'ozono ha come rovescio della medaglia minori prestazioni termoisolanti dei gas o materiali alternativi e quindi un effetto indiretto di segno opposto sul contenimento delle dispersioni termiche e dei consumi energetici. D'altro canto i materiali termoisolanti espansi a gas erano comunque soggetti ad un forte decadimento delle prestazioni nel tempo.

Si capisce quindi come l'analisi del problema risulti molto complessa ed articolata. L'intenzione di questo lavoro è quella di promuovere un'identificazione oggettiva e una misura che vorrebbe essere "assoluta" dell'impatto ambientale dei materiali in una prospettiva di lungo

periodo, nel loro intero arco di vita: un approccio più maturo alla cosiddetta "sostenibilità".

In questo lavoro si applica tale approccio agli edifici e in particolar modo all'isolamento termico dell'involucro edilizio. Se ne valuta l'impatto ambientale nell'arco della sua vita (*LCA, Life Cycle Assessment*), dalla culla alla tomba (*from cradle to grave*), prendendo come caso studio una tipologia edilizia abbastanza diffusa in Italia. Lo studio è completato da una valutazione economica (*LCC, Life Cycle Cost*) che individua lo spessore ottimo in funzione di diverse condizioni climatiche della penisola.

2 EDIFICI E ISOLAMENTO TERMICO IN ITALIA [1]

Nel complesso, la costruzione, ristrutturazione e la gestione degli edifici costituisce circa il 45% del fabbisogno energetico nazionale, in termini di energia primaria pari a circa 190 Mtep (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio). Inoltre, mentre il totale nazionale mostra tassi di aumento minori dell'1% annuo, il settore civile vede aumentare i propri consumi del 2% annuo; ciò è dovuto prevalentemente alla crescita della componente elettrica, legata alla diffusione del condizionamento estivo, quasi sempre realizzato con macchine a compressione di vapore (alimentate elettricamente) in edifici abitativi il cui involucro è privo di isolamento termico.

Il fabbisogno di energia ad uso riscaldamento rappresenta ancora la quota maggiore del consumo energetico per il settore civile (61% del totale degli usi finali nel residenziale); ognuna delle circa 19 milioni di unità abitative dotate di impianto fisso di riscaldamento consuma in media 1 tep all'anno per questa funzione.

Ai consumi legati alla gestione si possono sommare quelli dovuti alla costruzione e ristrutturazione degli edifici. Questi ultimi sono però valutabili con scarsa precisione, a causa della

presenza nell'importo globale dei lavori della quota "sommersa". Tuttavia, è possibile esprimere una considerazione di carattere generale: per realizzare un'unità abitativa media, come un appartamento di 90÷100 m², si utilizzano circa 100 tonnellate di materiali, in grande maggioranza prodotti mediante processi di cottura o metallurgici, del costo energetico medio di circa 500÷700 kcal/kg. Aggiungendo anche i modesti consumi energetici del cantiere si arriva ad un totale di circa 5÷6 tep, quindi un costo energetico relativamente basso.

Gli edifici italiani presentano il minor consumo energetico specifico per metro quadro fra quelli dei Paesi sviluppati, con la sola eccezione del Giappone, ma uno dei maggiori consumi specifici per metro quadro e grado-giorno. Se ne deduce che i bassi consumi per metro quadro sono dovuti ad un clima mite (media geografica dei gradi-giorno inferiore a 2 000), che le nostre abitazioni possiedono involucri mal coibentati e/o il processo di riscaldamento non è gestito correttamente.

L'involucro costituisce il grande problema del parco edilizio esistente, data la carenza di sistemi di isolamento termico adeguati per i 2/3 degli edifici costruiti prima della legge 373/76. Con la vigente legge 10/91 non si è sfruttata la possibilità di introdurre nuovi livelli di isolamento più stringenti (ed economicamente più validi) della precedente normativa. Ne deriva che gli edifici italiani sono tra i più inefficienti d'Europa. Se il nostro Paese si allineasse alla normativa della Danimarca i consumi degli edifici si ridurrebbero a quasi un terzo degli attuali. Senza confrontarsi con i Paesi nordici, è sufficiente ricordare che una casa costruita a Nizza possiede un isolamento triplo rispetto ad una casa costruita nella stessa zona climatica a San Remo.

Attualmente lo spessore medio dei materiali normalmente impiegati in Italia non arriva a 4 cm: a questo proposito è possibile sottolineare che installare uno spessore d'isolante ridotto è antieconomico poiché il costo di posa incide nella stessa misura di uno spessore maggiore, mentre i vantaggi in termini di risparmio energetico sono pressoché proporzionali allo spessore.

Anche, ma non solo, per l'inevitabile ulteriore diffusione della climatizzazione estiva, va ricordato l'effetto che ha la massa termica interna all'involucro nello smussare i picchi di temperatura, migliorando il comfort e attenuando la domanda di condizionamento [2]. In media, tuttavia, metà dell'energia impiegata dal condizionatore viene spesa per deumidificare; l'altra metà serve ad asportare il calore che penetra dall'esterno attraverso l'involucro e quello dovuto alla radiazione solare entrante attraverso le superfici trasparenti.

3 LIFE CYCLE ASSESSMENT: PRESENTAZIONE DEL METODO

Nell'arco della vita di un edificio si possono distinguere differenti fasi: la produzione dei componenti, la costruzione, l'uso dell'edificio, la manutenzione dello stesso, la demolizione finale e il recupero (riuso o riciclaggio) dei componenti.

L'impatto ambientale dei componenti o dei processi di un edificio può essere valutato sulla base di inventari. Un inventario è una tabella di fattori di impatto ambientale che indicano la quantità di ciascuna sostanza emessa o utilizzata, per un'unità del componente o del processo. Detti fattori si distinguono in:

- risorse utilizzate (materiali, energia);
- le emissioni nell'aria, acqua e terreno (CO₂ nell'aria, ammoniaca nell'acqua, olio nel terreno, ...);

- rifiuti prodotti (inerti, tossici, radioattivi, ...).

Il metodo di valutazione LCA richiede l'individuazione dei confini del sistema considerato e la definizione di un'unità funzionale.

I confini del sistema definiscono quali flussi (materiali, energia, emissioni) devono essere considerati e se gli impatti dovuti alle infrastrutture (costruzione, manutenzione, ...) sono da assegnarsi al sistema in una certa proporzione.

Se si vogliono confrontare differenti prodotti, è necessario che essi soddisfino la stessa funzione. L'unità funzionale è la prestazione oggettiva di un prodotto da utilizzare come unità di riferimento in una valutazione nell'arco della vita [3]. Riferendosi ai prodotti termoisolanti, la resistenza termica R pari a 1 m²K/W è generalmente accettata come unità funzionale significativa e operativa. Essa deve essere riferita ad un preciso intervallo temporale: per i materiali termoisolanti si preferisce una fase di utilizzo di 50 anni. Esprimendola in chilogrammi è definita come [4]:

$$FU = R \cdot \lambda \cdot d \cdot A$$

dove λ è la conduttività termica in W/(m K), d è la densità in kg/m³ e A la superficie pari a 1 m². Da una parte informa sulla quantità di materiale termoisolante necessario per produrre una certa resistenza termica nella vita utile dell'isolamento; dall'altra permette di valutare gli impatti ambientali nella produzione, installazione e smaltimento dell'isolamento. In Tabella 1 sono riportati alcuni esempi dell'applicazione della precedente relazione.

Tabella 1. Unità funzionale in chilogrammi necessaria per fornire una resistenza termica di 1 m²K/W per un uso di 50 anni. Dati ricavati da [4] [5] [6].

Materiale	l [mW/(m K)]	d [kg/m ³]	FU [kg]	spessore corrispondente [mm]
Lana di roccia	37	32	1.184	37
Cellulosa	40	32	1.28	40
Fibre di lino	42	30	1.26	42
Polistirene espanso	29	20	0.58	29
Poliuretano espanso	26	80	2.08	26

Tabella 2. Impatti ambientali per unità funzionale. Estratto da [4] [5] [6].

Impatto ambientale	Riscaldamento globale	Acidificazione	Rifiuti non tossici	Rifiuti tossici	Consumo energetico primario	Feed stock energy
Unità	g equiv. CO ₂	g equiv. SO ₂	g	g	MJ	MJ
Lana roccia	1 449	12	53	0.50	20.60	3.36
Cellulosa	819	5	30	2.00	26.20	14.42
Fibre di lino	2 357	17	122	0.40	49.70	22.84
Polistirene espanso	3 468	16	26	7.00	54.00	25.64
Poliuretano espanso	-	-	-	-	76.50	45.00

Gli impatti ambientali di detti materiali termoisolanti sono

riportati in Tabella 2. L'ultima colonna a destra riporta la *Feed stock energy*, ossia l'energia contenuta nei legami chimici del materiale, che può essere quindi recuperata, in tutto o in parte, attraverso la combustione dello stesso. Secondo un'analogia con i concetti dell'economia, è una sorta di "energia residua" del materiale, utilizzabile al termine della sua vita utile.

4 IL CASO STUDIO

Per questo lavoro è stato creato un modello di edificio [7] a 6 zone termiche su 2 piani, avente una superficie calpestabile di 135 m², una volumetria complessiva di 363 m³ (di cui 315 riscaldati) e una superficie disperdente di 327 m². Le condizioni interne sono state fissate in 20°C e 50% UR in inverno e 26°C e 50% UR in estate. Sono state scelte delle logiche di regolazione che prevedono il mantenimento di temperature leggermente più elevate nei bagni, nonché il *set-back* notturno invernale a 16°C per tutti gli ambienti. Inoltre, si sono tenuti in debito conto i carichi sensibili e latenti legati alla presenza di persone e quelli legati alla presenza di elettrodomestici e illuminazione (secondo uno *scheduling* settimanale).

Sono state quindi svolte diverse serie di simulazioni, per il calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento invernale e il condizionamento estivo: oltre al "caso base" costituito dall'edificio senza isolamento, per ogni tipo di isolante si sono scelti gli spessori in progressione geometrica da 1 a 32 cm e si sono eseguite le simulazioni per le tre località italiane di Milano, Roma e Crotone, secondo i dati meteorologici dei *Test Reference Year* [8].

A questo punto, assumendo che il rendimento medio di produzione dell'energia elettrica sia in Italia pari al 40%, che il rendimento medio stagionale del generatore di calore domestico sia pari al 75% e che il COP medio della/e unità split installate nelle abitazioni sia pari a 2.5, si può ricavare il valore del fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione annuale.

Tabella 3. Fabbisogno di energia primaria, Milano, isolamento in lana di roccia.

Milano - lana		energia primaria [MJ]		
spessore [cm]	riscaldamento	raffrescamento	annuale	
0	108 082	5 327	113 409	
2	81 720	5 177	86 897	
4	70 493	5 083	75 576	
8	60 313	4 974	65 288	
16	52 810	4 862	57 672	
32	48 038	4 736	52 774	

In Tabella 3 è possibile apprezzare i risultati delle simulazioni per la città di Milano, con l'isolamento dell'edificio realizzato in lana di roccia. Vale la pena sottolineare l'incidenza modesta del fabbisogno per raffrescamento. In Tabella 4 è stato riportato il confronto, in termini di fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione, nelle tre località prescelte. Si nota come l'incidenza relativa dell'isolamento sia molto simile nei tre diversi climi considerati, nonché vi sia una sostanziale differenza, in termini assoluti, del fabbisogno annuale in relazione alla zona climatica; infatti, lo stesso edificio posto in

un clima mite (KR, RM) presenta un fabbisogno inferiore del 30-40% rispetto a quello che avrebbe se fosse posto in un clima di tipo continentale (MI).

Tabella 4. Fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione, isolamento in lana di roccia.

lana spessore [cm]	energia primaria annuale [MJ]		
	MI	RM	KR
0	113.409	75.451	69.140
2	86.897	57.408	52.507
4	75.576	49.719	45.417
8	65.288	42.692	38.946
16	57.672	37.472	34.145
32	52.774	34.108	31.060

5 ANALISI LCA

Il passo successivo dell'analisi è stato quello di considerare, nel bilancio energetico della vita dell'edificio (fissata in 50 anni), anche l'energia che viene impiegata per produrre gli isolanti e infine quella che si può recuperare dalla loro distruzione; questi dati sono rispettivamente indicati in Tabella 2 come Consumo energetico primario e *Feed stock energy*.

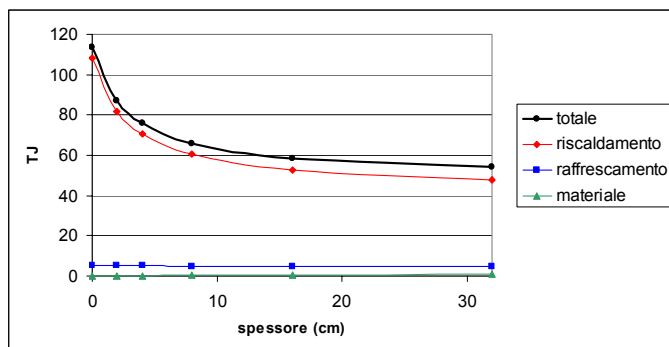


Figura 1. Fabbisogno di energia primaria annuale, Milano, lana di roccia. *Feed stock energy* non recuperata a fine vita utile.

La Figura 1 rappresenta un'analisi LCA del fabbisogno energetico in funzione dello spessore di isolamento, in lana di roccia, per la città di Milano. Il consumo energetico primario per la produzione dell'isolante è stato ripartito nell'intera vita utile dell'edificio, cioè sostanzialmente diviso per 50. In questo caso non si è tenuto in considerazione di un eventuale recupero di energia derivante dalla combustione del materiale isolante alla fine del suo ciclo vitale. Si può osservare che la curva non presenta un minimo, perlomeno nel dominio di analisi. Si può, tuttavia, formulare la seguente considerazione: dato che il consumo energetico per la climatizzazione annuale decresce meno che linearmente con lo spessore, mentre l'energia primaria dell'isolante è una funzione lineare dello spessore, si può postulare l'esistenza di un punto di minimo della curva del fabbisogno totale. Lo spessore di isolante corrispondente al minimo nella curva, che sarà quindi dipendente dalle caratteristiche termofisiche del materiale e del suo processo produttivo, potrà però essere talmente elevato

da non essere preso in considerazione per l'installazione. In Figura 2, invece, si riporta la stessa analisi, "scontando" il recupero energetico dal materiale. Non si apprezzano però delle variazioni significative nella forma della curva. Ciò è dovuto al fatto che l'energia recuperata dalla combustione della lana di roccia è una frazione molto ridotta rispetto al consumo di energia primaria per la sua produzione (5%).

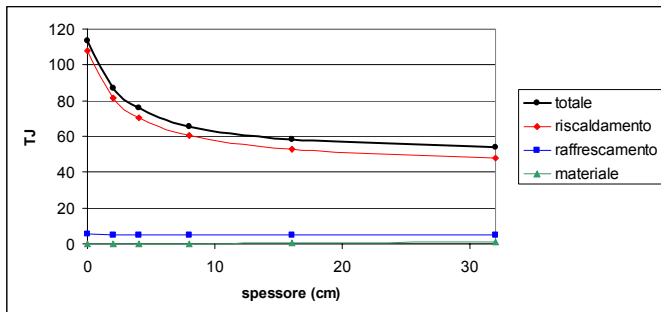


Figura 2. Fabbisogno di energia primaria annuale, Milano, lana di roccia. *Feed stock energy* recuperata a fine vita utile.

A titolo di esempio riguardo l'esistenza di un punto di minimo, si riporta in Figura 3 l'analisi LCA per un isolamento in poliuretano espanso nella città di Crotona. Come è possibile riscontrare, vi è un minimo identificabile tra 15 e 20 cm di spessore: questo accade poiché il costo energetico di produzione del poliuretano è piuttosto elevato e il fabbisogno per la climatizzazione annuale nella località considerata è modesto. Quindi, in una prospettiva LCA, non è conveniente nemmeno dal punto di vista energetico installare un isolamento di spessore superiore a quello corrispondente al minimo della curva.

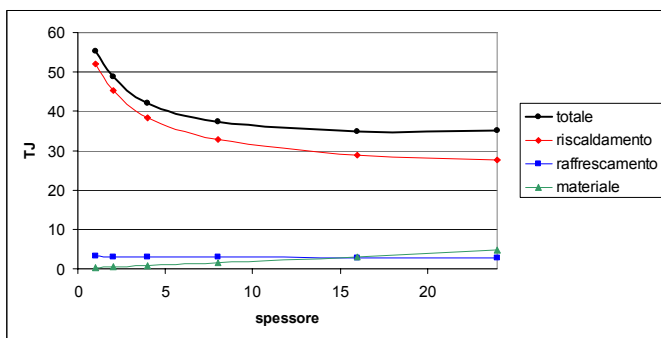


Figura 3. Fabbisogno di energia primaria annuale, Crotona, poliuretano espanso. *Feed stock energy* non recuperata a fine vita utile.

A questo punto si può spendere un'ulteriore considerazione sul tempo di ritorno (*payback*) "energetico" dell'installazione dell'isolante. Infatti, se si divide il consumo energetico primario della produzione dell'isolante (suddiviso nei 50 anni) per il risparmio annuale di fonte primaria ad esso associato, si nota che il "periodo di recupero" corrispondente vale al più 2 mesi. In altri termini, il risparmio di energia consentito in un anno dall'isolamento è, per qualsiasi spessore e tipologia di materiale, almeno 6 volte superiore al consumo di energia per la produzione dello stesso. Esso è inoltre una funzione

crescente dello spessore di isolante, per quanto si è detto nel commento alla Figura 1.

La questione è mostrata in Tabella 5 nella quale, in corrispondenza ai diversi spessori di isolante, sono riportati i consumi di energia primaria per la climatizzazione annuale, il risparmio energetico rispetto alla soluzione senza isolamento e la spesa energetica per la produzione del materiale termoisolante. Nell'ultima colonna viene infine calcolato il *payback* energetico, espresso in anni.

Tabella 5. *Payback* "energetico" per isolamento in polistirene, Crotona. *Feed stock energy* non recuperata a fine vita utile.

spessore [cm]	Energia primaria [MJ]			Payback "energia"
	climatizzazione	risparmio	materiale	
0	69 140	0	0	-
1	56 705	12 435	122	0.01
2	50 041	19 098	244	0.01
4	43 002	26 137	488	0.02
8	37 050	32 090	975	0.03
16	32 877	36 263	1 950	0.05
32	30 351	38 789	3 900	0.10

6 ANALISI LCC

Un approccio al problema della valutazione dello spessore di isolante ottimo in una visione di lungo periodo può essere svolta analogamente in termini economici. Essa prende il nome di analisi LCC (*Life Cycle Cost*). L'idea è quella di valutare i risparmi economici generati dall'isolamento e di metterli in relazione con i rispettivi costi. Pertanto, è necessario "tradurre" i consumi di energia primaria in costi.

Le ipotesi di base sono il costo medio dell'energia elettrica fissato in 0.14 €/kWh_e, il costo medio del gas fissato in 0.60 €/Sm³ e il suo potere calorifico inferiore PCI pari a 34 500 kJ/Sm³. Si ricava così un'informazione significativa: il costo per l'utente finale domestico per un MJ di energia frigorifera resa (0.016 €/MJ_f) è inferiore al costo di un MJ di energia resa in riscaldamento (0.023 €/MJ_r).

È stata quindi svolta un'analisi economica su un orizzonte temporale di 50 anni, assumendo un tasso di interesse di riferimento del 5%. Tale analisi inizia con il calcolo del Valore Attuale Netto (*VAN*) del costo di funzionamento dell'impianto di riscaldamento/condizionamento, attualizzando le bollette energetiche (elettrica e gas) al costo del materiale isolante. Il costo d'installazione dell'isolamento viene supposto uguale per tutti i diversi spessori, in quanto si suppone che tale installazione avvenga contestualmente alla costruzione dell'edificio e non la influenzi in maniera significativa.

Tabella 6. Costo del materiale isolante.

Materiale isolante	Costo (€/m ²)	Spessore (cm)	Costo (€/m ³)	Costo (€/kg)	Costo (€/FU)
Cellulosa	2.9	2	145.00	4.53	5.80
Lana di roccia	2.67	4	66.75	2.09	2.47
Fibra di lino	6.5	1	650.00	21.67	27.30
Polistirene espanso	5.82	4	145.50	7.28	4.22
Poliuretano espanso	7.47	4	186.75	2.33	4.86

In Tabella 6 sono riportati i costi del materiale isolante secondo lo specifico spessore di fornitura e viene calcolato il costo per unità di volume, di massa e infine per unità funzionale *FU*, secondo le caratteristiche elencate in Tabella 1. I dati sono stati forniti dai rivenditori di materiali per l'edilizia.

Come è possibile vedere in Figura 4 la curva del *VAN*, per isolamento in fibra di lino nella città di Crotona, presenta un punto di minimo in corrispondenza dello spessore 2 cm. Questo costituisce il punto di ottimo del problema in questione. Il costo del materiale per aumentare lo spessore di isolante non consente, nei 50 anni, un risparmio nelle spese per l'energia tale da giustificarlo.

Se l'analisi viene, invece, eseguita sul medesimo edificio, ma nella zona climatica di Milano, lo spessore corrispondente al punto di minimo si sposta verso spessori maggiori, collocandosi verosimilmente tra 3 e 4 cm, come è possibile riscontrare in Figura 5. Il risultato delle simulazioni è in accordo con il ragionamento teorico: infatti, a parità di isolamento, nei climi più rigidi il risparmio assoluto in termini energetici ed economici è superiore (si ricorda che il fabbisogno di energia primaria per riscaldamento è circa 20 volte superiore a quello per il condizionamento estivo).

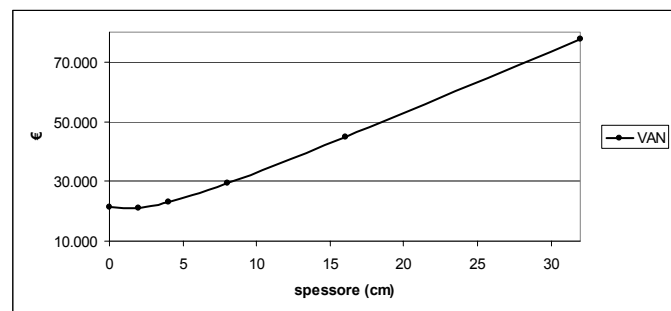


Figura 4. *VAN* per isolamento in fibra di lino, Crotona.

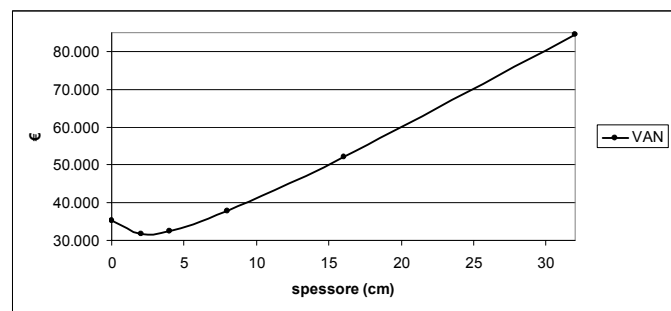


Figura 5. *VAN* per isolamento in fibra di lino, Milano.

Il caso considerato si riferisce, tuttavia, ad un'isolante dal costo (riferito ad unità funzionale *FU*) molto elevato, come la fibra di lino. Se si ripete l'analisi per il materiale più economico, la lana di roccia, si ottengono i grafici di Figura 6 e Figura 7.

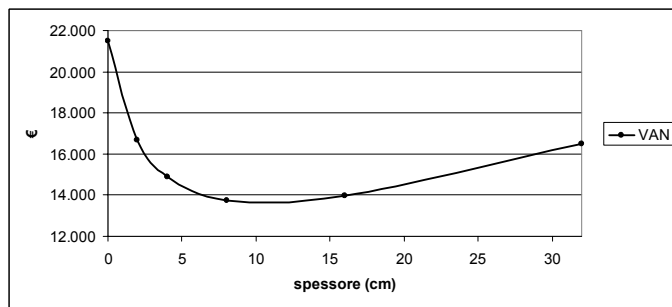


Figura 6. *VAN* per isolamento in lana di roccia, Crotona.

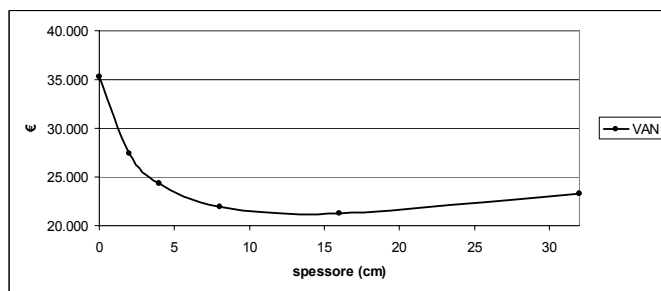


Figura 7. *VAN* per isolamento in lana di roccia, Milano.

In questo caso lo spessore ottimale di isolamento per la città di Crotona è di poco superiore ai 10 cm, mentre per la città di Milano risulta quasi 15 cm. È significativo confrontare la spesa per la climatizzazione in assenza di isolamento (valore che si legge in corrispondenza dello spessore 0 cm) che attualizzata nei 50 anni è di quasi 22 000 € per Crotona e circa 35 000 € per Milano. Tali valori scendono rispettivamente a meno di 14 000 € e meno di 22 000 €. L'isolamento realizzato in lana di roccia riduce quindi il costo complessivo della climatizzazione di circa 1/3 rispetto al caso senza isolamento. I risparmi economici conseguibili con isolanti aventi costo per unità funzionale più elevato sono ovviamente minori, come è possibile riscontrare dal confronto con la Figura 4 e la Figura 5.

Arrivati a questo punto dell'analisi è possibile affermare che tanto più un isolante ha un costo per unità funzionale basso, tanto più sarà conveniente il suo utilizzo, a parità di tutte le altre condizioni (spessore, clima e ovviamente modalità di gestione degli impianti).

Da un punto di vista strettamente economico però le cose non sono sempre così semplici. Se, infatti, fosse chiesto di valutare lo spessore di isolante che massimizza il ritorno economico generato dai risparmi da esso consentiti, la risposta indicherebbe dei valori di spessore molto diversi da quelli che ottimizzano il Valore Attuale Netto in un'ottica di lungo periodo. Ciò si può apprezzare semplicemente guardando i grafici: la pendenza della curva del *VAN*, ovvero l'aumento del risparmio generato dall'isolante, è infatti massima con il tendere a "0" dello spessore di isolante. Il costo dell'isolante cresce invece linearmente con lo spessore, per cui si può dedurre che l'intervento che si ripaga meglio è il passaggio dallo spessore "0" al più piccolo spessore disponibile sul mercato per la fornitura. A tal proposito, sono stati calcolati il tasso di rendimento interno dell'investimento *IRR* (*Internal Rate of Return*) e il tempo di ritorno dell'investimento, *payback*.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Tabella 7. Indici economici per l'isolamento, Crotone.

spessore [cm]	Lana di roccia			Fibra di lino		
	VAN	Payback	IRR	VAN	Payback	IRR
0	21.481	-	-	21.481	-	-
2	16.690	1,6	66%	20.899	33	6%
4	14.899	2,3	47%	22.943	-	4%
8	13.741	3,8	30%	29.350	-	2%
16	13.981	7,0	17%	44.755	-	-
32	16.509	15,6	9%	77.738	-	-

Tabella 8. Indici economici per l'isolamento, Milano.

spessore [cm]	Lana di roccia			Fibra di lino		
	VAN	Payback	IRR	VAN	Payback	IRR
0	35.329	-	-	35.329	-	-
2	27.417	1,0	105%	31.854	14	10%
4	24.292	1,4	75%	32.579	24	7%
8	21.929	2,3	47%	37.735	-	4%
16	21.285	4,1	27%	52.195	-	1%
32	23.246	8,3	15%	84.557	-	-

Come si evince dai dati riportati in Tabella 7 e Tabella 8 lo spessore che minimizza il *VAN* non è sempre quello che massimizza la rendita del capitale addizionale investito nell'acquisto dell'isolante. La minimizzazione del *VAN* corrisponde alla minimizzazione del *payback* e alla massimizzazione dell'*IRR* nel caso del lino (il risparmio generato difficilmente giustifica il suo costo d'acquisto), ma non nel caso della lana di roccia e di nessun altro tipo di isolante considerato (i dati sono omessi per brevità).

7 CONCLUSIONI

Le conclusioni di questo lavoro possono essere riassunte in tre punti principali:

- l'isolamento è sempre conveniente per il risparmio energetico globale, se non quando il costo energetico di produzione del materiale termoisolante è molto elevato e il fabbisogno per la climatizzazione annuale è modesto;
- i vantaggi energetici derivanti dall'isolamento termico si traducono in vantaggi economici all'aumentare dello spessore di isolante fino a raggiungere un punto di ottimo. Per minimizzare il costo globale della gestione energetica dell'abitazione, conviene scegliere gli isolanti con un basso costo per unità funzionale *FU*;
- l'intervento che ha il ritorno economico migliore in termini di *payback* e *IRR* è il passaggio dall'assenza di isolante allo spessore minimo realizzabile in opera. In questo modo si massimizza il rapporto tra miglioramento ottenuto e sforzo profuso per ottenerlo.

Questa analisi potrebbe essere ulteriormente ampliata con la valutazione delle potenzialità che l'isolante può rivelare in termini di riduzione di costo d'impianto. È vero infatti che all'aumentare dello spessore di isolante vengono progressivamente smorzati i picchi di carico, in riscaldamento e in raffrescamento. Questo potrebbe implicare una riduzione della taglia delle macchine (generatori di calore e gruppi split) utilizzate e quindi costituire una ulteriore fonte di risparmio.

1. FINCO-ENEA, Abstract Libro Bianco "Energia-Ambiente-Edificio", Febbraio 2004.
2. Castellotti F., Gli isolanti termici come strumento di riduzione del carico estivo degli edifici, in Il condizionamento dell'aria, cap. 3, a cura di Lazzarin R., Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2003. ISBN 88-7758-499-8.
3. ISO 14040, Environmental management, Life cycle assessment – Principles and framework, 1997.
4. A. C. Schmidt, A. A. Jensen, A. U. Clausen, O. Kamstrup, D. Postlethwaite, A comparative life cycle assessment of building insulation products made of stone wool, paper wool and flax, Int. Journal of LCA, 9, 2004, 53-66, 122-129.
5. EUMEPS, EPS White Book, 2003.
6. B. De Benedetti, G. L. Baldo, S. Rossi, Environmentally-conscious design and life cycle assessment, 2003.
7. AA, VV. 1997. TRNSYS: A Transient System Simulation Program. Solar Energy. Madison.
8. Test Reference Year, TRY, 1985, Data Sets for Computer Simulations of Solar Energy Systems and Energy Consumption in Buildings. Commission of the European Communities, Directorate General XII for Science, Research and Development.