

# Impatti ambientali dei pannelli in poliuretano

Erika Guolo<sup>1,\*</sup>, Francesca Cappelletti<sup>1</sup>, Piercarlo Romagnoni<sup>1</sup>, and Fabio Raggiotto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Università IUAV di Venezia, S. Croce 191, 30123 Venezia, Italy

<sup>2</sup>Stiferite Spa, Viale della Navigazione interna 54/5, 35129 Padova, Italy

**Abstract.** Per gestire una politica di miglioramento della sostenibilità ambientale degli edifici, secondo quanto previsto dagli obiettivi Europei per il 2030, è indispensabile valutare il loro impatto sia nella fase di costruzione che in quella di utilizzo. È soprattutto quest'ultima ad avere un peso determinante (pari a circa il 90%) sugli impatti ambientali, ed è per questo che l'impegno dovrà essere rivolto alla riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di CO<sub>2</sub> degli edifici durante la loro vita utile, mediante una corretta selezione e progettazione dei materiali e delle tecnologie, in particolar modo gli isolanti termici, tenendo in considerazione la salute ed il comfort degli abitanti. Uno strumento utile e di supporto alle imprese per l'eco-innovazione dei prodotti e dei processi produttivi è la LCA – Life Cycle Assessment: un metodo in grado di identificare e quantificare l'energia, i materiali consumati ed i residui rilasciati nell'ambiente durante il processo di formazione di un prodotto. Confrontare i dati di impatto ambientale dei prodotti è poi possibile adottando l'approccio delle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto, EPD – Environmental Product Declarations – che prevedono, per ogni gruppo di prodotti, l'elaborazione di una specifica tecnica, le PRC – Product Category Rules. Nel settore edilizio, tra gli isolanti termici attualmente in uso, il poliuretano espanso rigido (isolante organico sintetico cellulare a celle chiuse, di natura termoindurente), consente di ottenere ottime caratteristiche a fronte di masse volumiche molto contenute, determinando una riduzione dei consumi di energia derivanti da trasporto, installazione e dismissione o riciclo a fine vita. Numerosi studi sugli impatti ambientali durante il suo ciclo di vita utile hanno evidenziato come il quantitativo di risorse consumate per la produzione del poliuretano espanso sia ammortizzato nella fase d'uso degli edifici grazie al risparmio energetico determinato dall'isolamento termico. Una caratteristica molto importante del poliuretano è l'elevata durabilità nel tempo (superiore od uguale alla vita dell'edificio), la cui resistenza è superiore alle componenti di impianto tecnologiche negli edifici. Ciò è dimostrato in seguito ad alcune prove di caratterizzazione fisica e verifica della durabilità di pannelli isolanti in poliuretano espanso rigido utilizzati in diverse tecnologie costruttive, senza alcun tipo manutenzione in fase d'opera: secondo la determinazione della conducibilità termica e della resistenza a compressione è provato come i valori risultino invariati nonostante gli anni di utilizzo (superiori a 40 anni).

## 1 Introduzione

Per raggiungere gli obiettivi stabiliti dalla Comunità Europea per il 2030, relativamente ai problemi di sostenibilità ambientale, si devono considerare tre aspetti fondamentali all'interno del settore edilizio: gli impatti ambientali, gli impatti economici, la salute ed il comfort degli utenti. Quest'ultimo aspetto include una serie di parametri, tra cui la temperatura dell'aria, l'umidità dell'aria, il trattamento aria (ventilazione), l'illuminazione, il rumore, ecc. Poiché circa l'80% degli edifici europei sono stati costruiti prima degli anni '80, la ristrutturazione gioca un ruolo fondamentale nel mirare al rispetto di questi obiettivi, attraverso una corretta progettazione ed uso dei materiali isolanti, riducendo inoltre i costi ambientali [1,2,3,4]. La scelta dei materiali isolanti dev'essere conforme ai seguenti criteri di sostenibilità [5]:

- Efficiente uso delle risorse;

- Efficienza energetica;
- Prevenzione dell'inquinamento;
- Utilizzo di risorse e materiali locali.

La Life Cycle Assessment (LCA) è uno strumento che supporta le aziende all'identificazione dei prodotti e nelle opportunità di miglioramento dei processi, definendo strategie di pianificazione e di marketing di un determinato prodotto, mediante un sistema di etichettatura ambientale. Sponsorizzato da una buona pubblicità dell'edilizia sostenibile, il metodo di valutazione LCA comprende una parte del processo di certificazione sostenibile degli edifici, quantificando l'energia consumata, i materiali utilizzati ed i rifiuti introdotti nell'ambiente durante il processo di produzione di un prodotto [6]. Tuttavia, questa analisi presenta dei limiti, tra cui la mancanza di una metodologia e di dati standard: molte valutazioni sono eseguite solamente nella fase funzionale, ma non durante l'intero ciclo di vita [7].

\* Corresponding author: [eguolo@iuav.it](mailto:eguolo@iuav.it)

Per garantire una maggior eco-efficienza della produzione, le etichette e le certificazioni di prodotto (obbligatorie o volontarie) hanno acquisito un interesse crescente, come i sistemi di Dichiarazione Ambientale di prodotti e/o servizi che riguardano l'industria delle costruzioni (EPD): la norma UNI EN 15804 definisce le regole chiave per i prodotti di categoria "Product Category Rules" (IBU PCR parte A: 2014-20-08 V1.4, parte B V06.2017). EPD e PCR indicano i confini di sistema dello studio, lo sviluppo di scenari, il calcolo degli impatti e la valutazione di inventario, per comunicare in modo chiaro informazioni affidabili ed imparziali, relativamente alle prestazioni ambientali ed ai risultati ottenuti dalla LCA [8,9,10].

Al fine di valutare le prestazioni dei materiali isolanti nel tempo e durante la vita utile dell'edificio, si considerano i valori di trasmittanza termica (U) e/o di resistenza termica (R). La formula sotto riportata definisce la modalità di caratterizzazione dell'unità funzionale [6]:

$$UF = R k \rho A \quad (1)$$

Dove:

R = resistenza termica, pari a 1 unità per definire l'UF [m<sup>2</sup> K/W]

k = conducibilità termica [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]

ρ = densità [kg/m<sup>3</sup>]

A = area, pari a 1 unità per definire l'UF [m<sup>2</sup>]

La formula indica la quantità di volume necessario a fornire la resistenza termica per tutta la durata dell'isolamento. È possibile anche usare 1 kg di isolante come UF, indicante la quantità di materiale necessario per la realizzazione di un pannello di isolante, resistenza termica (R), densità (ρ) e conducibilità termica (k).

Generalmente, è importante tenere in considerazione le principali performance dell'isolante, sia durante la vita utile che alla fine della vita del prodotto, come riportate di seguito [11]:

- Isolamento termico (resistenza termica e conducibilità termica);
- Prestazioni meccaniche (resistenza a compressione e trazione) [kPa];
- Stabilità dimensionale [%];
- Reazione al fuoco [Euroclasse];
- Assorbimento d'acqua [%] e resistenza alla diffusione del vapore;
- Durabilità;
- Innocuità per la salute umana (emissioni ambientali nella fase di produzione, trasporto e installazione di CO<sub>2</sub> equivalente, SO<sub>2</sub> equivalente, PO<sub>4</sub> equivalente e C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> equivalente, VOC);
- Performance acustiche [dB];
- Impatti ambientali (cambiamenti climatici, acidificazione, eutrofizzazione, ecc);
- Costi [€].

## 2 Il poliuretano espanso rigido

Il poliuretano espanso rigido (prodotto isolante di natura polimerica termoidurente, con struttura a celle chiuse, comprendente i polimeri PUR e PIR), comparato ad un altro tipo di isolante, nei medesimi spessori, garantisce sempre un buon isolamento. La sua leggerezza determina una riduzione del consumo di energia derivante dal trasporto, installazione e smaltimento o riciclo a fine vita; ne deriva inoltre una riduzione dei rifiuti derivanti dalle attività di costruzione e demolizione, ottenendo un limitato impatto ambientale. Tra le caratteristiche principali del materiale si considerano:

- Limitato assorbimento d'acqua;
- Assenza della produzione di emissioni, pericolose per l'uomo e l'ambiente;
- Elevata resistenza a compressione;
- Buona reazione al fuoco;
- Elevata durabilità (pari o superiore alla vita degli edifici) senza necessità di manutenzione.

Gli studi dell'Associazione Nazionale Poliuretano Espanso (ANPE) [12] hanno rilevato che le caratteristiche del materiale durante la sua vita utile, rimangono invariate (senza alcun tipo di degrado fisico o chimico) e la durabilità è pari, se non superiore, al ciclo di vita dell'edificio. Attualmente, alla fine della vita utile del costruito, si ipotizzano i seguenti scenari per il poliuretano espanso rigido:

- Riutilizzo del materiale in altri tipi di costruzione (privato di eventuali elementi metallici);
- Recupero di energia mediante termovalorizzazione;
- Recupero della schiuma per la realizzazione di agglomerati;
- Smaltimento in discarica.

**Tabella 1.** Milano, copertura piana pavimentata – Stima dell'energia consumata e del risparmio ottenuto con l'utilizzo dell'isolamento in poliuretano (metodo di valutazione ENEA).

<b>U struttura esistente</b>	1.46 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	ΔU = 1.18 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
<b>U struttura isolate con 80 mm PUR</b>	0.28 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	
<b>Risorse utilizzate per la produzione del PUR</b>	23,470 MJ	1° anno +7,169 MJ eq*.
<b>Risparmio energetico/anno</b>	30,639 MJ	-372 kgCO <sub>2</sub>
<b>Risparmio energetico/50 anni</b>	1,531,969 MJ	50 anni +1,508,499 MJ eq*.
		-78,441 kgCO <sub>2</sub>

\*eq. = equivalente

Le associazioni e le singole aziende produttrici di isolanti in poliuretano, hanno sviluppato numerosi studi sugli impatti di tale materiale durante il ciclo di vita, mettendo in evidenza come la quantità di risorse consumate per la produzione dell'isolante è ammortizzata nella fase d'uso dell'edificio, grazie all'energia risparmiata determinata dall'isolamento

termico; ipotizzando l'isolamento di una copertura piana a Milano, le risorse necessarie per la produzione del pannello sono ammortizzate nel primo anno di utilizzo dell'impianto di riscaldamento [13].

Il riciclo dei polimeri termoindurenti, incluso il poliuretano, è molto complesso, in quanto durante la fase di produzione iniziale avviene un processo di reticolazione che impedisce al materiale, una volta formato, di essere sottoposto a successiva fusione: può avvenire un riciclo meccanico mediante macinazione o micronizzazione in particelle del materiale, successivamente mescolate con il materiale vergine, o convertite in differenti applicazioni rispetto al materiale di partenza (pavimenti e/o rivestimenti). La schiuma poliuretanica può invece essere riciclata per la produzione di una nuova schiuma, dopo la riduzione in polvere della materia prima [14].

L'azienda italiana Stiferite Spa è produttrice di pannelli in poliuretano espanso rigido a celle chiuse (composti da schiuma polyiso – PIR), ed è la prima azienda Europea ad elaborare LCA con EPD certificate da un ente di controllo svedese (The Swedish Environmental Management Council – SEMC), a partire da due prodotti [15]: Stiferite Class S 60 mm e Stiferite GT 80 mm; la valutazione dei prodotti ha messo in luce l'utilizzo limitato di risorse ed i bassi impatti ambientali durante il processo di produzione, restituendo all'ambiente le risorse consumate durante la produzione del pannello, sotto forma di risparmio energetico.

Tutti i pannelli presentano diversi rivestimenti, progettati per specifiche applicazioni e quindi non universali all'uso. Le caratteristiche di stabilità nel tempo e di conduttività termica dichiarata variano in base ai loro spessori:  $0.025 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  per pannelli con spessori superiori a 120 mm,  $0.026 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  per pannelli con spessori compresi tra 120 mm e 80 mm,  $0.028 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  per pannelli con spessori inferiori a 80 mm, o in base alla tipologia del rivestimento, con valori nel range da  $0.022$  a  $0.028 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

### 3 Determinazione della durabilità

La durabilità dei prodotti è un elemento essenziale per stimare le caratteristiche a lungo termine degli edifici, sia in termini di costi che di impatti ambientali, considerando le normative EN 13165:2012.

È importante conoscere la durabilità dei materiali isolanti, elementi in grado di ridurre lo scambio termico tra l'edificio e l'ambiente, perché giocano un ruolo fondamentale nel determinare i costi in fase d'opera degli edifici (consumo di energia); secondo la definizione della Direttiva sui Prodotti da Costruzione CPR 305/2011, la durabilità "è la capacità di un prodotto di mantenere inalterate nel tempo le prestazioni richieste sotto l'effetto di azioni prevedibili. Se sottoposto a manutenzione ordinaria, un prodotto deve consentire ad un'opera debitamente progettata e realizzata, di soddisfare i requisiti essenziali per un periodo economicamente ragionevole (vita utile del prodotto). Ne consegue che la durabilità dipende dall'uso previsto e dalle condizioni di manutenzione di

un prodotto. La valutazione della durabilità può riferirsi al prodotto nel suo complesso o alle caratteristiche di prestazione [...]. In entrambi i casi, la presunzione di base è che la prestazione del prodotto si mantenga ad un livello accettabile, in relazione alle prestazioni iniziali, durante tutta la sua vita utile". Con lo scopo di rispondere al bisogno di informazioni tecniche, la Federazione delle Associazioni Europee per il poliuretano espanso rigido (PU Europe) ha affidato al FIW di Monaco di Baviera la valutazione delle caratteristiche di una serie di pannelli posti in opera:

- Conduttività termica;
- Resistenza a compressione;
- Umidità;
- Integrità del prodotto.

I test hanno dimostrato l'efficacia del poliuretano, che dopo decenni di applicazione in varie tecnologie costruttive, rimane inalterato ed esente da alcun tipo di danno/difetto, rispondendo alle caratteristiche dichiarate dal produttore [16].

**Tabella 2.** Test n.1 FIW München: isolamento in schiuma poliuretanica, con rivestimento in alluminio multistrato su entrambe le facce, posizionato, nel 1982, sopra le travi di una copertura inclinata in un edificio residenziale singolo, e prelevato nel 2010.

Proprietà	Valori dichiarati	Valori misurati dopo 28 anni
Spessore	100 mm	101.08 mm
Resistenza a compressione al 10%	150 kPa	208 kPa
Conduttività termica	$0.030 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$0.029 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Resistenza termica	$3.33 \text{ m}^2 \text{ K/W}$	$3.49 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
$\Delta\%$ resistenza termica	4.55%	

**Tabella 3.** Test n.2 FIW München: isolamento in schiuma poliuretanica, posizionato, nel 1978, sotto la membrana impermeabilizzante nella copertura piana di un edificio scolastico, e prelevato nel 2010.

Proprietà	Valori dichiarati	Valori misurati dopo 33 anni
Spessore	60 mm	59,05 mm
Resistenza a compressione al 10%	150 kPa	226 kPa
Conduttività termica	$0.030 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$0.027 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Resistenza termica	$2.00 \text{ m}^2 \text{ K/W}$	$2.19 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
$\Delta\%$ resistenza termica	9.35%	

Stiferite Spa ha realizzato i medesimi test di durabilità su alcuni prodotti, attraverso una serie di test di caratterizzazione termofisica dei pannelli isolanti in poliuretano, realizzati dall'Università IUAV di Venezia. Utilizzando lo strumento doppia piastra con anello di

guardia TPL 800 S, si è riusciti a definire la conduttività equivalente, grazie alla determinazione del flusso termico che attraversa il campione di spessore noto, relativamente a prodotti posti in opera negli anni 1982, 1988 e 1998, in differenti tipologie di costruzione (senza alcun tipo di manutenzione), attualmente in fase di ristrutturazione. Ciò ha dimostrato come i valori dichiarati dall'azienda stessa negli anni in cui i pannelli erano stati prodotti, si sono conservati nel tempo, provando la veridicità delle dichiarazioni riguardanti la durabilità del materiale nel tempo (superiore a 40 anni).

**Tabella 4.** Test n.1 Università IUAV di Venezia – Stiferite BB 40 mm: isolamento in schiuma poliuretanic, con rivestimento in cartongfello bitumato su entrambe le facce; posizionato in opera nel 1982, nell'intercapedine di muri perimetrali in un edificio residenziale singolo e prelevato nel Luglio 2018, in seguito a interventi di ristrutturazione edilizia.

Proprietà	Valori dichiarati	Valori misurati dopo 36 anni
Spessore	40 mm	40.83 mm
Resistenza a compressione al 10%	150 kPa	271.15 kPa
Conduttività termica	0.028 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0.027 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Resistenza termica	1.43 m <sup>2</sup> K/W	1.51 m <sup>2</sup> K/W
Δ% resistenza termica	5.86%	

**Tabella 5.** Test n.2 Università IUAV di Venezia – Stiferite BB 30 mm: isolamento in schiuma poliuretanic, con rivestimento in cartongfello bitumato su entrambe le facce; posizionato in opera nel 1998, sotto la membrana impermeabilizzante nella copertura piana di un edificio residenziale multipiano, e prelevato nel Luglio 2018, in seguito a interventi di ristrutturazione edilizia dell'appartamento all'ultimo piano dell'edificio.

Proprietà	Valori dichiarati	Valori misurati dopo 20 anni
Spessore	30 mm	31.22 mm
Resistenza a compressione al 10%	150 kPa	264.49 kPa
Conduttività termica	0.028 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0.028 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Resistenza termica	1.07 m <sup>2</sup> K/W	1.12 m <sup>2</sup> K/W
Δ% resistenza termica	4.07%	

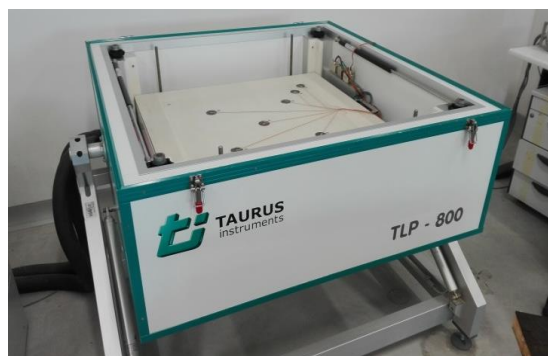
Da questi test si può notare come il ciclo di vita del materiale sia superiore alle componenti tecnologiche degli edifici, stimate attorno a 20 anni secondo la normativa UNI EN 15459 [17].

## 4 Metodologie di applicazione LCA-EPD e casi studio

### 4.1 Scopo

Alcuni esempi di LCA ed EPD sono state realizzate su alcuni prodotti dell'azienda Stiferite Spa: Stiferite Class SH, Stiferite Class BH e Stiferite RP, relativamente all'anno 2017. Lo scopo è quello di verificare le informazioni relative agli aspetti ambientali del prodotto isolante, durante il ciclo di vita, come previsto dalla normativa EN 15804 [9], definendo il metodo di verifica "cradle-to-gate" (dalla culla al cancello) ed identificando tre possibili scenari di fine vita: smaltimento in discarica, termovalorizzazione o recupero.

Le caratteristiche tecniche dei prodotti sono determinate in accordo alla normativa EN 13165 [18].



**Fig. 1.** Hotplate TPL 800 S, Università IUAV di Venezia

**Tabella 6.** Test n.3 Università IUAV di Venezia – Stiferite BB 30 mm: isolamento in schiuma poliuretanic, con rivestimento in cartongfello bitumato su entrambe le facce; posizionato in opera nel 1988, sotto uno strato di carta catramata nella copertura inclinata in un edificio residenziale singolo, e prelevato nel 2019, in seguito a interventi di ristrutturazione.

Proprietà	Valori dichiarati	Valori misurati dopo 31 anni
Spessore	30 mm	32.30 mm
Resistenza a compressione al 10%	150 kPa	184.59 kPa
Conduttività termica	0.028 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0.027 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Resistenza termica	1.07 m <sup>2</sup> K/W	1.20 m <sup>2</sup> K/W
Δ% resistenza termica	11.65%	

#### 4.1.1 Stiferite Class SH

Stiferite Class SH è un pannello sandwich in poliuretano espanso rigido, rivestito su entrambe le facce con velo vetro saturato, con resistenza alla compressione pari a 200kPa; il prodotto è suggerito per l'isolamento di coperture piane sotto manti bituminosi e termoadesivi, per l'isolamento di coperture a falde, pareti e pavimenti.

Il formato standard è 600 mm x 1200 mm, con spessore nominale compreso tra 20 mm e 200 mm.

**Tabella 7.** Principali caratteristiche dichiarate relative al prodotto Stiferite Class SH.

Descrizione	Unità	Valore
Conduttività termica dichiarata acc. EN 13165 d < 80 mm	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0.028
Resistenza alla compressione al 10% di schiacciamento acc. EN 826	kPa	200
Resistenza a trazione perpendicolare alle facce acc. EN 1607	kPa	40
Assorbimento d'acqua per immersione totale, d<110 mm acc. EN 12087	%	2
Assorbimento d'acqua per immersion parziale acc. EN 1609	kg/m <sup>2</sup>	0.1
Fattore di resistenza alla diffusione del vapore acc. EN 12086	-	56
Reazione al fuoco acc. EN 13823	Euroclasse	E

\*d = spessore

**Tabella 8.** Principali caratteristiche dichiarate relative al Stiferite Class BH.

Descrizione	Unità	Valore
Conduttività termica dichiarata acc. EN 13165 80 mm < d < 110 mm	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0.026
Resistenza alla compressione al 10% di schiacciamento acc. EN 826	kPa	200
Resistenza a trazione perpendicolare alle facce acc. EN 1607	kPa	40
Assorbimento d'acqua per immersione totale, d<110 mm acc. EN 12087	%	2
Assorbimento d'acqua per immersion parziale acc. EN 1609	kg/m <sup>2</sup>	0.1
Fattore di resistenza alla diffusione del vapore acc. EN 12086	-	33
Reazione al fuoco acc. EN 13823	Euroclasse	F

\*d = spessore

#### 4.1.2 Stiferite Class BH

Stiferite Class BH è un pannello sandwich in poliuretano espanso rigido, rivestito sulla faccia superiore con velo vetro bitumato accoppiato a PP e su quella inferiore con fibra minerale saturata, con resistenza alla compressione pari a 200 kPa; il prodotto è indicato per coperture sotto

manti impermeabili bituminosi, dove si richieda elevata resistenza alla sfiammatura. Il formato standard è 600 mm x 1200 mm, con spessori nominali compresi tra 30 mm e 200 mm.

#### 4.1.3 Stiferite RP

Stiferite RP è costituito da un pannello isolante in schiuma polyiso espansa rigida (PIR) con rivestimento Gas Tight triplo strato e schermo al vapore integrato sul lato caldo, accoppiato ad una lastra di cartongesso di spessore 13 mm; il prodotto è indicato per l'isolamento di pareti dall'interno e di soffitti. Il format standard è 1200 mm x 3000 mm, con spessori nominali compresi tra 33 mm e 133 mm.

**Tabella 9.** Principali caratteristiche dichiarate relative al Stiferite RP.

Descrizione	Unità	Valore
Resistenza termica dichiarata acc. EN 13950	m <sup>2</sup> K W <sup>-1</sup>	2.30
Resistenza alla compressione al 10% di schiacciamento acc. EN 826	kPa	>150
Resistenza a trazione perpendicolare alle facce acc. EN 1607	kPa	>35
Assorbimento d'acqua per immersione totale acc. EN 12087	%	<1
Assorbimento d'acqua per immersion parziale acc. EN 1609	kg/m <sup>2</sup>	<0.1
Fattore di resistenza alla diffusione del vapore acc. EN 12086	-	164
Reazione al fuoco acc. EN 13823	Euroclasse	B s1 d0

#### 4.2 Modalità operative

L'unità funzionale, definita dalla normativa ISO 14040 [19], permette di confrontare i risultati tra loro; in questo caso l'unità funzionale dichiarata è 1 m<sup>2</sup>.

Il software utilizzato per la modellazione del ciclo di vita è GaBi, focalizzato sull'ottimizzazione ambientale dei materiali, energia e risorse e lo sviluppo dei prodotti in grado di rispondere ai requisiti ed alle normative ambientali, per migliorare l'efficienza della catena di approvvigionamento [20].

L'inventario del ciclo di vita permette di descrivere tutti i flussi (materia ed energia) che intersecano i confini di sistema per la creazione del prodotto. La valutazione del ciclo di vita in esame, considera le fasi dall'estrazione della materia prima fino allo smaltimento del prodotto a fine vita, includendo le fasi di trasporto al sito di cantiere e l'installazione. Di seguito si riportano le fasi analizzate, come da normativa EN 15804:

- A1 – estrazione della materia prima;
- A2 – trasporto della materia prima;
- A3 – costruzione del prodotto isolante;

A4 – trasporto al sito di cantiere;  
 A5 – installazione del prodotto;  
 C2 – trasporto del prodotto a fine vita;  
 C3/C4 – fine vita: scenari di termovalorizzazione o smaltimento a discarica;  
 D – recupero/riciclo.

Nel caso in questione, i seguenti confini di sistema non sono considerati: B1 (utilizzo del prodotto), B2 (manutenzione del prodotto, con relativi trasporti), B3 (riparazione), B4 (sostituzione), B5 (riqualificazione), B6 (utilizzo di energia), B7 (utilizzo di acqua), C1-C4 (de-costruzione e demolizione). La scelta dei confini di sistema qui effettuata, dipende dal fatto che nella fase d'uso del materiale isolante non è richiesto alcun tipo di manutenzione/riparazione/sostituzione, perché il prodotto ha un'elevata durabilità (come indicato nel paragrafo precedente), assicurando un significativo risparmio energetico negli edifici che lo ospitano, sia in termini di consumi che di costi.

Tuttavia, considerando uno spessore medio del pannello, nella fase di fine vita, si sono analizzati una serie di scenari con differenti percentuali relative ai possibili usi finali del prodotto, tra cui lo smaltimento a discarica, la termovalorizzazione ed il recupero del materiale; i risultati finali analizzati hanno identificato i benefici derivanti dai diversi processi.

## 5 Analisi e conclusioni

I valori di conducibilità termica misurati, in alcuni casi, sono in linea con i valori dichiarati dal produttore e riferiti ai prodotti recenti. È importante sottolineare come con l'introduzione della marcatura CE, i produttori sono tenuti a testare i materiali in accordo alle norme armonizzate, che prevedono la dichiarazione di un coefficiente di conducibilità ponderato per una durata di servizio di 25 anni, riferibile al 90% della produzione, con il 90% di confidenza statistica ( $\lambda_D$ ), e non necessariamente il valore che un singolo pannello può raggiungere.

La maggior parte delle normative italiane precedentemente utilizzate (UNI 9051:1987 [21], UNI 7745:1977 [22], UNI 7891:1978 [23]) prevedono la misurazione della conducibilità termica dopo 90 giorni dalla produzione.

Inoltre, dall'inizio del 2004, gli agenti espandenti direttamente dannosi per lo strato di ozono (Freon 141/B) sono stati banditi, rendendo obbligatorio l'uso di schiume poliuretaniche con nuovi agenti espandenti eco-compatibili, decretando tuttavia la produzione di nuovi pannelli con prestazioni isolanti inferiori: ciò indica che nei pannelli precedentemente esaminati, prodotti tra gli anni '80 e '90, è ancora possibile determinare valori di conducibilità molto bassa.

L'investimento sotto forma di isolamento termico è importante nel settore delle costruzioni sostenibili e, come mostrato, questo utilizzo apporta benefici tangibili a livello economico, ambientale e sociale.

È fondamentale utilizzare metodi di valutazione economica e ambientale per fare corretti investimenti in termini di costruzione e, come sopra descritto, l'analisi

LCA è lo strumento più completo ed iterativo per raggiungere gli obiettivi fissati dalla Comunità Europea.

**Tabella 10.** Analisi comparative dei pannelli in poliuretano analizzati da IUAV.

Riferimento	Anno	Conducibilità termica [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Spessore [mm]
Università IUAV di Venezia (1)	1982	0.028	40
	2018	0.027	40.83
Università IUAV di Venezia (2)	1998	0.028	30
	2018	0.028	31.22
Università IUAV di Venezia (3)	1988	0.028	30
	2019	0.027	32.30

Nel caso particolare riportato in questo articolo, lo studio LCA è stato eseguito in conformità con la normativa ISO 14040, per dimostrare l'impatto del materiale nella fase di produzione: dopo la schematizzazione del processo del ciclo di vita, i dati primari vengono raccolti in relazione ai flussi in ingresso ed ai flussi in uscita (derivanti dal sito dove ha luogo la produzione), con riferimento alle ore di produzione [h] eseguite nel periodo di riferimento. I dati di input si riferiscono alla materia prima (di cui la percentuale [%] di materia riciclata), al materiale utilizzato per il confezionamento del prodotto finito [kg] (quantità calcolata su una media ponderata in base allo spessore nell'anno di riferimento), ed al consumo annuo di energia termica ed elettrica consumata nel processo di generazione.

I flussi in uscita sono riferiti alla produzione di rifiuti (descrizioni e quantità indicate nel MUD – Modello Unico di Dichiarazione ambientale) ed al rilascio delle emissioni atmosferiche (VOC).

Nella fase di distribuzione vengono analizzate le quantità di prodotto trasportato [m<sup>2</sup>], i mezzi di trasporto utilizzati (camion o traghetto) e le distanze percorse [km], suddividendo le analisi per province italiane, paesi Europei e paesi extra Europei.

L'obiettivo finale è strutturare un bilanciamento ambientale con una corretta allocazione dei dati.

I dati collezionati, grazie all'utilizzo del software, saranno trasformati in un'analisi degli impatti ambientali, relazionati all'unità funzionale decisa. I risultati ottenuti riguardanti gli impatti ambientali e le risorse utilizzate, come aspettato, variano a seconda dello scenario di fine vita scelto, specialmente se un'importante percentuale di materiale destinato a discarica sarà recuperato (attraverso un riciclo di tipo chimico/meccanico). Con il software è stato possibile notare come limitando o eliminando il materiale smaltito a discarica o destinato a termovalorizzazione, gli impatti ambientali e le risorse primarie utilizzate nella fase di produzione diminuiscano, incrementando i benefici derivanti dal riuso, recupero o riciclo. Pertanto, per aumentare la sostenibilità del prodotto, riducendo al minimo gli sprechi e gli impatti ambientali grazie ad un dirottamento dei vasti volumi attualmente destinati a discarica, è importante considerare il riuso come primo scenario di fine vita; il recupero di energia, dev'essere

considerato come ultima alternativa di “riciclaggio” del materiale, solo quando la schiuma poliuretana ha raggiunto il termine della sua vita utile e non può più essere utilizzata in altri sistemi.

La valutazione degli impatti è un processo quantitativo e qualitativo, utile a valutare gli effetti delle sostanze suscettibili all’esaurimento delle risorse, agli effetti sulla salute umana ed alla conservazione dell’ambiente.

Le principali cause di incertezza nella fase di valutazione possono essere:

- Inaccuratezza dei dati (misure affette da errori);
- Mancanza di dati;
- Limitata rappresentazione dei dati (i dati si riferiscono al medesimo processo e non strettamente correlati allo studio);
- Incertezza del modello (semplificazione dei calcoli) ed epistemologica (non conoscenza del sistema);
- Variabilità nel tempo e nello spazio.

Tutti i risultati, dati, metodi ed ipotesi sono trasparenti, presentati in dettaglio e coerenti con l’obiettivo dello studio.

## Referenze

1. D. Anastaselos, E. Giama, A. M. Papadopolous. An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions. *Energy and Buildings* **41**, 1165-1171 (2009).
2. L. Aditya, T.M.I. Mahlia, B. Rismanchi, H.M. Ng, M.H. Hasan, H.S.C. Metselaar, O. Muraza, H.B. Aditya. A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **73**, 1352-1365 (2017).
3. F.R. d’Ambrosio Alfano, F. de Leo. Materiali impermeabilizzanti e termoisolanti per l’involucro edilizio: un binomio. AiCARR – Cultura e Tecnica per Energia Uomo e Ambiente, Editoriale Delfino. 2015.
4. L. Napolano, V. James. Analisi LCA comparativa di materiali isolanti tradizionali e innovativi: Il caso del progetto ELISSA. *Atti del X Convegno dell’Associazione Rete Italiana LCA 2016 – Life Cycle Thinking, sostenibilità ed economia circolare*. Ravenna 23-24 Giugno 2016, a cura di A. Dominici Loprieno, S. Scalbi, S. Righi, 63-71 (2016).
5. F.Pacheco-Torgal, L. F. Cabeza, J. Labrincha, A. de Magalhães. Life cycle assessment (LCA) of sustainable building materials: an overview. G. K. C. Eco-efficient construction and building materials – Life cycle assessment (LCA), eco-labelling and case studies. *Woodhead Publishing Series Civil and Structural Engineering* **49**, 38-62.
6. M. Cellura (coordinator). Life Cycle Assessment applicata all’edificio: metodologia e casi di studio sul sistema fabbricato-impianto. Editoriale Delfino. AiCARR – Cultura e Tecnica per Energia Uomo e Ambiente. 2017.
7. S. S. Shretsha, K. Biswas, A. O. Desjarlais. A protocol for lifetime energy and environmental impact assessment of building insulation materials. *Environmental Impact Assessment Review* **46**, 25-31 (2014).
8. G.L. Baldo, M. Marino and S. Rossi. Analisi del ciclo di vita LCA. Materiali, prodotti, processi. Edizioni Ambiente Srl, 2005.
9. EN 15804:2014 Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products. European Committee for Standardization.
10. M. D. Bovea, V. Ibáñez-Forés, I. Augusti-Juan. Environmental Product Declaration (EPD) labelling of construction and building materials. Eco-efficient construction and building materials – Life cycle assessment (LCA), eco-labelling and case studies. F.Pacheco-Torgal, L. F. Cabeza, J. Labrincha, A. de Magalhães. *Woodhead Publishing Series Civil and Structural Engineering* **49**, 125-150.
11. R. Dylewski, J. Adamczyk. Life cycle assessment (LCA) of building thermal insulation materials. Eco-efficient construction and building materials – Life cycle assessment (LCA), eco-labelling and case studies. F.Pacheco-Torgal, L. F. Cabeza, J. Labrincha, A. de Magalhães. *Woodhead Publishing Series Civil and Structural Engineering* **49**, 267-286.
12. ANPE – Associazione Nazionale Poliuretano Esanso rigido. [www.poliuretano.it](http://www.poliuretano.it).
13. Poliuretano & Ambiente. Associazione Nazionale Poliuretano Esanso rigido [www.poliuretano.it](http://www.poliuretano.it).
14. A. Pellizzari, E. Genovesi. Neomateriali nell’economia circolare. Edizioni Ambiente 2017.
15. Life Cycle Assessment Environmental Product Declaration. Stiferite – l’isolante termico. [www.stiferite.com](http://www.stiferite.com).
16. Durabilità dei prodotti isolanti in poliuretano. Associazione Nazionale Poliuretano Espanso rigido. Ottobre 2012.
17. UNI EN 15459-1:2018 Prestazione energetica degli edifici – Sistemi di riscaldamento e sistemi di raffrescamento idronici negli edifici – Parte 1: Procedura di valutazione economica per i sistemi energetici negli edifici, Modulo M1-14. European Committee for Standardization.
18. EN 13165:2016 Thermal insulation products for buildings – Factory made rigid polyurethane foam (PU) products – Specification. European Committee for Standardization.
19. ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. European Committee for Standardization.
20. Thinkstep Gabi. [www.gabi-software.com](http://www.gabi-software.com).

21. UNI 9051:1987 Materie plastiche cellulari rigide. Pannelli di poliuretano espanso rigido con parametri flessibili prodotti in continuo – Tipi, requisiti e prove.
22. UNI 7745:1977+A112:1983 Materiali isolanti. Determinazione della conduttività termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia.
23. UNI 7891:1987+A113:1983 Materiali isolanti. Determinazione della conduttività termica con il metodo dei termoflussimetri.