

IMPATTI AMBIENTALI DEI PANNELLI IN POLIURETANO

di

* Erika Guolo, Francesca Cappelletti, Piercarlo Romagnoni, Fabio Raggiotto

1 Introduzione

Il raggiungimento degli obiettivi stabiliti dalla Comunità Europea per il 2030, relativamente ai problemi di sostenibilità ambientale, è previsto mediante la valutazione di tre aspetti fondamentali per l'intero settore edilizio: gli impatti ambientali, gli impatti economici, la salute ed il comfort degli utenti. La definizione dei criteri di qualità relativi a quest'ultimo punto include la valutazione di una serie di parametri, tra cui temperatura e umidità dell'aria, il trattamento aria, la qualità illuminotecnica, il livello di rumore, ecc. Poiché circa l'80% degli edifici europei sono stati costruiti prima degli anni '80, la ristrutturazione gioca un ruolo fondamentale: in tali casi, ma non solo, una corretta progettazione, l'uso di adeguati materiali isolanti riduce sia i costi che gli impatti ambientali [1,2,3,4].

Volendo focalizzare l'attenzione sulla scelta dei materiali isolanti, sarebbe opportuno valutare la conformità degli stessi ai seguenti criteri di sostenibilità [5]:

- efficiente uso delle risorse;
- efficienza energetica dell'edificio;
- prevenzione dell'inquinamento;
- utilizzo di risorse e materiali locali.

La logica con cui si deve procedere risponde quindi a quanto definito nei processi di Life Cycle Assessment (LCA), valorizzando uno strumento in grado di supportare non solo progettisti e costruttori nell'identificazione dei prodotti, ma anche le aziende produttrici valutando le opportunità di miglioramento dei processi e definendo strategie di pianificazione e marketing di un determinato prodotto, mediante un sistema di etichettatura ambientale.

Testata da alcuni anni nel campo dell'edilizia so-

stenibile, la LCA ha il pregio di consentire la valutazione di una parte del processo di certificazione sostenibile degli edifici, quantificando l'energia consumata, i materiali utilizzati ed i rifiuti introdotti nell'ambiente durante tutto il processo di produzione di un prodotto [6]. Tale processo non è ancora pienamente rodato: infatti questa valutazione presenta dei limiti tra cui la mancanza di una metodologia ben strutturata e di dati standardizzati. Molte valutazioni sono eseguite solamente nella fase funzionale, ma non per l'intero ciclo di vita [7].

Per garantire una maggior eco-efficienza nella produzione, le etichette e le certificazioni di prodotto (obbligatorie o volontarie) hanno acquisito un interesse crescente. La norma UNI EN 15804 [8] fornisce le regole quadro per categoria di prodotto (Product Category Rules) per l'elaborazione di Dichiarazioni Ambientali di tipo III per ogni tipo di prodotto e/o servizio per le costruzioni (EPD). Questo tipo di documento permette di comunicare in modo chiaro informazioni oggettive, affidabili ed imparziali, quantificando le prestazioni ambientali dei prodotti, ottenuti sulla base di uno studio LCA. Le PCR sono documenti tecnici che definiscono i parametri da adottare e le modalità di raccolta dei dati per la redazione di LCA ed EPD, descrivendo le fasi del ciclo di vita del prodotto e gli scenari da considerare per la valutazione degli impatti e la comparazione dei prodotti (IBU PCR parte A: 2014-20-08 V1.4, parte B V06.2017) [8,9,10].

Al fine di valutare le prestazioni di diversi materiali isolanti effettuando un confronto a parità di performance offerte, l'Unità Funzionale (UF) è il parametro più adeguato.

Tale valore esprime i costi ambientali in relazione alla vita utile dell'edificio (stimata di circa 50 anni), mediante i valori di trasmittanza termica U , [$W m^{-2} K^{-1}$] o di resistenza termica R [$m^2 K W^{-1}$]. L'equazione sotto riportata (1) definisce la modalità di caratterizzazione dell'unità funzionale per un prodotto isolante, utilizzata nell'analisi del ciclo di vita [6]:

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

dove:

R = resistenza termica unitaria [= $1 m^2 K W^{-1}$]

k = conducibilità termica [$W m^{-1} K^{-1}$]

ρ = densità [$kg m^{-3}$]

A = area unitaria [= $1 m^2$]

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 [$m^2 K W^{-1}$] e conducibilità termica [$W m^{-1} K^{-1}$]);
- 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 sia nella fase di produzione e sia nella fase di installazione ed uso);
- 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 termoindurente con struttura a celle chiuse (comprendente i polimeri PUR e PIR), garantisce ottime prestazioni termiche con spessori e masse volumiche contenute. La sua leggerezza determina una riduzione del consumo di energia derivante da trasporto, installazione e smaltimento o riciclo a fine vita; ne deriva inoltre una riduzione dei rifiuti prodotti nelle attività di costruzione e demolizione, ottenendo un limitato impatto ambientale. Tra le principali caratteristiche del materiale, sia in fase di produzione che di utilizzo, si considerano:

- Limitato assorbimento d'acqua;

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

Gli studi dell'Associazione Nazionale Poliuretano Espanso rigido (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 del materiale è pari, se non superiore, al ciclo di vita dell'edificio.

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 a falda di $100 m^2$ a Milano [13], con solaio in latero-cemento, le risorse necessarie per la produzione del pannello sono ammortizzate nel primo anno di utilizzo dell'impianto di riscaldamento (Tab. 1).

U struttura esistente	1.46 $W m^{-2} K^{-1}$	$\Delta U = 1.18$ $W m^{-2} K^{-1}$
U struttura isolata con PUR 80 mm	0.28 $W m^{-2} K^{-1}$	
Risorse utilizzate per la produzione del PUR	23 470 MJ	1° anno + 7 169 MJ eq*
Risparmio energetico/anno	30 639 MJ	-372 kgCO ₂
Risparmio energetico/50 anni	1 531 969 MJ	50 anni +1 508499 MJ eq*
		-78 441 kgCO ₂

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).

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
- Recupero di energia mediante termovalorizzazione;
- Recupero della schiuma per la realizzazione di

agglomerati (mediante processi chimici/fisici);

- Smaltimento in discarica;
- Recupero della schiuma per produrre nuove materie prime riciclate

Il riciclo dei polimeri termoindurenti 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 poliuretana può invece essere riciclata per la produzione di una nuova schiuma, dopo la riduzione in polvere della materia prima [14].

L'elaborazione di LCA da parte delle aziende produttrici e successiva pubblicazione di EPD certificate da enti riconosciuti ha messo in luce il limitato utilizzo di risorse ed i bassi impatti ambientali durante il processo di produzione del materiale, restituendo all'ambiente le risorse consumate durante la produzione del pannello sotto forma di risparmio energetico.

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 la normativa EN 13165:2012 aggiornata al 2016.

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 riferibili al concetto di durabilità del prodotto, la Federazione delle Associazioni Europee per il poliuretano espanso rigido (PU Europe) ha affidato al FIW di Monaco di Baviera la valutazione delle seguenti caratteristiche di una serie di pannelli posti in opera:

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

In questo senso, alcuni test (i cui risultati sono presentati nelle Tab. 2 e Tab. 3) hanno dimostrato l'efficacia del poliuretano. Dopo decenni di applicazione, pure con diverse tecnologie costruttive, il prodotto rimane inalterato nelle prestazioni e comunque esente da danno/difetto, rispondendo alle caratteristiche tecnologiche dichiarate dal produttore nelle schede tecniche [16]. È importante considerare che le caratteristiche di stabilità nel tempo e di conduttività termica dichiarata variano in base ai loro spessori.

Proprietà	Valori dichiarati	Valori misurati dopo 28 anni
Spessore	100 mm	101.08 mm
Resistenza a compressione al 10%	150 kPa	208 kPa
Conducibilità termica	0.030 W m ⁻¹ K ⁻¹	0.029 W m ⁻¹ K ⁻¹
Resistenza termica	3.33 m ² K/W	3.49 m ² K/W
Δ% resistenza termica	4.55%	

Tabella 2. Test n.1 FIW München: isolamento in schiuma poliuretana, 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 33 anni
Spessore	60 mm	59.05 mm
Resistenza a compressione al 10%	150 kPa	226 kPa
Conducibilità termica	0.030 W m ⁻¹ K ⁻¹	0.027 W m ⁻¹ K ⁻¹
Resistenza termica	2.00 m ² K/W	2.19 m ² K/W
Δ% resistenza termica	9.35%	

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

Anche il laboratorio FisTec dell'Università IUAV di Venezia ha realizzato alcuni test di durabilità su pannelli isolanti in poliuretano espanso rigido, attraverso una serie di test di caratterizzazione termofisica. Utilizzando lo strumento doppia piastra con anello di guardia TPL 800 S (Fig. 1), è stato possibile definire la conduttività termica equivalente, grazie alla determinazione del flusso termico che attraversa un campione di spessore noto. I prodotti testati erano isolanti posti in opera rispettivamente negli anni 1982 (Tab. 4), 1988 (Tab. 5) e 1998 (Tab. 6), in differenti tipologie di costruzione. Negli edifici di provenienza dei campioni, attualmente in fase di ristrutturazione edilizia, non è avvenuta alcun tipo di manutenzione. I risultati ottenuti hanno evidenziato come i valori di spessore, resistenza a compressione e conduttività termica dichiarati dai produttori negli anni in cui i pannelli erano stati prodotti, si sono conservati nel tempo, confermando la stabilità di tali proprietà. Da questi test si può notare come il ciclo di vita del materiale sia nettamente superiore alle componenti tecnologiche degli edifici, la cui durabilità temporale si può ragionevolmente stimare attorno a 20 anni, come riportato anche dalla normativa UNI EN 15459 [17].



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

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

Tabella 4. Test n.1 Università IUAV di Venezia: isolamento in schiuma poliuretanicca, con rivestimento in cartongfello bitumato su entrambe le facce; posizionato in opera nel 1982, nell'intercapedine di muri perimetrali in un edificio residenziale singolo, prelevato nel Luglio 2018.

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

Tabella 5. Test n.3 Università IUAV di Venezia: isolamento in schiuma poliuretanicca, 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, prelevato nel 2019.

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

Tabella 6. Test n.2 Università IUAV di Venezia: isolamento in schiuma poliuretanicca, 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, prelevato nel Luglio 2018.

4 Analisi dei risultati

I valori di conducibilità termica misurati (Tab. 7), 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, norme 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 (λ_D); questo non è necessariamente il valore che un singolo pannello può raggiungere.

Riferimento	Anno	Conducibilità termica [W m ⁻¹ K ⁻¹]	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

Tabella 7. *Analisi comparative dei pannelli in poliuretano analizzati da IUAV.*

La maggior parte delle normative italiane precedentemente utilizzate per la determinazione di tale valore (UNI 9051:1987 [21], UNI 7745:1977 [22], UNI 7891:1978 [23]), prevedono la misurazione della conducibilità termica dopo 90 giorni dalla produzione. Inoltre, la messa al bando degli agenti espandenti direttamente dannosi per lo strato di ozono a partire dal 2004 (Freon 141/B), ha decretato la necessità di adottare nuovi agenti espandenti eco-compatibili per la produzione delle schiume poliuretaniche.

5 Introduzione alle metodologie di applicazione LCA-EPD

5.1 Scopo

Lo scopo dell'analisi LCA è di verificare le informazioni relative agli aspetti ambientali del prodotto isolante, durante il ciclo di vita, come previsto dalla normativa UNI 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].

5.2 Modalità operative

L'unità funzionale, definita dalla normativa ISO 14040 [19] permette di confrontare i risultati tra loro. In questo caso, per quanto riguarda l'unità funzionale dichiarata a cui riferire i risultati per descrivere la produzione dei pannelli, si è scelta la produzione di 1 m² di pannello.

Il software utilizzato per la modellazione del ciclo di vita è GaBi [20], focalizzato sull'otti-

mizzazione ambientale dei materiali, energia, risorse e lo sviluppo dei prodotti in grado di rispondere ai requisiti ed alle normative ambientali, per migliorare l'efficienza della catena di approvvigionamento.

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, in conformità con la normativa ISO 14040, 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 e 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. 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] nel periodo di riferimento. I dati di input si riferiscono alla quantità di materia prima (di cui materia

riciclata [%]), al materiale utilizzato per il confezionamento del prodotto finito [m²] ed al consumo annuo di energia termica ed elettrica [kWh] nel processo di generazione. I flussi in uscita andrebbero riferiti alla produzione di rifiuti (MUD – Modello Unico di Dichiarazione ambientale) ed al rilascio delle emissioni in atmosfera (VOC). Nella fase di distribuzione vengono analizzate le quantità di prodotto trasportato [m²], i mezzi di trasporto utilizzati (camion, traghetto o aereo) e le distanze percorse [km], suddividendo le analisi per provincie italiane, paesi Europei e paesi extra Europei. L'obiettivo finale è strutturare un bilanciamento ambientale con una corretta allocazione dei dati.

5.3 Impatti ambientali e scenari di fine vita

I dati collezionati, grazie all'utilizzo di un software quale GaBi [20], possono essere trasformati in un'analisi degli impatti ambientali relazionati all'unità funzionale prescelta.

Inoltre, considerando uno determinato spessore del pannello, mediante l'utilizzo del software, nella fase di fine vita si possono analizzare 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. Come previsto, i risultati variano in base allo scenario di fine vita scelto, specialmente se un'importante percentuale di materiale destinato a discarica sarà recuperato (attraverso un riciclo di tipo chimico/meccanico). È inoltre possibile verificare come, limitando o eliminando il materiale smaltito a discarica o destinato a termovalorizzazione, gli impatti ambientali e le risorse primarie nella fase di produzione diminuiscono, 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 diverso impiego 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 alternativa di "riciclaggio" del materiale solamente quando la schiuma poliuretana ha raggiunto il termine della sua vita utile e non può più essere utilizzata in altri sistemi o prodotti.


6 Conclusioni

L'investimento che deve essere dedicato all'isolamento termico dell'edificio è un punto assai importante nel settore delle costruzioni sostenibili e, come mostrato, l'utilizzo di un determinato isolante apporta benefici tangibili a livello ambientale e sociale (oltre che economico).

Nel settore edilizio, la valutazione economica e ambientale è un dato ineludibile in particolare nelle ristrutturazioni e, come sopra descritto, l'analisi LCA è lo strumento più completo per raggiungere gli obiettivi fissati dalla Comunità Europea.

La valutazione degli impatti è un processo quantitativo e qualitativo, utile ad analizzare gli effetti delle sostanze suscettibili all'esaurimento delle risorse, gli effetti sulla salute umana e la conservazione dell'ambiente.

È importante sottolineare, infine, come principali cause di incertezza nella fase di valutazione possono essere:

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

*Erika Guolo, Francesca Cappelletti,
Piercarlo Romagnoni,
Università IUAV di Venezia,
S. Croce 191, 30123 Venezia, Italy.*

*Fabio Raggiotto,
Stiferite Spa,
Viale della Navigazione interna 54/5,
35129 Padova, Italy.*

Referimenti

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. Shrestha, 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. EN 15804:2014 Sostenibilità delle costruzioni – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto. European Committee for Standardization.
 9. G.L. Baldo, M. Marino and S. Rossi. Analisi del ciclo di vita LCA. Materiali, prodotti, processi. Edizioni Ambiente Srl, 2005.
 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.
 13. Poliuretano & Ambiente. Associazione Nazionale Poliuretano Esanso rigido 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.
 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 Isolanti termici per edilizia – Prodotti di poliuretano espanso rigido (PU) ottenuti in fabbrica - Specificazione. European Committee for Standardization.
 19. ISO 14040:2006 Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Principi e quadro di riferimento. European Committee for Standardization.
 20. Thinkstep Gabi. 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.
 24. M. Motta, S. Spinelli. Schiume ad alta efficienza per il trasporto refrigerato. POLIURETANO, 12-13 (Dicembre 2004).