



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

**Corso di Laurea Magistrale in Architettura per la sostenibilità
a.a. 2025/2026**

**Pannelli isolanti a base di micelio per l'edilizia:
analisi comparativa e scomposizione per voci di costo nel
confronto con i pannelli in polistirene espanso (EPS)**

Relatrice:
Paola Palmero

Candidata:
Sara Pietricola

Correlatrice:
Manuela Rebaudengo

Matricola:
s328844

INTRODUZIONE	1
 CAPITOLO 1 – Il micelio: origine e caratteristiche	 5
1.1. <i>Cos'è il micelio: struttura e composizione</i>	5
1.2. <i>Processo produttivo dei compositi di micelio</i>	6
1.2.1. <i>Scelta della specie fungina</i>	7
1.2.2. <i>Scelta e preparazione del substrato</i>	8
1.2.3. <i>Sterilizzazione del substrato</i>	9
1.2.4. <i>Inoculazione e riempimento del substrato</i>	11
1.2.5. <i>Incubazione</i>	11
1.2.6. <i>Essiccamento</i>	12
1.3. <i>Conclusioni del processo produttivo</i>	12
 CAPITOLO 2 – I compositi in micelio come isolante termico	 13
2.1. <i>Introduzione</i>	13
2.2. <i>Densità</i>	13
2.3. <i>Conduttività termica</i>	14
2.4. <i>Comportamento al fuoco</i>	16
2.4.1. <i>Reazione e resistenza al fuoco</i>	16
2.4.2. <i>Metodi di prova</i>	17
2.5. <i>Comportamento al fuoco dei compositi in micelio</i>	18
2.6. <i>Assorbimento dell'acqua</i>	20
2.7. <i>Porosità</i>	23
 CAPITOLO 3 – Confronto tra pannelli in micelio e in polistirene espanso	 26
3.1. <i>Introduzione</i>	26
3.2. <i>Polistirene espanso (EPS): che cos'è</i>	26
3.2.1. <i>Processo produttivo dei pannelli in polistirene espanso</i>	27
3.2.2. <i>L'impiego in edilizia</i>	28
3.3. <i>Confronto dell'impatto ambientale tra i pannelli isolanti in micelio e in polistirene espanso</i>	29
3.3.1. <i>Energia consumata</i>	31
3.3.2. <i>Emissioni di gas serra (GWP)</i>	32
3.3.3. <i>Acidificazione ed eutrofizzazione</i>	32
3.3.4. <i>Consumo idrico</i>	34

3.4.	<i>Confronto sulla durabilità tra pannelli isolanti in micelio e in EPS</i>	35
3.4.1.	<i>Meccanismo di degrado</i>	35
3.4.2.	<i>Igroscopicità</i>	36
3.4.3.	<i>Resistenza al fuoco</i>	38
3.5.	<i>Confronto sullo smaltimento e la gestione di fine vita</i>	39
3.6.	<i>Sequestro e rilascio di carbonio</i>	40
 CAPITOLO 4 – Analisi economica		41
4.1.	<i>Introduzione</i>	41
4.2.	<i>Analisi prezzi e Life Cycle Cost: definizione e costruzione</i>	41
4.3.	<i>Costruzione dell'analisi dei costi del pannello isolante in micelio e in polistirene espanso (EPS)</i>	44
4.4.	<i>Suddivisione dei costi del ciclo di vita del pannello isolante in micelio</i>	46
4.4.1.	<i>Costi di produzione</i>	46
4.4.2.	<i>Costo di installazione</i>	50
4.4.3.	<i>Costo di manutenzione</i>	51
4.4.4.	<i>Costo di smaltimento/fine vita</i>	52
4.5.	<i>Suddivisione dei costi del ciclo di vita del pannello isolante in polistirene espanso</i>	53
4.6.	<i>Confronto: risultati e possibili miglioramenti</i>	55
 CONCLUSIONI		57
BIBLIOGRAFIA		59

INTRODUZIONE

"Gli edifici in cui lavoriamo, facciamo acquisti e viviamo sono responsabili di un terzo delle emissioni globali e di un terzo dei rifiuti globali", ha affermato Inger Andersen, Direttore Esecutivo dell'UNEP. [1]

Il settore edilizio è responsabile quasi del 35% del consumo energetico mondiale, del 38% delle emissioni globali di CO₂ e del 50% del consumo globale di risorse [2].

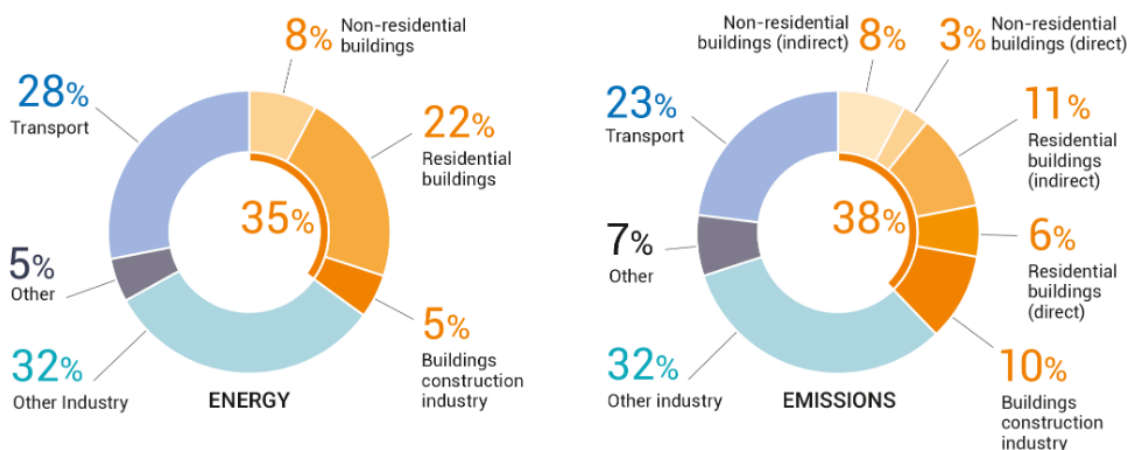


Figura 1. Ripartizione del consumo energetico e delle emissioni di CO₂ legate all'energia per settore. Fonte: Global Alliance for Building and Construction (Global ABC) [2].

Tali impatti non sono causati unicamente dall'operatività dell'edificio (operational energy) ma anche da altre fasi che costituiscono l'intero ciclo di vita: produzione, costruzione, manutenzione e dismissione. Le emissioni di CO₂ incorporate associate ai materiali da costruzione rappresentano il 15% del totale [3]. Pertanto, la necessità di estendere il concetto di sostenibilità edilizia, non deve riguardare solamente l'efficienza energetica ma deve includere anche un'analisi rispetto all'impiego dei materiali. Entro il 2060 si prevede che il consumo di materiali a livello globale raddoppierà, causando l'esaurimento di materie prime e risorse naturali non rinnovabili, provocando ulteriori impatti ambientali a livello globale [3].

Tra i materiali edilizi che contribuiscono sia all'efficienza energetica che all'impatto ambientale, ci sono i materiali isolanti. Se si fa riferimento ai materiali isolanti organici, vediamo dalla Figura 2 al primo posto il polistirene espanso (EPS). La maggior parte di essi si riferiscono a materiali sintetici, spesso derivati da risorse non rinnovabili, come l'EPS.

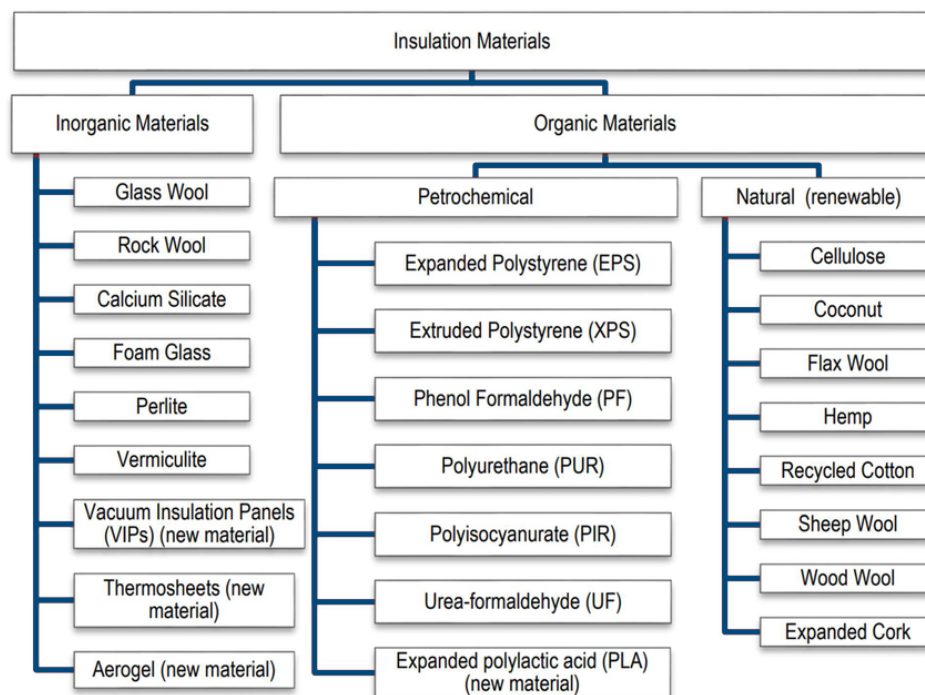


Figura 2. Classificazione dei principali materiali isolanti. Fonte: Yildiz, G., et al. (2020) [5].

Sebbene l'EPS possieda prestazioni termiche efficaci, presenta criticità ambientali significativi legati al processo produttivo, alla loro non biodegradabilità e alla difficoltà di smaltimento a fine vita.

Per affrontare tali criticità, la scelta consapevole di utilizzare materiali isolanti che contribuiscono alla riduzione degli impatti ambientali è fondamentale. Pertanto, sono stati progettati materiali più rispettosi dell'ambiente derivati dall'agricoltura e dal riciclaggio, definiti come “materiali bio-based”. Questa definizione è stata formalizzata nel decreto del 19 dicembre 2012, in armonia con il regolamento UE n. 305/2011 [6]. Un materiale bio-based viene definito come “*un materiale derivante da biomassa vegetale o animale che può essere utilizzato come materia prima in prodotti da costruzione e decorazione, mobili fissi e come materiale da costruzione in un edificio*” [6].

Tra la scelta dei materiali isolanti derivati dalla biomassa, ovvero, in questo caso, da materia organica vegetale, i compositi a base di micelio (Mycelium Based Composites, MBC), rappresentano un'alternativa promettente. Per composito si intende un materiale costituito da più fasi distinte, che danno origine a un materiale con proprietà meccaniche e fisiche superiori rispetto ai singoli componenti.

Nello specifico il composito miceliare è formato da una matrice e un rinforzo. La matrice è costituita dal micelio fungino, ovvero una rete di microfilamenti chiamati ife, e il rinforzo dalla fibra naturale, ovvero il substrato. Il micelio circonda le fibre, mantenendo la loro posizione relativa all'interno del materiale. Le fibre a loro volta influenzano le proprietà meccaniche e fisiche del composito [7].

Per analizzare l'alternativa emergente dei compositi miceliari, la presente tesi propone un confronto tra pannelli isolanti a base di micelio e in EPS, al fine di valutare la competitività prestazionale, ambientale, ma soprattutto economica del pannello miceliare. Tale confronto mira a individuare le diverse condizioni che possono favorire o limitare l'impiego del micelio come isolante in edilizia. Il lavoro si articola in quattro capitoli.

Nel primo capitolo viene introdotto il micelio, descrivendone origine e struttura, e ricostruendo le fasi principali relative al suo processo produttivo: scelta della specie fungina, scelta e preparazione del substrato, sterilizzazione del substrato, inoculazione, incubazione ed essiccamento.

Nel secondo capitolo, la ricerca si concentra sulle prestazioni richieste per l'applicazione del pannello in micelio come isolante termico. In particolare, sono state analizzate densità, conduttività termica, comportamento al fuoco, assorbimento dell'acqua e porosità.

Il terzo capitolo si focalizza su una breve descrizione del polistirene espanso, sul processo produttivo e sul suo impiego in edilizia. È stata successivamente fatta un'analisi degli impatti ambientali, prendendo in considerazione emissioni da gas serra (Global Warming Potential, GWP), energia consumata, eutrofizzazione, acidificazione e consumo idrico, riferita alle fasi A1 – A3, secondo la norma EN 15804, che fanno riferimento all'approvvigionamento materie prime e energie (A1), trasporti fino al cancello dello stabilimento (A2), produzione del pannello, consumi di acqua e materiali ancillari, trattamento dei rifiuti di processo, emissioni in aria, acqua e suolo (A3). La valutazione è stata condotta secondo la letteratura per i pannelli in micelio e secondo dichiarazioni ambientali di prodotto (Environmental Product Declaration, EPD) per il polistirene espanso, adottando un'unità funzionale specifica

e definendo un confine di sistema al fine di rendere coerente il confronto tra i pannelli realizzati nei due diversi materiali.

Inoltre, un secondo confronto tra i due pannelli isolanti si è basato sulla durabilità, ponendo l'attenzione su meccanismi di degrado, igroscopicità del materiale, resistenza al fuoco e smaltimento a fine vita.

Il quarto capitolo riporta l'analisi economica del pannello isolante in micelio con l'obiettivo di stimare i costi associati alle diverse fasi del suo ciclo di vita e di ricostruire un prezzo di mercato, confrontandoli con i prezzi del polistirene espanso. Per rendere il confronto coerente è stata definita un'unità funzionale comune ad entrambi i materiali, ponendo un valore di resistenza termica pari a $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ in riferimento alla produzione di 1 m^2 di prodotto.

In particolare, l'analisi economica è stata sviluppata attraverso un'analisi prezzi strutturata secondo un approccio di Life Cycle Costing (LCC), che consente di valutare il costo del pannello isolante non limitandosi alla sola fase di produzione, ma includendo anche le fasi di installazione, manutenzione e smaltimento.

CAPITOLO 1 – Il micelio: origine e caratteristiche

1.1. Cos'è il micelio: struttura e composizione

Il micelio è l'apparato vegetativo dei funghi, formato da una fitta rete di filamenti tubolari e allungati chiamati ife, che si sviluppano e si ramificano nel sottosuolo.

Gli elementi ifali si sviluppano a partire dalle spore, che si disperdono nell'ambiente. Le condizioni favorevoli rendono possibile la germinazione, producendo una prima ifa chiamata tubetto germinativo, da cui poi si svilupperà il micelio. La crescita della rete ifale avviene per estensione apicale di ife sottili che poi si ramificano.

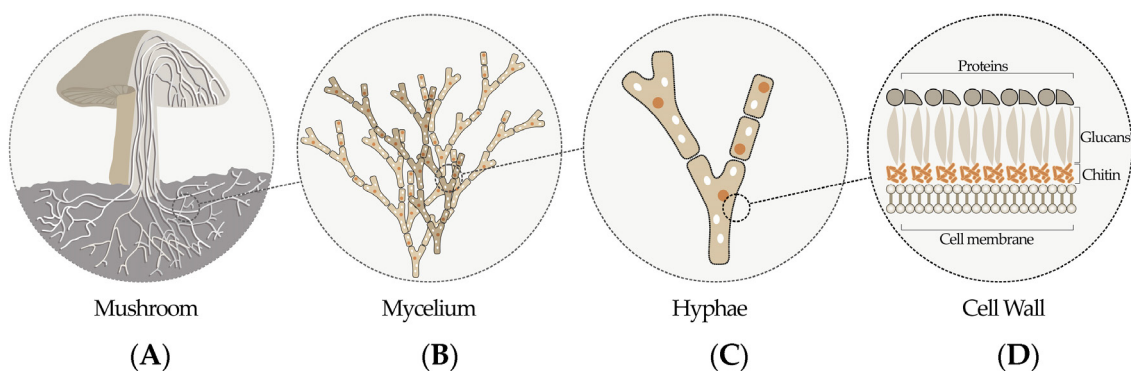


Figura 3. Struttura gerarchica del micelio: (A) corpo fruttifero del fungo; (B) rete di ife che costituisce il micelio; (C) struttura ramificata delle ife; (D) parete cellulare fungina, composta da chitina, beta glucani e proteine. Fonte: Mohseni, A., et al. (2023) [8].

I funghi presentano un comportamento eterotrofo, incapaci di sintetizzare autonomamente le proprie sostanze nutritive, dipendendo dall'assimilazione di composti organici dall'ambiente circostante. Ciò li differenzia dal comportamento autotrofo dalle piante, che attraverso la fotosintesi clorofilliana, sintetizzano composti organici a partire da sostanze inorganiche, come anidride carbonica e acqua.

L'estensione della rete ifale consente di assorbire nutrienti semplici come glucosio o saccarosio attraverso la parete cellulare. Diversamente, composti più complessi e insolubili come cellulosa, emicellulosa e lignina, vengono degradati grazie alla secrezione di enzimi extracellulari, quali:

- cellulasi, responsabile della digestione della cellulosa, degradando in glucosio
- emicellulasi, che degradano l'emicellulosa in zuccheri semplici
- ligninasi: degradano la lignina, il componente più resistente [9].

Attraverso questi meccanismi i polimeri complessi vengono convertiti in monomeri solubili, facilmente assimilabili dalle ife. Oltre alla funzione trofica, le ife svolgono un ruolo strutturale nel mantenimento dell'integrità della rete miceliare.

Le ife sono costituite da cellule allungate, separate le une dalle altre da pareti trasversali porose chiamate setti, racchiuse all'interno di una parete cellulare tubolare. La parete cellulare è formata da chitina e beta glucani. La chitina è un polisaccaride costituito da unità di N-acetamido e D-glucosamina unite con legami di beta 1,4, in maniera analoga alla cellulosa, come mostrato in figura 4 [10].

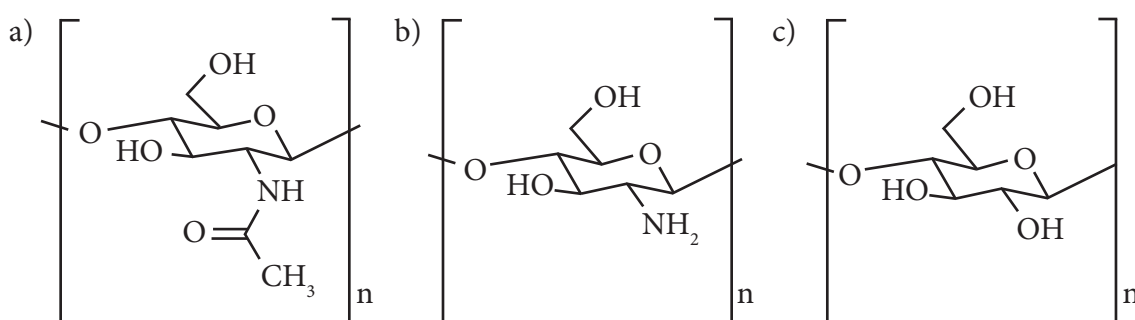


Figura 4. Composizione chimica: a) chitina; b) chitosano; c) cellulosa. Fonte: Jones et al. (2020) [10].

I beta glucani sono polisaccaridi strutturali ramificati, che costituiscono circa il 50-60% della parete fungina. Formano una matrice flessibile che avvolge e collega le microfibrille di chitina. Oltre a questi due componenti, sono presenti anche le proteine, contribuendo alla resistenza meccanica e alla difesa da parte di agenti patogeni [10].

1.2. Processo produttivo dei composti di micelio

Il processo produttivo dei composti in micelio si basa su un processo biologico, in cui il micelio colonizza i substrati organici, trasformandolo in una matrice coesa e compatta.

Tale processo, schematizzato in Figura 5, si articola in diverse fasi (scelta della specie fungina, preparazione e sterilizzazione del substrato, inoculazione, incubazione e trattamento di essiccazione finale), le quali incidono sul risultato finale del composto, in particolare sulle proprietà fisiche e termiche.

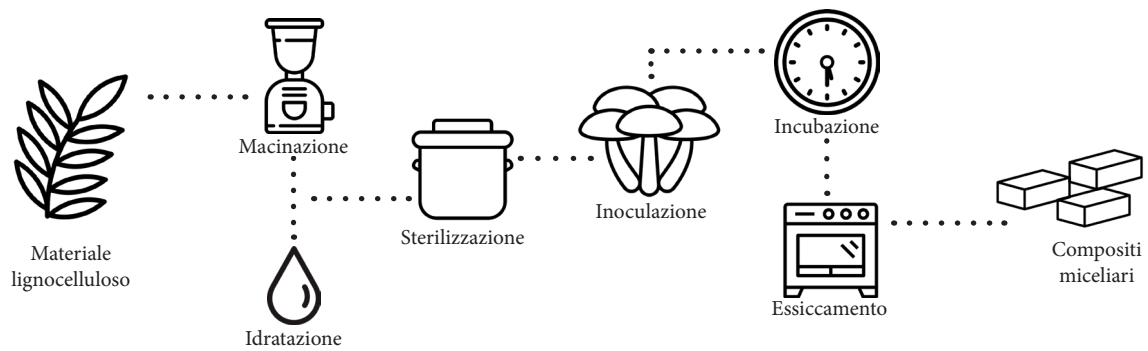


Figura 5. Schema processo produttivo composti in micelio. Fonte: rielaborato da Jones, M., et al. (2020) [10].

Lo scopo di tale processo è quello di controllare lo sviluppo del micelio, a condizioni di temperatura e umidità controllate, così che possa agire da biopolimero naturale, capace di generare un materiale isolante ottimale per le applicazioni in architettura. Il seguente paragrafo ha l'obiettivo di spiegare le diverse fasi del processo produttivo basato sulla produzione di pannelli isolanti.

1.2.1. Scelta della specie fungina

Le ife costituiscono la struttura portante dei composti a base di micelio; pertanto, le loro caratteristiche biologiche influenzano direttamente sia il processo produttivo sia le caratteristiche del prodotto finale. In letteratura sono state riportate circa 36 specie fungine impiegate o menzionate in brevetti per la produzione di materiali a base di micelio.

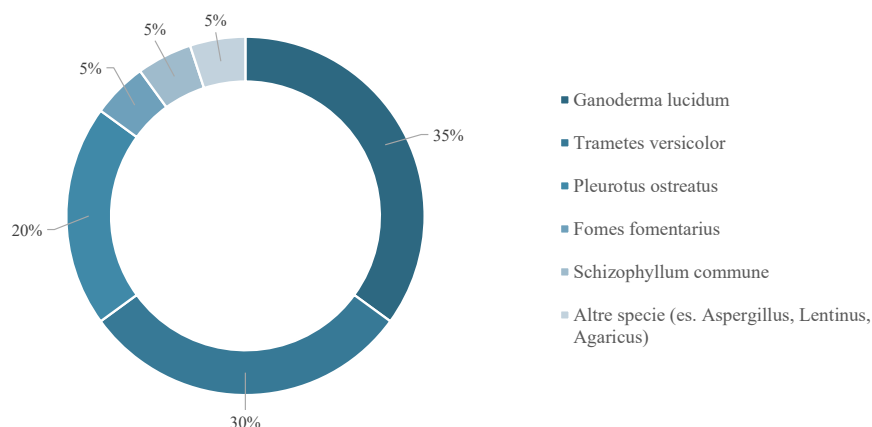


Figura 6. Grafico specie fungine utilizzate. Fonte: rielaborato da Elsacker et al. (2020) [16].

Tra queste, i casi studio analizzati, condotti dagli autori Shritt, H. et al. (2021) [11], De, G. et al. (2025) [12] e Dias, P. et al. (2021) [13], si concentrano su *Ganoderma lucidum* e *T. versicolor*, che, come mostrato dal grafico in Figura 6, rappresentano le specie più utilizzate in letteratura.

La selezione di tali specie deriva da valutazioni sulla condizione di crescita ottimale. Studi comparativi hanno mostrato che la crescita del micelio di *G. lucidum* e *T. versicolor* risulta massima in un intervallo di temperatura compreso tra 25-30°C. Inoltre, la crescita di tali funghi è stata valutata su diversi substrati per capire la loro differenza di colonizzazione: *T. Versicolor* mostra una crescita costante su tutti i substrati (segatura di faggio e di betulla, segatura di faggio e di betulla integrata con nutrienti) raggiungendo una crescita di 7,4 - 11,8 mm/giorno. *G. lucidum*, invece, mostra una crescita ottimale solo sul substrato di segatura di faggio. [11]

Un ulteriore criterio di selezione è legato alla capacità di entrambe le specie, appartenenti ai funghi ligninolitici del marciume bianco, di degradare cellulosa ed emicellulosa presenti nei substrati comunemente utilizzati (paglia, segatura, residui agricoli). Tale caratteristica incrementa la porosità del materiale attraverso la degradazione delle pareti cellulari, aumentando i vuoti all'interno. La presenza di una struttura interna porosa permette di intrappolare aria, diminuendo la conduttività termica.

Nonostante queste specie fungine siano le più studiate, la letteratura evidenzia un limite metodologico. I risultati sono stati ottenuti in condizioni ambientali e substrati differenti, rendendo difficile stabilire criteri di selezione universali che possano essere comparabili tra le specie. Inoltre, si evince come la scelta del fungo debba essere fatta in relazione al tipo di substrato, facendo intendere che non esista una specie fungina valida per tutti i substrati.

1.2.2. Scelta e preparazione del substrato

I seguenti autori Shritt, H. et al. (2021) [11], De, G. et al. (2025) [12] e Dias, P. et al. (2021) [13] hanno condotto prove sperimentali in laboratorio su differenti matrici lignocellulosiche, tra cui fibra di cocco, la segatura di betulla e di faggio e fibre di miscanto, al fine di valutare l'idoneità di tali substrati con la crescita miceliare.

Nei casi studio analizzati, i substrati sono sottoposti a processi preliminari di macinazione mediante mulino, con l'obiettivo di ottenere una granulometria uniforme e adeguata alla colonizzazione miceliare.

È stato osservato come la dimensione della granulometria sia un parametro che incide sulle prestazioni finali del composito. Infatti, Zhang, Y. et al. (2023) [14] hanno dimostrato come la segatura di betulla con granulometria di 2-10 mm, rispetto alla segatura di faggio (0,2 - 0,8 mm), determini valori di conduttività termica inferiore. Tale effetto è attribuibile alla maggior porosità generata dalle particelle grossolane, le quali favoriscono sia la formazione di vuoti interstiziali colmi d'aria sia una propagazione più agevole delle ife.

Parallelamente, gli studi hanno evidenziato come i substrati arricchiti con additivi naturali a base di crusca di frumento, farina di frumento o supplementi nutritivi a base di lievito e malto, aumentino la crescita miceliare.

Dalla letteratura analizzata si evince come la giusta scelta del substrato e della granulometria sia importante per la velocità di crescita del micelio, ma anche per il prodotto finale. Tuttavia, una granulometria grossolana, nonostante favorisca una maggiore porosità, può compromettere la colonizzazione omogenea del micelio. Analogamente, l'aggiunta di nutrienti potrebbe introdurre un limite rispetto alla scalabilità industriale del prodotto: la richiesta di risorse aggiuntive comporterebbe un maggior uso di risorse, alterando la circolarità del prodotto, basata sull'impiego esclusivo degli scarti agricoli. Ne emerge quindi l'importanza di valutare tali scelte non solo in relazione alle prestazioni tecniche, ma anche in funzione ad un bilancio tra sostenibilità economica ed ambientale.

1.2.3. Sterilizzazione del substrato

La presenza di microrganismi competitivi all'interno del substrato può limitare il tasso di colonizzazione della specie fungina, compromettendo la qualità del prodotto finale. Per tale motivo, la letteratura concorda sulla necessità di sottoporre il substrato a processi di sterilizzazione prima dell'inoculazione miceliare. I trattamenti comunemente impiegati includono metodi termici quali la bollitura in acqua e la sterilizzazione in autoclave a parametri di temperatura e pressioni controllati [10].

Nei tre casi studio presi in esame (Shritt, H. et al. (2021) [11], De, G. et al. (2025) [12], e Dias, P. et al. (2021) [13], i substrati sono stati trattati sia tramite sterilizzazione in autoclave sia tramite bollitura. Tuttavia, tali lavori non approfondiscono in modo sistematico le motivazioni tecniche che hanno guidato tale scelta.

A supporto, Atila, F. et al. (2016) [15] ha valutato l'efficacia di differenti metodi di sterilizzazione sul fungo *Pleurotus ostreatus*: autoclavaggio 121° C per 1,5 h; pastorizzazione tramite bollitura in acqua calda a 60, 80 e 100°C.

I risultati hanno mostrato che il trattamento a 60°C non elimina in maniera efficace i microrganismi contaminanti. La bollitura a 100°C riduce ulteriormente la presenza microbica ma potrebbe comportare la distruzione di microrganismi utili al processo. Il trattamento a 80°C si è rivelata un compromesso ottimale, poiché garantisce un sufficiente abbattimento della carica microbica mantenendo al contempo una resa paragonabile a quelle ottenute in autoclave ma a costi energetici inferiori.

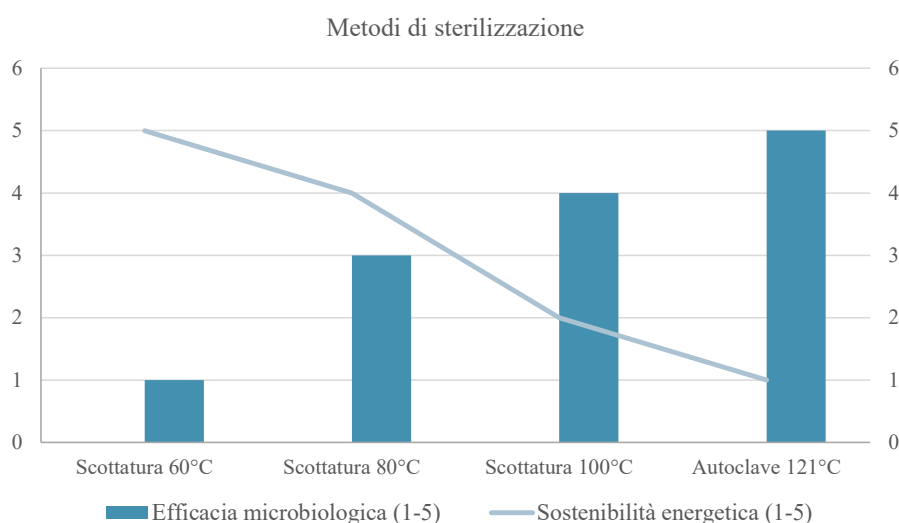


Figura 7. Confronto metodi di sterilizzazione e la relativa sostenibilità energetica. Fonte: elaborazione propria su dati tratti da Atila, F. et al. (2016) [15].

Come riportato nel grafico in Figura 7, sebbene i metodi di autoclave e di bollitura siano i più utilizzati, portano con sé delle criticità importanti. L'utilizzo dell'autoclave è uno dei metodi più efficaci ma allo stesso tempo comporta un consumo energetico elevato, contrastando la sostenibilità del materiale naturale. Analogamente, la bollitura, nonostante sia meno energivora, richiede un'elevata quantità di acqua.

L'assenza di linee guida rende difficile valutare quale metodo possa garantire un miglior compromesso tra efficacia microbiologica e sostenibilità ambientale.

1.2.4. Inoculazione e riempimento del substrato

Il processo di inoculazione fa riferimento al trasferimento dell'inoculo del micelio (spawn) precedentemente prodotto, all'interno del substrato sterilizzato.

La produzione dello spawn si avvia ponendo una spora fungina in coltura su un terreno agarizzato, un ambiente controllato e sterile ricco di nutrienti. Raggiunto un adeguato livello di crescita, il micelio viene trasferito su un substrato intermedio di cereali (grano, segale o miglio) fornendo una matrice ricca di carboidrati che facilitano la colonizzazione del micelio. Successivamente lo spawn ottenuto viene inoculato nel substrato lignocellulosico definitivo, dove il micelio continua il suo processo di colonizzazione fino a raggiungere una coesione strutturale del composito. [16]

Secondo gli studi Shritt, H. et al. (2021) [11], De, G. et al. (2025) [12] e Dias, P. et al. (2021) [13], la percentuale di spawn inoculato nel substrato è pari al 10%. Il procedimento viene eseguito miscelando, all'interno di un sacchetto di plastica, substrato e spawn, al fine di ottenere un composto omogeneo. Successivamente, la miscela viene inserita all'interno di appositi stampi, scelti in funzione della forma che si vuole ottenere per il prodotto finale.

1.2.5. Incubazione

La fase di incubazione consente la completa colonizzazione del substrato da parte delle ife. Le condizioni ambientali (temperatura e umidità relativa) in questa fase non sono universali, ma variano in funzione sia della specie fungina sia della natura del substrato, influenzando i tempi di crescita e la qualità del composto finale.

L'incubazione dei campioni dei diversi casi studio (Shritt, H. et al. (2021) [11], De, G. et al. (2025) [12] e Dias, P. et al. (2021) [13]) è avvenuta in condizioni di buio, impostando un'umidità relativa tra l'80% e il 90%, a una temperatura controllata tra 20°C e i 24°C. Questi parametri sono stati impostati in base al fungo e al substrato utilizzato.

Nel complesso, questi risultati mettono in evidenza come la fase di incubazione non possa essere un parametro standardizzato. Al contrario, risulta essere fortemente condizionata dalla specie fungina e dal substrato utilizzato.

1.2.6. Essiccamento

A maturazione avvenuta, i compositi a base di micelio vengono sottoposti a trattamento termico al fine di inattivare l'organismo e ridurre i contenuti di umidità dei compositi prodotti. Dalla letteratura (Shritt, H. et al. (2021) [11], De, G. et al. (2025) [12] e Dias, P. et al. (2021) [13]) emerge che, per la produzione di pannelli isolanti, il metodo più diffuso è l'essiccamento in forno ventilato a temperatura compresa tra 60°C e 80°C per un intervallo di tempo compreso tra 12 e 24 ore. Questo permette al prodotto finale di mantenere la porosità al suo interno ed eliminare l'umidità in eccesso.

In alternativa, la pressatura a caldo è efficace per migliorare le proprietà meccaniche del materiale. Tuttavia, è un metodo che non risulta essere idoneo quando si tratta di isolanti, in quanto la compattazione riduce la porosità con conseguente peggioramento delle prestazioni termiche. [12]

Nonostante l'essiccamento in forno sia ottimale per tutelare le prestazioni termiche degli isolanti in micelio, essa comporta un dispendio energetico, rischiando di ridurre il vantaggio ambientale. D'altra parte, la pressatura a caldo se usata per l'ottenimento di isolanti, riduce la porosità, compromettendo la funzione primaria del pannello isolante. Emerge quindi una criticità dovuta alla mancanza di un processo standardizzato capace di coniugare efficienza meccanica e prestazioni termiche.

1.3. Conclusioni del processo produttivo

L'analisi del processo produttivo evidenzia come ogni fase incida sulle caratteristiche finali del prodotto, facendo intendere la difficile standardizzazione del processo. Questa criticità potrebbe ostacolare la diffusione su larga scala, in quanto la forte dipendenza da parametri biologici ne limita la ripetibilità e la prevedibilità.

Inoltre, alcune fasi, come la sterilizzazione e l'essiccamento, definiti energivori e consumatori di grande quantità di acqua, introduce una contraddizione tra la sostenibilità del materiale e le prestazioni ottenute.

CAPITOLO 2 – I compositi in micelio come isolante termico

2.1. Introduzione

Il seguente capitolo ha l'obiettivo di analizzare le diverse prestazioni e i diversi parametri termici richiesti per l'applicazione del pannello in micelio come isolante termico. In particolare, sono state analizzate la densità, la conducibilità termica, il comportamento al fuoco, l'assorbimento all'acqua e la porosità strutturale.

2.2. Densità

La densità apparente degli isolanti a base di micelio è stata calcolata rapportando la massa secca e il volume del composito.

$$\rho = \frac{m}{v} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Dalla letteratura, la densità dei campioni è stata valutata dopo la fase di essiccamento, permettendo di ottenere valori più rappresentativi del materiale secco. Il calcolo è stato eseguito pesando campioni su una bilancia e calcolandone il volume. I risultati che sono stati riportati sono i rispettivi:

- 183,2 kg/m³ per substrati di segatura di faggio; [11]
- 170 kg/m³ per i compositi a base di fibra di cocco; [12]
- 158 kg/m³ per campioni a base di miscanto. [13]

La diversità di questi valori dipende dal tipo di substrato utilizzato e dal tempo di crescita della specie fungina.

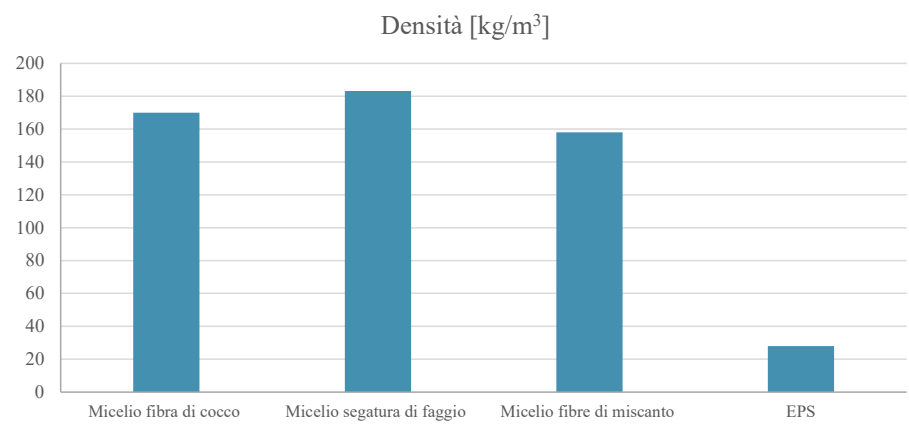


Figura 8. Densità dei diversi materiali. Fonte: elaborazione propria sulla base dei dati tratti da Schritt, H. et al. (2021) [11], De, G. et al. (2025) [12], Dias, P. et al. 2021 [13].

Se confrontato con il valore di densità di 15 kg/ m³, riportato dell'EPD di Isolconfort Srl (2017) [17] del polistirene espanso (EPS), i valori dei compositi di micelio risultano più elevati. Ciò deriva dal fatto che le ife del micelio, una volta colonizzate, formano una rete che genera una matrice solida e compatta, a differenza dell'EPS che invece è molto leggero perché formato dal 98% di struttura porosa.

2.3. *Conduttività termica*

La conduttività termica è un parametro fondamentale per definire un materiale isolante, in quanto misura la capacità di un materiale di resistere al passaggio del calore. Un materiale isolante viene definito tale se possiede una conducibilità termica < 0,1 W/mK. Tale valore, pur non esplicitato dalla norma UNI ISO 10456:2008, rappresenta un parametro di riferimento, utilizzato per distinguere i materiali che limitano la conduzione dai materiali con comportamento conduttivo.

Dalla letteratura, il metodo maggiormente utilizzato per la misurazione delle proprietà termiche è il metodo SRLL (Single Specimen with Reduced Lateral Losses), attraverso un dispositivo che richiede di disporre il campione tra due piastre, una di riscaldamento e una di raffreddamento, isolando le facce laterali per garantire un flusso di calore unidirezionale. Nei casi studio analizzati (Shritt, H. et al. (2021) [11], De, G. et al. (2025) [12] e Dias, P. et al. (2021) [13]), attraverso il metodo SRLL viene misurata la resistenza termica (R); dividendo tale valore per lo spessore del pannello (s), si ricava il valore di conducibilità termica (λ), tramite la seguente formula:

$$\lambda = \frac{s}{R} \left[\frac{W}{mK} \right]$$

La scelta di utilizzare il metodo SRLL per definire la conducibilità termica, è dettata dal fatto che i campioni miceliari, prodotti su scala di laboratorio, presentano spessori non standardizzati, che non garantirebbe un valore diretto per la conducibilità termica affidabile.

Dunque, dall'analisi di questi test, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- 0,035 W/mK per il composito di micelio su substrato di fibra di cocco [11];
 - 0,04 W/mK per il composito di micelio su substrato di segatura di faggio [12];
 - 0,06 W/mK per il composito di micelio su substrato di fibre di miscanto [13];
- Tali risultati confermano la competitività rispetto al polistirene espanso, con una conducibilità pari a 0,036 W/mK [17].

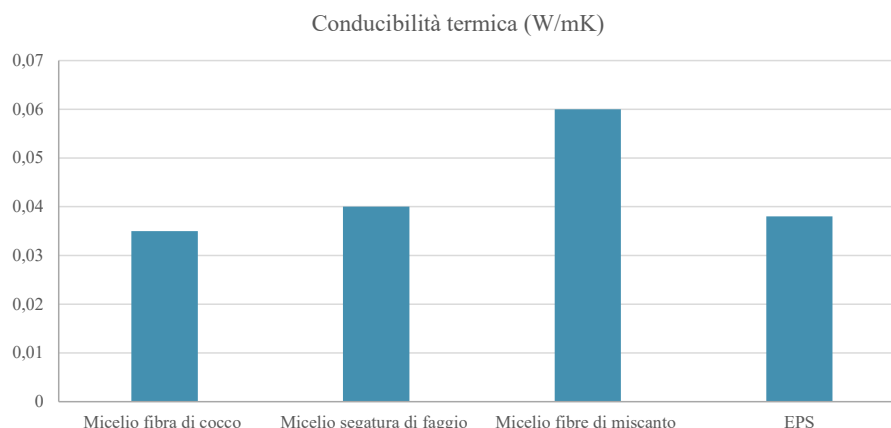


Figura 9. Conduttività termica dei diversi materiali. Fonte: elaborazione propria sulla base dei dati tratti da Schritt et al. (2021) [11], De et al. (2025) [12], Dias et al. 2021 [13].

Significativo è notare come la densità apparente dei compositi miceliari risulti superiore rispetto all'EPS, poichè i compositi a base di micelio presentano una maggiore frazione solida all'interno del materiale. Nonostante questo, la conducibilità termica risulta essere comparabile all'EPS, in quanto la rete ifale forma una matrice tridimensionale porosa, caratterizzata da una significativa frazione di aria intrappolata e da percorsi solidi discontinui, che limitano il trasferimento di calore per conduzione. Per questo motivo, nonostante una densità apparente maggiore rispetto all'EPS, la conducibilità termica risulta comparabile a quella degli isolanti sintetici.

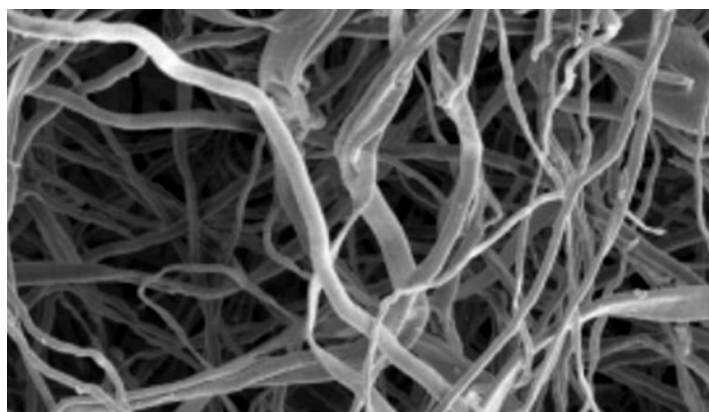


Figura 10. Micrografia SEM del micelio. Struttura tridimensionale della rete ifale. Fonte: Olivero et al. (2023) [30].

Questo comportamento è possibile anche notarlo nell'EPS, in quanto se si aumenta la densità di esso, la conducibilità termica diminuisce. Questo perché la struttura interna dell'EPS è formata dal 98% di pori e vuoti; aumentando la densità questi pori si chiudono, limitando, anche in questo caso, la propagazione del calore per conduzione. [18]

2.4. Comportamento al fuoco

2.4.1. Reazione e resistenza al fuoco

Nel settore edilizio, la sicurezza antincendio viene misurata attraverso due parametri: reazione al fuoco e resistenza al fuoco. Per valutarli, si fa riferimento alla norma europea EN 13501 che definisce un sistema unificato per la classificazione della reazione e della resistenza al fuoco dei prodotti da costruzione e degli elementi edilizi [19] [20].

La norma EN 13501-1 si riferisce alla reazione al fuoco, ovvero l'indice di partecipazione di un materiale nelle prime fasi di un incendio. Per questo parametro, la norma, come indicato dalla Tabella 1, prevede una classificazione riferita al grado di infiammabilità indicato con lettere da A (non combustibile) a F (combustibile), con classificazioni aggiuntive per la produzione di fumo (s1-s3) e gocce infuocate (d0-d2).

Classe	Descrizione
A1	Materiale non combustibile
A2	Contributo al fuoco molto limitato
B	Crescita del fuoco molto limitata; buone prestazioni antincendio, ma possibile un certo contributo
C	Contributo all'incendio limitato
D	Prestazione antincendio accettabile; contributo moderato all'incendio
E	Prestazioni di base; in grado di resistere a una fiamma small per un breve periodo di tempo
F	Nessuna prestazione determinata

Tabella 1. Classi di reazione al fuoco. Fonte: rielaborato da [21].

D'altra parte, la norma EN 13501-2 fa riferimento alla resistenza al fuoco, ovvero la capacità di un elemento costruttivo di mantenere la sua stabilità strutturale, l'integrità e l'isolamento termico per un determinato lasso di tempo durante l'incendio. A questo parametro fa riferimento la sigla REI, dove "R" indica la resistenza meccanica, "E" basata sulla produzione delle fiamme e "I" che indica la riduzione della trasmissione di calore. Quando si parla di materiali isolanti e si vuole verificare la loro resistenza al fuoco, si tengono in considerazione solo i criteri E (tenuta) ed I (isolamento termico).

Inoltre, la sigla REI segue numeri che vanno da 10 a 360 espressi in minuti. Questi indicano il tempo entro il quale sono in grado di mantenere la loro caratteristiche prestazionali.

2.4.2. Metodi di prova.

Per determinare il comportamento al fuoco di un materiale, in particolare la reazione e la resistenza termica, ci si avvale di test che permettono di decretarne i risultati. In particolare, i test comunemente utilizzati, specialmente su scala di laboratorio, come si leggerà del paragrafo successivo, fanno riferimento alle norme UNI EN ISO 11925-2:2020 e alla ISO 5650.

Entrambe le norme fanno riferimento alla reazione al fuoco. La UNI EN ISO 11925-2:2020 [22] determina l'accendibilità dei prodotti con l'impiego di una fiamma sulla superficie verticale di un provino per 15 o 30 secondi. La normativa ISO 5660 è uno standard che si avvale dell'uso del cono calorimetro (Figura 11) che misura il calore sviluppato e altri parametri durante la combustione, quali:

- Tasso del rilascio di calore (H.R.R.): quantità di calore liberato per unità di tempo durante la reazione di combustione.
- Rilascio di fumo: quantità di fumo prodotta durante una combustione.
- Tempo di accensione: periodo tra l'inizio del riscaldamento di un materiale e il momento in cui inizia a bruciare.
- Sviluppo di monossido di carbonio e anidride carbonica. [23]

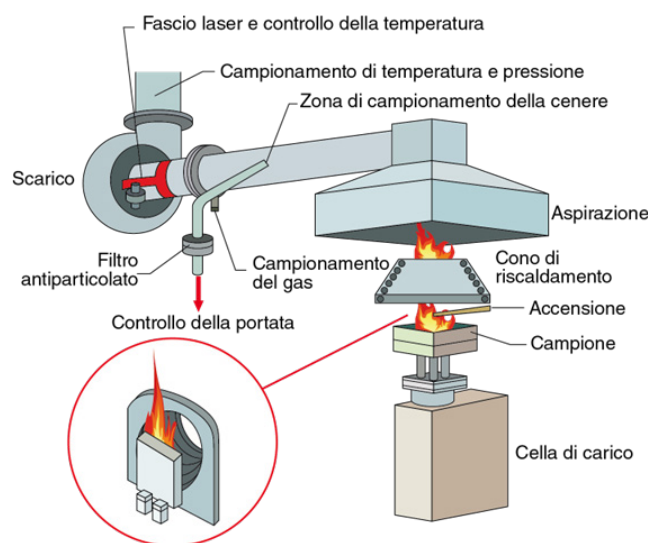


Figura 11. Schema di funzionamento del cono calorimetro. Fonte: <https://www.plastix.it/come-lantifiamma-ideale/>

2.5. Comportamento al fuoco dei compositi in micelio

Per valutare il comportamento al fuoco dei compositi in micelio, i diversi autori, De, G. et al. (2025) [12] e Dias, P. et al. (2021) [13], hanno condotto alcuni test tramite l'uso di una fiamma ossidrica, lasciata in azione per circa 15 secondi. Questa operazione viene fatta per poco tempo per i materiali di classe di reazione al fuoco bassa, ovvero classe E, mentre per i materiali di classe più alta come B, C e D, la fiamma viene lasciata in azione per circa 30 secondi.

Il risultato che è stato ottenuto è che i pannelli in micelio a contatto con il calore formano uno strato di materiale carbonioso (Figura 12), come succede per il legno, in grado di non propagare la fiamma. La formazione di tale strato è data dalla chitina che promuove la formazione di uno strato protettivo di carbone di micelio. Questo strato è resistente al calore e all'ossigeno, riducendo la diffusione di fiamma. Inoltre, le proteine e i glucani nel micelio forniscono ulteriori fonti di strato di materiale carbonioso, limitando il rilascio diretto di gas combustibili e aumentando la resistenza al fuoco.

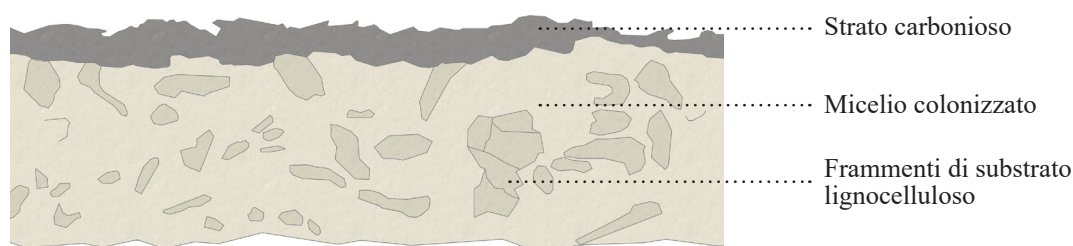


Figura 12. Formazione materiale carbonioso in superficie. Fonte: rielaborato da Jones et al. (2017) [24].

Per testare la reazione al fuoco, gli stessi autori hanno condotto dei test di infiammabilità per comprenderne la sicurezza antincendio. Lo studio condotto dall'autore De et al. (2025) [10] ha eseguito il test utilizzando una torcia a butano antivento seguendo lo standard di prova DIN EN 13501-1. La normativa prevede di esporre i materiali alla fiamma per 40 secondi per determinare la classe. L'area bruciata è stata misurata così come la profondità di penetrazione. Da qui sono stati riscontrati i seguenti risultati: aree bruciate 920 mm² con una profondità di penetrazione di 5 mm. Interessante osservare come i film di micelio abbiano ritardato l'accensione sulla superficie.

L'autore Dias, P. et al. (2021) [13] invece ha effettuato due prove: una posizionando il pannello in micelio senza intonaco (Figura 13) e una con intonaco (Figura 14).

Entrambi sono stati sottoposti a fiamma ossidrica con un batuffolo di cotone posto al di sopra della piastra. Il primo campione, quello senza intonaco, è stato sottoposto a una durata di 40 minuti e alla fine di questi si è notato un'apertura sulla parte superiore della piastra.

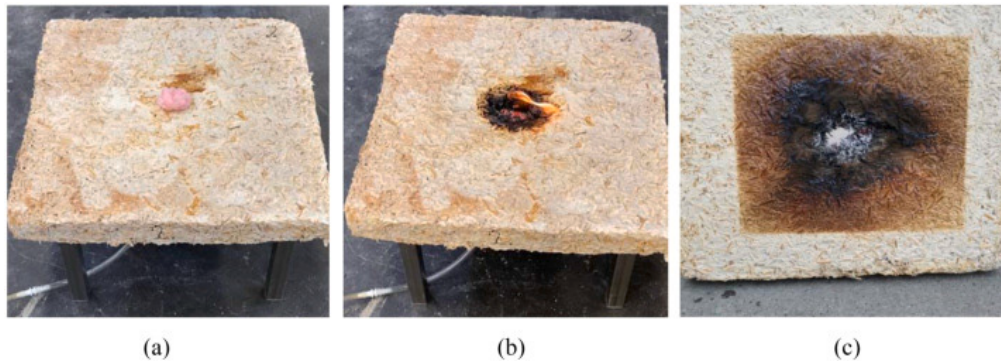


Figura 13. Lastra senza intonaco sottoposta a prova di incendio: (a) prima dell'inizio della combustione; (b) dopo 40 minuti; (c) parte inferiore della lastra dopo 40 minuti. Fonte: Dias et al (2021) [13].

La stessa procedura è stata eseguita con un pannello ricoperto da intonaco, esponendola a fiamma per 1 ora e 10 minuti. Il campione non ha dimostrato alcuna combustione perché il fuoco non ha attraversato la piastra. Tuttavia, il fondo risulta essere bruciato. Questo test antincendio ha permesso di collocare il micelio-miscanto nella classe di resistenza al fuoco EI15.

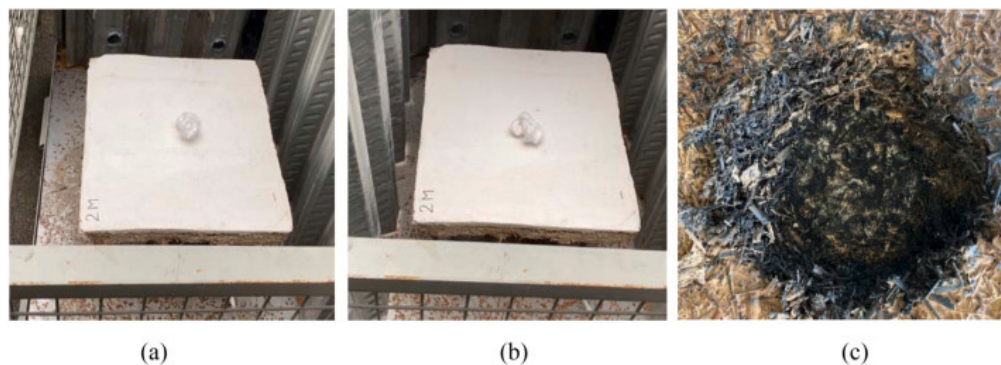


Figura 14. Lastra con intonaco sottoposta a prova di fuoco: (a) prima della combustione; (b) dopo 1 ora e 10 minuti; (c) parte inferiore della lastra dopo 1 ora e 10 minuti). Fonte: Dias et al. (2021) [13].

Analogamente, lo studio condotto da Jones, M. et al. (2017) [24] si è concentrato sulla valutazione dei parametri di reazione al fuoco del micelio. Per la valutazione di tali valori, l'analisi è stata condotta con un calorimetro a cono a un flusso di calore pari a 50 kW/m^2 , da cui sono emersi i seguenti risultati (Tabella 2) rispetto a: tempo di

accensione, velocità massima di rilascio di calore, rilascio totale del calore, velocità massima di emissione di calore e rilascio totale di fumo.

Tempo di accensione (s)	PHRR (kW/m ²)	THR (MJ/m ²)	MARHE (kW/m ²)	Resa media di CO
7	133	45	87	0,04

Tabella 2. Parametri test reazione al fuoco compositi in micelio. Fonte: rielaborato da Jones M. et al. (2017) [24].

Se si confrontano questi dati con i parametri rispetto all'EPS (Tabella 3), si nota come, attraverso la stessa modalità di prova e con lo stesso flusso di calore (50 kW/m²), i risultati sono i seguenti: [25]

Tempo di accensione (s)	PHRR (kW/m ²)	THR (MJ/m ²)	MARHE (kW/m ²)	Resa media di CO
17	442	12,9	224,35	0,21

Tabella 3. Parametri test reazione al fuoco pannelli in EPS. Fonte: rielaborato da Jones M. et al. (2017) [24].

Dai risultati si evince come il micelio abbia un comportamento al fuoco migliore rispetto all'EPS.

Nonostante il tempo di accensione sia più rapido per il micelio, rilascia molto meno calore. Questo parametro è fondamentale per evitare la propagazione delle fiamme, l'aumento di temperatura all'interno dell'ambiente e una produzione maggiore di gas tossici. Quest'ultimo parametro, in particolare il rilascio di monossido di carbonio e di anidride carbonica è inferiore per il micelio. Tuttavia, è interessante notare come il comportamento del micelio cambi rispetto al tipo di finitura. Infatti, si è visto dalle prove condotte come se si copre un pannello di micelio con l'intonaco, esso è in grado di bruciare molto più lentamente.

2.6. Assorbimento dell'acqua

Quando si parla di un isolante termico, l'idrofobicità rappresenta una proprietà fondamentale, in quanto consente al materiale di respingere l'acqua e prevenire fenomeni di degrado.

Per verificare questa proprietà vengono comunemente utilizzati due test: angolo di

contatto, che valuta la bagnabilità superficiale, e assorbimento in acqua, che determina la capacità del materiale di trattenere acqua in massa.

Gli autori De, G. et al (2025) [12] e Dias, P. et al. (2021) [13] hanno analizzando la capacità di assorbimento d'acqua attraverso immersione dei campioni in acqua per un periodo da 24 a 72 ore, misurando successivamente la variazione di massa e rigonfiamento di spessore. I risultati riportano diversi valori, che variano in funzione della specie fungina, della scelta del substrato e del periodo di incubazione. In generale, è stato riportato che l'assorbimento dell'acqua nei compositi a base di micelio è molto rapida e che porta ad un aumento di peso del 40-580% a contatto con acqua per 48-192 ore.

Lo studio condotto da Gezer, E.D. et al. (2024) [27] ha valutato la capacità di assorbimento dell'acqua dei pannelli di fibra a base di micelio è stata determinata immergendo il pannello in acqua per 72 ore. Si è riscontrato che la percentuale è aumentata rispetto a quella di controllo e che l'assorbimento è stato maggiore nelle prime 24 ore e poi si è stabilizzato (Figura 15).

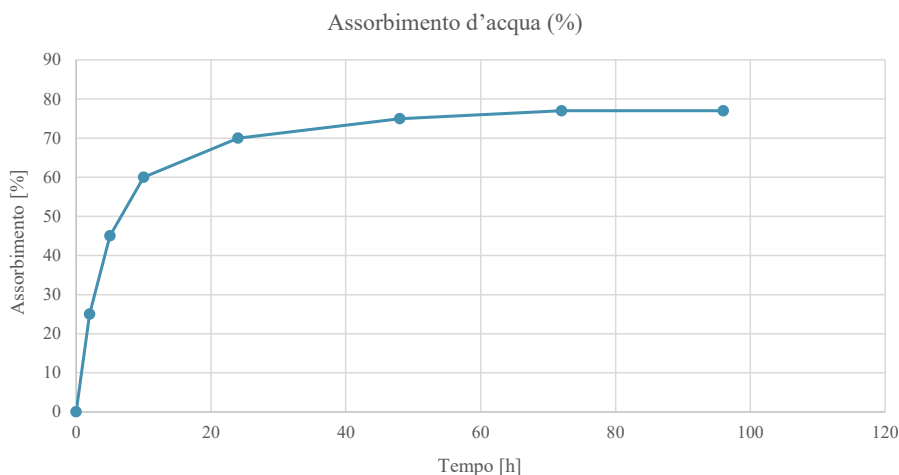


Figura 15. Andamento assorbimento d'acqua nel tempo nei compositi in micelio. Fonte: elaborazione propria sulla base dei dati tratti da De, G. et al (2025) [12], Dias, P. et al. (2021) [13] e Gezer E.D. et al. (2024) [27].

L'elevata capacità di assorbimento nei compositi di micelio è attribuita alla presenza di gruppi ossidrilici (-OH), appartenenti a cellulosa ed emicellulosa, che stabilendo legami a idrogeno con molecole d'acqua, conferiscono al materiale un comportamento idrofilo.

Tuttavia, risultati diversi sono stati ottenuti effettuando il test attraverso l'angolo di contatto, come mostrato in Figura 16. Lo studio De, G. et al. (2025) [12] ha condotto il test mirando a valutare la bagnabilità superficiale del composito. Una goccia di acqua è stata distribuita sulla superficie e ne è stato misurato l'angolo di contatto con un microscopio, considerando che un angolo $> 90^\circ$ definisce un comportamento idrofobo mentre un angolo $< 90^\circ$ un comportamento idrofilo. All'aumentare dell'angolo misurato, aumenta l'idrofobicità.

Il risultato mostra che l'angolo di contatto dell'acqua misurava 133° . Lo stesso test è stato eseguito dallo studio Diaz, P. et al. (2021) [13] ha riportato un angolo di contatto di 129° . Anche in questo studio si nota come la bagnabilità per immersione del pannello aumenta nei primi 10 minuti di immersione e poi tende a stabilizzarsi.

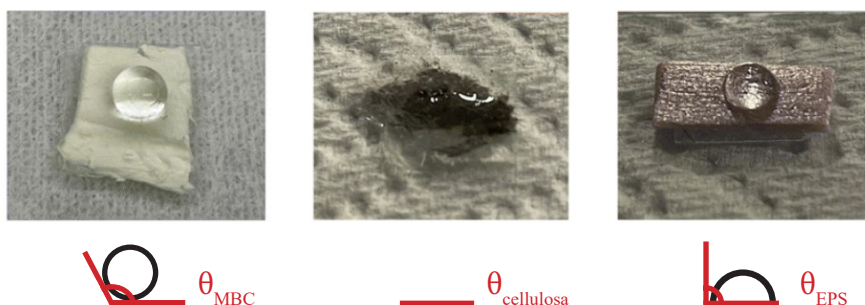


Figura 16. Test angolo di contatto su tre diversi campioni di materiale: da sinistra a destra composito in micelio, cellulosa e schiuma in EPS. Fonte: in parte rielaborato da De et al. (2025) [12]

Il comportamento idrofobico e idrofilo dei compositi in micelio a contatto con l'acqua è dato dalla doppia natura strutturale del micelio. La superficie del composito è costituita da un film di idrofobine, proteine secrete dei funghi, che si autoassemblano nella parete fungina per formare una barriera a bassa energia che respinge l'acqua. [28]

Se confrontato con l'EPS, la norma UNI EN 12087:2013 riporta i valori di assorbimento dell'acqua compresi tra 0,5% e 4% in volume dopo 28 giorni, con un rigonfiamento dimensionale nullo. Questo comportamento è dato dalla struttura a celle chiuse del polistirene espanso che conferisce al materiale una bassa permeabilità all'acqua.

Questo duplice comportamento del micelio rappresenta un limite per l'applicazione di questo materiale come isolante, in quanto il rigonfiamento potrebbe compromettere la conducibilità termica.

2.7. Porosità

La porosità di un materiale, espresso in frazione (ϕ), è definita come il rapporto tra il volume dei pori (V_p) e il volume totale del materiale (V_t).

$$\phi = \frac{V_p}{V_t}$$

Essa rappresenta una caratteristica microstrutturale dei materiali, che esercita una diretta influenza sulle proprietà fisico-chimiche condizionando la resistenza meccanica, la capacità di trasmettere calore o di consentire la circolazione di fluidi. Diversi studi si sono concentrati sulla struttura porosa dei compositi a base di micelio, analizzando il substrato utilizzato, il tipo di fungo impiegato e la crescita di esso.

Dalla letteratura [29] si evince come il fungo *T. versicolor* ha dimostrato una porosità del 93,5% e una densità di 98 kg/m³. Tale risultato è stato attribuito alla riduzione del ritiro volumetrico durante l'essiccamento, effetto ottenuto anche dalle reti miceliari del fungo dominate da ife scheletriche e leganti ad alta resistenza.

Le ife scheletriche e leganti, caratterizzate da pareti spesse, solide e più o meno ramificate, conferiscono al materiale una struttura complessa, determinando un'elevata stabilità meccanica.

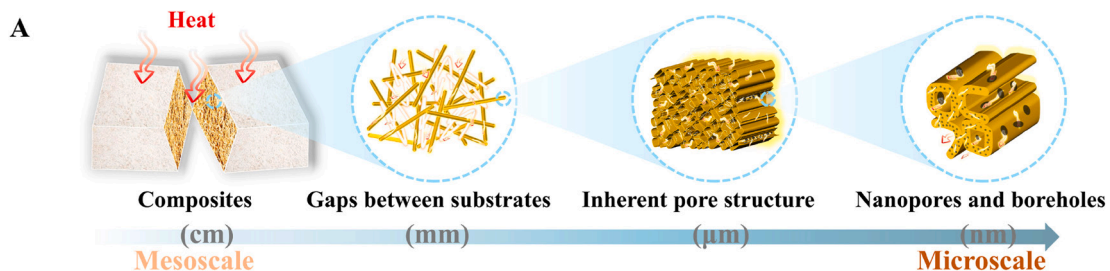


Figura 17. Diagramma schematico sulla struttura porosa gerarchica multiscala dei compositi in micelio. Fonte: riprodotta da Zhang et al. (2023) [14] tramite licenza n. 6187820323049, per la riproduzione dell'immagine 7 (A).

La porosità è dunque influenzata dalla crescita e dalla differenziazione delle ife. Le ife generative sono responsabili della colonizzazione iniziale, creando una rete di filamenti fini e disordinata, che permette all'aria di intrappolarsi facilmente. Le ife generative e scheletriche intervengono nella fase successiva di maturazione. Esse compattano la rete miceliare senza però chiudere i vuoti che si sono formati, ma creano una rete interconnessa di canali che lascia una continua porosità.

Inoltre, la degradazione selettiva delle ife delle pareti cellulari del substrato contribuisce alla formazione della porosità. Dallo studio Zhang, M. et al. (2024) [29] si evince come la degradazione da parte di *T. versicolor* di lignina ed emicellulosa, abbia prodotto vuoti e cavità aggiuntive, incrementando la porosità e riducendo la conduttività termica. A tale effetto, susseguono diversi punti, come:

- l'elevato numero di vuoti tra le particelle del substrato del composito di micelio a bassa densità ha portato una grande quantità di aria e una bassa conduttività termica (0,03 W/mK)
- la complessa disposizione anisotropa del substrato ha limitato il trasferimento del calore
- la presenza di nanofibre e di micropori nella parete cellulare del substrato degradato, aumentano la superficie interna e i percorsi di diffusione termica.

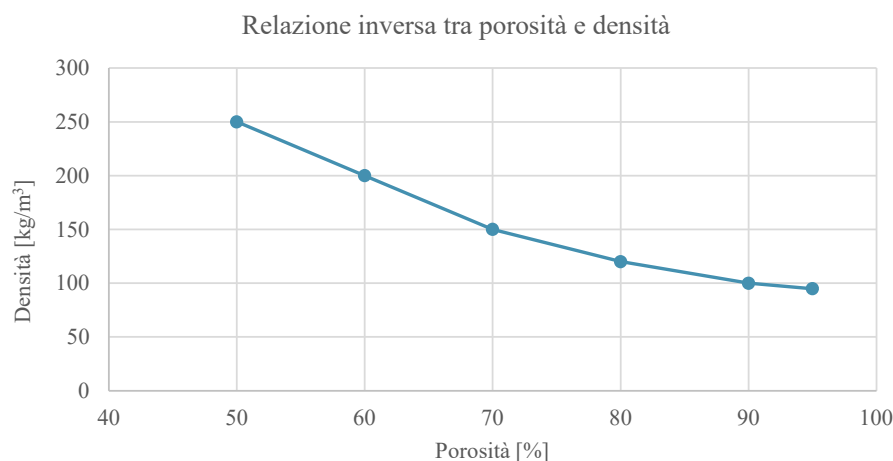


Figura 18. Relazione inversa tra porosità e densità nei compositi in micelio. Fonte: rielaborazione propria sulla base dei dati tratti da Zhang M. et al. (2024) [29].

D'altra parte, lo studio Olivero E. et al. (2023) [30] ha analizzato l'area dei pori e la porosità a diverse profondità di crescita, individuando tre strati: L-1 strato più vecchio, L-2 intermedio e L-3 lo strato più giovane.

Tuttavia, la distribuzione dei pori è differente: hanno osservato che la frazione dei pori dominanti, ovvero la percentuale di pori sul totale, è del 32% nello strato L-3, mentre negli strati più vecchi (L-1 e L-2) aumenta fino al 44% e al 50%.

È stata riscontrata anche una frazione di pori molto piccoli (inferiori a $5,5 \mu\text{m}^2$) negli strati più maturi, raggiungendo il 71%. Questa struttura dimostra come con la crescita del micelio i pori diventino più numerosi ma più piccoli e la rete ifale si compatti. La dimensione piccola dei pori permette al materiale una minore permeabilità all'acqua e un miglior isolamento termico.

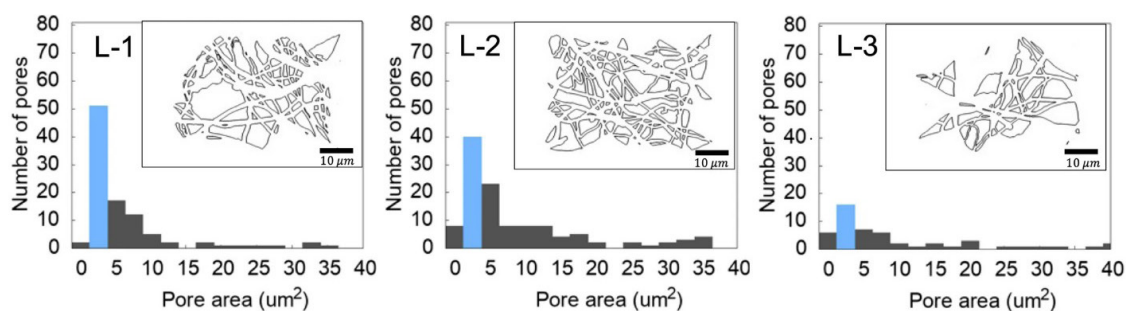


Figura 19. Istogrammi rappresentativi della distribuzione delle dimensioni dei pori per la crescita del micelio più vecchio (L-1), medio (L-2) e più giovane (L-3). Fonte: Olivero et al. (2023) [30].

Questi due studi dimostrano come la porosità del micelio non derivi solo dal processo produttivo come per l'EPS, la cui porosità nasce dall'espansione delle perle di polistirene, ma deriva direttamente dalla biologia del fungo e dalla sua colonizzazione all'interno di un substrato.

CAPITOLO 3 – Confronto tra pannelli in micelio e in polistirene espanso

3.1. Introduzione

L'obiettivo del presente capitolo è valutare il possibile impiego in edilizia dei pannelli isolanti a base di micelio come alternativa al materiale isolante in polistirene espanso (EPS). A tal fine, è stata fatta un'analisi di confronto tra i due materiali, considerando il processo produttivo e i relativi impatti ambientali, i meccanismi di degrado, le proprietà igroscopiche, la resistenza al fuoco, il fine vita e il sequestro di carbonio. Il fine dell'analisi, dunque, è quello di verificare in quali condizioni prestazionali, il materiale a base di micelio possa garantire un livello di prestazione comparabile a quello del materiale sintetico convenzionale.

3.2. Polistirene espanso (EPS): che cos'è

Il polistirene espanso (EPS), comunemente denominato polistirolo espanso, è un materiale rigido, di peso ridotto, composto unicamente da carbonio e, idrogeno. Presenta una struttura cellulare, che arriva ad includere il 98% di aria. È una resina termoplastica ottenuta dalla polimerizzazione dello stirene, un idrocarburo aromatico di derivazione petrolchimica, caratterizzato da un singolo anello benzenico e da un doppio legame C=C.

Il processo di produzione dello stirene ha origine dalla sintesi di etilene e benzene, da cui si ottiene l'etilbenzene (come mostrato in Figura 21); in una fase successiva, quest'ultimo viene sottoposto a deidrogenazione per generare lo stirene. Lo stirene viene dunque polimerizzato per ottenere lunghe catene polimeriche identificate come polistirene. [31]

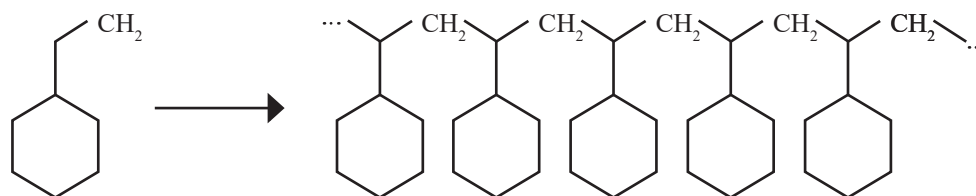


Figura 20. Rappresentazione composizione chimica del polistirene espanso. Fonte: rielaborato da Paoletta, A. et al. (2009) [31].

Dal punto di vista tossicologico, lo stirene presenta rischi per la salute dell'uomo, soprattutto per l'apparato respiratorio. Infatti, viene classificato dall'International Agency for Research on Cancer (IARC) come probabile agente cancerogeno.

3.2.1. Processo produttivo dei pannelli in polistirene espanso

La produzione del polistirene espanso (EPS) ha origine dalla polimerizzazione dello stirene, che viene trasformato in polistirene al fine di creare lunghe catene polimeriche. Durante questa fase viene aggiunto un agente espandente, il pentano, che rimane intrappolato all'interno del polimero. Da questa fase, si ottengono perle di polistirene espandibile.

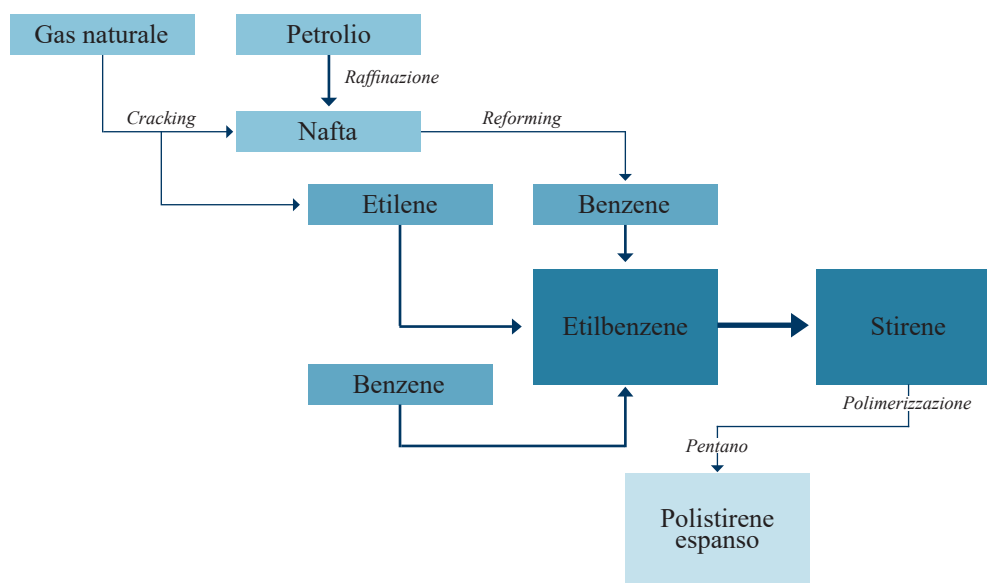


Figura 21. Schema processo di estrazione delle materie prime e trasformazione di esse in stirene. Fonte: rielaborata da AIPE [40].

Successivamente alla polimerizzazione, la produzione dei manufatti in EPS si articola in tre fasi principali, come schematizzato in Figura 22, secondo AIPE [32]:

1. Pre-espansione. Le perle vengono pre-espanso, utilizzando vapore a temperatura a 90°C, in un pre-espansore. A seguito della vaporizzazione, le perle si gonfiano fino a 20-50 volte il loro volume iniziale. In questa fase si forma una struttura a celle chiuse, determinante per le proprietà di isolamento termico.
2. Maturazione. Le perle pre-espanso stazionano in sili arieggiati, dove avviene il raffreddamento e la condensazione dei residui dell'agente espandente e del vapore acqueo all'interno delle celle.
3. Stampaggio. Le perle maturate sono trasformate in manufatti o in semilavorati con diverse modalità. Il processo più diffuso è lo stampaggio a blocchi con successivo taglio in lastre: le perle pre-espanso vengono inserite in apposite blocchiere e sottoposte all'azione del vapore saturo. A 100-120°C si verifica un'ulteriore espansione:

la superficie delle perle diventa adesiva, portando alla saldatura reciproca e sinterizzazione. Raggiunta l'espansione desiderata, i blocchi vengono raffreddati e sformati.

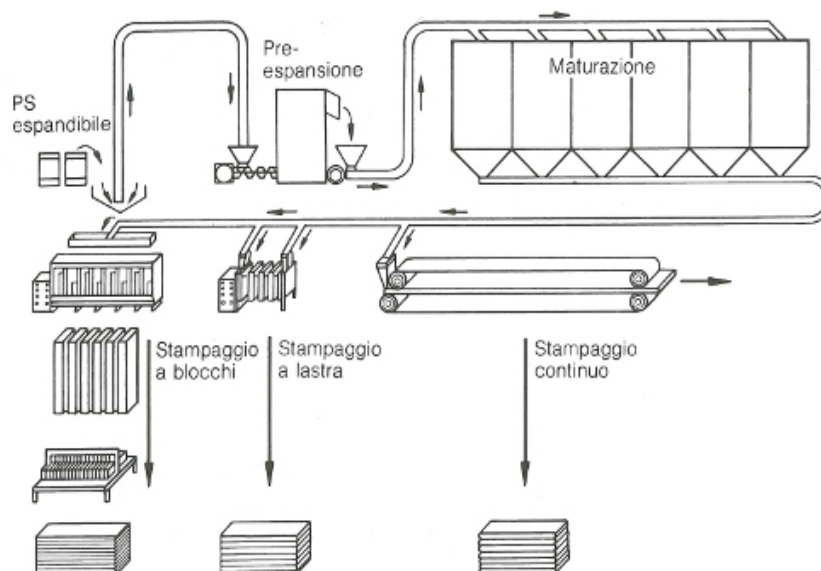


Figura 22. Schema del processo di trasformazione EPS. Fonte: AIPE [32].

3.2.2. L'impiego in edilizia

Accanto all'industria dell'imballaggio, l'edilizia rappresenta il principale mercato dei prodotti plastici. Infatti, l'impiego del polistirene espanso, come illustrato in Figura 23, è suddiviso per il 63% in edilizia per l'isolamento termico, per il 35% nell'imballaggio e per il 2% come altre applicazioni.

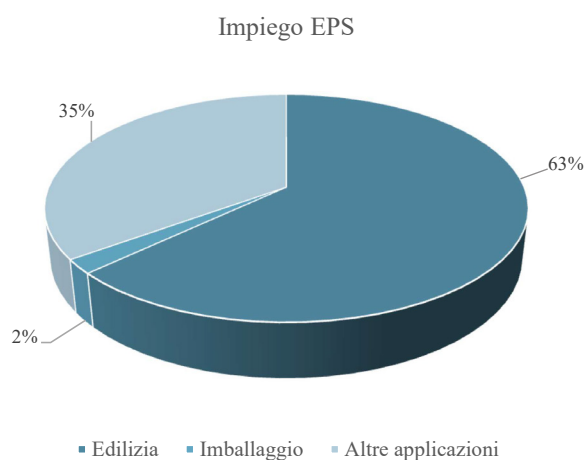


Figura 23. Grafico di illustrazione per l'impiego dell'EPS. Fonte: rielaborato da Paoletta, A., et al. (2009) [31].

L'uso del materiale plastico è dovuto alle prestazioni in termini di leggerezza, resistenza, coibenza ed economicità. L'uso più consistente in edilizia che viene fatto del polistirene espanso è quello di materiale isolante applicato all'involucro delle costruzioni. In particolare, la richiesta di maggiori prestazioni energetiche e gli interventi di retrofit energetico ha stimolato il settore edilizio nell'utilizzo di materiali termicamente isolanti come l'EPS. Inoltre, l'utilizzo del polistirene espanso è dato non solo dalla sua bassa densità e conducibilità termica, ma anche da un conveniente rapporto tra costi e prestazioni.

Le principali applicazioni di questo materiale sono nell'isolamento termico in intercapedini e solai, per la riduzione di ponti termici, e nelle chiusure verticali può essere applicato internamente, oppure accoppiato ad intonaci e lastre, esternamente negli isolamenti a cappotto [31].

3.3. Confronto dell'impatto ambientale tra i pannelli isolanti in micelio ed in polistirene espanso.

Il confronto ambientale tra i pannelli isolanti in micelio e in polistirene espanso (EPS) è stato condotto sulla base di dati tratti dall'analisi di Life Cycle Assessment (LCA).

I pannelli isolanti in micelio non sono ancora supportati da dichiarazioni ambientali standardizzate, e pertanto sono stati considerati studi LCA presenti in letteratura scientifica. Tali studi analizzano le fasi di produzione del materiale, quali preparazione del substrato e la sterilizzazione di esso, crescita e tempi di incubazione ed essiccamento.

In particolare, le principali voci di consumo legate alla produzione secondo gli studi di Volk, R., et al (2024) [33], Alaux, N., et al. (2023) [34], Bagheriehnajjar, G., et al. (2023) [35] sono la sterilizzazione del substrato, l'incubazione, dove i compositi vengono lasciati maturare a condizioni di temperatura e umidità controllate, e l'essiccamento finale dei compositi. Inoltre, è stato analizzato il consumo idrico, associato alla fase di lavaggio e di sterilizzazione del substrato, mentre la perdita di acqua si verifica durante la fase di essiccamento, in cui l'umidità viene rimossa ed evapora.

Per l'EPS, invece, essendo un materiale diffuso e standardizzato, i dati ambientali sono stati ricavati dal documento tecnico EPD [36], considerando i dati relativi alla fase di produzione, corrispondente ai moduli A1-A3 secondo la norma EN 15804, che fanno riferimento all'approvvigionamento materie prime e energie (A1), trasporti fino al cancello dello stabilimento (A2), produzione del pannello, consumi di acqua e materiali ancillari, trattamento dei rifiuti di processo, emissioni in aria, acqua e suolo (A3).

Secondo la letteratura [31] [32], il processo produttivo dell'EPS è caratterizzato da elevata intensità energetica, principalmente nella fase di produzione delle materie prime. In questa fase, l'energia è impiegata per l'estrazione del petrolio e la sua trasformazione in stirene e polistirene espandibile. Inoltre, le emissioni di gas serra derivano sia dall'impiego di combustibili fossili come materia prima, sia dal loro utilizzo come fonte energetica. Ulteriori emissioni di CO₂ derivano dall'utilizzo di un ossidatore termico impiegato per abbattere i composti organici volatili (Volatile Organic CompoundS, VOC) generati dall'agente espandente, il pentano. [31]

Nonostante la diversa origine dei dati, il confronto ambientale tra i due pannelli è stato possibile definendo il confine di sistema di tipo "Cradle to Gate" (dalla culla al cancello). Inoltre, siccome i dati di entrambi i pannelli sono espressi in un'unità diverse, i valori sono stati normalizzati attraverso l'unità funzionale, al fine di ottenere un confronto coerente. È stato definito 1 m² di pannello isolante in grado di fornire una resistenza termica pari a 2 m²K/W. Sono stati assunti valori di conducibilità termica per i compositi in micelio pari a 0,05 W/mK (valore medio ottenuto dalla letteratura [11] [12] [13]) e per l'EPS pari a 0,03 W/mK [36]. Sulla base di questi parametri è stato possibile ottenere lo spessore dei due pannelli, rispettivamente di 0,10 m e di 0,06 m, e successivamente la quantità di materiale richiesto per la realizzazione di 1 m² di pannello isolante.

I valori relativi al polistirene espanso, originariamente espressi per unità di volume (m³), sono stati convertiti attraverso il parametro di conversione riportato nella scheda EPD, pari a 0,0303 m³/m² riferito a una resistenza termica pari a 1, successivamente scalato in funzione dell'unità funzionale. Analogamente, i risultati dello studio LCA per i pannelli in micelio, condotto da Volk, R., et al (2024) [33], riferiti a 1 kg di

substrato di canapa, sono stati convertiti rispetto all'unità funzionale precedentemente descritta.

Infine, il confronto tra i due materiali è stato strutturato secondo l'impostazione delle EPD, considerando gli indicatori relativi alla quantità di energia consumata, alle emissioni di gas serra, agli impatti relativi all'eutrofizzazione ed acidificazione e al consumo idrico.

3.3.1. Energia consumata

Dai risultati tratti dalla letteratura [33], si evince come il consumo di energia associato al processo di produzione, includendo macinazione e sterilizzazione del substrato, incubazione ed essiccamento, risulti pari a 64,99 MJ. Tale valore è inferiore rispetto ai valori dell'EPS che da EPD risultano essere pari a 110,30 MJ.

Questa differenza è attribuibile principalmente alla natura bio-based dei compositi in micelio, che richiedono trattamenti energetici inferiori rispetto al polistirene espanso, la cui produzione richiede l'estrazione del petrolio come materia prima e la sua trasformazione in stirene e polistirene espandibile.

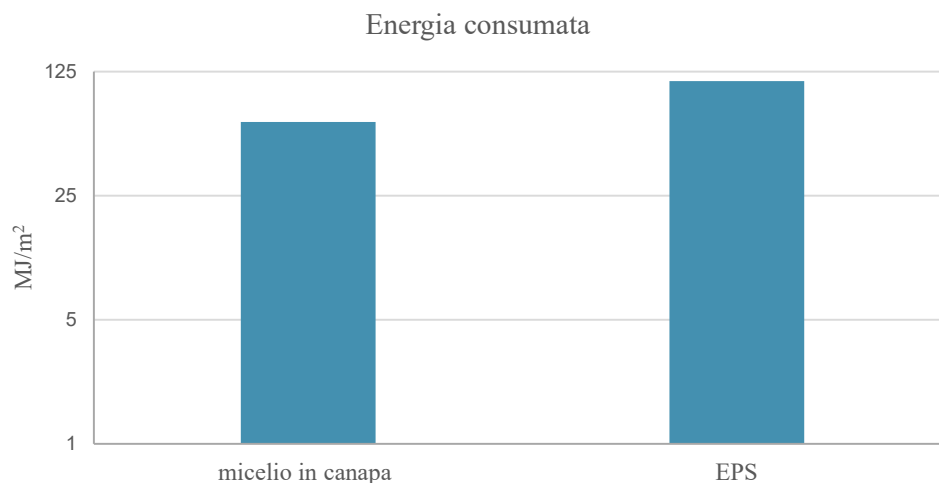


Figura 24. Grafico di confronto sull'energia necessaria per la produzione di compositi miceliare e isolante in polistirene espanso. Fonte: rielaborazione propria tratta dai dati di EPD [36] e Volk, R. et al. (2024) [33].

3.3.2. Emissioni di gas serra (GWP)

I valori relativi al potenziale di riscaldamento globale, espressi in kg CO₂ equivalente, risultano, sia dalla letteratura per i compositi in micelio sia dall'EPD per il polistirene espanso, rispettivamente 6,62 kg CO₂ eq/m² e 7,70 kg CO₂ eq/m². Il motivo di tali risultati è dato dall'uso di elettricità per alimentare i macchinari destinati alla produzione del materiale. [33]

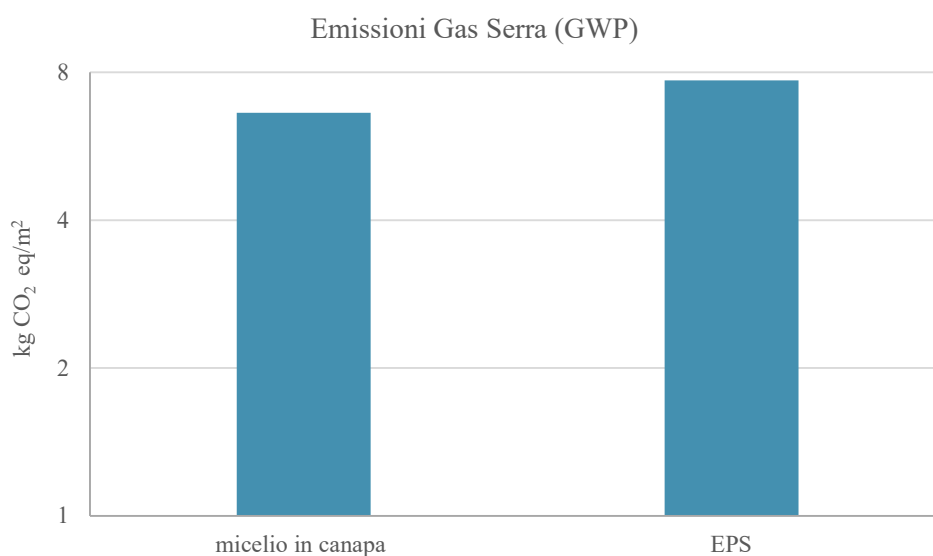


Figura 25. Grafico di confronto sulle emissioni generate dalla produzione di compositi miceliare e isolante in polistirene espanso. Fonte: rielaborazione propria tratta dai dati di EPD [36], Volk, R. et al. (2024) [33].

3.3.3. Acidificazione ed eutrofizzazione

L'analisi rispetto agli impatti di acidificazione e di eutrofizzazione riporta risultati superiori per i compositi in micelio rispetto al polistirene espanso. In particolare, per i compositi in micelio i valori sono pari a 0,147 mol H⁺ eq/m² per l'acidificazione, mentre per l'EPS i valori sono pari a 0,008 mol H⁺ eq/m².

Gli impatti di eutrofizzazione sono stati distinti tra eutrofizzazione acqua dolce, marina e terrestre. Rispetto alle tre categorie, i pannelli in micelio presentano valori pari a 0,034 kg P eq/m² (EP – freshwater), 0,007 kg N eq/m² (EP – marine) e 0,006 mol N eq/m² (EP – terrestrial), mentre l'EPS presenta valori pari a 0,027 kg P eq/m² (EP – freshwater), 0,000 kg N eq/m² (EP – marine) e 0,003 mol N eq/m² (EP – terrestrial).

La differenza tra i valori è attribuibile, oltre all'elettricità che rimane il principale fattore contribuente, anche alla fertilizzazione delle colture con azoto durante il processo biologico, rilasciando nutrienti azotati e fosfatici, diversamente dall'EPS che, essendo un materiale derivante da attività petrolchimica, non contribuisce a questo tipo di emissioni. [33]

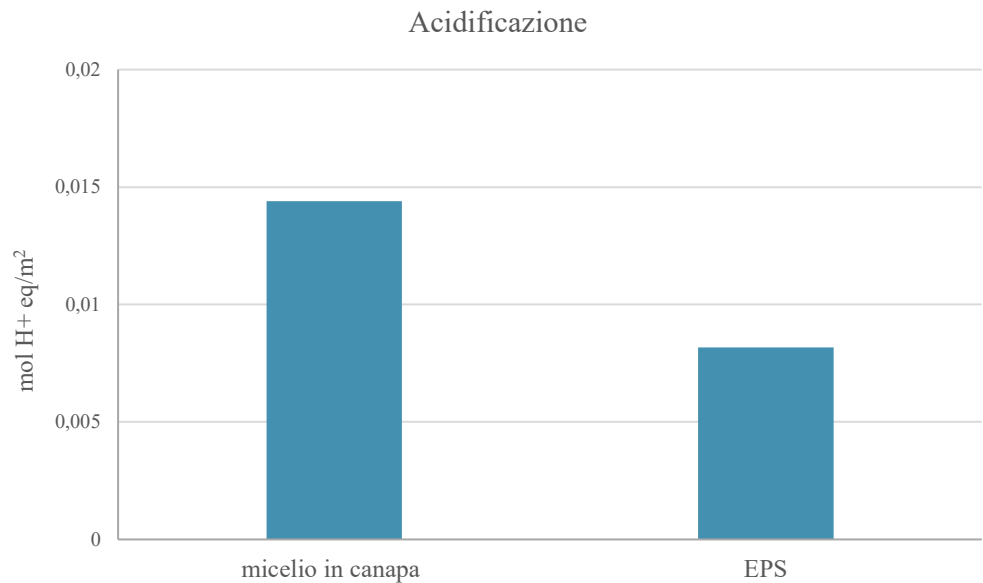


Figura 26. Grafico di confronto sugli impatti di acidificazione generate dalla produzione di compositi miceliari e isolante in polistirene espanso. Fonte: rielaborazione propria tratta dai dati di EPD [36], Volk, R. et al. (2024) [33].

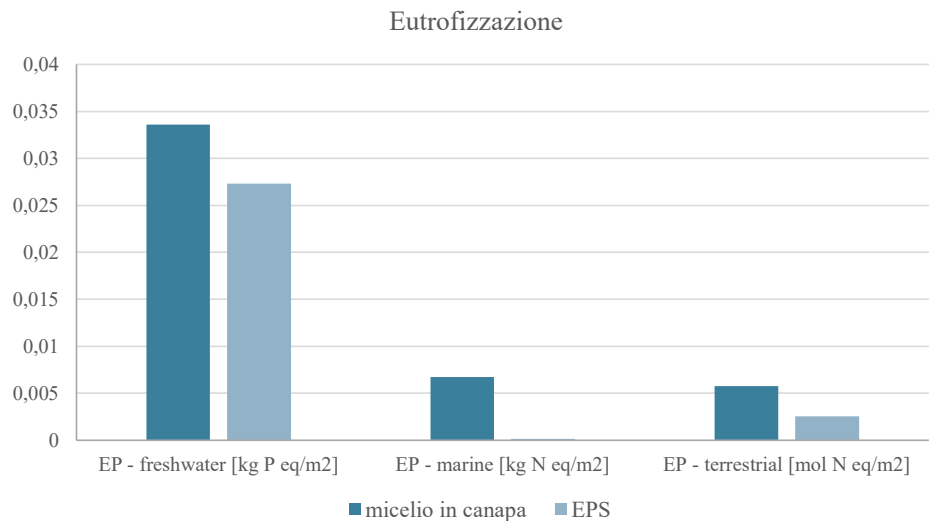


Figura 27. Grafico di confronto sugli impatti di eutrofizzazione generati dalla produzione di compositi miceliari e isolante in polistirene espanso. Fonte: rielaborazione propria tratta dai dati di EPD [36], Volk, R. et al. (2024) [33].

3.3.4. Consumo idrico

I valori riportati rispetto al consumo idrico di acqua per la produzione di compositi in micelio e del polistirene espanso sono rispettivamente pari a 4,03 m³/m² e di 0,88 m³/m².

L'utilizzo di acqua associato al micelio è attribuibile ai processi agricoli, come la coltivazione per la canapa, e ai processi di lavaggio e sterilizzazione del materiale. Al contrario, nel processo produttivo dell'EPS, l'acqua viene utilizzata principalmente per il raffreddamento dei macchinari.

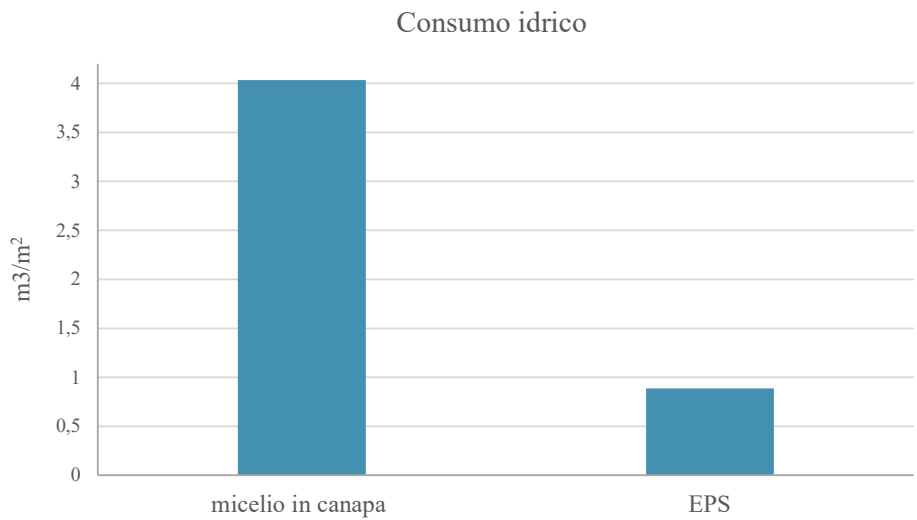


Figura 28. Grafico di confronto sul consumo idrico legato alla produzione di compositi miceliari e isolante in polistirene espanso. Fonte: rielaborazione propria tratta dai dati di EPD [36], Volk, R. et al. (2024) [33].

PANNELLO IN MICELIO			PANNELLO IN EPS		
parametro	unità	A1-A3	parametro	unità	A1-A3
PENRE	MJ	64,99	PENRE	MJ	110,29
GWP	kg CO ₂ eq	6,62	GWP	kg CO ₂ eq	7,70
AP	mol H ⁺ eq	0,01	AP	mol H ⁺ eq	0,01
EP - freshwater	kg P eq	0,03	EP - freshwater	kg P eq	0,03
EP - marine	kg N eq	0,01	EP - marine	kg N eq	0,00
EP - terrestrial	mol N eq	0,01	EP - terrestrial	mol N eq	0,00
WDP	m ³	4,03	WDP	m ³	0,88

Tabella 4. Confronto dei dati relativi gli impatti ambientali generati dalla produzione dei pannelli isolanti in micelio e in polistirene espanso, con impostazione scheda tecnica EPD. Fonte: rielaborazione propria tratta dai dati di EPD [36], Volk, R. et al. (2024) [33]. Legenda: PENRE: uso di energia primaria non rinnovabile escluse le risorse di energia primaria non rinnovabile impiegate come materie prime; GWP: potenziale riscaldamento globale; AP: potenziale di acidificazione; EP-freshwater: potenziale di Eutrofizzazione, frazione di nutrienti che raggiungono i corsi d'acqua; EP-marine: potenziale di Eutrofizzazione, frazione di nutrienti che raggiungono il comparto marino; EP-terrestrial: Potenziale di Eutrofizzazione, eccedenza accumulata; WDP: Potenziale di privazione dell'acqua.

3.4. Confronto sulla durabilità tra pannelli isolanti in micelio e in EPS

3.4.1. Meccanismo di degrado

Come descritto nei capitoli precedenti, i pannelli isolanti a base di micelio sono formati da biomasse derivati da matrici fungine e substrati lignocellulosici, la cui natura li rende sensibili all'attacco biologico. Nonostante il micelio venga inattivato attraverso il metodo di essiccamento, la presenza di substrati lignocellulosici favorisce l'attacco biologico e la formazione di muffe. Dunque, la biodegradabilità, per quanto risulti un vantaggio in ottica di sostenibilità, rappresenta un limite per applicazioni esterne [38].

Dallo studio condotto dagli autori Gan, J. K, et al. (2022) [37], si evince come la durabilità dei compositi in micelio sia condizionata da un controllo igrometrico. Prove condotte in ambienti asciutti mostrano un rischio di attacco biologico (Figura 29). Per questo motivo, l'impiego di pannelli in micelio risulta più idoneo ad applicazioni interne, richiedendo comunque degli appositi rivestimenti, come descritti nel paragrafo 3.4.2., in modo da limitare l'esposizione all'umidità.

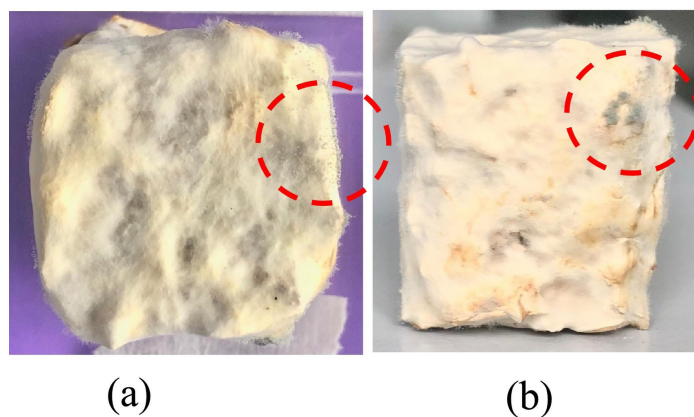


Figura 29. Crescita biologica di un campione in micelio non rivestito. Fonte: Farrahnoor, A. et al. (2024) [38] tramite licenza n. 6187820607943, per la riproduzione dell'immagine 10.

Al contrario, il polistirene espanso essendo un materiale di origine petrolchimica, non è soggetto ad attacchi biologici, in quanto non biodegradabile e resistente agli attacchi di funghi, muffe ed insetti.

Tuttavia, l'EPS può essere soggetto a degrado fisico. Esso viene comunemente impiegato nei sistemi a cappotto in facciata (External Thermal Insulation Composite System, ETICS). La costante esposizione agli agenti atmosferici e ai fattori antropici

può portare ad anomalie estetiche come il cambiamento del colore e la rottura del materiale (Figura 30). Dallo studio condotto da Parracha, J. L. et al. (2023) [39] si evince come la degradabilità dell'isolante derivi soprattutto da una scorretta esecuzione e assemblaggio dei componenti di sistema, portando ad una diminuzione dell'efficienza del materiale. Tali criticità possono essere mitigate attraverso l'applicazione di una rete di rinforzo e maggiore spessore dell'intonaco.

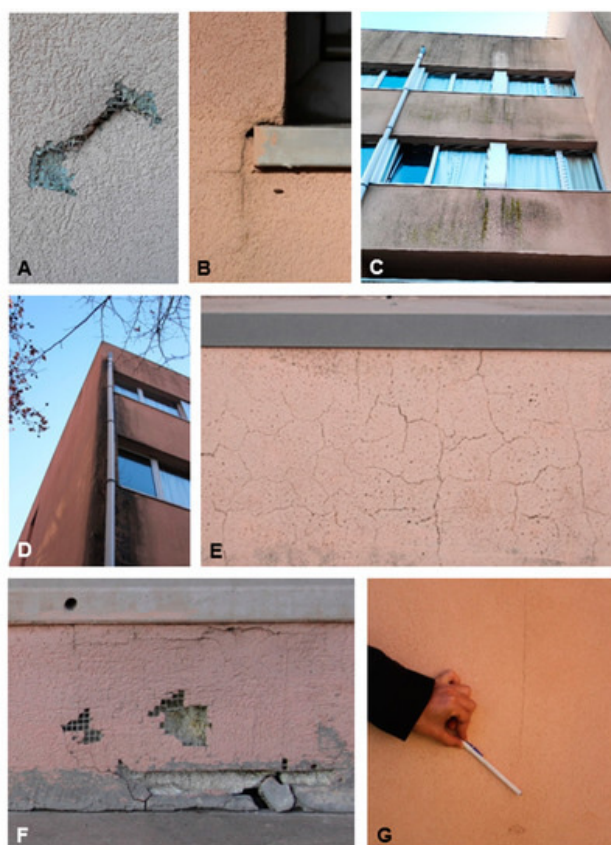


Figura 30. Anomalie rilevanti individuate sulle facciate: (A) perforazione del sistema; (B) fessurazione del sistema di intonaco nelle aperture delle finestre; (C) colonizzazione biologica; (D) segni di deflusso dell'acqua; (E) fessurazione non orientata; (F) distacco dello strato di finitura; (G) fessurazione orientata. Fonte: Parracha, J. L. et al. (2023) [39]

3.4.2. Igroscopicità

Come discusso nel Capitolo 2, i pannelli isolanti in micelio presentano un'elevata capacità di assorbimento, attribuita alla presenza nella matrice miceliare di gruppi ossidrilici (-OH) che conferiscono al materiale un comportamento idrofilo. In questo caso l'assorbimento avviene per capillarità, rendendo il materiale sensibile all'umidità se non con adeguate protezioni superficiali.

Per mitigare questa criticità dei compositi a base di micelio, alcuni autori hanno sviluppato diverse strategie, in particolare attraverso applicazioni di rivestimenti superficiali, così da migliorare la durabilità del materiale.

In particolare, lo studio condotto da Gan, J., et al. (2024) [37] ha sperimentato l'applicazione di rivestimenti, in spray aerosol e in cera d'api. Rispettivamente, come riportato in Figura 31, è stata analizzata una maggiore idrofobicità per il primo, con un angolo di contatto pari a 140° e assenza di assorbimento dopo 20 minuti, e una diminuzione dell'angolo di contatto a 90° per la cera d'api. Dopo un periodo di due mesi in ambiente chiuso, i campioni rivestiti non hanno riportato alcun segno di alterazione né fenomeni di infestazione.

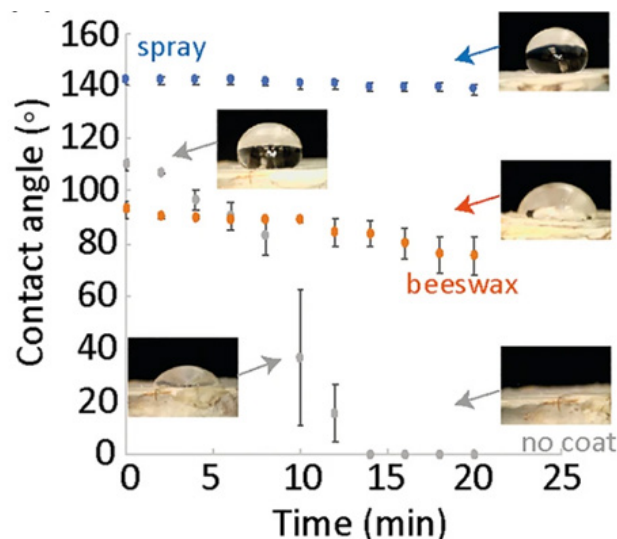


Figura 31. Durabilità in ambienti chiusi per MBC senza rivestimento (grigio), rivestimento spray impermeabile (blu) e rivestimento in cera d'api (arancione). Angolo di contatto in funzione del tempo dopo che una goccia d'acqua è stata depositata sulla superficie dei campioni. Le immagini mostrano la morfologia della goccia in diversi punti temporali. Fonte: Gan, J., et al. (2024) [37]

Gli autori Farrahnor, A, et al. (2024) [38] hanno sperimentato il rivestimento dei pannelli in micelio con cera d'api bianca e olio di cocco, dimostrando che i campioni senza rivestimento e con solo olio di cocco hanno sviluppato funghi dopo 18 giorni, mentre la combinazione cera d'api e olio cocco è risultata più efficace, poiché non hanno rilevato alcuna crescita fungina fino al ventiquattresimo giorno. Questo studio, dunque, afferma che il pannello in micelio, se non protetto dall'umidità può essere attaccato da agenti biologici, richiedendo un corretto rivestimento per aumentare la durabilità.

Se confrontato con il polistirene espanso, esso presenta comportamento idrofobico, grazie alla sua struttura a celle chiuse. Rispetto a tali caratteristiche, l'assorbimento per capillarità risulta nullo e l'acqua può attraversare gli interstizi tra le perle o in presenza di danneggiamento locale, quali tagli o giunti. Attraverso la prova sperimentale ad immersione, si indica un assorbimento di acqua volume tra il 3% e il 5% in volume, affermando una buona stabilità a contatto con ambienti umidi. [40]

Dal confronto si evince come l'assorbimento di acqua nei pannelli in micelio rappresenti una criticità intrinseca, mentre per l'EPS sia un fenomeno che può essere controllato e che non implica un limite per la sua applicazione.

3.4.3. Resistenza al fuoco

Sulla base delle proprietà descritte nel Capitolo 2, i pannelli in micelio, durante la combustione, formano uno strato carbonioso che svolge la funzione di ritardante di fiamma.

Analogamente, il polistirene espanso è classificato, secondo la classe europea, in Euroclasse E, dunque in grado di resistere alla fiamma per un breve periodo di tempo.

Il comportamento al fuoco dell'EPS è tipico delle materie plastiche: inizia a rammollire ad una temperatura di circa 100°C, e raggiunta una temperatura di circa 240-250°C produce vapori infiammabili. L'innesco di fiamma avviene ad una temperatura di 360-380°C. In condizioni di incendio, intorno ai 300°C e 400°C rilascia gas tossici, tra cui monossido di carbonio (CO) e vapori di stirene insieme a composti aromatici. Più la temperatura aumenta più queste emissioni crescono, tanto da essere realmente pericolosi per l'inalazione [40]. Un aspetto interessante del suo comportamento sotto l'azione del calore è la contrazione per collasso delle cellule che tende ad allontanarlo dalla sorgente di calore, contribuendo a ritardare l'accensione della fiamma.

Nonostante l'EPS sia un materiale combustibile, è importante sottolineare come richieda una determinata energia per la sua accensione. Inoltre, è generalmente rivestito e protetto da strati di rivestimento (intonaci) che limitano la disponibilità di ossigeno, riducendo l'esposizione diretta al fuoco.

3.5. Confronto sullo smaltimento e la gestione di fine vita

I compositi a base di micelio sono progettati per essere intrinsecamente biodegradabili, rendendo possibili diversi trattamenti di fine vita quali il compostaggio, l'incenerimento con recupero energetico e la digestione anaerobica. Bagheriehnajjar, G., et al. (2023) [35] riportano che tali materiali possono essere trasformati in compost, favorendo il reinserimento del materiale nel ciclo biologico.

Diversi studi hanno dimostrato che la biodegradabilità dei pannelli può essere mantenuta anche in presenza di rivestimenti superficiali. Gan, J. K., et al (2022) [37] hanno evidenziato che dopo due mesi nel terreno, i campioni senza rivestimento hanno registrato una perdita di massa del 35,89%, i campioni con rivestimento a spray del 44% e quelli con cera d'api del 64,13%.

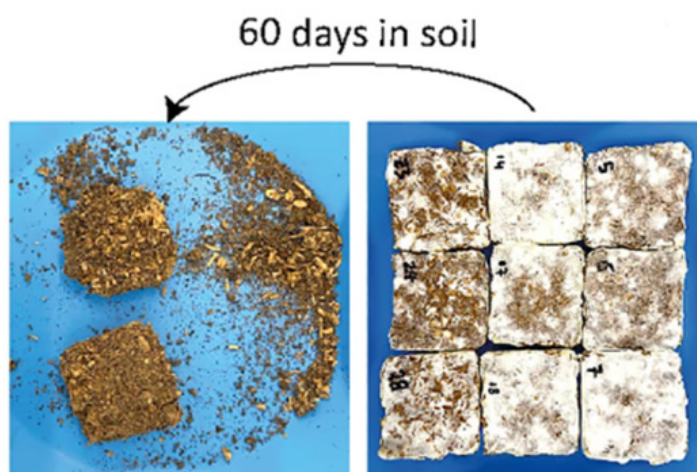


Figura 32. Compostaggio dopo 2 mesi nel terreno. Fonte: Gan, J. K., et al (2022) [37]

Lo stesso studio, inoltre, ha evidenziato l'avvio di un nuovo biociclo mediante l'uso di substrati esausti, ottenendo nuovi compositi con prestazioni comparabili ai campioni originali.

Al contrario, i materiali isolanti convenzionali come l'EPS non sono biodegradabili e, se non gestiti in modo corretto, tendono a permanere nell'ecosistema, accumulandosi in discariche e habitat acquatici.

A livello europeo, i rifiuti edili in EPS rappresentano l'86% dei rifiuti plastici previsti per il 2030 e il 2050 [41]. Tuttavia, secondo AIPE [32] la gestione dell'EPS a fine

vita non si limita allo smaltimento in discarica, ma considera delle tecniche di trasformazione dei rifiuti, tra cui: il riciclo meccanico mediante la riduzione quasi a livello di singola perla degli scarti di EPS e della loro miscelazione con perle di materiale vergine; l'utilizzo del materiale come inerte leggero utilizzato in malte per intonaci e caldane per calcestruzzi alleggeriti; il recupero energetico mediante termovalorizzazione.

Il recupero energetico dell'EPS risulta ottimale grazie all'elevato potere calorifico, paragonabile all'olio combustibile; dunque, il calore prodotto dall'incenerimento può essere sfruttato sia per il sostegno del processo di combustione, sia per la produzione di energia elettrica, risparmiando l'uso di combustibili fossili [41].

3.6. Sequestro e rilascio di carbonio

Come descritto nel Capitolo 1, i compositi in micelio sono costituiti da una matrice (micelio) e un rinforzo lignocellulosico (substrato). L'utilizzo di un sottoprodotto del legno (segatura, paglia) permette ai compositi in micelio di sequestrare anidride carbonica (CO_2), immagazzinandola all'interno del materiale. Questo è possibile in quanto la biomassa legnosa intrappola CO_2 durante la fotosintesi clorofilliana, in forma di carbonio biogenico.

Il carbonio biogenico viene emesso nell'aria come CO_2 , CO e CH_4 a seconda dei processi di ossidazione e riduzione della biomassa. I prodotti di origine biologica come legno, canapa e paglia contengono il 50% di carbonio in massa secca [42]. Nel caso dei compositi in micelio, è importante dunque tenere conto del rapporto tra substrato e micelio. Secondo lo studio condotto da Alaux, N. et al. (2024) [34] la quantità di micelio è pari al 5-10% della massa umida del substrato. Se si considera dunque 1 kg di substrato secco, ipotizzando che contenga, come descritto nello studio sopra citato [42], il 50% di carbonio, la quantità di carbonio all'interno del substrato secco sarà dato dalla formula $1 \text{ kg} \times 0,5 = 0,5 \text{ kg}$ di carbonio.

Inoltre, lo studio condotto da Al-Qahtani, S. et al. (2023) [43] mette a confronto materiali miceliali e isolanti sintetici, tra cui l'EPS, evidenziando come i compositi a base di micelio vengano considerati carbon negative. Tale termine indica che un materiale elimina più anidride carbonica di quanto non ne emetta durante il suo intero ciclo di vita.

CAPITOLO 4 – Analisi economica

4.1. Introduzione

Il presente capitolo è dedicato all'analisi economica del pannello isolante in micelio, con l'obiettivo di stimare i costi associati alle diverse fasi del suo ciclo di vita e di definire, così, un potenziale valore di mercato. Poiché il materiale non risulta ancora standardizzato e non dispone di un mercato consolidato, l'analisi dei costi è stata eseguita mediante un approccio basato sulla scomposizione analitica del processo produttivo e delle successive fasi di utilizzo, fino allo smaltimento/fine vita.

In particolare, l'analisi economica è stata sviluppata attraverso un'analisi prezzi strutturata secondo un approccio di Life Cycle Costing (LCC), che consente di valutare il costo del pannello isolante in micelio non limitandosi alla sola fase di produzione, ma includendo anche quelle di installazione, manutenzione e smaltimento. Tale impostazione permette di ottenere una visione complessiva del costo del materiale lungo l'intero arco della sua vita utile.

Il capitolo punta, dunque, a introdurre i concetti di analisi prezzi e Life Cycle Costing, illustrando i principi di base, le modalità di costruzione e le motivazioni alla base della loro applicazione. Successivamente, si passa alla costruzione del modello di costo del pannello isolante in micelio, attraverso la quantificazione analitica delle singole voci di fornitura e lavorazione.

Tale approccio è stato utilizzato anche per il pannello isolante in polistirene espanso (EPS) che, come descritto nei capitoli precedenti, rappresenta il materiale di riferimento adottato per il confronto economico e prestazionale. Sebbene l'EPS sia caratterizzato dalla presenza di prezzi consolidati sul mercato, l'adozione dello stesso approccio di analisi prezzi risulta necessaria al fine di garantire un confronto omogeneo e coerente tra i due materiali.

4.2. Analisi prezzi e Life Cycle Cost: definizione e costruzione

Prima di procedere alla definizione e alla costruzione dell'analisi prezzo in un'ottica del ciclo di vita, occorre definire il concetto di costo. Con il termine costo si intende ciascuna spesa che occorre affrontare per la produzione di un determinato bene o

servizio, comprendendo tutte le risorse impiegate nel processo produttivo. [44]

Per una corretta interpretazione del concetto di costo, è utile richiamare le principali modalità di classificazione. La prima si basa sulla natura dei costi, cioè sulle caratteristiche fisiche ed economiche dei fattori impegnati nei processi produttivi; ad esempio i costi delle materie prime, della manodopera e degli ammortamenti dei macchinari. La seconda classificazione articola i costi per imputazione, articolandosi in costi diretti e indiretti. I costi diretti vengono attribuiti ad un bene in modo oggettivo attraverso una misurazione della quantità di risorse assorbite per la produzione, tra questi rientrano le componenti basilari della lavorazione come, materiali, manodopera e macchinari. I costi indiretti, invece, sono relativi ai costi di amministrazione, gestione e organizzazione aziendale, dunque che non possono essere imputati al singolo prodotto. L'ultima classificazione fa riferimento alla variabilità dei costi, ovvero al mutare dei costi in maniera proporzionale alla quantità prodotta. In questo caso si distinguono in costi variabili, che cambiano in funzione della produzione, e costi fissi, che restano costanti pur modificando i volumi prodotti. [44]

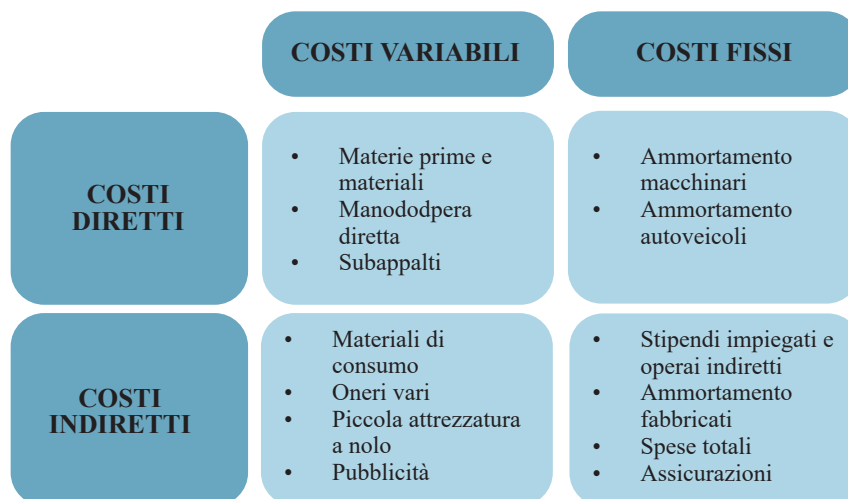


Figura 33. Distinzione tra costi diretti, indiretti, variabili e fissi. Fonte: rielaborato da Prizzon, F., Rebaudengo, M., (2010). [44].

L'analisi prezzo, dunque, si configura come uno strumento indirizzato a determinare il costo di una lavorazione attraverso la scomposizione nelle sue componenti elementari, aggiungendo le spese generali e l'utile di impresa per ottenere il prezzo unitario finale. L'analisi prezzi risulta utile nei casi in cui non siano disponibili prezzi di riferimento consolidati o standardizzati. [45]

La costruzione di un'analisi prezzo richiede l'individuazione e la separazione delle singole componenti di costo, quali materie prime, manodopera, noli e trasporti, in modo da non avere disomogeneità. Successivamente, per ciascuna voce devono essere indicati l'unità di misura, la quantità di materiale necessario per ottenere un'unità di prodotto finito e il prezzo unitario. I prezzi unitari possono essere ricavati da prezziari oppure, se non di larga diffusione, da listini o indagini di mercato. I costi della manodopera, invece, vengono articolati in base al livello di qualificazione degli operai (comune, qualificato e specializzato) e quantificati moltiplicando per il numero di ore necessarie alla lavorazione per portare a termine un'unità elementare. [45]

Nel presente lavoro, l'analisi prezzo viene estesa oltre la fase di produzione (in genere la quantificazione dei costi avviene per la fornitura di beni e servizi e per la realizzazione di un manufatto/un'opera) attraverso l'adozione dell'approccio Life Cycle Costing (LCC) che si basa sulla quantificazione e individuazione dei costi che costituiscono le diverse fasi che caratterizzano la vita utile di un prodotto. In particolare, secondo questo approccio i costi da considerare includono quelli di Figura 34 ovvero:

1. costi di investimento iniziale, relativi all'acquisto delle materie prime e alla produzione del materiale;
2. costi di installazione, legati alla posa in opera del materiale;
3. costi di manutenzione;
4. costi operativi, legati all'operatività del bene;
5. costi di fine vita, riferiti al ritiro o smaltimento.

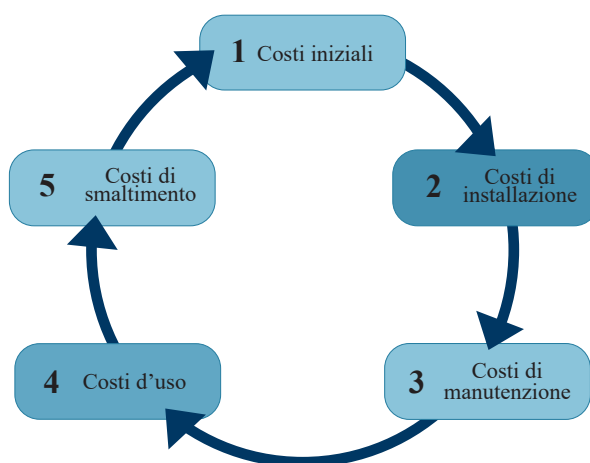


Figura 34. Schema della struttura del Life Cycle Costing. Fonte: rielaborato da <https://www.headvisor.it/life-cycle-costing>

L'adozione di un'analisi prezzi strutturata secondo un approccio LCC permette di valutare decisioni di acquisto molto più consapevoli e proiettate alla fase di uso/gestione (ben maggiori in termini temporali rispetto alla fase iniziale), sia in fase di progettazione sia nella comparazione tra soluzioni alternative, ponendo così l'attenzione sul costo complessivo del ciclo di vita del prodotto.

4.3. Costruzione dell'analisi dei costi del pannello isolante in micelio e in polistirene espanso (EPS)

L'analisi dei costi è stata condotta ponendo il confronto tra due materiali isolanti: uno naturale a base di micelio e uno sintetico in polistirene espanso (EPS). I materiali sono stati valutati secondo un approccio funzionale, cioè in base alla loro capacità di svolgere la stessa funzione termica, indipendentemente dalla loro collocazione all'interno del sistema edilizio.

A tal fine è stata definita un'unità funzionale comune ad entrambi i materiali. In particolare, l'analisi è stata sviluppata a parità di resistenza termica, intesa come la capacità dell'isolante di opporsi al flusso di calore, impostando un valore pari a $2 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Inoltre, sono stati definiti i valori di conducibilità termica di entrambi i materiali: per l'isolante in micelio è stato assunto un valore medio di $0,05 \text{ W/mK}$ ([11] [12] [13]) e per il polistirene espanso è stato considerato un valore pari a $0,03 \text{ W/mK}$, assunto dalla Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPS). [36]

La definizione di questi valori ha permesso di determinare lo spessore di entrambi i materiali, utilizzando la seguente formula:

$$s = \lambda * R [m]$$

ottenendo rispettivamente i seguenti spessori: $0,10 \text{ m}$ per il pannello in micelio e $0,06 \text{ m}$ per il pannello in EPS.

Poiché l'analisi economica è riferita alla produzione di 1 m^2 di pannello isolante, è stata definita la densità per entrambi i materiali, al fine di determinare la quantità di materiale necessaria. Per il pannello in micelio è stata assunta una densità media tratta dai valori riportati in letteratura pari a 120 kg/m^3 , mentre per l'EPS è stato adottato un valore pari a 20 kg/m^3 . La definizione della densità, insieme allo spessore calcolato, ha permesso di determinare la massa del materiale per la produzione

di 1 m² di pannello isolante, attraverso la formula:

$$m = \rho * V [kg]$$

Come anticipato nei capitoli precedenti, i compositi in micelio sono soggetti a degradazione biologica in quanto presentano substrati derivanti da biomassa. Pertanto, diversi studi hanno evidenziato l'importanza di collocare tali pannelli all'interno dell'edificio, in condizioni controllate. Al contrario, il polistirene espanso viene comunemente usato all'esterno della parete, come isolante a cappotto.

Nonostante la posizione degli isolanti non sia rilevante ai fini dell'analisi economica, viene comunque riportata una rappresentazione grafica delle stratigrafie di riferimento, al fine di facilitare la comprensione delle diverse modalità di impiego dei materiali analizzati.

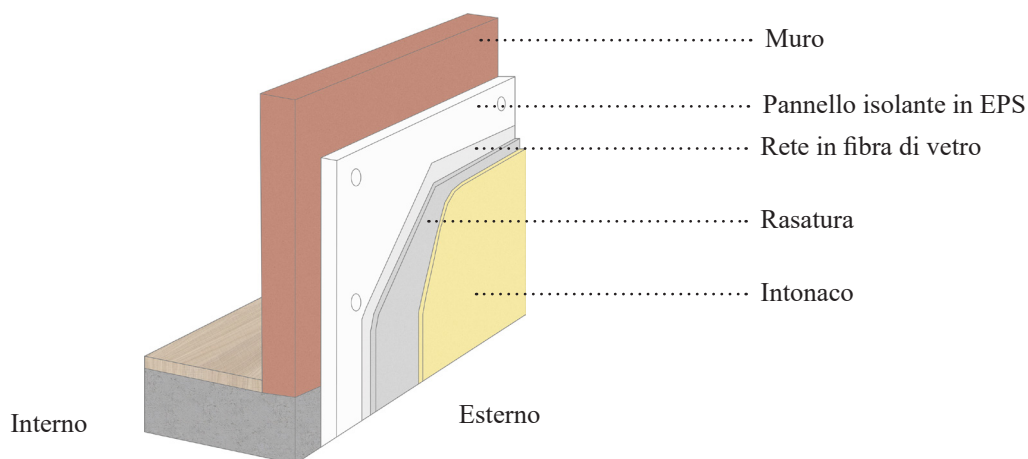


Figura 35. Stratigrafia con isolante in polistirene espanso. Fonte: rielaborato da <https://www.studiomadera.it/news/556-eps>

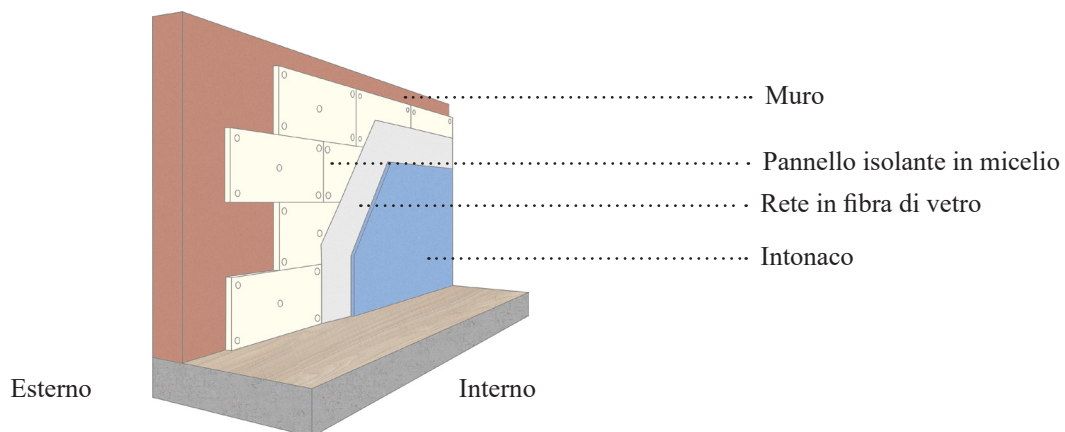


Figura 36. Stratigrafia con isolante in micelio. Fonte: rielaborato da <https://www.fibradilegno.com/fibra-di-legno-therm-dry.html>

4.4. Suddivisione dei costi del ciclo di vita del pannello isolante in micelio

Come accennato dai paragrafi precedenti, la suddivisione dei costi è stata fatta rispetto all'approccio del Life Cycle Costing, dunque su tutte le fasi del ciclo di vita del materiale, impostando il confine di sistema di tipo "cradle to gate". In particolare, i costi analizzati sono stati suddivisi in: costi di produzione, comprendenti materie prime, trasporto di esse e i vari processi di preparazione del pannello; costi di installazione del pannello; costi di manutenzione ordinaria e costi di smaltimento/fine vita.

Nell'analisi prezzi condotta, sono stati considerati due tipologie di costo: alcuni costi riferiti al prezzario della Regione Piemonte e altri stimati. Poiché le voci da prezzario sono già comprensive dell'utile di impresa e delle spese generali, quantificati con la percentuale del 27,6%, al fine di prevenire una duplicazione della maggiorazione, ove sono presenti sia valori da prezzario che valori stimati, i valori da prezzario sono stati depurati da tale percentuale. La maggiorazione è stata successivamente aggiunta a fine calcolo, applicandola sul costo totale parziale.

4.4.1. Costi di produzione

Per stimare i costi di produzione è stato ipotizzato di produrre tale isolante in una piccola media impresa, con particolare riferimento all'impresa di pannelli acustici isolanti MOGU. Infatti, si è ipotizzato che i pannelli possano essere prodotti nella loro sede. A tal proposito, tutte le distanze per il trasporto sono state calcolate in base ai chilometri dai fornitori all'impresa di produzione.

Il costo di produzione non è rappresentato da un'unica voce, ma deriva dalla somma di più contributi elementari, ognuno riferito a una specifica fase del processo produttivo. In particolare, sono state analizzate le seguenti voci:

1. Materie prime

La scelta delle materie prime è stata fatta in riferimento alla letteratura scientifica, in particolare sono state scelte come substrato lignocellulosico la segatura, in quanto presenta una granulometria idonea alla lavorazione, evitando dunque la fase di macinazione, abbattendo così i costi, e per l'inoculo, è stato scelto lo spawn di *Ganoderma Lucidum* colonizzato su grano per le sua velocità di colonizzazione e di

degradazione del substrato come spiegato in maniera approfondita nel capitolo 2. Per stimarne il prezzo della segatura sono state contattate diverse segherie nella provincia di Torino, dalle quali è stato ricavato un valore medio di 0,05€/kg. Lo spawn, invece, proveniente dal Belgio, prevede un costo unitario pari a 2,55 €/kg.

I prezzi unitari stimati sono stati moltiplicati per le quantità di materiale necessarie alla produzione di 1 m² di pannello isolante, ottenendo il costo complessivo relativo all'acquisto delle materie prime.

Analisi n°	Descrizione			UF	u.d.m
1	Produzione pannello isolante in micelio con substrato in segatura			1	m²
OGGETTO		u.d.m	quantità	prezzo unitario	importo
1 - Materiale					
N.P.	Segatura	kg	15	0,05 €	0,75 €
N.P.	Spawn	kg	1,5	2,55 €	3,83 €
			TOTALE PARZIALE [€/mq]		4,58 €

Tabella 5. Suddivisione costi delle materie prime. N.P. = Nuovo Prezzo

2. Trasporto delle materie prime

Il trasporto delle materie prime è stato calcolato tenendo conto della tariffa per chilometri percorsi, pari a una media di 1,2 €/km. [46]

Per il trasporto della segatura, è stato ipotizzato il ritiro presso una segheria situata nella provincia di Torino, ipotizzando una distanza di 250 km. È stata inoltre ipotizzata la capacità di un camion per il trasporto della segatura pari a 16 tonnellate. Il costo totale del trasporto è stato rapportato alla capienza del camion, ottenendo un costo unitario al chilogrammo, successivamente moltiplicato per la quantità di segatura necessaria alla produzione di 1 m² di pannello.

Procedimento analogo è stato utilizzato per stimare il costo del trasporto dello spawn, ipotizzando una distanza di 1000 km e una capacità del camion pari a 10 tonnellate.

Una volta ottenuti entrambi i costi del trasporto, essi sono stati sommati ottenendo così il costo totale del trasporto delle materie prime.

2 - Trasporti						
N.P.	Camion trasporto segatura	kg	15	0,02 €	0,30 €	
N.P.	Camion trasporto spawn	kg	1,5	0,12 €	0,18 €	
TOTALE PARZIALE [€/mq]					0,48 €	

Tabella 6. Suddivisione costi dei trasporti delle materie prime. N.P. = Nuovo Prezzo

3. Sterilizzazione del substrato

Per il processo di sterilizzazione del substrato è stata considerata un'autoclave con capacità di 200 kg e potenza di 4 kW. La durata del processo è pari a 40 minuti, convertita in ore per garantire coerenza nel calcolo dei consumi energetici.

Il consumo di energia è stato determinato calcolando l'energia assorbita per chilogrammo di substrato, ottenuta moltiplicando la potenza per la durata del ciclo e dividendo il risultato per la capacità dell'autoclave. Tale valore è stato moltiplicato per i chili di substrato necessari alla produzione di 1 m² di pannello e infine, quest'ultimo, è stato moltiplicato per il costo dell'energia industriale pari a 0,2 €/kWh. [47]

Inoltre, è stata stimata la manodopera necessaria, ipotizzando l'impiego di un operaio comune per la durata di 30 minuti. Considerando una produzione in batch di 14 m², ottenuta dal rapporto tra la capacità dell'autoclave e la quantità di materiale necessaria per 1 m², il tempo di manodopera per unità di superficie è pari a 0,04 h/m². Tale valore è stato moltiplicato per il costo della manodopera di un operaio comune, ottenuto dal Prezzario della Regione Piemonte. [48]

3 - Pastorizzazione del substrato					
N.P.	Energia	kwh	0,2	0,20 €	0,04 €
01.P01.A30.005	Manodopera *	ore	0,035	26,35 €	0,92 €
TOTALE PARZIALE [€/mq]					0,96 €

Tabella 7. Suddivisione costi per la pastorizzazione del substrato. N.P. = Nuovo Prezzo. *Il valore della manodopera è stato depurato dall'utile e dalle spese generali (27,6%) dichiarati da Prezzario.

4. Inoculazione del substrato

Per il processo di inoculazione è stata considerata esclusivamente la manodopera. È stato ipotizzato che per effettuare l'operazione su 1 m² di pannello, l'operaio comune impieghi 7 minuti (0,117 h). Moltiplicando il costo della manodopera [48] per la durata e per 1 m² di pannello, si ottiene il costo relativo alla inoculazione del substrato.

4 - Inoculazione del substrato					
01.P01.A30.005	Manodopera *	ore	0,117	26,35 €	3,08 €
TOTALE PARZIALE [€/mq]					3,08 €

Tabella 8. Suddivisione costi per l'inoculazione del substrato. *Il valore della manodopera è stato depurato dall'utile e dalle spese generali (27,6%) dichiarati da Prezzario.

5. Riempimento stampi

Anche per questa fase è stata considerata unicamente la manodopera. È stato ipotizzato che un operaio comune impieghi 5 minuti per il riempimento in uno stampo di 1 m². Dunque, moltiplicando la durata convertita in ore per il costo dell'operaio, si ottiene il costo della manodopera.

5 - Riempimento degli stampi					
01.P01.A30.005	Manodopera *	ore	0,08	26,35 €	2,11 €
TOTALE PARZIALE [€/mq]					2,11 €

Tabella 9. Suddivisione costi per il riempimento degli stampi. *Il valore della manodopera è stato depurato dall'utile e dalle spese generali dichiarati da Prezzario.

6. Incubazione degli stampi

Per il processo di incubazione è stato ipotizzato l'utilizzo di un incubatore con una capacità di 120 kg e una potenza di 0,35 kW, con una durata del processo di 7 giorni.

Analogamente al processo di sterilizzazione, è stato ricavato il valore dell'energia consumata per chilogrammo di materiale, successivamente rapportato alla quantità necessaria per la produzione di 1 m² e moltiplicato per il costo dell'energia.

Inoltre, è stata stimata la manodopera ipotizzando un operaio comune per la durata di 30 minuti su un batch di 14 m², ottenendo un valore di tempo unitario pari a 0,04 h/m². Tale valore è stato successivamente moltiplicato per il costo della manodopera di un operaio comune [48].

6 - Incubazione stampi					
N.P.	Energia	kwh	0,29	0,20 €	0,06 €
01.P01.A30.005	Manodopera *	ore	0,06	26,35 €	1,58 €
TOTALE PARZIALE [€/mq]					1,64 €

Tabella 10. Suddivisione costi per l'incubazione degli stampi. N.P. = Nuovo Prezzo. *Il valore della manodopera è stato depurato dall'utile e dalle spese generali dichiarati da Prezzario.

7. Essiccamento

Per il processo di essiccamento è stato ipotizzato l'utilizzo di un forno con una capacità di 300 kg e una potenza elettrica di 1,5 kw, con una durata del processo pari a 24 ore.

Analogamente alle precedenti fasi, è stato ricavato il valore dell'energia consumata per kg, che è stato poi moltiplicato per i kg necessari alla produzione. Quest'ultimo valore è stato moltiplicato per il costo dell'energia.

Inoltre, è stata stimata la manodopera ipotizzando un operaio comune per la durata di 30 minuti per un batch di 20 m², ottenendo un valore di tempo unitario pari a 0,02 h/m². Tale valore è stato moltiplicato per il costo della manodopera di un operaio comune. [48]

7 - Essiccazione pannelli					
N.P.	Energia	kwh	1,8	0,20 €	0,36 €
01.P01.A30.005	Manodopera *	ore	0,025	26,35 €	0,66 €
TOTALE PARZIALE [€/mq]					1,02 €

Tabella 11. Suddivisione costi per l'essiccazione dei pannelli. N.P. = Nuovo Prezzo. *Il valore della manodopera è stato depurato dall'utile e dalle spese generali dichiarati da Prezzario.

8. Costo totale

Il costo totale della produzione del pannello è stato stimato sommando tutti i costi ottenuti dalle singole fasi di produzione. A tale costo è stato aggiunto una percentuale relativa al costo di stabilimento, che comprende tutti i costi indiretti legati all'azienda, tra cui ammortamento dei macchinari e dell'edificio, manutenzione ordinaria, energia per l'illuminazione, personale non direttamente produttivo, assicurazione, vigilanza, pulizie e costi generali di fabbrica. Siccome non è possibile possedere la percentuale effettiva di tale costo, si è ipotizzato un valore del 17%, coerente con i valori di maggiorazione presenti sul prezzario. Successivamente, al totale parziale è stata aggiunta una percentuale relativa all'utile di impresa pari al 10%.

8 - Totale parziale		13,87 €
9 - Costo di stabilimento	17%	2,36 €
10 - Totale parziale		16,22 €
11 - Utile d'impresa	10%	1,62 €
TOTALE [€/mq]		17,84 €

Tabella 12. Suddivisione dei costi finali e aggiunta di maggiorazione delle spese generali e utile di impresa per convertire il costo in prezzo.

4.4.2. Costo di installazione

Il costo di installazione fa riferimento alla posa in opera del pannello sulla parete edilizia. Stando alla stratigrafia sopra riportata, è stato ipotizzato di inserirlo all'interno dell'edificio. Siccome non è stato possibile ottenere il sistema tecnologico di un pannello isolante in micelio attaccato alla parete, è stato preso come riferimento il sistema tecnologico del pannello in fibra di legno, in quanto dalle caratteristiche meccaniche è risultato comparabile.

Per stimare tale prezzo, è stato preso in considerazione il prezzo ricavato dal Prezzario della Regione Piemonte, riferito alla sezione 03, codice 03.A07.A02: “Costo della manodopera per la realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e deposito a qualsiasi piano del fabbricato. Sono compresi inoltre gli oneri relativi alle lavorazioni di: incollaggio e/o tassellatura e sagomatura dei pannelli, compreso ogni altro onere necessario per dare l’opera finita a perfetta regola d’arte. (esclusa la fornitura dell’isolante e di ogni altro elemento accessorio)”. Riferito alle superfici esterne ed interne verticali. [48]

Inoltre, è stato considerato il trasporto per il materiale prodotto al cantiere di installazione, assumendo il codice 25.P03.B75.005 relativo al “trasporto materiali qualsiasi natura dai luoghi di magazzinaggio ai cantieri di costruzione o viceversa con qualunque mezzo compreso il carico e lo scarico per ogni quintale e per ogni distanza.” [48] Il costo è stato ottenuto convertendo il prezzo da quintali in chilogrammi e successivamente moltiplicato per i chili di trasporto e la distanza dall’impresa di produzione al cantiere.

A tali costi, non è stata aggiunta la percentuale del 27,60%, in quanto le voci all’interno del prezzario sono già comprensivi di tale percentuale. [48]

Analisi n°	Descrizione			UF	u.d.m
2	installazione del pannello isolante in micelio			1	m ²
OGGETTO		u.d.m	quantità	prezzo unitario	importo
1 - Costo installazione					
03.A07.A02.005	Manodopera	m2	1	42,70 €	42,70 €
25.P03.B75.005	Trasporto	kg	15	0,0038 €	7,98 €
			TOTALE [€/mq]		50,68 €

Tabella 13. Suddivisione costi per l’installazione del pannello isolante in micelio.

4.4.3. Costo di manutenzione

Il costo di manutenzione è stato determinato in particolare con riferimento alla manutenzione ordinaria. È stato, infatti, ipotizzato che il pannello isolante sia sottoposto annualmente a un controllo attraverso ispezione visiva. Nonostante sia collocato all’interno, il pannello viene comunque protetto da uno strato di intonaco.

L'attività di manutenzione ordinaria prevede un'ispezione visiva al fine di individuare possibili fenomeni di degradi quali rigonfiamenti dell'intonaco, macchie superficiali, distacchi cromatici o eventuali odori riconducibili alla presenza di umidità e muffe.

Per tale attività, assumendo una parete 3x4 m, pari a 12 m², è stato ipotizzato l'impiego di un operaio comune (secondo la voce 01.P01.A30.005 del Prezzario della Regione Piemonte, comprensiva del 27,6% [48]) per una durata di 10 minuti per parete. Tale valore è stato successivamente utilizzato per stabilire il costo parametrico unitario di manutenzione.

Analisi n°	Descrizione			UF	u.d.m
3	manutenzione annuale del pannello isolante in micelio			1	m²
OGGETTO		u.d.m	quantità	prezzo unitario	importo
1 - Costo di manutenzione					
01.P01.A30.005	Manodopera	ore	0,013	33,60 €	0,45 €
			TOTALE [€/mq]		0,45 €

Tabella 14. Suddivisione costi per la manutenzione annuale del pannello isolante in micelio

4.4.4. Costo di smaltimento/fine vita

Per il costo di smaltimento e fine vita, è stato ipotizzato lo smontaggio dei pannelli e il trasporto di essi nell'apposita area di smaltimento. I pannelli in micelio sono stati realizzati per essere degradabili al 100%. Tuttavia, per stimare tale costo, sono state calcolate le ore di manodopera per lo smontaggio dei pannelli e il costo di trasporto per lo smaltimento, considerando un raggio compreso tra i 10 e i 30 km dal cantiere al punto di smaltimento. Per le ore di manodopera è stato considerato un operaio comune secondo la voce 01.P01.A30.005, mentre per il trasporto è stata considerata la voce 01.P26.A60.030 relativa al "trasporto in impianto di trattamento autorizzato, esclusivamente per distanze tra sito di lavorazione e impianto comprese tra 10 e i 30 km." Inoltre, è stato considerato anche il costo di smaltimento con riferimento al codice 29.P20.A10.005: "rifiuti biodegradabili (rif.codice CER 20 02 01)". [48]

Ottenuti i seguenti valori, essi sono stati sommati per ottenere il costo totale dello smaltimento a fine vita. Non è stata aggiunta alcuna maggiorazione in quanto già comprensive del 27,60%.

Analisi n°	Descrizione			UF	u.d.m	
4	smaltimento/fine vita del pannello isolante in micelio			1	m ²	
OGGETTO			u.d.m	quantità	prezzo unitario	importo
1 - Costo di smaltimento						
01.P26.A60.030	Trasporto	kg	5	0,051 €		0,26 €
01.P01.A30.005	Manodopera	ore	0,08	33,60 €		2,69 €
29.P20.A10.005 (CER 20 02 01)	Smaltimento	kg	5	0,09 €		0,45 €
			TOTALE [€/mq]			3,39 €

Tabella 15. Suddivisione dei costi per lo smaltimento del pannello isolante in micelio.

4.5. Suddivisione dei costi del ciclo di vita del pannello isolante in polistirene espanso

Lo stesso approccio metodologico è stato applicato anche per il pannello isolante in polistirene espanso (EPS), con l'obiettivo di garantire un confronto economico omogeneo e coerente con il pannello isolante in micelio. A differenza di quest'ultimo, l'EPS è un materiale standardizzato e caratterizzato da prezzi disponibili di mercato.

Pertanto, il costo di produzione non è stato ricostruito mediante una scomposizione dei costi delle diverse fasi di produzione, ma è stato ottenuto dal Prezzario della regione Piemonte, prendendo come riferimento il codice 01.P09.A26: "Pannello in polistirene espanso sintetizzato (EPS), esenti da CFC o HCFC, resistenza a compressione pari a 100 kPa e densità compresa tra 18-28 kg/m³ (secondo la norma UNI EN 13163), Euroclasse E di resistenza al fuoco, marchiatura CE, lambda pari a 0,033 W/mK., con canale di ventilazione per lo smaltimento del vapore acqueo in eccesso. Per isolamento termico a cappotto", riferito a uno spessore di 60 mm. [48]. È stato così ottenuto un prezzo unitario pari a 5,05 €/m².

Il costo di installazione è risultato uguale per entrambi i materiali, in quanto si è ipotizzato la stessa procedura di installazione, mentre risulta diverso il costo del trasporto in quanto varia in base alla distanza.

Analisi n°	Descrizione			UF	u.d.m	
2	installazione del pannello isolante in polistirene espanso			1	m²	
OGGETTO			u.d.m	quantità	prezzo unitario	importo
1 - Costo installazione						
01.P01.A30.005	Manodopera	m2	1	42,70 €	42,70 €	
25.P03.B75.005	Trasporto	kg	1,2	0,0038 €	0,06 €	
			TOTALE [€/mq]			42,76 €

Tabella 16. Suddivisione costi di installazione per il pannello in EPS.

Nonostante il polistirene espanso sia un materiale standardizzato, è stato comunque opportuno scomporre i costi relativi alle fasi di manutenzione e fine vita, applicando lo stesso approccio per il pannello isolante in micelio.

Per definire il costo di manutenzione ordinaria è stata ipotizzata una parete esterna 10x3 m, pari a 30 m², impiegando un operaio comune (riferito al codice 01.P01.A30.005 da Prezzario della Regione Piemonte, comprensivo del 27,6% [48]), per una durata di 30 minuti. Tale valore è stato successivamente utilizzato per stabilire il costo unitario di manutenzione.

Analisi n°	Descrizione			UF	u.d.m
3	manutenzione annuale del pannello isolante in EPS			1	m ²
OGGETTO		u.d.m	quantità	prezzo unitario	importo
1 - Costo di manutenzione					
01.P01.A30.005	Manodopera	ore	0,02	33,60 €	0,56 €
TOTALE [€/mq]					0,56 €

Tabella 17. Suddivisione costi per la manutenzione del pannello isolante in EPS

Per definire il costo di fine vita, è stato ipotizzato, oltre lo smontaggio e il trasporto all'apposito centro di smaltimento, lo smaltimento dell'EPS come rifiuto plastico, utilizzando il codice 29.P15.A10.015, riferimento codice CER 17 02 03. [48]. Anche in questo caso, le voci prese in considerazione non sono state maggiorate in quanto già comprensive della percentuale del 27,60%. [48]

Analisi n°	Descrizione			UF	u.d.m
4	smaltimento/fine vita del pannello isolante in EPS			1	m ²
OGGETTO		u.d.m	quantità	prezzo unitario	importo
1 - Costo di smaltimento					
01.P26.A60.030	Trasporto	kg	0,5	0,051 €	0,03 €
01.P01.A30.005	Manodopera	ore	0,166	33,60 €	5,58 €
29.P15.A10.015 (CER 17 02 03)	Smaltimento	kg	1	0,27 €	0,27 €
TOTALE [€/mq]					5,88 €

Tabella 18. Suddivisione costi per lo smaltimento del pannello isolante in EPS.

4.6. Confronto: risultati e possibili miglioramenti

Successivamente alla stima dei costi relativi al pannello isolante in polistirene espanso, è stato possibile confrontare il costo finale relativo a tutte le fasi legate al ciclo di vita di entrambi i materiali. Come descritto nel paragrafo 4.3., tale confronto si basa su valori riferiti a 1 m² di materiale, che fornisce la stessa prestazione termica, relativa alla resistenza termica di 2 W/m²K.

	Pannelli isolanti in micelio	Pannelli isolanti in EPS
Costo di produzione [€/mq]	17,66 €	5,05 €
Costo di installazione [€/mq]	50,68 €	42,76 €
Costo di manutenzione [€/mq]	0,45 €	0,56 €
Costo di smaltimento [€/mq]	3,39 €	5,88 €
TOTALE [€/mq]	72,19 €	54,25 €
Costo ambientale [€/mq]	0,59 €	0,68 €

Tabella 19. Confronto dei costi delle singole fasi e totale dei costi del pannello isolante in micelio e in polistirene espanso.

Dai risultati ottenuti si evince come il costo totale del pannello in micelio sia superiore rispetto a quello in polistirene espanso, evidenziando un divario pari a 17,94 €.

La voce principale di tale differenza è relativa al costo di produzione, che per il pannello isolante in micelio risulta più onerosa rispetto al pannello in polistirene espanso. Tuttavia, tale valore risulta coerente con lo stato attuale ancora in sviluppo delle tecnologie produttive dei compositi miceliari, in quanto caratterizzati da processi produttivi ancora non standardizzati e da una mancanza di economia di scala.

Il costo di installazione del pannello isolante in micelio risulta più elevato rispetto ai pannelli di polistirene espanso, in quanto è influenzato dal costo del trasporto, dovuto da una scarsa distribuzione di imprese produttrici sul territorio. D'altra parte, il costo di manutenzione risulta leggermente più alto per l'EPS rispetto al pannello miceliare. Ciò dipende dalla durata della lavorazione e dalla superficie della parete da ispezionare.

Dall'analisi del costo di smaltimento a fine vita, si evince come il costo del polistirene espanso risulti maggiore rispetto al costo del pannello in micelio. Tale risultato sottolinea come la biodegradabilità del pannello miceliare incida in maniera positiva sullo smaltimento, rappresentandone un punto di forza.

Tali osservazioni permettono di affrontare il tema ipotizzando alcuni possibili margini di miglioramento, affinché il costo totale possa diminuire. In particolare, l'introduzione di un aumento di volumi, e quindi di un'economia di scala, porterebbe alla diminuzione del costo medio: in questo modo, con l'aumento della produzione, i costi fissi vengono spalmati su più unità, con conseguente riduzione del costo unitario. Un ulteriore punto riguarda la standardizzazione, ovvero garantire processi ripetibili attraverso regole e procedure specifiche applicabili in tutti i campi aziendali, al fine di ridurre i costi, aumentare l'efficienza e ottimizzare la produzione diminuendo il margine di errore.

Inoltre, l'abbassamento dei costi potrebbe essere generato dallo sviluppo di imprese sul territorio che possano produrre e distribuire tale materiale, accorciando la distanza di trasporto. Attualmente in Italia è presente una sola impresa produttrice di pannelli acustici in micelio in Provincia di Varese.

Oltre ai costi relativi alle diverse fasi lungo la vita di entrambi i materiali, è stato ritenuto opportuno calcolare il costo unitario rispetto all'emissione di CO₂, riprendendo i valori che sono stati analizzati nel Capitolo 3. Tale valore è stato calcolato moltiplicando la quantità di CO₂ emessa per il valore monetario della CO₂ che, secondo la EU Emission Trading System [49], è pari a 88,40 €/tonnellata. L'analisi ambientale è stata riferita ai chilogrammi di anidride carbonica per 1 m² di prodotto. Dal valore ottenuto si evince come, dal punto di vista ambientale, i pannelli in micelio siano più convenienti rispetto agli isolanti in polistirene espanso.

Dunque, da questa analisi, ne consegue come, attualmente, nelle condizioni ipotizzate, il pannello in micelio non risulti economicamente competitivo rispetto al polistirene espanso. Ciò è da attribuire alla mancanza di maturità produttiva e logistica del materiale, penalizzando soprattutto i costi iniziali.

CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi ha analizzato la possibilità di impiego dei pannelli isolanti in micelio come alternativa agli isolanti sintetici come il polistirene espanso, adottando un approccio comparativo, che ha tenuto in considerazione aspetti prestazionali, ambientali e soprattutto economici. Dall'analisi si evince come la loro natura bio-based rappresenti un nodo principale per la sostenibilità, soprattutto attraverso l'utilizzo di materie prime naturali, derivati da scarti agricoli per la formazione del substrato. Il confronto con un materiale industrializzato come il polistirene espanso ha permesso di portare alla luce le maggiori differenze che intercorrono tra questi due materiali, soprattutto dal punto di vista della produzione industriale.

Inoltre, si evince come le prestazioni termiche del pannello in micelio siano molto simili a quelli dell'EPS, ma allo stesso tempo dipendenti dalle scelte processuali e dal tipo di fungo e substrato che si intenda utilizzare. Tutta via, l'analisi ambientale fornisce risultati favorevoli ai compositi miceliari, in quanto riducono le emissioni di gas serra e il consumo di energia.

Di rilevante importanza è stata la parte economica all'interno del lavoro, la quale ha contribuito a delineare il confronto in termini quantitativi, riportando una visione più chiara e critica rispetto alle fasi lungo l'intero ciclo di vita comparando i due materiali.

Dall'analisi condotta, attualmente gli isolanti in micelio dal punto di vista economico non risultano competitivi, in quanto il costo totale lungo l'intero ciclo di vita risulta maggiore rispetto al polistirene espanso. D'altra parte, il valore e il costo ambientale legato alle emissioni di CO₂ risulta più conveniente rispetto a quello del polistirene espanso, evidenziando un vantaggio in ottica di sostenibilità ambientale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] «UN Environment Programme,» 2025. [Online]. Available: <https://www.unep.org>.
- [2] «World Green Building Council,» [Online]. Available: <https://worldgbc.org/thecommitment/>.
- [3] «EPA,» [Online]. Available: <https://www.epa.gov/greenerproducts/cmored>.
- [4] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *Journal of cleaner production*, 143, 757-768.
- [5] Yildiz, G., & Yahia, M. E. (2020). Comparative performance evaluation of conventional and renewable thermal insulation materials used in building envelopes. *Tehnički vjesnik*, 27(1), 283-289.
- [6] «Republique Francais,» [Online]. Available: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026810976>.
- [7] Elsacker, E., De Laet, L., & Peeters, E. (2022). Functional grading of mycelium materials with inorganic particles: The effect of nanoclay on the biological, chemical and mechanical properties. *Biomimetics*, 7(2), 57.
- [8] Mohseni, A., Vieira, F. R., Pecchia, J. A., & Gürsoy, B. (2023). Three-dimensional printing of living mycelium-based composites: Material compositions, workflows, and ways to mitigate contamination. *Biomimetics*, 8(2), 257.
- [9] Kumar, A., & Chandra, R. (2020). Ligninolytic enzymes and its mechanisms for degradation of lignocellulosic waste in environment. *Heliyon*, 6(2).
- [10] Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., & John, S. (2020). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. *Materials & Design*, 187, 108397.
- [11] Schritt, H., Vidi, S., & Pleissner, D. (2021). Spent mushroom substrate and sawdust to produce mycelium-based thermal insulation composites. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127910.
- [12] De, G., Yang, L., Lee, J., Wu, Y. H., Tian, Z., & Qin, Z. (2025). Mycelium–coir-based composites for sustainable building insulation. *Journal of Materials Chemistry A*, 13(14), 9694-9707.
- [13] Dias, P. P., Jayasinghe, L. B., & Waldmann, D. (2021). Investigation of Mycelium-Miscanthus composites as building insulation material. *Results in Materials*, 10, 100189.

- [14] Zhang, M., Zhang, Z., Zhang, R., Peng, Y., Wang, M., & Cao, J. (2023). Lightweight, thermal insulation, hydrophobic mycelium composites with hierarchical porous structure: Design, manufacture and applications. *Composites Part B: Engineering*, 266, 111003.
- [15] Atila, F. (2016). Effect of different substrate disinfection methods on the production of *Pleurotus ostreatus*. *Journal of Agricultural Studies*, 4(4), 2016.
- [16] Elsacker, E., Vandeloock, S., Van Wylick, A., Ruytinx, J., De Laet, L., & Peeters, E. (2020). A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites. *Science of The Total Environment*, 725, 138431.
- [17] Isolconfort Srl. (2017). Environmental Product Declaration – ECO-ESPANSO 100. EPDIItaly. Program Operator EPDIItaly. Declaration Number: EPD2017-02-02/V.3.
- [18] Yucel, K. T., Basyigit, C., & Ozel, C. (2003, June). Thermal insulation properties of expanded polystyrene as construction and insulating materials. In 15th symposium in thermophysical properties (pp. 54-66). Colorado, USA.: Boulder.
- [19] Antifuoco (2021). Sicurezza antincendio: la resistenza e la reazione al fuoco. <https://antifuoco.it/sicurezza-antincendio-la-resistenza-e-la-reazione-al-fuoco>
- [20] Caparol Media. La resistenza al fuoco dei Sistemi di isolamento termico a Cappotto. <https://www.caparolmedia.it/articoli/la-resistenza-al-fuoco-dei-sistemi-di-isolamento-termico-a-cappotto>.
- [21] Allien Sammler (2025). EN 13501 - Classificazione antincendio in Europa e supporto di NETZSCH per la conformità. <https://analyzing-testing.netzsch.com/it/blog/2025/en-13501-classificazione-antincendio-in-europa-e-come-netzsch-supporta-la-conformita>.
- [22] Biblus (2020). Prove di reazione al fuoco: in italiano la EN ISO 11925-2. <https://biblus.acca.it/prove-di-reazione-al-fuoco-in-italiano-la-en-iso-11925-2>.
- [23] AMSE. Cono calorimetro. https://amse.it/2024/01/30/cono-calorimetro/?_gl=1*3ay039*_up*MQ..*_ga*NjcwNzQwMDIuMTc2MzA1MTc3OQ..*_ga_
- [24] Jones, M., Bhat, T., Wang, C. H., Moinuddin, K., & John, S. (2017, August). Thermal degradation and fire reaction properties of mycelium composites. In *Proceedings of the 21st international conference on composite materials*, Xi'an, China (pp. 20-25).
- [25] Hossain, M. D., Hassan, M. K., Akl, M., Pathirana, S., Rahnamayiezekavat, P., Douglas, G., ... & Saha, S. (2022). Fire behaviour of insulation panels commonly used in high-rise buildings. *Fire*, 5(3), 81.
- [26] European Manufactures of Expanded Polystyrene (EUMEPS), (2007). Behaviour of EPS in case of fire [PDF].

- [27] Gezer, E. D., Uçar, E., & Gümüşkaya, E. (2024). Physical and mechanical properties of mycelium-based fiberboards. *BioResources*, 19(2), 3421.
- [28] Bayry, J., Aïmanianda, V., Guijarro, J. I., Sunde, M., & Latge, J. P. (2012). Hydrophobins—unique fungal proteins. *PLoS pathogens*, 8(5), e1002700.
- [29] Zhang, M., Xue, J., Zhang, R., Zhang, W., Peng, Y., Wang, M., & Cao, J. (2023). Mycelium composite with hierarchical porous structure for thermal management. *Small*, 19(46), 2302827.
- [30] Olivero, E., Gawronska, E., Manimuda, P., Jivani, D., Chaggan, F. Z., Corey, Z., ... & Nalam, P. C. (2023). Gradient porous structures of mycelium: A quantitative structure–mechanical property analysis. *Scientific reports*, 13(1), 19285.
- [31] Paoletta, A., Cocci Grifoni, R. (2009). L'uso del polistirene espanso in edilizia: Riflessioni critiche su un materiale non ecologico. WWF Italia.
- [32] AIPE – Associazione Italiana Polistirene Espanso. EPS: impatto ambientale e ciclo di vita.
- [33] Volk, R., Schröter, M., Saeidi, N., Steffl, S., Javadian, A., Hebel, D. E., & Schultmann, F. (2024). Life cycle assessment of mycelium-based composite materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 205, 107579.
- [34] Alaux, N., Vašatko, H., Maierhofer, D., Saade, M. R. M., Stavric, M., & Passer, A. (2024). Environmental potential of fungal insulation: A prospective life cycle assessment of mycelium-based composites. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29(2), 255-272.
- [35] Bagheriehnajjar, G., Yousefpour, H., & Rahimnejad, M. (2024). Environmental impacts of mycelium-based bio-composite construction materials. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(6), 5437-5458.
- [36] EPD Italy (2022). Environmental Product declaration – Pannello stampato in EPS. Dichiarazione n. TRLST22, EPDITALY0187. Empoli (FI). Validità: 2022-2027
- [37] Gan, J. K., Soh, E., Saeidi, N., Javadian, A., Hebel, D. E., & Le Ferrand, H. (2022). Temporal characterization of biocycles of mycelium-bound composites made from bamboo and *Pleurotus ostreatus* for indoor usage. *Scientific Reports*, 12(1), 19362.
- [38] Farrahnoor, A., Sazali, N. A. A., Yusoff, H., & Zhou, B. T. (2024). Effect of beeswax and coconut oil as natural coating agents on morphological, degradation behaviour, and water barrier properties of mycelium-based composite in modified controlled environment. *Progress in Organic Coatings*, 196, 108763.

- [39] Parracha, J. L., Veiga, R., Flores-Colen, I., & Nunes, L. (2023). Toward the sustainable and efficient use of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS): A comprehensive review of anomalies, performance parameters, requirements and durability. *Buildings*, 13(7), 1664.
- [40] AIPE – Associazione Italiana Polistirene Espanso. EPS: caratteristiche, produzioni, impieghi e riciclo.
- [41] Schleier, J., Simons, M., Greiff, K., & Walther, G. (2022). End-of-life treatment of EPS-based building insulation material—An estimation of future waste and review of treatment options. *Resources, Conservation and Recycling*, 187, 106603.
- [42] Hoxha, E., Passer, A., Mendes Saade, M. R., Trigaux, D., Shuttleworth, A., Pittau, F., ... & Habert, G. (2020). Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods. *Buildings & Cities*, 1(1), 504-524.
- [43] Al-Qahtani, S., Koç, M., & Isaifan, R. J. (2023). Mycelium-based thermal insulation for domestic cooling footprint reduction: a review. *Sustainability*, 15(17), 13217.
- [44] Prizzon, F., Rebaudengo, M., (2010). Parte quarta: la gestione dei costi. In Bardelli, P.G., Coppo, S., *Il cantiere edile* (pp. 552 – 553). Flaccovio Dario.
- [45] Prizzon, F., Rebaudengo, M., Taccone, G., (2014). Costruzione di un’analisi prezzi. In Roscelli, R., *Manuale di estimo* (pp. 148-151). Utet università.
- [46] <https://www.softwaretrasporti.it/costi-di-un-azienda-di-trasporti/#:~:text=Il%20costo%20medio%20pu%C3%B2%20variare,%C3%A8%20conveniente%20accettare%20il%20trasporto.>
- [47] <https://www.prontobolletta.it/offerte-luce-gas-aziende/costo-kwh/>
- [48] Prezzario Regione Piemonte 2025 <https://www.servizi.piemonte.it/srv/prezzario/prezzario-2025.shtml>
- [49] EU Emission Trading System <https://it.tradingeconomics.com/commodity/carbon>

