

ARTICLE INFO

Received 13 September 2025
Revised 22 October 2025
Accepted 24 October 2025
Published 30 December 2025

LCA E DOMANDA ENERGETICA COMPLESSIVA DEI PRODOTTI EDILI IN CANAPA

LCA AND CUMULATIVE ENERGY DEMAND OF HEMP BUILDING PRODUCTS

Maria Chiara Capasso

ABSTRACT

Il settore edile è uno dei più impattanti per l'ambiente e per ridurre il consumo energetico si sono attuati sforzi che si traducono anche nell'utilizzo di materiali edili a bassa energia incorporata, come la canapa. Per validare la conformità della canapa come materia prima idonea alla costruzione di 'edifici verdi' è stata condotta una valutazione del ciclo vita del blocco in calce e canapa e applicata la metodologia Cumulative Energy Demand per valutare l'impatto del blocco sulle risorse energetiche. La valutazione ha rilevato un ridotto impatto ambientale, con bassa influenza sulle diverse fonti energetiche e peso leggermente maggiore su quelle non rinnovabili. In questo modo il blocco risulta idoneo per l'efficientamento energetico e per il raggiungimento degli SDG 6 e 7, riducendo i consumi del settore edile e consentendo un più equo accesso all'energia e all'acqua.

The building sector is one of the most environmentally impactful; to reduce its energy consumption, various efforts have been undertaken, including the use of construction materials with low embodied energy, such as hemp. To validate hemp's suitability as a raw material for the construction of 'green buildings', a Life Cycle Assessment (LCA) of hemp-lime blocks was carried out through the application of the Cumulative Energy Demand (CED) methodology to assess the block's impact on energy resources. The assessment revealed a low environmental impact, with limited influence on different energy sources and a slightly higher weight on non-renewable ones. The block, therefore, proves suitable for energy-efficiency improvements and for achieving SDGs 6 and 7 by reducing the building sector's energy consumption and enabling more equitable access to energy and water.

KEYWORDS

canapa, architettura sostenibile, energia incorporata, domanda di energia complessiva, valutazione del ciclo vita

hemp, sustainable architecture, embodied energy, cumulative energy demand, life cycle assessment



Maria Chiara Capasso, Architect and PhD, is a Research Fellow at the Department of Architecture, 'G. d'Annunzio' University of Chieti-Pescara (Italy). She conducts research primarily in Architectural Technology, with a specific focus on the sustainable development of architectural systems. E-mail: mariachiaracapasso@unich.it

Nell'ambito degli Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile (SDGs) dell'Agenda 2030 (UN, 2015) si pone l'attenzione sulla necessità di assicurare a tutta la popolazione su scala globale l'accesso alle risorse energetiche e idriche che, rispetto agli SDG 7 (assicurare a tutti l'accesso a sistemi di energia economici, affidabili, sostenibili e moderni) e 6 (garantire a tutti la disponibilità e la gestione sostenibile dell'acqua e delle strutture igienico-sanitarie), in ambito architettonico si traduce nell'urgenza di ridurre i consumi di energia e di acqua durante l'intero ciclo vita dell'edificio. Secondo studi condotti a livello globale il settore edile è responsabile dell'utilizzo di 61 miliardi di tonnellate di acqua (Huang et alii, 2024), del 34% della domanda energetica e del 37% delle emissioni globali di anidride carbonica legate all'energia impiegata per le attività di costruzione e produzione dei materiali (UNEP, 2024). È da considerare inoltre che, nonostante la transizione energetica in atto per la sostituzione dei combustibili fossili con fonti rinnovabili, dal 2010 al 2023 il loro utilizzo negli edifici è aumentato (IEA, 2023; Fig. 1).

Per ridurre emissioni e consumi energetici del settore edile sono state elaborate diverse strategie, direttive, norme e standard e sono stati stanziati finanziamenti a livello internazionale, europeo e nazionale: dalle proposte del Green Deal Europeo (European Commission, 2019), tradotto nel Nuovo Bauhaus Europeo (European Commission, 2023, 2021c), all'ultima revisione della Direttiva Case Green (European Parliament and Council of the European Union, 2024) e al pacchetto Fit for 55 (European Commission, 2021a), che forniscono i principali obiettivi per la realizzazione di edifici a emissione zero da raggiungere entro il 2050, fino ai finanziamenti della Next Generation Europe (European Parliament, 2020) e al Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) italiano (MIMIT, 2023).

Nonostante questi sforzi il settore edile risulta ancora in ritardo nel raggiungimento della decarbonizzazione entro il 2050, in quanto il processo di cambiamento è eccessivamente lento (UNEP, 2024), probabilmente perché focalizzato sulla dimensione operativa dei manufatti edili, a discapito dell'attenzione verso l'intero ciclo vita delle costruzioni (Palumbo, Romano and Gallo, 2024). È invece fondamentale considerare che il consumo energetico di un edificio non è legato prevalentemente alla sua fase d'uso (Cabeza et alii, 2014), ma dipende dall'energia incorporata, ovvero dall'energia necessaria a produrre un'unità di prodotto.

Una possibile risposta alla realizzazione di 'edifici ad energia quasi zero' viene quindi dall'impiego di materiali a bassa energia incorporata (Arrigoni et alii, 2017); infatti del 34% della domanda energetica globale richiesta dal settore edile il 4% è rappresentato dall'energia impiegata per la lavorazione delle materie prime e la successiva produzione di cemento, acciaio, alluminio, mattoni e vetro, mentre del 37% delle emissioni di gas serra globali del settore edile il 7-9% è correlato alla produzione di questi materiali (UNEP, 2024); infine il 50% delle emissioni complessive di carbonio nei nuovi edifici è associato alle emissioni incorporate nei materiali (WBCSD and ARUP, 2023).

Da questi dati emerge la necessità da un lato di progettare gli edifici attingendo a materie prime rinnovabili e con basso valore di energia incorporata, attraverso l'impiego di materiali derivati da processi di approvvigionamento e trasformazione semplici, dall'altro di privilegiare soluzioni a secco per la di-

smissione ed il disassemblaggio della maggior parte di elementi e componenti edili a fine vita, garantendone recupero, riutilizzo o riciclo. Con tali obiettivi è possibile indagare gli scenari di fine vita dei prodotti da costruzione già dalle prime fasi del processo, quando si configurano le strategie progettuali (Finch et alii, 2021) e si selezionano accuratamente i materiali (Franzoni, 2011) da includere nelle valutazioni di impatto.

Per perseguire questi obiettivi e ridurre emissioni e consumi energetici del settore edile una fra le possibili soluzioni è l'impiego di materiali di origine naturale, derivanti da risorse rinnovabili o da biomasse vegetali (Melià et alii, 2014). In tale ottica il presente contributo rivolge l'attenzione a materiali dal basso contenuto di energia incorporata, come la canapa, e alla necessità di utilizzare la LCA (Life Cycle Assessment) per valutare aspetti ambientali ed energetici dei materiali.

Nello specifico ad oggi gli studi in campo edile hanno esteso le possibilità di scelta di materiali a basse emissioni di carbonio, ma malgrado questi ampliamenti si tratta di materiali ancora poco utilizzati (Aldersoni et alii, 2025), di conseguenza è necessario incrementare gli studi del settore, al fine di dimostrare e validare le performance di questi materiali da un punto di vista prestazionale ed ambientale (Bungau et alii, 2022), approfondendo l'influenza che hanno sull'impiego dell'energia e sulle emissioni di carbonio (Dou et alii, 2024; Madessa et alii, 2024; Li et alii, 2023).

Il contributo è strutturato in sezioni: la prima riporta una panoramica dei benefici generati dall'impiego della canapa in edilizia, anche con riferimenti a lavori già condotti dalla comunità scientifica; la seconda introduce lo strumento di valutazione LCA e la metodologia CED (Cumulative Energy Demand); la terza presenta l'applicazione della metodologia CED al blocco in calce e canapa, i risultati e le criticità emerse durante la valutazione; nella conclusione si elaborano riflessioni generali e sviluppi futuri.

Obiettivi della ricerca | Nonostante il numero di ricerche sui materiali a basse emissioni di carbonio sia in aumento, come esplicitato anche da Aldersoni et alii (2025), persistono alcune lacune. Pertanto il presente studio si prefigge di indagare le connessioni tra la scelta del materiale da costruzione e il consumo energetico per la cui quantificazione viene applicata la metodologia CED, in modo da poter integrare le informazioni a supporto della progettazione architettonica sostenibile. In questo modo si raggiunge l'obiettivo di aggiungere input importanti a sostegno dell'utilizzo dei materiali edili derivanti dalla canapa e utili per le diverse figure professionali del settore delle costruzioni, dalle aziende produttrici agli architetti ed ingegneri, fino alla classe dirigente. La metodologia CED viene impiegata infatti per misurare i consumi diretti e indiretti in mega joule (MJ) durante il ciclo di vita di un sistema, di un servizio o di un prodotto e pertanto risulta un indicatore fondamentale per stimare l'energia primaria consumata per la realizzazione di un'unità di prodotto (Samadikun, Syafrudin and Whayuni, 2024). Questo lavoro si propone quindi di approfondire l'incidenza che il ciclo di vita di prodotti edili a base di canapa ha sulle principali categorie energetiche, in modo da analizzare e restituire un'adeguata panoramica su aspetti sempre più importanti nella scelta dei prodotti derivanti da quelli che una volta erano ritenuti scarti dell'attività agricola, come il canapulo (legno di canapa).

Punti di forza e barriere nell'impiego della canapa

Nel settore edile viene adoperata la 'Cannabis sativa', una pianta potenzialmente a scarto zero (Aluigi and Viganò, 2016), dal cui fusto vengono estratte fibre e canapulo utili per la realizzazione di prodotti da costruzione (Fig. 2). Considerando il ciclo vita della canapa si evidenziano alcuni aspetti significativi: la piantagione di 'Cannabis sativa' non necessita di particolari cure ed attenzioni, di acqua per l'irrigazione, di pesticidi e fertilizzanti o altre sostanze chimiche che inquinano suolo e falde acquifere (InterChanvre, 2020) e la fase di produzione di semilavorati per l'edilizia prevede pochi e semplici passaggi. Inoltre, le piantagioni di canapa assorbono anidride carbonica dall'atmosfera: un ettaro di terreno coltivato a canapa è in grado di catturare, in circa sei mesi, 22 tonnellate di anidride carbonica, valore particolarmente elevato se confrontato con quello di foreste e altre colture più diffuse (Adesina et alii, 2020).

Questa elevata capacità di stoccare la CO₂ contribuisce ad avere prodotti per l'edilizia 'carbon negative', in quanto una parete in calce e canapulo, nonostante le emissioni generate nella fase di coltivazione e produzione (Fig. 3), è in grado di stoccare 36,08 kg di CO_{2eq} (Ip and Miller, 2012). Lo studio condotto da Nazri e Woods (2025) evidenzia infatti che i materiali isolanti in canapa hanno un elevato potenziale nel ridurre l'impatto ambientale dei materiali edili, soprattutto se paragonati a fibra di vetro, lana di roccia, EPS e XPS. Inoltre la canapa è una pianta con un ciclo di vita annuale, aspetto significativo se si considera l'ampio utilizzo di risorse naturali non rinnovabili e sempre più scarse (Ding, 2014), con conseguenti risvolti negativi sull'oscillazione dei prezzi delle materie prime (Fig. 4), sulla perdita di biodiversità globale e sullo stress idrico (Haigh, 2023).

Tutte le proprietà riscontrate nei prodotti edili in canapa consentono di considerarla una materia prima con diversi punti di forza: a) sotto il profilo ambientale, sia a livello di coltivazione che di prodotto finale per l'edilizia; b) sotto il profilo economico in quanto ha un elevato rendimento sia per il terreno di coltura che per le piantagioni, non produce scarti e richiede pochissimi input durante tutto il ciclo vita (prodotti fitosanitari, acqua ed energia) e infine costituisce una filiera potenzialmente autonoma; c) sotto il profilo sociale ed etico, in quanto l'incremento della filiera creerebbe nuovi posti di lavoro e l'assenza di sostanze nocive non danneggerebbe lavoratori e consumatori (InterChanvre, 2020).

Le barriere che frenano l'impiego diffuso dei prodotti a base di canapa nel settore edile possono essere individuate in diversi aspetti tra cui la carenza di filiere produttive, la presenza di pregiudizi verso una materia prima considerata una 'droga', la diffidenza da parte dei professionisti del settore (Capasso et alii, 2024) e diverse carenze normative (Aluigi and Viganò, 2016). A tal riguardo Jami, Karade e Singh (2019) segnalano l'opportunità di inserire i calcestruzzi a base di canapa negli standard edili, in quanto prodotti in grado di influenzare positivamente l'architettura, inoltre Barbhuiya e Bhusan Das (2022) propongono la denominazione 'bio-based materials with carbon capture and storage' per identificare materiali con elevate capacità di stoccare carbonio, richiamando l'attenzione su materiali derivanti da biomassa animale o vegetale in grado di contribuire anche alla biodiversità e all'attivazione di filiere produttive locali (Morpurgo, 2024). Attualmente sono molteplici i prodotti edili presenti sul mercato che

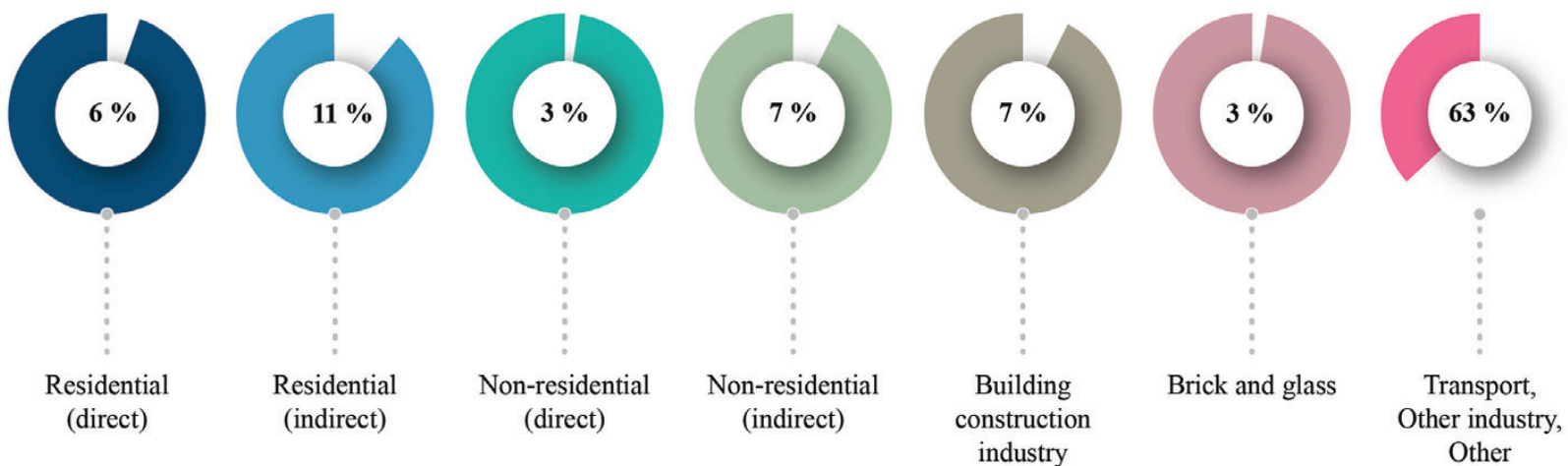


Fig. 1 | Construction sector emissions in 2022 (source: UNEP, 2024; adapted by the Author).

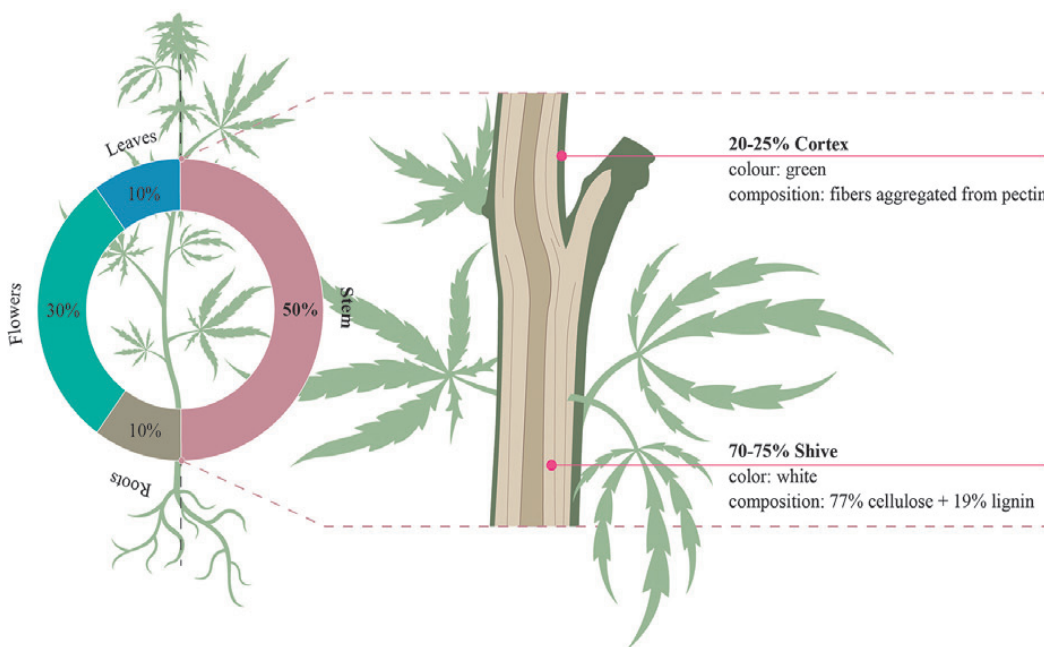


Fig. 2 | Composition of the 'Cannabis sativa' plant and structure of the stem, representing approximately 60% of the total plant and consisting of 25-30% of an external bark composed of aggregated pectin fibers and 70-75% of the internal part, particularly light, called shive and composed of cellulose and lignin (source: Azienda Agricola Passerini, 2025; adapted by the Author).

possono derivare dalle fibre di canapa o dal canapulo; nel primo raggruppamento rientrano i pannelli a bassa / media densità con fibre di canapa e leganti, comunemente utilizzati per la realizzazione di cappotti o per essere inseriti all'interno delle intercapedini murarie. I vantaggi nell'utilizzo di questo prodotto risiedono nella possibilità di essere facilmente tagliato in cantiere, per adattarsi alle condizioni esistenti, e di essere posato a secco (Perletti, Rattazzi and Zaccanti, 2020), aspetto, quest'ultimo, particolarmente rilevante in fase di demolizione selettiva del fabbricato.

Nel secondo raggruppamento rientrano quattro tipologie di materiale: le lastre ad alta densità sono un prodotto autoportante a base di canapulo e leganti impiegato per la realizzazione di partizioni interne, controsoffitti, contropareti e pareti con intercapedini interne; come i pannelli anche le lastre possono essere posate in opera a secco o con l'ausilio di malte, in quest'ultimo caso si preferisce sempre l'utilizzo di malte a base di canapa per una omogeneità e continuità materica. Un altro prodotto è composto da conglomerati a base di canapulo, calce e additivi ed è utilizzato per l'isolamento termico ed acustico, da inserire nelle intercapedini di strutture verticali o per l'esecuzione di massetti di strutture orizzontali e inclinate. Uno dei principali vantaggi di

questo prodotto è che viene fornito dalle aziende produttrici già miscelato e pronto per essere addizionato con acqua (Perletti, Rattazzi and Zaccanti, 2020).

Dal conglomerato deriva quello che viene comunemente denominato 'hemcrete', ovvero cemento di canapa, prodotto che gettato in opera all'interno di casseforme e impiegato per la realizzazione di chiusure non portanti (Di Capua et alii, 2021), risulta ideale per l'impiego combinato con strutture a telaio in legno; da un punto di vista del fine vita il cemento di canapa presenta il vantaggio di un'uniformità materica e quindi la fase di smaltimento selettivo può risultare più semplice e veloce. Ultimo prodotto è il blocco in calce e canapulo, autoportante o meno, da utilizzare per la realizzazione di chiusure e partizioni, da posare in opera con l'ausilio di una malta che ha la stessa composizione del blocco (Perletti, Rattazzi e Zaccanti, 2020) per garantire continuità materica e prestazionale alle chiusure verticali.

Sul mercato sono presenti anche prodotti per la finitura delle superfici, come intonaci e pitture che amplificano le performance di isolamento termico dei materiali sottostanti a base di canapa e consentono di abbattere i consumi energetici per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti interni.

Infine la canapa è una materia prima in grado di restituire prodotti edili¹ dall'elevato potere fonoisolante, leggeri, facili da posare in opera e durevoli nel tempo, resistenti a muffe, batteri e roditori, traspiranti e autoregolatori di umidità, resistenti al fuoco e alle sollecitazioni di compressione (EIHA, n.d.; Fig. 5, 6).

Edilizia in canapa | Secondo i dati della Commissione Europea, tra il 2015 e il 2019 la canapa industriale ha registrato nel continente un vero e proprio balzo in avanti (European Commission, n.d.): gli ettari coltivati sono passati da 19.970 a 34.960 (+75%; Fig. 7), mentre la produzione è salita da 94.120 a 152.820 tonnellate (+62,4%), con la Francia al primo posto (60% del totale), seguita da Germania (17%) e Paesi Bassi (5%). Stime diverse elaborate da InterChanvre – l'Organismo che rappresenta l'intera filiera francese – attribuiscono al 2019 una superficie coltivata di 58.000 ettari nel continente europeo (InterChanvre, 2021; Fig. 8); negli anni successivi (2020-2021) si osserva una contrazione dovuta verosimilmente ai rallentamenti produttivi e logistici imposti dalla pandemia, mentre nel 2022 gli indicatori sono tornati a crescere, segno che l'interesse per la canapa – trainato dalla domanda di materiali da costruzione a base biologica e dalle politiche europee – ha ripreso slancio dopo la parentesi emergenziale.

In Italia l'interesse per la canapa sembra comunque in aumento, anche grazie all'attenzione dedicata al settore dalla comunità scientifica, a partire dallo studio di Agliata et alii (2020) i quali hanno testato i benefici, in termini di risparmio energetico, determinati dall'impiego di materiale composito a base di calce e canapa con funzione isolante nell'intervento di ristrutturazione di Palazzo Jadiccico (XVII sec.), ubicato a Frattamaggiore. L'edificio presenta una struttura portante in tufo napoletano giallo e mattoni forati, i rivestimenti esterni in granito e quelli interni in intonaco gesso-calce.

I ricercatori hanno ipotizzato la sostituzione dei rivestimenti esterni e di quelli interni non affrescati con l'intonaco in calce e canapa. La valutazione delle prestazioni energetiche delle pareti dopo l'intervento simulato dimostra un raddoppio della capacità di isolamento, riducendo drasticamente sia l'impiego di energia per il riscaldamento interno che la domanda di energia primaria non rinnovabile. Aversa et alii (2021) hanno invece presentato i risultati

dell'impiego sperimentale di blocchi in calce e canapa in due cantieri situati in Sicilia e Veneto, verificando che le prestazioni termoigrometriche del prodotto in condizioni climatiche diverse, in regime invernale ed estivo, consentono buoni livelli di comfort interno.

LCA e metodologia CED | Le indagini citate confermano la possibilità di impiegare prodotti a base di canapa per ridurre gli impatti ambientali del settore edile. Per validare questa affermazione è necessario applicare strumenti codificati e riconosciuti dalla comunità scientifica tra cui l'approccio Life Cycle Thinking (LCT; European Commission, 2003) per la riduzione degli impatti ambientali complessivi dei prodotti, attraverso il taglio degli input (materiali ed energia) e degli output (emissioni e rifiuti) dei processi produttivi (Campioli et alii, 2018), attenzionando in modo particolare la LCA.

La valutazione del ciclo vita stimola quella 'cultura dell'errore' che enfatizza la sua individuazione

per elaborare soluzioni innovative e creative (Porfirione, Ferrari Tumay and Leggiero, 2024). Infatti la LCA è lo strumento per quantificare e valutare gli impatti ambientali di un prodotto lungo il suo ciclo vita, uno strumento utile per analizzare le prestazioni di prodotto rispetto a specifici indicatori ambientali che rende evidenti le fasi del processo più impattanti (errori) e consente di intervenire dove necessario. In questo modo i processi vengono resi trasparenti e confrontabili con i risultati di altri prodotti, permettendo di scegliere consapevolmente la soluzione migliore. La LCA si basa sulle UNI EN ISO 14040 e 14044 (aggiornate nel 2021) che hanno messo a punto una metodologia in grado di modellare gli impatti ambientali attraverso un percorso causa-effetto che collega ogni processo del ciclo di vita analizzato con uno o più potenziali effetti sull'uomo e sull'ambiente e dove ogni effetto è classificato in categorie di impatto (Sposito and De Giovanni, 2023); nella fase di valutazione si utilizzano modelli di caratterizzazione, i quali consentono di convertire i flussi

Fig. 3 | The main method of cultivation and first processing the hemp raw materials (credit: M. C. Capasso, 2025).

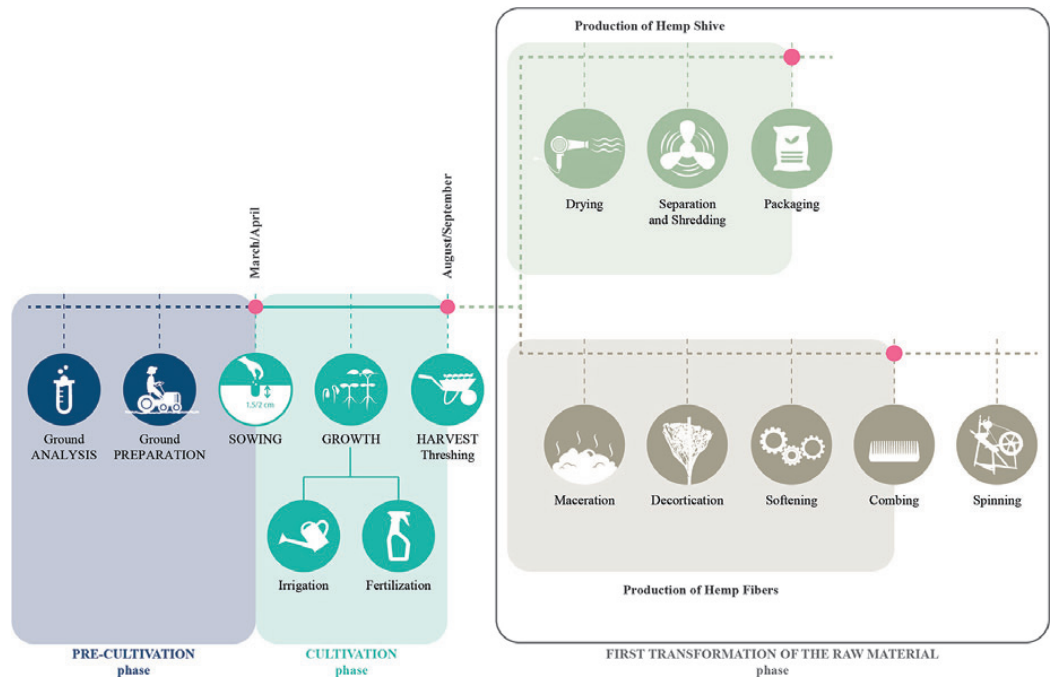
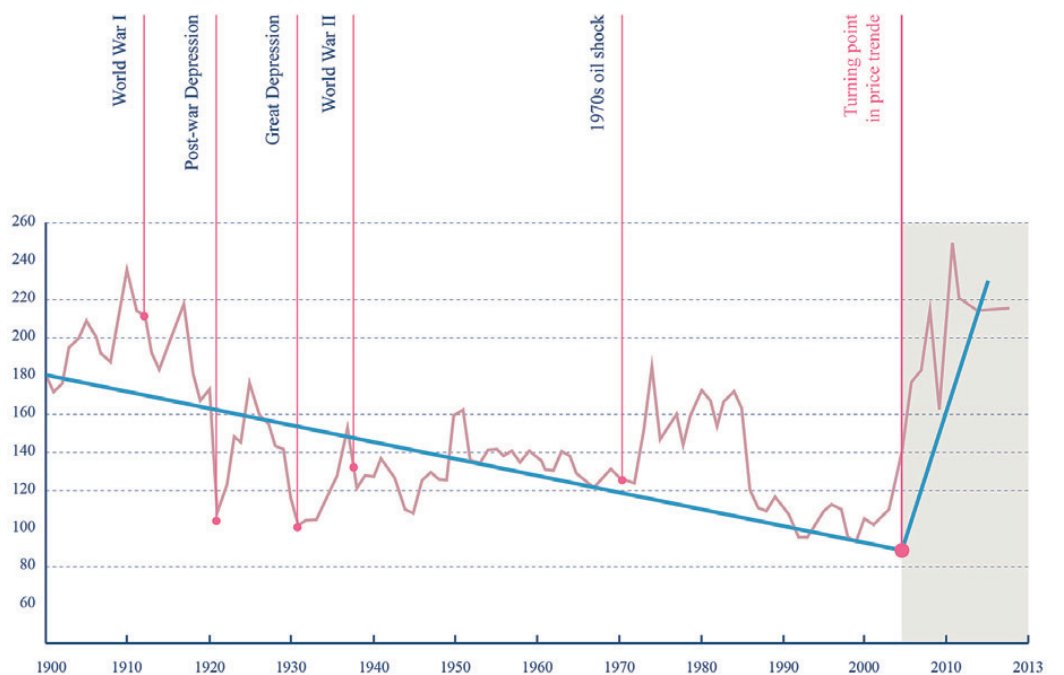


Fig. 4 | McKinsey Commodity Price Index (source: Dobbs et alii, 2011; adapted by the Author).



elementari in emissioni e categorie di impatto (European Commission, 2021b).

Fra le categorie midpoint è presente la metodologia CED che fornisce fattori di caratterizzazione per le risorse energetiche suddivise in 5 categorie, non rinnovabili e rinnovabili. Prendendo in considerazione il consumo energetico derivante da fonti 'non rinnovabili, fossili', 'non rinnovabili, nucleare', 'rinnovabile, biomassa', 'rinnovabile, vento, sole, geotermico' e 'rinnovabile, acqua' (SimaPro, 2020), come indicato da Gürzenich et alii (1999), è possibile considerare la metodologia CED un indicatore di impatto ambientale in riferimento all'esaurimento delle risorse energetiche.

La LCA è fondamentale per cercare di ridurre gli impatti ambientali legati al ciclo vita di un prodotto; tuttavia risulta una metodologia particolarmente lunga e complessa la cui attendibilità è legata alla qualità dei dati impiegati (Ding, 2014) e al tipo di processo produttivo. La valutazione è influenzata anche dalla vita utile del prodotto e questo aspetto è poco considerato; infine, oltre a non esaminare la distribuzione temporale, la LCA è sito-indipendente, ovvero non considera la distribuzione spaziale

dell'impatto, aspetto che non consente di rilevare gli impatti reali, ma solo quelli potenziali (Muazu, Rothman and Maltby, 2021).

Nel presente studio la valutazione di impatto ambientale si focalizza sull'applicazione della metodologia CED per quantificare la domanda di energia primaria da parte del ciclo vita del prodotto in analisi. Generalmente la categoria d'impatto maggiormente utilizzata negli studi LCA è il GWP, ovvero il potenziale di riscaldamento globale, per verificare l'impatto che un prodotto ha sul cambiamento climatico espresso in kg CO_{2eq}, considerando al suo interno tutti i principali gas serra emessi in un arco temporale di 100 anni. Sebbene i dati risultanti dalla CED e dal GWP siano differenti, sono entrambi necessari per valutare al meglio la scelta dei materiali da impiegare nella realizzazione di nuove costruzioni, ma anche in interventi di retrofit o risanamento di edifici preesistenti. L'utilizzo combinato di CED e GWB consente di avere una panoramica più completa sul materiale e sul prodotto edile finale, per conoscere da un lato i consumi di energia, dall'altro l'impatto che il ciclo vita del prodotto ha in termini climatici.

Le principali motivazioni che nel presente studio spingono a indagare e soffermarsi sul consumo energetico del prodotto edile, in linea con l'SDG 7, sono da ricercare nell'importanza che ha l'energia per il raggiungimento e/o il mantenimento del benessere dell'essere umano, che deve trovare un equilibrio con la limitatezza delle risorse energetiche a disposizione (Smil, 2003). Mentre in uno studio precedente (Capasso et alii, 2025) sono state identificate diverse categorie di impatto ambientale sulla stessa tipologia di prodotto, e tra queste il GWP, contenuto all'interno della metodologia CML-IA baseline, nel presente studio si riporta un approfondimento della metodologia CED.

Dall'analisi della letteratura scientifica è emerso che pochi studi applicano esplicitamente la metodologia CED ai prodotti edili a base di canapa, più comunemente si parla di energia incorporata. Nel lavoro di Fu et alii (2024) si analizza una LCA comparativa, limitandola al confine del sistema 'gate-to-gate', fra il nuovo processo di macerazione batterica e il tradizionale processo termochimico per l'ottenimento di fibre di canapa grezze: nella valutazione viene utilizzata la metodologia CED per verificare

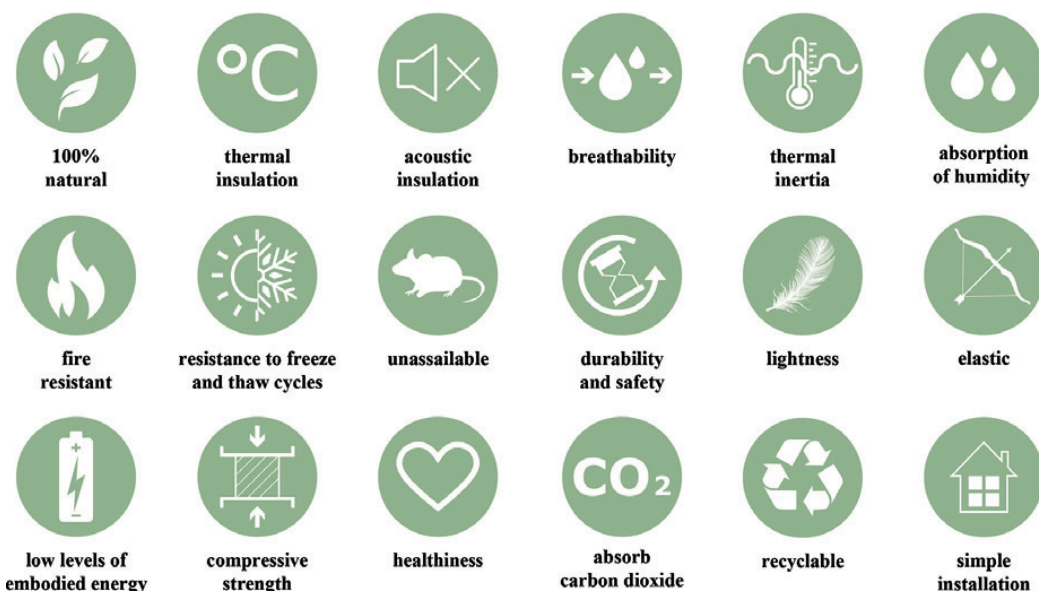


Fig. 5 | Main properties of building products derived from 'Cannabis sativa' (source: edilcanapa.it, 2024; adapted by the Author).

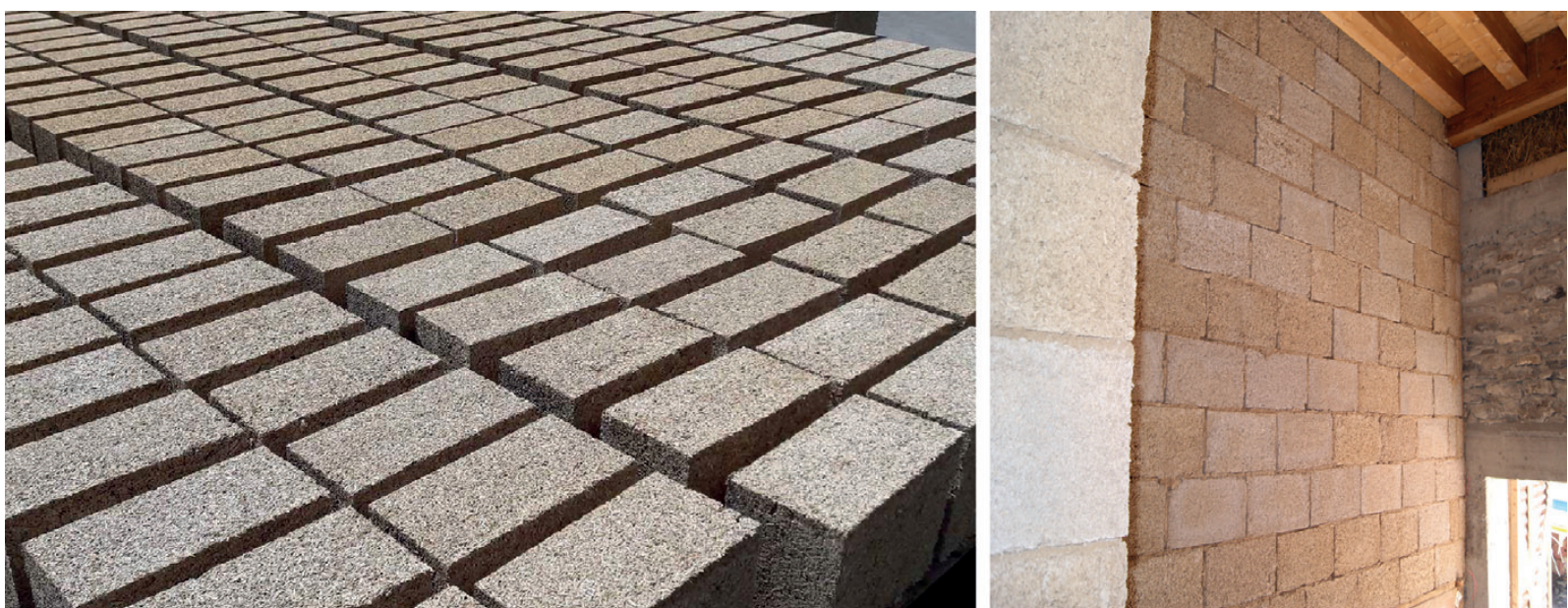


Fig. 6 | Lime and hemp blocks and block installation for a false wall (copyright: Edilcanapa Srl; source: edilcanapa.it, 2024).

Fig. 7 | Trend from 2015 to 2022 of the European Union's territorial area cultivated with hemp for fibre production (source: European Commission, n.d.; adapted by the Author).



i consumi energetici delle due tipologie di macerazione, evidenziando un risparmio del 23,9% di energia grazie all'impiego della macerazione batterica per la produzione di un grammo di fibra di canapa.

Díaz, López e Bugallo (2022) valutano alcuni prodotti derivati da biomassa di rifiuti agricoli per verificare quale sia in grado di rendere maggiormente stabile la temperatura: fra i prodotti analizzati vi è anche il cemento di canapa, un prodotto con un valore di conducibilità termica compreso tra 0,05 e 0,16 W/mK, una densità compresa tra 220 e 550 kg/m³ e un valore del calore specifico, rilevato da Kinnane et alii (2015), compreso fra 900 e 4.700 J/kgK. L'analisi condotta da Díaz, López e Bugallo (2022) relativa al comportamento del calcestruzzo in canapa, abbinato a un pannello di sughero espanso e a uno di cartongesso, rispettivamente utilizzati per l'isolamento e la chiusura della parete, ha evidenziato un'onda con oscillazione bassa e un ritardo temporale di 9 ore; lo stesso studio con la LCA della parete in canapa, condotta utilizzando dati reperiti da database, ha mostrato valori relativamente bassi (se confrontati con quelli di materiali più convenzionali) dei consumi delle principali fonti energetiche considerate dalla metodologia CED.

LCA del blocco in calce e canapa: fonti, limiti e attendibilità dell'analisi | Per validare il ridotto impatto ambientale dei prodotti edili a base di canapa e il loro basso livello di energia incorporata è stata condotta la LCA del blocco in calce e canapa, con applicazione della metodologia CED che valuta i consumi energetici del blocco durante il suo ciclo vita, individuando le risorse energetiche sulle quali esso incide maggiormente. Si precisa che si riportano i risultati della valutazione delle singole fasi oggetto di studio, in modo da semplificare la lettura dei risultati e consentire una rapida individuazione dei processi più energivori e impattanti.

La LCA è stata condotta sul blocco in calce e canapa in quanto, dal riscontro con le vendite effettuate negli ultimi anni dall'Azienda partner del progetto di ricerca, il blocco è risultato essere la componente più richiesta. Si tratta di un prodotto prefabbricato, quindi semplice e veloce da posare in opera in fase di cantierizzazione. Nello specifico il blocco in analisi è l'EC11/30 di 30 x 20 x 40 cm, con conducibilità termica pari a 0,0784 W/mK (categoria T1 – UNI EN 1745:2020), massa volumica di 424 Kg/m³, resistenza a compressione di 0,56 N/mm² e valore di trasmittanza termica dell'intera chiusura verticale realizzata con solo blocchi pari a 0,25 W/m²K. Il blocco, composto da canapulo, calce idraulica ed additivi naturali, è un isolante massiccio che combina proprietà di isolamento e massa termica; è autoportante, ma non ha funzione strut-

turale, che implica la necessità di affiancarlo a strutture portanti a telaio e di utilizzarlo come elemento di tamponatura per la realizzazione di chiusure verticali e partizioni interne, per cappotti, per isolamento termoacustico e come deumidificante in edifici di nuova costruzione o in interventi su edilizia preesistente. Si precisa che il processo produttivo del blocco avviene interamente all'interno della stessa azienda e prevede le seguenti fasi: a) pesatura delle componenti; b) miscelazione delle componenti con aggiunta di acqua; c) pressovibratura e formatura, fase nella quale la miscela del blocco viene colata e pressata all'interno degli stampi e fatta vibrare per eliminare eventuali bolle d'aria; d) asciugatura all'aria aperta del blocco estratto dallo stampo; e) deposito e stoccaggio, attraverso l'ausilio dei materiali per l'imballaggio (bancali lignei, angolari in cartonato e reggette in PET).

Lo studio ha utilizzato il programma di calcolo SimaPro 9.1 e il database Ecoinvent v3, integrando dati specifici quando disponibili. L'analisi condotta è del tipo 'from cradle to gate', comprensiva delle fasi di fornitura dei materiali (fase A1), di trasporto (fase A2) e di produzione del blocco (fase A3). In aggiunta sono state effettuate ipotesi sui carichi ambientali e sui benefici oltre i confini del sistema (modulo D), come previsto dalla normativa UNI EN 15 804:2021 (Fig. 9). L'esclusione dei moduli B e C, che limita l'applicazione e i risultati dello studio LCA, è dettata dalla momentanea impossibilità di reperire dati affidabili su queste fasi. Tralasciando quindi la fase di posa in opera, uso e manutenzione del prodotto si è utilizzata come unità dichiarata la produzione di blocchi realizzati in una mensilità (Capasso et alii, 2025). Si precisa che, per il patto di riservatezza stipulato con l'Azienda produttrice, non è possibile riportare ulteriori informazioni in merito dall'unità dichiarata, così come non sarà possibile inserire i risultati di dettaglio dell'analisi, ma solo valori aggregati.

Lo svolgimento della LCA ha visto l'impiego di dati primari forniti direttamente dall'Azienda produttrice del blocco riferiti alla fase di trasporto dai siti di produzione delle materie prime alla sede di lavorazione del prodotto (fase A1) e all'intera fase di realizzazione e imballaggio del blocco (fasi A2 e A3). Si tratta di dati considerati attendibili, in quanto specifici del processo in analisi e reperiti in loco tramite appositi questionari predisposti dall'autrice su base normativa. Sono stati invece impiegati dati di secondo livello per la descrizione della fase A1 (relativa ai processi di produzione e prima trasformazione delle materie prime) derivanti dai processi di modellizzazione del database Ecoinvent e forniti direttamente dall'Azienda CalcePiasco, attinenti alla coltivazione della canapa e alla produzione di canapulo-

lo; questi ultimi dati si considerano attendibili, in quanto derivanti da fonti certe.

L'intera valutazione ha visto l'applicazione di due metodologie che raggruppano i risultati della fase di inventario in categorie midpoint, ovvero la metodologia CED, che non valuta impatti ambientali, ma verifica i quantitativi di energia richiesta dal ciclo vita del blocco, e la metodologia CML-IA baseline, con la quale si verificano le incidenze sulle principali categorie di impatto ambientale (SimaPro, 2020). A livello endpoint è stata invece applicata la metodologia Eco-indicator 99 (H) per valutare i danni del ciclo vita del blocco sulla salute umana, sulla qualità dell'ecosistema e sulle risorse (SimaPro, 2020). Come precedentemente dichiarato, nel presente lavoro si riporta l'approfondimento di quanto emerso dall'applicazione della metodologia CED, per conformità all'SDG 7, mentre l'intera valutazione è stata indagata in una precedente pubblicazione (Capasso et alii, 2025).

Risultati | L'applicazione della metodologia CED alla fase A1 di approvvigionamento e prima trasformazione delle materie prime impiegate nella miscela del blocco ha rilevato un impatto maggiore sull'energia derivante da fonti fossili, sulla quale il processo produttivo della calce idraulica ha un'incidenza superiore (Tab. 1; Fig. 10).

La fase A2 considera il trasporto dal sito di estrazione e prima trasformazione della materia prima al sito di produzione del blocco; pertanto si sono considerati tre differenti trasporti relativi ai tre materiali che costituiscono il blocco e anche in questo caso la caratterizzazione CED ha rilevato un maggiore impatto sull'energia derivante da fonti fossili, con incidenza superiore data dal trasporto della calce idraulica, seguita da quello del canapulo (Tab. 2; Fig. 11).

La fase A3 considera i processi legati alla produzione del blocco all'interno dell'Azienda, ovvero i consumi energetici dei diversi macchinari, facendo riferimento al mix italiano di energia elettrica da rete a medio voltaggio (Capasso et alii, 2025) e all'acqua impiegata nella miscela del blocco. Come nelle precedenti fasi, la caratterizzazione della metodologia CED ha rilevato un maggiore impatto sull'energia derivante da fonti fossili, con un'incidenza superiore del processo legato all'impiego della blocchiera (Tab. 3; Fig. 12). In quest'ultimo caso sono stati adoperati dati di primo livello raccolti attraverso l'elaborazione di appositi questionari compilati durante il periodo di monitoraggio interno all'Azienda partner del progetto di ricerca.

Nella fase A3 è stata calcolata separatamente l'incidenza dell'imballaggio dei blocchi (angolari in cartone, bancali in legno e reggette in PET), comprensiva dei processi legati ai trasporti dei singoli

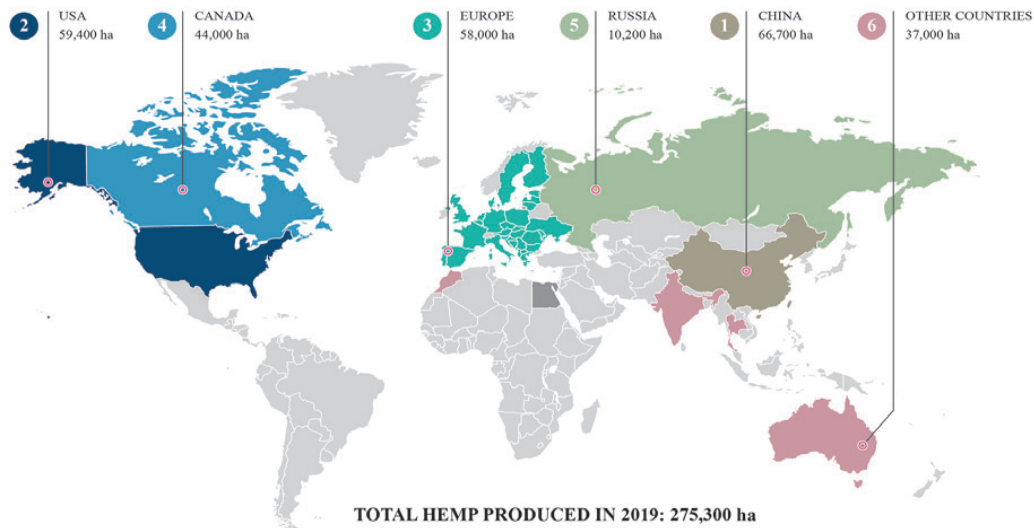


Fig. 8 | Industrial hemp cultivation in Europe in 2019 (source: InterChanvre, 2021; adapted by the Author).

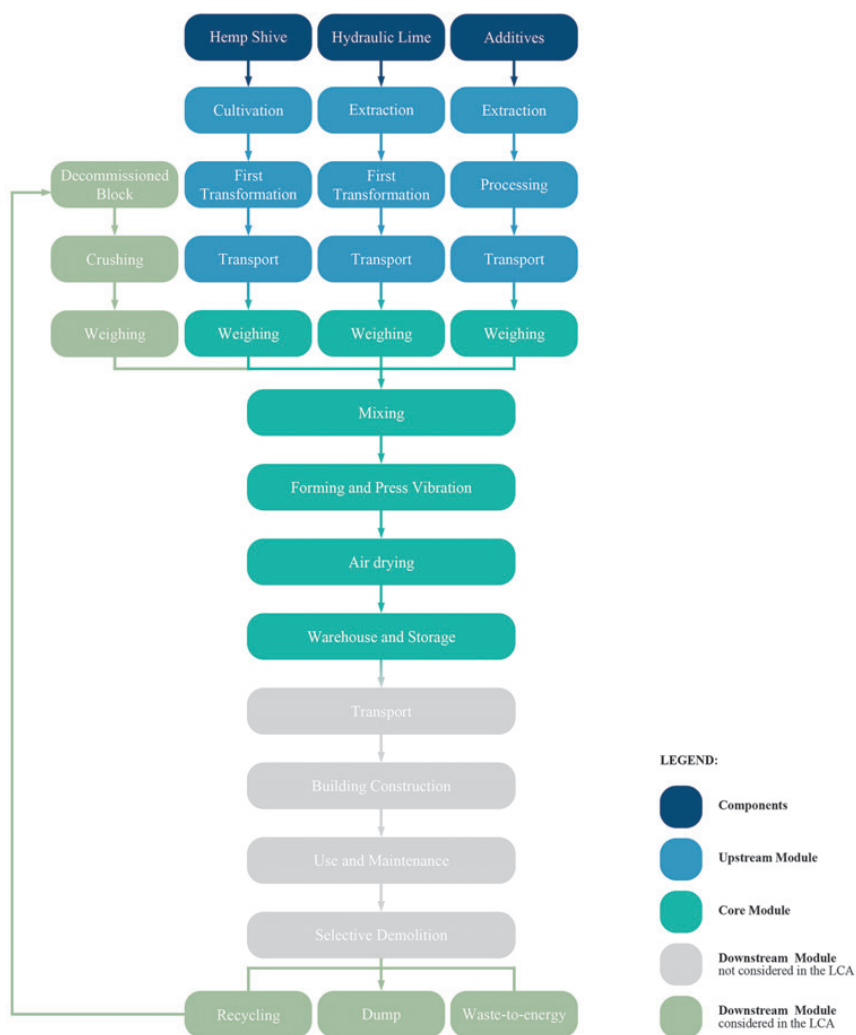


Fig. 9 | Simplified flowchart of all the processes in the block life cycle, divided into upstream, core and downstream modules (credit: M. C. Capasso, 2025).

A1 phase Raw material supply				
Impact Category	Characterisation		Weight	
	Unit	Numeric value	Unit	Numeric value
Non renewable: fossil	MJ	1.49e5	GJ	149
Non renewable: nuclear	MJ	7.61e3	GJ	7.61
Non renewable: biomass	MJ	104	GJ	0.104
Renewable: biomass	MJ	2.51e3	GJ	2.51
Renewable: wind, solar, and geothermal	MJ	1.31e3	GJ	1.31
Renewable: water	MJ	4.57e3	GJ	4.57
			Total	
			GJ	165

Tab. 1 | A1 phase: Raw material supply – Results of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

elementi dai loro siti produttivi all'Azienda che realizza il blocco. In questo caso la metodologia CED ha evidenziato una maggior incidenza sulle risorse energetiche derivanti da fonti fossili, prevalentemente legata all'impiego dei bancali e poi alle reggette in PET, mentre è quasi irrilevante l'influenza degli angolari in cartone (Tab. 4; Fig. 13).

Confrontando i risultati della presente LCA con studi di letteratura si può dedurre che, in linea generale, l'esito della metodologia CED applicata al blocco in calce e canapa ha evidenziato bassi valori di consumi energetici legati alle fasi analizzate, rilevando maggiori consumi anzitutto nella prima fase di approvvigionamento e di prima trasformazione delle materie prime e in secondo luogo nella terza fase, relativa alla produzione del blocco.

Anche se non è possibile effettuare una comparazione precisa con altri studi effettuati dalla comunità scientifica negli ultimi anni (anche a causa della differenza di unità dichiarata / funzionale impiegata), al fine di verificare l'effettivo beneficio in termini di energia consumata del blocco in calce e canapa, si è comunque effettuato un confronto di questi consumi con quelli di altri materiali più comunemente impiegati nel settore edile. Si sono considerati studi che hanno approfondito la metodologia CED su prodotti similari per funzione e spessore al blocco analizzato.

Come primo prodotto per il confronto si è deciso di considerare il mattone forato analizzato da Di Capua et alii (2021). I ricercatori hanno svolto una LCA comparativa sui confini del sistema 'from cradle to gate', fra tre differenti chiusure verticali: a) una parete in cemento di canapa; b) una parete in blocchi di canapa e calce; c) una parete in laterizi forati, alla quale è stato aggiunto un pannello di polistirene esterno, per ottenere le medesime prestazioni di isolamento termico delle prime due pareti.

Il confronto evidenzia che la soluzione costruttiva con mattoni forati è quella con un'incidenza maggiore sulle categorie di energia 'non rinnovabile, fossile' e 'non rinnovabile, nucleare', a causa soprattutto del materiale isolante in polistirene, necessario per garantire un isolamento termico adeguato. Al secondo posto, per incidenza sulla categoria di fonti energetiche fossili, si trovano le pareti in cemento di canapa, con conseguente risultato migliore sulla medesima categoria energetica da parte delle chiusure realizzate in blocchi di canapa e calce.

Wolfova (2020) nella sua valutazione comparativa ('from cradle to gate') tra due pareti portanti esterne (unità funzionale un metro quadrato) realizzate rispettivamente in mattoni (spessore 30 cm) e in blocchi di calcestruzzo cellulare (spessore 40 cm), entrambe con uno strato isolante in polistirene espanso, applica la metodologia CED. La LCA valuta la muratura in blocchi di calcestruzzo cellulare migliore rispetto a quella realizzata in mattoni per tutte le categorie energetiche considerate. La differenza maggiore fra i due prodotti si riscontra nelle categorie 'non rinnovabili, fossili' e 'rinnovabili, biomassa', nelle quali la parete in mattoni è più incidente rispetto a quella in blocchi in calcestruzzo cellulare.

A seguito di questo confronto puramente teorico fra i consumi energetici di vari prodotti impiegati per la realizzazione di chiusure verticali, possiamo confermare che il blocco in calce e canapa è un prodotto idoneo alla realizzazione di 'edifici verdi', in quanto l'incidenza delle fasi del ciclo vita analizzate sulle categorie della metodologia CED ha complessivamente valori ridotti, con una maggiore incidenza

Method: **Cumulative Energy Demand V1.09**

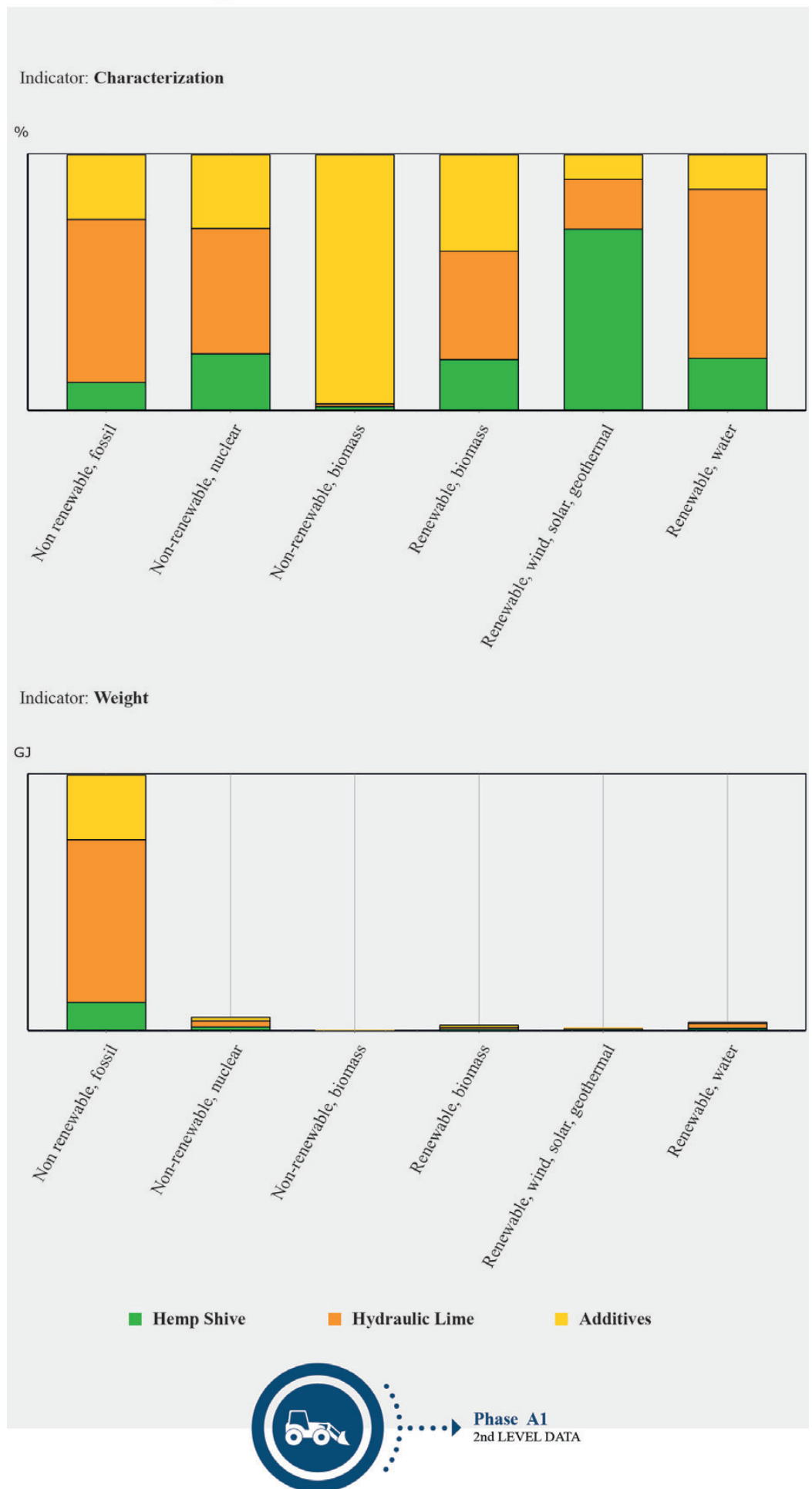


Fig. 10 | A1 phase: Raw material – Charts of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

A2 phase Transport				
Impact Category	Characterisation		Weight	
	Unit	Numeric value	Unit	Numeric value
Non renewable: fossil	MJ	1.9e4	GJ	19.4
Non renewable: nuclear	MJ	301	GJ	0.301
Non renewable: biomass	MJ	0.503	GJ	0.000503
Renewable: biomass	MJ	112	GJ	0.112
Renewable: wind, solar, and geothermal	MJ	18.4	GJ	0.0183
Renewable: water	MJ	104	GJ	0.104
			Total	
			GJ	19.9

Tab. 2 | A2 phase: Transport – Results of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

sull'energia non rinnovabile derivante da fonti fossili. Questi risultati consigliano di passare a fornitori di energia rinnovabile per ridurre gli impatti legati ai consumi energetici e, considerando il potenziale dei materiali a 'km 0', ove possibile, di individuare fornitori di calce e di additivi più vicini all'azienda produttrice del blocco, al fine di ridurre anche i consumi energetici relativi alla fase A2.

Poiché i risultati della LCA possono variare significativamente in base alle ipotesi preliminari adottate e in relazione ai limiti del sistema (Haik, Meir and Peled, 2023), è stata condotta un'analisi di sensitività sostituendo l'input energetico in fase A3 di produzione del blocco. L'analisi ha previsto la sostituzione del mix italiano di energia elettrica da rete a medio voltaggio (Capasso et alii, 2024) con energia derivante esclusivamente da fonti rinnovabili. Nella restituzione finale dei risultati aggregati della metodologia CED, in questo caso riferiti all'intero ciclo del blocco (fasi A1, A2 e A3 aggregate), si è riscontrata una cospicua diminuzione della domanda energetica, passando da 18,0 a 14,7 MJ. Nel confronto con i risultati dell'analisi di sensitività le principali variazioni si riscontrano sulle fonti energetiche 'non rinnovabili, fossili' per le quali si evidenzia un'importante riduzione del peso, mentre aumenta l'incidenza del blocco sulle categorie energetiche 'rinnovabili, vento, sole, geotermica' e 'rinnovabili, acqua'.

Essendo stata condotta un'analisi 'from cradle to gate', una delle limitazioni del lavoro è che non si conoscono gli impatti legati alle fasi di cantierizzazione e demolizione che generano rifiuti ed emissioni nell'ambiente (Ding, 2014). Nonostante questa mancanza, da un resoconto empirico dell'azienda, sappiamo che il blocco in cantiere produce sfridi che potrebbero essere recuperati e riutilizzati direttamente in loco.

Considerazioni conclusive | Il concetto di sostenibilità in ambito edile fa riferimento sia alla realizzazione di manufatti architettonici e al loro uso, sia alla riduzione dei consumi energetici e di risorse naturali; in quest'ottica è evidente il ruolo cardine della materia impiegata per la realizzazione di prodotti edili (Franzoni, 2011) e l'utilità di una LCA, intesa come approccio sistemico per la valutazione degli impatti ambientali associati a uno specifico prodotto per conoscere l'energia primaria del materiale, ovvero i quantitativi di energia consumata per l'estrazione / produzione della materia prima e l'energia necessaria per il funzionamento dei macchinari impiegati nel processo (Ding, 2014).

La LCA condotta sul blocco in calce e canapa ha rilevato una ridotta domanda energetica su tutte le principali fonti considerate dalla metodologia CED, contribuendo positivamente, se pur in minima parte, alla riduzione su scala globale della domanda energetica e delle emissioni di anidride carbonica legate all'uso dell'energia del settore edile. Alla luce di ciò il blocco risulta essere un prodotto utilizzabile per l'efficientamento energetico degli edifici e per il raggiungimento dell'SDG 7, grazie alle elevate prestazioni tecniche del prodotto e, a monte del processo, grazie all'impiego di una materia prima altamente rinnovabile, che richiede pochi e semplici processi di lavorazione, che gli assicurano un basso contenuto di energia incorporata.

Attraverso l'impiego della canapa come materia prima orientiamo il settore edile anche verso il raggiungimento dell'SDG 6, grazie alla poca acqua necessaria sia in fase di coltivazione della canapa sia in fase di creazione del blocco, consentendo così un più equo accesso all'energia e all'acqua. L'impiego della canapa genera co-benefici anche con l'SDG 12 (Garantire modelli sostenibili di produzione e di consumo) e il 3 (Salute e benessere), in quanto non solo riduce i consumi di materie prime, energia ed emissioni del settore edile, ma assicura elevati livelli di comfort interno e benessere dell'utente che vive gli spazi confinati: un materiale può infatti considerarsi sostenibile quando non ha conseguenze negative sull'uomo, sull'ambiente naturale e sul costruito (Ding, 2014).

Nonostante alcune lacune riscontrate nel processo, si ritiene che lo studio LCA condotto sia fondamentale come primo step per riconoscere e comunicare su larga scala le prestazioni ambientali del prodotto durante le varie fasi del suo ciclo vita. Un ulteriore passo sarà estendere l'attuale valutazione LCA a tutte le fasi del ciclo vita del blocco, al fine del rilascio della Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD; UNI EN ISO 14025:2010) e validare la sua conformità ai Criteri Ambientali Minimi; infine, per una panoramica completa sulla sostenibilità del blocco, sarebbe opportuno integrare lo studio LCA con gli aspetti economici e sociali.

Come dichiarato da Aldersoni et alii (2025) sono ancora presenti significative mancanze relative all'applicazione su larga scala della canapa in campo edile, una delle quali è relativa alla conoscenza degli effetti combinati nell'impiego, in un unico sistema edilizio, di diversi materiali con verificata bassa emissione di carbonio; infatti fra i limiti del presente studio si segnala quella relativa alla restrizione dell'ap-

plicazione al singolo prodotto edile, incorporato dal suo contesto di utilizzo.

Per valorizzare le potenzialità dei prodotti edili a base di canapa e superare le barriere alla loro ampia diffusione Agliata et alii (2020), confermando la necessità di ampliare gli studi, sviluppi, verifiche ed incentivi su questo tipo di prodotti, si individuano sei pilastri / aspetti fondamentali:

- 1) aspetto tecnico che tenga in considerazione tutte le proprietà della canapa e dei prodotti edili e contemporaneamente la scarsa conoscenza dei loro benefici da parte degli attori del settore, anche in ragione del fatto che in Italia si sono progressivamente perse le conoscenze legate alle tecniche di coltivazione della canapa a seguito degli effetti del proibizionismo, a partire dal 1937 e fino allo stop definitivo con l'approvazione della Convenzione Unica delle Sostanze Stupefacenti² nel 1961 (Fig. 14);
- 2) aspetto commerciale che considera l'aumento del rinnovato interesse verso la canapa solo negli ultimi 15 anni, nei quali si è notato un aumento della domanda di prodotti di origine naturale, probabilmente sollecitato dalla crescente sensibilità dei consumatori verso le problematiche di sostenibilità ambientale, oltre all'aumento dei prezzi delle materie prime più convenzionali a seguito della crisi petrolifera (Dobbs et alii, 2011); tale interesse crescente è dimostrato dall'aumento della coltivazione / produzione di canapa e della domanda di prodotti edili da parte del mercato (Fig. 15) che comunque potrebbe essere ostacolato dalla scarsa redditività economica della piantagione per i suoi coltivatori, a causa delle lunghe tempistiche di stoccaggio della materia prima e dell'incidenza dei trasporti;
- 3) aspetto conoscitivo che riprende la mancanza di conoscenza da parte degli operatori del settore sulle potenzialità dell'utilizzo della canapa in edilizia;
- 4) aspetto normativo ufficialmente riconosciuto dal Parlamento Italiano (2016, art. 1) che ha affermato come questa coltura sia in grado di «[...] contribuire alla riduzione dell'impatto ambientale in agricoltura e del consumo dei suoli, della desertificazione e della perdita di biodiversità, nonché come coltura da impiegare quale possibile sostituto di colture eccedentarie e come coltura da rotazione». Un riconoscimento che, insieme alle importanti proprietà tecniche dei prodotti edili in canapa, dovrebbe trovare riscontro nello sviluppo di norme tecniche specifiche per le costruzioni in canapa, come avvenuto in Francia nel 2014 con le Règles Professionnelles de la Construction en Chanvre³ e successivi aggiornamenti;
- 5) aspetto psicologico che vede la necessità di au-

mentare la diffusione delle conoscenze sulla ‘Cannabis sativa’ e sui prodotti che ne derivano, al fine di eliminare qualsiasi fraintendimento con la marijuana; 6) aspetto invisibile, legato alla competitività dei prodotti in canapa rispetto ai prodotti edili tradizionali in termini di prestazioni e di qualità del comfort interno restituito.

In conclusione lo studio proposto, che è incentrato sulla materia e sul suo ciclo vita, evidenzia il ruolo essenziale dell’LCA per promuovere pratiche sostenibili in ambito edile e individuare le opportunità di miglioramento (Carvalho et alii, 2025). Sebbene quello presentato sia un approccio che punta alla ‘efficienza’ dei processi, parallelamente è necessario promuoverne uno sulla ‘sufficienza’ (Ness, 2024), come ribadito dal New European Bauhaus (European Commission, 2023, 2021c), al fine di stimolare soluzioni in grado di soddisfare esigenze e bisogni impiegando un quantitativo minore di risorse non rinnovabili e attivando azioni per il recupero e il riuso del patrimonio costruito.

Within the framework of the Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda (UN, 2015), focus is placed on the need to ensure that the entire global population has access to energy and water resources. In the field of architecture, and with regard to SDG 7 (ensuring access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all) and SDG 6 (ensuring the availability and sustainable management of water and sanitation for all), this translates into the urgent need to reduce energy and water consumption throughout the entire life cycle of buildings. According to global studies, the construction sector is responsible for the use of 61 billion tonnes of water (Huang et alii, 2024), 34% of energy demand and 37% of global carbon dioxide emissions related to energy used in construction and material production activities (UNEP, 2024). It is also worth noting that, despite the ongoing energy transition from fossil fuels to renewable sources, their use in buildings increased between 2010 and 2023 (IEA, 2023; Fig. 1).

Various strategies, directives, norms and standards have been developed to reduce emissions and energy consumption in the building sector, and funding has been allocated at international, European and national level: from the proposals of the European Green Deal (European Commission, 2019), translated into the New European Bauhaus (European Commission, 2023, 2021c), to the latest revision of the Case Green Directive (European Parliament and Council of the European Union, 2024) and the Fit for 55 package (European Commission, 2021a), which provide the primary targets for zero-emission buildings to be achieved by 2050, up to the funding of the Next Generation Europe (European Parliament, 2020) and the Italian National Recovery and Resilience Plan (MIMIT, 2023).

Despite these efforts, the construction sector is still lagging behind in achieving decarbonisation by 2050, as the process of change is excessively slow (UNEP, 2024), probably because it is focused on the operational dimension of construction products, to the detriment of the focus on the entire construction life cycle (Palumbo, Romano and Gallo, 2024). However, it is crucial to consider that the energy consumption of a building is not mainly related to its use phase (Cabeza et alii, 2014), but depends on the embodied energy, i.e., the energy required to produce

Method: **Cumulative Energy Demand V1.09**

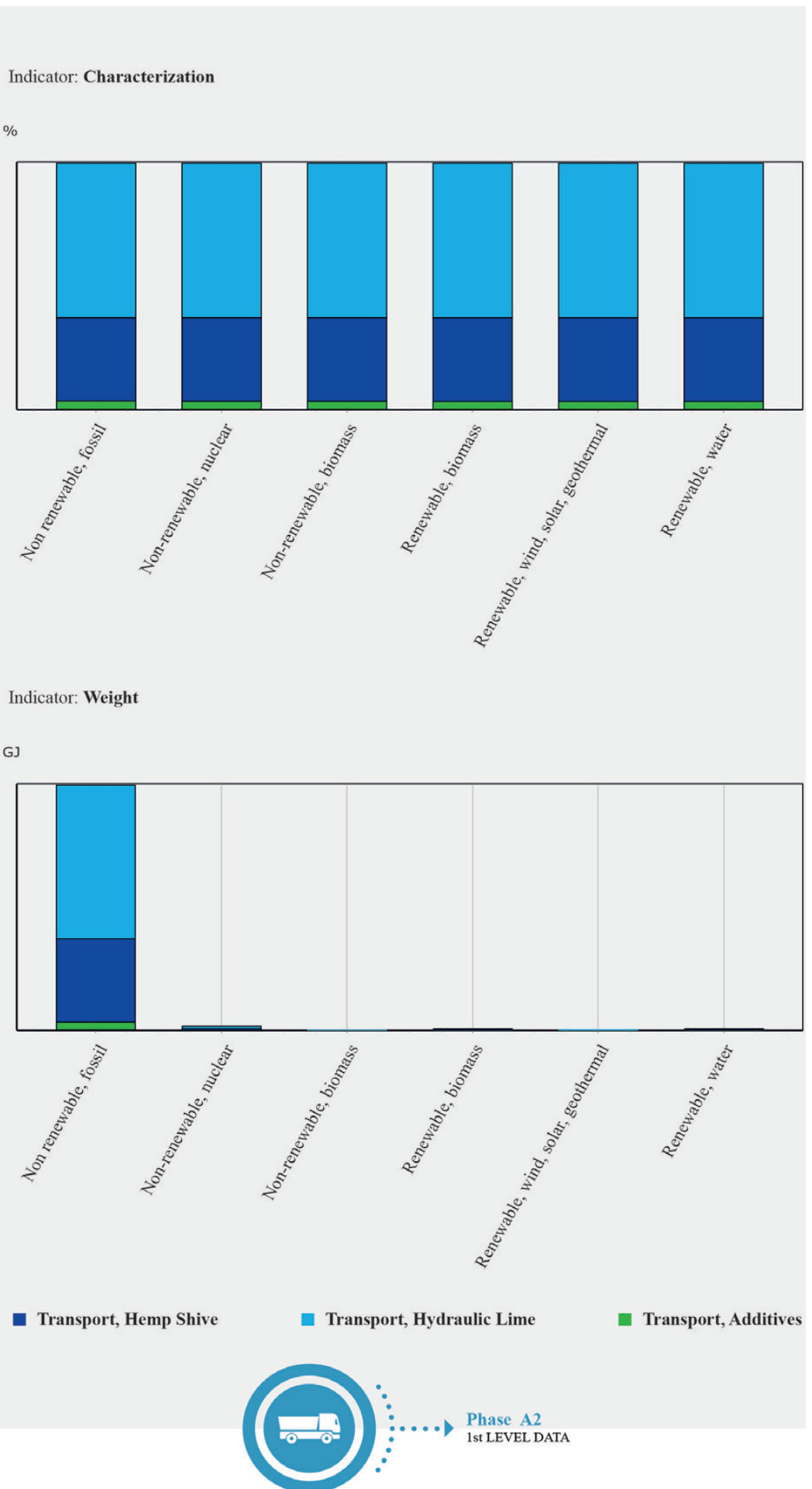


Fig. 11 | A2 phase: Transport – Charts of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

A3 phase Manufacturing processes				
Impact Category	Characterisation		Weight	
	Unit	Numeric value	Unit	Numeric value
Non renewable: fossil	MJ	7.77e4	GJ	77.7
Non renewable: nuclear	MJ	1.06e4	GJ	10.6
Non renewable: biomass	MJ	8.63	GJ	0.00863
Renewable: biomass	MJ	1.66e3	GJ	1.66
Renewable: wind, solar, and geothermal	MJ	6.06e3	GJ	6.06
Renewable: water	MJ	5.94e3	GJ	5.94
			Total	
			GJ	102

Tab. 3 | A3 phase: Manufacturing processes – Results of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

a unit of product. A promising approach to achieving nearly zero-energy buildings is the use of low embodied-energy materials (Arrigoni et alii, 2017). Of the 34% of global energy demand attributable to the construction sector, 4% is used for processing raw materials and producing cement, steel, aluminium, bricks, and glass. Meanwhile, 7-9% of the sector’s total greenhouse gas emissions stem from producing these materials (UNEP, 2024), and 50% of all carbon emissions in new buildings are associated with embodied carbon in materials (WBCSD and ARUP, 2023).

This data highlights the need, on the one hand, to design buildings by drawing on renewable raw materials with low embodied-energy value, through the use of materials derived from simple procurement and transformation processes, and, on the other hand, to favour dry solutions for the decommissioning and disassembly of most building elements and components at the end of their life, ensuring their recovery, reuse or recycling. With such objectives in mind, it is possible to investigate end-of-life scenarios for construction products early on in the process, when designing strategies (Finch et alii, 2021) and carefully selecting materials (Franzoni, 2011) for inclusion in impact assessments.

To meet these goals and reduce emissions and energy consumption in the building sector, one possible solution is to employ natural materials from renewable resources or plant-based biomass (Melià et alii, 2014). In this context, the present study focuses on low-embodied-energy materials, such as hemp, and on the need to use LCA (Life Cycle Assessment) to evaluate their environmental and energy performance.

Specifically, studies in the construction field have now expanded the range of low-carbon materials available, but despite this expansion, these materials are still rarely used (Aldersoni et alii, 2025). Consequently, there is a need for more studies in the field to demonstrate and validate the performance of these materials from a performance and environmental point of view (Bungau et alii, 2022), and to investigate their influence on energy use and carbon emissions (Dou et alii, 2024; Madessa et alii, 2024; Li et alii, 2023).

The contribution is divided into sections: the first provides an overview of the benefits generated by the use of hemp in construction, including references to work already carried out by the scientific community; the second introduces the LCA assessment tool and the CED (Cumulative Energy Demand) methodology; the third presents the application of the CED

methodology to lime and hemp blocks, the results, and the critical issues that emerged during the assessment. The conclusion presents general reflections and future developments.

Research objectives | Although the amount of research on low-carbon materials is increasing, as also explained by Aldersoni et alii (2025), some gaps remain. Therefore, this study investigates how the selection of building materials influences energy consumption, quantified through the CED method, to inform sustainable architectural design. This contributes valuable insights supporting the use of hemp-derived building materials, information relevant to manufacturers, architects, engineers, and construction managers alike. The CED methodology measures both direct and indirect energy consumption, expressed in megajoules (MJ), throughout the life cycle of a system, service, or product. It therefore serves as a key indicator for estimating the primary energy required to produce a single unit of product (Samadikun, Syafrudin and Whayuni, 2024).

This study aims to examine the life-cycle impacts of hemp-based building products on key energy categories and to analyse and provide a comprehensive overview of aspects that are becoming increasingly significant in the selection of materials derived from what was once considered agricultural waste, such as hemp shive (hemp wood).

Strengths and barriers in the use of hemp | The construction sector employs ‘Cannabis sativa’: a potentially zero-waste plant (Aluigi and Viganò, 2016), whose stalks yield fibre and hemp shive, both valuable in producing building materials (Fig. 2). When considering the life cycle of hemp, several key features emerge. The cultivation of ‘Cannabis sativa’ requires minimal care, as it grows without irrigation, pesticides, fertilisers, or other chemicals that contaminate soil and groundwater (InterChanvre, 2020). Moreover, producing semi-finished construction materials from hemp requires only a few simple processing steps. In addition, hemp plantations absorb significant amounts of carbon dioxide from the atmosphere. One hectare of hemp can capture about 22 tonnes of CO₂ in about six months, a rate notably higher than that of forests and other common crops (Adesina et alii, 2020).

This high CO₂ storage capacity contributes to ‘carbon-negative’ building products, as a lime and hemp shive wall (Fig. 3) can store 36.08 kg of CO_{2eq} (Ip and Miller, 2012) despite the emissions gener-

ated during cultivation and production. Indeed, the study by Nazri and Woods (2025) shows that hemp-based insulation materials have strong potential to reduce the environmental impact of building materials, particularly when compared with fibreglass, rockwool, EPS, and XPS. In addition, hemp is an annual plant, a feature of particular significance given the widespread use of non-renewable and increasingly scarce natural resources (Ding, 2014), which in turn negatively affects commodity price stability (Fig. 4), global biodiversity loss and water stress (Haigh, 2023).

All the properties identified in hemp-based building materials highlight its potential as a raw material with multiple advantages: (a) Environmental, as it offers benefits both during cultivation and in the performance of the final building product; (b) Economic, as it provides high yields for both soil and plantations, produces no waste, requires minimal inputs throughout its life cycle (such as plant protection products, water, and energy), and supports the development of a potentially self-sustaining supply chain; (c) Social and ethical, as the expansion of this supply chain would create new employment opportunities, and the absence of harmful substances ensures the safety of both workers and consumers (InterChanvre, 2020).

The barriers hindering the widespread use of hemp products in the construction sector can be attributed to several factors, including the lack of production chains, persistent prejudice toward a raw material perceived as a ‘drug’, mistrust among professionals in the sector (Capasso et alii, 2024), and various regulatory shortcomings (Aluigi and Viganò, 2016). In this regard, Jami, Karade and Singh (2019) highlight the desirability of including hemp-based concretes in building standards, as these products can positively influence architectural design. Barbhuiya and Bhusan Das (2022) propose the term ‘bio-based materials with carbon capture and storage’ to describe materials with high carbon storage capacity, focusing on those derived from animal or plant biomass that can also promote biodiversity and the development of local production chains (Morpurgo, 2024).

At present, many building products available on the market can be derived from hemp fibres or hemp shive. The first group includes low to medium-density panels made with hemp fibres and binders, which are commonly used to make coatings or to be inserted into wall cavities. The advantages of using this product lie in its ability to be easily cut on site,

to adapt to existing conditions, and to be laid dry (Perletti, Rattazzi and Zaccanti, 2020), the latter being particularly relevant during selective building demolition.

The second group includes four types of material. High-density slabs are self-supporting products made of hemp shive and binders, used for constructing internal partitions, false ceilings, counter walls, and walls with internal cavities. Like the panels, the slabs can be installed dry or with the aid of mortars; in the latter case, hemp-based mortars are preferred to ensure material homogeneity and continuity. Another product consists of conglomerates of hemp shive, lime, and additives, used for thermal and acoustic insulation, either inserted into the cavities of vertical structures or applied as screeds in horizontal and sloping structures. One of the main advantages of this product is that it is supplied by manufacturers pre-mixed and ready for combination with water (Perletti, Rattazzi and Zaccanti, 2020).

From the conglomerate comes what is commonly referred to as 'hemcrete', a product that, when cast into formwork and used for the construction of non-load-bearing closures (Di Capua et alii, 2021), is ideal for use in combination with wooden platform-frame structures; from an end-of-life perspective, hemp cement has the advantage of material uniformity and therefore the selective disposal phase may be easier and faster. The last product is the lime and hemp shive block, either self-supporting or not, used for constructing enclosures and partitions: these blocks are laid on site with a mortar of the same composition to ensure material and performance continuity in the vertical closures (Perletti, Rattazzi and Zaccanti, 2020).

There are also surface finishing products available on the market, such as plasters and paints, which enhance the thermal insulation performance of the underlying hemp-based materials and reduce energy consumption for heating and cooling indoor spaces. Finally, hemp is a raw material capable of producing building products¹ that are highly soundproof, lightweight, easy to install, durable, resistant to mould, bacteria, and rodents, breathable and moisture-regulating, and fire- and compressive-stress-resistant (EIHA, n.d.; Figg. 5, 6).

Hemp construction | According to data from the European Commission, between 2015 and 2019 industrial hemp cultivation in Europe experienced a significant surge (European Commission, n.d.): the cultivated area increased from 19,970 to 34,960 hectares, representing a 75% growth (Fig. 7), while production increased from 94,120 to 152,820 tonnes (+62.4%), with France accounting for the largest share (60% of the total), followed by Germany (17%) and the Netherlands (5%). Different estimates provided by InterChanvre – the organisation representing the entire French hemp industry – indicate that the cultivated area in Europe reached 58,000 hectares in 2019 (InterChanvre, 2021; Fig. 8); in the following years (2020-2021), a contraction was observed, likely due to the production and logistical slowdowns caused by the pandemic. In 2022, however, the indicators returned to growth, indicating that interest in hemp – driven by the demand for bio-based building materials and by European policies – regained momentum after the temporary pandemic downturn.

However, interest in hemp appears to be growing in Italy, partly due to the attention the sector has received from the scientific community, starting with

Method: Cumulative Energy Demand V1.09

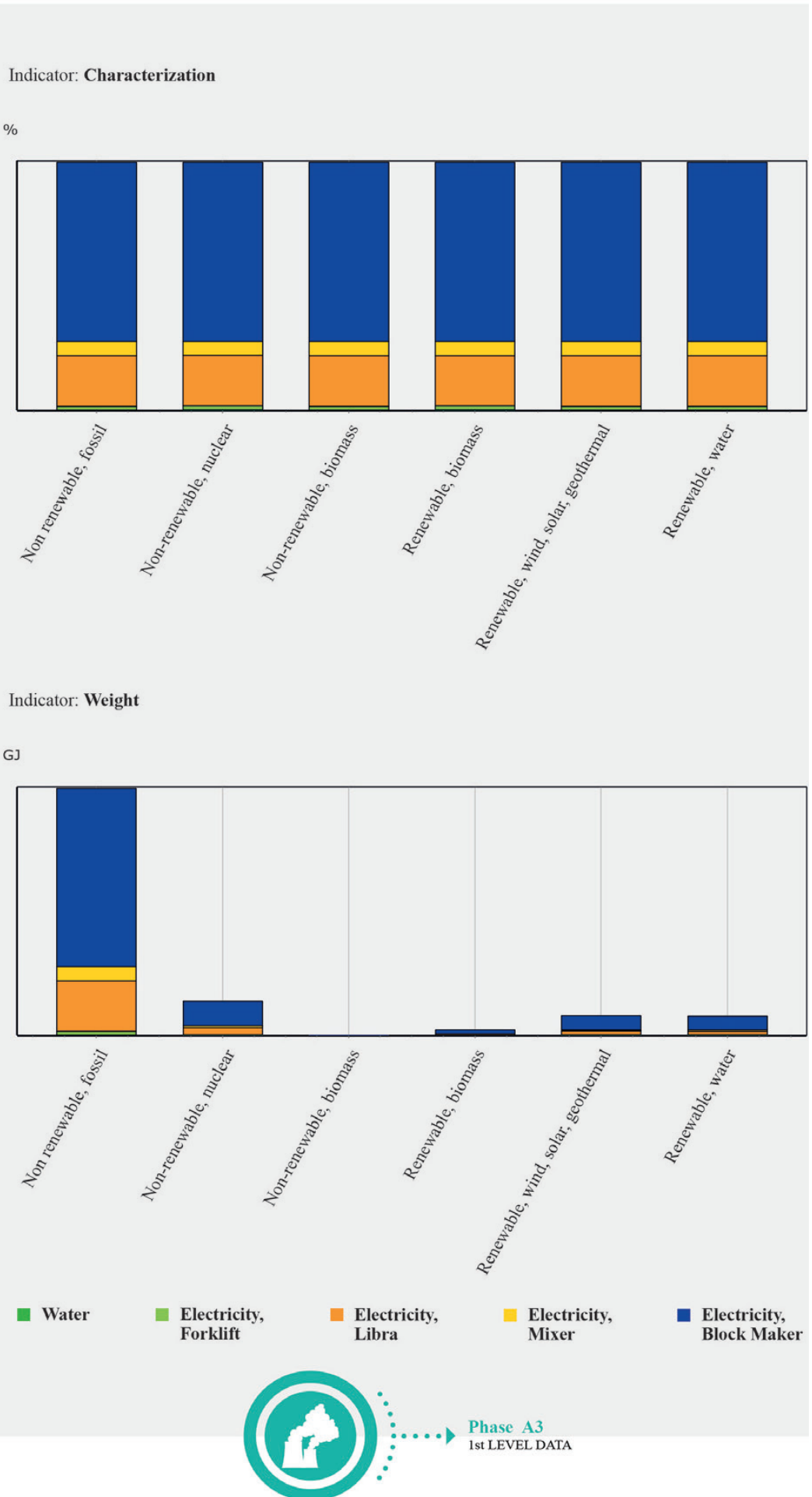


Fig. 12 | A3 phase: Manufacturing processes – Charts of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

the study by Agliata et alii (2020), which examined the energy-saving benefits resulting from the use of a lime and hemp-based composite material with an insulating function in the renovation of Palazzo Jadicco (17th century), located in Frattamaggiore. The building features a load-bearing structure made of yellow Neapolitan tuff and perforated bricks, with granite cladding on the exterior and gypsum-lime plaster on the interior.

The researchers hypothesised that replacing the external cladding and the non-frescoed interior walls with lime and hemp plaster would improve the building's energy efficiency. The evaluation of the walls' energy performance after the simulated intervention showed a doubling of their insulation capacity, significantly reducing both the energy required for indoor heating and the demand for non-renewable primary energy. On the other hand, Aversa et alii (2021) presented the results of the experimental use of lime and hemp blocks at two construction sites in Sicily and Veneto, verifying that the thermo-hygro-metric performance of the product under different climatic conditions, both in winter and in summer, ensures good levels of indoor comfort.

LCA and CED methodology | The studies mentioned above confirm the potential of hemp-based products to reduce the environmental impacts of the construction sector. To validate this assertion, it is necessary to apply standardised tools recognised by the scientific community, including the Life Cycle Thinking (LCT; European Commission, 2003) approach, which aims to reduce the overall environmental impacts of products by minimising the inputs (materials and energy) and outputs (emissions and waste) of production processes (Campioli et alii, 2018), with particular attention to LCA.

Life Cycle Assessment fosters a 'culture of error' that emphasises identifying mistakes as a means to develop innovative and creative solutions (Porfirione, Ferrari Tumay and Leggiero, 2024). In fact, LCA is the tool used to quantify and assess a product's environmental impacts throughout its life cycle. It is a valuable method for analysing product performance against specific environmental indicators, revealing the most impactful process stages (errors) and enabling targeted corrective actions where necessary. In this way, processes become transparent and comparable with the results of other products, enabling an informed selection of the most appropriate solution. LCA is based on UNI EN ISO 14040 and 14044 standards (updated in 2021), which de-

fine a methodology capable of modelling environmental impacts through a cause-and-effect pathway that connects each analysed life cycle process with one or more potential effects on humans and the environment, with each effect classified into specific impact categories (Sposito and De Giovanni, 2023). Characterisation models are employed in the assessment phase to convert elementary flows into emissions and corresponding impact categories (European Commission, 2021b).

Midpoint categories include the CED methodology, which provides characterisation factors for energy resources divided into five categories, both non-renewable and renewable. Taking into account energy consumption from 'non-renewable, fossil', 'non-renewable, nuclear', 'renewable, biomass', 'renewable, wind, solar, geothermal' and 'renewable, water' sources (SimaPro, 2020), it is therefore possible, as indicated by Gürzenich et alii (1999), to consider the CED methodology as an indicator of environmental impact in relation to the depletion of energy resources. LCA is essential for reducing the environmental impacts associated with a product's life cycle; however, it is a particularly time-consuming and complex methodology, whose reliability depends on the quality of the data used (Ding, 2014) and the specific characteristics of the production process. The assessment is also influenced by the product's useful life, an aspect that is often overlooked. Moreover, in addition to disregarding temporal distribution, LCA is site-independent – that is, it does not account for the spatial distribution of impacts – therefore allowing the identification of potential rather than actual effects (Muazu, Rothman and Maltby, 2021).

In this study, the environmental impact assessment focuses on applying the CED methodology to quantify the primary energy demand associated with the product's life cycle. Generally, the impact category most commonly used in LCA studies is the Global Warming Potential (GWP), which assesses a product's impact on climate change, expressed in kg CO_{2eq}, and accounts for all major greenhouse gases emitted over a 100-year period. Although the data from CED and GWP differ, both are necessary for a more comprehensive assessment of material selection in the construction of new buildings and in the retrofitting or renovation of existing ones. The combined use of CED and GWP offers a more complete understanding of both the material and the final building product, allowing for the evaluation of ener-

gy consumption as well as the product's climate-related life-cycle impacts.

In the present study, the main motivation for investigating the energy consumption of the building product, in line with SDG 7, lies in the fundamental role of energy in achieving and maintaining human well-being, which must be balanced with the limited energy resources available to us (Smil, 2003). While a previous study (Capasso et alii, 2025) identified various categories of environmental impact for the same product type, including the GWP, as defined within the CML-IA baseline methodology, the present work provides an in-depth analysis of the CED methodology.

A review of the scientific literature reveals that few studies explicitly apply the CED methodology to hemp-based building products, instead referring more frequently to embodied energy. In the study by Fu et alii (2024), a comparative LCA is conducted within a 'gate-to-gate' system boundary, comparing the new bacterial retting process with the traditional thermochemical process used to obtain raw hemp fibre. The CED methodology is applied to assess the energy consumption of the two retting methods, revealing a 23.9% reduction in energy use when employing bacterial retting for the production of one gram of hemp fibre.

Díaz, López and Bugallo (2022) evaluate several products derived from agricultural waste biomass to determine which exhibits greater thermal stability. Among the materials analysed is hempcrete, characterised by a thermal conductivity ranging between 0.05 and 0.16 W/mK, a density between 220 and 550 kg/m³, and a specific heat capacity, as reported by Kinnane et alii (2015), between 900 and 4,700 J/kgK. The analysis conducted by Díaz, López and Bugallo (2022) on the performance of hemp concrete, combined with a cork foam panel and a plasterboard panel, used respectively for insulation and wall closure, revealed a low oscillation wave and a time lag of nine hours. The same study, which included an LCA of the hemp wall based on data from existing databases, reported relatively low values, when compared to those of more conventional materials, for the consumption of the main energy sources considered in the CED methodology.

LCA of the lime and hemp block: sources, limits and reliability of the analysis | To validate the reduced environmental impact of hemp-based building products and their low embodied energy, the LCA of the lime and hemp block was carried out

A3 phase Hemp-Block Packaging				
Impact Category	Characterisation		Weight	
	Unit	Numeric value	Unit	Numeric value
Non renewable: fossil	MJ	8.55e3	GJ	8.55
Non renewable: nuclear	MJ	666	GJ	0.666
Non renewable: biomass	MJ	4.16	GJ	0.00416
Renewable: biomass	MJ	3.03e4	GJ	30.3
Renewable: wind, solar, and geothermal	MJ	29.6	GJ	0.0296
Renewable: water	MJ	169	GJ	0.169
			Total	
			GJ	39.7

Tab. 4 | A3 phase: Hemp-Block Packaging – Results of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

using the CED methodology. This approach assesses the block's energy consumption throughout its life cycle, identifying the energy resources on which it exerts the greatest impact. It should be noted that the results of the evaluation of the individual phases under analysis are presented to facilitate interpretation of the findings and enable rapid identification of the most energy-intensive and impactful processes.

The LCA was conducted on the lime and hemp block, as recent sales data from the partner company involved in the research project indicated that this component was the most widely used. It is a prefabricated product that enables quick, straightforward installation during construction. Specifically, the block under analysis is EC1 1/30 measuring 30 x 20 x 40 cm, with a thermal conductivity of 0.0784 W/mK (category T1 – UNI EN 1745:2020), volume mass of 424 Kg/m³, compressive strength of 0.56 N/mm² and thermal transmittance value of the entire vertical closure made only with blocks equal to 0.25 W/m²K.

The block, composed of hemp shive, hydraulic lime, and natural additives, is a massive insulating material that combines thermal insulation properties with thermal mass. It is self-supporting but non-structural, which means it can be used in conjunction with load-bearing frame structures and serve as an infill element for external walls and internal partitions, as cladding, for thermo-acoustic insulation, and as a dehumidifying component in both new constructions and retrofit interventions on existing buildings.

It's worth noting that the block production process is carried out entirely within the same company and includes the following phases: (a) weighing of the components; (b) mixing of the components with the addition of water; (c) pressing and moulding, during which the mixture is poured and compacted inside the moulds and vibrated to remove any air bubbles; (d) open-air drying of the block after demoulding; and (e) storage and warehousing, which involve the use of packaging materials, as wooden pallets, cardboard corner protectors, and PET strapping.

The study employed SimaPro 9.1 calculation software and the Ecoinvent v3 database, integrating specific data where available. The analysis conducted follows a 'cradle-to-gate' approach, encompassing the stages of material supply (phase A1), transport (phase A2), and block production (phase A3). In addition, assumptions were made about environmental loads and benefits across system boundaries (module D), as required by UNI EN 15804:2021 (Fig. 9). The exclusion of modules B and C, which restricts the scope and applicability of the LCA results, is due to the current unavailability of reliable data for these phases. Therefore, excluding the installation, use, and maintenance phases of the product, the production of blocks manufactured over the course of one month was adopted as the declared unit (Capasso et alii, 2025). Due to the confidentiality agreement with the manufacturing company, it is not possible to disclose further details regarding the declared unit or present the detailed results of the analysis; only aggregated values can therefore be reported.

The LCA was carried out using primary data provided directly by the block manufacturer, covering the transport phase from the raw material production sites to the processing facility (phase A1), as well as the entire block production and packaging process (phases A2 and A3). These data are considered reliable because they are specific to the pro-

Method: Cumulative Energy Demand V1.09

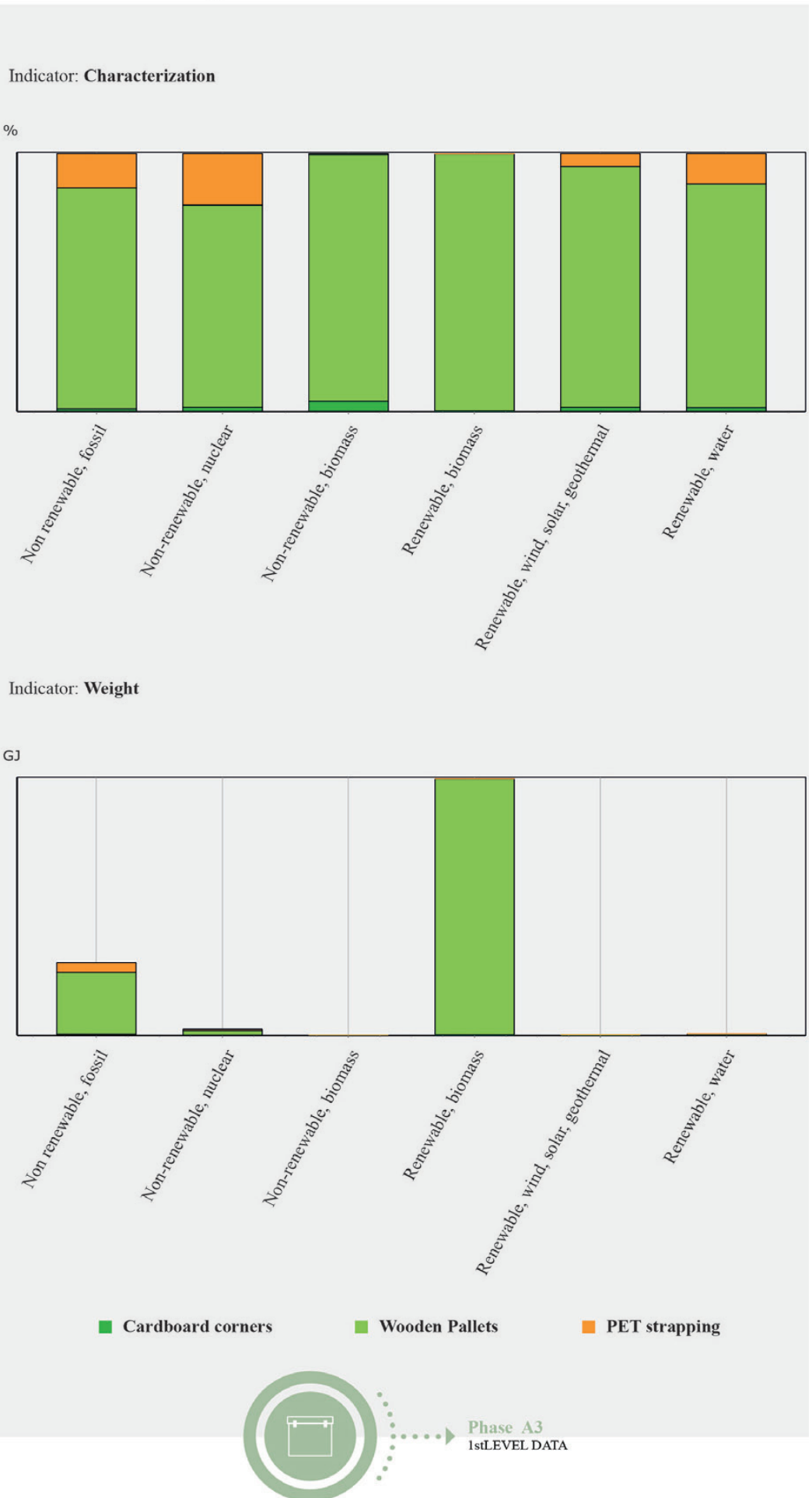


Fig. 13 | A3 phase: Hemp-Block Packaging – Charts of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

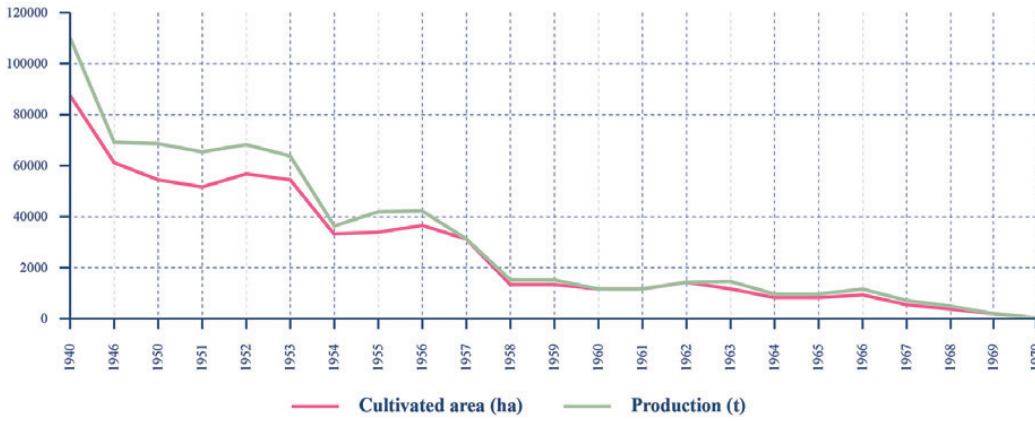


Fig. 14 | The drastic reduction in land cultivated with hemp in Italy from 1940 to 1970 and the relative decrease in the production of hemp fibre (source: Aluigi and Viganò, 2016; adapted by the Author).



Fig. 15 | Diagram showing the trend of hemp cultivation in Italy, in hectares, from 2012 to 2022 and the trend expressed in quintals of raw material production (flowers, leaves, stems) in the same time frame (source: Capasso et alii, 2024; adapted by the Author).

cess under investigation and were collected on-site using dedicated questionnaires prepared by the author in accordance with regulatory standards. Conversely, secondary data were used to describe phase A1, concerning the production processes and the initial transformation of raw materials. These data were derived from the modelling processes of the Ecoinvent database and directly provided by the company CalcePiasco, relating to hemp cultivation and the production of hemp shive. The latter are considered reliable, as they originate from verified and authoritative sources.

The overall assessment applied two methodologies that aggregate the results of the inventory phase into midpoint categories: the CED methodology, which does not evaluate environmental impacts but quantifies the energy required throughout the block's life cycle, and the CML-IA baseline methodology, which assesses the impacts across the main environmental impact categories (SimaPro, 2020). At the endpoint level, the Eco-indicator 99 (H) methodology was applied to assess the life-cycle damage of the block in terms of human health, ecosystem quality, and resource depletion (SimaPro, 2020). As previously noted, this paper presents findings from the application of the CED methodology, aligned with SDG 7, while the complete assessment was discussed in a previous publication (Capasso et alii, 2025).

Results | The application of the CED methodology to phase A1, covering the procurement and initial processing of raw materials used in the block mixture, revealed a greater impact on energy derived from fossil sources, primarily due to the impact of the hydraulic lime production process (Tab. 1; Fig. 10).

Phase A2 concerns the transport of materials from the extraction and initial processing sites to the block production facility. Accordingly, three different transport routes were considered, corresponding to the three materials composing the block. In this case as well, the CED characterisation indicated a higher impact associated with energy from fossil sources, with the transport of hydraulic lime showing the most significant contribution, followed by that of hemp shive (Tab. 2; Fig. 11).

Phase A3 concerns the processes involved in the in-house production of the block, including the energy consumption of the various machines, based on the Italian medium-voltage electricity mix (Capasso et alii, 2025), as well as the use of fresh water in the block mixture. As in the previous phases, the characterisation using the CED methodology revealed a greater impact associated with energy from fossil sources, with the process involving the use of the blockhouse showing the highest contribution (Tab. 3; Fig. 12). In this case, primary data were used, collected through dedicated questionnaires completed during the internal monitoring pe-

riod conducted within the partner company of the research project.

In phase A3, the contribution of block packaging (comprising cardboard corner protectors, wooden pallets, and PET strapping) was calculated separately, including the processes related to the transport of each component from its production site to the block manufacturing company. In this case, the CED methodology indicated a higher contribution from fossil-fuel energy resources, primarily associated with the use of wooden pallets, followed by PET strapping, while the impact of cardboard corner protectors was almost negligible (Tab. 4; Fig. 13).

By comparing the results of this LCA with those reported in the literature, it can be observed that, overall, the application of the CED methodology to the lime and hemp block yielded low energy consumption values across the analysed phases. Higher consumption was recorded primarily in the first phase (raw material procurement and initial processing) and, subsequently, in the third phase (block production). Although a precise comparison with other studies conducted in recent years is not possible, partly due to differences in the declared or functional units used, a comparison was nonetheless made between the energy consumption of the lime and hemp block and that of other materials more commonly employed in the construction sector, to verify its actual advantages in terms of energy use. Con-

sideration was given to studies that applied the CED methodology to products comparable in both function and thickness to the block under analysis.

As the first comparison product, the perforated brick analysed by Di Capua et alii (2021) was selected. The researchers conducted a comparative LCA within a 'cradle-to-gate' system boundary, examining three different types of vertical enclosures: (a) a hempcrete wall; (b) a hemp and lime block wall; and (c) a perforated brick wall supplemented with an external polystyrene panel to achieve the same thermal insulation performance as the first two walls. The comparison indicates that the perforated brick construction solution exhibits the highest impact in the 'non-renewable, fossil' and 'non-renewable, nuclear' energy categories, primarily due to the use of polystyrene insulation, which is necessary to achieve adequate thermal performance. Hempcrete walls rank second in terms of impact within the fossil energy category, while hemp and lime block walls demonstrate superior performance in this regard.

Wolfova (2020), in a comparative evaluation conducted within a 'cradle-to-gate' system boundary, applied the CED methodology to analyse two external load-bearing walls (functional unit equivalent to one square metre): one constructed with 30 cm-thick brick and the other with 40 cm-thick cellular concrete blocks, both with an insulation layer of expanded polystyrene. The LCA indicates that cellular concrete block masonry performs better than brick masonry across all the energy categories considered. The greatest differences between the two products are observed in the 'non-renewable, fossil' and 'renewable, biomass' categories, in which the brick wall shows a higher impact than the cellular concrete block wall.

As a result of this purely theoretical comparison between the energy consumption of various products used for the construction of vertical closures, we can confirm that lime and hemp block is a suitable product for the construction of 'green buildings', as the incidence of the analysed life cycle phases on the categories of the CED methodology has overall low values, with a higher incidence on non-renewable energy from fossil sources. These results suggest the adoption of renewable energy suppliers to mitigate the impacts of energy consumption and, considering the potential of '0 km' materials, the identification, where possible, of lime and additive suppliers located closer to the block manufacturer, thereby also reducing the energy consumption associated with phase A2.

Since the results of an LCA can vary significantly depending on the preliminary assumptions adopted and the system boundaries defined (Haik, Meir and Peled, 2023), a sensitivity analysis was carried out by replacing the energy input used in phase A3, corresponding to the block production stage. The study involved replacing Italy's medium-voltage grid electricity mix (Capasso et alii, 2024) with energy sourced exclusively from renewable resources. In the final return of the aggregated results of the CED methodology, referring to the entire block cycle (phases A1, A2, and A3 aggregated), there was a significant decrease in energy demand, from 18.0 to 14.7 MJ. In comparison with the baseline results, the sensitivity analysis revealed significant changes in the 'non-renewable, fossil' energy category, which showed a substantial reduction in impact, while the influence of the block increased on the 'renewable, wind, solar, geothermal' and 'renewable, water' energy cat-

egories. Since a 'cradle-to-gate' analysis was conducted, one limitation of this study is the lack of information on the impacts associated with the construction and demolition phases, which generate waste and emissions into the environment (Ding, 2014). Despite this limitation, the company's information indicates that on-site block waste can be recovered and reused directly during construction.

Concluding remarks | The concept of sustainability in construction concerns both the creation and use of architectural artefacts and the reduction of energy consumption and the use of natural resources. From this perspective, the central role of the material employed in the production of building components becomes evident (Franzoni, 2011), as does the value of LCA as a systemic approach for assessing the environmental impacts associated with a specific product. Through LCA, it is possible to determine a material's primary energy, namely the energy consumed for the extraction or production of raw materials and the energy required to operate the machinery used in the process (Ding, 2014).

The LCA conducted on the lime and hemp block revealed reduced energy demand across all the main sources considered by the CED methodology, contributing, albeit modestly, to the global reduction of energy consumption and carbon dioxide emissions associated with energy use in the building sector. In light of this, the block represents a product suitable for improving the energy efficiency of buildings and for contributing to the achievement of SDG 7, owing to its high technical performance and, upstream in the process, the use of a highly renewable raw material that requires only a few simple processing steps, thereby ensuring a low embodied-energy content.

By using hemp as a raw material, the construction sector is also directed towards achieving SDG 6, given the limited water required for both hemp cultivation and block production, thereby promoting more equitable access to energy and water resources. The use of hemp also generates co-benefits with SDG 12 (Ensure sustainable consumption and production patterns) and SDG 3 (Good health and well-being), as it not only reduces raw material use, energy consumption, and emissions in the construction sector, but also contributes to high levels of indoor comfort and well-being for users. A material can, in fact, be considered sustainable when it does not produce adverse effects on humans, the natural environment, or the built environment (Ding, 2014).

Despite certain limitations in the process, the LCA conducted is considered a fundamental first step toward recognising and communicating, on a broader scale, the product's environmental performance across its life cycle. A further step will be to extend the current LCA assessment to encompass all phases of the block's life cycle, to issue an Environmental Product Declaration (EPD; UNI EN ISO 14025:2010) and validate its compliance with the Minimum Environmental Criteria. Finally, to obtain a comprehensive understanding of the block's sustainability, it would be advisable to integrate the LCA with economic and social dimensions.

As noted by Aldersoni et alii (2025), significant limitations still hinder the large-scale application of hemp in construction, one of which concerns the understanding of the combined effects of incorporating different materials with verified low carbon emissions within a single building system. Indeed,

one of the constraints of this study lies in its focus on a single building product, analysed independently from its context of use.

To enhance the potential of hemp-based building products and overcome the barriers to their widespread adoption, Agliata et alii (2020), while confirming the need to expand research, development, testing, and incentives for this type of product, identify six key pillars/aspects:

- 1) the technical aspect, which considers all the properties of hemp and its derived building products, while also acknowledging the limited awareness of their benefits among professionals in the sector; this lack of knowledge is partly the result of the gradual disappearance of hemp cultivation techniques in Italy, following the effects of prohibitionism that began in 1937 and culminated in the definitive ban with the approval of the Single Convention on Narcotic Drugs² in 1961 (Fig. 14);
- 2) the commercial aspect, which takes into account the renewed interest in hemp that has emerged only over the past 15 years, marked by a growing demand for products of natural origin; this trend is likely driven by increasing consumer awareness of environmental sustainability issues, as well as by the rising prices of more conventional raw materials following the oil crisis (Dobbs et alii, 2011); such interest is reflected in the expansion of hemp cultivation and production, along with the growing market demand for hemp-based building products (Fig. 15), which, however, could be hindered by the low economic viability of the plantation for its growers, due to the long lead times for raw material storage and the incidence of transport;
- 3) the knowledge aspect, which highlights the limited awareness among professionals regarding the potential use of hemp in construction;
- 4) the regulatory aspect, officially recognised by the Italian Parliament (2016, art. 1), which declared that this crop could contribute to the reduction of environmental impact in agriculture and soil consumption, desertification and loss of biodiversity, as well as serve as a possible substitute for surplus crops and as a rotation crop. A recognition that, together with the important technical properties of hemp building products, should be reflected in the development of specific technical standards for hemp construction, as occurred in France in 2014 with the Règles Professionnelles de la Construction en Chanvre³ and subsequent updates;
- 5) the psychological aspect, which emphasises the need to enhance the dissemination of knowledge about 'Cannabis sativa' and its derived products, to eliminate any misunderstanding with marijuana;
- 6) the invisible aspect, related to the competitiveness of hemp-based products compared to traditional building materials, both in terms of performance and the quality of indoor comfort they provide.

In conclusion, this study, centred on the material and its life cycle, highlights the key role of LCA in fostering sustainable practices in the construction sector and in identifying areas for further improvement (Carvalho et alii, 2025). Although the approach presented here focuses on the 'efficiency' of processes, it is equally necessary to promote one based on 'sufficiency' (Ness, 2024), as reaffirmed by the New European Bauhaus (European Commission, 2023, 2021c), to encourage solutions that meet needs and requirements through the use of fewer non-renewable resources and by fostering actions aimed at the recovery and reuse of the existing built heritage.

Acknowledgments

The Author conducted the present study as part of the PON Research Doctorate 'Land Systems and Built Environments' at the 'G. d'Annunzio' University of Chieti-Pescara. The PhD was carried out in partnership with the Institute of Sustainability in Civil Engineering at RWTH Aachen University (Germany) and the company Edilcanapa Srl (Italy).

Notes

1) For more information on hemp building materials, blocks, pre-mixes and panels, please visit: edilcanapasrl.co.uk [Accessed 20 October 2025].

2) For more information, see: treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtmsg_no=VI-15&chapter=6&clang=en [Accessed 20 October 2025].

3) For more information, see: construire-en-chanvre.fr/documents/pdf/documentation/PAROIS_VERTICALS-Regles_professionnelles_(2024).pdf [Accessed 20 October 2025].

References

- Adesina, I., Bhowmik, A., Sharma, H. and Shahbazi, A. (2020), "A review on the current state of knowledge of growing conditions, agronomic soil health practices and utilities of hemp in the United States", in *Agriculture*, vol. 10, issue 4, article 129, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/agriculture10040129 [Accessed 20 October 2025].
- Agliata, R., Marino, A., Mollo, L. and Pariso, P. (2020), "Historic Building Energy Audit and Retrofit Simulation with Hemp-Lime Plaster – A Case Study", in *Sustainability*, vol. 11, issue 11, article 4620, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12114620 [Accessed 20 October 2025].
- Aluigi, D. and Viganò, E. (2016), "La canapa come opportunità per imprese di sviluppo per le imprese agricole", in *Agriregioni Europa*, vol. 12, issue 45, pp. 113-117. [Online] Available at: hdl.handle.net/11576/2641861 [Accessed 20 October 2025].
- Aldersoni, A. A., Ibrahim, A. O., Aldamady, A. A. H., Bashir, F. M., Babatunde, O. E., Dado, Y. A. and Ibrahim, W. (2025), "Investigating the impact of low-carbon building materials on energy consumption and carbon emissions in construction projects", in *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 20, pp. 1581-1592. [Online] Available at: doi.org/10.1093/ijlct/ctaf096 [Accessed 20 October 2025].
- Arrigoni, A., Pelosato, R., Melià, P., Ruggeri, G., Sabbadini, S. and Dotelli, G. (2017), "Life cycle assessment of natural building materials – The role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete block", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 149, pp. 1051-1061. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161 [Accessed 20 October 2025].
- Aversa, P., Marzo, A., Tripepi, C., Sabbadino, S., Dotelli, G., Lauriola, P., Moletti, C. and Luprano, V.A.M. (2021), "Hemp-lime buildings – Thermo-hygro-metric behaviour of two case studies in North and South Italy", in *Energy and Buildings*, vol. 247, article 111147, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111147 [Accessed 20 October 2025].
- Azienda Agricola Passerini (2025), *Canapa sativa*. [Online] Available at: aziendapasserini.it/canapa-sativa?utm_source=chatgpt.com [Accessed 20 October 2025].
- Barbhuiya, S. and Bhusan Das, B. (2022), "A comprehensive review on the use of hemp in concrete", in *Construction and Building Materials*, vol. 341, article 127857, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127857 [Accessed 20 October 2025].
- Bungau, C. C., Bungau, T., Prada, I. F. and Prada, M. (2022), "Green Buildings as a Necessity for Sustainable Environment Development – Dilemmas and Challenges", in *Sustainability*, vol. 14, issue 20, article 13121, p. 1-34. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su142013121 [Accessed 20 October 2025].
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G. and Castell, A. (2014), "Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Energy Analysis (LCEA) of buildings and the building sector – A review", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 394-416. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037 [Accessed 20 October 2025].
- Campoli, A., Dalla Valle, A., Ganassali, S. and Giorgi, S. (2018), "Progettare il ciclo di vita della materia – Nuove tendenze in prospettiva ambientale | Designing the life cycle of materials – New trends in environmental perspective", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 16, pp. 86-95. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-23016 [Accessed 20 October 2025].
- Capasso, M. C., Traverso, M., Mankaa, R., and Radogna, D. (2024), "The production capacities of Cannabis sativa and its growth Possibilities", in Scholz, S. G., Howlett, R. J. and Setchi, R. (eds), *Sustainable Design and Manufacturing 2023 – Proceedings of the 10th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing (KES-SDM 2023), Bari, Italy, September 18-20, 2023*, Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 377, Springer, Singapore, pp. 125-137. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-981-99-8159-5_11 [Accessed 20 October 2025].
- Capasso, M. C., Traverso, M., Radogna, D. and Mastrolo-nardo, L. (2025), "Life Cycle Impact Assessment del blocco in calce e canapa per la bioedilizia", in Raggi, A., Petti, L., Tascione, V. and Arzoumanidis, I. (eds), *Atti del XVIII Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA – Life Cycle Thinking a supporto di modelli di consumo sostenibili, Università degli Studi 'G. d'Annunzio', Pescara, Italy, July 3-5, 2024*, Associazione Rete Italiana LCA, pp. 417-424.
- Carvalho, J. G. R. O., Cecchin, D., De Azevedo, A. R. G., Do Carmo, D. F., Paes, J. L., Ferraz, P. F. P., Hamacher, L. S., Costa, K. A. Rossi, G. and Bambi, G. (2025), "Life Cycle Assessment (LCA) in construction materials – Review", in *Agronomy Research*, vol. 23, issue 1, pp. 293-321. [Online] Available at: doi.org/10.15159/AR.25.041 [Accessed 20 October 2025].
- Di Capua, S. E., Paoletto, L., Moretti, E., Rocchi, L. and Boggia, A. (2021), "Evaluation of the Environmental Sustainability of Hemp as a Building Material, through Life Cycle Assessment", in *Environmental and Climate Technologies*, vol. 25, issue 1, pp. 1215-1228. [Online] Available at: doi.org/10.2478/rtuct-2021-0092 [Accessed 20 October 2025].
- Diaz, A. V., López, A. F. and Bugallo, P. M. B. (2022), "Analysis of Biowast-based Materials in the Construction Sector – Evaluation of Thermal Behaviour and Life Cycle Assessment (LCA)", in *Waste and Biomass Valorization*, vol. 13, pp. 4983-5004. [Online] Available at: link.springer.com/article/10.1007/s12649-022-01820-y?utm [Accessed 20 October 2025].
- Ding, G. K. C. (2014), "Life Cycle Assessment (LCA) of sustainable building materials – An overview", in Pacheco-Torgal, F., Cabeza, L. F., Labrincha, J. and De Magalhães, A. (eds), *Eco-Efficient Construction and Building Materials – Life Cycle Assessment (LCA) – Eco-Labeling and Case Studies*, Woodhead Publishing, pp. 38-62. [Online] Available at: doi.org/10.1533/9780857097729.1.38 [Accessed 20 October 2025].
- Dobbs, R., Oppenheim, J., Thompson, F., Brinkman, M. and Zornes, M. (2011), *Resource Revolution – Meeting the world's energy, materials, food, and water needs*. [Online] Available at: mckinsey.com/~media/mckinsey/not%20map ped/test%20copy%20of%20resource%20revolution%20tracking%20global%20commodity%20markets/mgi_resources_survey_full_report_sep2013.pdf [Accessed 20 October 2025].
- Dou, S., Zhu, H., Wu, S. and Shen, Y. (2024), "A review of information technology application in reducing carbon emission – From buildings to tunnels", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 452, article 142162, pp. 1-30. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142162 [Accessed 20 October 2025].
- EIHA – European Industrial Hemp Association (n.d.), *Canapa – Il vero green deal*. [Online] Available at: eiha.org/wp-content/uploads/2020/09/Canapa-il-vero-green-deal-IT.pdf [Accessed 20 October 2025].
- European Commission (n.d.), "Hemp", in *agriculture.ec.europa.eu*. [Online] Available at: agriculture.ec.europa.eu/farming/crop-productions-and-plant-based-products/hemp_en [Accessed 20 October 2025].
- European Commission (2023), "New European Bauhaus Academy to build skills for sustainable construction with innovative materials", in *ec.europa.eu*, 18/12/2023. [Online] Available at: ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_6593 [Accessed 20 October 2025].
- European Commission (2021a), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Fit for 55 – Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality*, document 52021DC 0550, COM/2021/550 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0550 [Accessed 20 October 2025].
- European Commission (2021b), *Commission Recommendation on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations*, C/2021/9332 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=intcom:C%282021%299332 [Accessed 20 October 2025].
- European Commission (2021c), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – New European Bauhaus – Beautiful, Sustainable, Together*, COM/2021/573 final. [Online] Available at: new-european-bauhaus.europa.eu/system/files/2021-09/COM(2021)_573_EN_ACT.pdf [Accessed 20 October 2025].
- European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019 DC0640, COM/2019/640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640 [Accessed 20 October 2025].
- European Commission (2003), *Communication from the Commission to the Council and the European Parliament – Integrated Product Policy – Building on Environmental Life-Cycle Thinking*, document 52003DC0302, COM/2003/302 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52003DC0302 [Accessed 20 October 2025].
- European Parliament (2020), *Next Generation EU – A European instrument to counter the impact of the coronavirus pandemic*. [Online] Available at: europarl.europa.eu/Reg-Data/etudes/BRIE/2020/652000/EPRS_BRI(2020)652000_EN.pdf [Accessed 20 October 2025].
- European Parliament and Council of the European Union (2024), *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings*, document 32024L1275, PE/102/2023/REV/1. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32024L1275 [Accessed 20 October 2025].
- Finch, G., Marriage, G., Pelosi, A. and Gjerde, M. (2021), "Building envelope systems for circular economy – Evaluation parameters, current performance and key challenges", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 64, article 102561, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2020.102561 [Accessed 20 October 2025].
- Franzoni, E. (2011), "Materials selection for green buildings – Which tools for engineers and architects?", in *Procedia Engineering*, vol. 21, pp. 883-890. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2090 [Accessed 20 October 2025].
- Fu, Y., Gu, H., Wu, H. F. and Shi, S. Q. (2024), "Comparative Life Cycle Assessment of Bacterial and Thermochemical Retting of Hemp", in *Materials*, vol. 17, issue 16, article 4164, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.3390/ma17164164 [Accessed 20 October 2025].
- Gürzenich, D., Mathur, J., Bansal, N. K. and Wagner, H.-J. (1999), "Cumulative energy demand for selected renewable energy technologies", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 4, pp. 143-149. [Online] Available at: doi.org/10.1007/BF02979448 [Accessed 20 October 2025].
- Haigh, L. (2023), "Beyond the energy transition", in *Economist Impact | The Sustainability Project*, newspaper online, 31/07/2023. [Online] Available at: impact.economist.

com/sustainability/circular-economies/beyond-the-energy-transition-why-we-need-a-circular-economy-to-keep-human [Accessed 20 October 2025].

Haik, R., Meir, I. A. and Peled, A. (2023), “Lime Hemp Concrete with Unfired Binders vs. Conventional Building Materials – A Comparative Assessment of Energy Requirements and CO₂ Emissions”, in *Energies*, vol. 16, issue 2, article 708, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en16020708 [Accessed 20 October 2025].

Huang, W., Shuai, C., Xiang, P., Chen, X., Zhao, B. and Sole, J. (2024), “Assessing the Consumption-based Water Use of Global Construction Sectors and its Impact to the Local Water Shortage”, in *Water Resour Manage*, vol. 38, pp. 6063-6078. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11269-024-03944-3 [Accessed 20 October 2025].

IEA – International Energy Agency (2023), *World Energy Outlook 2023*. [Online] Available at: iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf [Accessed 20 October 2025].

InterChanvre (2021), *La filière Chanvre française & la Normandie*.

InterChanvre (2020), *Le Chanvre – Un culture ‘verte’ incroyable*. [Online] Available at: interchanvre.org/documents/1.Interchanvre/202005_PPT_Le%20Chanvre.pdf [Accessed 20 October 2025].

Ip, K. and Miller, A. (2012), “Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime wall constructions in the UK”, in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 69, 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.001 [Accessed 20 October 2025].

Jami, T., Karade, S. R. and Singh, L. P. (2019), “A review of the properties of hemp for green building applications”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 239, article 117852, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117852 [Accessed 20 October 2025].

Kinnane, O., McGranaghan, G., Walker, R., Pavia, S., Byrne, G. and Robinson, A. (2015), “Experimental investigation of thermal inertia properties in hemp-lime concrete walls”, in *Proceedings of the 10th Conference on Advanced Building Skins*, pp. 942-949. [Online] Available at: researchgate.net/publication/283498250_Experimental_investigation_of_thermal_inertia_properties_in_hemp-lime_concrete_walls [Accessed 20 October 2025].

Li, Y., Li, S., Xia, S., Li, B., Zhang, X., Wang, B., Ye, T. and Zheng, W. (2023), “A Review on the Policy, Technology and Evaluation Method of Low-Carbon Buildings and Communities”, in *Energies*, vol. 16, issue 4, article 1773, pp. 1-43. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en16041773 [Accessed 20 October 2025].

Madessa, H. B., Shakerin, M., Reinskau, E. H. and Rabani, M. (2024), “Recent progress in the application of energy technologies in large-scale building blocks – A state-of-the-art review”, in *Energy Conversion and Management*, vol. 305, article 118210, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118210 [Accessed 20 October 2025].

Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S. and Dotelli, G. (2014), “Environmental impacts of natural and conventional building materials – A case study on earth plasters”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 80, pp. 179-186. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.073 [Accessed 20 October 2025].

MIMIT – Ministero delle Imprese e del Made in Italy (2023), *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza*. [Online] Available at: mimit.gov.it/images/stories/documenti/PNRR_Aggiornato.pdf [Accessed 20 October 2025].

Morpurgo, E. (2024), “Biomateriali e zone umide – Filiere per l’edilizia e il tessile dalla valorizzazione di ecosistemi locali | Biomaterials and wetlands – Supply chains for construction and textiles through the enhancement of local ecosystems”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 314-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16262024 [Accessed 20 October 2025].

Muazu, R. I., Rothman, R. and Maltby, L. (2021), “Integrating life cycle assessment and environmental risk assessment – A critical review”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 293, article 126120, p. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126120 [Accessed 20 October 2025].

Nazri, F. and Woods, L. D. (2025), “Environmental life cycle assessment of hemp-based thermal insulation – From agricultural growth to manufacturing in the United States”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 506, article 145509, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145509 [Accessed 20 October 2025].

Ness, D. (2024), “La decarbonizzazione degli edifici sarà sufficiente? Limitare e ridistribuire l’aumento di superficie costruita | Will decarbonising buildings be enough? Constrain and redistribute growth in floor area”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 84-97. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1562024 [Accessed 20 October 2025].

Palumbo, E., Romano, R. and Gallo, P. (2024), “Strategie life cycle thinking per la realizzazione di scuole nZEB | Life cycle thinking strategies for constructing nZEB schools”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 252-265. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15202024 [Accessed 20 October 2025].

Parlamento Italiano (2016), “Legge del 2 dicembre 2016, n. 242 – Disposizioni per la promozione della coltivazione e della filiera agroindustriale della canapa”, in *Gazzetta Ufficiale*, Serie Generale, n. 304 del 30/12/2016. [Online] Available at: gazzettaufficiale.it/eli/id/2016/12/30/16G00258/sg [Accessed 20 October 2025].

Perletti, M. A., Rattazzi, A. and Zaccanti, O. (2020), “Nel mondo delle costruzioni”, in Perletti, M. A. (ed.), *Costruire sostenibile con la canapa*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, pp. 51-134.

Porfirione, C., Ferrari Tumay, X. and Leggiero, I. (2024), “Conoscenza, innovazione e cambiamento – Il potere dell’errore nel design e nei sistemi complessi | Knowledge, innovation, and change – The power of error in design and complex systems”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 232-241. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16202024 [Accessed 20 October 2025].

Samadikun, B. P., Syafrudin S. and Whayuni, R. H. (2024), “Analysis of Cumulative Energy Demand Potential Using Life Cycle Assessment Approach – A Case Study of XYZ Laboratory”, in *Jurnal Presipitasi – Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, vol. 21, issue 3, pp. 894-906. [Online] Available at: doi.org/10.14710/presipitasi.v21i3.894-906 [Accessed 20 October 2025].

SimaPro (2020), *SimaPro database manual – Methods library*. [Online] Available at: simapro.com/wp-content/uploads/2020/10/DatabaseManualMethods.pdf [Accessed 20 October 2025].

Smil, V. (2003), *Energy at the Crossroads – Global Perspectives and Uncertainties*, MIT Press, Cambridge.

Sposito, C. and De Giovanni, G. (2023), “Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 20 October 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication [Accessed 20 October 2025].

UNEP – United Nations Environment Programme (2024), *Global Status Report for Buildings and Construction – Beyond foundations – Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*, Nairobi. [Online] Available at: doi.org/10.59117/20.500.11822/45095 [Accessed 20 October 2025].

UNIEN 1745:2020, *Masonry and masonry products – Methods for determining thermal properties*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-1745-2020 [Accessed 20 October 2025].

UNIEN 15804:2021, *Sustainability of construction works – Environmental Product Declarations – Core rules for the product category of construction products*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-15804-2021 [Accessed 20 October 2025].

UNI EN ISO 14044:2021, *Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines*. [Online] Available at: store.uni.com/en/search/ALL/1/14044 [Accessed 20 October 2025].

UNI EN ISO 14040:2021, *Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and framework*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-14040-2021 [Accessed 20 October 2025].

UNI EN ISO 14025:2010, *Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-14025-2010 [Accessed 20 October 2025].

Wolfova, M. (2020), “Analysing the cumulative energy demand of external bearing walls”, in *IOP Conference Series – Materials Science and Engineering*, vol. 867, article 012048, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1757-899X/867/1/012048 [Accessed 21 October 2025].

World Business Council for Sustainable Development and ARUP (2023), *Net-zero building – Halving construction emissions today*. [Online] Available at: wbcscd.org/wp-content/uploads/2023/09/Net-zero-buildings_Halving-construction-emissions-today.pdf [Accessed 20 October 2025].