

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE A CICLO UNICO

IN INGEGNERIA EDILE - ARCHITETTURA

TESI DI LAUREA

in

Chimica e Tecnologia del Restauro e della Conservazione dei materiali

**UNA NUOVA SOLUZIONE COSTRUTTIVA IN CALCE E
CANAPA SU SISTEMA PREFABBRICATO:
APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO REALE E
ANALISI DEL CICLO DI VITA (LCA)**

CANDIDATA:

Veronica Angelozzi

RELATORE:

Prof.ssa Elisa Franzoni

CORRELATORI:

Prof. Andrea Rattazzi

Prof.ssa Alessandra Bonoli

Ing. Anna Degli Esposti

Anno Accademico 2019/2020

Sessione II

A mia mamma, a mio papà, ai miei nonni

Indice

Introduzione	1
1. Bioedilizia	
1.1. Emergenza climatica mondiale	4
1.2. Sviluppo sostenibile ed economia circolare	8
1.3. La sostenibilità in edilizia.	10
1.4. Materiali naturali nelle costruzioni.	12
1.5. Legislazione sulla bioedilizia.	21
2. Biocomposito di calce e canapa	
2.1. La calce	22
2.1.1. Storia e ritorno della calce.	23
2.1.2. Il ciclo della calce.	25
2.1.3. Calce nella bioedilizia.	31
2.2. La canapa.	32
2.2.1. Storia della canapa	32
2.2.2. La pianta della canapa	33
2.2.3. Coltivazioni di canapa ed ecologia	35
2.3. Miscela calce-canapa.	36
2.4. Il biocomposito in edilizia	36
2.4.1. Situazione in Francia.	37
2.4.2. Situazione in Regno Unito	38
2.4.3. Situazione in Italia	38
2.5. Proprietà della miscela.	40
2.5.1. Isolamento termico	40

2.5.2. Permeabilità al vapore e igroscopicità	41
2.5.3. Isolamento acustico.	41
2.5.4. Proprietà meccaniche	42
2.5.5. Resistenza al fuoco	42
2.5.6. Sequestro di anidride carbonica (CO ₂).	43
2.5.7. Fine vita della miscela	44
2.6. Soluzioni costruttive con il biocomposito di calce e canapa	45
2.6.1. Elementi prefabbricati	45
2.6.2. Elementi gettata in opera	47

3. Tecnologia del sistema *acciaio – calce e canapa*

3.1. Il sistema costruttivo	51
3.2. Modulo in acciaio	53
3.3. Pannelli in lana di legno mineralizzato	56
3.4. Miscela calce e canapa	57
3.5. Stratigrafia del sistema	60
3.6. Posa in opera del sistema	61
3.7. Prove sul sistema	63
3.7.1. Verifica di trasmittanza.	63
3.7.2. Verifica termoigrometrica	63
3.7.3. Verifica di massa e inerzia termica.	67
3.7.4. Prova a flessione.	69
3.8. Fine vita del sistema	71

4. Caso studio: residenza unifamiliare realizzata con il sistema *acciaio – calce e canapa*

4.1. Scelta progettuale	73
4.2. Fasi di cantiere	75
4.2.1. Fondazione e armature di chiamata	75
4.2.2. Posa moduli in acciaio	76
4.2.3. Inserimento pannelli in lana di legno mineralizzata	78
4.2.4. Getto miscela calce e canapa	78
4.2.5. Tracce e forature impiantistiche	80
4.2.6. Intonaco e finitura	80
4.3 Stato attuale	82

5. Analisi del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment – LCA)

5.1. Origini e sviluppo della metodologia LCA	83
5.2. Normativa di riferimento	84
5.3. Struttura di un'analisi LCA	85
5.3.1. Prima fase: Definizione obiettivi e campo di applicazione	86
5.3.2. Seconda fase: Analisi dell'inventario (LCI)	87
5.3.3. Terza fase: Valutazione degli impatti (LCIA)	89
5.3.4. Quarta fase: Interpretazione dei risultati	92
5.4. Strumenti software per l'analisi LCA	93
5.4.1. Dati di inventario	94
5.4.2. Metodi di valutazione degli impatti	94
5.4.3. Categorie di impatto ambientale	96

6. Analisi LCA (Life Cycle Assessment) applicata al sistema

acciaio – calce e canapa

6.1. Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione	102
6.2. Definizione dei confini del sistema	102
6.3. Definizione dell'unità funzionale	103
6.4. Qualità dei dati	104
6.5. Sistema tradizionale di riferimento	104
6.6. Analisi di inventario	106
6.6.1. Miscela di calce e canapa	106
6.6.2. Modulo di acciaio	111
6.6.3. Pannelli in fibra di legno mineralizzato	108
6.7. Metodologia di calcolo	114
6.7.1. Greenhouse Gas Protocol (GGP)	114
6.7.2. GGP – Confronto con sistema tradizionale	120
6.7.3. EPD (2013)	123
6.7.4. EPD (2013) – Confronto con sistema tradizionale	132

7. Conclusioni 141

Bibliografia 147

Allegati 151

Ringraziamenti 157

Introduzione

Secondo alcuni scienziati ci troviamo in una nuova era geologica, l'*Antropocene*⁽¹⁾, iniziata con la prima rivoluzione industriale, in cui l'essere umano ha un impatto decisivo sull'ecosistema terrestre, che si sta modificando drasticamente. Il settore delle costruzioni è uno dei maggiori responsabili di questo cambiamento. Pertanto è necessario riconsiderare la progettazione architettonica e la realizzazione degli edifici al fine di renderli meno impattanti per l'ambiente.

L'architettura sostenibile e l'efficienza energetica sono temi importanti nelle scelte costruttive, la canapa è un materiale molto efficace da tutti i punti di vista. Obiettivo di questa tesi è quello di illustrarne e incentivarne l'uso, attraverso una nuova soluzione costruttiva in cui la canapa miscelata con la calce è gettata all'interno di casseri prefabbricati in acciaio, rispondendo alle necessità di sostenibilità ambientale e rapidità di posa.

Nel primo capitolo di questo elaborato si ripercorrono le tappe che hanno segnato la presa di coscienza da parte delle istituzioni internazionali riguardo l'emergenza climatica mondiale, partendo dalla prima conferenza dell'ONU del 1972 sulle questioni ambientali internazionali fino ad arrivare alla Nuova Legge sul Clima, presentata dalla Commissione Europea nell'anno corrente. Ci si sofferma sull'importanza di adottare un'economia circolare, da sostituire al modello classico lineare, in cui tutte le attività industriali sono pensate per essere recuperate o rigenerate al fine di essere reimmesse in un nuovo ciclo di produzione. Il settore delle costruzioni è considerato il maggiore responsabile di emissioni e consumo di materiali. Questa visione può essere riconsiderata e cambiata positivamente con l'introduzione di materiali naturali, di cui viene fatta una breve rassegna, che permettono di ridurre in modo sostanziale l'impatto sull'ambiente. Questa prospettiva di innovazione deve essere accompagnata da chiari indirizzi normativi, si riportano quindi i provvedimenti che hanno permesso di accelerare i cambiamenti negli interventi di edilizia.

(1) *Antropocène*: Termine divulgato dal premio Nobel per la chimica atmosferica Paul Crutzen, per definire l'epoca geologica in cui l'ambiente terrestre, inteso come l'insieme delle caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche in cui si svolge ed evolve la vita, è fortemente condizionato a scala sia locale sia globale dagli effetti dell'azione umana. – Treccani

Nel secondo capitolo vengono presentati due materiali utilizzati in antichità e riscoperti per le eccellenti qualità ecologiche: la calce e la canapa. Viene presentata la natura, la storia e l'applicazione in edilizia del biocomposito, dalle origini ai giorni nostri. Si esaltano le proprietà della miscela e le sue tipologie di applicazione.

Nel terzo capitolo viene presentata una nuova soluzione costruttiva in calce e canapa su sistema prefabbricato, oggetto di studio e ricerca di questa tesi. Il sistema è stato studiato sia per rispondere ai principi di ecologia e sostenibilità ambientale, sia per rendere attuale un sistema tradizionale attraverso una soluzione con casseri prefabbricati. Ciò che ad oggi ha limitato l'impiego della miscela è la complessità delle operazioni di posa: la miscela si presenta come materiale sciolto granulare, privo di consistenza, che necessita di un cassero di contenimento. Come soluzione al problema, si è individuata una mesh tridimensionale di fili di acciaio zincato che funge da cassero di contenimento leggero, riciclabile e veloce da posare, grazie alla prefabbricazione e modularità.

Il sistema *acciaio – calce e canapa* è stato applicato per la prima volta in un progetto di edilizia residenziale a Mestrino (PD) per la realizzazione dei muri di tamponamento. La scelta di utilizzare questa soluzione costruttiva è stata dettata dal fatto di voler realizzare un fabbricato in tempi veloci, con elevate prestazioni di isolamento termico, ma al contempo con un'impiantistica poco impattante. Nel quarto capitolo si mostrano le fasi di cantiere e di posa in opera del sistema.

Per dimostrare che un prodotto è sostenibile è necessario munirsi di strumenti di valutazione oggettivi, supportati da basi scientifiche condivise. Nel settore della sostenibilità ambientale un valido strumento di valutazione è *l'Analisi del Ciclo di Vita* ("Life Cycle Assessment" - LCA), che ha come normativa di riferimento la Norma ISO 14040:2006 - *Gestione Ambientale – Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento* e la ISO 14044:2018 - *"Gestione Ambientale – Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida"*. Nel quinto capitolo vengono delineate le origini, la struttura, la metodologia di calcolo e di analisi e le linee base del software per svolgerla.

Nel sesto capitolo ci si propone di analizzare il ciclo di vita del sistema *acciaio – calce e canapa* attraverso il software SimpaPro 8.5. Obiettivo dello studio è la valutazione dell'impatto ambientale che il sistema ha dall'estrazione delle materie prime alla fase di produzione. L'analisi è stata effettuata confrontando gli impatti relativi ai quattro materiali che compongono il sistema (canapulo, grassello di calce, acciaio e lana di legno) per analizzare quanto ogni singolo materiale incida sull'ambiente. E' stato svolto inoltre un confronto con una tipologia costruttiva utilizzata nella zona di Mestrino (PD), che garantisce lo stesso valore di conducibilità termica, costituita da blocchi in laterizio e pannelli in polistirene espanso. L'analisi è stata condotta per verificare i benefici ambientali che il sistema con isolamento in calce e canapa apporta se sostituito all'edilizia tradizionale.

1. Bioedilizia

1.1. Emergenza climatica mondiale

Ci troviamo di fronte ad un'emergenza climatica mai verificata prima, i cui i dati sono drammatici: i livelli del mare si stanno innalzando alla velocità più alta mai registrata in tremila anni e la biodiversità sulla terra si sta riducendo drasticamente, tanto che un milione di specie sono minacciate di estinzione. Di fronte a questi dati è necessario intervenire e cambiare radicalmente il nostro approccio nei confronti della natura. Alla Conferenza delle Nazioni Unite sul Clima (COP25) il Presidente del Consiglio europeo Charles Michel⁽²⁾, il 2 dicembre 2019, afferma: *"Abbiamo conosciuto la rivoluzione industriale, poi la rivoluzione tecnologica: ora è il momento della rivoluzione verde"* [2]. Questo Green Deal (Patto Verde) europeo ha fissato come obiettivo quello di rendere l'Europa il primo continente a impatto climatico zero sul pianeta entro il 2050, utilizzando quasi esclusivamente energia sostenibile a prezzi moderati, aumentando l'efficienza energetica e introducendo leggi per un'economia circolare, sulla ristrutturazione degli edifici, sulla biodiversità e sull'innovazione. La protezione dell'ambiente è divenuta un'esigenza sempre più sentita dalla comunità internazionale, la quale ha progressivamente riconosciuto il valore dell'ambiente naturale, preoccupandosi di stabilire linee programmatiche da seguire per garantire la salvaguardia ed arginare il deterioramento.

La prima grande conferenza dell'ONU⁽³⁾ sulle questioni ambientali internazionali si svolge a Stoccolma nel 1972 determinando una svolta nello sviluppo della politica ambientale internazionale.

In risposta alla raccolta di prove dei cambiamenti climatici antropogenici, nel 1979 si tiene la *Prima Conferenza Mondiale sul Clima* (WCC), uno dei primi grandi incontri

(2) *Charles Yves Jean Ghislain Michel* (Namur, 21 dicembre 1975) è un politico belga, Primo ministro del Belgio dal 2014 al 2019. Il 2 luglio è stato eletto dal Consiglio europeo come presidente del Consiglio europeo, incarico assunto allo scadere del mandato di Donald Tusk il 1 dicembre 2019. [1]

(3) *Organizzazione delle Nazioni Unite* è un' unione di 193 Stati la cui adesione ha carattere volontario. Oltre allo scopo di mantenere la pace e la sicurezza internazionale, si sono aggiunti nel tempo altri obiettivi, quali la protezione dei diritti umani e delle libertà fondamentali, la promozione della crescita economica, sociale, culturale e della salute pubblica internazionale.

internazionali sul cambiamento climatico: si tratta di un evento essenzialmente scientifico e vede la partecipazione di scienziati provenienti da tutto il mondo esperti in molte discipline.

Nel 1987 Gro Harlem Brundtland⁽⁴⁾, Presidente della Commissione Mondiale su Ambiente e Sviluppo, presenta, su incarico delle Nazioni unite, il proprio rapporto e formula una definizione di sviluppo sostenibile: “*sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri*” [4]. L'intento è quello di conciliare lo sviluppo economico e la salvaguardia degli equilibri sociali e ambientali con uno sguardo rivolto alle generazioni future.

Nel 1988 viene istituito dalla World Meteorological Organization (WMO) e dallo United Nations Environment Programme (UNEP) il Gruppo Intergovernativo di Esperti sul Cambiamento Climatico (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), allo scopo di fornire una visione scientifica dello stato attuale delle conoscenze sui cambiamenti climatici e sui loro potenziali impatti ambientali e socio-economici [5]. Il gruppo redige *la Primo Rapporto di Valutazione*, pubblicata nel 1990: “Climate Change: The IPCC Scientific Assessment”, in cui si evidenzia che le emissioni prodotte dalle attività dell'uomo si stanno aggiungendo alla componente naturale di gas serra dell'atmosfera ed è pertanto necessaria una cooperazione a livello internazionale per poter affrontare il problema.

Nel 1992 entra in vigore la *Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici* (United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC), principale trattato internazionale in materia di lotta contro i cambiamenti climatici. Il suo obiettivo è impedire pericolose interferenze di origine umana con il sistema climatico mondiale. Per la prima volta vengono stabiliti degli obiettivi vincolanti di riduzione delle emissioni di gas nei confronti dei paesi industrializzati [6].

(4) Gro Harlem Brundtland (Oslo, 20 aprile 1939) è una politica norvegese, impegnata sul fronte ambientalista. Nel 1981 diventò primo ministro del governo norvegese, prima donna ad aver mai ricoperto tale incarico. Dal 1983 Presidente della Commissione Mondiale sull'ambiente e lo sviluppo.

Entra in vigore nel 2005, grazie alla sottoscrizione della Russia: per entrare in vigore, il trattato doveva essere ratificato da almeno 55 Nazioni che rappresentassero non meno del 55% delle emissioni globali di effetto serra di origine antropica . È il primo accordo internazionale che contiene gli impegni dei paesi industrializzati a ridurre le emissioni di alcuni gas ad effetto serra, tra cui Biossido di carbonio (CO₂), Metano (CH₄), Protossido di azoto (N₂O), Idrofluorocarburi (HFC), Perfluorocarburi (PFC), responsabili del riscaldamento del pianeta. Il Protocollo stabilisce obiettivi vincolanti e quantificati di limitazione e riduzione dei gas ad effetto serra per i paesi aderenti, ovvero 37 paesi industrializzati e la Comunità Europea. I paesi industrializzati riconosciuti come principali responsabili dei livelli di gas ad effetto serra presenti in atmosfera, si impegnavano a ridurre le loro emissioni, nel periodo 2008-2012, di almeno il 5 % rispetto ai livelli del 1990. [7]

Nel 2007 viene pubblicata la *Quarto Rapporto di Valutazione* da parte del Comitato Intergovernativo per i Cambiamenti Climatici (IPCC), che evidenzia la presenza del surriscaldamento globale e individua la causa nelle concentrazioni di gas serra antropogeniche, con valori mai registrati prima. [8]

Nel 2012 in occasione della Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici tenuto a Doha, è stato adottato l'*Emendamento di Doha*, che sancisce la continuazione del Protocollo di Kyoto per la lotta alle emissioni di gas serra e ne estende la validità per il periodo dal 2013 al 2020, con l'obiettivo di portare a una riduzione del 18% delle emissioni rispetto al 1990. Il documento evidenzia che il settore delle costruzioni è responsabile di oltre il 40% del consumo energetico globale e di ben il 33% delle emissioni di anidride carbonica. [9]

Nel dicembre 2015 viene adottato alla conferenza di Parigi sul Clima (COP21) l'*Accordo di Parigi sul Clima*, primo accordo che vincola tutti i paesi del mondo sui cambiamenti climatici attraverso leggi e obiettivi condivisi. L'accordo mira a controllare il picco delle emissioni di gas serra e bilanciare emissioni e assorbimenti di gas serra entro il 2050. Si occupa inoltre dell'adattamento al cambiamento climatico, dei finanziamenti e di altre tipologie di assistenza per i paesi in via di sviluppo, del trasferimento di tecnologia, del potenziamento delle capacità, delle perdite e dei danni. [10]

Il 4 marzo 2020 è stata presentata dalla presidente della Commissione Europea Ursula von der Leyen⁽⁵⁾ la *Nuova Legge sul Clima*, come previsto dalla tabella di marcia del Green Deal europeo, programma per rendere sostenibile l'economia dell'Unione Europea. Per affrontare le sfide dei cambiamenti climatici e del degrado ambientale, l'Europa ha bisogno di una nuova strategia per la crescita, che veda un'economia moderna, efficiente, in cui nel 2050 non siano più generate emissioni di gas serra e la crescita economica sia dissociata dall'uso delle risorse. Per raggiungere questo obiettivo sarà inoltre presentato un piano di valutazione degli impatti per innalzare al almeno il 50% l'obiettivo di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra dell'UE entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990.

Il Green Deal europeo prevede un insieme di iniziative politiche volte a:

- promuovere l'uso efficiente delle risorse passando ad un'economia pulita e circolare;
- ripristinare la biodiversità e ridurre l'inquinamento.

Per conseguire l'obiettivo di neutralità climatica entro il 2050, sarà necessaria l'azione di tutti i settori della nostra economia per garantire una maggiore efficienza energetica negli edifici, decarbonizzare il settore energetico, investire in tecnologie rispettose dell'ambiente e sostenere l'industria nell'innovazione. [11]

(5) *Ursula von der Leyen* (Ixelles, 8 ottobre 1958) è una politica tedesca, membro dell'Unione Cristiano-Democratica di Germania e presidente della Commissione europea dal 2 luglio 2019.

1.2 Sviluppo sostenibile ed economia circolare

Abbandonato il concetto di sviluppo legato alla sola crescita economica, negli anni '70 è sorta la necessità di creare un nuovo modello di sviluppo in grado di conciliare crescita economica ed equa distribuzione delle risorse, al fine di non mandare in collasso i sistemi naturali. Nel 1987 viene introdotto il concetto di “sviluppo sostenibile” nel Rapporto Brundtland, nel quale si evince che *“lo sviluppo è reale solo se migliora la qualità della vita in modo duraturo”*. La sostenibilità consiste quindi nel raggiungimento di un equilibrio ottimale a lungo termine dei requisiti economici, sociali e ambientali. La *sostenibilità economica* è la capacità di generare reddito per il sostentamento della popolazione, la *sostenibilità sociale* di garantire condizioni di benessere umano equamente distribuite per classi e genere, mentre la *sostenibilità ambientale* di preservare nel tempo qualità e riproducibilità delle risorse naturali. Le tre dimensioni sono strettamente correlate, l'insieme di queste interrelazioni definisce lo sviluppo sostenibile, misurato a seconda del grado di relazione tra i fattori che lo compongono. Una successiva definizione di sviluppo sostenibile è stata fornita nel 1991 dalla World Conservation Union (WCU), United Nation Environment Programme (UNEP) e World Wide Fund for Nature (WWF), che lo identifica come *“un miglioramento della qualità della vita, senza eccedere la capacità di carico degli ecosistemi di supporto, dai quali essa dipende”*.

Nello stesso anno Hermann Daly⁽⁷⁾ ricondusse lo sviluppo sostenibile a tre condizioni generali concernenti l'uso delle risorse naturali da parte dell'uomo:

- il tasso di utilizzazione delle risorse rinnovabili non deve essere superiore al loro tasso di rigenerazione;
- l'immissione di sostanze inquinanti e di scorie nell'ambiente non deve superare la capacità di carico dell'ambiente stesso;
- lo stock di risorse non rinnovabili deve restare costante nel tempo.

Le imprese svolgono un ruolo di notevole importanza, che va rimodellato per garantire la sostenibilità, sostituendo lo schema classico di *economia lineare* con un modello di *economia circolare*. Secondo la Ellen MacArthur Foundation, il termine

(6) *Ellen MacArthur* (Whatstandweel, 8 luglio 1976) è una velista inglese e fondatrice il 2 settembre 2010 della Ellen MacArthur Foundation, un ente di beneficenza che lavora con le imprese e l'istruzione per accelerare la transizione verso un'economia circolare.

(7) *Herman Daly* (21 luglio 1938) è un economista statunitense, uno dei maggiori economisti ecologici.

economia circolare definisce “un’economia pensata per potersi rigenerare da sola. In un’economia circolare i flussi di materiali sono di due tipi: quelli biologici, in grado di essere reintegrati nella biosfera, e quelli tecnici, destinati ad essere rivalorizzati senza entrare nella biosfera.” L’economia circolare è dunque un sistema in cui tutte le attività, a partire dall’estrazione e dalla produzione, sono organizzate in modo che i rifiuti di qualcuno diventino risorse per qualcun’altro. Nell’economia lineare, invece, terminato il consumo termina anche il ciclo del prodotto che diventa rifiuto, costringendo la catena economica a riprendere continuamente lo stesso schema: estrazione, produzione, consumo, smaltimento.”

E’ necessario quindi intervenire sull’acquisizione delle materie prime, punto di partenza del ciclo, riducendo al minimo la pressione esercitata sui sistemi naturali introducendo le *materie prime secondarie*, ovvero quelle materie prime già utilizzate per cicli produttivi precedenti, recuperate e rigenerate per essere reimmesse in un nuovo ciclo di produzione. La fase di progettazione è decisiva per l’economia circolare, in quanto si progettano i prodotti pensando al loro impiego a fine vita e si dà priorità alla modularità, versatilità e adattabilità in modo tale che possano adattarsi al cambiamento delle condizioni esterne.

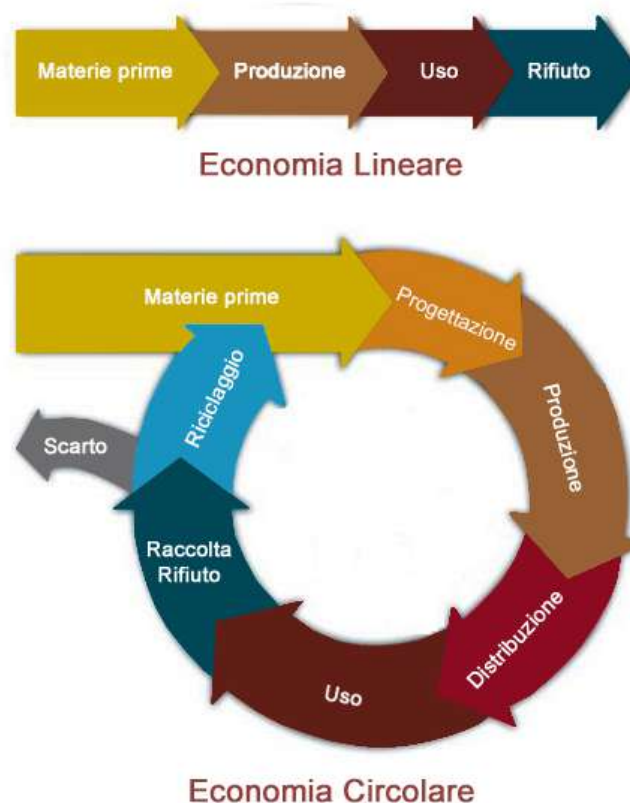


Fig. 1.1 Economia lineare ed economia circolare

1.3 La sostenibilità in edilizia

Il *Global Status Report for Building and Construction*, rapporto per gli edifici e le costruzioni coordinato dalle Nazioni Unite, riporta che nel 2018 il settore dell'edilizia e delle costruzioni è responsabile del 39% delle emissioni di anidride carbonica (CO₂) legate all'energia e ai processi, di cui l'11% proviene da emissioni di CO₂ incorporate, o "iniziali" associate a materiali e processi di costruzione durante l'intero ciclo di vita dell'edificio [12]. Le crescenti preoccupazioni legate all'aumento delle emissioni di carbonio hanno spinto i leader di tutto il mondo a compiere sforzi per prevenire le manifestazioni catastrofiche del cambiamento climatico e del riscaldamento globale. E' necessario prevedere uno sviluppo sostenibile delle città, che va perseguito dal momento della progettazione degli interventi edilizi, durante la vita utile degli stessi, fino alla loro dismissione. L'edilizia viene ripensata in termini di sostenibilità attraverso edifici efficienti, realizzati con sistemi evoluti, in grado di garantire i corretti fattori ambientali, di salute e di comfort degli occupanti. A tal proposito, l'edilizia deve puntare alla riduzione dell'inquinamento atmosferico attraverso la riduzione del fabbisogno di energia primaria degli edifici e con l'ausilio di fonti di energia rinnovabili; migliorare il comfort abitativo (estivo e invernale) e conseguire una riduzione dei costi di gestione e manutenzione; realizzare ambienti interni più salubri attraverso l'utilizzo studiato di materiali e tecniche costruttive. L'impatto dell'attività edilizia sull'ambiente deve essere considerato con l'Analisi del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment - LCA) dei materiali, degli impianti e del manufatto stesso, per valutare costi e benefici in termini ambientali e sociali.

La sostenibilità di un intervento edilizio si riassume nei seguenti requisiti:

- *affidabilità*: capacità di fornire le prestazioni richieste nel periodo di vita e condizioni di esercizio;
- *manutenibilità*: capacità di subire modifiche e riparazioni con impatti minimi sugli utilizzatori;
- *adattabilità*: prontezza nel fornire prestazioni diverse adeguate alla richiesta esterna;
- *durabilità*: capacità di mantenere invariate durante la vita utile le prestazioni offerte);

- *sicurezza strutturale*: capacità di garantire prestazioni di progetto senza danni;
- *robustezza strutturale*: capacità di limitare i danni in presenza di situazioni eccezionali;

La sostenibilità di un sistema da costruzione consiste quindi nel miglior rapporto tra la costruzione, il suo funzionamento e mantenimento, la sua dismissione e l'impatto che tutti questi cicli hanno sull'ambiente [13].

L'ottenimento dei requisiti di sostenibilità va indirizzato verso la ricerca di nuovi materiali e tecniche di realizzazione, per contribuire a limitare le emissioni di gas serra, contribuendo a rallentare il riscaldamento globale e i gravi problemi derivati dall'inquinamento.

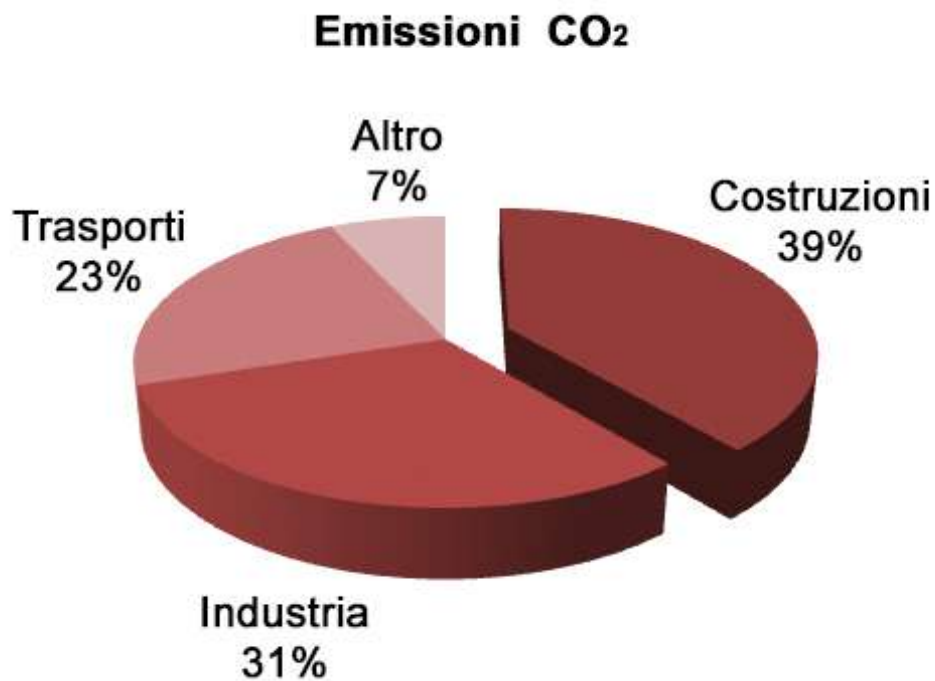


Fig 1.2 Quota globale di energia ed emissioni finali di edifici e costruzioni, 2018

1.4 Materiali naturali nelle costruzioni

A fronte dello scenario appena descritto, negli ultimi anni si assiste all'introduzione di materiali naturali, riciclati e riciclabili, per cercare di rendere il settore delle costruzioni nuovo e sostenibile.

Fino alla fine del XX secolo, i materiali da costruzione erano tutti naturali: pietra, laterizio, legno, argilla cruda o cotta, calce. I materiali erano prevalentemente reperiti in loco, le cui caratteristiche e tecniche costruttive erano note perché tramandate dalla tradizione. Con l'avvento dell'industria petrolchimica sono entrati nel mondo delle costruzioni materiali sintetici, che hanno portato ad ottenere ambienti artificiali, caratterizzati da scarsa ventilazione e traspirabilità. Oltre ad avere ripercussioni sulla vivibilità degli edifici, il pericolo ricade anche sulla salute umana, data l'aggressività delle sostanze volatili immesse dai materiali, che emettono nell'aria sostanze tossiche. Come risposta alla situazione allarmante, è cresciuto l'interesse per i materiali e le tecniche da costruzione "naturali", "vernacolari" o "tradizionali", che offrono un'alternativa a basso consumo energetico e impatto ambientale minimo rispetto ai tradizionali materiali da costruzione. Rimangono comunque molte barriere in merito all'uso dei materiali naturali da costruzione nell'edilizia tradizionale, a causa della mancanza di dati scientifici esaustivi che quantificano le prestazioni e una mancata esperienza nell'industria tradizionale, fattori che portano alla percezione che questi materiali abbiano scarse prestazioni e siano poco tecnologici.

Nel 2016 è stato redatto il rapporto *"100 materiali per una nuova edilizia"* frutto di un lavoro congiunto di Legambiente⁽⁸⁾ e dell'Osservatorio Recycle sui nuovi materiali da costruzione, che ha come scopo di illustrare e approfondire i cambiamenti in corso nell'edilizia e contiene al suo interno specifici criteri che permettono di evidenziare le peculiarità dei materiali, per poi motivarne la scelta di utilizzo.

(8) *Legambiente* è un'associazione ambientalista italiana senza scopo di lucro erede dei primi nuclei ecologisti e del movimento antinucleare che si sviluppò in Italia e in tutto il mondo occidentale nella seconda metà degli anni settanta. Nata nel 1980 nell'ambito ARCI, da cui si è successivamente resa autonoma, era conosciuta inizialmente come Lega per l'Ambiente, ma nel 1992, nel corso del IV Congresso nazionale tenutosi a Parma, ha modificato il nome in Legambiente per evitare confusione con altri movimenti.

Per ogni materiale è riportato:

- Informazioni sulle voci di capitolato e caratteristiche del materiale stesso, quali ad esempio la resistenza, la conducibilità e la trasmittanza;
- Trasformazione del processo produttivo, la filiera e il ciclo di vita del materiale e, se presente, la capacità della gestione del riciclo del prodotto da parte del produttore;
- Caratteristiche ambientali, ovvero i parametri di lettura di un materiale che ci restituiscono la riciclabilità e il riuso;
- Marchi ed enti certificatori sulla qualità del prodotto LEED, Marcatura CE, ICEA (Istituto Per La Certificazione Etica Ed Ambientale), ANAB (Associazione Nazionale Architettura Bioecologica), Norme UNI, sistemi di gestione ambientale ISO14001, EPD (Dichiarazione Ambientale Prodotto), PEFC (Programma per il mutuo riconoscimento degli schemi di certificazione forestale) e FSC (Forest Stewardship Council), ecc.

Riportare queste informazioni è necessario per dare prova del miglioramento delle prestazioni ambientali dei materiali, per accompagnare e accelerare i cambiamenti negli interventi di edilizia con chiari indirizzi normativi [13].

Selezionare ed individuare i materiali per l'edilizia sostenibile richiede lo studio di molti fattori, in particolare l'utilizzo di materiali locali, minimizzazione dei trasporti, costruzione modulare, che veda nel cantiere il luogo di montaggio/smontaggio di componenti di derivazione industriale; riciclo o riutilizzo a fine vita.

Il tema del fine vita risulta particolarmente importante in Italia quando è stata emanata la Direttiva Europea 2008/98/CE relativa ai rifiuti, che introduce i concetti di *riutilizzo*, *recupero* e *riciclaggio*, indicando con chiarezza l'obiettivo di utilizzo di almeno il 70% di materiali da riciclo entro il 2020.

Di seguito si riporta una selezione dei materiali naturali più comunemente usati in edilizia al giorno d'oggi.

Blocchi in laterizio porizzato e materiale naturale

I blocchi si realizzano aggiungendo all'impasto tradizionale di argilla, acqua e sabbia, materiali di origine naturale, quali la *pula di riso*, la *sansa di olive*, la *farina di legno*, la *cellulosa*, che in fase di cottura rilasciano gas creando microalveoli uniformemente diffusi nella massa d'argilla. La porosità del materiale garantisce un alto grado di isolamento termico, elevata permeabilità al vapore, resistenza al gelo e al fuoco.

Blocchi in laterizio e sughero

I blocchi sono costituiti da laterizi forati con pannelli in sughero all'interno delle intercapedini, così da generare un elemento con totale assenza di ponti termici, con buon grado di isolamento termico e acustico. Per il sughero si utilizzano solo resine naturali, che si riconoscono da quelle sintetiche per il colore bruno. Il sughero ottenuto dalla quercia da sughero, pianta autoctona mediterranea, non comporta fasi di lavorazione inquinanti né di impoverimento delle risorse naturali.

Mattoni in terra cruda “Adobe”

I mattoni sono realizzati con *terra* estratta da 30 cm di profondità, mescolata con sabbia o paglia. E' una tecnica molto antica, la miscela viene preparata e battuta in casseforme, lasciata asciugare oppure pressata con tecniche moderne di compressione manuale e meccanica. Le costruzioni in terra cruda sono molto salubri perché possiedono buone proprietà igrometriche, accumulano calore e hanno buone proprietà fonoisolanti. L'intero ciclo produttivo è a basso impatto ambientale: l'estrazione può avvenire sfruttando terreni di scavo di fondazioni, la preparazione del materiale non prevede l'aggiunta di altri elementi, le lavorazioni non richiedono l'utilizzo di macchinari o di cottura e, infine, il mattone può essere inumidito e riutilizzato o restituito all'ambiente a fini agricoli, chiudendo con la massima sostenibilità il suo ciclo di vita.

Mattone di calce e canapa

I blocchi sono costituiti da un composto a base di canapa e calce, ottenuto dalla combinazione della parte legnosa dello stelo di canapa con un legante a base di

calce, si caratterizzano per la capacità di catturare le emissioni di CO₂ dall'atmosfera. Una volta indurito, il composito acquisisce rigidità rimanendo leggero, garantendo un ambiente salutare, un ottimo isolamento termo-acustico, permeabilità al vapore e un alto confort abitativo. La canapa è la pianta che produce più biomassa al mondo, crescendo in soli quattro mesi fino a sei metri di altezza e assorbendo grandi quantità di biossido di carbonio durante il suo ciclo vitale. Grazie all'utilizzo della canapa, infatti, per ogni tonnellata di materia secca posata in cantiere vengono sequestrati dall'atmosfera 330 kg di CO₂, rendendo il bilancio del prodotto nettamente negativo (ovvero, la CO₂ impiegata dalle piante per crescere è nettamente superiore a quella prodotta per ottenere il prodotto finito).

Pannelli in Canna Palustre

La Canna Palustre è una delle più grandi graminacee nostrane, molto diffusa allo stato spontaneo. E' caratterizzata dal possedere un grosso rizoma nodoso e sommerso, da cui si ergono fusti straordinariamente flessibili che possono raggiungere un'altezza di 4 m. Le canne utilizzate in edilizia vengono raccolte già secche e poi legate insieme mediante filo di ferro zincato o filo di nylon per realizzare pannelli utilizzati in cappotti esterni ed interni. Le cavità interne del materiale rimangono integre e contengono aria ferma, ottima per l'isolamento termico, garantiscono inoltre igroscopicità, traspirazione, resistenza all'attacco dei roditori e delle muffe, resistenza all'umidità e alla marcescenza, resistenza al fuoco grazie ad un alto contenuto di acido silicico e perfetta salubrità.

Pannello in sughero

Le cortecce, dopo la stagionatura all'aria aperta, vengono triturate in granuli per essere assemblate in pannelli per l'edilizia attraverso un ciclo di pressatura a caldo. Il processo termico di tostatura permette la fusione delle resine naturalmente contenute nella corteccia, che agiscono da collante naturale per aggregare i granuli e formare il pannello. La tostatura migliora le caratteristiche del sughero, in quanto permette al granulo di espandersi, inglobando aria e migliorandone le caratteristiche di coibenza.

Pannelli in lana di pecora

La lana di pecora è l'unica materia prima rinnovabile di origine animale sul mercato mondiale, è elastica e traspirante, possiede capacità igroscopiche e climatizzanti contro il caldo e il freddo. Grazie alla particolare microstruttura è un ottimo isolante termico e acustico, inoltre è in grado di assorbire le sostanze tossiche. La lana deve essere protetta dall'attacco di tarme e parassiti attraverso trattamenti con sali o derivati a base di urea. La scelta di questo tipo di isolante garantisce un basso livello di inquinamento ambientale e un basso consumo energetico durante la fase di produzione.

Pannelli in fibra di cocco

La fibra si ricava per mezzo di semplici processi di lavorazione naturali della buccia esterna della noce di cocco. Dopo il lavaggio con acqua e battitura a mano, la fibra viene sottoposta al processo naturale di essiccazione, senza l'utilizzo di prodotti chimici. La fibra viene cardata e tessuta dando origine ad un manto che viene pressato, per consentire di raggiungere la rigidità necessaria per il processo di taglio in lastre, o strisce. Il materiale resiste a compressione e a trazione, è elastico e caratterizzato da una lenta combustione, imputrescibile, inattaccabile da insetti e batteri. È permeabile al vapore e viene utilizzato in edilizia come isolante termoacustico. I pannelli sono impiegati in edilizia sia come interno porte che come interno pareti.

Pannelli in fibra di kenaf

È un prodotto ricavato dalla pianta di Kenaf, diffusa in Asia meridionale e nell'Africa subshariana, pianta simile alla canapa, che appartiene alla famiglia delle Malvacee, che possono raggiungere dai 3 ai 6 metri di altezza, senza particolari ramificazioni. La fibra di Kenaf ha ottime proprietà termoacustiche ed è traspirante e igroscopica. È un prodotto che non contiene sostanze tossiche e non presenta rischi per la salute durante la fase di lavorazione e nemmeno durante la messa in opera o l'utilizzo. I pannelli semirigidi in fibra di Kenaf vengono utilizzati per isolare termicamente ed acusticamente le intercapedini di strutture in legno e muratura, cappotti interni ed esterni ventilati, controsoffitti, sottopavimenti e solai, è traspirante ed è in grado di

regolare l'umidità interna di un ambiente sia nel periodo invernale che in quello estivo, garantendo un ambiente salubre e confortevole. La fibra di Kenaf risulta essere un materiale ecocompatibile con una alta resa per ettaro e un basso consumo di energia durante il processo produttivo.

Pannelli in fibra di lino

Il lino è una fibra composta per circa il 70% da cellulosa, il cui utilizzo come tessuto è conosciuto fin dall'antichità. I prodotti per l'isolamento in fibra di lino sono ricavati da piante provenienti da coltivazioni biologiche, con lavorazioni non inquinanti e con scarsa richiesta energetica. La fibra di lino è un materiale con ottime proprietà di isolamento termico ed acustico, è altamente traspirante e igroscopico, e non contiene sostanze nocive per la salute. I pannelli morbidi vengono utilizzati per isolare intercapedini di costruzioni in legno, per cappotti interni ed esterni, per pareti divisorie interne e per solai.

Pannelli in fibra di mais

Il prodotto si ricava dai chicchi di mais, che vengono fatti fermentare per estrarre l'acido polilattico, che viene lavorato per produrre le fibre vere e proprie. Per la produzione dei pannelli viene utilizzata una miscela di fibre costituita da un 70% di fibre normali e la restante di fibra di acido polilattico. L'insieme di fibre, sovrapposte in veli sottili, sono portate a 160C° in appositi forni per consentire la termolegatura delle fibre e la formazione di pannelli di diverso spessore e densità. I pannelli sono biodegradabili al 100%, non contengono sostanze tossiche e non comportano rischi per la salute in fase di messa in opera e in fase di utilizzo. La fibra di mais ha ottime proprietà di isolante termoacustico ed è altamente traspirante. Inoltre, in caso di incendio, è autoestinguente ed ha basse emissioni di fumo.

Pannelli in bambù

I pannelli sono interamente realizzati in bambù massiccio, ottenuto pressando le strisce di bambù orizzontalmente, verticalmente o mediante compressione. In seguito alla raccolta, i culmi di bambù vengono sezionati longitudinalmente,

mentre la corteccia e la membrana interna vengono rimosse. Le strisce hanno naturalmente un colore giallo chiaro, ma possono essere vaporizzate per ottenere un colore marrone chiaro o trattate termicamente per ottenere un colore marrone scuro. Dopo il trattamento e l'essiccazione, le strisce di bambù sono pronte per essere lavorate in diversi modi per ottenere il prodotto finale.

Feltro di juta

La juta è una fibra naturale ricavata da piantagioni coltivate specialmente in India. La produzione si ricava dal fusto, che raggiunge i 3-4 metri di altezza. I lunghi steli della pianta vengono tagliati e messi a macerare in acqua per eliminare le parti organiche. Dopo circa tre settimane si procede alla separazione della corteccia fibrosa dall'anima legnosa dello stelo. Le fibre vengono lavate, asciugate, battute ed ammassate in balle. Vengono poi prodotti i feltri, tramite procedimenti meccanici che non richiedono l'uso di sostanze chimiche. La fibra di juta è costituita solo dal 6% del peso della pianta. Il processo di produzione è lungo e richiede un lavoro intenso, l'estrazione della fibra viene effettuato totalmente a mano. I materiali isolanti in fibra di juta sono traspiranti, igroscopici e con buone caratteristiche di isolamento acustico, relativamente resistenti a malattie e parassiti. La fibra di juta è riutilizzabile, riciclabile e compostabile nel terreno o nei siti di compostaggio.

Fibra e fiocchi di cellulosa

Il materiale è ricavato quasi interamente da carta riciclata, possiede buone capacità isolanti, determinate dalla resistenza all'aria che ostacola la trasmissione al calore. Si presenta sotto forma di pannelli o in fiocchi, ideali per il riempimento di intercapedini attraverso l'insufflaggio. Garantisce la traspirabilità, la stabilità dimensionale e una riduzione dei costi e dell'incidenza energetica in fase di produzione.

Balle di paglia

Intorno agli inizi del XX secolo questo materiale è stato utilizzato principalmente negli Stati Uniti per costruire case veloci, a basso costo, in modo semplice ed efficace. Da allora più di 10.000 case a basso consumo energetico sono state

costruite con isolamento in paglia, materiale di scarto derivante dalla lavorazione di una materia prima rinnovabile, il grano, che cresce ogni anno a basso costo ed è completamente biodegradabile. Le balle di paglia come materiale da costruzione possono essere facilmente lavorate, hanno alto potere isolante termico e acustico; traspirabilità dei muri e conseguente salubrità degli ambienti. Al contrario di quanto si possa pensare, le case in paglia resistono al fuoco più a lungo di un edificio in cemento armato. La paglia necessita di essere protetta dall'acqua e ben rivestita da uno strato di intonaco solitamente di 4 cm di argilla all'interno e di calce all'esterno per impedire di essere attaccata da roditori e insetti. La paglia è un materiale altamente sostenibile, rinnovabile annualmente e disponibile in grandi quantità in tutto il mondo, inoltre è facilmente smaltibile e riciclabile.

Pannelli in fibra di legno

Ottenuta dalla lavorazione degli scarti delle segherie o dalle pulizie forestali che non contengono sostanze chimiche, è un materiale sostenibile e ottimo isolante termoacustico. Con pannelli in fibra di legno si possono isolare termicamente e dai rumori le pareti verticali degli edifici, i solai orizzontali, i tetti e i sottopavimenti, il che ne fa un materiale molto versatile con una buona stabilità dimensionale (le lastre tendono a piegarsi ma in modo contenuto) e anche di durata superiore rispetto a molti materiali isolanti di sintesi petrolchimica.

Pannelli in lana di legno

I pannelli in lana di legno sono realizzati partendo dagli scarti di legno di segheria macinati fino a ridurli in lana e successivamente aggregati per effetto del solo potere collante della lignina, la resina naturale presente nel legno stesso. Di solito i pannelli sono sottoposti a un procedimento particolare di "feltratura" o "mineralizzazione" attraverso l'aggiunta di cemento e polvere di marmo, che contribuisce a renderli stabili. Oltre a presentare un ottimo bilancio ecologico, un altro vantaggio della lana di legno è l'elevato tempo di 'sfasamento' che rende i tetti e i sottotetti isolati con questo materiale molto più freschi e vivibili rispetto agli isolanti di sintesi.



Fig. 1.3 Mattone in terra cruda - Adobe (architonic.com)



Fig 1.4 Mattone in calce e canapa (greenplanner.it)



Fig 1.5 Pannello in Canna Palustre (bancadellacalce.it)



Fig 1.6 Pannello in lana di pecora (nordtex.it)



Fig 1.7 Pannello in lana di lino (thewproject.it)



Fig 1.8 Pannello in fibra di mais (casaenergetica.it)



Fig 1.9 Pannelli in fibra di kenaf (softex-srl.com)



Fig 1.10 Feltro di juta (lamasiera.it)



Fig 1.11 Pannello in fibra di cellulosa (ideegreen.it)

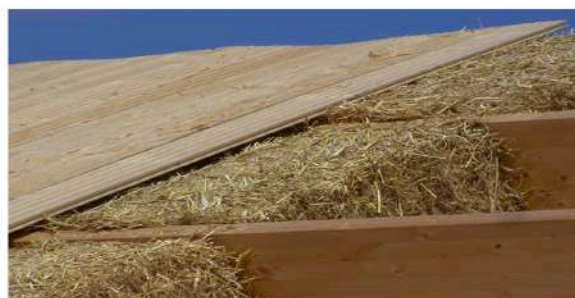


Fig 1.12 Isolamento in paglia (filodipaglia.it)

1.5 Legislazione sulla bioedilizia

Nel 2004, la conferenza dei presidenti delle regioni e delle province autonome ha approvato uno strumento di valutazione, denominato “Protocollo ITACA⁽⁹⁾”, che consente di effettuare la valutazione della sostenibilità degli edifici per destinazioni d’uso, prevalentemente residenziali.

Il termine “*bioedilizia*” entra a far parte del lessico legislativo italiano con il Decreto 2002/91/CE sul “*Rendimento energetico nell’edilizia*”, approvato dal Consiglio dei Ministri il 29 dicembre 2006, come applicazione di criteri di sostenibilità nel campo della progettazione e costruzione edilizia. Il testo tratta prettamente temi energetici, stabilisce che gli edifici immessi nel mercato immobiliare dichiarino il proprio consumo energetico attraverso un attestato di certificazione che indichi la classe di consumo, incitando ad adeguare le tecnologie edilizie a efficaci livelli di isolamento termico. I Comuni in particolare hanno l’obbligo di inserire nei Regolamenti edilizi norme più restrittive sui consumi energetici, imponendo l’impiego di tecnologie per la produzione di energie rinnovabili e valori relativi alle caratteristiche prestazionali dell’involucro (pareti, finestre, solai, coperture) che garantiscano meglio l’isolamento. La prospettiva di innovazione ha bisogno di chiari indirizzi normativi per accompagnare i cambiamenti negli interventi in edilizia, la direttiva di riferimento è *EPBD (Energy Performance of Buildings Directive)* – Direttiva Europea 2010/31/UE, che individua un cambiamento per il settore delle costruzioni: da gennaio 2019 tutti gli edifici pubblici dell’Unione Europea (scuole, sedi comunali, biblioteche, ecc) devono essere ad *energia quasi zero (NZEB – near zero energy)* e da gennaio 2021 anche quelli nuovi privati. Inoltre la direttiva prevede che ogni paese proceda ad elaborare appositi piani di sviluppo per favorire l’aumento di nuovi NZEB, fissando obiettivi ed eventuali incentivi utili, tenendo in considerazione tradizioni e specificità locali. Con la sigla NZEB si intende un edificio che garantisce prestazioni di rendimento tali da non aver bisogno di apporti per il riscaldamento e il raffrescamento o, eventualmente, attraverso l’apporto di fonti rinnovabili, fattore che porta necessariamente ad un’innovazione nella progettazione e nella fase di cantiere.

(9) *Protocollo ITACA* è nato dall’esigenza delle Regioni di dotarsi di strumenti validi per supportare politiche territoriali di promozione della sostenibilità ambientale nel settore delle costruzioni, è stato realizzato da ITACA (Istituto per l’innovazione e trasparenza degli appalti e la compatibilità ambientale - Associazione nazionale delle Regioni e delle Province autonome), nell’ambito del Gruppo di lavoro interregionale per l’Edilizia Sostenibile istituito nel dicembre 2001.

2. Biocomposito di calce e canapa

2.1 La calce

Il termine calce, la cui etimologia deriva dal greco *chàlix* “*pietra, ciottolo calcareo*” [14], indica una serie di materiali da costruzione, noti fin dall’antichità, ottenuti per cottura a temperatura elevata di calcare, marmo, conchiglie o altri materiali contenuti carbonato di calcio.

La calce si presenta in diverse forme, che si differenziano a seconda dell’ambito di impiego. Si parla di *calce da costruzione* quando è impiegata in ambito edilizio, distinguendola da *calce siderurgica*, *calce agricola*, e altri svariati tipi che si utilizzano in settori diversi per ottenere determinati prodotti in base alla necessità. La distinzione tra le diverse tipologie di calce si fa in base alla purezza del calcare di partenza, da cui la divisione in due famiglie: calci aeree e calci idrauliche.

La calce aerea, così chiamata perché indurisce con l’assorbimento dell’anidride carbonica dall’aria, è il prodotto della cottura di calcari più puri, rocce ad alto contenuto di carbonati di calcio e/o carbonati di calcio e magnesio.

Nell’ambito specifico delle calci da costruzione, con calce aerea si indicano due prodotti:

- *calce viva*, o ossido di calcio, è raramente utilizzata in edilizia perché materiale caustico;
- *calce idrata* o *calce spenta*, costituita prevalentemente da idrossido di calcio, è ottenuta facendo reagire la calce viva con l’acqua in condizioni controllate.

La calce aerea è disponibile anche sotto forma di pasta, ottenuta aggiungendo un eccesso di acqua rispetto a quella necessaria a trasformare la calce viva in calce idrata. Quando questo prodotto viene lasciato in acqua per un lasso di tempo elevato, da qualche mese a parecchi anni, cambia la struttura chimico-fisico del materiale, con il risultato di aumentarne la plasticità, lavorabilità e ritenzione d’acqua. La calce idrata in pasta “invecchiata” prende il nome di *grassello di calce*.

Le calce idrauliche sono prodotti derivati dalla calcinazione di calcari marnosi, miscele naturali che presentano componenti di argilla e alluminosilicati idrati, sottoposti a cottura a temperature generalmente comprese tra 1000 e 1250 °C. In tali condizioni si forma l'ossido di calcio, che combinandosi con la silice e l'allumina forma silicati e alluminati di calcio idrati, composti che, reagendo con l'acqua, diventano stabili e insolubili anche sott'acqua (presa idraulica). [15]

A partire dal 2001 sono state pubblicate tre norme europee sulle calce da costruzione: UNI EN 459-1 "Calce da costruzione – Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità", UNI EN 459-2 "Calce da costruzione – Parte 2: Metodi di prova", 459-3 "Calce da costruzione – Parte 3: Valutazione della conformità", che hanno lo scopo di dare definizione e classificazione ai diversi tipi di calce, assegnando i requisiti relativi alle loro proprietà chimico-fisiche, specificando i criteri di conformità, di controllo e di produzione.

2.1.1 Storia e ritorno della calce

L'origine della manifattura della calce è cosa incerta: non si può stabilire né quando questa pratica ha avuto inizio, né quando si ha avuto piena coscienza dei fenomeni che accompagnano la produzione della calce.

Le prime testimonianze risalgono a 14-15 mila anni fa in Palestina, dove sono state ritrovate tracce di calce nelle pareti di antiche abitazioni; in Mesopotamia è stato rinvenuto un pavimento a terrazzo, in cui si calcola che sia stata utilizzata circa una tonnellata di calce. Dalla Mesopotamia la conoscenza della fabbricazione della calce si diffuse rapidamente nel Vicino Oriente, nella costruzione di Troia e Micene si impiegò una malta a base di calce. Nell'Antico Testamento si descrivono i tinteggi degli edifici con scialbi di calce. Con il passare dei secoli, la conoscenza arrivò ai Greci, che la trasmisero ai Romani perfezionandone la tecnica e l'impiego.

Nell'antichità la calce venne prevalentemente impiegata per le malte da costruzione e intonaco, per i tinteggi delle pareti e la formazione dei pavimenti. La grande perfezione nel costruire è testimoniata dalle possenti costruzioni romane, che ancora oggi possiamo ammirare in tutta Europa. Vitruvio⁽¹⁰⁾ nel *De Architettura*⁽¹¹⁾ descrive

diffusamente la tecnica, soffermandosi in particolare sull'*opus cementicium*, una miscela di calce viva, pozzolana, cocchiopesto e sabbia.

In passato la calce non servì solo nell'ambito delle costruzioni: alcuni popoli, tra cui Egiziani, Cretesi, Etruschi, la conobbero come colorante; Plinio il Vecchio⁽¹²⁾ ne riconosce le virtù medicamentose e fertilizzanti; il tedesco George Bauer⁽¹³⁾ illustrò l'impiego della calce in siderurgia nei primi anni del Cinquecento.

I romani ben conoscevano la cottura ed il successivo spegnimento della calce, tanto che ne diedero delle regole in svariati trattati; per quanto riguarda l'impiego di malte resistenti all'acqua, manca invece un esplicito riferimento. Non si esclude però, che senza averne piena conoscenza, si sia usata calce idraulica ritenendola un tipo di calce aerea di qualità più scadente di quelle calci aeree che erano ottenute da calcari più puri, ossia più bianchi.

Dalla caduta dell'impero romano fino al XVIII secolo, ben pochi sono stati i progressi della tecnica costruttiva; continuò l'uso della calce aerea seguendo le prescrizioni tramandate dai romani e continuò l'uso delle malte pozzolaniche, costituite da calce e polvere di laterizi o pozzolana naturale.

Nel corso della storia moderna, all'inizio dell'Ottocento, si approfondirono e svilupparono velocemente le conoscenze della calce, che portarono alla luce il significato chimico di calce viva, calce spenta, carbonatazione, presa e indurimento.

Le più alte temperature raggiungibili, i nuovi forni e combustibili permisero ad alcuni ricercatori di cogliere i millenari segreti dei leganti del passato e riproporli in un nuovo materiale, il cemento Portland, facendo lentamente scomparire la figura della calce.

Tuttavia, negli ultimi decenni, la necessità di sviluppare prodotti rispettosi dell'ambiente ha generato un nuovo interesse nell'uso della calce come materiale da costruzione. La calce, in particolare quella idraulica, necessita di temperature di cottura decisamente inferiori rispetto al cemento Portland, il che comporta un'importante riduzione di emissioni di anidride carbonica, circa il 25% in meno.

Inoltre, la calce è soggetta ad un secondo processo di presa, detto carbonatazione,

(10) *Marco Vitruvio Pollione* (80 a.C circa) è stato un architetto e scrittore romano, attivo nella seconda metà del I secolo a.C., considerato il più famoso teorico dell'architettura di tutti i tempi.

(11) *De Architettura*, trattato latino scritto da Marco Vitruvio Pollione intorno al 15 a.C, unico testo sull'architettura giunto integro dall'antichità, che divenne il fondamento teorico dell'architettura occidentale, dal rinascimento fino alla fine del XIX secolo.

(12) Plinio il Vecchio (79 d.C) è stato uno scrittore, naturalista e filosofo

(13) Georg Bauer (Glauchau 1494, Chemnitz, 1555) è stato uno scienziato e mineralogista tedesco, conosciuto come il padre della minerologia.

nel quale l'idrossido di calcio presente nella miscela si combina con l'anidride carbonica presente nell'atmosfera dando origine al carbonato di calcio, innocuo per la natura. Sono stati condotti molti studi sulle malte a base di calce per comprendere l'influenza di vari parametri, come la viscosità, la struttura dei pori, la porosità capillare e il rapporto acqua/calce, in particolare sulle proprietà meccaniche delle malte risultanti. Nonostante questa ripresa di interesse, non sono stati pubblicati studi ufficiali sull'incorporazione di fibre naturali in una matrice di calce, sebbene siano state introdotte nei polimeri o nelle matrici di cemento e siano note per migliorare le proprietà meccaniche delle malte. Inoltre, l'uso di fibre naturali e in particolare delle fibre di canapa come agenti di rinforzo nei materiali compositi offre molti vantaggi rispetto alle fibre di vetro, come la bassa densità e la biodegradabilità.

2.1.2 Il ciclo della calce

“Vi è del magico nel cogliere un sasso dalla terra, cuocerlo e demolirlo al fuoco, renderlo plastico con l'acqua, lavorarlo secondo volontà e riottenerlo solido grazie all'influsso dell'aria” (De natura, 12° Frammento, Empedocle).

Empedocle, filosofo e politico vissuto nel V secolo a.C. descrive così quello che oggi chiamiamo *ciclo della calce*. Questo processo, suddiviso in quattro momenti fondamentali, porta la pietra calcarea a diventare il legante principale di gran parte delle opere costruttive realizzate dall'uomo negli ultimi diecimila anni.

1. **Selezione del calcare:** il processo di produzione della calce inizia con la selezione della materia prima, il calcare, che comprende una grande varietà di rocce sedimentarie costituite essenzialmente da carbonato di calcio (CaCO_3), che possono presentare aspetti e caratteristiche molto variabili in relazione alle condizioni di formazione e al contenuto di impurità.
2. **Cottura:** In fase di cottura, il calcare viene immesso nei forni e portato a una temperatura prossima a 900°C . In tali condizioni il carbonato di calcio si decompone in ossido di calcio (calce viva) e anidride carbonica. Schematicamente: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

- 3. Spegnimento:** L'ossido di calce (calce viva), messo a contatto con l'acqua reagisce provocando un forte sviluppo di calore, durante il quale si trasforma in idrossido di calcio, una polvere bianca comunemente chiamata calce spenta. Schematicamente: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$
- 4. Carbonatazione:** L'ultima fase avviene quando la calce reagisce con l'anidride carbonica presente nell'aria, si trasforma in calcite attraverso la carbonatazione, assumendo una consistenza simile alla pietra, chiudendo così il ciclo della calce. Schematicamente: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$.

Selezione del calcare

La prima fase di produzione della calce avviene con la selezione del calcare, una roccia sedimentaria ricca di carbonato di calcio (CaCO_3), che viene estratta direttamente dalle cave. La sua composizione è molto variabile in funzione delle condizioni di formazione, in base alle quali le rocce sedimentarie si suddividono in tre grandi gruppi:

- Sedimenti organogeni;
- Sedimenti chimici;
- Sedimenti clastici/metamorfici.

La maggior parte delle rocce calcaree è composta da sedimenti organogeni, derivanti da organismi viventi quali scheletri, gusci o resti vegetali; una parte minore, invece, da sedimenti chimici, formatosi per precipitazioni da soluzioni acquose soprassature. La restante parte deriva da sedimenti calcarei clastici, qualora le rocce, formatesi originariamente per via chimica o organogena, vengano distrutte fisicamente e poi ricomposte in altro luogo.

Il processo di scelta del sasso è molto importante, perché determina il tipo di calce che viene prodotta. Il colore varia a seconda del contenuto di calcare e impurità argillose o quarzitiche.

I calcari, che rappresentano circa il 20% della crosta terrestre, vengono classificati e denominati mediante criteri compositivo, di struttura e in base alla loro origine.

Rispetto alla composizione chimica, i due tipi fondamentali di calcari sono:

- Calcare puro o calcico, costituito da solo carbonato di calcio
- Dolomia, composto da calcare doppio di calcio e magnesio

Calcare di tale purezza non sono commercialmente disponibili, si considerano puri i calcari che contengono un contenuto di calcio e magnesio superiore al 95%.

Quando in associazione al carbonato di calcio, i calcari contengono carbonato di magnesio (MgCO_3), si classificano in:

- Calcare magnesiacco ($5\% \leq \text{MgCO}_3 \leq 30\%$)
- Calcare dolomitico ($30\% \leq \text{MgCO}_3 \leq 45\%$)

I calcari più puri - contenenti meno del 3-5% di impurità - sono utilizzati per le calce aeree; quelli contenenti impurità di natura argillosa o silicatica per le calce idrauliche.

Nelle fornaci in Italia vengono effettuate prove di calce derivanti da sassi provenienti da tutta la penisola per vedere quali sono le migliori, per poi catalogarle. Per legge vengono eseguiti ciclicamente (ogni giorno/mensilmente) prove di tipo chimico e fisico che bisogna compiere per monitorare la produzione; ogni stabilimento deve essere attrezzato di un laboratorio che monitori gli aspetti della resistenza meccanica, della prova libera, finezza e stabilità. Ogni anno un ispettore esterno controlla che tutti i parametri siano idonei e che la produzione della calce rispetti tutti gli aspetti della normativa.

Cottura del calcare

Per cottura o calcinazione si intende la decomposizione termica a una temperatura vicino ai 900 °C delle rocce calcaree. La finalità del processo consiste nella trasformazione della materia prima, il calcare (CaCO_3), nel prodotto di cottura: la calce viva (CaO).

Nel sistema costruttivo di principio, il forno verticale rappresenta il processo di cottura più antico della fabbricazione della calce. I sassi, grossolanamente frantumati con pezzatura diversa, sono introdotti in forni cilindrici di diametro di 3 metri insieme al carbone, per procedere con il processo di cottura. E' importante che i pezzi abbiano dimensioni diverse (nell'ordine dei centimetri), per evitare che l'aria passi troppo in fretta e il carbone bruci prima del sasso. Il forno ha un processo di produzione continua a circa 900-1000 °C, finito il processo di cottura si riparte con un altro ciclo. In questa fase avviene la reazione chimica di calcinazione, che porta alla liberazione

di anidride carbonica e alla produzione dell'ossido di calcio o calce viva. All'uscita dal forno escono pietre diverse per colore e per aspetto, solitamente si differenziano in cotte, stracotte (clickerizzato, la cottura è andata a circa 1550 °C) e incotte, che non hanno cambiato ne colore ne peso, che vanno scartate o macinate. Il prodotto 'buono' è quello che messo a contatto con l'acqua sfiorisce e si apre con un processo chiamato idratazione.

Spegnimento della calce viva

Per essere utilizzata come legante, la calce viva (CaO) deve essere trasformata in calce idrata o calce spenta (Ca(OH)_2) facendola reagire chimicamente con l'acqua.

Il prodotto uscito dal forno costituisce la calce viva che può essere commercializzata così com'è oppure ridotta in polvere, quanto più carbonato di calcio c'è all'interno, tanto più il processo è veloce. Il processo è definito esotermico, perché restituisce parte dell'energia che ha assorbito (sprigiona calore fino a circa 300 gradi).

Lo spegnimento avviene in modalità diversa a seconda del tipo di calce che si vuole ottenere. Per quanto riguarda la calce aerea i processi utilizzati sono:

- *Aspersione*: con apporto d'acqua strettamente necessario alla reazione (rapporto stechiometrico). Si usa acqua atomizzata ed in pressione, favorendo la formazione di una polvere, venduta in sacchi e utilizzata per malte e pitture a calce.
- *Immersione*: con apporto d'acqua sovrabbondante alla reazione. Viene denominata "in grandi acque" e si realizza in cantiere in grandi vasche dal bordo alto, onde evitare incidenti, poiché la reazione è altamente esotermica e la produzione di calore è tale da determinare l'ebollizione dell'acqua. Terminata questa fase, prima della totale evaporazione dell'acqua, si coprono le zolle con uno strato di sabbia. La calce spenta così ottenuta è il grassello di calce, pasta di colore bianco, consistenza densa e untosa.

Può capitare, però, che alcuni grumi di calce viva finiscano con lo spegnersi dopo l'impiego, producendo con il loro aumento di volume rigonfiamenti e disgregamenti, spesso circolari. Questo è il fenomeno dei calcinaroli e si presenta quando si usa grassello non invecchiato o calce idrata difettosa.

Presa ed indurimento

La presa si sviluppa solamente in aria per le calce aeree, in aria e in acqua per quelle idrauliche, a seguito di una reazione chimica tra l'idrossido di calcio e l'anidride carbonica presente in atmosfera. Tale reazione è chiamata *carbonatazione*, schematicamente: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$.

La calce aerea, una volta messa in opera sotto forma di malta, inizia il processo di presa, caratterizzato dalla perdita graduale delle proprietà reologiche, ossia la lavorabilità e plasticità, che conferisce all'impasto una certa rigidità. Il tempo di presa può variare da alcune ore a diversi giorni, in funzione delle condizioni climatiche (umidità, temperatura, velocità del vento, concentrazione di anidride carbonica) ed è causata prevalentemente dall'evaporazione dell'acqua libera presente nella malta.

L'indurimento inizia convenzionalmente alla fine della presa e si sviluppa molto lentamente nel corso dei mesi e degli anni, in funzione soprattutto delle condizioni d'esposizione all'anidride carbonica e all'umidità e dalla composizione della malta. L'indurimento è causato dalla reazione chimica di carbonatazione dell'idrossido di calcio Ca(OH)_2 che si trasforma in carbonato di calcio (CaCO_3), accompagnata da:

- Indurimento della superficie per la formazione di un reticolo cristallino di carbonato di calcio;
- Espulsione dell'acqua;
- Aumento del volume del 12%, determinato dal maggiore volume del carbonato di calcio rispetto all'idrossido di calcio;
- Sviluppo di calore, rilasciato lentamente per il lento procedere della reazione.

Alla fine del processo si ottiene carbonato di calcio con consistenza simile alla pietra, la stessa sostanza da cui ha avuto origine, chiudendo così il ciclo della calce. [15]



Fig. 2.0 Calce viva (bancadellacalce.it)



Fig 2.1 Selezione rocce calcaree (bancadellacalce.it)



Fig 2.2 Forni verticali per la cottura



Fig 2.3 Introduzione rocce calcaree nei forni



Fig 2.4 Pezzature diverse rocce calcaree e carbone



Fig 2.5 Rocce calcaree in uscita dai forni (calce viva)



Fig 2.6 Vasche immersione calce viva (bancadellacalce.it)



Fig 2.7 Grassello di calce invecchiato (bancadellacalce.it)



Fig 2.8 Calce idrata (spiegimento per aspersione)



Fig 2.9 Prove di calci con rocce di diversa provenienza

2.1.3 Calce nella bioedilizia

Tutti i leganti da costruzione, in fase di processo produttivo, emettono in atmosfera ingenti quantitativi di anidride carbonica, legati all'uso di combustibili fossili: la calce è tra questi. Tuttavia la calce, soprattutto quella aerea, si distingue per le minori emissioni permanenti di CO₂, per via bassa della temperatura di cottura e del parziale riassorbimento dell'anidride carbonica in fase di messa in opera. La bassa temperatura di cottura della calce, che non supera i 950°C (per il cemento convenzionale si arriva a 1500°C) permette di avere bassi costi energetici ed emissioni rispetto al tradizionale cemento. In Italia si stima che i cementifici siano responsabili del 6% delle emissioni totali di anidride carbonica [17].

La calce rispetta uno dei principi di sviluppo sostenibile enunciato da Hermann Daly⁽¹⁴⁾: *“Il tasso di utilizzazione delle risorse rinnovabili non deve essere superiore al loro tasso di rigenerazione”*. Infatti il calcare in natura è stimato in 875 milioni di miliardi di tonnellate, la sua formazione/rigenerazione naturale è dell'ordine di 500 milioni di tonnellate/anno. La produzione di calce annuale mondiale è stimata a circa 117 milioni di tonnellate, e ne viene consumato un valore di 209 milioni di tonnellate annue. In pratica ci vorrebbero miliardi di anni prima di finire la reperibilità del calcare.

Un altro aspetto importante è l'alta traspirabilità, che permette alle murature di non avere aree bagnate al proprio interno lasciando fuoriuscire in modo naturale l'umidità, eliminando quasi totalmente la formazione di muffe superficiali, dannose per la salute.

Dal punto di vista chimico e tossicologico, le calci, in particolare quelle aeree, sono sostanze molto più semplici e innocue di qualsiasi altro prodotto alternativo perché costituite essenzialmente da Ca(OH)₂ ed eventualmente Mg(OH)₂. Le calci sono sostanze basiche, non tossiche e notoriamente antisettiche e igienizzanti.

(14) Herman Daly (21 luglio 1938) è un economista statunitense, uno dei maggiori economisti in tematiche ecologiche.

2.2 La canapa

2.2.1 Storia della canapa

Prove dell'utilizzo della canapa si hanno fin dai tempi del Neolitico, testimoniate dal ritrovamento di alcuni semi fossilizzati in una grotta in Romania. Il più antico manufatto umano ritrovato è un pezzo di stoffa di canapa risalente all'8000 a.C. La canapa, inizialmente utilizzata come ottima fibra tessile, cominciò a essere coltivata in epoche antiche nel continente asiatico. La sua presenza in Italia è stata rinvenuta in molti reperti risalenti alla civiltà etrusca, i quali la utilizzavano nei settori tessili, militari e navali. Nel Medioevo la coltura della canapa si estende a tutta la penisola, con l'impiego sia nell'industria che nel commercio con i paesi esteri. Nella prima metà del XX secolo l'Italia è il secondo produttore mondiale di canapa, ma con l'avvento delle fibre sintetiche e i prodotti derivati dal petrolio si assiste ad un brusco declino fino alla sua quasi totale scomparsa. Per molti anni la canapa viene pubblicizzata come pianta da cui si derivano sostanze stupefacenti, senza fare distinzione tra le varie tipologie che hanno un basso contenuto di sostanze con effetti psicotropi. Solo nel 2016 viene promulgata la Legge 242 che segna la "rinascita" della canapa nei settori economici, che contiene *"Disposizioni per la promozione della coltivazione della filiera agroindustriale della canapa"*. La norma riguarda solo la Cannabis Sativa L., ossia la sub-specie con un contenuto di THC minore dello 0,2%, che non rientra quindi nell'applicazione delle leggi sulle sostanze psicotrope e stupefacenti. La legge identifica la coltura di canapa in grado di contribuire alla riduzione dell'impatto ambientale in agricoltura, alla riduzione del consumo dei suoli, della desertificazione e della perdita di biodiversità. Attualmente in Italia si può coltivare Canapa Sativa senza necessità di autorizzazioni, in modo particolare lo Stato Italiano sostiene e promuove la coltivazione e trasformazione in vari settori, le attività di formazione, divulgazione e innovazione. La canapa si distingue per la sua varietà di usi grazie alla proprietà delle sue fibre, del canapulo (la parte legnosa del fusto), dei semi e dei fiori. Le fibre di canapa vengono utilizzate nei prodotti tessili per realizzare prodotti con aspetto naturale, grezzo, resistenti e durevole nei prodotti cartari come alternativa sostenibile al legno degli alberi. Nei prodotti alimentari si utilizzano i semi di canapa, che hanno benefiche proprietà nutrizionali, da cui si ricava farina e si estrae l'olio. La canapa viene inoltre utilizzata per prodotti medicinali

e cosmetici, prodotti plastici totalmente biodegradabili, come combustibile alternativo a quello petrolifero e come solvente naturale impiegato nella produzione di vernici e pitture.

Nel mondo delle costruzioni il componente della canapa che maggiormente viene utilizzato è il canapulo, o legno di canapa, che viene utilizzato per formare il biocomposito nel quale viene abbinata la calce con funzione di legante. L'impiego del canapulo avviene con un processo di produzione che prevede la triturazione della materia organica, con la riduzione alle diverse granulometrie richieste. Al momento non sono disponibili varietà di canapa specificamente adatte agli impieghi nel settore edilizio, quelle più adatte risultano essere quelle monoiche, che presentano piante più basse e robuste rispetto alle dioiche, che hanno precocità di sviluppo e ciclo biologico più breve. Si predilige quindi quel tipo di coltivazione che è in grado di produrre più materia prima nel minor tempo. [18]

2.2.2 La pianta della canapa

La canapa appartiene alla famiglia delle Cannabinacee, è una pianta annuale dioica (si trovano al 50% esemplari che portano solo fiori femminili e 50% fiori maschili). Il nome botanico della canapa è *Cannabis sativa* L., che è costituito da tre sottospecie: *Cannabis sativa* (canapa industriale e fonte di fibre tecniche), *Cannabis ruderalis* (canapa selvatica) e *Cannabis indica* L. (contiene elevate quantità di tetrahydrocannabinol (THC), uno dei principali cannabinoidi che ha effetti narcotici).

Fusto

La pianta di canapa ha un fusto eretto, la cui altezza può variare da 1 a 6 metri a seconda della varietà. Il fusto è formato da una corteccia esterna di colore verde costituita da fibre e da una parte interna, il canapulo, di colore bianco molto leggero. Le fibre, tenute insieme da pectine, costituiscono circa il 30 per cento del fusto e sono costituite da cellulosa (80%), pentosani (8%) lignina (6%); il canapulo rappresenta la restante parte ed è costituito anch'esso da cellulosa (45%), emicellulosa (25%) e lignina (25%), è formato da una materia legnosa leggera con bassa densità. Grazie alla particolare struttura alveolare, una volta essiccata assume

alta percentuale di cavità d'aria. Viene di norma impiegato in processi che prevedono la triturazione della materia organica, con la riduzione alle diverse granulometrie richieste, e l'addizione a leganti naturali, principalmente la calce e acqua, che danno vita ad una miscela fluida e facilmente lavorabile. Il canapulo, essendo ricco di silice, contribuisce all'indurimento del legante calcico. Queste caratteristiche sono particolarmente apprezzabili nei materiali edilizi perché altamente isolanti, traspirabili e a facile assorbimento/rilascio di umidità.

Apparato radicale

La radice della pianta di canapa è formata da un robusto fittone con esili ramificazioni laterali, che nei terreni sciolti arriva fino alla profondità di 1,5 metri.

Foglie

Le foglie della pianta di canapa si sviluppano su ciascun nodo del fusto, sono prevalentemente opposte, palmate, con segmenti acuminati, seghettati e pelosi.

Seme

Il seme è prodotto dai fiori femminili, è costituito da un frutto secco detto achenio, di colore grigio/verde, fi forma ovoidale di lunghezza 3-5 mm. Sono ricchi di olio ad alto valore nutrizionale.



Fig. 2.10. Coltivazione Cannabis Sativa (dolcevita.it)



Fig. 2.11 Semente di Canapa (southemp.it)



Fig. 2.12 Fibra di canapa (southemp.it)



Fig. 2.13 Canapulo (southemp.it)

2.2.3 Coltivazioni di canapa ed ecologia

La coltivazione di canapa è un'ottima risorsa per l'agricoltura, perché contrasta l'inquinamento dell'ecosistema, difende la biodiversità, migliora i terreni, favorisce la rotazione e la diversificazione delle colture, riduce i costi energetici, il consumo d'acqua e l'impegno lavorativo dell'agricoltore. Si adatta a tutti i tipi di terreni, è una coltivazione dinamica che si adegua al cambiamento stagionale. La canapa, se seminata con la giusta tecnica, non richiede alcun trattamento fitosanitario e diserbante, poiché cresce talmente tanto rapidamente che le piante infestanti non si attaccano. Inoltre non necessita di pesticidi perché le sue foglie e i frutti non sono graditi agli insetti. La canapa resiste alla carenza d'acqua più di tutte le altre colture industriali, per poter germinare però, deve trovare un terreno umido.

In passato la resa media in steli con le varietà italiane nei terreni più fertili era stimata in sostanza secca (13% di umidità) in 130 q/ha. Sperimentazioni condotte dall'Università di Pisa con la varietà Carmagnola nella bassa valle dell'Arno dimostrano che sono stati superati i 160 q/ha. In terreni poco fertili o marginali le rese in steli di coltivazioni "normali" variano in genere dai 50 ai 100 q/ha. In condizioni climatiche "normali" la resa media in seme delle varietà monoiche francesi e Juso 31 varia dai 6 ai 10 q/ha (massima finora riscontrata in Italia 8,5 q/ha), quella delle varietà dioiche varia da 4 a 8 q/ha. Oltre alla fertilità del terreno e all'apporto idrico durante la formazione del seme, incidono sulla resa anche la trebbia di cui si dispone, l'esperienza del trebbiatore con la canapa e la capacità di individuare il periodo giusto per la raccolta [19].

E' ormai confermato dall'esperienza che la canapa migliora i terreni: dopo le coltivazioni di canapa, si sono registrati consistenti incrementi delle produzioni di cereali ed eccezionali performances delle colture orticole. Il miglioramento, che fino ad oggi non è stato oggetto di studi specifici, è attribuito a diversi fattori, tra cui la capacità della radice della canapa di raggiungere profondità notevoli, dove preleva i nutrienti e in seguito, spogliandosi delle abbondanti foglie, in parte restituisce materia organica allo strato superficiale (contrasto alla desertificazione). La canapa inoltre protegge i terreni dal dilavamento e, durante la fase vegetativa (primavera – estate - autunno) trattiene notevoli quantità di azoto prelevato dal terreno, impedendone il percolamento in falda.

2.3 Miscela di calce e canapa

Il biocomposito di calce e canapa è ottenuto dalla combinazione della parte legnosa dello stelo della canapa, il canapulo, ed un legante a base di calce idraulica o aerea, con aggiunta di acqua. La canapa svolge la funzione di riempitivo, mentre la calce quello di legante e conservante. Il tipo di calce (idraulica o aerea) il tipo di canapa (qualità, provenienza, lunghezza del canapulo, ecc.) e le proporzioni utilizzate per realizzare la miscela, determinano materiali con caratteristiche distinte e consistenza variabile, adatta a differenti impieghi in edilizia, quali pareti, solai, cappotti termici, intonaci termici, pannelli e mattoni prefabbricati. E' possibile variare densità e spessore a seconda delle necessità prestazionali desiderate. La miscela viene lavorata in impastatrice e applicata a mano o a macchina, a seconda del prodotto finale che si vuole ottenere. Una volta mescolato con acqua e calce, il canapulo, essendo molto ricco di silice, subisce un processo di carbonatazione, nel quale il legno viene mineralizzato, ovvero trasformato in pietra. In questo processo la canapa si stabilizza e viene resa ignifuga ed inattaccabile da organismi esterni. [18]

2.4 Il biocomposito in edilizia

La miscela di calce e canapa è stata riscoperta negli ultimi 30 anni nell'edilizia in Francia Inghilterra e sta conoscendo un crescente impiego anche in Italia per le sue eccellenti caratteristiche.

Sono stati condotti tre importanti studi sull'importanza dal punto di vista ambientale della canapa, che analizza il ciclo di vita della pianta e dei prodotti da essi derivati utilizzando dati agricoli francesi (Boutin, 2006), inglesi (Miller, 2012) e italiani (Zampori, 2013). Per quanto riguarda il biocomposito, in letteratura sono presenti due studi LCA riguardante la miscela di calce-canapulo messo in opera a spruzzo (Boutin, 2006 e Pretot, 2013) [21], uno studio su miscela in cassaforma a rimuovere (Ip and Miller, 2012) [22] e uno sui blocchi in calce e canapulo (Arrigoni, 2017) [23].

Nel 2007 sono state pubblicate le regole per costruire con la canapa: *“Construire en Chanvre – Règle Professionnelles d'exécution”*, con lo scopo di affrontare gli aspetti normativi e rispondere ai numerosi quesiti delle assicurazioni che operano nel settore delle costruzioni. Successivamente sono state ampliate e ripubblicate a cura dell'Associazione Construire en Chanvre con il volume *“Guide des bonnes pratiques:*

Beton et Mortier de Chanvre” (Juillet, 2012). Queste attività di studio, hanno portato ad allargare l'interesse per l'uso della canapa in edilizia in diversi Paesi.

2.4.1 Situazione in Francia

L'uso del biocomposito di calce e canapa nel settore delle costruzioni si è diffuso in Francia, nella regione di Troyes, con il restauro dei *Colombage*, antichi edifici intelaiati in legno, dove la miscela sostituiva gli antichi materiali di riempimento che prevedevano il tradizionale metodo “a cannicciata di fango”. Originariamente il riempimento avveniva con una miscela a base di calce, durante la seconda metà del XX secolo la maggior parte degli interventi è stata realizzata utilizzando malte a base di cemento, che rendono il muro impermeabile, causando rigonfiamenti a causa dell'umidità intrappolata al suo interno. La miscela di calce e canapa è stata quindi scoperta come soluzione per i danni causati dall'utilizzo improprio del cemento [20]. L'utilizzo della canapa in edilizia lo si deve a Charles Rasetti, un artigiano francese di origini italiane, che negli anni '80 ha sperimentato impasti di canapulo con vari leganti, mettendo a punto un sistema costruttivo che, con diverse modalità, si è sviluppato nell'intera regione bretone, successivamente in Canada e in tutto il nord Europa. Significativo è stato il contributo di alcuni artigiani che, avendo compreso l'importanza del materiale in edilizia, lo svilupparono e testarono in diverse applicazioni: France Périer con l'azienda da lui fondata *Isochanvre* iniziò a produrre e distribuire il cemento di canapa e calce come alternativa al cemento tradizionale; Bernard Boyeux con l'associazione *Construire en Chanvre* ed Yves Khun con la *Association d'Adam* aiutarono a mettere in relazione i diversi portatori di interesse della neonata industria. Oggi in Francia esistono diverse centinaia di case costruite con il biocomposito di canapa e calce e vengono utilizzate dall'industria edile circa 4.000 tonnellate di canapulo ogni anno. Ricerca scientifica e test vengono costantemente condotti dal *Centre Scientifique et Technique du Batiment* (Centro di Scienza e Tecnica per la costruzione) e dalla *Ecole Nationale des Travaux Public de l'Etat* (Scuola Nazionale dei Lavori Pubblici di Stato). [24].

2.4.2 Situazione in Regno Unito

Nel Regno Unito l'impiego della miscela di calce e canapa è stato preso in considerazione solo recentemente. Il primo ad utilizzarla in via sperimentale all'interno di un progetto di edilizia popolare nel sud dell'Inghilterra è stato Ralph Carpenter di Modece Architects per conto della società Suffolk Housing nel 2007. L'intero processo è stato monitorato e misurato dal Building Research Establishment, una società di ricerca e consulenza specializzata in edilizia sostenibile, con il fine di investigare le proprietà strutturali, termiche, acustiche, di permeabilità e durevolezza, così come la riduzione dei rifiuti generata sul posto durante i lavori, l'impatto ambientale, ed i costi di costruzione. Successivamente è stato realizzato un enorme magazzino e centro di distribuzione a Southwold, nel Suffolk, utilizzando mattoni di canapa e calce e cemento di canapa e calce in un edificio con struttura portante di acciaio. A fine 2007 era in fase di completamento un edificio di tre piani che ospita un centro di educazione ambientale a Machynlleth nel Galles, dove il cemento di canapa e calce viene impiegato per realizzare il sistema murario [25]. La ricerca sul cemento di canapa e calce viene attualmente condotta in diverse università nel Regno Unito, il maggiore centro è l'Università di Bath, che nel 2012 ha pubblicato i risultati di un'importante attività di ricerca in merito alle prestazioni termoigrometriche su un fabbricato reale, *HemPod*, i cui risultati sono raccolti nella pubblicazione *"Hygrothermal performance of an experimental hemp–lime building"* [26], da cui si evince che rimane incerto il valore reale della conduttività termica della miscela, dovute a differenze nella densità e nel contenuto di umidità, ma che l'involucro dell'edificio fornisce una significativa attenuazione delle oscillazioni nell'ambiente esterno, che aiuta a mantenere confortevoli condizioni di temperatura all'interno dell'edificio.

2.4.3 Situazione In Italia

Il confronto con le realtà del Nord Europa ha portato ad approfondire anche in Italia l'interesse per la canapa in edilizia attraverso convegni, incontri e seminari, che hanno promosso la condivisione delle tecniche e delle buone pratiche d'uso di un materiale con grandi potenzialità a livello ecologico e ambientale. In particolare si menzionano i progetti europei INATER (Isolanti Naturali e Terra Cruda – 2009-2011),

nel quale si sono raccolte le esperienze di progettisti e costruttori che hanno operato con materiali naturali, e CANAPALEA (2015-2018), che si è sviluppato mediante “cantieri-scuola” con prove, visite, sopralluoghi, confronti tra Paesi, seminari e convegni.

In Italia il primo edificio in canapa e calce sorge nel 2011 a San Giovanni in Persiceto, nel Bolognese, un’abitazione nata dalla richiesta di realizzare una “*casa naturale che consumasse poca energia*”, progettata da Oliver Zaccanti, architetto dell’ANAB, l’Associazione Nazionale Architettura Bioecologica. Il canapulo impastato con la calce è l’unico isolante che è stato utilizzato per la costruzione: blocchi prefabbricati per le pareti e impasti eseguiti direttamente in opera differenziati a seconda della tipologia della struttura da isolare. Da quanto riferito dai proprietari che lo abitano da diversi anni, l’edificio ha un clima ottimale in estate ed inverno, senza fare ricorso a impianti di raffrescamento e deumidificazione. Durante gli eventi sismici del 2012 che hanno colpito la zona, grazie alla struttura in legno e al tamponamento in canapulo e calce, l’edificio non ha subito alcun danno, confermando l’idoneità di questi materiali alla resistenza alle sollecitazioni orizzontali, essendo “sufficientemente rigidi ma al contempo elastici”. In seguito al sisma sono stati svolti numerosi interventi per la ricostruzione di edifici danneggiati, mettendo a punto e sviluppando nuove tecniche costruttive, introducendo il “getto in opera con casseri”. Si evince da stime effettuate in diversi studi e ricerche che tutti gli edifici realizzati in questa fase hanno un bilancio di CO₂ negativo, che significa che la quantità di anidride carbonica generata dall’uso e gestione dei fabbricati sarà inferiore a quella stoccata nei muri. L’edificio di San Giovanni in Persiceto è diventato un modello per la costruzione in calce e canapa, che ne ha consentito lo sviluppo e la diffusione in varie regioni italiane, dal Piemonte e Alto Adige fino alla Puglia e Sicilia.

Di particolare rilievo sono due progetti di rigenerazione urbana realizzati in Puglia a Bisceglie, “*Le Case di Luce*”, progettate dallo studio di architettura Pedone Working nel 2016. Abitazioni costruite con canapa e calce, a basso impatto ambientale e in classe energetica A+. Il progetto ha vinto la categoria Energy and Hot Climates del Green Building Solution Award (2016), imponendosi su oltre 100 concorrenti da tutto il mondo. [18] Secondo Federcanapa, federazione della canapa italiana, ad oggi ci sono oltre 500 costruzioni realizzate o ristrutturate con il connubio di calce e canapa. Il problema che tutt’ora emerge è la mancanza di norme e regolamentazioni specifiche che possano facilitare la diffusione del materiale.

2.5 Proprietà della miscela

La canapa è una materia prima rinnovabile di origine vegetale, che cresce tutto l'anno molto rapidamente: in soli di tre mesi e mezzo produce una biomassa quattro volte maggiore di quella prodotta dalla stessa superficie di un bosco in un anno.

La calce è ottenuta dalla cottura dei calcari, rocce diffuse in tutto il territorio, ed è prodotta localmente, in linea con la politica della filiera a 'km zero'. E' stata utilizzata per centinaia di anni per mantenere i livelli di igiene grazie alla sua alcalinità ($\text{pH} > 9$), che lo rende un materiale caustico, caratteristica che le conferisce buone capacità antisettiche e disinfettanti. Inoltre, nel corso della storia si dimostra come la calce sia stata ampiamente utilizzata per preservare le fibre naturali e proteggerle da ogni forma di attacco biologico. Essendo inattaccabile da muffe e batteri, la miscela di calce e canapa risulta durevole nel tempo.

2.5.1 Isolamento termico

Le proprietà termiche della miscela variano in funzione della densità, determinata dal rapporto canapulo/calce e dal grado di compattazione in fase di posa in opera: minore è la densità, migliore è l'isolamento termico che garantisce. A seconda delle applicazioni, la densità della miscela di calce e canapa varia da 200 a 450 kg/m^3 . Le caratteristiche fisico-chimiche della miscela di calce e canapa garantiscono una bassa conducibilità termica⁽¹⁵⁾, fattore che lo rende un ottimo isolante. Vi sono differenti studi sulla misura dei parametri termici del biocomposito, uno dei più recenti, condotto presso la *Lublin University of Technology* in Polonia, riporta che il materiale ha una conducibilità pari a $\lambda = 0,086\text{-}0,094 \text{ W/mK}$. Minori consumi energetici equivalgono a risparmio economico e ad una riduzione dell'emissione di inquinanti nell'atmosfera.

L'inerzia termica è la capacità di un materiale di conservare energia calorifica e di rilasciarla nel tempo. Il parametro che descrive la capacità di accumulare energia, ritardando e attenuando la trasmissione di calore, è il *calore specifico*. La canapa si caratterizza per un calore specifico elevato ($c \approx 1700 \text{ J/KgK}$) rispetto ai materiali di origine minerale ($c \approx 900 \text{ J/KgK}$), fattore che determina benessere abitativo nei mesi caldi e bassi costi di raffrescamento.

(15) *Conducibilità termica o conduttività termica*: quantità di calore che in 1 secondo attraversa un materiale di spessore 1 metro e superficie 1 mq quando la differenza di temperatura delle due facce è di un 1°C (1 Kelvin).

La particolarità del materiale di possedere una bassa conducibilità termica e un elevato calore specifico ha l'effetto di mitigare le variazioni di temperatura esterna, mantenendo costante la temperatura interna senza l'ausilio di impianti di riscaldamento o refrigerazione. Questa peculiarità consente di regolare la temperatura in modo passivo, con conseguenti riduzioni di impatti sull'ambiente.

2.5.2 Permeabilità al vapore e igroscopicità

Le calce aeree sono caratteristiche per avere un livello di permeabilità al vapore maggiore rispetto ai leganti idraulici, caratteristica che conferisce traspirabilità. Il canapulo condivide questa caratteristica di permeabilità grazie alla sua natura porosa. Inoltre a livello microscopico è costituito da una struttura capillare in direzione del fusto della pianta, capace di assorbire e trattenere l'umidità, per poi rilasciarla lentamente a seconda delle condizioni climatiche circostanti. La capacità del biocomposito di assorbire umidità e rilasciarla quando l'aria è più asciutta garantisce l'assenza di condense, eliminando la possibilità di formazione di degrado biologico (muffe, funghi, alghe, batteri). Inoltre, grazie all'alcalinità della calce, il vapore acqueo assorbito e rilasciato durante il processo di assorbimento viene sanificato. Recenti studi dimostrano la rapidità di assorbimento del canapulo che ha raggiunto il 58,7÷67,9% dopo soli 5 secondi di immersione in acqua [27]. Questa combinazione delle proprietà dei materiali riduce la possibilità di deterioramento abbassando il livello di umidità complessiva all'interno dell'edificio, rendendolo più salubre. Inoltre gli ambienti necessitano di un minore condizionamento dell'aria e minore ventilazione, fattore che si traduce in un risparmio di costi. [31]

2.5.3 Isolamento acustico

La porosità della miscela di calce e canapa la rende un buon isolante acustico. A seconda del grado di compattazione del biocomposito e del rapporto calce-canapulo, la miscela registra un diverso assorbimento dell'onda sonora: minore è la densità, maggiore è la capacità di isolamento acustico. In tutti gli studi effettuati sulla miscela di calce e canapa non si è mai registrato un valore minimo di assorbimento inferiore a 50 dB, valore che rientra nei parametri minimi normativi. [31] Prove di laboratorio dimostrano che i migliori risultati raggiungono il 90% di assorbimento dell'onda sonora tra 500 e 2000 Hz, con eliminazione quasi totale di risonanze indesiderate

[32]. Pèrier afferma che il biocomposito migliora l'isolamento acustico quando la sua superficie viene lasciata grezza senza intonaco. Un'ulteriore ricerca è al momento in corso per massimizzare il potenziale del biocomposito affinché possa essere utilizzato in applicazioni specifiche come isolante acustico. [33]

2.5.4 Proprietà meccaniche

La miscela di calce e canapa è un materiale composito costituito da un aggregato poroso di origine vegetale e da un legante, che varia a seconda del grado di carbonatazione, caratteristica che rende il materiale non adatto ad assolvere funzioni strutturali. Tuttavia l'elevata porosità del canapulo conferisce al materiale una naturale flessibilità e leggerezza, fattori che determinano ottime proprietà di elasticità e resistenza a flessione. Il materiale dimostra di avere un alto grado di deformazione rispetto ai materiali tradizionali, come il calcestruzzo che utilizza aggregati rigidi e non porosi, fattore che comporta una maggiore resistenza alla rottura e una grande capacità plastica. Test condotti su blocchi prefabbricati dimostrano che se sono sottoposti a compressione non giungono a rottura come la muratura, bensì si deformano recuperando parzialmente la forma quando il carico viene rimosso. Nonostante non abbia capacità portante, quando la miscela ingloba la struttura portante nei muri di tamponamento, conferisce all'intera parete una notevole rigidità e resistenza a taglio in risposta ad azioni orizzontali esterne come il carico del vento. Secondo studi effettuati da Amziane e Arnaud, il tamponamento in calce e canapa è in grado di fornire una resistenza fino a dieci volte superiore un controvento diagonale ligneo e ridurre drasticamente la deformazione in caso di rottura della stessa. L'ausilio di una parete di tamponamento che non necessita di controventi e di elementi di irrigidimento, determina un beneficio in termini di tempo, manodopera e materiale. [31]

2.5.5 Resistenza al fuoco

La miscela di calce e canapa è in grado di resistere ad una prolungata esposizione al fuoco: quando la calce entra a contatto con il canapulo, ricco di silice, subisce un processo di mineralizzazione, che lo rende resistente alla fiamma. La resistenza al fuoco delle pareti è valutata in base al tempo che gli elementi possono mantenere la loro adeguatezza strutturale / integrità / isolamento quando sono esposti al fuoco.

Secondo i test condotti dal *Building Research Establishment, UK* la resistenza al fuoco media di una parete di tamponamento realizzata con la miscela di calce e canapa è di 73 minuti. Il "Centre Scientifique et Technique du Batiment" ha condotto il test su una parete in blocchi da 25 cm e dai risultati si evince che ha resistito fino ad un massimo di 120 minuti senza rilascio di emissioni nocive. La maggior parte dei produttori italiani classifica la miscela alla categoria A2 s1 d0 secondo la norma UNI 13501-1 *"materiali non combustibili la cui applicazione evita il verificarsi di fenomeni di autoaccensione - elemento strutturale che può emettere una quantità estremamente limitata di gas di combustione"*. [31]

2.5.6 Sequestro di anidride carbonica (CO₂)

La canapa assorbe anidride carbonica nell'atmosfera durante il processo di fotosintesi. Secondo Pervais, in una tonnellata di canapa essiccata sono immagazzinati 325 kg di CO₂ [28]. I vantaggi del sequestro complessivo di anidride carbonica aumentano ulteriormente utilizzando la canapa miscelata alla calce all'interno degli elementi da costruzione: al bilancio contribuisce sia l'aggregato di origine vegetale, che la carbonatazione del legante aereo durante la fase di presa. Pretot, in conferma a quanto appena esposto, ha condotto l'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) di una parete in calce e canapa applicata a spruzzo con struttura in legno, i risultati mostrano che la produzione di materie prime è la fase più impattante, principalmente a causa della produzione del legante, ma il bilancio dell'indicatore del cambiamento climatico è favorevole, in quanto l'assorbimento di CO₂ da parte della fotosintesi e della carbonatazione è superiore alle emissioni. Inoltre è stata effettuata un'analisi del cambiamento dei parametri in relazione agli spessori: con l'aumento dello spessore della parete, è migliorato l'indicatore del cambiamento climatico e la resistenza termica, fattore che riduce il fabbisogno energetico dell'edificio durante l'utilizzo, che comporta un'ulteriore riduzione dell'impatto ambientale [29]. La Lime Technology riporta che per ogni metro cubo di costruzione in calce e canapa sono assorbiti dall'ecosistema 110 kg di CO₂ quando viene applicato a spruzzo, e fino a 165 kg di CO₂ quando viene pressato e gettato all'interno di pannelli di contenimento, il valore varia a seconda del livello di compattazione durante la costruzione. Tenendo in considerazione il valore di CO₂ emessa durante la produzione della calce, si evince che la miscela di calce e canapa ha un bilancio negativo in emissione di

anidride carbonica ed è pertanto dichiarata *carbon negative* [30]. Ancora non esiste un metodo accettato o una valutazione ambientale standard per il calcolo del sequestro di anidride carbonica, Bevan e Woolley – architetti affermati che perseguono i principi di architettura sostenibile con l'utilizzo di materiali naturali – sottolineano che l'accettazione metodologica dovrebbe essere raggiunta per ottenere risultati accurati, che possono essere utilizzati per il confronto con altri materiali da costruzione. Vi è anche qualche controversia sui livelli di emissione e sulla carbonizzazione in relazione ai leganti a base di calce: la CO₂ viene emessa sia quando il calcare viene bruciato nel forno, sia dalla combustione di combustibili fossili, che dalla reazione chimica che si verifica quando il carbonato di calcio diventa ossido di calcio. La CO₂ viene poi riassorbita dal legante di calce durante il processo di carbonatazione, tuttavia è difficile dire se tale quantità compensa completamente quella che è stata emessa nella fase precedente del ciclo della calce. [31]

2.5.7 Fine vita della miscela

La miscela di calce di canapa può essere riutilizzata a fine vita sgretolandola, mescolandola con acqua e altro legante di calce e gettandola di nuovo. Questo vale per qualsiasi forma di applicazione della miscela: pareti gettate a spruzzo, mattoni o blocchi. Il materiale ha anche un potenziale di riciclaggio in altre applicazioni come il compostaggio, il rinterro o la frantumazione e lo spargimento su aiuole o campi per aumentare il pH del terreno e introdurre una pacciamatura. Essendo prodotto principalmente da uno stelo di canapa, che è una biomassa, e da calce carbonata, la miscela di calce e canapa avrebbe un impatto ambientale minimo se mandata in discarica. Può anche essere possibile sgretolarla e disperderla su terreni o campi agricoli, dove lo stelo della canapa si biodegraderebbe e la calce si mescolerebbe con il terreno.

2.6 Soluzioni costruttive con il biocomposito di calce e canapa

Sul mercato italiano sono presenti diverse tipologie di prodotti per l'edilizia a base di canapa che possono essere divisi in due categorie:

- Elementi prefabbricati (blocchi e pannelli);
- Elementi realizzati in opera (miscele, intercapedini, intonaci, finiture).

I manufatti prefabbricati vengono prodotti in stabilimento in modo analogo ai materiali tradizionali (mattoni in laterizio, blocchi in calcestruzzo), mentre quelli in opera vengono realizzate direttamente in cantiere.

Tutte le soluzioni si distinguono per avere ottime caratteristiche di isolamento termico, potere fonoassorbente, resistenza al fuoco, regolazione dell'umidità e alta traspirabilità.

2.6.1 Elementi prefabbricati

Blocchi prefabbricati

I blocchi prefabbricati in calce e canapulo si presentano come prismi parallelepipedi, dalla superficie grezza e ruvida al tatto, con una consistenza porosa dettata dalla granulometria dell'impasto. Sono sempre accoppiati a strutture portanti in legno, acciaio, cemento armato, raddoppio di muratura, perché non possono essere utilizzati per la costruzione di murature portanti. Sono disponibili in diversi spessori, che variano da 10 a 40 cm circa a seconda del produttore e dalla destinazione d'uso, in particolare vengono utilizzati per la realizzazione di pareti e tamponamenti di nuova costruzione, interventi di riqualificazione del costruito e pareti divisorie.

La posa è molto simile ai blocchi tradizionali, con la differenza che il primo corso di blocchi deve essere isolato dal terreno con guaina impermeabile per evitare la risalita di umidità sulle pareti, essendo la canapa altamente igroscopica. Grazie alla leggerezza dell'impasto, vengono garantite prestazioni di isolamento termico eccezionali. I blocchi sono lavorabili e adattabili alle necessità dimensionali.

Pannelli in fibra di canapa

I pannelli in fibra di canapa sono impiegati per la coibentazione termica e acustica di pareti, solai, coperture e anche nella realizzazione di sistemi a cappotto su laterizi, mattoni pieni e murature in pietra. Sono disponibili in diversi spessori, che variano da 2 a 20 cm circa a seconda del produttore e dalla destinazione d'uso. Si presentano nella classica forma del pannello isolante con una densità variabile, dando origine a materiali morbidi, semirigidi o rigidi. La posa dei pannelli è molto simile a quella degli analoghi pannelli tradizionali, con la differenza che si utilizza per l'incollaggio una malta a base di calce idraulica.



Fig. 2.14. Struttura in legno con blocchi in calce e canapa



Fig. 2.15. Blocchi calce e canapa (bancadellacalce.it)

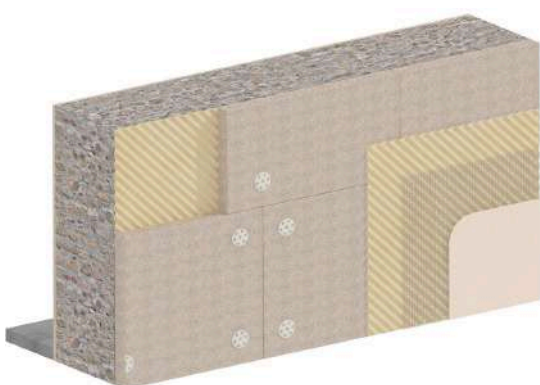


Fig. 2.16. Muratura in pietra con pannelli in fibra di canapa



Fig. 2.17. Pannelli in fibra di canapa

2.6.2 Elementi gettati in opera

Miscela di calce e canapa gettata in opera

L'impasto si presenta come materiale granulare privo di consistenza, che necessita di un cassero di contenimento per essere messo in opera. Per la posa in opera si procede con il montaggio della prima fila di pannelli (Fig. 2.18) iniziando dal basso, inserendo dei distanziali tra i listelli ed il cassero per ottenere lo spessore desiderato del getto. La seconda fase riguarda il riempimento a mano o a macchina per strati successivi e compattazione con un pestello, in modo che la densità risulti omogenea (Fig. 2.19). Dopo il riempimento del primo cassero, può essere rimosso e spostato verso l'alto (Fig. 2.20), accavallandosi alla parte già realizzata. Dopo aver eseguito l'intera parete, si possono rimuovere i pannelli (Fig. 2.21).

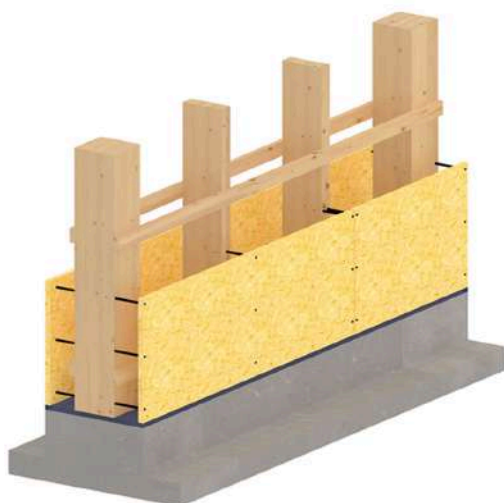


Fig 2.18 Montaggio prima fila di pannelli

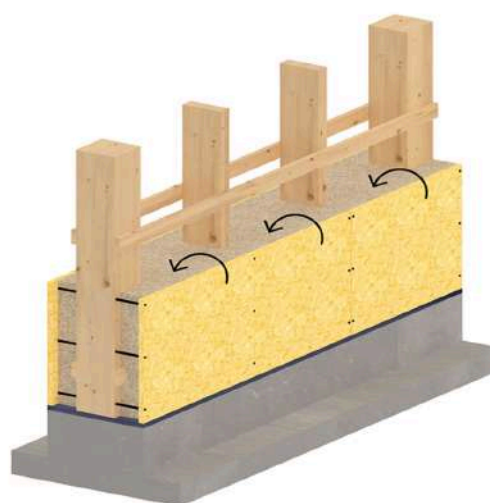


Fig 2.19 Riempimento e compattazione

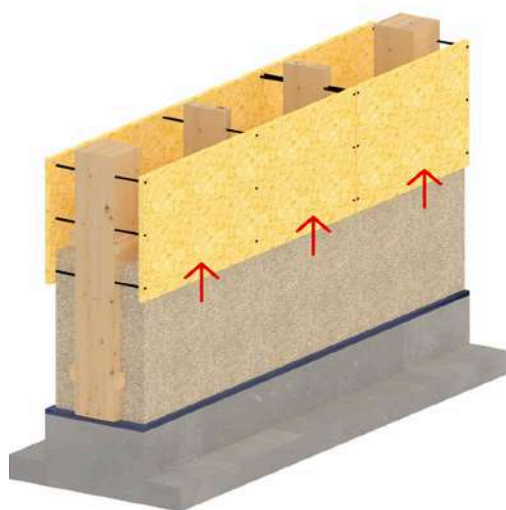


Fig 2.20 Montaggio pannelli successivi

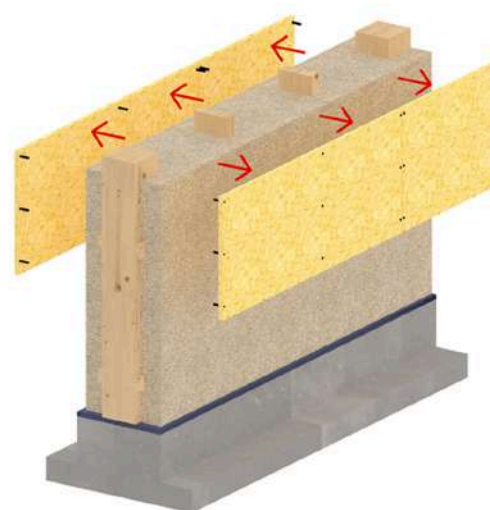


Fig 2.21 Rimozione pannelli

Se ben compattata, la miscela è in grado di auto-sostenersi fin da subito, occorrono circa due giorni prima che si possa considerare definitivamente stabile.

Il conglomerato è autoportante, ma non ha funzione strutturale, deve quindi essere sempre associato a elementi portanti in altri materiali. Per questo tipo di esecuzione serve dunque molto tempo e maestranze specializzate, fattori che determinano un costo elevato di cantierizzazione e ne limitano tutt'ora l'impiego in edilizia. La miscela viene utilizzata per la realizzazione di strati isolanti di pareti, tetti inclinati (coperture a falda) e superfici orizzontali (solaio, sottofondi di pavimento, sottotetti, coperture piane), sia interne che esterne. La resistenza a compressione varia a seconda del rapporto tra i componenti dell'impasto e in dipendenza al loro dosaggio.

La miscela di calce e canapa può essere messa in opera preparando l'impasto direttamente in cantiere o utilizzando soluzioni preconfezionate, che vengono trasportate con appositi sacchi in polipropilene (Big Bag).

Di seguito vengono illustrati i possibili utilizzi del biocomposito di calce e canapa:



Fig. 2.22 Struttura in legno con parete in calce e canapa



Fig. 2.23 Miscela di calce e canapa



Fig. 2.24 Controparete in calce e canapa su muratura

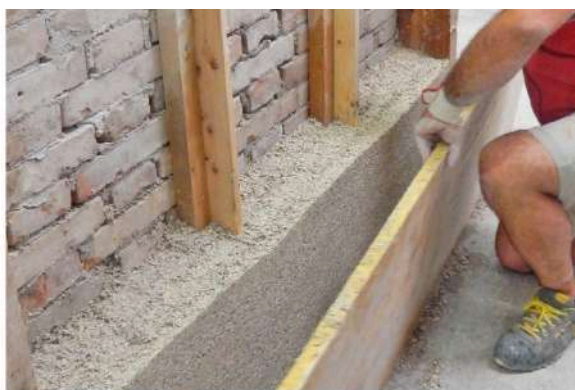


Fig. 2.25 Esecuzione controparete in calce e canapa



Fig 2.26 Tetto in legno con pannelli isolanti in fibra di canapa



Fig. 2.27 Solaio in legno con massetto isolante in calce e canapa

Intonaco e finitura

Il composto di calce e canapa è utilizzato anche per realizzare intonaci termici, intonaci per interni ed esterni, finiture e tinteggi per la decorazione di pareti e soffitti. La preparazione avviene direttamente in cantiere, impastando gli ingredienti con l'acqua, come avviene per gli analoghi prodotti tradizionali.

Tinteggio

Il biocomposito viene infine utilizzato per la realizzazione di tinteggi per interni ed esterni, attraverso l'unione di grassello di calce invecchiato e olio essenziale di canapa sativa, eccellente per le qualità traspiranti, antisettiche e antibatteriche. Dopo l'applicazione, attraverso il processo di carbonatazione, si forma una pellicola composta di microcristalli birifrangenti di calcite, che donano alle superfici particolari riflessi di luce.

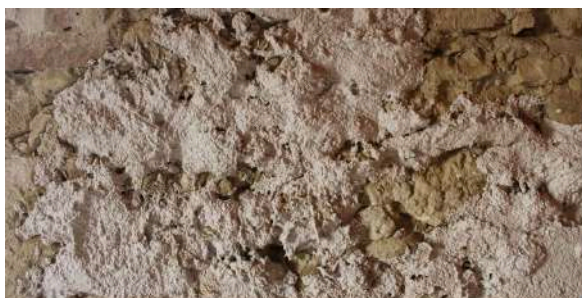


Fig. 2.28 Prima stesura intonaco termico



Fig. 2.29 Stesura intonaco (bancadellacalce.it)

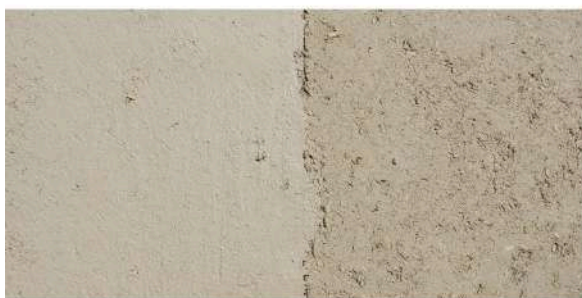


Fig. 2.30 Intonaco calce e canapa diverse granulometrie



Fig. 2.31 Finitura in calce e canapa

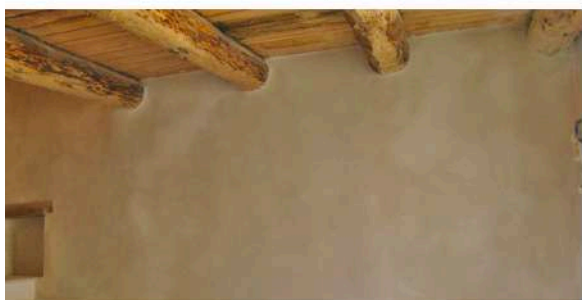


Fig. 2.32 Tinteggio a base di calce naturale

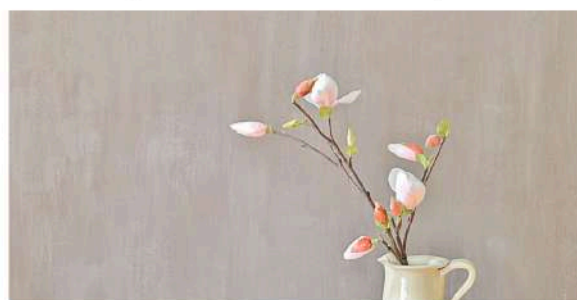


Fig. 2.33 Tinteggio a base di calce (bancadellacalce.it)

3. Tecnologia del sistema *acciaio – calce e canapa*

3.1 Il sistema costruttivo

L'impiego della miscela di calce e canapa è ancora oggi limitato a causa della complessità delle operazioni di posa: il bio-composito si presenta come materiale granulare privo di consistenza, che necessita di un cassero di contenimento per essere messo in opera. Per questo tipo di esecuzione serve dunque molto tempo e maestranze specializzate, fattori che determinano un costo elevato di cantierizzazione.

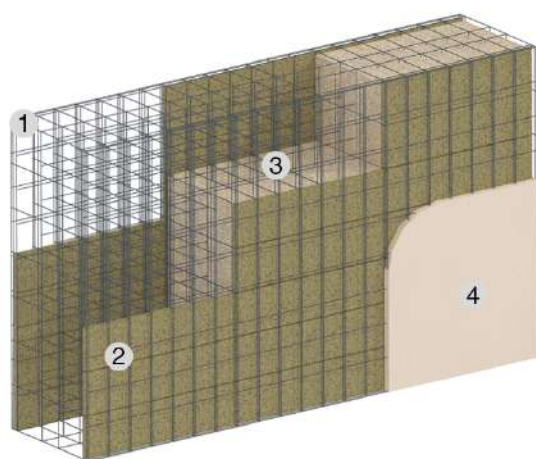
Il sistema in oggetto, ideato e progettato dallo *Studio Ass.to M Ingegneria (Ing. Miazzon A., Ing. Rampin L.)*, presenta una soluzione alle difficoltà di posa: grazie all'introduzione di casseri a rimanere prefabbricati viene realizzata una soluzione costruttiva industrializzata, con produzione standardizzata, ridotti tempi di posa e indipendenza del risultato a fronte delle maestranze impiegate, con particolare attenzione ai principi di sostenibilità ed economia circolare, data la totale riciclabilità degli elementi del sistema.

Il sistema consente l'impiego di una struttura portante a telaio in acciaio, cemento armato o legno, unito a pannelli prefabbricati realizzati con una matrice di fili d'acciaio zincato elettrosaldati, confinata da ambo i lati da pannelli in lana di legno minerale che fungono da cassero per il riempimento con miscela di calce e canapa.

La miscela è un bio-composito naturale a base di calce e canapa. E' leggera e traspirante, capace di offrire elevato isolamento termo-acustico. Viene realizzata in stabilimento e insufflata all'interno dei casseri in acciaio dal basso verso l'alto, con un processo facile e veloce.

Su ambo le superfici sono presenti pannelli in lana di legno mineralizzato, le cui caratteristiche di leggerezza e permeabilità al vapore lo rendono affine al sistema.

Nelle superfici esterne è previsto uno strato di intonaco a base di calce, che si aggrappa alla struttura metallica realizzando un intonaco confinato, come se fosse armato.



1. Modulo in acciaio zincato
2. Pannello in lana di legno mineralizzato
3. Miscela di calce e canapa
4. Intonaco a calce

Di seguito si riportano le caratteristiche tecniche del sistema acciaio – calce e canapa:

Struttura portante	Telaio in acciaio o cemento armato
Materiale isolante	Pannello lana di legno mineralizzata sp. 1,5 cm Miscela di calce e canapa sp. 37 cm Pannello lana di legno mineralizzata sp. 1,5 cm
Spessore parete finita	45 cm
Trasmittanza termica (D.M. 90/2013)	$U = 0,158 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Tempo di sfasamento dell'onda termica (UNI EN ISO 13786)	22 h 30'
Resistenza al fuoco (D.M. 30/11/83)	Classe REI 120
pH	pH > 9 altamente alcalino (basico)
Conducibilità termica miscela	$\lambda = 0,065 \text{ W/mK}$
Resistenza a compressione (UNI EN 988-1)	Categoria CS I ($0,4 \div 0,25 \text{ N/mm}^2$)
Potere fonoisolante su parete (D.M. 5/12/97)	$(R'w) > 50 \text{ dB}$
Coefficiente di resistenza al vapore acqueo	$\mu = 7 \text{ ca.}$

3.2 Modulo in acciaio

Il modulo in acciaio elettrosaldato è un brevetto dell'Azienda *Ecosism® – Advanced Building Technology* di Padova.

L'elemento consiste in una gabbia di sostegno tridimensionale costituita da vergelle in acciaio orizzontali e verticali elettrosaldate di diametro 2mm. L'acciaio utilizzato è certificato per avere un contenuto minimo di materiale riciclato del 98,6%, in linea con i principi ambientali di sostenibilità. Inoltre la sua forma permette di integrare al suo interno la strutture portante a telaio in acciaio, cemento armato o legno e fungere da supporto per i materiali di finitura.

Le aperture per porte e finestre sono già predisposte nel modulo secondo il progetto esecutivo. L'infinita variabilità della trama di acciaio permette di adattare il modulo ad ogni forma geometrica piana o curva. Il professionista può progettare ex novo a seconda della modularità dei casseri oppure adeguare un progetto esecutivo esistente.

La produzione della trama d'acciaio avviene attraverso un processo industrializzato di elettrosaldatura, grazie ad un impianto specificamente progettato, su brevetto esclusivo dell'azienda in cui viene prodotto.

A produzione completata i moduli vengono consegnati in cantiere per il montaggio insieme alle piante di produzione che funzionano da guida. La leggerezza dei moduli permette una rapida e semplice movimentazione, eliminando il fabbisogno di manodopera specializzata e di attrezzature pesanti in cantiere. I moduli vengono uniti tra loro per mezzo di una pinzatrice manuale realizzata specificatamente per i pannelli e rinforzati negli angoli, garantendo una notevole rigidità.

La trama tridimensionale funge da ancoraggio per qualsiasi materiale di finitura interna ed esterna presente in commercio.

Gli impianti sono realizzati sfruttando lo strato interno del sistema, dove è presente il materiale isolante, le porte e le finestre possono essere posizionate all'esterno, all'interno o nel mezzo del muro, è inoltre possibile realizzare innesti per particolari tipi di serramenti. I moduli sono realizzati in cantiere in base al progetto architettonico, comprendono tutte le forometrie e sono facilmente integrabili con le predisposizioni impiantistiche necessarie. Vengono assemblati in cantiere seguendo un preciso schema di montaggio. Il modulo standard ha una larghezza di 120 cm per un'altezza massima di 8 m, ma si possono realizzare misure diverse a seconda delle esigenze. I moduli possono essere prodotti con spessori da 10 a 50 cm, con diverse forme e altezze. In seguito sarà descritto in modo dettagliato il processo di produzione del

cassero. La doppia matrice superficiale di fili funge da supporto per la finitura a intonaco, che risulta confinato come se fosse “armato” e quindi in grado di sostenere agevolmente carichi concentrati appesi alla parete.

La produzione degli elementi prefabbricati in azienda prima di giungere in cantiere permette un'importante economia di tempo, di maestranze e di materiale, risparmio quantificabile da un 20% ad un 30% rispetto ai sistemi costruttivi tradizionali (tipo laterizio e polistirene espanso) con le stesse qualità di isolamento termico.

Zincatura dell'acciaio

Lo zinco è un metallo non ferroso che può essere riciclato all'infinito senza alcuna perdita di proprietà fisiche o chimiche.

La zincatura è il processo chimico industriale più efficiente ed efficace per la protezione dell'acciaio dalla corrosione. Il trattamento rende le strutture in acciaio capaci di resistere agli agenti climatici e atmosferici allungando considerevolmente il tempo di vita del materiale. E' importante proteggere l'acciaio dal fenomeno della corrosione, in quanto può causare un graduale deterioramento del materiale, causato dal progressivo decadimento delle sue proprietà intrinseche, per interazione chimico-fisica con l'ambiente circostante. Per i metalli e l'acciaio, la corrosione comporta la progressiva perdita delle caratteristiche meccaniche, funzionali e strutturali, proprie dello stato metallico. Rispetto ad altri trattamenti di protezione, come la verniciatura, si preferisce la zincatura perché è un processo ecologico ed economico. Lo zinco è un elemento naturalmente diffuso in forma organica e inorganica, e non richiede interventi di manutenzione necessari per proteggere e conservare efficientemente un pezzo d'acciaio. La zincatura diminuisce la velocità di corrosione dei metalli, aumentandone il tempo di vita e quindi diminuendo il consumo di materie prime.

Lo zinco è riciclabile e già oggi, dei 7 milioni di tonnellate di zinco prodotti ogni anno al mondo, il 30% viene dal recupero. Lo zinco è uno dei metalli che costituiscono la struttura portante degli organismi: è contenuto nel corpo umano ed è un elemento fondamentale anche in processi di miglioramento della qualità del suolo per le produzioni agricole. La durata del rivestimento di zincatura è determinata dalle condizioni di stabilità dello strato di conversione superficiale del rivestimento di zinco.

Il pH è il parametro controllante: la corrosione acida diviene significativa per pH inferiori a 4, aumentando esponenzialmente per valori di pH più bassi; a pH alcalini, invece,

dove prevale la presenza di ioni OH^- in soluzione, la velocità di corrosione diviene trascurabile per formazione di un film protettivo di ossido. La calce, in particolare quella aerea, è un materiale altamente alcalino ($\text{pH} = 12,5$).

Lo zinco reagisce fortemente a contatto con la malta di calce e, in breve tempo - ordine di settimane - per esposizione con l'idrossido di calcio, dà luogo alla formazione dell'idrossizincato di calcio, che risulta avere effetti protettivi per l'acciaio. [34]



Fig. 3.1 Processo di produzione moduli tridimensionali in acciaio zincato presso l'Azienda Ecosism – Advanced Building Technology, ecosism.com

3.3 Pannelli in lana di legno mineralizzato

All'interno dei moduli in acciaio si inseriscono pannelli in lana di legno mineralizzata, che fungono da contenimento per la miscela di calce e canapa e da valido supporto per l'aggrappo dell'intonaco a calce. Lo spessore dei pannelli è molto ridotto (1,5 cm) per ridurre al minimo la funzione di cassero e massimizzare lo spessore di calce e canapa (37 cm). Ogni pannello è manovrabile agilmente da un solo operatore, grazie alle piccole dimensioni (lunghezza 60 cm, altezza 12 cm). Come materiale di contenimento è stata scelta la lana di legno per le caratteristiche fisiche analoghe alla miscela di calce e canapa: è un prodotto di origine vegetale, completamente riciclabile e biocompatibile; è un materiale leggero, facile da trasportare e da lavorare. Viene prodotto a partire dagli scarti della lavorazione di diversi tipi di legno, solitamente abete e pino, provenienti da segherie e fabbriche, ne consegue un'abbondanza nella disponibilità della materia prima, che si abbina a costi di produzione limitati. Le fibre del legno sono impastate con acqua, pressate in appositi stampi e lasciate essiccare fino a quando non raggiungono la durezza desiderata. Successivamente sono sottoposte ad un trattamento mineralizzante, che consiste nell'impregnare le fibre stesse con magnesite, cemento o altri materiali analoghi, per conferire maggiore compattezza strutturale e annullare i processi di deterioramento biologico, rende inoltre le fibre inerti e ne aumenta la resistenza al fuoco. I pannelli utilizzati sono costituiti per il 47% da legno di abete rosso provenienti da foreste a gestione sostenibile e per il 52% da leganti minerali, principalmente polvere di marmo e cemento Portland.

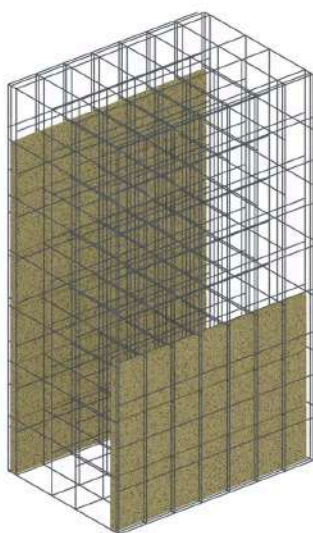


Fig. 3.2 Pannelli all'interno dei casseri d'acciaio



Fig 3.3 Pannelli in lana di legno mineralizzata

3.4 Miscela calce e canapa

La miscela di calce e canapa, commercialmente Calcecanapa® Getto, è un materiale premiscelato costituito da grassello di calce e canapulo mineralizzato, prodotto e distribuito dall'azienda *La Banca della Calce Srl* di Bologna. E' leggero, resistente, flessibile, naturalmente traspirante, capace di offrire elevato isolamento termo-acustico.

Per ottenere 350 kg netti di miscela (Big Bag 1 m³) si realizza il seguente mix-design:

- Grassello di calce 254,8 kg
- Canapulo mineralizzato 115 kg
- Acqua 80 kg

Di seguito si riportano i dati tecnici relativi alla miscela:

Tipo – UNI EN 998-1	Miscela per isolamento termico T1 premiscelata e pronta all'uso
Confezione	Big Bag da 1m ³
Resa teorica	1m ³ BigBag - 5/10 % in relazione al tipo di costipazione/posa
Lavorabilità a 20 °C	120 minuti
Coefficiente di resistenza al vapore acqueo	$\mu = 6$
Massa Volumica Apparente della malta indurita	240 kg/m ³
Calore specifico	1700 J/kg K
Conducibilità termica	$\lambda = 0,065$ W/mK
Resistenza a compressione (UNI EN 988-1)	Categoria CS I (0,4÷0,25 N/mm ²)
Potere fonoisolante su parete (D.M. 5/12/97)	(R'w) = 52 dB
Reazione al fuoco (D.M. 30/11/83)	Classe A2 (non combustibile)
Assorbimento d'acqua per capillarità (UNI EN 988-1)	Classe W1 ($c \leq 0,40$ kg/m ² ·min ^{0,5})

Il *grassello di calce* è un legante aereo, che si presenta come una pasta bianca, morbida, di consistenza plastica e untuosa al tatto. Dal punto di vista chimico fisico, il grassello di calce è una sospensione densa d'idrossido di calcio e/o magnesio in acqua; l'acqua libera, ossia eccedente a quella combinata chimicamente negli idrossidi, rappresenta il 45-70% della sua massa (mentre la calce idrata in polvere ne contiene al massimo il 2%). Il grassello di calce si ottiene esclusivamente dalla cottura di calcari puri e preferibilmente microcristallini, seguita dallo spegnimento della calce viva con opportuno eccesso di acqua e dalla prolungata maturazione (da 12 a 60 mesi) in ambiente anaerobico. E' importante distinguerlo dalla pasta di calce idrata, che si ottiene miscelando la calce idrata in polvere con l'acqua fino a realizzare un impasto omogeneo della consistenza voluta. Con grassello di calce si indica il nobile prodotto che si ottiene con i procedimenti tradizionali, come riportato nei testi di Vitruvio e Plinio, impiegato nell'edilizia, nell'architettura e nell'arte per secoli. [15]

Il *canapulo* è il nucleo interno legnoso dello stelo della pianta della canapa, ha un potere di assorbimento dei liquidi circa 12 volte superiore alla paglia e 3,5 volte superiore al truciolo di legno, grazie alla sua microstruttura che presenta numerose capillarità. Mescolato con acqua e calce, il canapulo subisce un processo di mineralizzazione che lo rende resistente al fuoco, aumenta le resistenze meccaniche e preserva il materiale dal deterioramento biologico.

Per la realizzazione della miscela di calce e canapa si è scelto un legante aereo, il grassello di calce, piuttosto che un legante idraulico per le seguenti proprietà:

- *Traspirabilità*: diversi studi hanno dimostrato che le calce aeree, in particolare il grassello, sono i materiali che meglio assicurano la traspirabilità grazie ai cristalli di calcite che si generano durante la carbonatazione di dimensioni molto maggiori rispetto a quelli che si creano dall'idratazione dei leganti idraulici. Oltre a produrre un incremento molto graduale delle resistenze nel tempo, conferisce alta permeabilità delle malte.
- *Salubrità*: il grassello di calce unito al canapulo, materiale altamente igroscopico, regola in modo ottimale l'umidità relativa degli ambienti con un processo di assorbimento – rilascio, riducendo i fenomeni di condensa e proliferazione delle muffe. Essendo fortemente alcalina, la calce aerea è un materiale caustico,

caratteristica che le conferisce buone capacità antisettiche e disinfettanti, caratteristica che non si verifica nei leganti idraulici.

- *Sostenibilità*: la calce aerea, cuocendo a temperatura più bassa rispetto ai leganti idraulici, richiede un minore consumo di combustibile e di conseguenza dà luogo a minori emissioni di anidride carbonica nell'atmosfera. Inoltre, durante la carbonatazione, grande parte del quantitativo di anidride carbonica viene riassorbita e sottratta all'ambiente.
- *Durabilità*: nella calce aerea sono assenti componenti chimici potenzialmente pericolosi, come l'alluminato tricalcico e da alcuni alcali, sempre presenti nei leganti idraulici, che a contatto con ambienti acidi (terreni e acque) hanno un'azione destabilizzante ed espansiva. L'utilizzo di un legante aereo garantisce una maggiore resistenza al degrado, aumentandone la durabilità.

La miscela di calce e canapa viene realizzata in stabilimento e inserita in sacchi di polipropilene (Big Bag) per il trasporto in cantiere dove, mediante un motocompressore, viene insufflata all'interno dei casseri dal basso verso l'alto.

Grazie a questo sistema di insufflaggio, vengono eliminate le giunture tra elementi, riducendo al minimo i ponti termici, problema importante per i materiali da costruzione basati su componenti organici, particolarmente suscettibili alla degradazione biologica. Riducendo le perdite di calore, diminuiscono le problematiche di condensa e le relative proliferazioni di muffa e umidità, rendendo il sistema di durata illimitata nel tempo.

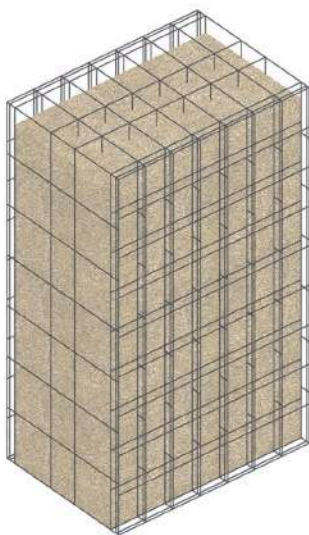
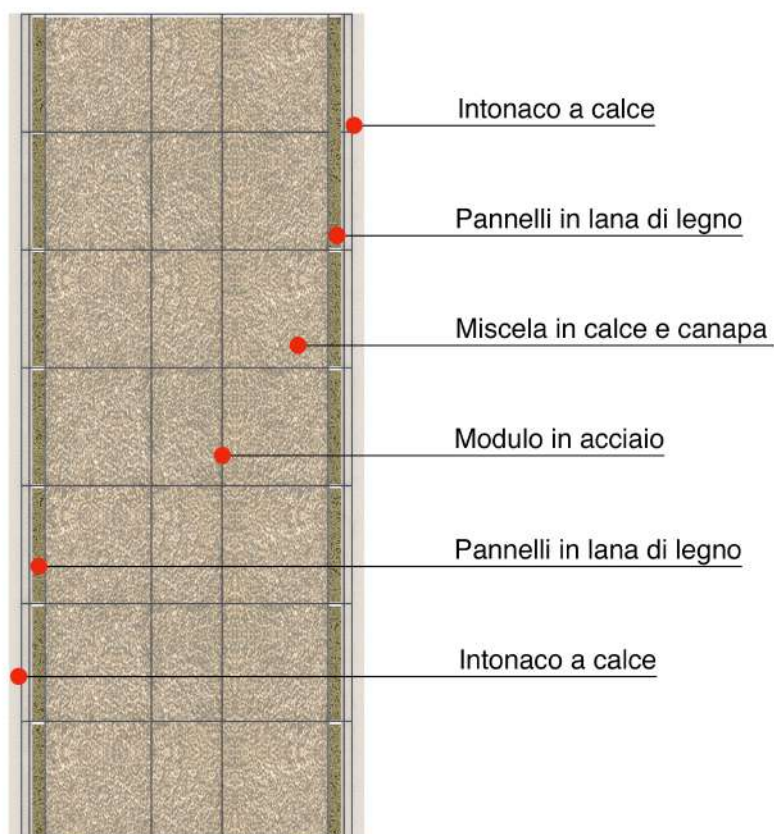


Fig. 3.4 Miscela all'interno dei casseri d'acciaio



Fig 3.5 Miscela di calce e canapa indurita

3.5 Stratigrafia del sistema



Le proprietà termiche dell'elemento opaco sono valutate in base alla UNI EN ISO 6946:2018 - *Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo*:

	Spessore (s) [m]	Conduttività (λ) [W/(mK)]	Resistenza termica (R) [(m ² K)/W]	Densità (ρ) [Kg/m ³]
Intonaco a calce	0,030	0,269	0,112	1045
Pannello in lana di legno	0,015	0,070	0,214	533
Miscela in calce e canapa	0,370	0,065	5,692	240
Pannello in lana di legno	0,015	0,070	0,214	533
Intonaco a calce	0,030	0,269	0,112	1045

3.6 Posa in opera del sistema *acciaio – calce e canapa*

La realizzazione del sistema acciaio – calce e canapa si svolge in quattro momenti principali: posa dei casseri di acciaio, inserimento dei pannelli di contenimento, getto della miscela e applicazione dell'intonaco.

La prima fase (Fig. 3.6) avviene seguendo un preciso schema di montaggio realizzato in fase di progettazione, che arriva in cantiere insieme ai moduli prefabbricati. La posa parte dagli angoli, una volta posata la prima coppia di moduli vengono uniti su entrambi i lati attraverso anelli in acciaio zincato. Le operazioni di posa dei moduli in acciaio sono agevolate dal peso contenuto dei moduli, che consentono di essere posati da due soli operatori: uno che comanda la gru che solleva il pannello, l'altro che lo posiziona a misura in opera.

La seconda fase (Fig. 3.7) prevede la realizzazione di un volume chiuso che funge da cassero a rimanere per la miscela di calce e canapa attraverso l'inserimento dei pannelli in lana di lana di legno mineralizzato, già parzialmente introdotti nella trama tridimensionale all'arrivo in cantiere.

La terza fase (Fig. 3.8) prevede il getto del biocomposito, realizzato in stabilimento e trasportato in cantiere attraverso sacchi in polipropilene. Con una macchina appositamente progettata dall'azienda viene trasferita la miscela in una tubatura flessibile, poi insufflata all'interno dei casseri a partire dal basso, procedimento che permette di ottenere una distribuzione uniforme del materiale senza la necessità di ulteriore compattazione manuale, sfruttando la pressione del fluido vettore: l'aria.

La fase finale (Fig. 3.9) prevede la realizzazione di un intonaco e uno strato di finitura a base di calce: la trama tridimensionale di acciaio dispone di una doppia maglia metallica esterna che funge da supporto per l'intonaco conferendogli rigidità, a formare un intonaco confinato come se fosse armato, al fine di realizzare una superficie in grado di sostenere carichi concentrati elevati.

Di seguito vengono riportate schematicamente le fasi della posa in opera del sistema appena descritte, su struttura portante a telaio in acciaio e cemento armato.

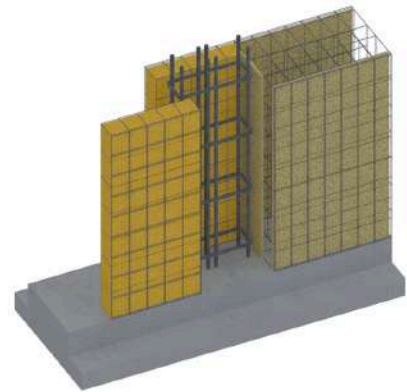
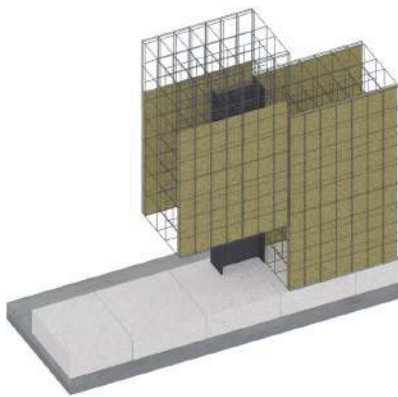


Fig. 3.6 Posa casseri acciaio

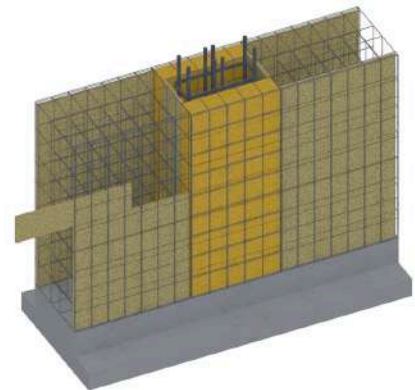
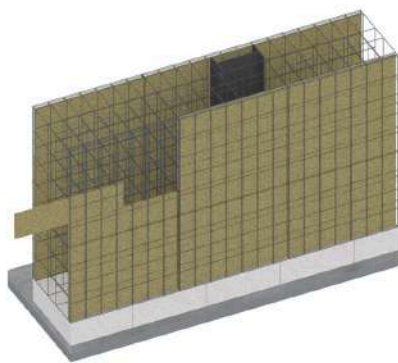


Fig. 3.7 Inserimento pannelli

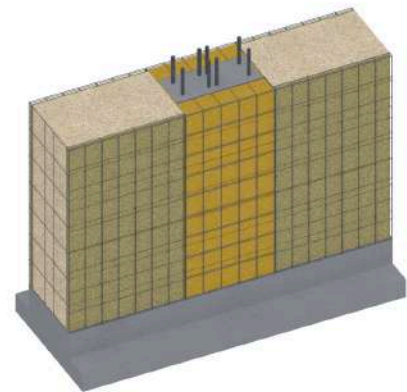
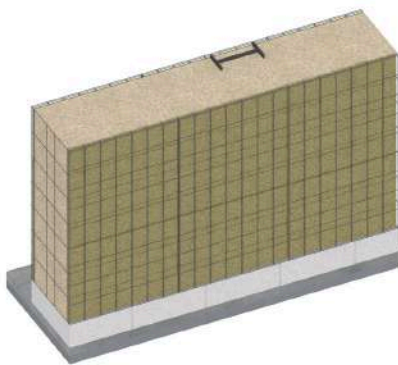


Fig. 3.8 Getto miscela calce e canapa

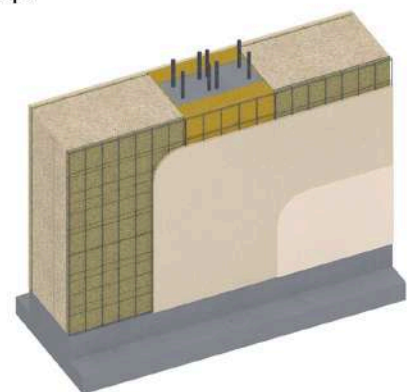
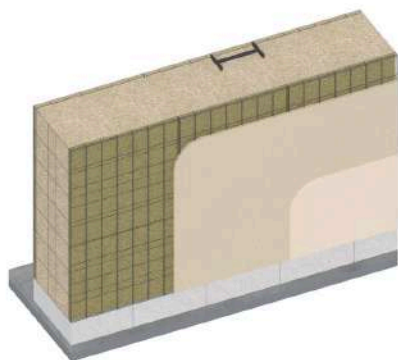


Fig. 3.9 Applicazione intonaco e finitura

3.7 Prove sul sistema

In fase di progettazione sono state effettuate sul sistema prove termodinamiche in rispetto alle norme vigenti, sia teoriche con l'ausilio di software di calcolo che in loco.

3.7.1 Verifica di trasmittanza

Viene effettuata la verifica di trasmittanza secondo il Decreto Legge 90/2013, che *“promuove il miglioramento della prestazione energetica degli edifici tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni relative al clima degli ambienti interni e all'efficacia sotto il profilo dei costi.”*

La trasmittanza U è il parametro principale utilizzato per calcolare le dispersioni termiche attraverso l'involucro di un edificio, rappresenta il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari ad 1°C .

Più basso è il valore di trasmittanza termica degli elementi che costituiscono l'involucro edilizio, minore sarà il flusso di calore che attraversa gli elementi stessi. [35]

Comune:	Mestrino (PD)	Zona climatica:	E
Tipologia:	Parete	Spessore:	46 cm
Trasmittanza U:	0,154 W/(m ² K)	Trasmittanza lim U_{lim}:	0,300 W/(m ² K)

La verifica di trasmittanza risulta soddisfatta.

I valori di trasmittanza risultano più performanti rispetto ad un involucro tradizionale dello stesso spessore (struttura in laterizio con isolamento in polistirene espanso), pari a 0,22/0,24 W/(m²K).

3.7.2 Verifica termoigrometrica

Il comportamento termoigrometrico dell'elemento opaco è stato valutato attraverso software di calcolo, secondo le procedure contenute nella UNI EN ISO 13788:2013 - *Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo.*

La verifica termoigrometrica consiste nel valutare la probabilità di formazione di condensa di un materiale o di un sistema costruttivo in particolari condizioni di esercizio. [36] La condensa si può presentare a livello superficiale, visibile ad occhio nudo, e interstiziale, all'interno degli elementi costruttivi (partizioni, tamponamenti, ecc) caratterizzati da temperatura differente sulle due superfici. E' importante verificare che non si presenti questo fenomeno perché presenta un rischio sia per la conservazione delle strutture, che per la salubrità degli ambienti, in quanto favorisce la formazione di muffe e la disgregazione di intonaci e murature.

Negli ultimi anni, la necessità di contenere le dispersioni termiche ha favorito l'adozione di serramenti e sistemi di isolamento dotati di un'ottima tenuta all'aria che, in assenza di ventilazione meccanica, ha comportato una sensibile riduzione della ventilazione naturale, con conseguente aumento di umidità, provocata dalla condensa all'interno degli ambienti. Secondo un rapporto pubblicato dall'Istituto di ricerca edile di Hannover (Institut für Bauforschung e.V. Hannover), che ha indagato le cause dei danni negli edifici esistenti, l'umidità rappresenta la fonte più frequente di degrado (48,3% dei casi), di cui la condensazione è uno dei maggiori responsabili. [37]

E' necessario quindi progettare gli strati di isolamento in modo tale da favorire il passaggio del vapore attraverso di esso, evitando allo stesso tempo che la temperatura diminuisca all'interno causando condensazione interstiziale.

Per comprendere se esiste il rischio di formazione di condensa interstiziale occorre determinare in maniera più accurata possibile l'andamento della temperatura e della pressione di vapore (indice della quantità di vapore presente nell'aria) all'interno dei vari strati che costituiscono l'elemento oggetto di studio e verificare che non si creino condizioni favorevoli alla formazione di condensa.

Per la verifica sono stati considerati i seguenti aspetti:

- Proprietà dei materiali;
- Località;
- Periodicità dei dati climatici;
- Temperatura esterna;
- Temperatura interna (costante a 20 °C);
- Umidità esterna;
- Umidità interna (costante al 65%).

Si determinano le pressioni parziali e le distribuzioni delle temperature interne ed esterne, dopodiché si calcola l'andamento delle pressioni parziali e di saturazione. Si confrontano graficamente gli andamenti e si verifica che per ogni punto del diagramma la pressione parziale sia inferiore di quella di saturazione.

	Temperatur a interna T_i °C	Umidità relativa interna ϕ_i %	Temperatur a esterna T_e °C	Umidità relativa esterna ϕ_e %
Gennaio	20,0	65,0	1,9	84,4
Febbraio	20,0	65,0	4,0	80,2
Marzo	20,0	65,0	8,4	73,4
Aprile	20,0	65,0	13,0	72,3
Maggio	20,0	65,0	17,1	71,2
Giugno	20,0	65,0	21,3	70,7
Luglio	20,0	65,0	23,6	66,3
Agosto	20,0	65,0	23,1	68,3
Settembre	20,0	65,0	19,7	74,9
Ottobre	20,0	65,0	13,8	79,4
Novembre	20,0	65,0	8,2	85,9
Dicembre	20,0	65,0	3,6	85,7

	Temperatura interna θ_i °C	Pressione parziale interna p_i Pa	Temperatura esterna θ_e °C	Pressione parziale esterna p_e Pa
Inverno	20,00	1.519,00	1,90	591,00
Estate	20,00	1.892,40	23,60	1.929,00

Dai risultati ottenuti si ottiene che la struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale. La differenza minima di pressione tra quella di saturazione e quella reale ΔP è pari a 776,372 Pa.

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa. La quantità stagionale di vapore condensato è pari a 0,000 kg/m² (rievaporabile durante il periodo estivo).

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale: La differenza minima di pressione tra quella di saturazione e quella reale ΔP è pari a 776,372 Pa.

	Pressione esterna P_e Pa	Variaz. di pressione ΔP Pa	Pressione interna P_i Pa	Pressione int. di satur. P_{si} Pa	Temp. sup. interna T_{si} °C
Ottobre	1252	251,1	1528,21	1910,26	16,78
Novembre	934	477,9	1459,69	1824,61	16,06
Dicembre	677	664,2	1407,62	1759,52	15,5
Gennaio	591	733,05	1397,36	1746,69	15,38
Febbraio	652	648	1364,8	1706	15,01
Marzo	809	469,8	1325,78	1657,23	14,56
Aprile	1083	283,5	1394,85	1743,56	15,35

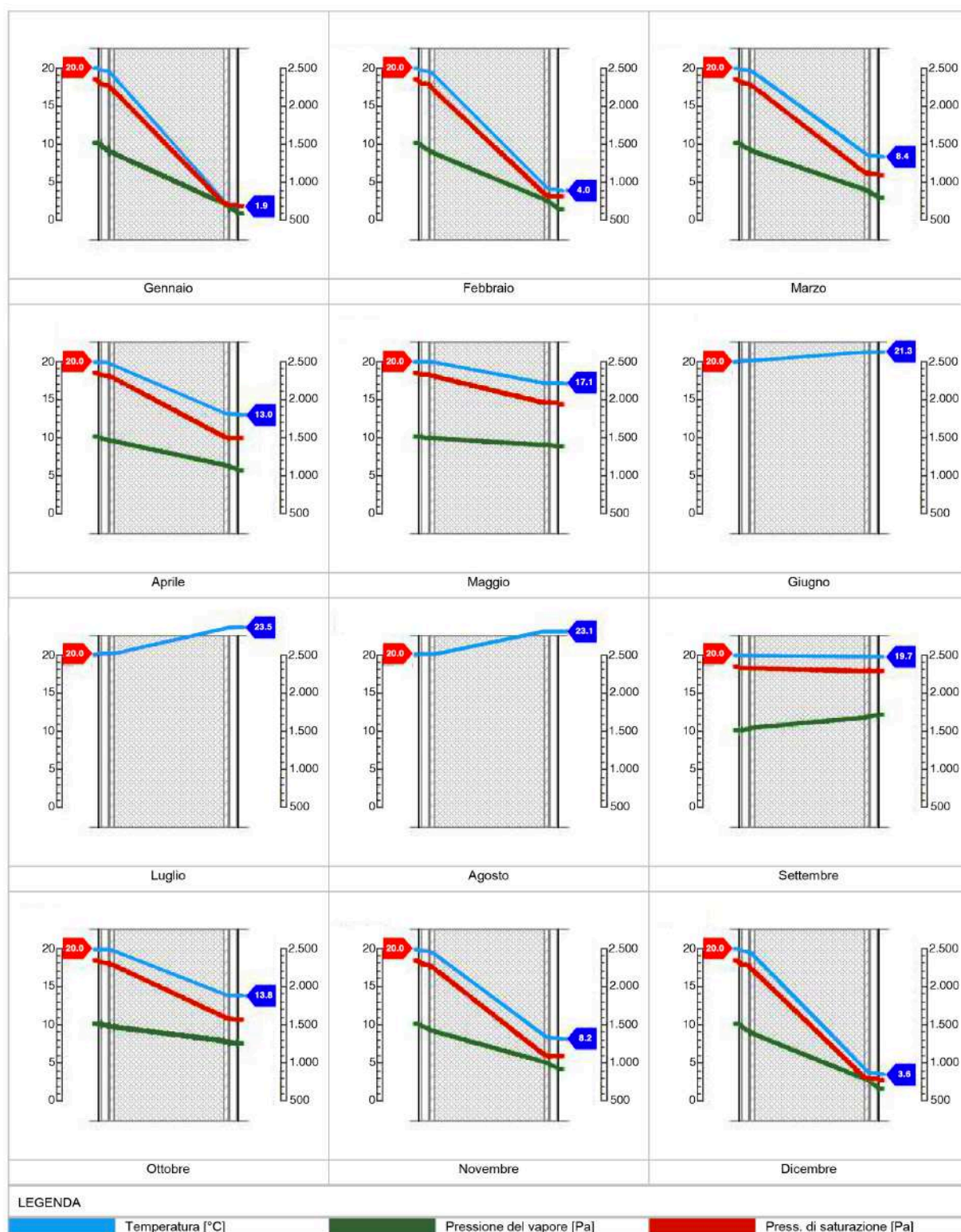


Fig. 3.6 Diagrammi di pressioni e temperatura per il sistema *acciaio – calce e canapa*

3.7.3 Verifica di massa e inerzia termica

L'inerzia termica è la proprietà fisica dei materiali che incide sulla velocità con cui questi cambiano la propria temperatura, in relazione a quella dell'ambiente esterno e o ad una fonte di calore interna. Si può tradurre come un effetto combinato della capacità di accumulo di calore di una struttura e della sua resistenza termica. Gli effetti più importanti dell'inerzia termica sono lo slittamento temporale del passaggio di calore dall'esterno all'interno di una superficie (sfasamento termico) e la riduzione dell'intensità dell'energia che attraversa la struttura (smorzamento termico).

La temperatura esterna durante le ore della giornata cambia, le oscillazioni termiche che ne conseguono e che interessano inevitabilmente anche il microclima interno di un edificio sono smorzate e ritardate nel loro passaggio da esterno a interno. Questo significa che, grazie all'inerzia termica, una parete è in grado di assorbire energia, accumularla e rilasciarla in un secondo momento nell'ambiente confinante, riducendo notevolmente le oscillazioni interne delle temperature. [38]

Ogni materiale può distinguersi per la propria capacità termica, per lo sfasamento e lo smorzamento che garantisce. Le caratteristiche del materiale che incidono su queste prestazioni sono il suo calore specifico, la sua massa e il valore di conducibilità termica, a cui l'inerzia termica è inversamente proporzionale.

Il comportamento termico dinamico dell'elemento opaco è valutato secondo le procedure di calcolo contenute nella UNI EN ISO 13786.

Comune	Mestrino	Colorazione :	Chiaro
Orientamento:	S	Mese max insolazione:	Luglio
Temperatura media mese:	23,6 °C	Temperatura massima estiva:	32,5 °C
Escursione giorno più caldo dell'anno:	13,0 °C	Irradiazione mensile max orizzontale:	251,16 W/m ²

Verifica di massa

Massa della struttura per metro quadrato di superficie:	180 kg/m ²
Valore minimo di massa superficiale:	230 kg/m ²

Esito verifica di massa effettuato.

Verifica di inerzia termica

Tempo di sfasamento dell'onda termica	22h 31'
Fattore di attenuazione	0,0402
Capacità termica interna	49,2 kJ/(m ² /K)
Capacità termica esterna	60,7 kJ/(m ² /K)

A seguito di valutazioni scandite per ogni ora del giorno, si determinano:

- Temperatura esterna nel giorno più caldo dell'anno
- Temperatura superficiale esterna nel giorno più caldo dell'anno
- Temperatura interna nel giorno più caldo dell'anno

	<i>Temperatura esterna nel giorno più caldo T_e °C</i>	<i>Irradiazione solare nel giorno più caldo dell'anno I_e W/m²</i>	<i>Temp. superficiale esterna nel giorno più caldo $T_{e,sup}$ °C</i>	<i>Temperatura interna nel giorno più caldo T_i °C</i>
1:00	21,84	0,00	21,84	26,78
2:00	21,19	0,00	21,19	26,75
3:00	20,54	0,00	20,54	26,73
4:00	20,02	0,00	20,02	26,71
5:00	19,63	0,00	19,63	26,71
6:00	19,50	9,87	19,62	26,74
7:00	19,76	48,87	20,35	26,79
8:00	20,41	85,72	21,44	26,87
9:00	21,58	172,47	23,65	27,01
10:00	23,27	315,05	27,05	27,15
11:00	25,22	431,92	30,40	27,27
12:00	27,43	507,35	33,52	27,37
13:00	29,51	533,35	35,91	27,42
14:00	31,07	507,35	37,16	27,42
15:00	32,11	431,92	37,29	27,38
16:00	32,50	315,05	36,28	27,30
17:00	32,11	172,47	34,18	27,21
18:00	31,20	63,90	31,97	27,14
19:00	29,77	49,43	30,36	27,06
20:00	28,08	9,87	28,20	26,98
21:00	26,39	0,00	26,39	26,93
22:00	24,96	0,00	24,96	26,87
23:00	23,66	0,00	23,66	26,83
00:00	22,62	0,00	22,62	26,80

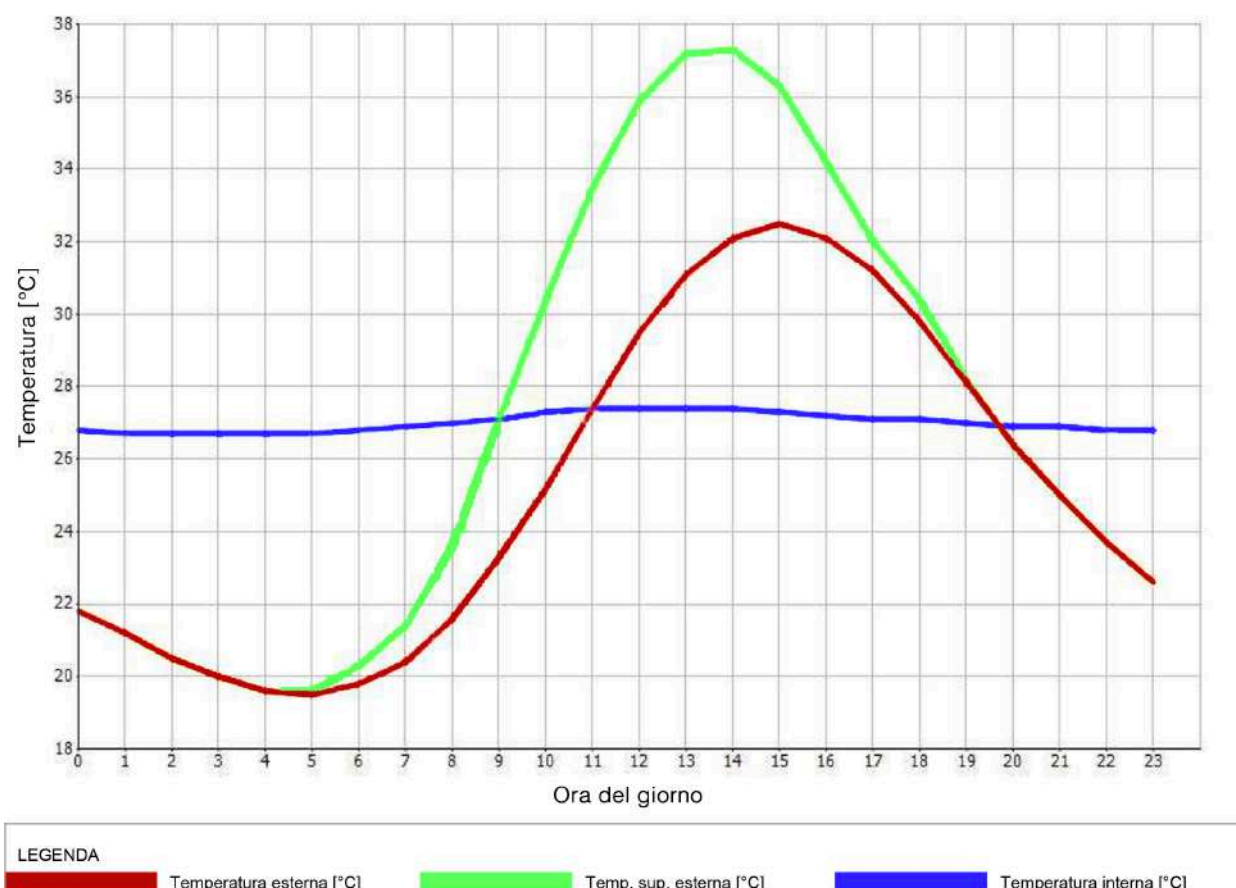


Grafico 3.1 Diagramma di sfasamento dell'onda termica

Dal grafico si evince che, data un'escursione termica di 13°C, la temperatura interna rimane pressochè costante. Questa è la prova di come il sistema abbia la capacità di smorzare quasi completamente (98,5%) una variazione sinusoidale di temperatura da 19,50 °C alle ore 6:00 a 32,50 °C alle ore 16:00 in un ciclo di 24 ore.

3.7.4 Prova a flessione

Per la verifica a flessione è stato realizzato un pannello di prova di dimensioni 300 x 118 x 42,5 cm confinato in entrambi i lati da un pannello in polistirolo di spessore 5 cm. (Fig 3.6). La prova è stata effettuata su una luce nel piano orizzontale pari a 3 m, il pannello è stato posizionato su tre cavalletti posizionati in bolla e uno centrale regolabile a vite.

La prova è stata effettuata registrando l'abbassamento con un calibro digitale in posizione centrale del pannello con diverse condizioni di carico: partendo dal peso proprio della struttura (100 kg/mq) arrivando fino a rottura. Le prove sono state effettuate con un intervallo di 10 minuti l'uno.

	Carico Applicato Kg	Abbassam. dopo 1 min	Abbassam. dopo 5 min	Abbassam. dopo 10 min
Prova 1	Peso proprio	2,90 mm	3,56 mm	3,61 mm
Prova 2	Peso proprio	3,81 mm	3,90 mm	3,90 mm
Prova 3	25	4,58 mm	4,73 mm	4,84 mm
Prova 4	peso proprio	4,62 mm	4,64 mm	4,82 mm
Prova 5	100	7,38 mm	7,89 mm	8,00 mm
Prova 6	peso proprio	6,71 mm	6,83 mm	7,31 mm
Prova 7	200	12,30 mm	13,15 mm	13,57 mm

Dopo due minuti circa dall'applicazione dell'ultimo carico il pannello ha ceduto in corrispondenza della giunzione dei pannelli di polistirolo di contenimento.

La parete ha dimostrato di lavorare in campo elastico. Il pannello è giunto a rottura con un incremento del peso in mezzera di 200 kg, dopo circa due minuti dall'applicazione. Il cedimento è avvenuto con rumore percepibile in corrispondenza della giunzione dei pannelli di polistirolo di contenimento.



Fig. 3.10 Pannello di prova su cavalletti



Fig 3.11 Quinta prova di carico (100 kg)



Fig. 3.12 Calibro digitale



Fig 3.13 Cedimento pannello con 200 kg di carico

In condizioni esecutive il pannello prevede una doppia maglia metallica, che viene immersa nell'intonaco realizzando un intonaco confinato. Il peso specifico del tamponamento è di circa 250kg/m^3 , valore esiguo rispetto ai tamponamenti tradizionali, questo valore consente il contenimento della massa eccitabile sismicamente. Presso il *Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale* di Padova sono in corso valutazioni sull'assorbimento delle azioni orizzontali provenienti da sisma.

3.8 Fine vita del sistema

Essendo il sistema acciaio – calce e canapa in via sperimentale, non esistono dati specifici sul fine vita della soluzione costruttiva in oggetto. Di seguito vengono analizzati i singoli materiali che costituiscono il sistema, al fine di mostrare un possibile scenario di fine vita in linea con i principi di ecologia e sostenibilità ambientale.

I materiali metallici hanno la caratteristica di poter essere riciclati all'infinito senza perdere nessuna delle sue proprietà originarie, risultando indistinguibili dal materiale “nuovo”. Terminata la vita utile dell'opera in cui è inserito, l'acciaio può essere ricondotto in fonderia per assumere qualsiasi altra funzione, grazie alla facilità di separazione e disassemblaggio data dalle proprietà magnetiche [39]. infinito acciaio]L'acciaio utilizzato per realizzare i moduli tridimensionali sono certificati dall'Istituto Italiano di Garanzia delle Qualità (IGQ) secondo la norma UNI EN ISO 14021 per il contenuto minimo di materiale riciclato post-consumatore, che è risultato del 98,6%.

I pannelli in lana di legno sono completamente riciclabili, compostabili e riutilizzabili. Vengono prodotti attraverso la lavorazione di legname di scarto approvvigionato da industrie e fabbriche e il loro smaltimento avviene per combustione, bitumazione o riciclati per la realizzazione di nuovi pannelli. [40]

La miscela di calce e canapa può essere riutilizzata a fine vita sgretolandola, mescolandola con acqua e legante di calce e gettandola nuovamente. Il materiale ha anche un potenziale di riciclaggio in altre applicazioni come il compostaggio, il rinterro o la frantumazione e lo spargimento su aiuole o campi per aumentare il pH del terreno e

introdurre una pacciamatura. Essendo prodotto principalmente da una biomassa, lo stelo della canapa, e da calce carbonata, la miscela di calce e canapa ha un impatto ambientale minimo anche se mandata in discarica. E' possibile inoltre disperderla o frantumarla nei terreni o campi agricoli, poiché la canapa si biodegrada e la calce si mescola con il terreno, senza alcun impatto negativo per l'ambiente. [18]

Si evince pertanto che, essendo i tre materiali riciclabili e facilmente separabili, è possibile riciclare completamente il sistema *acciaio – calce e canapa* a fine vita.

4. Caso studio: residenza unifamiliare realizzata con il sistema *acciaio – calce e canapa*

4.1 Scelta progettuale

Il sistema *acciaio – calce e canapa* è stato applicato per la prima volta in un progetto di edilizia residenziale a Mestrino, in provincia di Padova. L'edificio ha una pianta regolare di superficie pari a 250 mq, che si sviluppa in un unico piano fuori terra; la struttura portante è in acciaio, con profilati giuntati in opera mediante bullonature.

La scelta di utilizzare questo sistema è nata dall'intento di realizzare un fabbricato in tempi veloci, con elevate prestazioni di isolamento termico e impiantistica poco impattante. Per raggiungere questo obiettivo, il progettista ha individuato in fase di progettazione la necessità di realizzare una parete con elevata permeabilità al vapore e igroscopicità, unita ad una modalità di posa rapida, senza l'ausilio di maestranze appositamente specializzate. Il sistema costruttivo *acciaio – calce e canapa* risponde perfettamente a questi requisiti: la miscela di calce e canapa garantisce ottime qualità di isolamento termico, il cassero in acciaio assicura una posa rapida e veloce grazie alla prefabbricazione.

Viene così realizzato in pochi mesi un edificio in cui il tamponamento racchiude il materiale isolante in calce e canapa tramite una matrice prefabbricata tridimensionale di fili di acciaio, che, a sua volta, avvolge l'ossatura metallica della struttura. La struttura portante in acciaio, tecnologia stratificata a secco, risulta essere uno dei sistemi da costruzione più ecosostenibile, in quanto minimizza l'uso dei materiali, che sono quasi totalmente riciclabili.

Il progetto di un fabbricato in acciaio con pareti in *acciaio - calce e canapa* nasce come soluzione alla necessità di creare un unico organismo completamente riciclabile a fine vita, rispettando così i principi di sostenibilità ambientale.

Si riportano nelle Fig. 4.1 e Fig. 4.2 le viste aeree del luogo in cui è stato realizzato l'intervento, si evidenzia con il tratteggio in rosso l'area di ingombro del fabbricato.



Fig. 4.1 Area di intervento vista sud



Fig. 4.2 Area di intervento vista nord

4.2 Fasi di cantiere

4.2.1 Fondazione e armature di chiamata

Il sistema portante è realizzato con una struttura a telaio in acciaio su fondazione a travi rovesce in cemento armato, che deve prevedere l'ancoraggio di fondazione mediante tirafondi posati in tubi di ancoraggio successivamente riempiti con malta cementizia premiscelata. Fondamentale pertanto è l'individuazione degli assi colonna per posizionare la struttura metallica che è interamente bullonata in opera. Al fine di realizzare un piano di posa perfettamente piano e date le elevate capacità igroscopiche della canapa, al fine di separare la parete dalla fondazione è stato posato un corso di mattoni in cemento cellulare idrofobizzato anti risalita capillare. La fondazione realizzata con sagoma a "L" consentiva infine di mantenere il piede della muratura separata dal terreno, caratterizzato da una quota di falda piuttosto vicina al piano campagna. Il vespaio è stato riempito con sasso spaccato di Albettone (VI) e infine ricoperto con uno spessore di 35 cm di ghiaia di vetro cellulare.



Fig. 4.3. Platea di fondazione



Fig. 4.4. Armature di chiamata



Fig. 4.5. Blocchi idrofobizzati



Fig. 4.6. Telaio in acciaio

4.2.2 Posa moduli in acciaio

I casseri prefabbricati vengono trasportati in cantiere tramite vettori su gomma dal centro di produzione al cantiere del committente a Mestrino (PD).

Ciascun pacco di moduli è scaricato sopra il livello della platea di fondazione e posizionato in funzione dello schema di montaggio, per facilitare la posa. Per il montaggio è necessario che il carpentiere si affidi alle tavole di produzione esecutive, che vengono redatte quando il committente consegna il progetto architettonico e strutturale dell'edificio da realizzare. Le tavole, che arrivano in cantiere insieme ai moduli prefabbricati, permettono di seguire un sistema di montaggio prestabilito e preciso, di risparmiare tempo e di eliminare ogni possibilità di errore. Al loro interno, vengono anche definiti gli elementi di apertura per porte, finestre, impianti, altezza delle soglie, spessore dei massetti e numeri di riferimento di ciascun modulo. I serramenti possono essere fissati a dei controtelai realizzati con murali in legno infissi prima del riempimento in calce e canapa nei moduli di contenimento. E' possibile altresì prevedere sistemi a imbotte con termocasse vincolati al telaio realizzato appositamente per le aperture, ai fini di garantire l'isolamento termico e acustico, anche se non necessario in quanto il muro è isolato per tutto lo spessore. La leggerezza dei moduli ne consente una rapida e semplice collocazione in opera, anche da un unico operatore.

La partenza del montaggio dei moduli avviene da un angolo, una volta posata la prima coppia di moduli, è necessario provvedere subito alla loro unione utilizzando una pinzatrice manuale e appositi anelli in acciaio zincato. I moduli vengono uniti su entrambi i lati del muro, tramite l'applicazione di un anello ogni 15 cm circa.

La struttura portante risulta avvolta dal pannello e immersa nella miscela di calce e canapa. Al piede il pannello è fornito di un elemento in polistirene espanso estruso (XPS), che funge da ulteriore barriera per la risalita capillare dell'umidità.

Il sistema di allineamento è studiato per consentire una facile e rapida posa in opera dei moduli e permette di compiere tutte le operazioni necessarie al raggiungimento della perfetta verticalità e misurazione della piombatura.

La preparazione degli elementi in stabilimento permette un'importante economia di tempo, di uomini e di materiale. Risparmio quantificabile da un 20% ad un 30% rispetto ai tradizionali sistemi costruttivi a parità di qualità realizzativa per la realizzazione dell'involucro edilizio al grezzo.



Fig. 4.7 Modulo prefabbricato

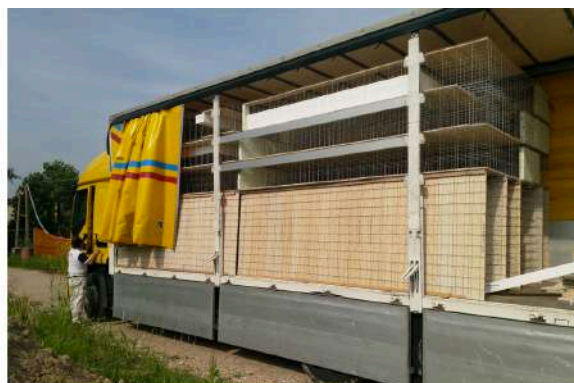


Fig. 4.8 Trasporto moduli su gomma

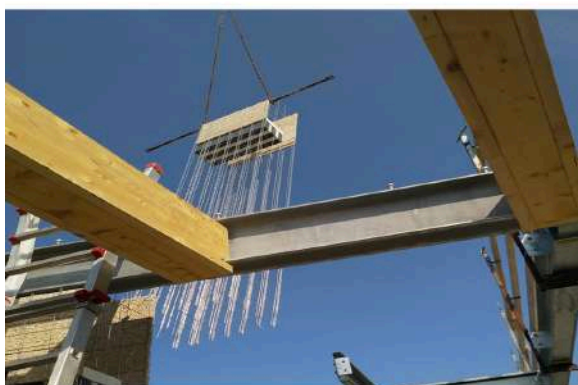


Fig. 4.9 Posa moduli con sollevatore



Fig. 4.10 Blocchi idrofobizzati

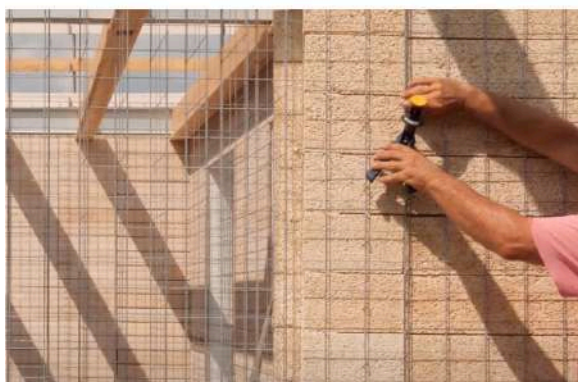


Fig. 4.11 Pinzatrice manuale per giunzioni



Fig. 4.12 Controtelaio per aperture



Fig. 4.13 Posa dei moduli con aperture



Fig. 4.14 Posa dei moduli con aperture

4.2.3 Inserimento pannelli in lana di legno mineralizzata

I moduli prefabbricati arrivano in cantiere già predisposti con i pannelli in lana di legno mineralizzata di contenimento. Grazie all'estrema leggerezza e alle piccole dimensioni (1,5 x 12 x 60 cm), i pannelli vengono inseriti a mano da un singolo operatore solo laddove sono presenti le colonne in acciaio. Lo spessore è ridotto al fine di ridurre al minimo la funzione di cassero e massimizzare lo spessore della miscela di calce e canapa, mantenendo la traspirabilità della parete.



Fig. 4.15 Inserimento pannelli



Fig. 4.16 Dettaglio pannelli

4.2.4 Getto miscela calce e canapa

La miscela di calce e canapa viene realizzata in stabilimento e inserita in sacchi di polipropilene per il trasporto in cantiere dove, mediante una macchina specificatamente progettata, viene insufflata all'interno dei casseri a partire dal basso. Il macchinario utilizzato è stato pensato appositamente per la proiezione del biocomposito, si tratta di una macchina a rotore, capace di trasportare e proiettare il composto inserendo la bocca del tubo di trasporto all'interno dei casseri, in prossimità della quota dove si intende versare il materiale. Il sacco con la miscela di consistenza umida viene appeso al gancio della gru edile e la miscela viene versata nella tramoggia sopra alla macchina. La quantità d'aria è sufficiente a fornire il grado di compattazione necessario della miscela, consentendo di ottenere una distribuzione uniforme del materiale, annullando completamente ogni possibile ponte termico, situazione che con un pestello manuale non potrebbe verificarsi.

Secondo le condizioni climatiche, il getto asciuga in 30/60 giorni, indurendosi progressivamente.



Fig. 4.18 Trasporto BigBag



Fig. 4.19 BigBag con miscela Calcecanapa



Fig. 4.20 Riempimento motocompressore



Fig. 4.21 Miscela Calcecanapa



Fig. 4.22 Riempimento casseri



Fig. 4.23 Riempimento casseri



Fig. 4.24 Riempimento casseri



Fig. 4.25 Indurimento miscela

4.2.5 Tracce e forature impiantistiche

Gli impianti idrici ed elettrici vanno ancorati alle strutture primarie e secondarie e poi inglobati dal getto. I tubi sono distanziati tra loro di almeno 2 cm per evitare di interrompere la continuità del getto. In superficie, gli impianti sono coperti da almeno 3 cm di impasto per evitare cavillature e distacchi. Le scatole elettriche sono posizionate considerando lo spessore complessivo del getto.



Fig. 4.26 Impianti basamento



Fig. 4.27 Tracce impiantistiche

4.2.6 Intonaco e finitura

Nelle superfici esterne ed interne è previsto uno strato intonaco e finitura a base di calce. Possono essere utilizzati altri tipi di finiture a base di calce idraulica, grassello di calce o argilla, mentre non sono consigliabili intonaci e finiture di tipo cementizio perché limiterebbero la permeabilità al vapore del sistema. La struttura del pannello prefabbricato è realizzata con una doppia maglia metallica in acciaio zincato di dimensioni 100 x 75 mm, che funge da supporto per l'intonaco, al fine di ottenere un intonaco confinato, come se fosse “armato”, in grado di sostenere agevolmente carichi concentrati appesi alla parete. La presenza di questa superficie armata da ambo le superfici, conferisce ancora più rigidità alla parete.

Ad intonaco asciutto, il pannello è stato verificato in opera ai carichi concentrati con tasselli da cartongesso, applicando un carico pari a 75 kg e verificandone la resistenza. La parete ha dimostrato di sopportare il carico, pertanto risulta predisposta per appendere mensole e pensili.



Fig. 4.28 Applicazione intonaco termico in interno



Fig. 4.29 Applicazione intonaco termico in esterno

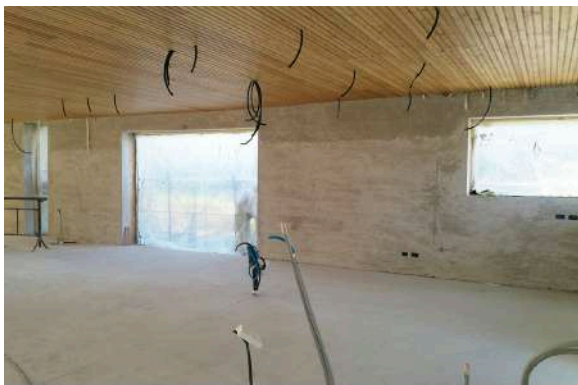


Fig. 4.30 Applicazione finitura in interno



Fig. 4.31 Applicazione finitura in esterno



Fig. 4.32 Dettaglio intonaco termico



Fig. 4.33 Prova a carichi concentrati - 75 kg

4.3 Stato attuale

Il primo edificio con i tamponamenti con il sistema *acciaio – calce e canapa* è stato completato a giugno dell'anno corrente ed è attualmente abitato dal proprietario progettista. Le fasi di cantiere sono durate circa sei mesi con la manodopera di soli tre operatori. Le misurazioni eseguite nei primi mesi di vita del fabbricato hanno dato conferma dei dati teorici in relazione alle dispersioni termiche.



Fig. 4.34 Prospetto nord



Fig. 4.35 Prospetto sud



Fig. 4.36 Prospetto est

5. Analisi del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment - LCA)

5.1 Origini e sviluppo della metodologia LCA

Per dimostrare che un prodotto è sostenibile bisogna munirsi di strumenti di valutazione oggettivi supportati da basi scientifiche condivise. Nel settore della sostenibilità ambientale, un valido strumento di valutazione è l'*Analisi del Ciclo di Vita* ("Life Cycle Assessment" - LCA).

Negli anni '60 del secolo scorso inizia a farsi strada un approccio all'ambiente che abbraccia l'intero ciclo di vita, il cosiddetto "*Environmental Life Cycle Thinking*"⁽¹⁷⁾. Le analisi del ciclo di vita sono studi scientifici che valutano l'impatto ambientale di prodotti, processi o attività dalla produzione delle materie prime al loro smaltimento, al fine di identificare le opportunità di miglioramento e intervenire sulle criticità ambientali.

Negli USA degli anni '70, l'Agenzia per l'ambiente EPA (Environmental Protection Agency) promuove le indagini REPA (Resource and Environmental Profile Analysis) finalizzate per la prima volta a studiare e confrontare il ciclo di vita dei principali materiali utilizzati in grandi produzioni industriali (ad es. Coca Cola, Mobil Chemical Company, ecc) con lo scopo di poter confrontare diverse soluzioni per medesime applicazioni ed individuare quella a minor impatto ambientale. Nel frattempo si pone sempre più attenzione alle tematiche della limitatezza del pianeta, dello sfruttamento delle risorse e i sempre più evidenti impatti ambientali. Grazie questi fattori e al rilevante testo "*Manuale di analisi energetica industriale*" (Bouestead I., Hancock G., 1979), vengono messe le basi dell'attuale metodologia LCA, che da allora divenne strumento di supporto per l'analisi ed il miglioramento delle attività produttive. [42]

Nel 1990 viene ideato dal congresso SETAC⁽¹⁸⁾ il termine *Life Cycle Assessment*,

(17) *Life Cycle Thinking* è l'approccio con cui analizzare la sostenibilità ambientale, economica e sociale di prodotti, servizi, tecnologie e sistemi, considerando tutte le fasi del ciclo di vita (estrazione delle materie prime, produzione, uso, distribuzione e fine vita). Life Cycle Assessment, Life Cycle Costing e Social-LCA sono gli strumenti principali per l'applicazione dell'approccio LCT. [41]

(18) *Society of Environmental Toxicology and Chemistry – SETAC* è un'organizzazione professionale globale no-profit che dal 1979 si dedica all'analisi e risoluzione dei problemi ambientali e alla regolazione delle risorse naturali, alla ricerca e allo sviluppo e all'educazione ambientale.

per definire, caratterizzare ed unificare gli obiettivi delle analisi sul ciclo di vita, definendolo come segue:

“Un’analisi LCA è un procedimento oggettivo che permette di valutare gli impatti ambientali associati ad un prodotto, un processo o un’attività, effettuato attraverso l’identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, energia ed emissioni nell’ambiente, e l’identificazione e la valutazione delle opportunità per diminuire questi impatti. L’analisi riguarda l’intero ciclo di vita del prodotto (“dalla culla alla tomba”): dall’estrazione e trattamento delle materie prime, alla produzione, trasporto e distribuzione del prodotto, al suo uso, riuso e manutenzione, fino al riciclo e allo smaltimento finale.” (SETAC, 1993)

L’analisi LCA non è solo un mezzo per la salvaguardia dell’ambiente, ma può diventare un importante strumento per il rafforzamento delle dinamiche competitive e di riduzione dei costi, comparando materiali diversi per uno stesso uso e identificando i processi che contribuiscono in misura maggiore all’impatto ambientale. [43]

5.2 Normativa di riferimento

Le norme ISO serie 14000 riportano le attuali buone pratiche rivolte alla protezione dell’ambiente, applicabili a qualsiasi organizzazione e in qualsiasi parte del globo. Una caratteristica chiave di tutti i requisiti ISO 14000 è la loro natura volontaria: non hanno nessuna costrizione legislativa al loro utilizzo. Pertanto, la decisione da parte delle aziende di applicare i requisiti ISO 14000 è di tipo strategico: può provenire dal bisogno di un maggiore controllo rispetto ai regolamenti ambientali, dalla ricerca di efficienza nei processi, dalle richieste dei clienti, dalle pressioni della comunità, o semplicemente, dal desiderio di un comportamento responsabile. Le prime norme ISO sulla metodologia LCA sono state pubblicate nel 1997, aggiornate successivamente con la norma ISO 14040:2006 sulla *“Gestione Ambientale – Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento”* e la norma ISO 14044:2018, sulla *“Gestione Ambientale – Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida”*. La prima sintetizza a livello teorico cosa deve comporre

una corretta valutazione LCA, mentre la seconda guida l'operatore nella sua esecuzione. [44]

Secondo la norma ISO 14040:2006, la metodologia LCA può essere utilizzata per:

- migliorare le prestazioni ambientali dei prodotti in varie fasi del loro ciclo di vita;
- informare i responsabili delle decisioni nei processi di produzione, nelle organizzazioni governative o non governative (ad esempio, a tale scopo di pianificazione strategica, definizione delle priorità, progettazione o riprogettazione di prodotti o processi),
- selezionare gli indicatori rilevanti delle prestazioni ambientali, comprese le tecniche di misurazione,
- attuare un sistema di etichettatura ecologica, la presentazione di una dichiarazione ambientale, o la produzione di una dichiarazione ambientale di prodotto.

La diffusione di questa metodologia è stata favorita dalla richiesta di Dichiarazioni Ambientali di Prodotto EPD, certificazione creata su base volontaria conforme alla norma ISO 14025 e alla EN 15804, che deve essere predisposta facendo riferimento all'analisi del ciclo di vita del prodotto basata su uno studio LCA, che definisce il consumo di risorse e gli impatti sull'ambiente circostante. [45]

5.3 Struttura di un'analisi LCA

L'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) si basa sullo studio della cosiddetta "unità funzionale" e si divide in quattro fasi consequenziali: definizione degli obiettivi e del campo di applicazione, analisi dell'inventario, valutazione degli impatti e interpretazione dei risultati. Una valutazione può variare sensibilmente a seconda di quali obiettivi e scopi si pone, viene eseguita in maniera schematica e iterativa; è importante ricordare che restituisce valori di impatto potenziale e non assoluto su quanto succede in un sistema, dipendendo fortemente dal grado di dettaglio e dagli intervalli di tempo considerati. I risultati devono quindi essere interpretati in

maniera attenta, ricordando che non esiste un metodo unico per condurre un'interpretazione delle valutazioni su uno stesso sistema, con la possibilità risultati diversi. [42]

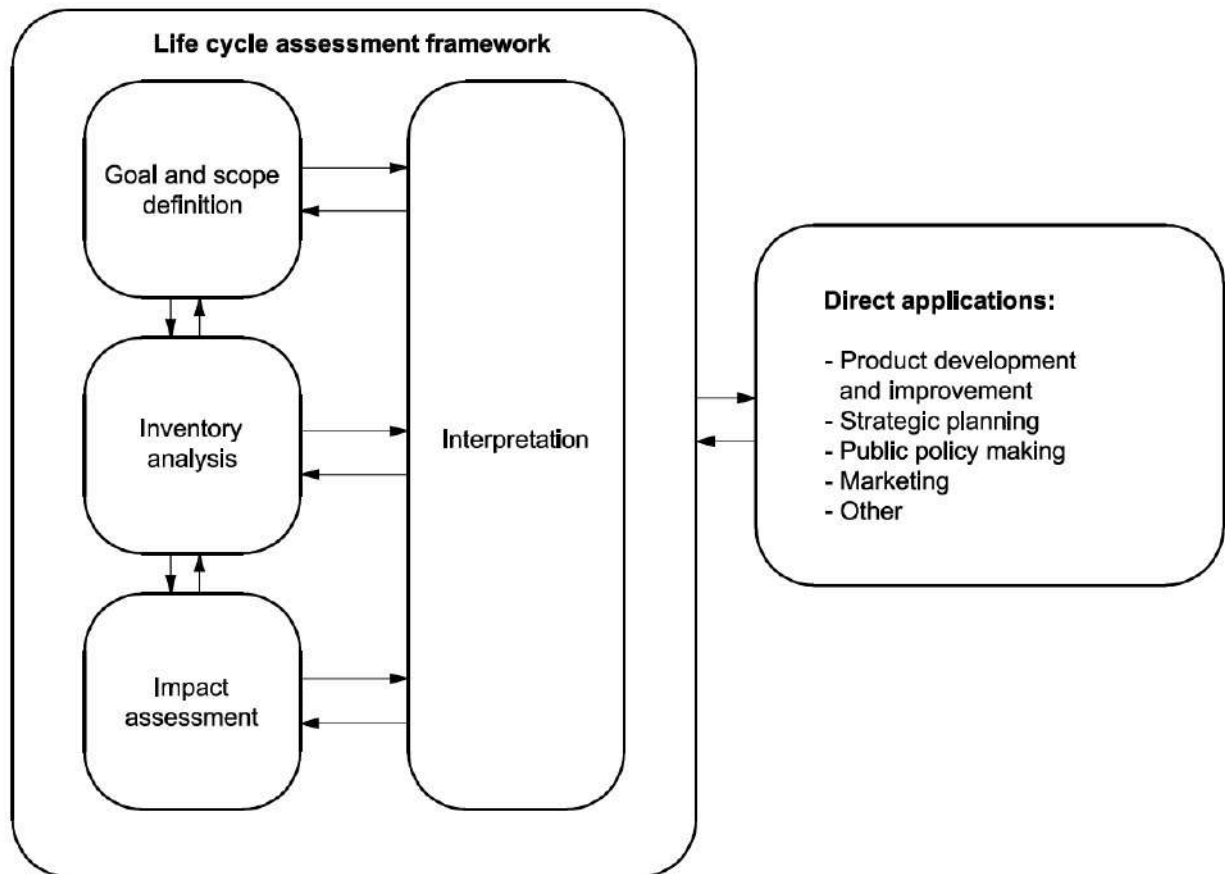


Fig 5.1 Fasi di una LCA - Norma EN ISO 14040:2006

5.3.1 Prima fase: Definizione obiettivi e campo di applicazione

La definizione degli obiettivi di uno studio LCA deve stabilire con chiarezza l'applicazione prevista, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio e tipo di pubblico a cui è destinato.

Nel definire il campo di applicazione di una LCA, devono essere descritti:

- Finalità dello studio;
- Unità funzionale;

- Confini del sistema;
- Requisiti di qualità dei dati.

L'unità funzionale è l'indice di riferimento dello studio, definisce la quantificazione delle funzioni identificate. Deve essere chiaramente definita e misurabile. E' un dato necessario per impostare il confronto con le possibili alternative di prodotto o servizio.

I confini del sistema definiscono le unità di processo da includere nel sistema di cui si costruisce il modello. Il sistema di prodotto dovrebbe essere schematizzato in modo tale che i flussi in ingresso e in uscita siano dei processi elementari. In base alle scelte effettuate è possibile definire diverse tipologie di confine:

- *From cradle to grave* (dalla culla alla tomba): vengono analizzati tutti i processi del ciclo produttivo dall'estrazione delle materie prime fino al loro smaltimento;
 - *From cradle to gate* (dalla culla al cancello): vengono analizzati i processi del ciclo produttivo dall'estrazione delle materie prime fino al termine della sua produzione, senza considerare le successive fasi di distribuzione, uso e smaltimento;
 - *From cradle to cradle* (dalla culla alla culla): vengono analizzati i processi dall'estrazione delle materie prime alla rivalorizzazione del prodotto a fine vita, mediante il recupero di materia e di energia;
- From gate to gate* (dal cancello al cancello): vengono analizzati solo i processi produttivi del prodotto, escludendo tutte le fasi legate all'estrazione, alla distribuzione, all'uso e al fine vita. [46]

5.3.2 Seconda fase: Analisi dell'inventario (LCI)

L'analisi di inventario (Life Cycle Impact – LCI) comprende la raccolta dei dati e i procedimenti di calcolo che consentono di quantificare i flussi in entrata e in uscita di un sistema prodotto. I dati qualitativi e quantitativi devono essere raccolti per ogni unità di processo compreso nei confini del sistema. I flussi sono espressi in unità fisiche (unità di massa e di energia) e comprendono l'utilizzo di risorse e di energia e tutti i rilasci in aria, in acqua e nel suolo associati al sistema.

E' necessario descrivere dettagliatamente la qualità dei dati per poter successivamente operare confronti fra studi su sistemi analoghi.

In particolare le informazioni possono essere divise in tre categorie:

- *dati primari*, raccolti direttamente nell'impianto o azienda dove il prodotto analizzato viene realizzato;
- *dati secondari*, ricavati da database LCA o dalla letteratura;
- *dati terziari*, provenienti da stime e valori medi.

I dati primari devono identificare gli input (materie prime, consumi, trasporti, ecc.) e gli output (prodotto, co-prodotti, rifiuti e emissioni) del sistema specifico; i dati secondari invece possono essere generici, qualora non si avessero informazioni specifiche sull'oggetto di studio.

Per agevolare lo studio LCA è opportuno suddividere il processo in una serie di sottosistemi, in cui vengano correttamente assegnati gli input e gli output, successivamente si passa all'aggregazione di questi, tenendo presente che le categorie di dati dovrebbero essere aggregate solo se si riferiscono a sostanze equivalenti e ad impatti ambientali simili. [42]

Gestione del “fine vita” nell'analisi di inventario

Nell'analisi di inventario è importante porre attenzione alla gestione del fine vita quando si valutano i confini del sistema *from cradle to grave* e *from cradle to cradle*, che comprendono le ricadute ambientali della gestione dei materiali che giungono a fine vita e che devono essere trattati come rifiuti, uno dei problemi centrali dei sistemi produttivi. Quando un bene è giunto al termine della sua vita utile, dopo la raccolta, si presentano tre strade possibili:

- Recupero di materia: riciclo e riuso;
- Recupero di energia;
- Smaltimento in discarica.

Il recupero di materiale è possibile attraverso due processi: il riciclo e il riuso. Il primo permette di riutilizzare il materiale giunto a fine vita per realizzare, dopo opportuno

trattamento, il medesimo o un altro prodotto. Il riuso, invece, prevede di riutilizzare lo stesso prodotto dopo un eventuale processo di ricondizionamento.

Il recupero energetico è possibile tramite processi di termovalorizzazione (incenerimento), che permettono la produzione di energia elettrica o termica, recuperando l'energia presente nei materiali di scarto; inoltre c'è la possibilità di produrre combustibili da rifiuti selezionati, per avviarli al mercato dei combustibili alternativi. Tutti i rifiuti che non hanno trovato collocazione nei processi appena descritti, vengono indirizzati in una discarica controllata, che può avere differenti caratteristiche a seconda della pericolosità dei rifiuti che è destinata a ricevere. [46]

5.3.3 Terza fase: Valutazione degli impatti (LCIA)

Le informazioni che si ottengono dall'analisi di inventario costituiscono la base di partenza per la fase di valutazione degli impatti ambientali (Life Cycle Impact Assessment - LCIA), che si intendono come l'alterazione dell'ambiente dato da un sistema di relazioni tra fattori antropici, naturalistici, chimico-fisici, climatici, paesaggistici, architettonici, ecc. Ai fini della definizione di "impatto ambientale", tale alterazione viene considerata tale a prescindere che sia qualitativa o quantitativa, diretta o indiretta, permanente o temporanea, positiva (associata ad un miglioramento dell'ambiente) o negativa (associata ad un peggioramento dell'ambiente). Esempi di impatti ambientali positivi sono quelli associati alle opere di risanamento ambientale, quelli negativi si possono manifestare in diverse forme di inquinamento (chimico, biologico, acustico, ecc.).

La valutazione degli impatti consiste nell'imputare i consumi e le emissioni a specifiche categorie di impatto riferibili ad effetti ambientali conosciuti e nel quantificare l'entità del contributo che il processo arreca agli effetti considerati. [46]

In accordo con la norma EN ISO 14044:2018 sulla "*Gestione Ambientale – Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida*" [47], la valutazione degli impatti si compone di due fasi obbligatorie, classificazione e caratterizzazione, e tre facoltative, normalizzazione, raggruppamento e pesatura.

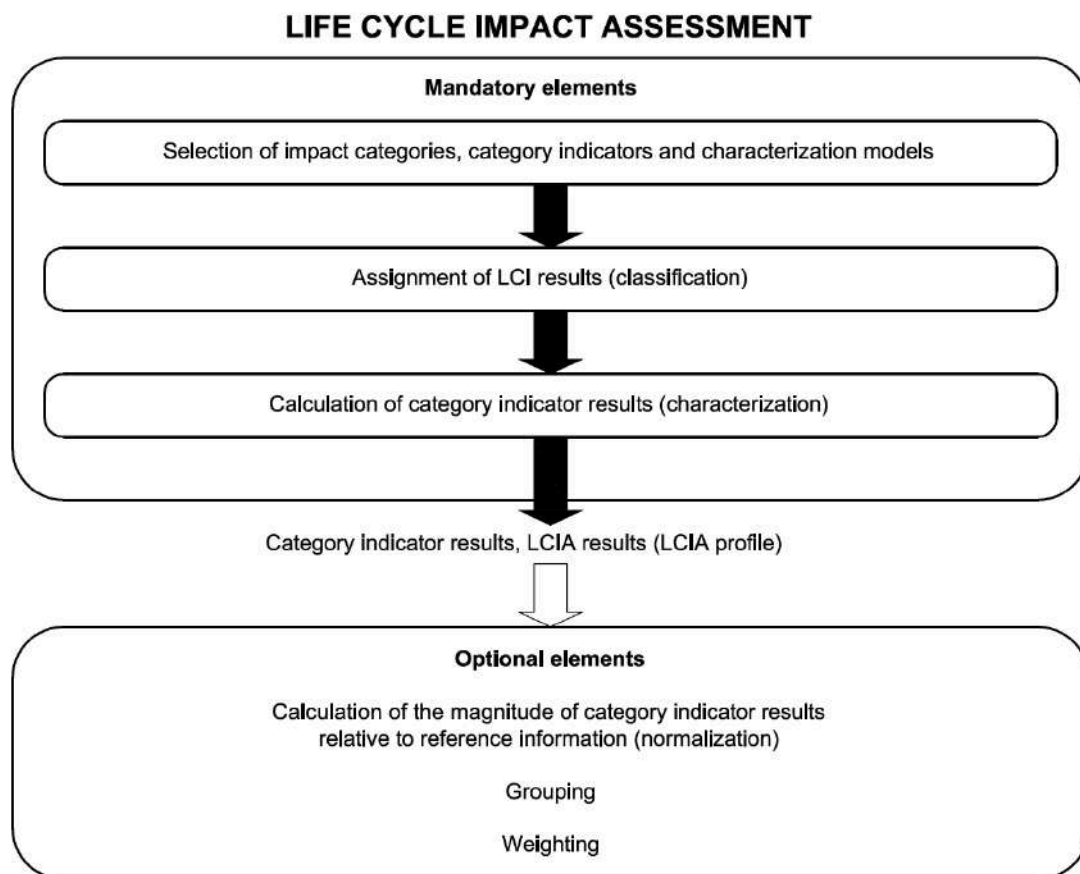


Fig 5.2 Elementi della fase LCIA - UNI EN 14040:2006

Classificazione

La classificazione prevede l'assegnazione di ciascun flusso elementare (risultato dell'analisi di inventario) alle rispettive categorie di impatto, in funzione degli effetti che può provocare sull'ambiente.

Caratterizzazione

La caratterizzazione permette il calcolo dell'impatto totale come somma dei singoli effetti potenziali valutati attraverso un fattore di conversione (fattore di caratterizzazione) associato ad ogni sostanza, che permette di esprimere i diversi contributi con un riferimento comune.

Al termine delle fasi di classificazione e caratterizzazione, si ottengono come risultati i potenziali impatti per ciascuna delle categorie considerate, ognuno con la propria

unità di misura. Per confrontarli, è necessario dunque omogeneizzare i dati con la fase di normalizzazione.

Normalizzazione

I risultati che si ottengono dalla fase di caratterizzazione, relativi alle diverse categorie di impatto, sono riportati a fattori di normalizzazione, così da risultare espressi con la stessa unità di riferimento. Solitamente come valore nominale di riferimento si utilizza il carico di impatto medio annuo relativo ad una specifica area geografica, diviso per il numero di abitanti, in modo da stimare il carico di inquinamento “pro-capite”. Questa fase ha la finalità di rendere confrontabili e maggiormente comprensibili i diversi impatti del sistema analizzato, nonché di evidenziare quali sono le categorie di impatto che hanno maggiore rilevanza nel ciclo di vita del sistema.

Raggruppamento

Il raggruppamento è l'assegnazione delle categorie d'impatto ad uno o più gruppi, è un elemento opzionale che può presentare due diverse procedure e finalità:

- ordinare le categorie d'impatto su base nominale (ad esempio in base a caratteristiche quali gli input e gli output o le scale spaziali globali regionali e locali);
- classificare le categorie d'impatto in una determinata gerarchia di priorità (ad esempio, alta, media e bassa).

Ponderazione

Questa fase comporta l'assegnazione di un peso alle diverse categorie di impatto: gli impatti potenziali relativi a ciascuna categoria è moltiplicato per un fattore di pesatura, dopodiché il valore può essere sommato ai valori di normalizzazione ottenendo un unico indice che rappresenta il potenziale impatto complessivo del sistema studiato da un punto di vista ambientale.

La classificazione e la ponderazione si basano su scelte effettuate da individui, organizzazioni e società, di conseguenza è possibile che stessi indicatori o risultati

normalizzati raggiungano risultati diversi. I dati e i risultati degli indicatori e i risultati normalizzati raggiunti prima della ponderazione, devono essere resi disponibili insieme ai risultati della ponderazione, per garantire che i compromessi e altre informazioni rimangano a disposizione dei responsabili delle decisioni e gli utenti possano prendere visione delle ramificazioni dei risultati. [46]

5.3.4 Quarta fase: Interpretazione dei risultati

La norma ISO EN 14040:2006 [48] definisce questa fase come il momento in cui realizzare una valida correlazione tra i risultati dell'analisi di inventario e della valutazione degli impatti per proporre utili raccomandazioni in conformità con gli scopi e gli obiettivi dello studio.

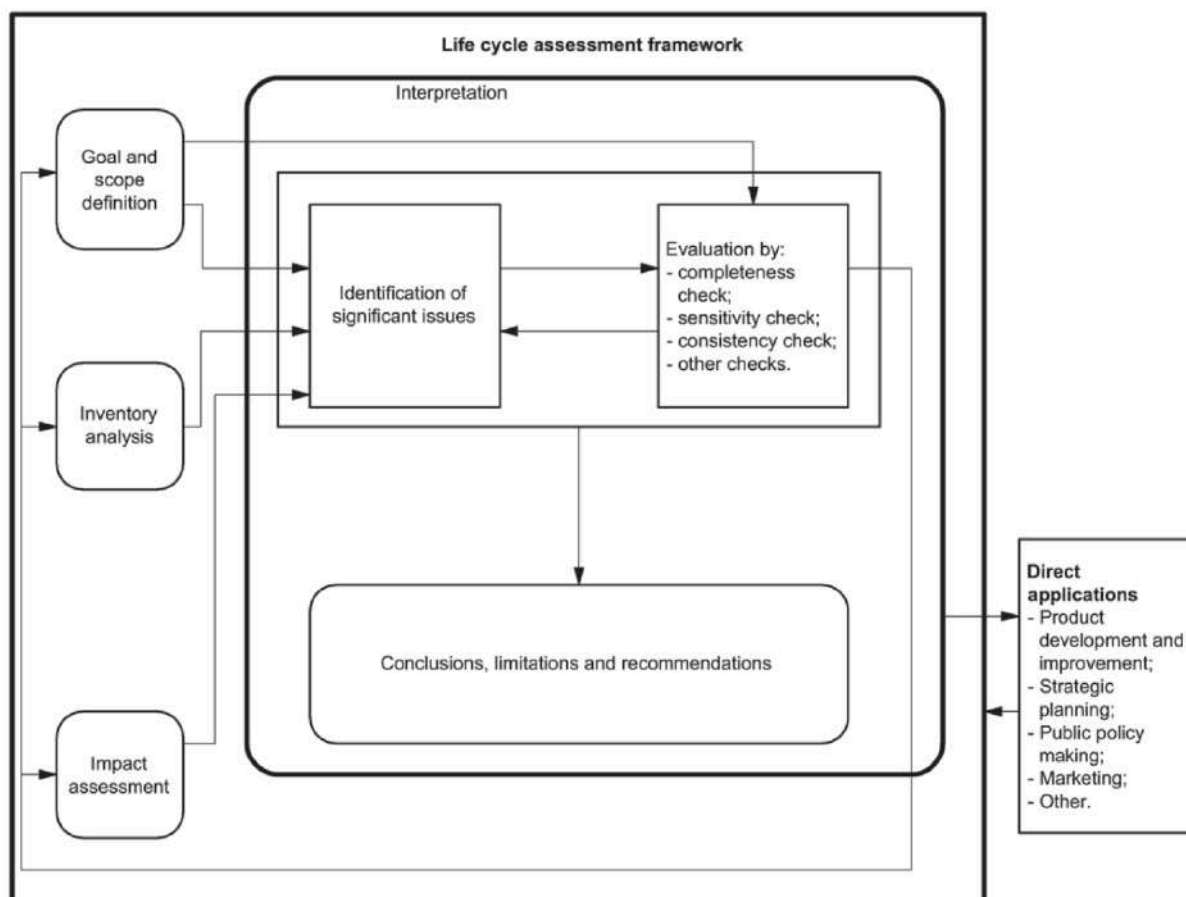


Fig 5.3 Relazione tra interpretazione dei risultati e le altre fasi dell'LCA - UNI EN 14044:2006

I principali elementi dell'interpretazione dei risultati sono:

- Identificazione dei punti critici, individuando i materiali e processi che contribuiscono maggiormente agli impatti complessivi;
- Controllo di completezza, ovvero la valutazione dell'inventario in termini di completezza;
- Valutazione di affidabilità dei risultati;
- Controllo di coerenza, con l'obiettivo di valutare se i dati, i metodi e le assunzioni dello studio siano applicate in modo coerente nell'analisi e, nel caso di analisi comparative, tra i diversi sistemi esaminati.

5.4 Strumenti software per l'analisi LCA

Per realizzare uno studio LCA sono stati sviluppati degli strumenti informatici specifici per agevolarne l'elaborazione, l'analisi e l'accuratezza. Tutti i software sono impostati in modo tale da seguire l'utente nelle fasi principali dello studio:

- *Analisi di inventario*: si forniscono all'utente il maggior numero di informazioni possibili quantitativamente e qualitativamente, in modo tale da completare l'inventario nel modo più oggettivo possibile;
- *Analisi degli impatti*: ogni software propone il suo modello di calcolo e di elaborazione dei dati attraverso svariati metodi, con la possibilità di comparare le metodologie;
- *Interpretazione dei risultati*: i software aiutano ad analizzare i risultati attraverso grafici, analisi di sensibilità e statistiche di risultati.

Nello studio in oggetto viene utilizzato il software SimaPro 8.5, programma sviluppato in Olanda dalla *PRè Products Ecology Consultants*, impiegato nella pratica industriale ed internazionale, riconosciuto da esperti nel settore. E' il software per l'analisi LCA più diffuso al mondo, permette di realizzare, modificare e adattare processi specifici già presenti nel database, di effettuare un'analisi interattiva dei risultati e dei cicli di vita più complessi, seguendo le linee guida della norma ISO EN 14040:2006 e 14044:2018.

5.4.1 Dati di inventario

I dati di inventario elaborati dal programma SimaPro sono contenuti in database contenenti migliaia di processi e materiali. [49]

Ecoinvent v3

Database contenente i dati principali delle attività in Svizzera e nell'Europa occidentale, per quanto concerne energia, trasporti, materiali da costruzione, prodotti chimici agricoltura, e trattamento degli inquinanti. Tutti i processi sono corredati da un'ampia documentazione, con la descrizione dei dati collegata (nome, unità di misura, derivazione del dato, categoria e sottocategoria di appartenenza) e informazioni riguardanti l'incertezza del dato.

European Life cycle Database – ELCD

Il Database ELCD comprende i dati dell'inventario del ciclo di vita provenienti da associazioni di imprese di primo piano a livello dell'UE e altre fonti per materiali chiave, scambi energetici, trasporti e gestione dei rifiuti. L'attenzione è posta sulla qualità dei dati, la coerenza e l'applicabilità. I rispettivi set di dati sono ufficialmente forniti e approvati dalla citata associazione industriale.

US Input Output Database

Database Americano i cui dati sono relativi a elementi industriali e commerciali dei settori economici statunitensi. Il database degli Stati Uniti Life-Cycle Inventory (LCI) contiene moduli di dati che quantificano i flussi di materiale ed energia in entrata e in uscita dall'ambiente per processi unitari comuni.

Il protocollo dati è basato su ISO 14048:2006 riguardante la *“Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Formato della documentazione dei dati”*

5.4.2 I metodi di valutazione degli impatti

Sono disponibili diversi metodi per la valutazione degli impatti supportati dal software SimaPro 8.5, che hanno come scopo comune di determinare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito dei rilasci nell'ambiente e del consumo di risorse provocati dall'attività produttiva.

Nel contesto della metodologia LCA un impatto è il risultato fisico immediato di una data operazione, consistente in particolare, nell'emissione di certe sostanze. Un impatto è, quindi, associato a uno o più effetti ambientali.

Il risultato finale di questa fase sarà quindi un profilo ambientale del sistema in studio, che può essere utilizzato sia per confrontare il comportamento di diversi processi produttivi, che per scoprire dove e come intervenire per ottenere una minimizzazione dell'impatto dovuto ai processi.

All'interno del software sono disponibili diversi metodi per la valutazione degli impatti, tra cui:

- *CML 2001* (Aprile 2013): metodo olandese che copre tutti gli impatti e le emissioni legati al consumo di risorse, per i quali sono disponibili metodi e modelli di classificazione e/o caratterizzazione comunemente accettati. Metodo definito *midpoint oriented*, perché basato sulle categorie di impatto, esprime i risultati come contributi a categorie d'impatto ambientale rilevanti.
- *EPD (2013)*: metodo nato nel 2008, per essere impiegato nella valutazione degli impatti delle analisi LCA realizzate per la redazione delle *Environmental Product Declarations* (EPD), secondo le indicazioni definite dal sito ufficiale dello SMEC (Swedish Environmental Management Council). La versione del 2013 è la successiva rielaborazione. Questo metodo risulta particolarmente indicato per chi deve redigere le schede di Dichiarazione Ambientale di Prodotto secondo i PCR pubblicati da Environdec, sito ufficiale del sistema svedese *The International EPD® System*.
- *Greenhouse Gas Protocol*: Si tratta di uno strumento nato dalla collaborazione tra World Resources Institute e il World Business Council for Sustainable Development a disposizione delle imprese e dei governi per sviluppare completi e affidabili inventari delle loro emissioni di gas serra, normalmente espressi in kg di CO₂-eq, attraverso un'operazione di standardizzazione basata sui potenziali di riscaldamento globale (GWP, Global Warming Potential), che sono calcolati per ciascun gas serra tenendo conto della sua

capacità di assorbimento delle radiazioni e del tempo della sua permanenza nell'atmosfera.

- *Eco – Indicator '99*: metodo olandese che fa riferimento a categorie di impatto globale e valuta una grande quantità di emissioni e le conseguenze ad esse correlate. È un metodo *damage oriented* poiché basato su una valutazione per categorie di danno ambientale e ne individua tre: Salute Umana, Qualità dell'Ecosistema, Esaurimento delle Risorse. Ad ogni categoria di danno sono associate diverse categorie d'impatto.
- *Impact 2002+*: metodo svizzero che offre una soluzione intermedia tra gli approcci *midpoint* e *damage*. Permette di ricondurre i risultati dell'analisi a quattordici categorie di impatto a loro volta riconducibili a quattro categorie di danno. Le quattro categorie di danno individuate da questo metodo sono: Salute Umana, Qualità dell'Ecosistema, Cambiamenti Climatici, Risorse.

Una volta scelta una certa categoria di impatto, si deve scegliere l'indicatore con cui rappresentarla. A seconda del metodo scelto per la valutazione degli impatti si utilizzeranno determinate categorie e specifici indicatori.

5.4.3 Categorie di impatto ambientale

Secondo il modello EPD (2013), metodo utilizzato per il sistema oggetto di studio, le categorie di impatto ambientale da analizzare sono le seguenti [50]:

- Acidificazione (SO₂-eq);
- Eutrofizzazione (PO₄-eq);
- Riscaldamento globale (CO₂-eq);
- Creazione di smog fotochimico (C₂ H₄-eq);
- Riduzione dello strato di ozono (CFC-11-eq);
- Riduzione delle risorse abiotiche (Sb);
- Riduzione delle risorse abiotiche fossili (MJ).

Acidificazione del suolo e delle acque – *Acidification (AP)*

L'acidificazione è un fenomeno che si sviluppa dalla presenza di sostanze acide, quali ossidi di azoto (NO_x) e ossidi di zolfo (SO_x). Queste sostanze derivano da fenomeni naturali, come eruzioni vulcaniche e incendi, o fenomeni antropici, attraverso sistemi di combustione industriali e civili (riscaldamento domestico e traffico veicolare). Dall'atmosfera queste sostanze ricadono sugli edifici, sulla vegetazione e sul suolo, sotto forma di piogge acide, dando luogo a effetti dannosi, quali la progressiva riduzione della fauna e dell'ecosistema, l'indebolimento delle specie vegetali presenti e l'arricchimento nelle acque sotterranee di elementi potenzialmente dannosi per la vita animale.

La sostanza di riferimento per la standardizzazione è l'anidride solforosa (SO₂). L'indice identificato è il Potenziale di Acidificazione (*Acidification Potential – AP*), espresso in kg di SO₂ equivalente.

Il potenziale complessivo di acidificazione del sistema è dato dalla seguente relazione:

$$AP = \sum AP_i \cdot m_i$$

AP_i potenziale di acidificazione della sostanza rilasciata;

m_i massa della sostanza, espressa in kg

Eutrofizzazione – *Eutrophication (EP)*

L'eutrofizzazione è un processo degenerativo delle acque indotto da eccessivi apporti di sostanze ad effetto fertilizzante (fosfati ed altre sostanze fitostimolanti) trasportate nel mare dai fiumi e dagli insediamenti costieri. Le principali fonti di generazione di queste sostanze sono costituite dal settore agro-zootecnico e civile, causato dalla forte antropizzazione del territorio. Per contrastare l'eutrofizzazione sono necessari interventi che riducano gli afflussi di nutrienti ai corpi idrici. Un esempio è la riduzione di fertilizzanti in agricoltura, la depurazione degli scarichi civili ed industriali ed il trattamento delle acque di scolo delle colture.

Si introduce un indice che misura l'attitudine delle diverse sostanze emesse a favorire lo sviluppo di biomassa. Con lo stesso approccio visto per le altre categorie,

è stato costruito un potenziale di eutrofizzazione (*Eutrophication Potential – EP*), espresso in kg PO₄ equivalente.

Il potenziale complessivo di eutrofizzazione del sistema è dato dalla seguente relazione:

$$EP = \sum EP_i \cdot m_i$$

EP_i potenziale di eutrofizzazione della sostanza generica;

m_i massa della sostanza, espressa in kg

Riscaldamento globale – Global Warming Potential (GWP)

L'effetto serra è un fenomeno naturale che assicura il riscaldamento globale del nostro pianeta ed è legato alla presenza di alcuni gas atmosferici, quali l'anidride carbonica (CO₂), l'ossido di azoto (N₂O), il metano (CH₄) e l'ozono troposferico (O₃). Questi gas fungono da regolatori di temperatura del Pianeta e conseguentemente determinano la distribuzione e il funzionamento dei sistemi climatici. L'aumento esponenziale dei gas di origine antropica sta determinando un generale surriscaldamento del globo terrestre, questa analisi ha il fine di determinare ed eliminare le maggiori emissioni di gas serra nell'ambiente, per diminuire il potenziale di riscaldamento globale.

L'indicatore di questa categoria di impatto è espresso in kg di CO₂ - equivalenti, ed è determinato dal potenziale di riscaldamento globale (Global Warming Potential - GWP). Questo potenziale determinato dalla IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) è stato calcolato considerando sia l'attitudine del gas serra ad assorbire radiazioni infrarosse, sia il tempo di permanenza del gas in atmosfera. Il GWP è quindi la misura, basata sulla concentrazione e sul periodo di esposizione, del potenziale contribuito che una sostanza arreca all'effetto serra, rispetto a quello provocato dalla stessa quantità di anidride carbonica.

Il Global Warming Potential è dato dalla seguente relazione:

$$GWP = \sum GWP_i \cdot m_i$$

GWP_i potenziale di riscaldamento globale della sostanza i-esima;
 m_i massa della stessa sostanza, espressa in kg

Formazione di smog fotochimico - *Photochemical oxidation (POCP)*

Lo smog fotochimico rappresenta una manifestazione dell'inquinamento atmosferico in ambiente urbano e suburbano. Si distingue dallo smog convenzionale per i composti inquinanti presenti e per il periodo di manifestazione: lo smog fotochimico è un insieme di ossidi di azoto, ozono, ossido di carbonio, aldeidi ed idrocarburi, che ha intensità massima nei periodi estivi e nelle ore più calde della giornata in quanto la luce solare fornisce l'energia di attivazione per numerose reazioni chimiche. I composti che costituiscono lo smog fotochimico sono sostanze tossiche per gli esseri umani, per gli animali ed anche per i vegetali, inoltre sono in grado di degradare molti materiali per il loro forte potere ossidante.

L'indicatore di conversione introdotto è il potenziale di formazione di smog fotochimico, POCP, espresso in kg di etilene (C₂H₄) equivalente.

Il potenziale complessivo di formazione di smog fotochimico è dato dalla seguente relazione:

$$POCP = \sum POCP_i \cdot m_i$$

$POCP_i$ potenziale formazione di smog fotochimico del generico gas rilasciato;
 m_i massa della sostanza, espressa in kg

Assottigliamento della fascia di ozono - *Ozone layer depletion (ODP)*

Lo strato di ozono è un gas naturale nella stratosfera che protegge gli esseri umani e gli altri esseri viventi dalle radiazioni nocive ultraviolette (UV) del sole. Sebbene l'ozono sia presente in piccole concentrazioni nell'atmosfera, la maggior parte - circa il 90% - è nella stratosfera, uno strato al di sopra della superficie terrestre di uno spessore compreso fra 10 e 50 km. Lo strato di ozono filtra la maggior parte delle radiazioni UV nocive del sole ed è quindi di cruciale importanza per la vita sulla Terra. Negli anni settanta alcuni scienziati hanno scoperto che lo strato di ozono si

stava riducendo a causa di sostanze chimiche prodotte dall'uomo (ODS), presenti in un'ampia gamma di applicazioni industriali e prodotti di consumo. Nel 1987, per far fronte alla distruzione dello strato di ozono, la comunità internazionale ha definito il Protocollo di Montreal sulle sostanze che riducono lo strato di ozono, primo trattato internazionale firmato da tutti i paesi del mondo. L'obiettivo prefissato è di ridurre la produzione e il consumo di sostanze che distruggono l'ozono per diminuire al minimo le radiazioni UV, dannose per la salute umana e gli ecosistemi. I principali responsabili della rottura delle molecole di ozono, composti molto stabili che raggiungono inalterati la stratosfera, sono i clorofluorocarburi (CFC) e gli idroclorofluorocarburi (HFC).

L'indice introdotto dalla World Meteorological Organization (WMO) per questa categoria d'impatto è il potenziale di riduzione dell'ozono (*Ozone Depletion Potential* – *ODP*). Per gli ODP la sostanza di riferimento è il CFCI_3 , anche conosciuto come CFC-11. Il potenziale complessivo, espresso in kg di CFC-11 equivalente, è dato dalla seguente relazione:

$$ODP = \sum ODP_i \cdot m_i$$

ODP_i potenziale di diminuzione dello strato di ozono del gas considerato;

m_i massa del generico gas rilasciato, espressa in kg

Consumo delle risorse abiotiche - *Abiotic depletion (ADP)*

Considerando la categoria “risorse” nella sua globalità, è necessario effettuare una distinzione tra le risorse intrinsecamente rinnovabili, anche definite risorse biotiche (acqua, aria, energia solare, energia eolica) e le risorse non rinnovabili, denominate risorse abiotiche (combustibili fossili e minerali, sabbia, ghiaia, risorse del territorio in generale). Le risorse abiotiche a sua volta, possono riguardare elementi non rinnovabili, come minerali (ferro, rame, ecc.) oppure combustibili fossili, quali petrolio e carbone.

Il fattore per caratterizzare la categoria d'impatto “diminuzione delle risorse fossili e minerarie”, è il potenziale di esaurimento delle risorse abiotiche, ADP, espresso in kg

di antimonio equivalente per ogni kg di risorsa estratta, mentre per le risorse energetiche è espresso in MJ.

L'antimonio è stato scelto come sostanza di riferimento in quanto è il primo degli elementi in ordine alfabetico per i quali è disponibile una serie completa di dati necessari (tasso di estrazione e di riserva finale).

Il potenziale complessivo di esaurimento delle risorse abiotiche è ottenuto con la seguente formula:

$$ADP = \sum ADP_i \cdot m_i \quad \text{con} \quad ADP_i = \frac{DR_i / R_i^2}{DR_{ref} / R_{ref}^2}$$

ADP_i potenziale di esaurimento della generica risorsa abiotica espresso in kg di antimonio equivalente/kg della risorsa i-esima;

m_i massa della rispettiva sostanza espressa in kg;

R_i riserva ultima della rispettiva sostanza espressa in kg;

DR_i tasso di estrazione della rispettiva sostanza espressa in kg/anno, considerando una capacità rigenerativa nulla;

R_{ref} riserva ultima della sostanza di riferimento (Antimonio), espressa in kg;

DR_{ref} tasso di estrazione della sostanza di riferimento, espresso in kg/anno.

6. Analisi LCA (Life Cycle Assessment) applicata al sistema *acciaio – calce e canapa*

Attraverso un'accurata *Analisi del Ciclo di Vita* ("Life Cycle Assessment" - LCA) è possibile selezionare attentamente i prodotti ed i materiali al fine di minimizzare gli esiti negativi sull'ambiente, supposto che è impossibile pensare di creare edifici che non vadano a modificare l'ecosistema.

6.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

Obiettivo dello studio è la valutazione dell'impatto ambientale che il sistema acciaio – calce e canapa ha dall'estrazione delle materie prime alla fase di produzione. L'analisi è stata effettuata confrontando gli impatti relativi ai quattro materiali che compongono il sistema (canapulo, grassello di calce, acciaio e lana di legno mineralizzata), per individuare quanto ogni singolo materiale incide sull'ambiente.

E' stato svolto inoltre un confronto con una tipologia costruttiva utilizzata nella zona di Mestrino (PD) che garantisce lo stesso valore di conducibilità termica, costituita da blocchi in laterizio e pannelli in polistirene espanso. L'analisi è stata effettuata per verificare i benefici ambientali che il sistema con isolamento naturale apporta se sostituito all'edilizia tradizionale.

6.2 Definizione dei confini del sistema

I confini del sistema spaziano dall'estrazione delle materie prime fino alla fase di produzione. Vengono considerati i trasporti dal sito di reperimento delle materie prime al sito di produzione nelle aziende, mentre sono esclusi i trasporti dal cancello al cantiere. Si assume che il sistema sia assemblato in azienda come banco di prova. Non viene presa in esame la fase di dismissione, perché non ci sono ancora stati casi in cui si è verificato il fine vita del sistema. Si tratta quindi di una valutazione del ciclo di vita del tipo "*cradle to gate*", dalla culla al cancello.

6.3 Definizione dell'unità funzionale

Secondo la norma ISO 14044:2018 – “*Gestione Ambientale – Valutazione del ciclo di Vita – Requisiti e linee guida*”, è necessario definire un'unità funzionale rappresentativa del prodotto analizzato, considerando le applicazioni finali e le caratteristiche fisiche del prodotto. [47]

L'unità funzionale (UF) di riferimento per lo studio in oggetto è 1 m² del sistema con trasmittanza pari $U = 0,158 \text{ W/m}^2\text{K}$ (valore limite $U=0,25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ secondo il *D.M. del 26/06/2015 - “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici”*).

Di seguito si riporta la schematizzazione dell'UF:

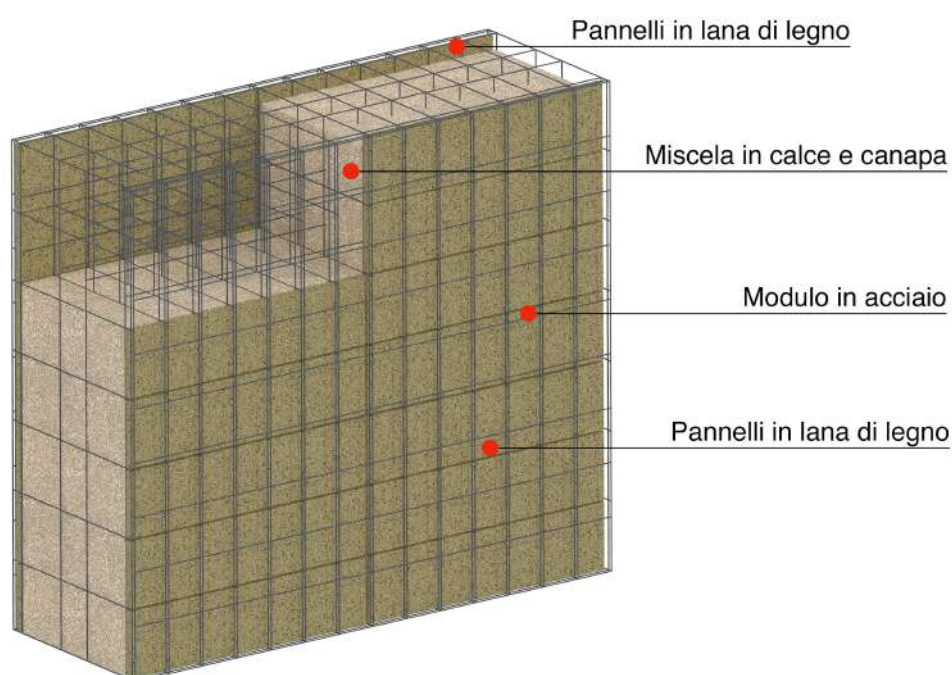


Fig 6.1 UF sistema acciaio - calce e canapa

	Spessore (s) [m]	Conduttività (λ) [W/(mK)]	Resistenza termica (R) [(m ² K)/W]	Densità (ρ) [Kg/m ³]
Pannello in lana di legno	0,015	0,070	0,214	533
Miscela in calce e canapa	0,370	0,065	5,692	240
Pannello in lana di legno	0,015	0,070	0,214	533

6.4 Qualità dei dati

Per l'elaborazione del modello sono stati raccolti dati di tipo primario dalle aziende produttrici attraverso questionari dirette e schede tecniche: l'Associazione *Assocanapa Group Srl* (TO) per la filiera della canapa, l'azienda *CalcePiasco Srl* (CN) per la produzione del grassello di calce, l'azienda *La Banca della Calce Srl* (BO) per la fornitura della miscela di calce e canapa, *Ecosism Srl* (PD) per la realizzazione delle gabbie di acciaio, *Celenit Spa* per i pannelli in lana di legno.

Nel dettaglio, i dati primari forniti dalle aziende riguardano:

- Quantità di materiale (miscela, acciaio, pannelli);
- Mezzi di trasporto, distanze, quantità di materiale trasportato;
- Consumi elettrici dei macchinari utilizzati per il processo;
- Applicazioni, proprietà e tipologie di utilizzi dei prodotti.

Sono da considerarsi secondari tutti quei dati contenuti nelle banche dati del software SimaPro 8.5, in grado di fornire dati esaurienti per l'intero processo di produzione.

6.5 Sistema tradizionale di riferimento

Per il sistema tradizionale non è stato fatto riferimento a dati di tipo primario, poiché privo di un contesto specifico da cui poter ricavare specifiche informazioni.

Considerando la zona climatica di riferimento (zona E) di Mestrino (PD) e le relative tipologie costruttive, è stata individuata una stratigrafia tradizionale che garantisca gli stessi valori di trasmittanza del sistema con isolamento naturale, pari a $U = 0,158 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, costituita da mattone forato in laterizio e isolamento con pannelli di polistirene espanso (EPS). In tabella si riportano le caratteristiche specifiche tecniche dei materiali.

	Spessore (s) [m]	Conduttività (λ) [W/(mK)]	Resistenza (R) [(m ² K)/W]	Densità (ρ) [Kg/m ³]
Mattone forato in laterizio	0,250	0,250	1,000	800
Pannello in EPS	0,200	0,040	5,000	30

Mattone forato in laterizio

Il laterizio è un prodotto materiale ceramico a pasta porosa, creato con argilla depurata, pressata in forme, asciugata e cotta in appositi forni. Le fasi di produzione si suddividono in:

- escavazione, trasporto e stoccaggio argilla;
- pre-lavorazione, formatura, essiccazione e cottura;
- imballaggio e trasporto.

Per realizzare gli alveoli all'interno dei mattoni al fine di aumentare le prestazioni termiche, si aggiunge nella miscela di argilla cruda elementi combustibili, che durante la cottura dell'impasto subiscono un processo di combustione totale, lasciando microcavità contenenti aria al loro interno. Gli elementi combustibili sono di origine sintetica, quale il polistirene espanso, materiale derivato dal petrolio. L'argilla costituisce una risorsa presente su larga scala, ma non rinnovabile, fattore che rende il materiale poco ecologico. [51]

Pannello in polistirene espanso (EPS)

Il polistirene espanso è un materiale isolante di origine sintetica, originato dalla polimerizzazione dello stirene, derivato dal petrolio attraverso processi industriali di raffinazione. La sua composizione è uno dei primi fattori che rende il prodotto poco ecologico, data la limitatezza della risorsa e le emissioni di CO₂ legate alla sua utilizzazione, che contribuiscono in modo sostanziale al riscaldamento globale. La direttiva comunitaria 2002/91/CE sul *Rendimento Energetico degli Edifici nella Comunità Europea*, anche nota come Direttiva EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*) è in relazione con il Protocollo di Kyoto che, tra gli obiettivi, prevede la riduzione della dipendenza dei prodotti derivati dal petrolio.

I materiali utilizzati per la produzione del polistirene non sono uniformemente distribuiti sul territorio, questo fattore implica che una componente significativa dell'impatto correlato a questo materiale sia costituita dal trasporto. Lo stirene, non potendo essere esposto a luce e calore, deve essere trasportato in container a bassa temperatura e conservato in serbatoi interrati e ben ventilati, secondo norme molto rigide per ridurre la probabilità di incidenti e di potenziale inquinamento globale.

Per quanto riguarda i consumi energetici, la quantità di energia assorbita in fase di produzione è tra le più elevate rispetto ad altri materiali con equivalenti capacità di

isolamento, ad esse va aggiunta quella consumata nel trasporto e nello stoccaggio, sia per la movimentazione, sia per il raffreddamento dello stirolo. [52]

6.6 Analisi di inventario

Vengono descritte di seguito le analisi di inventario delle unità di processo che riguardano l'intero sistema oggetto di studio, secondo i dati forniti dalle aziende e quelli ricavati dai database del Software SimaPro 8.5.

Per ogni componente del sistema, viene riportato il processo di produzione, la quantità di materiale impiegato e il trasporto, fattori presi in considerazione per la realizzazione del sistema.

6.6.1 Miscela di calce e canapa

Informazioni sul prodotto

La miscela di calce e canapa, commercialmente Calcecanapa[®] Getto, è un materiale premiscelato costituito da grassello di calce e canapulo mineralizzato, prodotto e distribuito dall'azienda *La Banca della Calce Srl* di Bologna.

Il grassello di calce è realizzato nello stabilimento Calce Piasco di Piasco (CN). Il calcare utilizzato da Calce Piasco viene estratto dalla cava "Rivasse Tarditi", sita nel comune di Rossana (CN), con mezzi moderni e personale specializzato. Il canapulo, parte legnosa dello stelo della canapa, è prodotto dall'associazione Assocanapa Srl a Carmagnola (TO) e proviene dalla prima trasformazione delle coltivazioni di canapa del territorio piemontese.

Processo di produzione grassello di calce

- Estrazione pietra Dolomitica nella cava "Rivasse Tarditi" nel comune di Rossana (CN);
- Taglio della roccia attraverso esplosivi;
- Trasporto dalla cava allo stabilimento CalcePiasco (CN) – 3km;
- Prima macinazione per ottenere pezzatura uniforme;
- Cottura in forno statico a tino unico verticale da cui si ottiene calce viva;
- Spegnimento calce viva attraverso uno stabilizzatore (acqua stechiometrica);

- Stagionamento calce viva in eccesso di acqua per un periodo prolungato (12-48 mesi).

Il grassello non viene imballato, ma trasportato internamente fino all'area destinata alla miscelazione e all'imballaggio del prodotto finito.

Durante il processo di combustione, poi di spegnimento, è possibile trovare del materiale che non ha completato la reazione di ossidazione e che viene quindi reimmesso in forno come flusso di ricircolo. Tuttavia, questo dato non è stato preso in considerazione in quanto inferiore all'1% in massa rispetto al totale di materiale in ingresso.

Per i trasporti sono stati considerati i seguenti dati:

Consumi di materie prime	Unità di misura	Quantità
Pietra da calce/ossido di calce	kg/kg	0,363
Acqua industriale	m ³	6,37 ⁻⁴

Consumi di energia	Unità di misura	Quantità
Energia elettrica (lavorazione ossido e grassello)	kWh	0,03
Gas metano	m ³	0,035
Carbone	kg	0,101

Per il processo relativo al *Grassello di Calce* si fa riferimento al lavoro di tesi di Campagnoni S. dal titolo *"Analisi LCA (Life Cycle Assessment) di malte da intonaco per il restauro ed il recupero edilizio"*

Processo produzione canapulo

La varietà di canapa coltivata dall'associazione *Assocanapa Srl* è quella dioica e, secondo i dati primari raccolti, non necessita l'applicazione di fertilizzanti chimici e di irrigazione, in quanto la pianta presenta un apparato radicale molto sviluppato che riesce a catturare le sostanze nutritive anche a grande profondità nel terreno.

La canapa è coltivata a Carmagnola (TO), la distanza dallo stabilimento CalcePiasco Srl, in cui il canapulo viene miscelato con il grassello di calce, è di 50 km.

La coltivazione della canapa consiste nei seguenti processi:

- Aratura;
- Semina;
- Trebbiatura;
- Macerazione;
- Essiccazione.

In seguito all'essiccazione, il canapulo è mandato all'impianto di sfibratura dove viene effettuata la prima trasformazione, per ogni kg di canapa si ricavano:

Prima trasformazione	Quantità (kg)	Peso secco
Fibre	0,25	20 %
Canapulo	0,75	75 %
Polvere	0,05	5 %

Ogni co-prodotto subisce lavorazioni differenti, il canapulo viene macinato, pulito per pezzatura (1 – 3 – 6 – 15 mm) e infine imballato in sacchi in polipropilene da 300 kg l'uno.

Per realizzare il processo “*Canapulo*”, sono stati utilizzati i dati provenienti dal *Report Analisi di Ciclo Vita di Prodotto (LCA)* realizzato dall'Azienda CalcePiasco Srl sul prodotto Calcecanapa Tetto[®], che contiene al suo interno lo stesso tipo di canapulo utilizzato per la miscela del sistema oggetto di studio. [53]

Per ottenere 1 kg di Canapulo si fa riferimento ai seguenti dati:

Consumi di materie prime	Unità di misura	Quantità
Canapa/canapulo	kg/kg	1,34
Energia elettrica	kWh/kg canapa lavorata	0,115

Per i trasporti sono stati considerati i seguenti dati, riferiti all'UF:

Tipologia trasporto	Distanza (km)	Carico (ton)	Alimentazione
Autocarro ad uso agricolo (Carmagnola – stabilimento Piasco)	50	0,0219	Gasolio

La mancanza di fertilizzanti chimici consente di semplificare il modello, evitando il calcolo di emissioni in atmosfera e aria di sostanze quali NH_3 , NO_x , N_2O e H_3PO_4 .

Processo miscelazione calce e canapa

L'ultima fase del processo prevede la miscelazione del canapulo con il grassello di calce presso lo stabilimento CalcePiasco Srl, secondo le quantità previste dalla ricetta fornita direttamente dall'azienda. Un sistema di opportune pompe alimenta l'impianto di miscelazione, da cui si ottiene il prodotto miscelato che viene trasportato attraverso un nastro redler fino al confezionamento in sacchi di polipropilene (Big Bag) con rivestimento esterno in politene. I sacchi Big Bag sono da 1 m³ (350 kg). Nel processo Miscela calce – canapa si considera che per ogni UF sono presenti 66,6 kg di miscela.

Di seguito si riportano i valori utilizzati:

Componente	BigBag (350 kg)	UF (66,6 kg)
Grassello di calce	154,8 kg	29,5 kg
Canapulo	115 kg	21,9 kg
Acqua	80 kg	15,2 kg

Si riporta a titolo illustrativo il Diagramma di Flusso realizzato con il software SimaPro per il processo della Miscela Calce - canapa (i valori percentuali nei riquadri in basso a sinistra indicano la CO₂ eq biogenica relativa ad ogni processo sul totale di quella emessa dall'intero sistema analizzato).

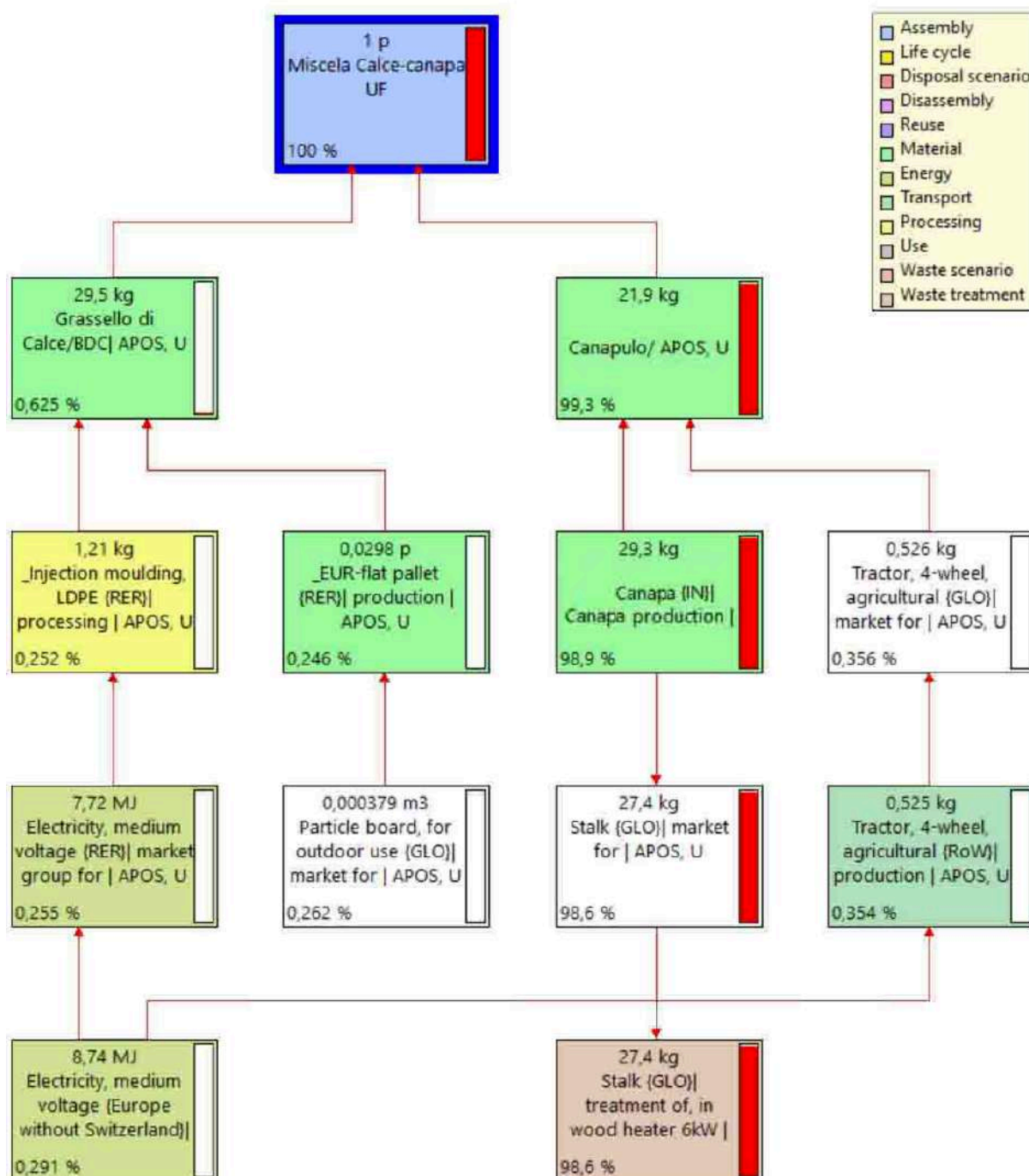


Fig 6.2 Diagramma di flusso miscela calce e canapa

6.6.2 Modulo di acciaio

Informazioni sul prodotto

L'elemento è una gabbia di sostegno tridimensionale costituita da vergelle in acciaio orizzontali e verticali elettrosaldate di diametro 2 mm.

L'acciaio utilizzato è lavorato dall'azienda Tecnofil di Gottolengo (BS) partendo da vergelle prodotte da Alfa Acciai (BS), uno tra i maggiori siti elettrosiderurgici presenti in Italia.

Successivamente viene portato nell'azienda *Ecosism Srl – Advanced Building Technology* di Padova, dove vengono realizzati i casseri di contenimento della miscela di calce e canapa.

Processo di produzione

- Raccolta di rottami di acciaio;
- Produzione della lamiera di acciaio;
- Produzione dello zinco;
- Trasporto delle forniture;
- Fase di pre-trattamento;
- Immersione nello zinco fuso;
- Fase di post-trattamento;
- Movimentazione interna;

Il 98,8% dell'acciaio è riciclabile. Il dato è ricavato dalla Convalida di Asserzione Ambientale auto dichiarata dall'azienda ALFA ACCIAI Spa nel rispetto del *“Regolamento per la verifica e convalida delle asserzioni ambientali sul contenuto di materiale riciclato in prodotti di acciaio”*, secondo le indicazioni contenute nella norma UNI EN ISO 14021. L'acciaio zincato, a sua volta, è completamente riciclabile, e mantiene la stessa qualità quando viene riciclato.

I mezzi di trasporto utilizzati per la consegna di barre e bobine di acciaio sono camion. Il prodotto finito viene trasportato per 175 km per arrivare all'azienda Ecosism Srl, dove avviene la seconda fase di lavorazione.

Il processo inizia dalle bobine di acciaio zincato e attraverso diverse fasi di elettro-saldatura viene trasformato nella trama tridimensionale attraverso un impianto di produzione studiato e progettato specificatamente dall'azienda.

- prima fase di lavorazione dell'acciaio zincato dove vengono stabiliti gli spessori del modulo (spessore rete porta-intonaco interna / spessore isolamento interno / spessore rete porta-intonaco esterna) e l'altezza;
- seconda fase di lavorazione dell'acciaio zincato: creazione della trama tridimensionale;
- prodotto finito: il modulo viene numerato ed ordinato secondo lo schema di montaggio opportunamente studiato e dimensionato dall'ufficio tecnico.

Per realizzare il sistema è stato preso come riferimento il processo "*Steel hot-dip galvanised coil/EU*", ricavato dal Databas Industry Data 2.0, modellato con i dati specifici del sistema per quanto riguarda energia e trasporti.

Si rileva che, con riferimento all'UF, nel sistema sono presenti 0,9 kg di acciaio zincato.

6.6.3 Panelli in lana di legno mineralizzato

I pannelli in lana di legno mineralizzata sono realizzati dall'azienda CELENIT Spa (PD). Sono costituiti per il 47% da legno di abete rosso provenienti da foreste a gestione sostenibile e per il 52% da leganti minerali, principalmente polvere di

	% in peso
Cemento Portland	37,0%
Legno di abete 80% + acqua 20%	47,3 %
Polvere di marmo	15,0%
Formiato di calcio	0,3%
Cloruro di calcio	0,2%
Alchilato lineare	0,2%

marmo e cemento Portland. Nella tabella si evincono i pesi percentuali costituenti ogni pannello.

I pannelli utilizzati hanno dimensione 1,5 x 12 x 60 cm, sono presenti 28 elementi/m³. Si calcola che all'interno dell'unità funzionale sono presenti circa 16 kg di pannelli.

Processo di produzione

- Taglio tronchi in pezzi di misura da 48 a 52 cm;
- Trasformazione in lana di legno;
- Immersione nella soluzione di Cloruro di calcio e Formiato di calcio;
- Mescolazione della lana di legno con cemento Portland e polvere di marmo;
- Pesatura e distribuzione su stampo della miscela;
- Pressatura;
- Maturazione della miscela negli stampi;
- Sformatura;
- Prima essiccazione con essiccatoio a bruciatore in vena d'aria;
- Seconda essiccazione in vena d'aria;
- Calibratura dei pannelli;
- Squadatura e ridefinizione dei bordi;
- Eventuale verniciatura;
- Imballaggio e stoccaggio.

Per il processo relativo ai pannelli di contenimento, si fa riferimento al DataBase Ecoinvent, utilizzando il processo "wood wool panels/ APOS, U."

6.7 Metodologia di calcolo

Come indicato norma ISO 14040:2006 – “*Gestione Ambientale – Valutazione del ciclo di Vita – Principi e quadro di riferimento*”, i dati raccolti dall’analisi di inventario relativamente ad ogni unità di processo sono successivamente classificati e caratterizzati. Il software SimaPro 8.5 contiene un elenco di metodologie di calcolo che permettono di valutare diverse categorie di impatto a seconda della finalità dello studio. I metodi di calcolo si differenziano dalle procedure di scelta, di aggregazione e di ponderazione dei diversi indicatori che determinano l’indice finale.

Il presente studio è stato analizzato con le seguenti metodologie:

- Greenhouse Gas Protocol (GGP);
- EPD (2013).

La valutazione degli impatti è stata eseguita per quantificare le emissioni riferite ad 1 m² del sistema con trasmittanza $U=0,158 \text{ W/m}^2\text{K}$, comparato ad un sistema tradizionale che garantisce gli stessi valori di trasmittanza, realizzato con laterizio forato e pannello in polistirene espanso (PPE).

6.7.1 Greenhouse Gas Protocol (GGP)

Il metodo *Greenhouse Gas Protocol* è un aggiornamento del precedente metodo IPCC 2007, in quanto utilizza gli stessi fattori di caratterizzazione dell’IPCC GWP100 del 2007. Si tratta di uno strumento nato dalla collaborazione tra World Resources Institute (WRI) e il World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) a disposizione delle imprese e dei governi per sviluppare inventari completi e affidabili delle loro emissioni di gas serra. I quantitativi di gas serra vengono normalmente espressi in kg di CO₂-equivalente, attraverso un’operazione di standardizzazione basata sui potenziali di riscaldamento globale (Global Warming Potential - GWP).

I potenziali di riscaldamento globale sono calcolati per ciascun gas serra tenendo conto della sua capacità di assorbimento delle radiazioni e del tempo della sua permanenza nell’atmosfera. Il GWP è la misura di quanto un dato gas contribuisce all’effetto serra.

Nel seguente studio viene analizzata la CO₂-equivalente relativa alle seguenti categorie:

- **CO₂ proveniente da combustibili fossili** ("Fossil CO₂-eq"): anidride carbonica prodotta dalla combustione di combustibili fossili, non riutilizzabile;
- **CO₂ proveniente da fonti biogeniche** ("Biogenic CO₂-eq"): anidride carbonica che deriva dalla combustione della biomassa (materiale biologico prodotto da carbonio, idrogeno e ossigeno), che produce emissioni che si considerano carbonio-neutrale perché il carbonio è generato dal ciclo naturale del carbonio.
- **CO₂ proveniente da trasformazioni del suolo** ("CO₂-eq from land transformation"): il carbonio non utilizzato per la crescita delle piante in superficie, passa nelle radici delle piante, le quali lo depositano all'interno del suolo anche per migliaia di anni, se lasciato indisturbato; di conseguenza quando questo viene danneggiato o modificato, il carbonio immagazzinato viene nuovamente rilasciato in atmosfera.
- **Assorbimento di CO₂** ("CO₂ uptake"): anidride carbonica assorbita dalle piante e dagli alberi durante il processo di fotosintesi. Questo contributo rappresenta un impatto benefico per l'ambiente, in quanto consente di trattenere una parte di CO₂ che verrebbe rilasciata in atmosfera.

Sulla base di queste considerazioni, si riporta la valutazione di impatto legata alle emissioni di CO₂ equivalente applicando il metodo GGP:

	CO₂ eq Fossile	CO₂ eq Biogenico	CO₂ eq Uso del suolo	CO₂ eq Assorbito
Canapulo	2,15	0,04	0,001	-40,54
Grassello di calce	17,30	0,24	0,004	-6,55
Acciaio zincato	1,37	x	x	-0,02
Pannello in lana di legno mineralizzato	3,66	0,09	0,002	-0,84
Totale	24,48	0,37	0,007	-47,94

Tabella 6.1 Confronto materiali con metodo GGP

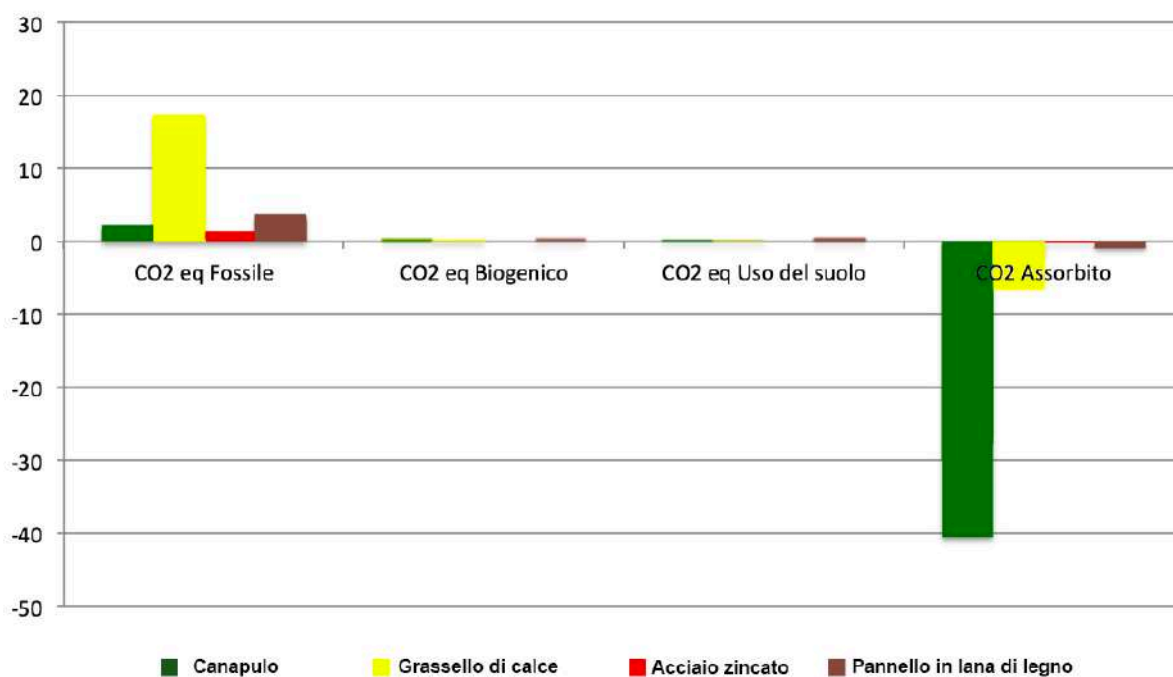


Fig 6.4 Bilancio CO₂ dei materiali con metodo GGP

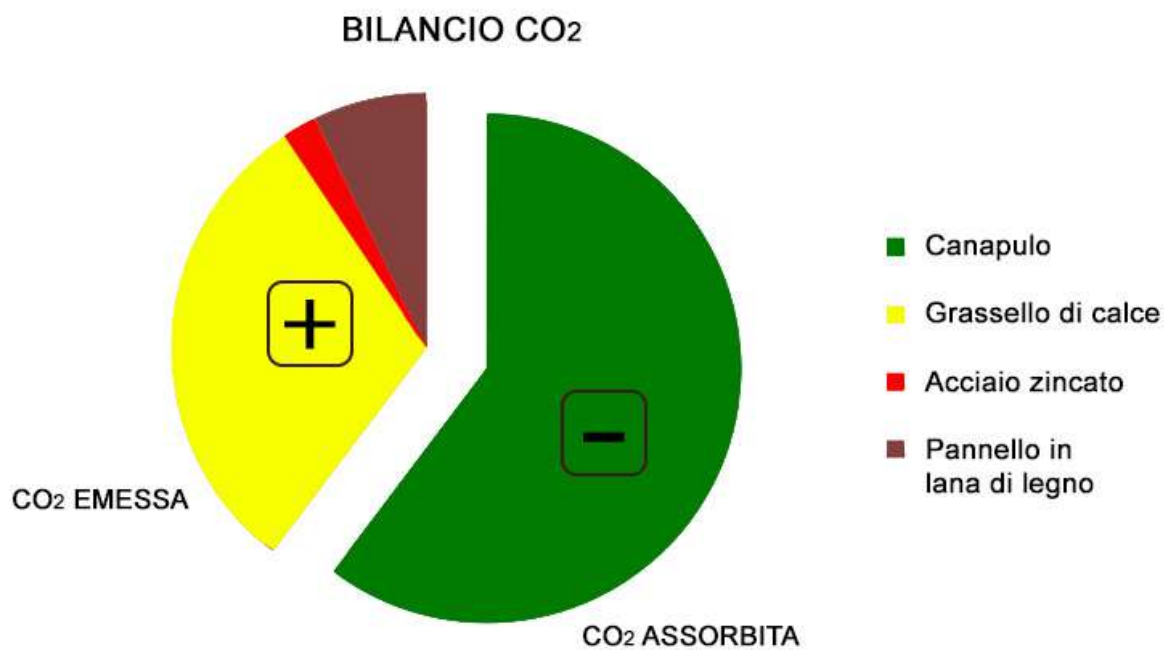
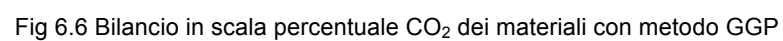


Fig 6 5 Bilancio complessivo CO₂ materiali



Gli impatti ambientali calcolati per il sistema sono strettamente legati alla composizione del prodotto, la presenza di fibre vegetali insieme al grassello di calce ne aumentano le caratteristiche di sostenibilità: il canapulo consente di inglobare all'interno della miscela la CO₂ assorbita per fotosintesi, creando uno stock di carbonio a breve termine senza possibilità di rilascio in atmosfera, mentre la calce riassorbe CO₂ dall'aria durante il processo di carbonatazione riconvertendosi in carbonato di calcio.

Come mostrato nella Tabella 6.1, i contributi maggiori in termini di emissioni di CO₂ equivalente per la realizzazione del sistema in oggetto, sono le categorie di CO₂ fossile e CO₂ assorbito.

Il consumo di CO₂ da fonte fossile è principalmente legato alla calce, che attraverso processi di cottura alimentati da combustibili fossili, si decompone in ossido di calcio rilasciando anidride carbonica, nella misura di circa 600 grammi/kg di calce viva ottenuta. Il canapulo è responsabile del consumo di CO₂ fossile principalmente per le fasi di coltivazione e di trasformazione della canapa in canapulo, ottenendo comunque risultati contenuti grazie al solo utilizzo di fertilizzanti naturali e alla mancanza della fase di irrigazione dei campi, elementi che caratterizzano la produzione della canapa in Piemonte.

La gabbia di acciaio zincato apporta le minori emissioni di CO₂ fossile (1,37 kg/UF) rispetto agli altri componenti del sistema, essendo presente in quantità molto ridotta e garantendo un contenuto minimo di acciaio riciclato pari al 98,6%. Inoltre l'acciaieria in cui sono realizzati i fili zincati è dotata di efficienti sistemi di abbattimento delle emissioni, che permettono l'aspirazione del diossido di carbonio in tutte le fasi del processo, in particolare l'insufflaggio di carboni attivi. Il contributo di CO₂ fossile della lana di legno mineralizzata è dato dal Cemento Portland presente al suo interno, che funge da legante.

Le emissioni di CO₂ biogenico e CO₂ derivanti dall'uso del suolo sono trascurabili rispetto agli altri contributi.

Risulta di grande rilevanza la quantità di CO₂ assorbita dal canapulo: le fibre vegetali assorbono una grande quantità di anidride carbonica durante la fotosintesi pari a

40,54 kg/UF, che consente di compensare le emissioni di CO₂ equivalente che avvengono per la realizzazione del prodotto finito, contribuendo in atmosfera ad un bilancio negativo di CO₂, (23,09 kg CO₂ assorbiti/UF). Inoltre è da rilevare che, anche se in minor quantità rispetto al canapulo, il grassello di calce in fase di messa in opera assorbe 6,55 kg CO₂/UF dall'atmosfera attraverso il processo di carbonatazione, riducendo il suo impatto negativo sull'ambiente. E' da specificare che si considera la quantità di CO₂ considerando il processo completo, in realtà le reazioni di carbonatazione sono lente e nel breve periodo la quantità di anidride catturata è inferiore alla massima quantità possibile.

Per concludere, si evidenzia che il grassello di calce è responsabile delle maggiori emissioni di CO₂ nell'ambiente, attribuibili in grande parte al processo di trasformazione da calcare a calce viva, che con il calore libera molecole di anidride carbonica in aria. Altre emissioni derivano dall'utilizzo di combustibili fossili per la cottura della miscela e la macinatura, questo fattore può essere mitigato con l'utilizzo di gas diversi dai combustibili fossili, come ad esempio materiali di origine vegetale, scarti di attività agricole, allevamento o industria del legno. Attualmente non ci sono soluzioni per decarbonizzare la fase di trasformazione "calcare – calce viva", ma si stanno facendo studi per tentare di catturare la CO₂ prodotta, immagazzinarla e riutilizzarla. Le ricerche sono condotte a Lixhe, in Belgio, da una compagnia cementiera HeidelbergCement e fanno parte di un progetto europeo (LEILAC – Low Emissions Intensity Lime&Cement), che ha l'intento di eliminare la CO₂ dall'industria di calce e cemento. La prima sperimentazione è stata la cattura della CO₂ utilizzando il lavaggio dei fumi in una torre alta 30 metri, soluzione efficace ma molto dispendiosa. [54]

Un altro parametro che abbatterebbe i consumi di CO₂, nonostante sia poco impattante nel sistema in oggetto data la esigua quantità presente nell'UF, è la possibilità di utilizzare gas diversi da combustibili fossili per la produzione dell'acciaio, quali il metano o l'idrogeno, che produrrebbe come scarto della reazione con l'ossido di ferro solo vapore acqueo. A questo proposito sta lavorando l'azienda siderurgica svedese SSAAB, con il progetto HYBRIT, che ha l'intento di sostituire il carbone da coke con l'idrogeno per la produzione di acciaio, che diventerebbe praticamente priva di emissioni di anidride carbonica. [54]

6.7.2 GGP - Confronto con sistema tradizionale

Considerando la zona climatica di riferimento (zona E) di Mestrino (PD) e le relative tipologie costruttive, è stata individuata una stratigrafia tradizionale che garantisca gli stessi valori di trasmittanza pari a $U = 0,158 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (valore limite $U=0,25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ secondo il D.M. Requisiti Minimi 26/06/2015), costituita da:

	Spessore (s) [m]	Conduttività (λ) [W/(mK)]	Resistenza (R) [(m ² K)/W]	Densità (ρ) [Kg/m ³]
Mattone forato in laterizio	0,25	0,25	1,00	800
Pannello in polisterne espanso	0,20	0,04	5,00	30

Qualità dei dati ed elaborazione dei calcoli

In questa fase di analisi non è stato fatto riferimento a dati di tipo primario, in quanto il sistema tradizionale di confronto è privo di un contesto specifico da cui poter ricavare specifiche informazioni. Tutti i processi sono stati selezionati dal database Ecoinvent, in particolare si prendono in considerazione le seguenti schede:

Materiale	Quantità	Unità
Light clay brick {GLO} market for APOS, U	200	kg
Polystyrene foam slab {GLO} market for APOS, U	6	kg

Nell'elaborazione del modello non si fa riferimento a trasporti in cantiere né all'energia spesa per l'installazione, ma solamente alle fasi di produzione dei materiali.

Si confronta il sistema acciaio – calce e canapa con il sistema tradizionale e si evince che i valori di maggior rilievo sono relativi alla CO₂ fossile del sistema tradizionale, di cui sono responsabili il ciclo di produzione dei laterizi e dei pannelli in polistirene espanso, derivato del petrolio. I valori di CO₂ biogenica e CO₂ dall'uso del suolo risultano pressoché nulli, mentre la quantità di CO₂ assorbita assume notevoli

differenze, data dalla natura delle materie prime. L'alta quantità di canapulo assorbe un elevato valore di CO₂ dall'atmosfera durante la fase di crescita, che fa sì che il valore di impatto totale sia di molto inferiore rispetto all'alternative tradizionale. Nel sistema con isolamento sintetico, non avendo materiale naturale, la CO₂ assorbita tende a zero, rendendo l'impatto complessivo della parete 3,5 volte più alto: il sistema tradizionale emette in atmosfera 56,56 kg CO₂ eq/UF mentre il sistema con il biocomposito di calce e canapa assorbe complessivamente 23,12 kg CO₂ eq/UF. Si può quindi affermare che il sistema oggetto di studio è *carbon negative*, processo che induce ad una rimozione permanente di CO₂ dall'ecosistema.

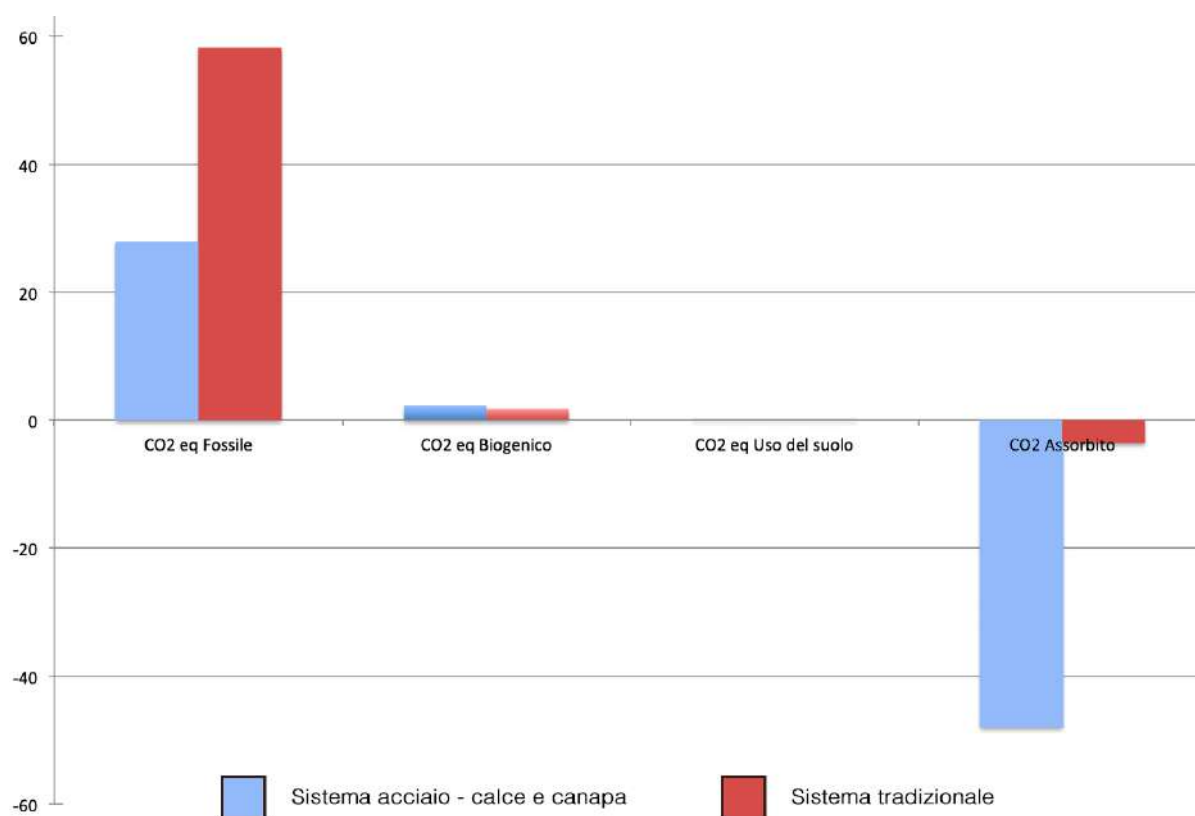


Fig 6.7 Bilancio CO₂ dei due sistemi con metodo GGP

	Unità	Sistema acciaio - calce e canapa	Sistema tradizionale
CO ₂ -eq Fossile	kg	27,9	58,2
CO ₂ -eq Biogenico	kg	2,26	1,75
CO ₂ -eq Uso del suolo	kg	1,4E-3	0,13
CO ₂ -eq Assorbito	kg	-47,94	-3,52
Totale CO₂-eq	kg	-17,78	56,56

Tabella 6.2 Confronto sistemi con metodo GGP

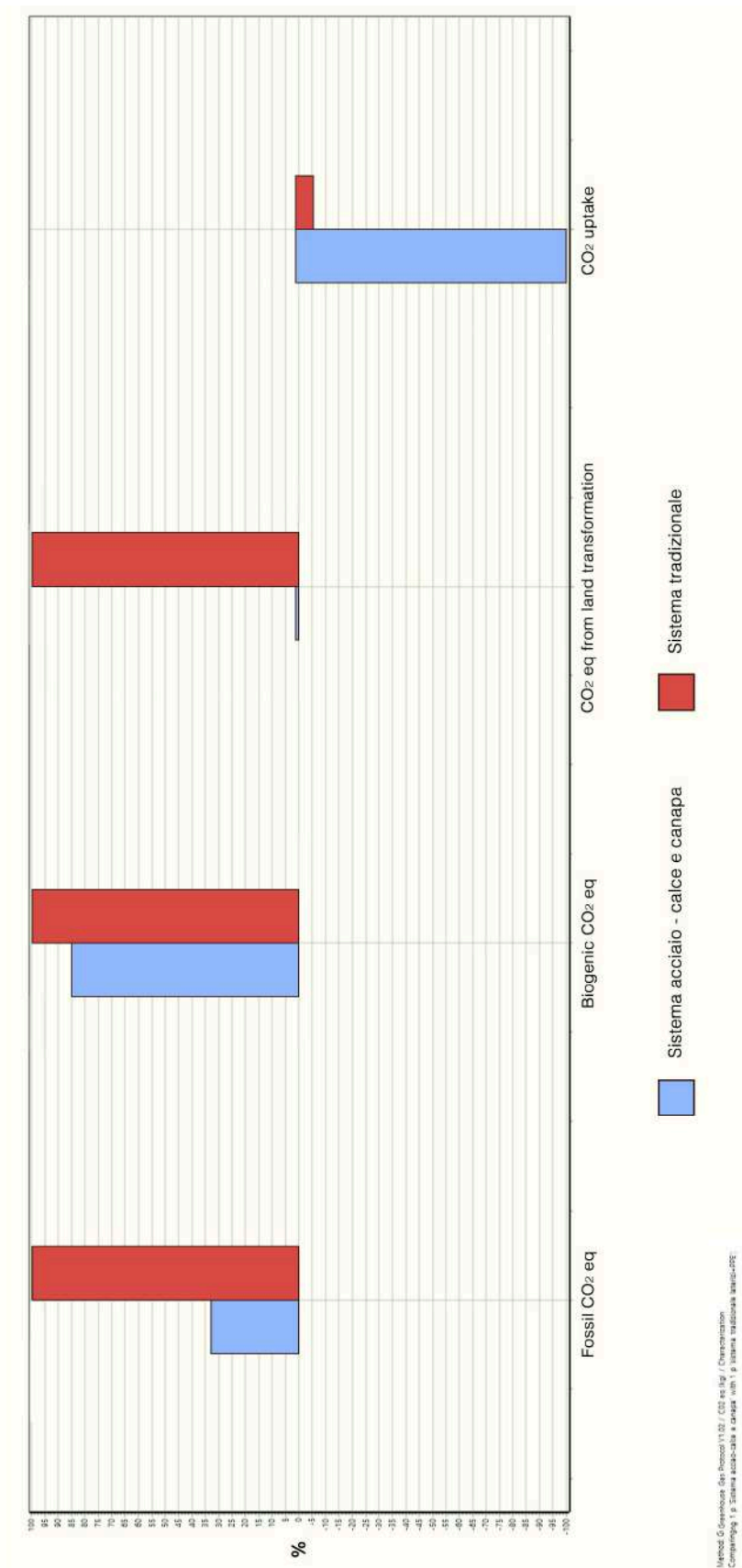


Fig 6.8 Bilancio in scala percentuale CO₂ dei sistemi con metodo GGP

6.7.3 EPD (2013)

Secondo il modello EPD (2013) le categorie di impatto ambientale da analizzare sono le seguenti:

- Potenziale di acidificazione ($\text{SO}_2\text{-eq}$);
- Potenziale di eutrofizzazione ($\text{PO}_4\text{-eq}$);
- Potenziale di riscaldamento globale ($\text{CO}_2\text{-eq}$);
- Potenziale di creazione di smog fotochimico ($\text{C}_2\text{H}_4\text{-eq}$);
- Potenziale di riduzione dello strato di ozono (CFC-11-eq);
- Potenziale di riduzione delle risorse abiotiche (Sb);
- Potenziale di riduzione delle risorse abiotiche fossili (MJ).

In figura è riportato il confronto per gli impatti delle singole categorie relative ai quattro materiali presenti nell'unità funzionale del sistema, dove si evince che gli impatti riguardano principalmente il riscaldamento globale e la riduzione delle risorse abiotiche fossili.

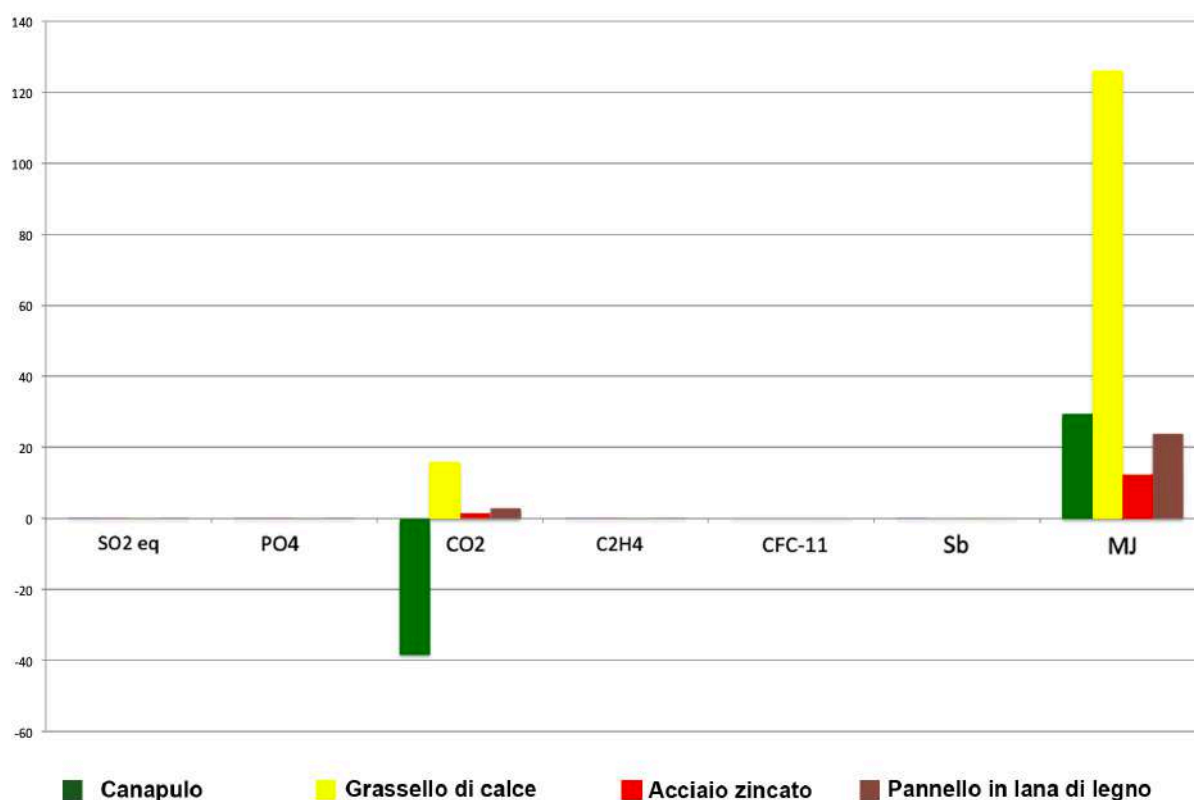


Fig 6.8 Confronto per categorie di impatto dei materiali con metodo EPD (2013)

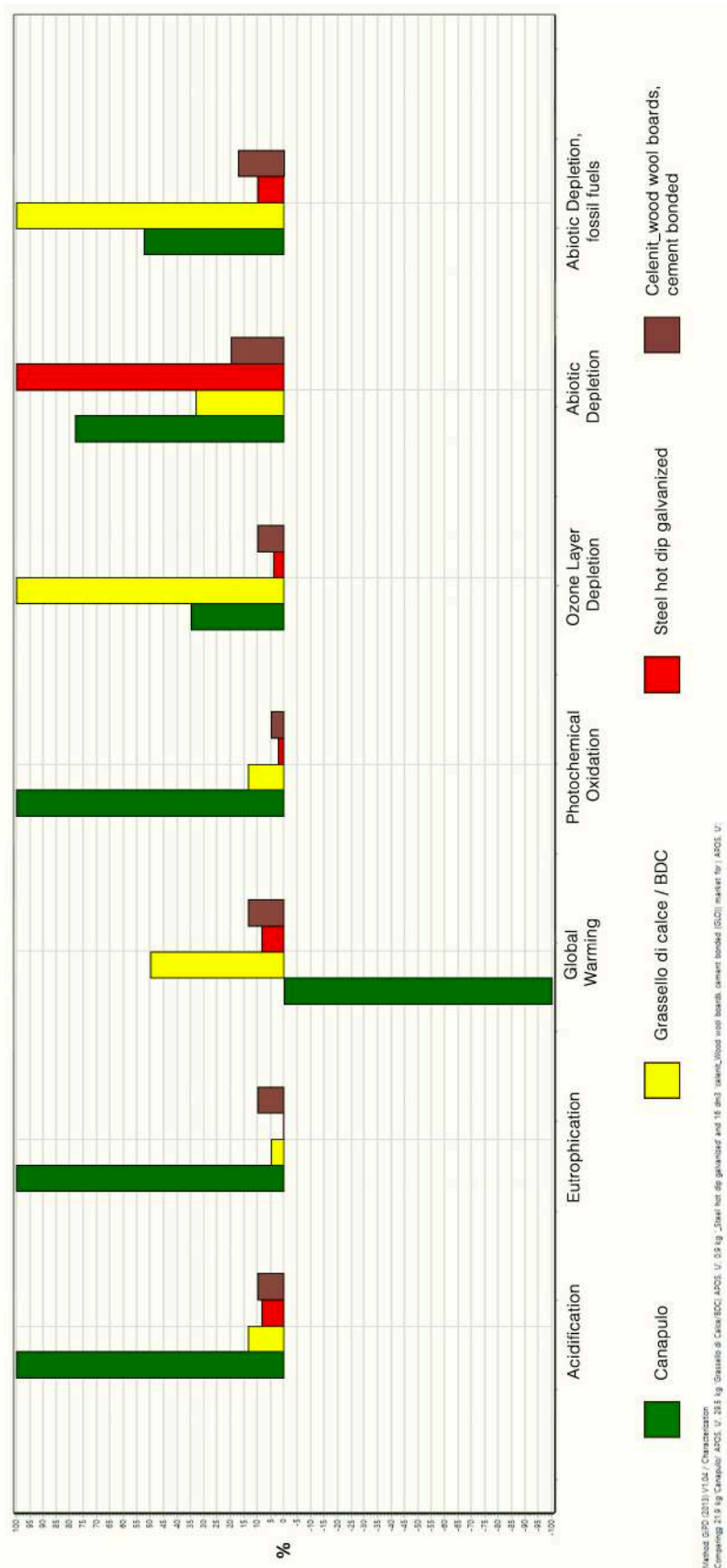


Fig 6.9 Confronto per categorie di impatto in scala percentuale dei materiali con metodo EPD (2013)

Potenziale di acidificazione (SO₂-eq)

Il processo di acidificazione deriva dall'assorbimento dell'anidride carbonica presente in atmosfera da parte delle acque dei fiumi e mari, che provoca a lungo termine l'abbassamento del pH e la conseguente riduzione degli ecosistemi e l'indebolimento delle specie vegetali presenti. Circa un terzo della CO₂ rilasciata dalla combustione di carbone, petrolio e gas si dissolve negli oceani.

Il contributo maggiore deriva dal canapulo, a causa delle emissioni dei trasporti data la distanza dal luogo di approvvigionamento della canapa (Assocanapa - TO) al luogo di lavorazione (CalcePiasco – CN) e della conseguente lavorazione. Il grassello di calce è responsabile di minori emissioni, essendo la cava di estrazione della materia prima in prossimità dello stabilimento di produzione. L'acciaio ha un contributo tendente a zero poiché in quantità molto minore rispetto agli altri materiali. I pannelli in lana di legno sono realizzati in prossimità del luogo di assemblaggio, pertanto sono responsabili di basse emissioni.

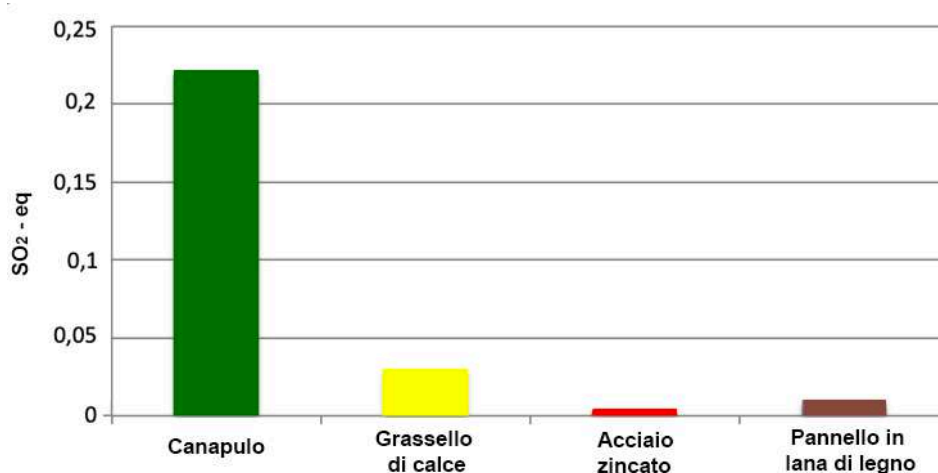


Fig 6.10 Confronto materiali per la categoria di impatto *Acidificazione*

	Unità	Quantità totale
Canapulo	kg SO ₂ eq/UF	0,222
Grassello di calce		0,030
Acciaio zincato		0,004
Lana di legno min.		0,010
Totale		0,266

Tab 6.3 Valori SO₂-eq per la categoria di impatto *Acidificazione*

Potenziale di eutrofizzazione (PO₄-eq)

Questo indicatore è legato all'arricchimento di sostanze nutritive in un ambiente acquatico, in particolare una sovrabbondanza di azoto, fosforo e zolfo, provenienti da fonti naturali o antropiche (fertilizzanti, acque reflue industriali), che causano il conseguente degrado dell'ambiente.

Il canapulo è dunque responsabile del maggior contributo di eutrofizzazione, seppur con valori molto bassi, grazie all'utilizzo quasi nullo di fertilizzanti per la coltivazione della canapa. Il contributo del grassello di calce, acciaio e lana di legno tende a zero, quindi si può definire trascurabile.

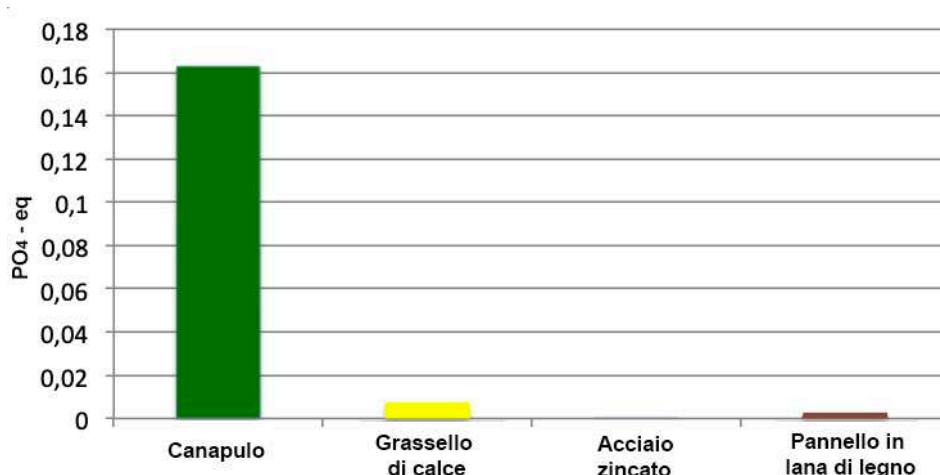


Fig 6.11 Confronto materiali per la categoria di impatto *Eutrofizzazione*

	Unità	Quantità totale
Canapulo	kg PO ₄ eq/UF	0,163
Grassello di calce		0,007
Acciaio zincato		x
Lana di legno min.		0,003
Totale		0.173

Tab 6.4 Valori PO₄-eq per la categoria di impatto *Eutrofizzazione*

Potenziale di riscaldamento globale (CO₂-eq)

Questo indicatore determina il potenziale contributo che una sostanza arreca all'effetto serra, rispetto a quello provocato dalla stessa quantità di anidride carbonica, considerando sia l'attitudine del gas ad assorbire radiazioni infrarosse, sia il tempo di permanenza in atmosfera.

Il potenziale di riscaldamento globale è un valore molto rilevante per il sistema in oggetto, il cui bilancio risulta negativo. Come già mostrato con la metodologia GGP, il canapulo assorbe un'ingente quantità di CO₂, maggiore della somma delle emissioni di cui sono responsabili il grassello di calce, l'acciaio e la lana di legno.

Da questo parametro si evince che il sistema ha un bilancio complessivo di emissioni di anidride carbonica negativo, pari a 23,11 kg CO₂eq assorbita/UF, che si traduce in un impatto positivo per l'ambiente.

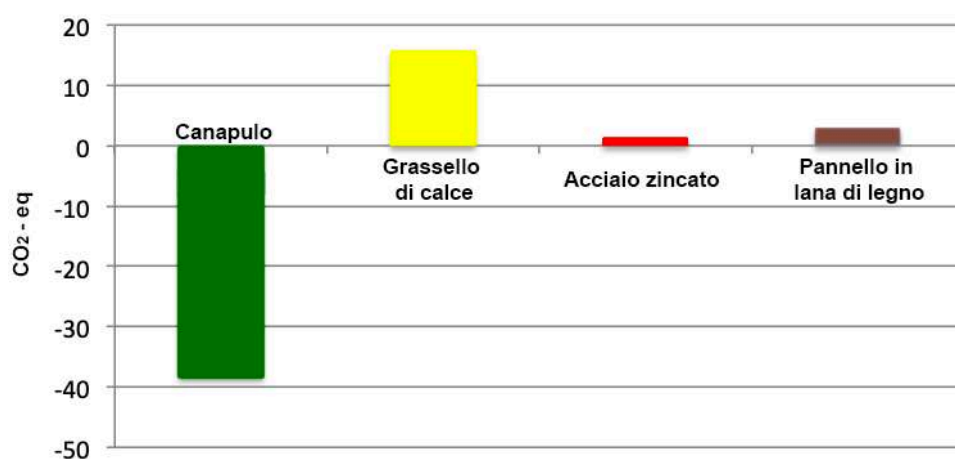


Fig 6.11 Confronto materiali per la categoria di impatto *Riscaldamento Globale*

	Unità	Quantità totale
Canapulo	kg CO ₂ eq/UF	-39,35
Grassello di calce		10,99
Acciaio zincato		1,35
Lana di legno min.		2,90
Totale		-23.09

Tab 6.5 Valori CO₂-eq per la categoria di impatto *Riscaldamento Globale*

Potenziale di formazione di smog fotochimico (C₂ H₄-eq)

Questo indicatore determina il potenziale di formazione di smog fotochimico in atmosfera, i cui componenti sono un insieme di ossidi di azoto, ozono, ossido di carbonio, aldeidi ed idrocarburi. Come per l'acidificazione, il contributo maggiore deriva dal canapulo, a causa della maggiore distanza di approvvigionamento della materia prima dal luogo di lavorazione e delle conseguenti emissioni dovute ai trasporti. Il contributo del grassello di calce, acciaio e lana di legno tende a zero, quindi si può definire trascurabile.

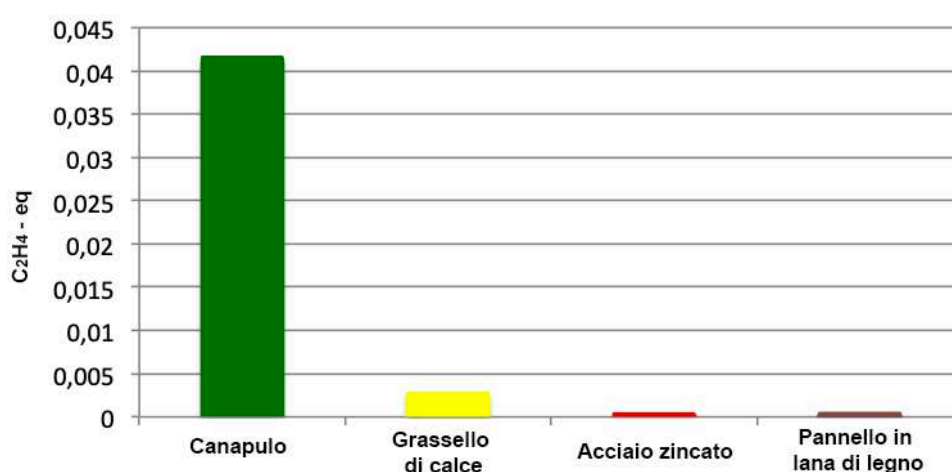


Fig 6.11 Confronto materiali per la categoria di impatto *Smog Fotochimico*

	Unità	Quantità totale
Canapulo	kg C ₂ H ₄ eq/UF	0,042
Grassello di calce		0,003
Acciaio zincato		0,001
Lana di legno min.		0,001
Totale		0,046

Tab 6.6 Valori C₂ H₄-eq per la categoria di impatto *Smog Fotochimico*

Potenziale di riduzione dello strato di ozono (CFC-11-eq)

Questo indicatore determina il potenziale della presenza di sostanze che distruggono lo strato di ozono, i principali responsabili sono i clorofluorocarburi (CFC) e gli idroclorofluorocarburi (HFC). Dai valori si evince che il grassello di calce è il maggiore responsabile, questo valore è da collegare ai forni utilizzati per la cottura del calcare, che pur emettendo basse quantità di CFC-eq, hanno un impatto significativo sull'ambiente. Il contributo del canapulo è molto minore, mentre quello dell'acciaio e della lana di legno tende a zero, quindi si può definire trascurabile.

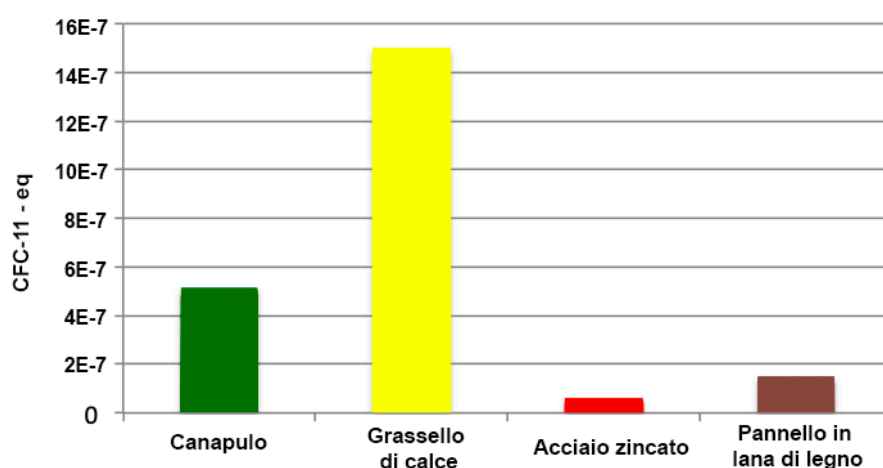


Fig 6.12 Confronto materiali per la categoria di impatto *Riduzione strato di ozono*

	Unità	Quantità totale
Canapulo	kg CFC-11 eq/UF	5,15E-7
Grassello di calce		15E-7
Acciaio zincato		0,6E-7
Lana di legno min.		1,5E-7
Totale		22.2E-7

Tab 6.7 Valori CFC-11 eq per la categoria di impatto *Riduzione strato di ozono*

Potenziale di riduzione delle risorse abiotiche elementari (Sb)

Questa categoria di impatto riguarda l'impoverimento delle risorse inorganiche, in particolare elementi non rinnovabili, come minerali (ferro, rame, ecc).

L'acciaio zincato risulta avere il valore maggiore di potenziale di esaurimento di risorse abiotiche, essendo una lega composta principalmente da ferro e carbonio, rivestito di zinco, anch'esso elemento chimico non rinnovabile. Essendo presente nell'UF in quantità molto piccola (0,9 kg/UF) e provenendo in maggior parte da riciclo, ha un impatto confrontabile con quello del canapulo, che E' da specificare che i valori in kg di Sb-eq tendono a zero, l'impatto si può dunque considerare trascurabile.

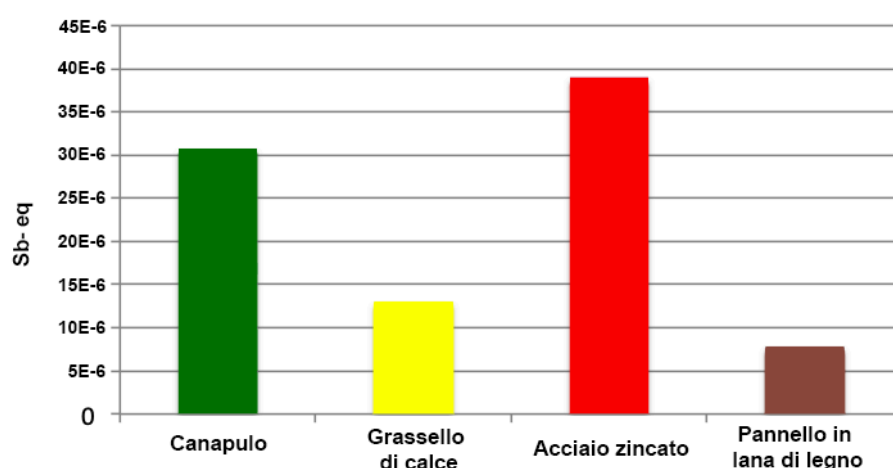


Fig 6.13 Confronto materiali per la categoria di impatto *Depauperamento abiotico*

	Unità	Quantità totale
Canapulo	Sb eq/UF	31E-6
Grassello di calce		13E-6
Acciaio zincato		39E-6
Lana di legno min.		7,8E-6
Totale		90.5E-6

Tab 6.8 Valori Sb eq per la categoria di impatto *Depauperamento abiotico*

Potenziale di riduzione delle risorse abiotiche fossili (MJ)

Questa categoria di impatto riguarda l'impoverimento delle risorse inorganiche, in particolare combustibili fossili non rinnovabili, quali petrolio e carbone.

Il grassello di calce risulta essere il materiale con il maggiore potenziale di esaurimento di risorse abiotiche fossili, responsabile è il carbone necessario ad alimentare i forni per la cottura del calcare. L'acciaio contribuisce per una bassa quantità per via della piccola quantità presente all'interno dell'unità funzionale.

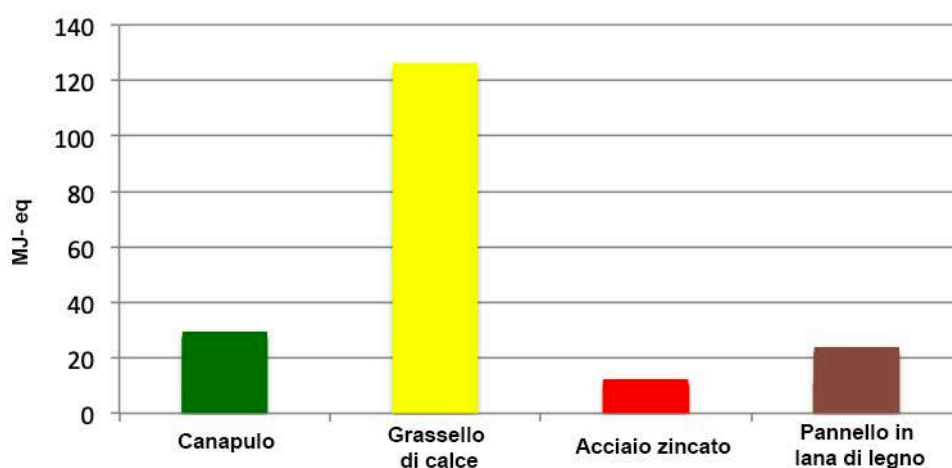


Fig 6.14 Confronto materiali per la categoria *Depauperamento abiotico, fossile*

	Unità	Quantità totale
Canapulo	MJ eq/UF	29,4
Grassello di calce		126
Acciaio zincato		12,3
Lana di legno min.		23,8
Totale		191,5

Tab 6.9 Valori MJ eq per la categoria di impatto *Depauperamento abiotico*

6.7.4 EPD (2013) – Confronto con sistema tradizionale

Si confronta il sistema acciaio calce e canapa con il sistema tradizionale costituito da laterizio e pannelli in polistirene espanso, che garantisce gli stessi valori di trasmittanza pari a $U = 0,158 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (valore limite $U=0,25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ secondo il D.M. Requisiti Minimi 26/06/2015).

Si confronta il sistema acciaio – calce e canapa con il sistema appena descritto e si evince che i valori di maggiori emissioni sono relativi al potenziale di riscaldamento globale e al depauperamento di risorse abiotiche fossili, di cui sono responsabili i trasporti, il ciclo di produzione dei laterizi e dei pannelli in polistirene espanso, derivato del petrolio. Da una prima analisi si evince che il sistema che utilizza la miscela di calce e canapa ha impatti minori e risulta essere la più ecocompatibile. Si riportano in seguito i dettagli relativi ad ogni categoria di impatto.

	Unità	Sistema acciaio - calce e canapa	Sistema tradizionale
Acidificazione	SO ₂ -eq	0,289	0,422
Eutrofizzazione	PO ₄ -eq	0,178	0,056
Riscaldamento globale	CO ₂ -eq	-23,09	56,56
Smog fotochimico	C ₂ H ₄ -eq	4,64 E-2	4,24E-2
Riduzione strato di ozono	CFC-11-eq	3,14E-6	5,01 E-6
Depauperamento abiotico	Sb-eq	1,05E-4	1,41E-4
Depauperamento abiotico, fossile	MJ-eq	304	963

Tabella 6.10 Confronto sistemi con metodo EPD (2013)

Potenziale di acidificazione (SO₂-eq)

Il processo di acidificazione deriva dall'assorbimento dell'anidride carbonica presente in atmosfera da parte delle acque dei fiumi e mari, che provoca a lungo termine l'abbassamento del pH e la conseguente riduzione degli ecosistemi e l'indebolimento delle specie vegetali presenti. Circa un terzo della CO₂ rilasciata dalla combustione di carbone, petrolio e gas si dissolve negli oceani.

Il sistema con isolamento in polistirene espanso risulta avere un maggiore potenziale di acidificazione, essendo realizzato attraverso la polimerizzazione dello stirene, un derivato del petrolio. Il sistema acciaio – calce canapa presenta un 30% in meno di emissioni di SO₂, ma comunque un valore non trascurabile, dato dai trasporti delle materie prime e dalla lavorazione dell'acciaio per realizzare il modulo tridimensionale con funzione di cassero.

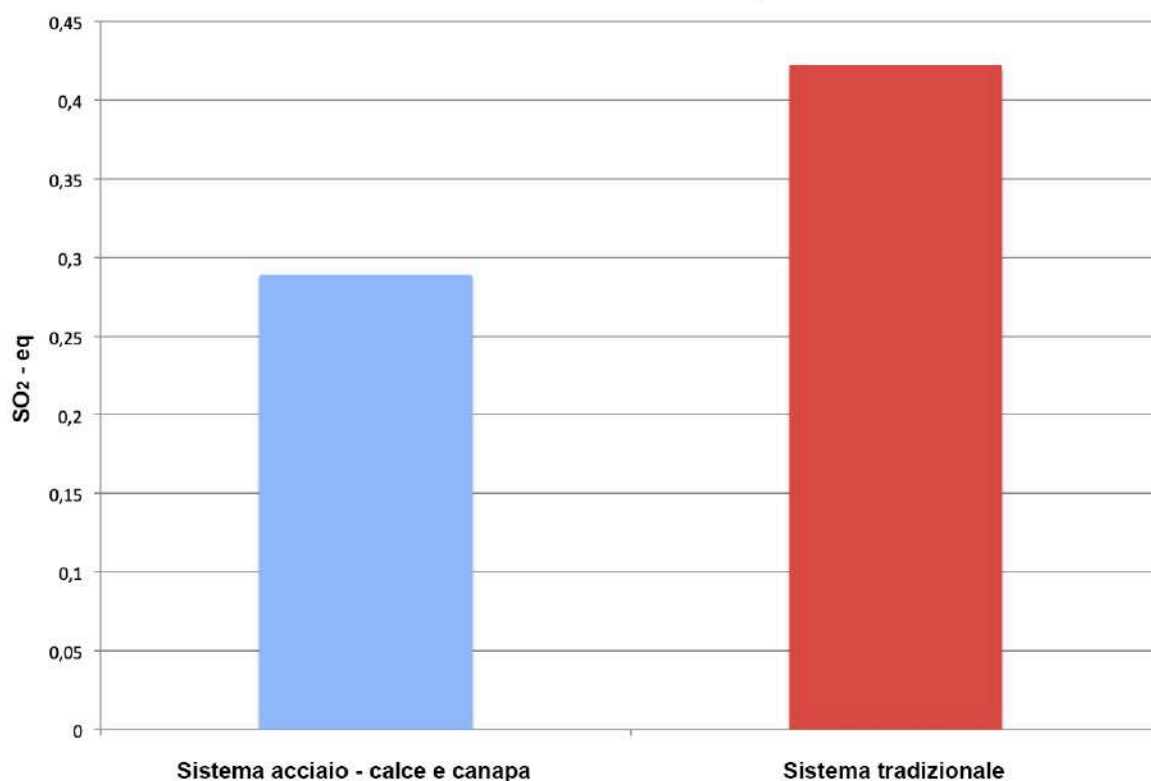


Fig 6.16 Confronto sistemi per la categoria di impatto *Acidificazione*

Potenziale di eutrofizzazione ($\text{PO}_4\text{-eq}$)

Questo indicatore è legato all'arricchimento di sostanze nutritive in un ambiente acquatico, in particolare una sovrabbondanza di azoto, fosforo e zolfo, provenienti da fonti naturali o antropiche (fertilizzanti, acque reflue industriali), che causano il conseguente degrado dell'ambiente.

Il sistema acciaio - calce e canapa è responsabile delle maggiori emissioni di PO_4 , seppur con valori molto bassi, grazie all'utilizzo quasi nullo di fertilizzanti per la coltivazione della canapa. Il sistema tradizionale risulta poco impattante in merito a questo indicatore data la natura minerale dei laterizi e polimerica dell'isolante.

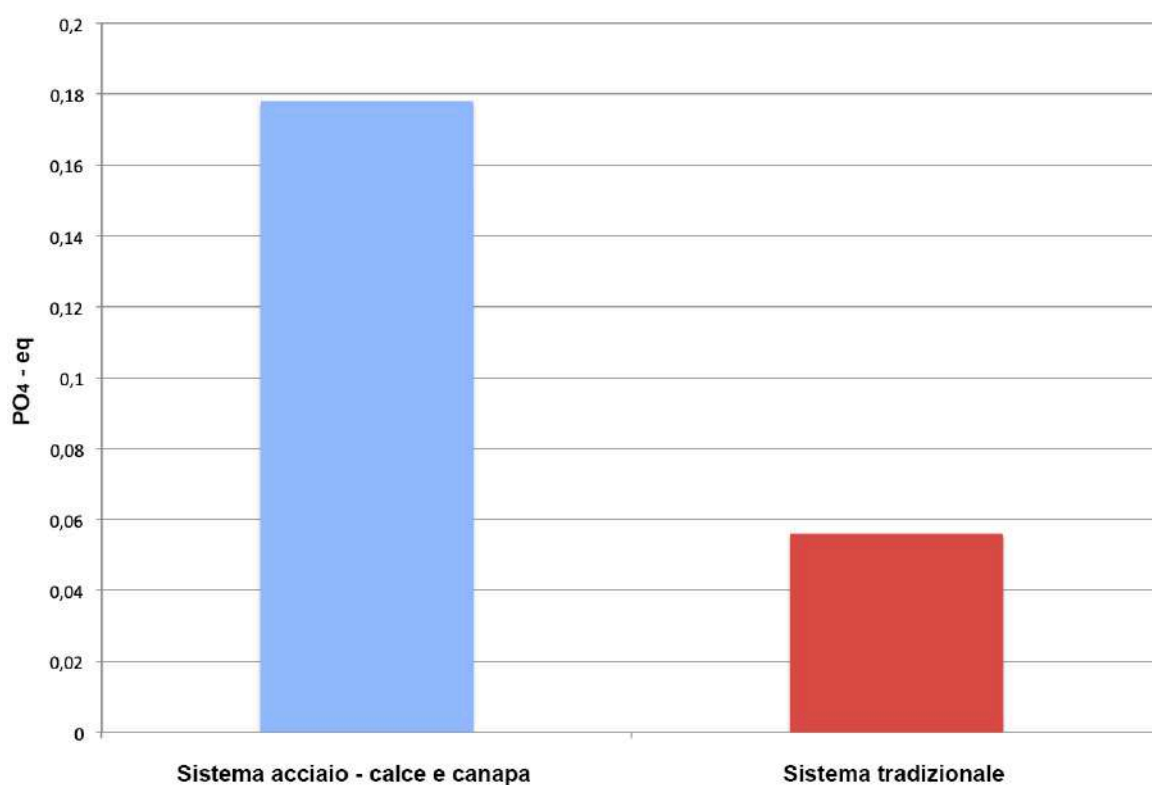


Fig 6.17 Confronto sistemi per la categoria di impatto *Eutrofizzazione*

Potenziale di riscaldamento globale (CO₂-eq)

Questo indicatore determina il potenziale contributo che una sostanza arreca all'effetto serra, considerando sia l'attitudine del gas ad assorbire radiazioni infrarosse, sia il tempo di permanenza in atmosfera. Come già mostrato con la metodologia GGP, il canapulo assorbe un'ingente quantità di CO₂, maggiore della somma delle emissioni di cui sono responsabili il grassello di calce, l'acciaio e la lana di legno, rendendolo un sistema a bilancio negativo di anidride carbonica.

Il contributo complessivo del sistema acciaio – calce canapa risulta quindi ad impatto positivo, mentre quello tradizionale ha un impatto negativo importante sul riscaldamento globale, dato dalla presenza di polistirene espanso, derivato dal petrolio. I processi di produzione del polistirene espanso utilizzano materie prime di origine fossile e derivati da combustione, che comportano alte emissioni di CO₂ in atmosfera, a cui vanno aggiunte quelle emesse nel trasporto e nelle operazioni di raffreddamento dello stirene. La somma di questi consumi rende il sistema con il polistirene espanso uno dei maggiori responsabili della produzione di gas serra.

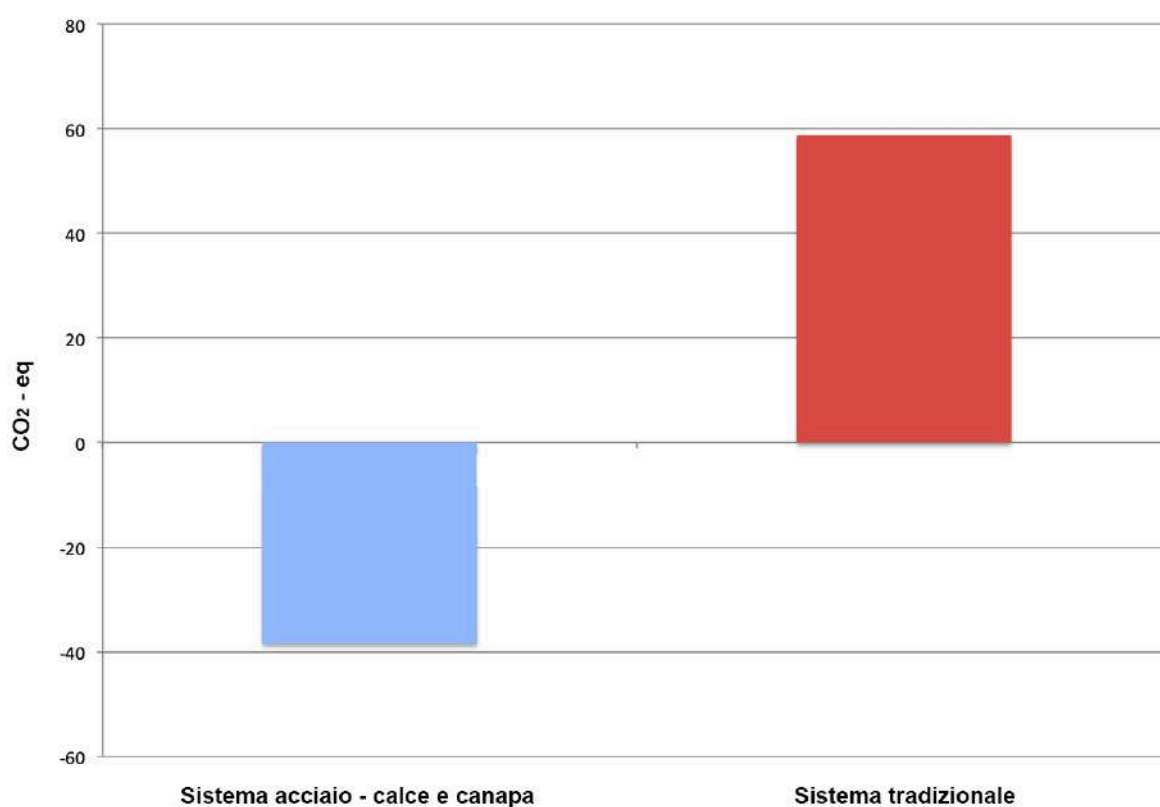


Fig 6.18 Confronto sistemi per la categoria di impatto *Riscaldamento Globale*

Potenziale di creazione di smog fotochimico (C_2H_4 -eq)

Questo indicatore determina il potenziale di formazione di smog fotochimico in atmosfera, i cui componenti sono un insieme di ossidi di azoto, ozono, ossido di carbonio, aldeidi ed idrocarburi. Il sistema acciaio – calce canapa mostra un maggiore potenziale di smog fotochimico, dato dalle emissioni dovute ai trasporti. La distanza di approvvigionamento della materia prima al luogo di lavorazione è un fattore molto rilevante: da Carmagnola (TO) la canapa viene trasportata a Piasco (CN) dove subisce il primo processo di lavorazione per la produzione della miscela di calce e canapa, che viene poi trasportata a Padova per la realizzazione del sistema, percorrendo circa 500 km totali. Nel sistema tradizionale non si considerano i trasposti, essendo privo di contesto specifico, è responsabile tuttavia delle emissioni di C_2H_4 per la presenza di pentano, agente espandente contenuto nel polistirene per consentirne l'aumento di volume, studi scientifici hanno determinato come esso contribuisca all'incremento dello smog fotochimico (Kruse H. Zucal, 1996).

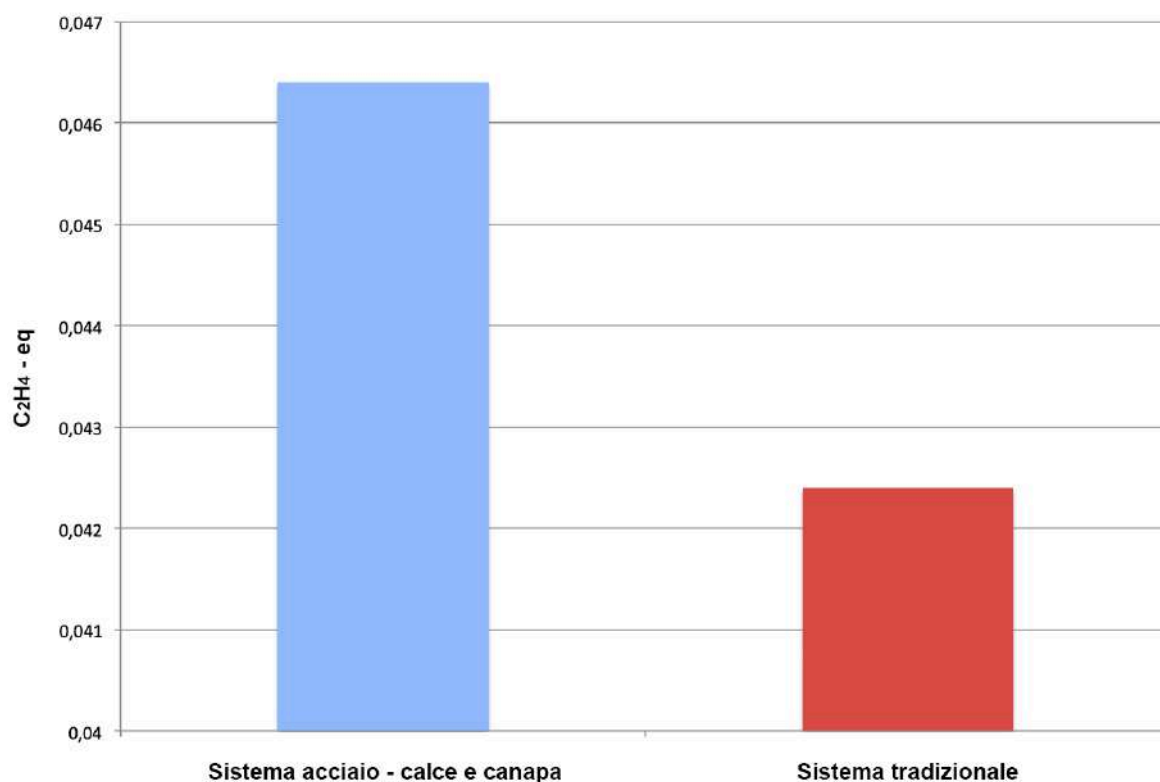


Fig 6.19 Confronto sistemi per la categoria di impatto *Smog fotochimico*

Potenziale di riduzione dello strato di ozono (CFC-11-eq)

Questo indicatore determina il potenziale della presenza di sostanze che distruggono lo strato di ozono, i principali responsabili sono i clorofluorocarburi (CFC) e gli idroclorofluorocarburi (HFC). I due sistemi differiscono di poco nelle emissioni di CFC-11: nel sistema acciaio – calce e canapa si individua come maggiore responsabile delle emissioni il grassello di calce, fattore da collegare ai forni utilizzati per la cottura del calcare, mentre nel sistema tradizionale ai componenti principali del polistirene (benzene, etilene e lo stirololo), che sono corresponsabili della riduzione dello strato di ozono a bassa quota (Kruse H. Zucal, 1996).

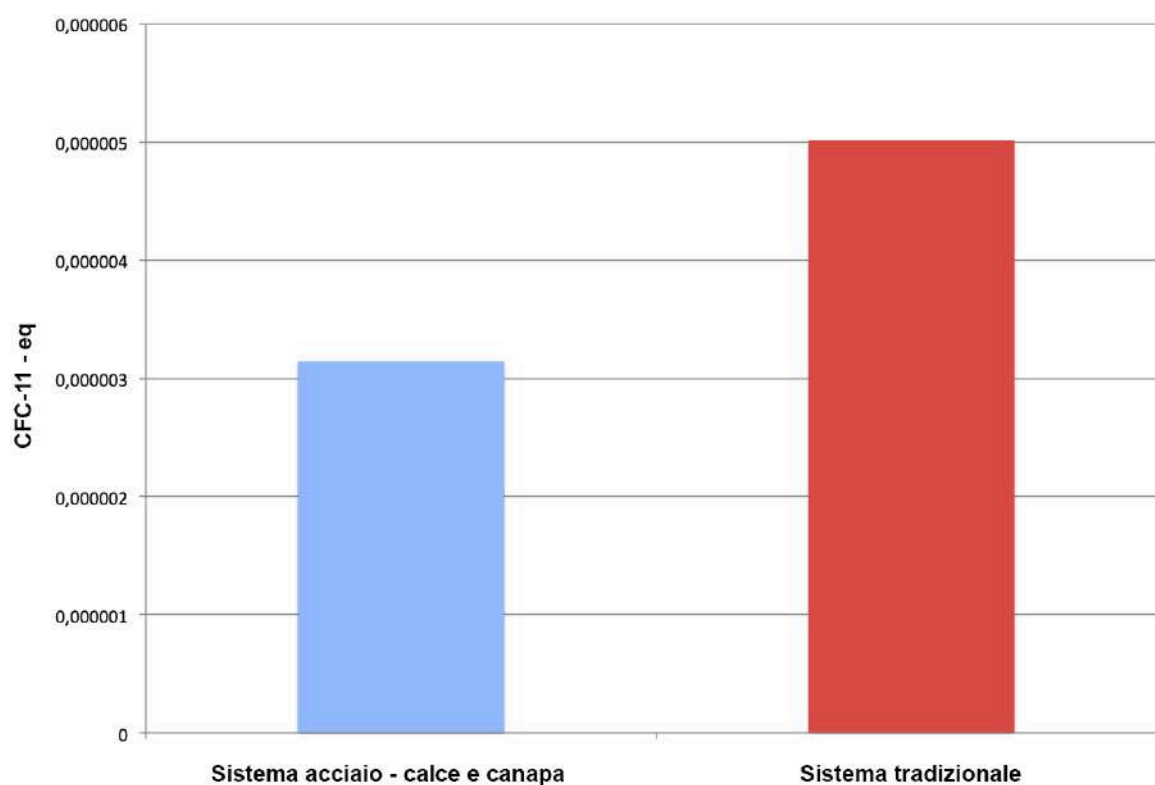


Fig 6.20 Confronto sistemi per la categoria di impatto *Riduzione strato di ozono*

Potenziale di riduzione delle risorse abiotiche elementari (Sb)

Questa categoria di impatto riguarda l'impoverimento delle risorse inorganiche, in particolare elementi non rinnovabili, come minerali (ferro, rame, ecc), terra, rocce.

I due sistemi presentano valori molto limitati e differiscono di una piccola quantità. Il sistema con la miscela in calce e canapa è responsabile dell'utilizzo di risorse abiotiche elementari per la presenza di acciaio, lega di ferro e carbonio, mentre il sistema tradizionale utilizza blocchi in laterizio, prodotto derivato dai minerali argillosi delle rocce sedimentarie.

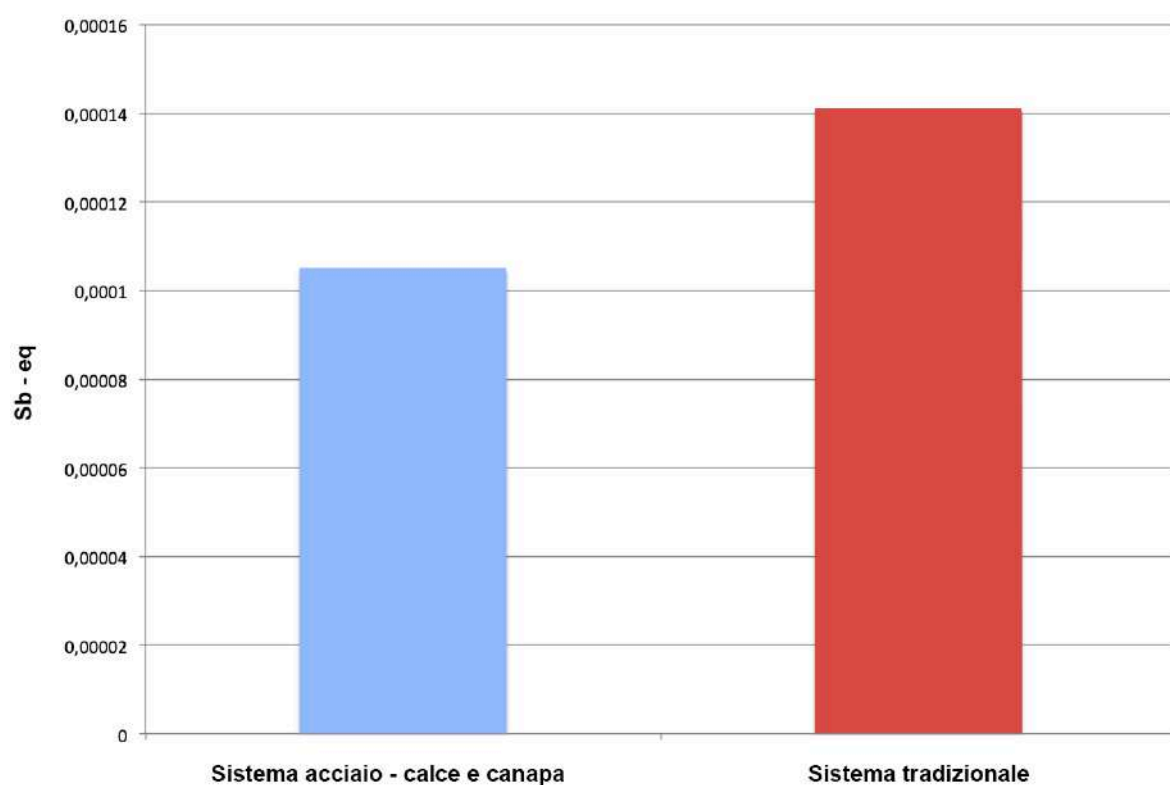


Fig 6.21 Confronto sistemi per la categoria di impatto *Depauperamento abiotico*

Potenziale di riduzione delle risorse abiotiche fossili (MJ)

Questa categoria di impatto riguarda l'impoverimento delle risorse inorganiche, in particolare combustibili fossili non rinnovabili, quali petrolio e carbone.

Il sistema tradizionale ha come isolante il polistirene espanso, che deriva dalla sinterizzazione del petrolio. Il sistema con isolamento in calce e canapa, ha 1/3 in meno delle emissioni perché utilizzando materie prime naturali, ha come soli responsabili di esaurimento di risorse abiotiche fossili i trasporti e il carbone necessario ad alimentare i forni per la cottura del calcare.

Il petrolio è una materia prima limitata, l'obiettivo di limitarne l'uso non si concentra solo sulle alte emissioni di CO₂, ma anche sull'esaurimento della risorsa e le relative aree di estrazione. Le previsioni relative all'industria delle costruzioni in Europa indicano che, se non si pongono in essere riduzioni e soluzioni alternative, aumenterà il consumo del petrolio del 30% entro il 2030, risulta evidente quanto sia importante ridurre la dipendenza da tale risorsa e preferire l'utilizzo di materiali di origine naturale.

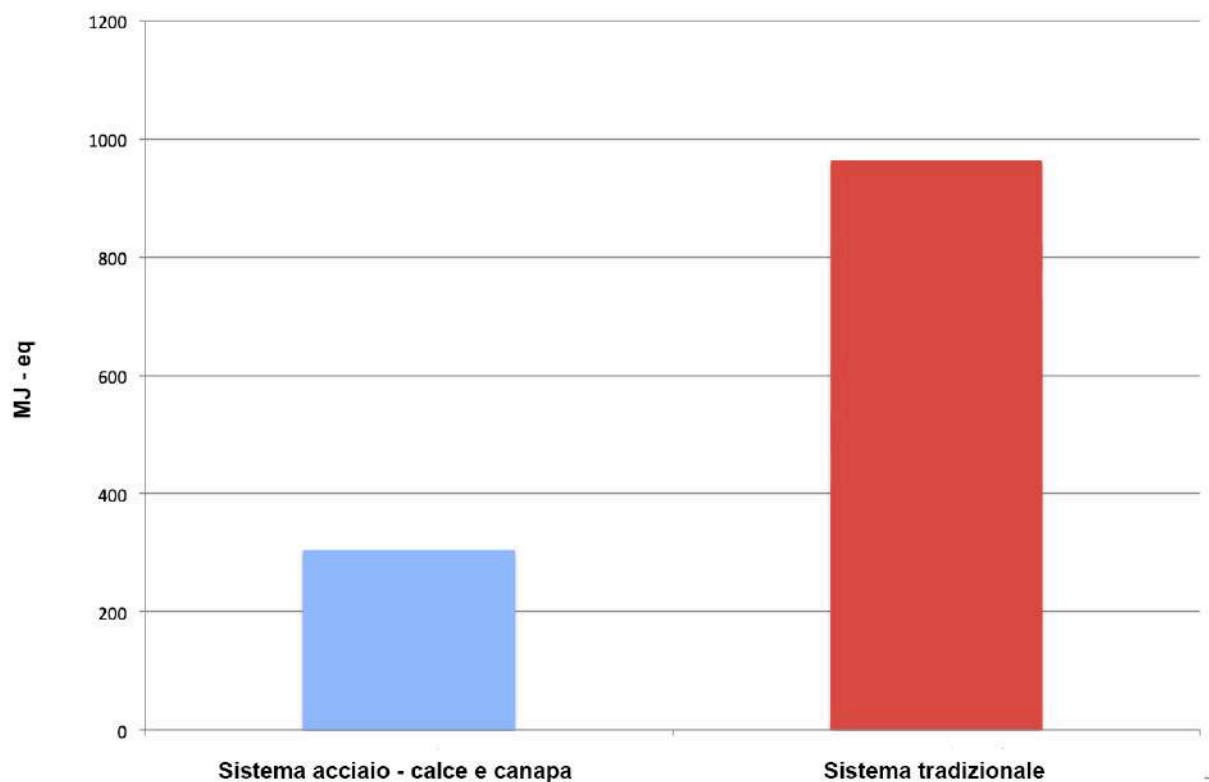


Fig 6.22 Confronto sistemi per la categoria di impatto *Depauperamento abiotico fossile*

7. Conclusioni

Il legame tra *attività dell'uomo* ed *emergenza climatica* è ormai evidente e riconosciuta da numerosi scienziati. Nel settore delle costruzioni di fondamentale importanza è il ruolo del progettista. Il progresso tecnologico permette di avere un'illimitata libertà costruttiva, ma al contempo l'emergenza climatica richiede un'inversione di rotta, con il ritorno ai principi di un'architettura vernacolare, attenta all'ambiente, alle esigenze locali e alla disponibilità di materiali da costruzione presenti sul luogo. Grazie a strumenti quali l'Economia Circolare e l'Analisi del Ciclo di Vita (*Life Cycle Assessment - LCA*), si può pensare ad un nuovo approccio all'architettura che sappia far interagire i vantaggi derivanti dalle conoscenze della modernità con le soluzioni sviluppate dall'uomo nei millenni.

In questo elaborato viene analizzata una nuova soluzione costruttiva che combina tradizione e innovazione, in cui la canapa, pianta millenaria, miscelata con la calce, il più antico legante da costruzione, è gettata all'interno di un cassero di acciaio prefabbricato, leggero, riciclabile, di posa facile e veloce.

Lo studio da me condotto per l'elaborazione di questa tesi si è sviluppato in tre momenti:

- Analisi dei materiali e del sistema;
- Sopralluoghi in cantiere durante la fase di realizzazione del primo edificio realizzato con sistema *acciaio - calce e canapa*;
- Analisi del Ciclo di Vita della soluzione costruttiva tramite la modellazione con il software SimaPro 8.3.

Nella prima fase sono state analizzate le proprietà dei materiali costituenti il sistema in oggetto, studiando i dati già presenti in letteratura, per poi concentrarsi sulle prove specifiche che sono state effettuate sul sistema acciaio – calce e canapa in fase di progettazione, al fine di verificare la coerenza dei dati. Analizzando ogni componente del sistema (cassero in acciaio, pannelli in lana di legno, miscela calce e canapa), se ne evidenziano le eccellenti proprietà, sotto il profilo di benessere abitativo,

sostenibilità ambientale, risparmio energetico ed economico. Il sistema garantisce la riduzione dell'umidità, regolando la temperatura in estate ed inverno, aumenta lo sfasamento termico creando un ambiente sano e vivibile, è ignifugo, riciclabile, riduce le emissioni di CO₂ nell'ambiente e, infine, riduce i costi di riscaldamento e raffrescamento grazie alle ottime qualità di isolamento termico. I progettisti hanno effettuato prove attraverso software specifici di calcolo, quali la verifica di trasmittanza per il calcolo delle dispersioni termiche, la verifica termoigrometrica per la probabilità di formazione di condensa superficiale e interstiziale e la verifica di inerzia termica, tutte con risultati positivi.

In seguito alla fase di studio, sono stati condotti da me personalmente alcuni sopralluoghi in cantiere presso l'edificio in fase di costruzione a Mestrino (PD), il primo fabbricato che utilizza interamente il *sistema acciaio – calce e canapa* per la realizzazione dei muri di tamponamento. Dalle osservazioni condotte si è evidenziata la facilità e la rapidità della posa in opera del sistema: la posa dei moduli di acciaio prefabbricati e il getto della miscela all'interno degli stessi è avvenuto in poco più di un mese da parte di soli tre operatori. Fattori determinanti risultano essere il perfetto schema di montaggio fornito in cantiere, che rende la procedura standardizzata, e il getto della miscela attraverso una specifica macchina a insufflaggio, che non richiede compattazione manuale da parte degli operatori.

Infine è stato realizzato il processo del *sistema acciaio – calce e canapa* attraverso il software SimaPro 8.5, per svolgere l'Analisi del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment – LCA), metodologia supportata da basi scientifiche condivise. Obiettivo dello studio è la valutazione dell'impatto che la soluzione costruttiva risulta avere dall'estrazione delle materie prime alla fase di produzione. L'analisi è stata effettuata confrontando gli impatti relativi ai quattro materiali che compongono il sistema (canapulo, grassello di calce, acciaio e lana di legno) per individuare quanto ogni singolo materiale incida sull'ambiente. E' stato svolto inoltre un confronto con una tipologia costruttiva utilizzata nella zona di Mestrino (PD), costituita da blocchi in laterizio e pannelli in polistirene espanso, che garantisce lo stesso valore di conducibilità termica. L'analisi è stata effettuata per quantificare gli impatti ambientali che il sistema acciaio – calce e canapa apporta all'ambiente e per avere un riscontro oggettivo sul beneficio di utilizzare un isolamento naturale piuttosto che uno sintetico.

Si riportano in sintesi i risultati ottenuti nelle tre fasi di studio:

- Le verifiche teoriche effettuate attraverso software di calcolo sono in linea con i dati presenti in letteratura;
- La fase di cantiere risulta facile e veloce, come ipotizzato in fase di progettazione in relazione alla prefabbricazione degli elementi;
- Dall'Analisi LCA del sistema *acciaio – calce e canapa* si evince che il sistema è *carbon negative*, processo che induce ad una rimozione permanente di CO₂ dall'ecosistema e permette di ottenere un abbassamento consistente di emissioni in atmosfera rispetto ad un sistema tradizionale in laterizio e polistirene espanso.

In particolare ci si sofferma sui principali risultati emersi nella terza fase di studio riguardante l'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) condotto su un'unità funzionale (UF) di 1 m² del sistema con trasmittanza $U = 0,158 \text{ W/m}^2\text{K}$, analizzati con le metodologie Greenhouse Gas Protocol (GGP) e EPD (2013).

Analizzando con il metodo GGP i quattro materiali che compongono l'UF del sistema sistema acciaio – calce e canapa (canapulo, grassello di calce, acciaio e pannelli in lana di legno) i maggiori contributi in termini di emissioni di CO₂ equivalente si verificano per le categorie di CO₂ fossile e CO₂ assorbito:

- Il grassello di calce è il maggiore responsabile del consumo di CO₂ da fonte fossile, che attraverso processi di cottura alimentati da combustibili fossili, si decompone in ossido di calcio rilasciando anidride carbonica, in atmosfera nella misura di circa 17,3 kg CO₂/UF. Una parte di CO₂ viene riassorbita dal grassello di calce durante il processo di carbonatazione, inglobando al suo interno 6,55 kg CO₂/UF presenti in aria, riducendo di circa un terzo l'impatto negativo per l'ambiente.
- Il canapulo è responsabile del consumo di CO₂ fossile principalmente per le fasi di coltivazione e di trasformazione della canapa in canapulo, ottenendo comunque risultati contenuti grazie alla mancanza della fase di irrigazione dei

campi. Parametro di grande importanza è la quantità di CO₂ assorbita dal canapulo durante la fase di crescita della pianta, pari a 40,54 kg/UF, che consente di compensare le emissioni di CO₂ fossile, contribuendo in atmosfera ad un bilancio negativo di CO₂, pari a 38,34 kg CO₂ assorbita/UF.

- L'acciaio risulta avere bassi valori di CO₂ emessa rispetto agli altri materiali, complessivamente pari a 1,36 kg CO₂-eq/UF, per via della ridotta quantità all'interno dell'UF e del contenuto minimo di acciaio riciclato pari al 98,6%. Inoltre l'acciaieria in cui sono realizzati i fili zincati è dotata di efficienti sistemi di abbattimento delle emissioni, che permettono l'aspirazione del diossido di carbonio in tutte le fasi del processo, in particolare l'insufflaggio di carboni attivi.
- I pannelli in lana di legno mineralizzata contribuiscono alle emissioni di CO₂ per la presenza di Cemento Portland che funge da legante, che viene in parte bilanciata dalla presenza del legno, che assorbe anidride carbonica durante la fase di crescita, ottenendo un bilancio complessivo di 2,9 kg CO₂-eq/UF.

Effettuando un calcolo complessivo di CO₂-eq emessa/assorbita dai quattro materiali costituenti il sistema, si evince che contribuiscono ad assorbire CO₂ in atmosfera, con un ammontare di 23,09 kg CO₂ assorbita/UF.

Dal confronto del sistema *acciaio – calce e canapa* con un sistema tradizionale costituito da blocchi forati in laterizio con pannelli in polistirene espanso, si evincono i seguenti risultati:

- Il sistema tradizionale emette 58,2 kg di CO₂ fossile, di cui sono responsabili il ciclo di produzione dei laterizi e dei pannelli in polistirene espanso, derivato dal petrolio, mentre il sistema acciaio – calce e canapa è responsabile per 27,9 kg CO₂ fossile/UF, derivanti dalla produzione di grassello di calce, trasformazione della canapa, lavorazione dell'acciaio, dalla presenza di cemento Portland all'interno dei pannelli in lana di legno e dall'insufflaggio della miscela all'interno dei casseri.

- Il sistema acciaio – calce e canapa assorbe dall'atmosfera un'ingente quantità di anidride carbonica, pari a 47,94 kg CO₂/UF, mentre nel sistema con isolamento sintetico, non avendo materiale naturale, la CO₂ assorbita tende a zero, rendendo l'impatto complessivo della parete 3,5 volte più alto: il sistema tradizionale emette in atmosfera 56,56 kg CO₂ eq/UF mentre il sistema con il biocomposito di calce e canapa assorbe complessivamente 17,78 kg CO₂ eq/UF.

Analizzando con il metodo *EPD (2013)* i quattro materiali che compongono l'UF del sistema *acciaio – calce e canapa* (canapulo, grassello di calce, acciaio e pannelli in lana di legno) si indagano le categorie di impatto relative: *Acidificazione, Eutrofizzazione, Riscaldamento Globale, Creazione di Smog fotochimico, Riduzione Strato di Ozono, Depauperamento delle Risorse Abiotiche Elementari e Risorse Abiotiche Fossili.*

Dall'analisi si evince che le sole categorie di impatto di rilievo possono riguardare il Riscaldamento Globale e il Depauperamento delle Risorse Abiotiche Fossili, in conferma ai risultati ottenuti con la metodologia GGP.

Svolgendo infine un confronto con il metodo *EPD (2013)* del sistema *acciaio – calce e canapa* con un sistema tradizionale costituito da blocchi forati in laterizio con pannelli in polistirene espanso, si evincono i seguenti risultati:

- Il sistema con isolamento in polistirene espanso risulta avere un maggiore potenziale di acidificazione, essendo realizzato attraverso la polimerizzazione dello stirene, un derivato del petrolio. Il sistema *acciaio – calce e canapa* presenta un 30% in meno di emissioni di SO₂, ma comunque un valore non trascurabile, dato dai trasporti delle materie prime e dalla lavorazione dell'acciaio per realizzare il modulo tridimensionale con funzione di cassero.
- Il sistema tradizionale emette in atmosfera emissioni di CO₂ eq/UF superiori 3 volte e mezzo rispetto al *sistema acciaio – calce e canapa.*

- Il potenziale di risorse abiotiche elementari è molto limitato e i due sistemi differiscono di una piccola quantità: il sistema con la miscela di calce e canapa è responsabile dell'utilizzo di risorse abiotiche elementari per la presenza di acciaio, lega di ferro e carbonio, mentre il sistema tradizionale utilizza blocchi in laterizio, prodotto derivato dai minerali argillosi delle rocce sedimentarie.
- Il sistema con isolamento in calce e canapa, ha 1/3 in meno di potenziale di depauperamento di risorse abiotiche fossili, perché utilizzando materie prime di origine organica e minerale ha come soli responsabili di esaurimento di risorse abiotiche fossili i trasporti e il carbone necessario ad alimentare i forni per la cottura del calcare, mentre il sistema tradizionale ha come isolante il polistirene espanso, che deriva dalla sinterizzazione del petrolio, materia prima limitata.

Al termine del mio percorso di ricerca iniziato nel settembre 2019 con lo studio di materiali naturali uniti a tecnologie innovative, ho avuto modo di dimostrare la validità e l'efficacia del *sistema acciaio – calce e canapa* attraverso l'esperienza in cantiere e i risultati ottenuti con l'analisi LCA. Ho verificato inoltre che i sistemi che utilizzano materiali di origine naturale rappresentano un'alternativa più sostenibile rispetto a quelli che impiegano materiali sintetici.

Dai risultati ottenuti posso affermare che, attraverso una buona progettazione e un'architettura attenta ai principi di sostenibilità ambientale, si può contribuire a contrastare il cambiamento climatico globale e a raggiungere la missione della Commissione Europea di rendere l'Europa il primo continente a impatto climatico zero entro il 2050.

Bibliografia

[1] Il Consiglio europeo nomina i nuovi leader dell'UE, su www.consilium.europa.eu, 2 luglio 2019.

[2] Discorso del presidente Charles Michel alla conferenza delle Nazioni Unite sul clima (COP 25), su www.consilium.europa.eu, 2 dicembre 2019

[3] Nazioni Unite – ONU, su salute.gov.it

[4] “Il futuro di tutti noi” - Rapporto della commissione mondiale per l'ambiente e lo sviluppo. Brundtland, 1987

[5] “Che cos'è l'IPCC” – ipccitalia.cmcc.it

[6] Convenzione delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, ec.europa.eu

[7] Protocollo di Kyoto: l'accordo internazionale per contrastare il cambiamento climatico, reteclima.it

[8] *Climate Change 2007 – Gli impatti dei Cambiamenti Climatici, l'Adattamento e la Vulnerabilità* – Sintesi per i decisori politici – Quarto Rapporto di Valutazione

[9] Protocollo di Kyoto, emendamenti di Doha e il lavoro del PE, europarl.europa.eu

[10] Accordo di Parigi, europarl.europa.eu

[11] Green Deal europeo, europarl.europa.eu

[12] 2019 Global Status Report for Buildings and Construction - International Energy Agency (IEA) for the Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC)

[13] “100 materiali per una nuova edilizia” – Rapporto dell'Osservatorio Recycle – Legambiente, 2006

[14] Dizionario Garzanti Linguistica – termine *calce* – *etimologia*

[15] Rattazzi A., *Conosci il grassello di calce? Origine, produzione e impiego del grassello in architettura, nell'arte e nel restauro*, EdicomEdizioni, 2014

[16] Effective Utilization of Alternative Materials in Lightweight Composites, Lucia Kidalova*, Nadezda Stevulova, Eva Terpakova, Marian Helcman

- [17] *Forum Italiano Calce*, forumcalce.it
- [18] Perlett M.A., *Costruire sostenibile con la canapa*, Maggioli Editore, 2020
- [19] Parenti G., *Coltivazione della canapa a scopi produttivi e ambientali in Toscana: valutazione della produzione di fibra in un confronto varietale*, Tesi di laurea in scienze tecnologiche agrarie, Università degli studi di Pisa, 2008
- [20] Daly P., Ronchetti P., Woollwy T., *Hemp Lime Bio-composite as a Building Material in Irish Construction*, 2009
- [21] Sylvie Pretot, Florence Collet*, Charles Garnier, *Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating*, Université Européenne de Bretagne, 2013
- [22] Ip K., Miller A., Life Cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime wall construction in the UK, *Resource, Conservation and Recycling*, 2012
- [23] Arrigoni A., * , Pelosato R., Melia P. , Ruggieri G., Sabbadini S., Dotelli G., *Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks*, *Journal of Cleaner Production*, 2017
- [24] *Canapa e calce in bio-edilizia, applicazioni e proprietà*, canapaindustriale.it, 2014
- [25] MacDougall C., PhD, P.Eng, *Natural Building materials in mainstream construction: lessons from the U.K.*
- [26] Shea A., Lawrence M., Walker P., *Hygrothermal performance of an experimental hemp–lime building*, University of Bat, *Construction and Building Materials*, 2012
- [27] Brzyski , Łagód , Suchorab, Properties of a thermal-insulating wall material based on hemp shives and lime binder
- [28] Pervais, Carbon storage potential in natural fiber composites, *Resource, conservation and Recycling*, 2003
- [29] Pretot S, Collet F and Garnier C (2014) Life cycle assessment of a hemp concrete wall: impact of thickness and coating. *Building and Environment*
- [30] Limetechnology, Tradical® Hemcrete® Information Pack, limetechnology.co.uk

- [31] Caiolo E., *L'integrazione di materiali compositi a base di canapa e calce nell'edilizia nepalese*, Tesi di laurea magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile, Politecnico di Torino, Relatore Arch. Bosia., 2018/2019
- [32] *Muratura in canapa e calce*, archetica.com
- [33] Pèrier, *Isochanvre Technical Document*, Isochanvre Sarl, France, 2001
- [34] Zincatura e edilizia sostenibile – Guida per progettisti e committenti, European General Galvanizer Association, Tom Woolley, 2008
- [35] *Trasmittanza termica U*, la-certificazione.energetica.net
- [36] Verifica termoigrometrica, Wikipedia
- [37] Rizkallah, Achmus, Kaiser – *Bauschäden beim Bauem im Bestand – Schadensursachen und Schadensvermeidung (Danni strutturali negli edifici esistenti – cause dei danni e prevenzione)* – Institut für Bauforschung e.V. Hannover
- [38] *Inerzia termica: cos'è e perché è importante*, Arch. Gaia Mussi, 2020 infobuildenergia.it
- [39] *Il riciclo infinito dell'acciaio, un modello virtuoso di Economia Circolare*, FPA – Fondazione promozione acciaio, 2019
- [40] *Tutto sulla fibra di legno, un isolante termico naturale davvero formidabile*, Faciolla E., 2019, tuttogreen.it
- [41] *Lyfe cycle thinking e valutazioni di sostenibilità*, Cutaia L., enea.it
- [42] Magatti G., *Life Cycle Assessment (LCA): origini, standard normativi e struttura operativa*, Greenreport: economia ecologica e sviluppo sostenibile, Greenreport.it
- [43] Linee Guida Arca per la “Life Cycle Assessment” (LCA), Frattari A., Menapace S., Università degli Studi di Trento, Arca Casa Legno S.r.l.
- [44] Le norme della serie ISO 14000, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, isprambiente.gov
- [45] *EPD – La dichiarazione Ambientale di Prodotto*, epditaly.it
- [46] Baldo G.L. con Marino M. e Rossi S., *Analisi del ciclo di vita LCA : materiali, prodotti, processi*, 2005

[47] Norma ISO 14044:2018, sulla *“Gestione Ambientale – Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida”*.

[48] Norma ISO 14040:2006 sulla *“Gestione Ambientale – Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento”*

[49] Prè, SimaPro Inventory - US Life Cycle Inventory Database. (2012).

[50] Campagnoni S., *Analisi LCA (Life Cycle Assessment) di malte da intonaco per il restauro ed il recupero edilizio*, Tesi di laurea in Ingegneria Edile – Architettura, Università degli Studi di Bologna, Relatore Prof.ssa Franzoni E., 2018/2019

[51] *Laterizi a massa alveolata*, Sicignano E., 2007, arketipomagazine.it

[52] Paoletta A., Cocci Grifoni R., *L'uso del polistirene espanso in edilizia. Riflessioni critiche su un materiale non ecologico*, 2011

[53] *Report Analisi di Ciclo Vita di prodotto – Rapport Analyse du Cycle de Vie de produit – Azienda CalcePiasco Srl – Enterprise CalcePiasco Srl*

[54] *Come abbattere la valanga di emissioni della produzione di acciaio e cemento?*, Codegoni A., 2019

Allegati

Si allegano nelle pagine seguenti le schede tecniche relative ai materiali costituenti il sistema acciaio – calce e canapa:

- **ALLEGATO I:** Scheda tecnica filo d'acciaio zincato;
- **ALLEGATO II:** Scheda tecnica miscela *Calcecanapa® Getto*;
- **ALLEGATO III:** Scheda tecnica pannelli *Celenit N*.



Filo Zincato crudo diam. mm. 2,17/2,23 in rosette - bobine

- Carico di rottura / resistenza a trazione : resistenza > 70 kg. / mm²
- Copertura zinco secondo UNI EN 10244-2 del 03/2003 classe C 85 g/m² min.
- Analisi chimica acciaio secondo schede tecniche specifiche, con analisi di riferimento riconducibili a qualità tipo C4D e C9D secondo norma UNI EN 10016-2
- Tolleranza su diametro del filo come indicato
- Sempre collaudato con la norma EN 10204 3.1

ECOSISM srl Via Rivella, 22 - 35041 Battaglia Terme (PD) - Italy - Tel.: +39 049 9101417 - Fax: +39 049 9114283 - info@ecosism.com - www.ecosism.com

Calcecanapa® Getto è ideale per contropareti e murature massive a base di calce e canapa

DESCRIZIONE

Calcecanapa® Getto è un biocomposto naturale, ecologico, di alta qualità a base di calce e canapa. E' leggero, resistente ma flessibile, naturalmente traspirante, capace di offrire elevato isolamento termo-acustico. Contribuisce efficacemente a fornire un ambiente ad alto comfort abitativo, grazie alla sua leggerezza e soprattutto alle componenti di origine naturale.

Calcecanapa® Getto determina uno sfasamento termico altamente efficiente: in estate il fresco accumulato dall'involucro nelle ore notturne è rilasciato all'interno degli ambienti con ritardo, attenuando il picco di calore.

Calcecanapa® Getto non teme l'attacco di roditori ed insetti.

**DESTINAZIONE
D'USO**

Calcecanapa® Getto si impiega sia nel recupero del costruito che nell'edilizia di nuova costruzione.

E' ideale per la realizzazione di **contropareti isolanti** su struttura esistente, da applicare con casseri (smontabili o a perdere), sia in interno sia in esterno. Si adatta perfettamente a tutte le superfici comunemente utilizzate in edilizia (laterizio, pietrame, cemento, legno, paglia, ecc.) svolgendo un'azione protettiva delle strutture. Nelle nuove costruzioni viene utilizzato come **tamponamento di chiusura** nelle pareti perimetrali, per il miglioramento dell'efficienza energetica e il naturale controllo dell'umidità.

COMPONENTI

- Calce aerea magnesiacca (DL 90-30 S-PL UNI EN 459-1:2010). Legante aereo che assicura lavorabilità e traspirabilità.
- Canapulo mineralizzato. Aggregato leggero ad alto potere isolante.

MISCELAZIONE

Calcecanapa® Getto è un materiale pronto all'uso, non è necessaria alcuna miscelazione o aggiunta.

**PREPARAZIONE
DEL SUPPORTO**

Nel caso in cui si operi su una struttura muraria esistente:

- Su **superfici grezze** (muratura in laterizio, pietra, ecc.), rimuovere l'intonaco pre-esistente, parzialmente o totalmente, specie se tratta di intonaco cementizio, asportare polveri e parti fragili.
- Su **superficie lisce** (murature cementizie, ecc.) applicare un rinzafo a calce.

POSA IN OPERA

Per l'applicazione di Calcecanapa® Getto è necessario realizzare un'orditura lignea, capace di assicurare l'ancoraggio della miscela alla muratura, e un cassero di contenimento temporaneo o permanente.

Successivamente si applica a mano o a macchina in spessore da 10 a 40 cm.

Per dettagli consultare il **Manuale di Posa**.

Calcecanapa® Getto è ideale per contropareti e murature massive a base di calce e canapa

DESCRIZIONE

Calcecanapa® Getto è un biocomposto naturale, ecologico, di alta qualità a base di calce e canapa. E' leggero, resistente ma flessibile, naturalmente traspirante, capace di offrire elevato isolamento termo-acustico. Contribuisce efficacemente a fornire un ambiente ad alto comfort abitativo, grazie alla sua leggerezza e soprattutto alle componenti di origine naturale.

Calcecanapa® Getto determina uno sfasamento termico altamente efficiente: in estate il fresco accumulato dall'involucro nelle ore notturne è rilasciato all'interno degli ambienti con ritardo, attenuando il picco di calore.

Calcecanapa® Getto non teme l'attacco di roditori ed insetti.

**DESTINAZIONE
D'USO**

Calcecanapa® Getto si impiega sia nel recupero del costruito che nell'edilizia di nuova costruzione.

E' ideale per la realizzazione di **contropareti isolanti** su struttura esistente, da applicare con casseri (smontabili o a perdere), sia in interno sia in esterno. Si adatta perfettamente a tutte le superfici comunemente utilizzate in edilizia (laterizio, pietrame, cemento, legno, paglia, ecc.) svolgendo un'azione protettiva delle strutture. Nelle nuove costruzioni viene utilizzato come **tamponamento di chiusura** nelle pareti perimetrali, per il miglioramento dell'efficienza energetica e il naturale controllo dell'umidità.

COMPONENTI

- Calce aerea magnesiacca (DL 90-30 S-PL UNI EN 459-1:2010). Legante aereo che assicura lavorabilità e traspirabilità.
- Canapulo mineralizzato. Aggregato leggero ad alto potere isolante.

MISCELAZIONE

Calcecanapa® Getto è un materiale pronto all'uso, non è necessaria alcuna miscelazione o aggiunta.

**PREPARAZIONE
DEL SUPPORTO**

Nel caso in cui si operi su una struttura muraria esistente:

- Su **superfici grezze** (muratura in laterizio, pietra, ecc.), rimuovere l'intonaco pre-esistente, parzialmente o totalmente, specie se tratta di intonaco cementizio, asportare polveri e parti fragili.
- Su **superficie lisce** (murature cementizie, ecc.) applicare un rinzafo a calce.

POSA IN OPERA

Per l'applicazione di Calcecanapa® Getto è necessario realizzare un'orditura lignea, capace di assicurare l'ancoraggio della miscela alla muratura, e un cassero di contenimento temporaneo o permanente.

Successivamente si applica a mano o a macchina in spessore da 10 a 40 cm.

Per dettagli consultare il **Manuale di Posa**.



CELENIT N

Scheda tecnica



Pannello isolante termico ed acustico, in lana di legno di abete rosso mineralizzata e legata con cemento Portland grigio. Larghezza lana di legno: 3 mm.
Conforme alla norma UNI EN 13168.
Certificato da ANAB-ICEA e natureplus per la ecocompatibilità dei materiali e del processo produttivo.
CELENIT N è certificato PEFC™. Disponibile anche con certificazione FSC®.

Dettaglio bordi

D - BC - BL - B4

Applicazioni

coperture, pareti perimetrali, pareti divisorie, solai, ponti termici, calcestruzzo isolato

Dati tecnici

Normativa	UNI EN 13168								CE
Codice di designazione	WW-EN13168-L2-W1-T1-S2-CS(10)200-CI1 (spessori 15-40 mm) WW-EN13168-L2-W1-T1-S2-CS(10)150-CI1 (spessori 50-75 mm)								
Lunghezza x Larghezza [mm]	2400x600 - 2000x600 - 1200x600								
Spessore [mm]	15	20	25	30	35	40	50	75	
Massa superficiale [kg/m²]	8,0	10,0	11,5	13,0	14,0	16,0	18,0	26,0	
Conducibilità termica dichiarata λ_D [W/mK]	0,065								
Resistenza termica dichiarata R_D [m²K/W]	0,20	0,30	0,35	0,45	0,50	0,60	0,75	1,15	
Resistenza termica R [m²K/W]	0,23	0,31	0,38	0,46	0,54	0,61	0,77	1,15	
Sollecitazione a compressione al 10% di deformazione σ_{10} [kPa]	≥ 200 (spessori 15-40 mm) ≥ 150 (spessori 50-75 mm)								
Resistenza alla diffusione del vapore μ	5								
Calore specifico c_p [kJ/kgK]	1,81 Certificato dall'Università di Bologna - LEBSC no. 809 / rev. 07.05.2009								
Reazione al fuoco	Euroclasse B-s1, d0								
Contenuto in cloruri [%]	$\leq 0,35$								

Dati logistici

Dimensioni [mm]	Pallet	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm	35 mm	40 mm	50 mm	75 mm
pannelli: 2400x600	pannelli per pallet	130		88		64		44	
pallet: 2400x1200	m ² per pallet	187,20		126,72		92,16		63,36	
pannelli: 2000x600	pannelli per pallet	130	110	88	74	64	56	44	30
pallet: 2000x1200	m ² per pallet	156,00	132,00	105,60	88,80	76,80	67,20	52,80	36,00
pannelli: 1200x600	pannelli per pallet	130		88					
pallet: 1200x1200	m ² per pallet	93,60		63,36					

Certificazioni

ISO 9001:2015 no. 1351
ANAB no. EDIL 2009_004
NATUREPLUS no. 1007-1511-134-1
EPD® S-P-00477
FSC® no. ICILA-COC-002789
PEFC™ no. ICILA-PEFCCOC-000117
ICEA no. LEED 2015_001
ICEA no. REC 2015_001





Stoccaggio

I pannelli devono essere trasportati e adagiati su una base piana in un luogo asciutto e pulito, protetti dall'azione diretta dell'umidità. La movimentazione dei pallet in cantiere si eseguirà con la necessaria cura. Urti in corrispondenza degli spigoli delle confezioni possono causare danni ai pannelli.

È importante che si sia previsto lo stoccaggio in un luogo riparato; i pannelli dovranno restare sollevati da terra e assolutamente protetti dall'azione diretta di umidità e agenti atmosferici. Durante la giacenza dei pallet in cantiere, assicurarsi che rimangano chiusi. Al momento della posa in opera i pannelli dovranno risultare assolutamente ben asciutti.



I pannelli CELENIT devono essere posti in opera solo quando il locale e il supporto edilizio risultano asciutti, ovvero dopo aver eseguito tutte le operazioni recanti umidità all'ambiente.

Normalmente i pannelli presentano il logo CELENIT per individuare il lato (denominato "retro del pannello") che deve essere installato verso la struttura. In assenza del logo, sarà possibile riconoscere il verso corretto del pannello in funzione della posizione dello stesso sul pallet: fronte del pannello verso l'alto e retro del pannello verso il basso.

Se i pannelli fossero installati in ambienti indoor, si preveda di condizionare i pannelli al clima ambiente mantenendoli nell'ambiente per qualche giorno. Si eviti un riscaldamento repentino dell'ambiente subito dopo l'installazione.



CELENIT S.p.A.
Pannelli isolanti termici ed acustici
per un'architettura sostenibile

Sede legale:
Via Bellinghiera, 17
35019 Onara di Tombolo (PD) Italia
P.IVA/C.F.: 00211210281

Contatti:
Tel. +39 049 5993544
assistenza@celenit.com
www.celenit.com

Ringraziamenti

Desidero ringraziare la Prof.ssa Elisa Franzoni per aver accettato il ruolo di relatore, per la sua disponibilità e competenza e per i consigli che mi ha fornito durante la stesura della tesi.

Un ringraziamento speciale va alla *Banca della Calce Srl* di Bologna, in particolare al Prof. Andrea Rattazzi, senza il quale questa tesi non sarebbe mai stata realizzata, che mi ha permesso con la sua professionalità e incredibile disponibilità di studiare e approfondire un argomento di grande interesse e attualità. Grazie al Dott. Costantino Polidoro, la Dott.ssa Puccia Coppola e la Dott.ssa Elena Giuntoli per avermi accolto da settembre 2019 con grande calore, dandomi la possibilità di entrare nel mondo del lavoro con entusiasmo, crescendo ogni giorno professionalmente.

Ringrazio la Prof.ssa Alessandra Bonoli, che con i suoi consigli e suggerimenti mi ha permesso di conoscere il mondo dell'Analisi LCA e di sviluppare i dati presenti in questo elaborato.

Ringrazio di cuore Anna, per avermi accompagnato durante l'elaborazione dell'Analisi LCA e la relativa stesura dei dati, supportandomi anche moralmente nei momenti di sconforto.

Ringrazio l'Ing. Luca Rampin, per avermi fornito con grande disponibilità informazioni essenziali per la stesura di questo elaborato e per avermi dato la possibilità di essere presente durante le fasi di realizzazione in cantiere dell'edificio oggetto di studio. Ringrazio inoltre l'Azienda Ecosism S.r.l di Padova, in particolare l'Ing. Marco Manganello e l'Ing. Daniele Pozzan, che mi hanno fornito il materiale richiesto dimostrando grande sensibilità al mio lavoro di ricerca.

Ringrazio tutte le persone che durante questo percorso mi hanno sostenuto e incoraggiato in ogni momento.

Il grazie più grande va alla mia famiglia, che mi ha dato la forza ogni giorno per raggiungere questo stupendo traguardo.