



Ricerca di Sistema elettrico

Componenti edili a base naturale e prestazioni energetiche ottimizzate: studi su componenti-base per l'edilizia, ottimizzati per la climatologia delle regioni meridionali, basati su miscele di fibre naturali e aventi come filler la canapa o le ceneri sottili prodotte dalle centrali termoelettriche

Luprano Vincenza Anna Maria, Donatelli Antonio, Aversa Patrizia

COMPONENTI EDILI A BASE NATURALE E PRESTAZIONI ENERGETICHE OTTIMIZZATE: STUDI SU COMPONENTI-BASE PER L'EDILIZIA, OTTIMIZZATI PER LA CLIMATOLOGIA DELLE REGIONI MERIDIONALI, BASATI SU MISCELE DI FIBRE NATURALI E AVENTI COME FILLER LA CANAPA O LE CENERI SOTTILI PRODOTTE DALLE CENTRALI TERMOELETTRICHE

Luprano Vincenza Anna Maria, Donatelli Antonio, Aversa Patrizia (ENEA)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici.

Progetto: Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici (scuole, ospedali, uffici della PA centrale e locale) mirata a conseguire il raggiungimento della definizione di edifici a energia quasi zero (nZEB).

Obiettivo:: Componenti edili a base naturale e prestazioni energetiche ottimizzate: studi su componenti-base per l'edilizia, ottimizzati per la climatologia delle regioni meridionali, basati su miscele di fibre naturali e aventi come filler la canapa o le ceneri sottili prodotte dalle centrali termoelettriche.

Responsabile del Progetto: Ing. Luciano Terrinoni, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DEI FILLER UTILIZZATI PER GLI IMPASTI.....	6
2.1 CICLO DELLE FLY ASH.....	7
2.2 CICLO DELLA CANAPA.....	9
3 COMPARAZIONE TRA LCA DI MATERIALI A BASE DI FIBRA DI CANAPA E FIBRA MINERALE.....	11
3.1 PRODUZIONE PANNELLI.....	12
3.1.1 <i>Lana di roccia</i>	12
3.2 CARATTERISTICHE TECNICHE DEI MATERIALI INVESTIGATI.....	13
3.3 UNITÀ FUNZIONALE.....	14
3.4 RISULTATI.....	16
3.4.1 <i>Domanda energetica</i>	16
3.4.2 <i>Emissioni di gas serra</i>	17
3.4.3 <i>Eutrofizzazione</i>	18
3.4.4 <i>Acidificazione</i>	18
3.4.5 <i>Potenziale di eliminazione dell’ozono</i>	19
3.5 DISCUSSIONE.....	20
3.6 CONCLUSIONI.....	22
4 MESSA A PUNTO DEGLI IMPASTI.....	23
4.1 LE CENERI VOLANTI.....	24
4.2 LA FIBRA DI CANAPA.....	25
4.3 MISCELAZIONE, LAVORABILITÀ ED ESSICCAZIONE DEGLI IMPASTI.....	27
4.3.1 <i>Impasto di argilla e fly-ash</i>	27
4.3.2 <i>Impasto di argilla e canapa</i>	28
4.4 CARATTERISTICHE DEI CAMPIONI PRODOTTI.....	30
4.5 CONCLUSIONI.....	30
5 CARATTERIZZAZIONE TERMICA E MECCANICA DEGLI IMPASTI MESSI A PUNTO.....	31
5.1 TIPOLOGIA DI IMPASTI IMPIEGATI.....	31
5.2 MISURA DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA.....	31
5.2.1 <i>Metodo Hot Disk</i>	32
5.2.2 <i>TCi C Therm</i>	32
5.2.3 <i>Metodo piastra calda con anello di guardia e termoflussimetro</i>	33
5.2.4 <i>Isomet</i>	33
5.2.5 <i>Risultati</i>	34
5.3 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI PROVINI.....	35
6 CONCLUSIONI.....	37
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	39
8 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	41
9 ALLEGATI.....	42
9.1 ALLEGATO 1 – REPORT DEI TEST DI COMPRESSIONE.....	43

Sommario

Obiettivo di questo studio è la messa a punto di impasti in laterizio innovativo che abbiano migliori prestazioni dal punto di vista energetico, che siano più sostenibili riutilizzando scarti di altri processi industriali del territorio (simbiosi industriale), e che siano in grado di contribuire al miglioramento del comfort abitativo in edifici pubblici e privati.

Fondamentale ai fini dello sfruttamento industriale dei risultati di questo studio è stata la definizione di un modello di filiera/settore per la commercializzazione realizzabile localmente ed eventualmente riproducibile e/o adattabile ad altre aree mondiali con caratteristiche climatiche simili. Infatti la transizione verso un nuovo modello di economia è una necessità per tutti i Paesi, ma ancora di più per l'Italia povera di materie prime e con una forte industria manifatturiera che necessita di approvvigionamenti di risorse che incidono fino al 60% sul prezzo finale dei prodotti

Per la messa a punto di nuove formulazioni di impasti per la produzione di laterizi ecosostenibili ci si è focalizzati sull'utilizzo di materiali da scarti industriali e di natura vegetale. In particolare lo studio è stato focalizzato sul riutilizzo di scarti inorganici provenienti da centrale termoelettrica (fly ash) e di scarti organici provenienti da coltivazioni agricole (canapa), potendo contare su cospicue risorse locali del territorio pugliese.

La ricerca ha tenuto in considerazione tutto il processo produttivo dei materiali e dei componenti, anche in termini di economicità di produzione, secondo un'attenta valutazione tanto delle materie prime impiegate (e dei rifiuti "recuperati") che delle tecniche e delle tecnologie di produzione.

I risultati ottenuti dalle sperimentazioni condotte presso i laboratori PROMAS-MATAS del C.R. ENEA di Brindisi, sono incoraggianti circa l'impiego della tipologia di scarti selezionati per l'ottenimento di impasti in laterizio da impiegare nel settore dell'edilizia, confermando che il riciclaggio degli scarti industriali ed urbani nelle materie prime argillose è teoricamente utile sia per chi li produce (smaltimento corretto di materiali ingombranti ed inquinanti) sia per i produttori di laterizi (riduzione degli oneri di approvvigionamento di materie prime, risparmi energetici, migliori prestazioni tecnologiche in alcuni casi).

Inoltre, la prossimità assicurata dalla provenienza locale degli scarti consente una riduzione degli oneri di trasporto, altrimenti non trascurabili e che inciderebbero in modo considerevole sui costi globali di produzione. In particolare, la fibra ottenuta dalla canapa rappresenta un interessante materiale alternativo ai tradizionali materiali isolanti per i climi mediterranei.

1 Introduzione

È risaputo che gli edifici sono responsabili di una parte significativa di emissioni di gas serra, principalmente CO₂, che alterano il clima del pianeta. Si stima che gli edifici siano responsabili di oltre il 40% dell'energia globale utilizzata sia nei paesi sviluppati che in quelli in via di sviluppo. In termini assoluti, il quarto rapporto di valutazione dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) stima che le costruzioni, relativamente alle emissioni di gas serra, hanno prodotto circa 8,6 milioni di tonnellate di CO₂ equivalenti nel 2004. Rinnovando gli edifici secondo alti standard di efficienza energetica possiamo dimostrare che azioni di mitigazione del cambiamento climatico e miglioramenti della qualità della vita possono andare di pari passo. Il patrimonio edilizio italiano ed europeo, con il suo mix unico di architettura storica e moderna costituisce al contempo una sfida importante e una significativa opportunità [1].

La performance degli edifici dipende da un ampio numero di fattori, ad esempio le performance del sistema di riscaldamento utilizzato e dell'involucro edilizio, le condizioni climatiche, le caratteristiche comportamentali degli utenti (es. tipiche temperature mantenute all'interno). I dati raccolti sui livelli di consumo associabili al riscaldamento dimostrano come il maggiore potenziale di risparmio si accompagni agli edifici più vecchi, con l'eccezione di alcuni edifici risalenti agli anni sessanta che spesso risultano essere persino peggiori, in termini di dispendio energetico, dei loro equivalenti risalenti a periodi precedenti [2].

Il futuro delle costruzioni passa per l'innovazione ambientale. E nella prospettiva dell'economia circolare oggi è davvero possibile un rilancio del settore che permetta di ridurre l'impatto sugli ecosistemi e di spingere, al contempo, la creazione di lavoro e di ricerca applicata [3].

Per il mercato italiano della produzione di laterizi, l'introduzione delle normative in ambito energetico (Cfr. Direttive EPBD ed EPBD Recast con i relativi recepimenti a livello nazionale che sono confluiti nell'attuale D.M. 26/06/2015, comunemente detto "Decreto requisiti Minimi") ha rappresentato un forte stimolo ad innovare materiali e componenti edilizi per garantire prestazioni più elevate in linea con i nuovi standard. Tale processo ha, inoltre, stimolato la ricerca di nuove soluzioni tecnico-costruttive e lo sviluppo di prodotti innovativi ad alte prestazioni in grado di dare risposte efficienti ed efficaci alle differenti specificità delle climatiche nazionali. L'Italia, come è noto, essendo un Paese a clima mediterraneo, si caratterizza per un elevato fabbisogno di energia in regime estivo (raffrescamento) con conseguente diffusione di sistemi di climatizzazione. Le soluzioni costruttive di involucro, pertanto, vanno alla ricerca di laterizi che garantiscano una maggiore resistenza termica (minore trasmittanza) e al contempo un miglior comportamento per i climi mediterranei, ottimizzando le condizioni di benessere termo-igrometrico indoor. Il tutto, naturalmente, con la garanzia di durabilità tipica del laterizio stesso. Sviluppare questa tipologia di nuovi prodotti non può che essere a vantaggio anche delle condizioni di comfort (sia invernale che estivo) ambientale. Inoltre, sulla base del "nuovo" Regolamento Prodotti da Costruzione (CPR 305/2011), in vigore dal luglio 2013, e della strategia Europea "Closing the loop" presentata nel dicembre 2015, ai produttori di materiali viene sempre più favorito e richiesto un incremento della sostenibilità ambientale dei loro prodotti. Nel caso dei prodotti da costruzione questo si traduce anche nella valorizzazione dei residui di altre attività produttive, possibilmente situate nei pressi delle prime, riutilizzandoli, ad esempio, per la produzione di blocchi in laterizio.

Partendo da questi presupposti, obiettivo di questo studio è la messa a punto di impasti in laterizio innovativo che abbiano migliori prestazioni dal punto di vista energetico, che siano più sostenibili riutilizzando scarti di altri processi industriali del territorio (simbiosi industriale), e che siano in grado di contribuire al miglioramento del comfort abitativo da parte degli utilizzatori finali.

Fondamentale ai fini dello sfruttamento industriale dei risultati di questo studio è stata la definizione di un modello di filiera/settore per la commercializzazione realizzabile localmente ed eventualmente riproducibile e/o adattabile ad altre aree mondiali con caratteristiche climatiche simili. Infatti la transizione

verso un nuovo modello di economia è una necessità per tutti i Paesi, ma ancora di più per l'Italia povera di materie prime e con una forte industria manifatturiera che necessita di approvvigionamenti di risorse che incidono fino al 60% sul prezzo finale dei prodotti.

In questo scenario ricerca ed eco-innovazione sono fondamentali per rafforzare la competitività in chiave sostenibile. L'economia circolare si focalizza sulla 'chiusura del ciclo produttivo' attraverso l'uso efficiente delle risorse, la minimizzazione delle perdite, la riduzione dei consumi, l'eco-progettazione e la produzione sostenibile. E, dove possibile, sull'uso di risorse rinnovabili, di materiali riciclati e l'estensione della vita dei prodotti. Attraverso questo impegno, ovvero nell'utilizzo di materie prime rinnovabili, nel riciclo e nella decarbonizzazione del ciclo dell'energia, l'efficienza energetica in Europa è migliorata del 20% negli ultimi 20 anni. Il legislatore nazionale ha, inoltre, introdotto negli ultimi anni limiti stringenti per il consumo di energia, anche in relazione alla climatizzazione estiva, focalizzandosi, nella fase iniziale, sull'involucro edilizio che riceve gli apporti solari non solo dagli elementi vetrati ma anche dagli elementi opachi (murature, solai e altre strutture di copertura). Particolare attenzione è stata posta in questo studio alle problematiche relative ai climi mediterranei.

Per la messa a punto di nuove formulazioni di impasti per la produzione di laterizi ecosostenibili ci si è focalizzati sull'utilizzo di materiali da scarti industriali e di natura vegetale.

In particolare è stato studiato il riutilizzo di scarti inorganici provenienti da centrale termoelettrica (ceneri volanti (fly ash)) e di scarti organici provenienti da coltivazioni agricole (canapa).

Data la presenza nel territorio pugliese di una realtà industriale importante, come la centrale termoelettrica a Cerano (Enel Federico II), avente un cospicuo impatto ambientale, si è deciso di utilizzare le ceneri volanti derivanti dalla combustione di carbone prodotte in questa centrale per gli impasti dei laterizi.

Sono state altresì scelte le fibre di canapa come materiale porizzante da aggiungere agli impasti per l'alleggerimento dei laterizi, poiché questo materiale viene prodotto in quantità piuttosto importanti nel territorio pugliese e spesso costituisce uno scarto.

Con riferimento alle prestazioni ambientali, sono state quindi studiate soluzioni in grado di ridurre il consumo di risorse naturali e l'impatto sull'ambiente circostante, di incrementare il ricorso a materie prime seconde e o di scarti di produzione per la realizzazione delle miscele, di contenere sensibilmente i trasporti, di minimizzare l'inquinamento atmosferico e il consumo di energia e acqua per la fase di produzione e dismissione finale.

La ricerca ha tenuto in considerazione tutto il processo produttivo dei materiali e dei componenti, anche in termini di economicità di produzione, secondo un'attenta valutazione tanto delle materie prime impiegate (e dei rifiuti "recuperati") che delle tecniche e delle tecnologie di produzione.

A questo scopo è stata applicata la metodologia di analisi del ciclo di vita (LCA – Life Cycle Assessment) per la valutazione, coerente con finalità di protezione ambientale, degli impatti sull'ambiente, non solamente della fase produttiva dei nuovi materiali e componenti, ma anche dei differenti possibili utilizzi e dello smaltimento finale ("dalla culla alla tomba").

2 Descrizione dei filler utilizzati per gli impasti

La sperimentazione è stata rivolta alla progettazione di nuove soluzioni per la realizzazione e valutazione di mattoni innovativi e sostenibili. Nella valutazione sono stati quindi presi in esame additivi

inorganici ed organici di scarti industriali, di produzione o di provenienza locale quali ad esempio le ceneri prodotte dalla combustione del carbone e prodotti e sottoprodotti da coltivazioni agricole locali.

Come è noto le attività industriali generano una certa quantità di rifiuti o scarti da produzione che pongono il problema del loro corretto smaltimento e del loro impatto ambientale. Per questo motivo negli ultimi decenni gli sforzi di un sistema economico e ambientale si sono concentrati per porre soluzioni sul riutilizzo delle scorie di produzione, in modo particolare in altri processi produttivi, trasformando i rifiuti in vera e propria risorsa. Non meno importante è l'aspetto relativo alla salute dell'uomo nell'impiego di questi materiali, sia durante la produzione e posa in opera, sia durante l'intera permanenza nelle pareti opache degli edifici. Data la presenza nel territorio pugliese di realtà industriali importanti e con forte impatto ambientale, come la centrale termoelettrica di Cerano (Enel Federico II), e l'impianto di lavorazione e trasformazione della canapa (South Hemp) a Crispiano, in questo rapporto tecnico si è deciso di analizzare approfonditamente le ceneri volanti e le fibre di canapa come additivi all'interno degli impasti per laterizi. L'impiego di questi materiali è quindi stato studiato in dettaglio nei successivi paragrafi.

2.1 Ciclo delle fly ash

Già da diversi decenni i processi termochimici di combustione, gassificazione, termovalorizzazione in Italia hanno ampia diffusione e impiego come valide tecnologie per la produzione di energia elettrica o la valorizzazione energetica di differenti tipologie di rifiuti. Al pari di altri processi, anche questi ultimi generano emissioni gassose e rifiuti liquidi e solidi. Tra questi ultimi si annoverano in particolare:

- scorie o ceneri pesanti, costituite dal residuo non combustibile dei rifiuti, residui metallici e non metallici e da materiale organico incombusto, e rappresentano la frazione più rilevante degli scarti prodotti dal processo di incenerimento. Si tratta nella maggior parte dei casi di rifiuti non pericolosi e su di loro si concentra l'attenzione per sviluppare tecnologie di recupero alternative allo smaltimento in discarica;
- ceneri leggere o volanti (fly ash), che derivano dai trattamenti di depurazione dei reflui gassosi e ceneri di caldaia. Sono rifiuti pericolosi e vengono generalmente smaltite in discarica.

La classificazione dei rifiuti in Italia è regolamentata dal D.Lgs. 152/06, il cui allegato D in particolare attribuisce i differenti codici CER alle varie tipologie di rifiuto, definendo nel contempo il percorso di riuso o stoccaggio cui saranno destinati [4]. Con particolare riferimento alle ceneri leggere, in Italia vengono definite come "rifiuti speciali non pericolosi" se derivanti da carbone o da torba e legno non trattato e vengono identificate rispettivamente con i codici CER 100102 e 100103. Si tratta invece di rifiuto speciale pericoloso se le ceneri leggere provengono dal trattamento di olio combustibile e polveri in caldaia (codice CER 100104).

Ad oggi, la produzione di energia elettrica da fonti non rinnovabili rappresenta ancora una aliquota importante: secondo i dati Terna aggiornati al 2012, tale aliquota costituisce il 72,7% della produzione totale nazionale e viene prodotta in particolare a partire da gas naturale (59,5%), carbone (21,6%) "altri combustibili" solidi (12%), derivati petroliferi (4,3%) e gas derivati da altiforni e acciaierie (2,6%) [5]. Tra questi impianti si annovera la Centrale Federico II dell'ENEL di Cerano, in Brindisi, che produce energia elettrica trasformando l'energia termica generata dai combustibili (carbone, olio combustibile denso e gasolio in fase di avviamento) mediante combustione in caldaia.

In particolare l'energia termica prodotta serve a trasformare l'acqua di processo in vapore. Quest'ultimo viene poi utilizzato come vettore di energia nel ciclo termodinamico e consente l'azionamento delle turbine che trasformano l'energia termica in energia meccanica. Infine alle turbine sono collegati i generatori che trasformano l'energia meccanica in energia elettrica [6]. I rifiuti prevalenti prodotti dalla centrale sono costituiti da ceneri da carbone e dai gessi della desolfurazione fumi, entrambi classificati come non

pericolosi. Questi rifiuti sono già destinati al recupero nell'industria del cemento e dei manufatti per l'edilizia. A tal fine e secondo quanto previsto dal vigente quadro legislativo nazionale e comunitario, l'UB Brindisi ha adottato un sistema di gestione per il Controllo della Produzione di Fabbrica finalizzato al mantenimento del Certificato CE di Conformità delle ceneri leggere secondo la norma UNI EN 450 e UNI EN 12620.

Dopo un periodo iniziale di controlli sui parametri chimico-fisici delle ceneri effettuati sia dal laboratorio chimico di centrale che da un laboratorio esterno certificato, nonché dopo verifiche da parte di un Organismo di Certificazione accreditato, l'impianto ha ottenuto nel 2007 i primi Certificati CE di Conformità alla norme UNI EN 450 e UNI EN 12620, tutt'oggi ancora validi [4].

Le quantità di ceneri prodotte nel 2013 ammontano a circa 524.000 tonnellate di cui circa 29.000 ceneri pesanti e 495.000 ceneri leggere. La tabella 1 riporta nel dettaglio i flussi di ceneri prodotti e con relativo codice CER e destinazione.

Tabella 1. Quantità di rifiuti prodotti nell'impianto termoelettrico Federico II di Cerano (anno 2013).

Descrizione rifiuti derivanti dal processo produttivo	Codice CER	Tipo	Totale quantità prodotta (kg)	Di cui conferite a smaltimento (kg)	Destinazione	Di cui conferite a terzi per recupero (kg)
Ceneri pesanti	10.01.01	NP	28.700.000		R5	34.341.010
Ceneri leggere da carbone	10.01.02	NP	495.470.000		R13 R5	489.030.400
Gesso	10.01.05	NP	166.319.880		R13 R5	168.850.610
Fanghi ITSD	10.01.21	NP	18.910.200	19.125.360	D1	
Sali SEC	10.01.21	NP	4.076.200	4.077.920	D9	
Fanghi ITAR	10.01.21	NP	785.080	735.080	D1	
Soluzioni acquose di scarto non pericolose (Acqua di controlavaggio filtri MEA)	16.10.02	NP	124.120	124.120	D9	
Soluzioni acquose di scarto non pericolose (Acqua di falda)	16.10.02	NP	180	180	D15	
TOTALE			714.385.660	24.062.660		692.222.020

Il recupero delle differenti tipologie di rifiuti prodotti raggiunge frazioni molto elevati, ed in particolare per le ceneri raggiunge valori pari a 96,91% nell'anno 2013 e 93,73% nel primo semestre del 2014 (Figura 1).

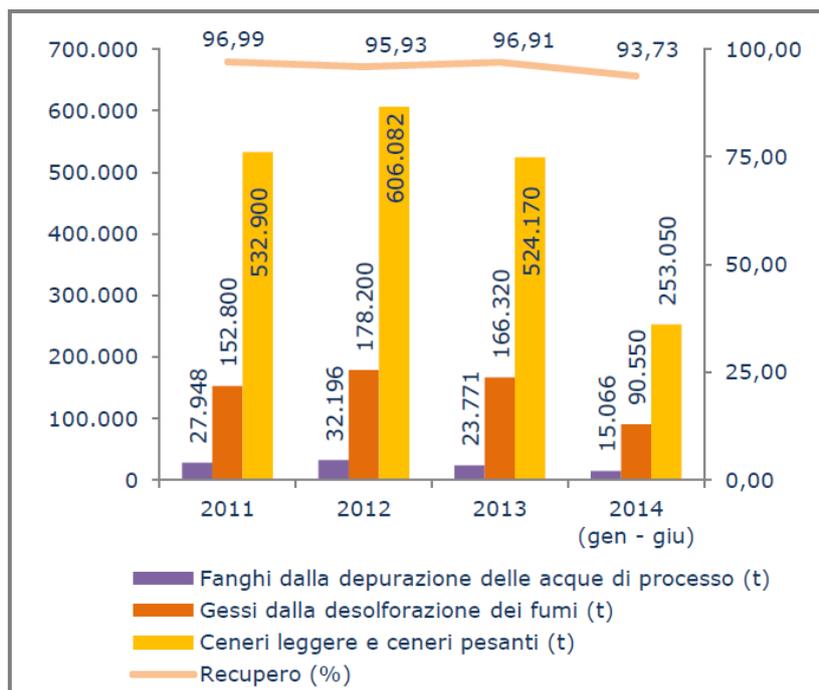


Figura 1. Rifiuti generati dal processo (fanghi, gessi e ceneri).

Una possibilità di riutilizzo delle ceneri prodotte dal processo produttivo della Centrale Federico II è la realizzazione di impasti ottenuti dalla miscelazione degli stessi con argilla, e il successivo impiego in ambito edilizio.

In tale ottica, occorre tenere presente che l'aggiunta di ceneri nell'argilla comporta una variazione del comportamento termico e meccanico dell'impasto. A tal fine, il presente documento presenta i risultati di misure di conducibilità termica e di test meccanici a compressione su impasti realizzati variando la percentuale di ceneri presente negli impasti, al fine di validare la possibilità della proposta di reimpiego delle ceneri e prevederne il comportamento termico e fisico del prodotto finale.

In questa sezione, organizzata in uno o più capitoli, si descrive il lavoro svolto (teoria, metodologie sperimentali utilizzate, tecnologie sviluppate, ecc.) e si illustrano i risultati ottenuti ed eventuali prodotti realizzati.

2.2 Ciclo della Canapa

La canapa conosciuta sin dall'antichità (coltivata già nell'Età del Bronzo), è sempre stata utilizzata per fabbricare tessuti e carta, e ritrovamenti archeologici (principalmente in Francia) attestano il suo impiego anche in ambito costruttivo. Solo negli ultimi anni, però, la canapa sta trovando ampia diffusione nel settore dell'edilizia con la realizzazione di differenti prodotti: cere, vernici, pannelli isolanti, intonaci ed anche blocchi prefabbricati, ottenuti sfruttando differenti parti della pianta (dai fiori ai semi, passando per le fibre) (Figura 2).

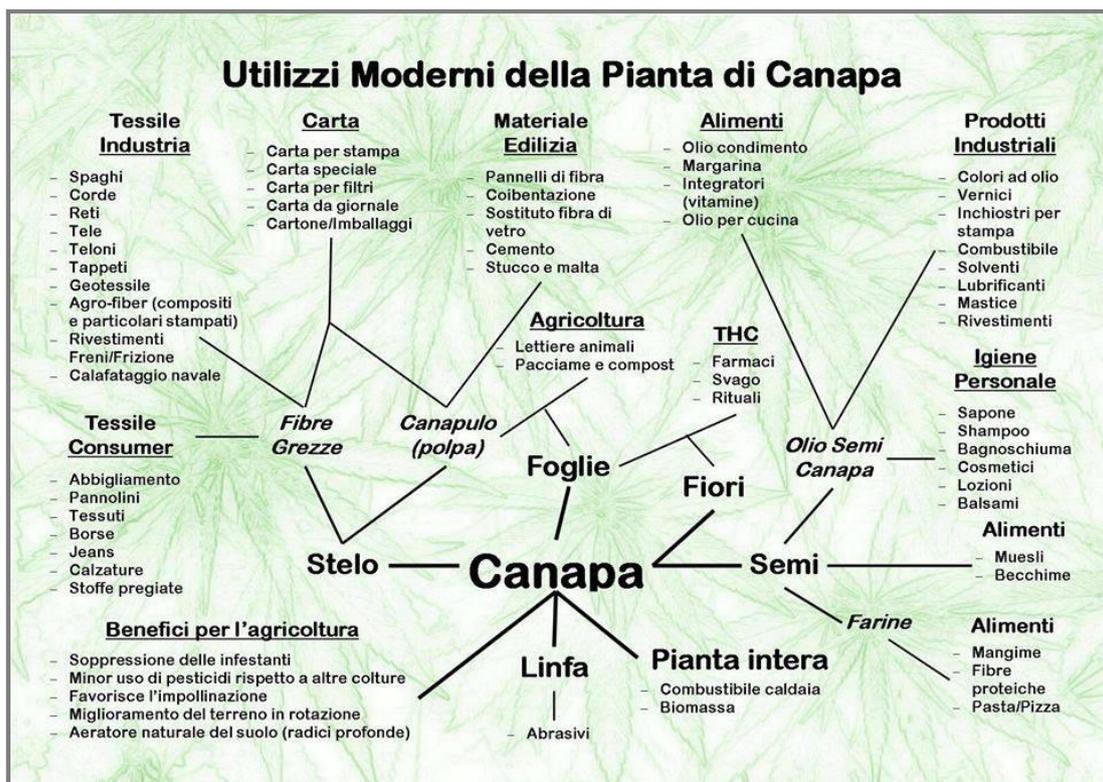


Figura 2. Prodotti derivanti dalla canapa.

L'ampia diffusione è garantita da svariate proprietà della canapa, tra le quali:

1. totale assenza di emissioni negative di carbonio;
2. durabilità a differenti condizioni ambientali;
3. elevata permeabilità al vapore;
4. basso impatto ambientale;
5. riciclabilità;
6. ottimo isolamento termico ed acustico.

Nel seguito l'attenzione sarà rivolta principalmente all'impiego di fibra (lana) di canapa per la realizzazione di pannelli isolanti e di impasti ottenuti miscelando argilla e canapa.

La produzione della lana di canapa passa attraverso la raccolta e l'essiccazione della canapa. La canapa essiccata è quindi divisa nei suoi costituenti principali: legno, fibre, foglie e semi; ai fini della realizzazione di materiali isolanti, le sole fibre sono selezionate per creare la lana.

Gli steli provenienti dalla raccolta della canapa vengono sottoposti ad una operazione di stigliatura che consente la separazione della parte fibrosa, detta "tiglio" (da cui deriva il termine "stigliatura"), dalla parte legnosa della pianta, detta "canapulo". Gli steli essiccati vengono sottoposti a sollecitazioni di vario tipo, durante le quali il canapulo si frantuma in pezzetti di varia dimensione, frammisti a fibre corte, e le fibre rimanenti vengono raccolte separatamente.

Negli impianti detti di "scotolatura" le bacchette, intere o cimite, sono disposte allineate sul piano di alimentazione e le fibre vengono estratte sotto forma di fasci lunghi, detti "mannelle".

Negli impianti di "decorticazione" gli steli, tagliati in pezzi più o meno lunghi e pressati in balle al momento della raccolta, vengono introdotti alla rinfusa nel sistema di alimentazione e le fibre vengono estratte sotto forma di matasse informi di fibre più o meno corte, dette anche "stoppe".

Al sistema di scotolatura deve sempre essere abbinato anche un sistema di lavorazione secondario delle stoppe, in cui le fibre corte ed il canapulo rimosse ed aspirate dalle macchine vengono ulteriormente separati. In questo caso otterremo tre prodotti principali: fibre lunghe, fibre corte e canapulo. Il sistema di decorticazione delle paglie può invece essere pienamente operativo anche senza la presenza di un sistema di scotolatura. In questo secondo caso non otterremo dunque le fibre lunghe ma solamente fibre corte, di lunghezze variabili a seconda del macchinario utilizzato, e canapulo.

Riepilogando, dagli impianti di stigliatura si possono quindi ottenere i seguenti prodotti principali:

- fibre lunghe ottenute con la scotolatura, che, una volta pettinate, sono impiegate esclusivamente nell'industria tessile, nella filatura di tipo liniero, detta "a filo umido";
- fibre corte, che vengono usate nella manifattura di vari prodotti industriali, dai feltri ai compositi, ai materiali per edilizia, alla carta;
- canapulo, che viene utilizzato come lettiera zootecnica, come materia cellulosa in compositi di vario tipo, come cippato legnoso.

Per garantire una certa stabilità di forma le fibre di canapa vengono comunemente integrate con fibre in poliestere (la cui quantità varia nell'intervallo 10-15% della massa totale); a tal riguardo è importante sottolineare che la presenza di poliestere non consente di smaltire per compostaggio i prodotti a base di lana di canapa giunti a fine vita.

Infine, alla lana di canapa vengono aggiunti fosfato di ammonio o borace per migliorarne la resistenza al fuoco e agli organismi (altrimenti molto bassa). Dal materiale così ottenuto si realizzano i prodotti finiti (materassini, rotoli, pannelli).

La lana di canapa rappresenta un materiale alternativo ai tradizionali materiali isolanti, principalmente di natura minerale, impiegati per la realizzazione di pannelli isolanti (EPS, XPS, lana di roccia, etc). La verifica della possibilità di competere, e all'occorrenza sostituire, questi ultimi passa attraverso un'attenta analisi del ciclo di vita della fibra di canapa e una sua comparazione con quelle dei materiali più comunemente adoperati. Nel seguito, a titolo esemplificativo, si riporta il confronto tra studi di *Life Cycle Assessment* (LCA) eseguiti per la fibra di canapa e per la fibra di roccia.

3 Comparazione tra LCA di materiali a base di fibra di canapa e fibra minerale

A tutt'oggi è molto diffusa l'opinione secondo la quale, a parità di prestazioni tecniche adatte al particolare impiego previsto, i materiali derivanti da risorse biologiche o vegetali abbiano un minore impatto ambientale rispetto a quelli derivanti da risorse minerali.

Si tratta di un presupposto che non trova immediata fondatezza nella realtà, poiché una corretta valutazione delle implicazioni ambientali dell'utilizzo di un materiale passa attraverso l'intero ciclo di vita dello stesso, partendo dalla sua produzione e giungendo alla sua dismissione a fine vita.

In quest'ottica, sulla base di dati disponibili in letteratura [7], è stata effettuata una comparazione tra il ciclo di vita di pannelli isolanti a base di fibra di canapa e quello di pannelli realizzati con lana di roccia, che è un materiale commercialmente molto diffuso, con particolare riguardo all'impatto ambientale e sulla salute. Tali impatti sono stati investigati prendendo in considerazione l'intero ciclo di vita: produzione, uso e dismissione di isolanti da applicare a diverse soluzioni costruttive, con particolare riferimento ai cosiddetti "cavity walls" la cui schematizzazione è di seguito raffigurata:

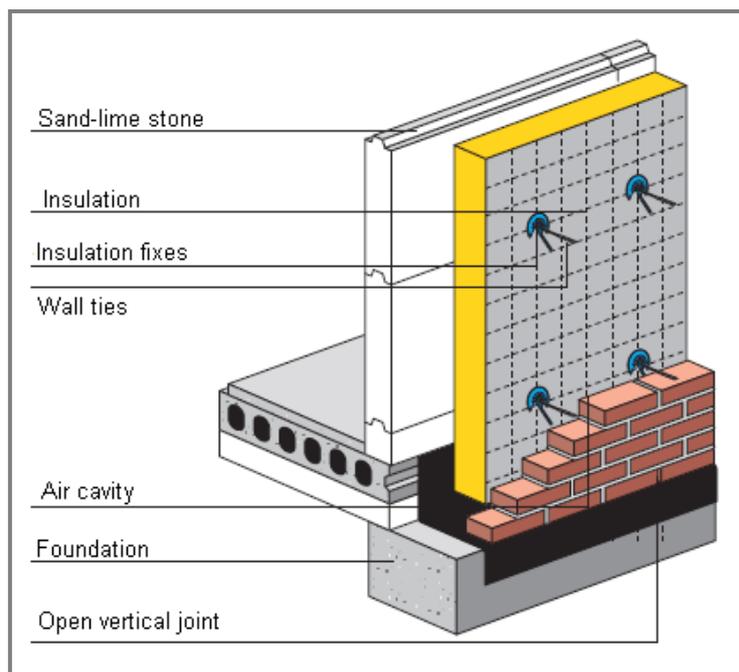


Figura 3. Cavity wall (da Isover, 2008).

Come mostrato in Figura 3, tale soluzione tecnica consiste di quattro strati:

1. una parete interna;
2. uno strato di isolante (pannello);
3. uno strato di aria con spessore variabile generalmente nell'intervallo 0-6 cm;
4. una parete esterna in pietra.

È importante sottolineare che i risultati di seguito riportati fanno esplicito riferimento a questo tipo di soluzione costruttiva, e che pertanto i valori assoluti dei principali parametri qui osservati possono discostarsi da quelli ottenibili nel caso di impieghi differenti, ad esempio utilizzo di isolante come riempimento di laterizi. Tuttavia, i risultati di seguito presentati sono considerati molto utili data la finalità di comparazione tra i materiali investigati.

3.1 Produzione pannelli

L'analisi del ciclo di vita del materiale isolante prende in considerazione innanzitutto la quantità di energia richiesta e gli impatti sull'ambiente e la salute implicati dal processo di produzione dei pannelli isolanti. Risulta pertanto necessario avere una chiara conoscenza di tali processi produttivi. La produzione della lana di canapa è riportata nel paragrafo 2.2, cui si rimanda. Nel seguito si riporta il ciclo di produzione della lana di roccia.

3.1.1 Lana di roccia

La lana di roccia è stata presa in considerazione come principale materiale di riferimento ai fini della comparazione con la lana di canapa. La lana di roccia è prodotta partendo principalmente da due minerali vergini: basalto e diabase e, in misura minore, facendo ricorso a lana di roccia riciclata e residui dell'industria metallurgica. Il processo di produzione consta dei seguenti step:

- fusione dei materiali di partenza in un forno a cupola, a temperature di 1500-1600°C; il combustibile utilizzato per la fusione in forno è prevalentemente coke [8] ed è comune l'aggiunta di dolomite come agente flussante [9];

- il materiale fuso è versato in dischi di filatura nei quali è insufflata aria, per la formazione di fibre;
- le fibre sono legate per l'ottenimento del prodotto finito (pannello, materassino, etc.) ed impiegando resine fenoliche, ureiche o formaldeide [9];

La Figura 4 illustra il ciclo di produzione appena descritto.

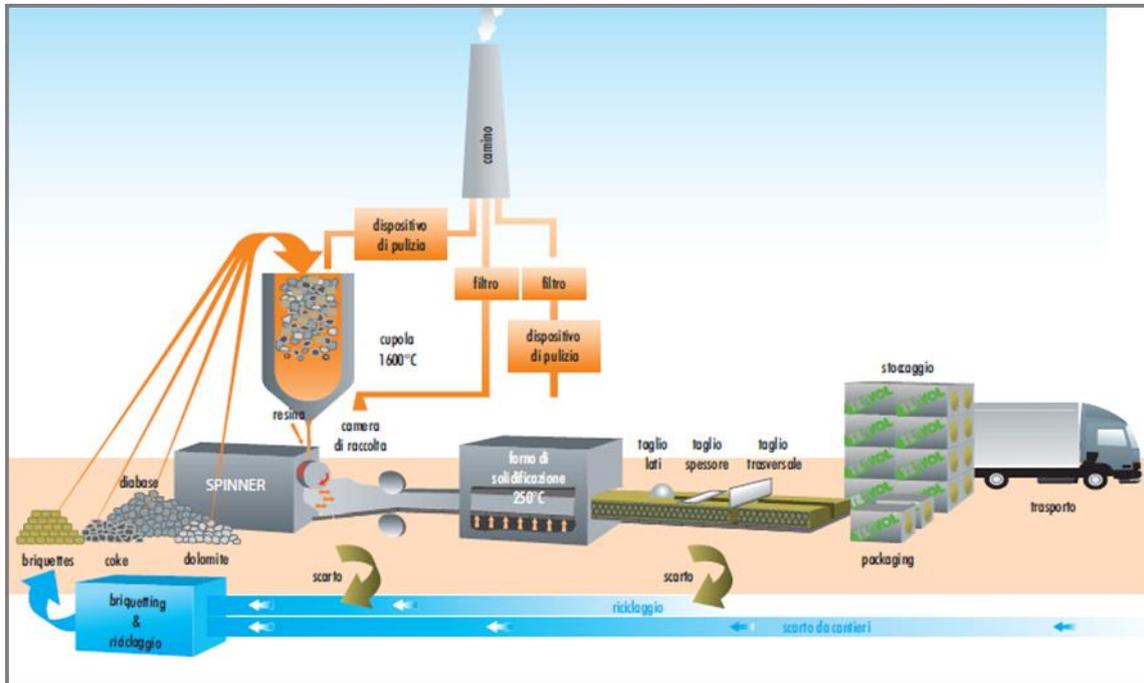


Figura 4. Ciclo di produzione della lana di roccia (Knauf, 2011).

3.2 Caratteristiche tecniche dei materiali investigati

Prima di procedere con un'analisi comparativa dei cicli di vita dei materiali sotto investigazione, è importante definire le loro caratteristiche fisiche principali, con particolare riguardo alle proprietà di isolamento termico, come riportato in tabella 2.

Tabella 2. Proprietà fisiche e termiche dei materiali isolanti.

Materiale isolante	Materiale di base	Conducibilità termica (λ) [W/m·K]	Densità [kg/m ³]	Classe di resistenza al fuoco (NEN-EN13501) ¹	Fattore di resistenza al vapore
Lana di roccia	basalto, diabase	0,030-0,040	25-200	A1	1-5
Lana di canapa	fibre di canapa, fibre di supporto	0,038-0,040	30-42	E	1-2

I parametri fisici e le voci in tabella 2 sono come di seguito definite:

Conducibilità termica

¹ NEN-EN 13501-1:2007+A1:2009 en

Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests

Rappresenta la capacità di un materiale di condurre calore ed è definito a partire dalla seguente equazione:

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{d} \cdot A \quad (1)$$

In cui:

Q = flusso di calore [W];

ΔT = differenza di temperature tra i due estremi del materiale [K];

d = spessore del materiale [m];

A = superficie del materiale [m²];

λ = conducibilità termica del materiale [W/m·K].

Classe di resistenza a fuoco

Si tratta di una classificazione obbligatoria della resistenza del materiale alla possibilità di entrare in combustione. La classificazione è prescritta dalla norma europea EN-13501-1 che definisce sette principali classi di resistenza: A1, A2, B, C, D, E ed F, in cui A1 rappresenta la classe con maggiore resistenza al fuoco (materiali ininfiammabili) ed E quella con una resistenza minore (materiali altamente infiammabili). Se il materiale non ha alcuna classificazione, o risulta essere estremamente infiammabile, è annoverato nella classe F.

Fattore di resistenza al vapore

Il fattore di resistenza al vapore di un materiale, generalmente indicato con “ μ ”, mette in relazione la quantità di vapore che riesce a diffondere attraverso un determinato strato di aria e quella che diffonde attraverso uno strato di materiale dello stesso spessore, ed è come di seguito definita:

$$\mu = \frac{\text{resistenza alla diffusione di vapore in strato di materiale di spessore } d}{\text{resistenza alla diffusione di vapore in strato di aria di spessore } d} \quad (2)$$

Si tratta pertanto di un utile indicatore per i materiali isolanti, fornendo una rapida impressione di quanto un materiale sia resistente a lasciarsi permeare ed attraversare dal vapore. Valori troppo alti di μ sono indesiderati poiché implicherebbero un ristagno di vapore all'interno di locali chiusi nei quali, generalmente, il tenore di umidità è maggiore rispetto all'ambiente esterno.

Dalla tabella 2 si evincono:

- una conducibilità termica leggermente inferiore per la lana di roccia rispetto alla lana di canapa, ma con differenze non significative;
- una densità molto variabile per la lana di roccia, giustificata dal fatto che risulta essere fortemente influenzata dalla particolare tecnica costruttiva impiegata, variando notevolmente il grado di compressione delle fibre;
- una spiccata differenza al comportamento in caso di incendio poiché, a differenza della lana di roccia che risulta essere ininfiammabile, la lana di canapa presenta un alto grado di infiammabilità. Per tale motivo, come riportato nel paragrafo 2.2, alle fibre di canapa si aggiungono additivi allo scopo di incrementarne la resistenza al fuoco (fosfato di ammonio o borace);
- una maggiore resistenza alla permeazione di vapore da parte della lana di roccia.

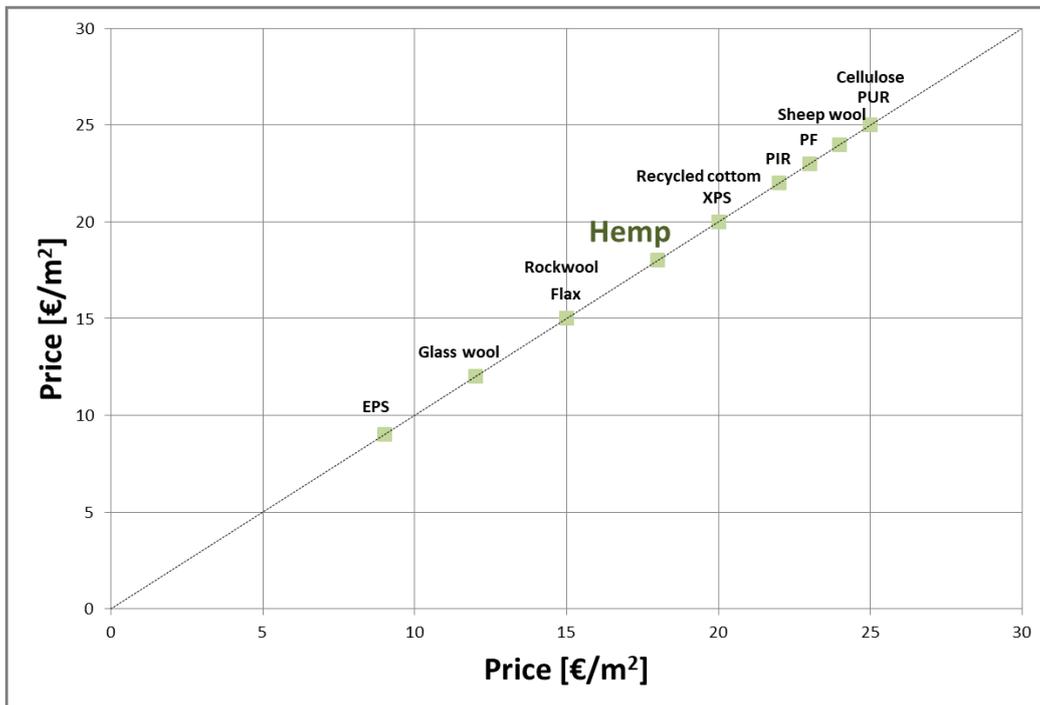
3.3 Unità Funzionale

Una corretta comparazione tra il comportamento di due materiali presuppone che la determinazione dei principali parametri sotto osservazione, sia essi relativi alla domanda energetica o all’impatto sull’ambiente o sulla salute pubblica, avvenga con riferimento al medesimo indice prestazionale. Il primo passo di un’analisi LCA è pertanto la definizione di questo indice, che prende il nome di “unità funzionale” (FU), rispetto al quale normalizzare i parametri investigati.

Nel caso in questione, l’unità funzionale è definita come:

“La produzione, l’uso e la dismissione di materiale isolante in grado di assicurare una resistenza termica di $3,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ su una superficie di cavity walls pari ad 1 m^2 e per un periodo di vita pari a 50 anni”

Una volta fissata l’unità funzionale di riferimento, un primo confronto tra la lana di roccia e la lana di canapa è relativo agli spessori dei pannelli e i relativi prezzi che assicurano l’ottenimento della resistenza termica sopra citata. La figura 5 mostra la disposizione in ordine crescente dei prezzi per l’acquisto del materiale necessario ad assicurare la resistenza termica presa a riferimento ($3,5 \text{ m}^2\text{K/W}$). Con particolare riferimento al confronto con la lana di roccia, la lana di canapa mostra un prezzo leggermente più alto (18 €/m^2 contro 15 €/m^2). In termini esclusivamente economici, il prezzo della canapa risulta essere maggiore anche rispetto ad altri materiali isolanti comunemente impiegati in edilizia (EPS, Rockwool, Glass wool), ma nel contempo nettamente inferiore a quello di altri materiali decisamente più performanti ma dal costo molto elevato (Aerogel, VIP).



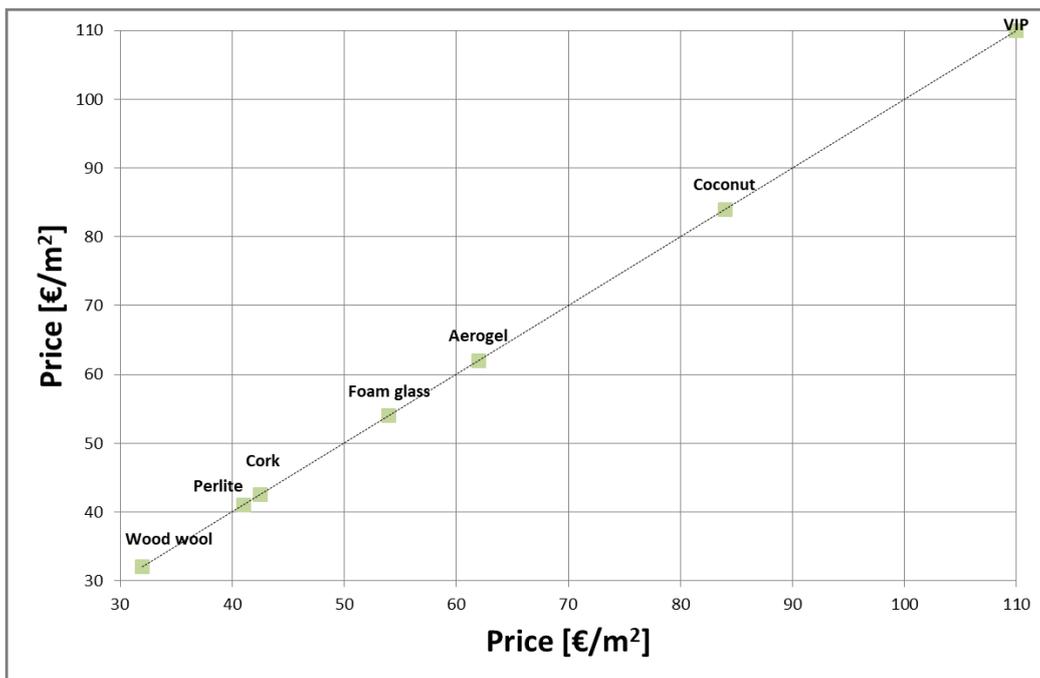


Figura 5. Prezzi dei materiali che assicurano un valore di $R_c=3,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ (immagine riadattata da [7])

3.4 Risultati

Nell'intero ciclo di vita di un materiale isolante la fase di utilizzo è quella meno dispendiosa da un punto di vista energetico e allo stesso tempo meno impattante sull'ambiente e sulla salute pubblica. Di conseguenza, le fasi di "estrazione delle risorse e produzione" e di "dismissione a fine vita" sono essenzialmente quelle su cui è opportuno focalizzare l'attenzione. A tale fine è bene effettuare una distinzione tra:

- analisi "cradle-to-gate": si tratta di un'analisi del ciclo di vita eseguita sulla sola fase di estrazione delle risorse di base e produzione del materiale sotto osservazione;
- analisi "cradle-to-grave": si tratta di un'analisi del ciclo di vita che prende in considerazione anche la fase di dismissione del materiale a fine vita.

I risultati di seguito riportati fanno riferimento ad entrambe queste tipologie di analisi.

3.4.1 Domanda energetica

Sulla base dei cicli produttivi descritti in precedenza, la domanda di energia richiesta per la produzione dei pannelli in lana di roccia e in lana di canapa in un'analisi *cradle-to-gate* è mostrata in figura 6, in cui appare evidente il minor dispendio energetico per la produzione di pannelli in lana di roccia. Ciò si spiega con la tipologia di materie prime impiegate (basalto, diabase, materia riciclata) e soprattutto con la bassa densità del materiale in uscita dal ciclo produttivo. Si stima, infatti, che da un 1 m^3 di basalto si riescano a produrre circa 90 m^3 di lana di roccia.

L'alto costo dei pannelli in lana di canapa, in termini di energia richiesta (circa 300 MJ/FU), è da giustificarsi prevalentemente con l'impiego di fertilizzanti nella crescita delle piante di canapa, l'uso di fibre in poliestere per tenere assieme le fibre (in quantità circa pari al 10% della massa totale) e l'impiego di ritardanti di fiamma per migliorarne le proprietà di ininfiammabilità: l'uso di queste sostanze richiede il ricorso a combustibili fossili per la loro produzione.

Se si considera la combustione come scenario di fine vita dei pannelli di lana di canapa ne deriva un effetto positivo in termini di domanda energetica, poiché dall'aliquota di energia richiesta dal ciclo di produzione è possibile decurtare la quantità di energia prodotta dallo stesso incenerimento. Chiaramente tale aliquota è assente se i pannelli in fibra di canapa a fine vita sono destinati al compostaggio o al riciclo. Difatti i maggiori produttori di pannelli in fibra di canapa e poliestere assicurano una riciclabilità totale del prodotto a fine vita.

La dismissione a fine vita della lana di roccia invece è rappresentata prevalentemente dallo stoccaggio in discarica, qualora non risulti applicabile il riciclo come materia base per la produzione di nuovi pannelli: tale soluzione non contribuisce significativamente al bilancio energetico. In virtù di queste considerazioni, e come si evince dalla figura 7, in un'analisi cradle-to-grave si realizza una minore differenza di domanda energetica tra la lana di roccia e la lana di canapa, a vantaggio comunque sempre della prima che risulta essere meno dispendiosa (≈ 120 MJ/FU per la lana di roccia contro ≈ 240 MJ/FU per la lana di canapa).

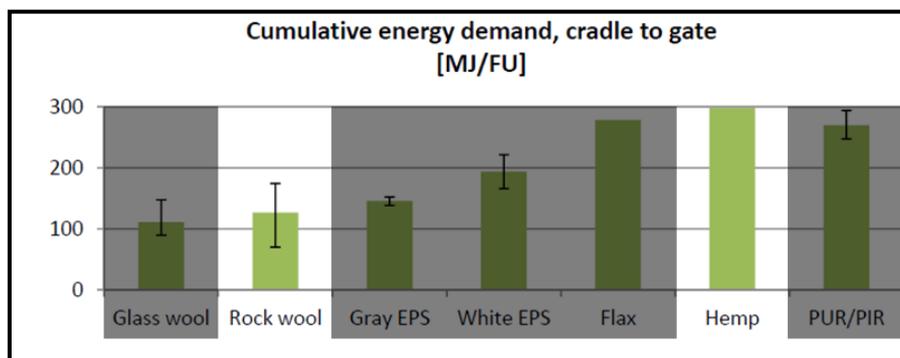


Figura 6. Domanda energetica in analisi cradle-to-gate (immagine riadattata da [7]).

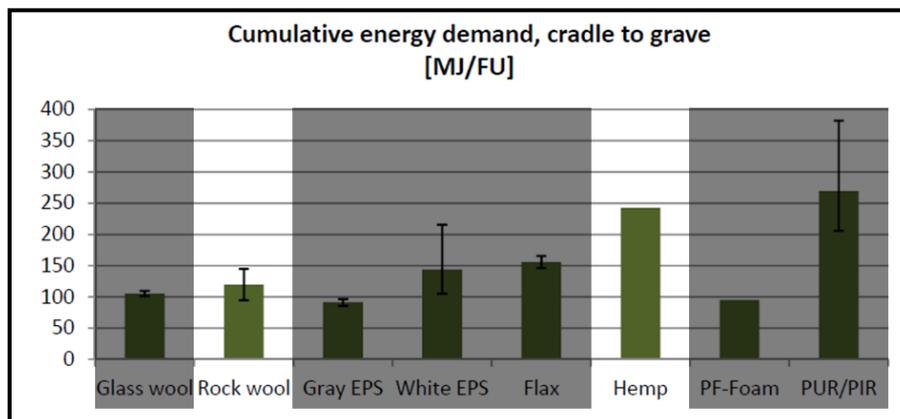


Figura 7. Domanda energetica in analisi cradle-to-grave (immagine riadattata da [7]).

Inoltre, dalle figure 6 e 7 si evince la presenza di uno ampio scarto attorno ad un valor medio per i valori relativi alla lana di roccia: ciò è da giustificarsi, anche, con un ampio intervallo nei valori di densità per tale materiale nella realizzazione di differenti pannelli per cavity walls.

3.4.2 Emissioni di gas serra

In Figura 8 sono riportati i risultati delle emissioni di gas serra, espressi in kgCO_2 eq per unità funzionale, per entrambi i materiali isolanti investigati e per entrambi gli scenari sotto osservazione (cradle-to-gate a sinistra e cradle-to-grave a destra).

Dalla figura si evince che le emissioni di gas serra nella fase di produzione della lana di roccia sono maggiori rispetto a quelle prodotte dalla produzione della lana di canapa; ciò è da imputarsi all'utilizzo di

coke per la fusione del basalto e del diabase. La situazione si ribalta però se si prende in considerazione l'analisi cradle-to-grave a causa del notevole impatto ambientale della fase di incenerimento della lana di canapa.

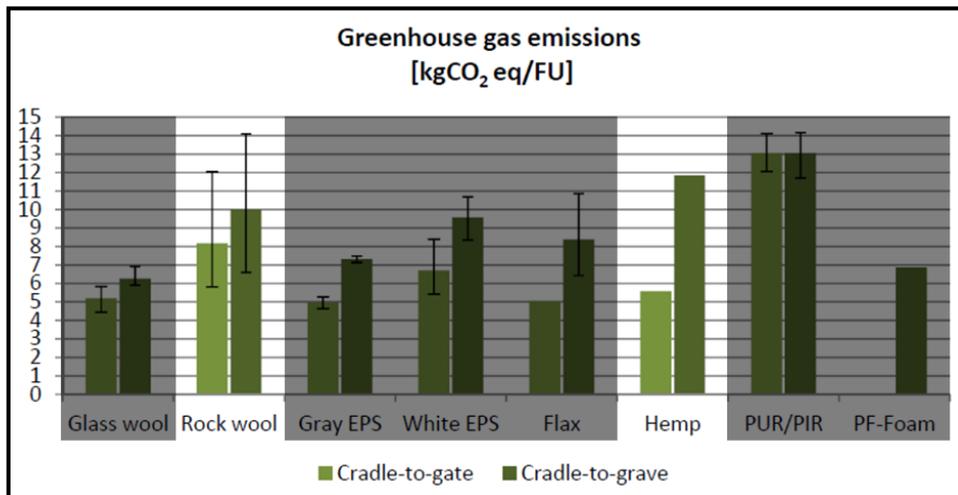


Figura 8. Emissioni di gas serra (immagine riadattata da [7]).

3.4.3 Eutrofizzazione

Con il termine eutrofizzazione si intende un eccessivo e indesiderato arricchimento di organismi vegetali in un determinato ambiente acquatico (in particolare fosfati e nitrati), che provoca la proliferazione di alghe le quali, non essendo assimilate da consumatori primari, determinano una maggiore attività batterica, quindi un maggior consumo di ossigeno che, mancando ai pesci, ne determina la morte.

Risulta essere pertanto un parametro importante nella valutazione dell'impatto sull'ambiente del ciclo di vita di un materiale. La figura 9 mostra le quantità di inquinamento per eutrofizzazione prodotte durante i cicli di vita *cradle to gate* e *cradle-to-grave* per entrambi i materiali isolanti sotto indagine, espressa in kgPO₄ eq/FU; si nota un lieve minor impatto per la lana di canapa rispetto alla lana di roccia.

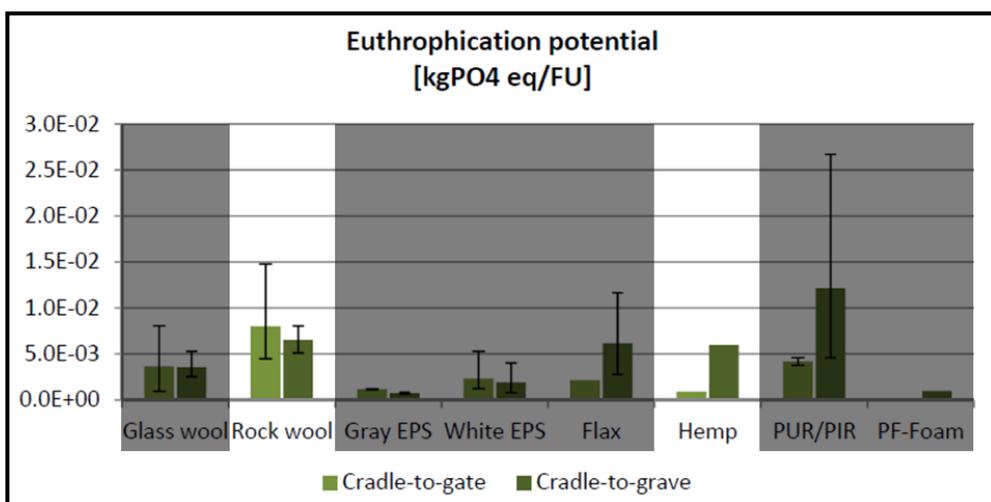


Figura 9. Eutrofizzazione (immagine riadattata da [7]).

3.4.4 Acidificazione

Con il termine acidificazione si intende, nell'accezione più ampia, la presenza in atmosfera di sostanze (ad esempio SO₂) che, reagendo con acqua piovana, possano originare piogge acide con negative

ripercussioni sui terreni, sulle acque e sulle varie forme di vita animale. Particolare riguardo pertanto deve essere riservato all'eventuale formazione di queste sostanze durante le fasi di produzione, utilizzo e dismissione di un materiale. Un confronto tra la lana di roccia e la lana di canapa è stato eseguito anche in termini di questo tipo di impatto sull'ambiente (espressi in kgSO₂ eq/FU), portando ai risultati mostrati in figura 10. Si evidenzia, in particolare, un elevato livello di acidificazione in entrambe le analisi *cradle-to-gate* e *cradle-to-grave* per la lana di roccia, da imputare essenzialmente all'impiego di coke nelle operazioni di fusione delle materie di base per la sua produzione.

Livelli di acidificazione più bassi si realizzano invece per la lana di canapa che pertanto, con particolare riferimento a tale indicatore, risulta essere preferibile alla lana di roccia.

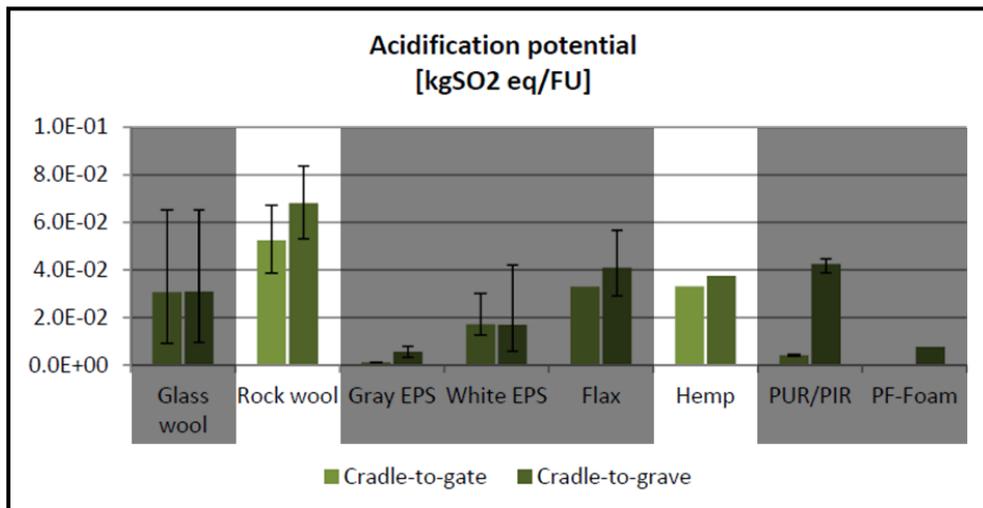


Figura 10. Acidificazione (immagine riadattata da [7]).

3.4.5 Potenziale di eliminazione dell'ozono

Con tale termine si intende la misura con cui una sostanza è in grado di danneggiare la fascia di ozono. Effetti dannosi sono provocati da diverse sostanze, tra le quali il triclorofluorometano (CFC-11), e generalmente il potenziale di eliminazione dell'ozono di una sostanza è determinato proprio prendendo come riferimento questa sostanza.

In figura 11 è riportato il potenziale di eliminazione dell'ozono per i due materiali isolanti osservati (espresso in kgCFC-11 eq/FU), da cui si evince un maggiore impatto per la lana di canapa rispetto alla lana di roccia. Con riferimento alla lana di canapa, il lieve miglioramento che si verifica nell'analisi *cradle-to-grave*, rispetto ai valori ottenuti nell'analisi *cradle-to-gate*, è da imputare al processo di incenerimento preso come scenario di dismissione a fine vita.

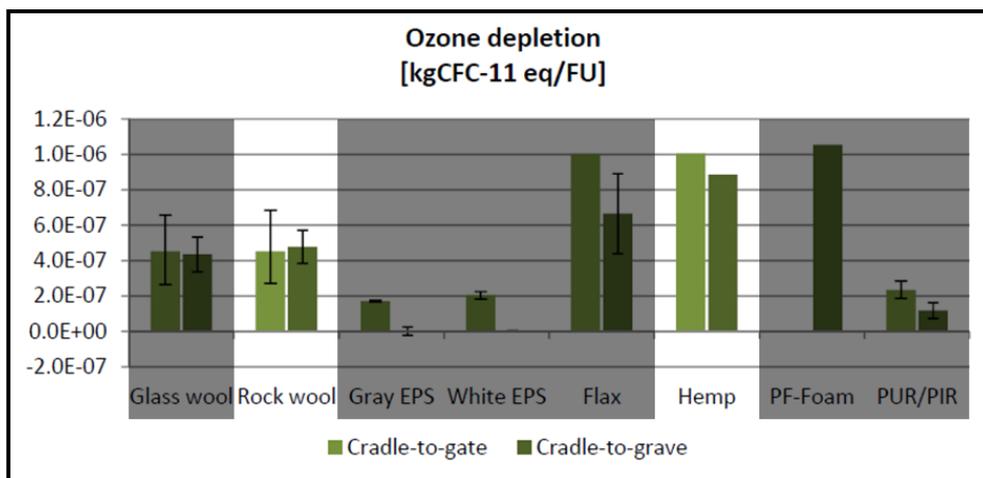


Figura 11. Potenziale di eliminazione dell'ozono (immagine riadattata da [7]).

3.5 Discussione

La letteratura scientifica annovera diversi lavori sui cicli di vita di materiali isolanti commercialmente diffusi. Al fine di validare i valori riguardanti la lana di roccia riportati nei risultati sopra presentati, essi sono stati confrontati con quelli ottenuti in un altro lavoro [10]. Poiché i due lavori fanno riferimento a differenti valori dell'unità funzionale scelta, si è resa necessaria una normalizzazione dei parametri investigati all'unità di massa di lana di roccia, al fine di poter correttamente effettuare una comparazione, come riportato in Tabella 3.

Tabella 3 - Domanda energetica e valutazione impatto sull'ambiente per la lana di roccia.

Sorgente	[7]	[10]
Materiale isolante	lana di roccia	lana di roccia
Unità funzionale (definizione)	massa di materiale isolante che assicura R=1 m ² K/W per un periodo di 50 anni	massa di materiale isolante che assicura R=3,5 m ² K/W per un periodo di 50 anni
Unità funzionale (valore) [kg]	1,18	6,75
Domanda energetica totale [MJ/kg]	17,52	17,78
Energia rinnovabile (% totale)	5,14%	< 10%
Emissioni gas serra [kgCO ₂ eq/kg]	1,22	1,48
Eutrofizzazione[kgPO ₄ eq/kg]	1,00E-03	1,04E-03
Acidificazione [kgSO ₂ eq/kg]	1,04E-02	1,01E-02
Potenziale di eliminazione azoto	non confrontabile	non confrontabile

Dalla Tabella 3 si evince una soddisfacente congruenza tra i valori riportati.

I risultati mostrati nel paragrafo 3.4 mostrano innanzitutto una maggiore richiesta energetica nel ciclo di vita della lana di canapa rispetto alla lana di roccia. Il rapporto tra le due richieste è circa 3 nell'analisi *cradle-to-gate*, e si abbassa a circa 2 nell'analisi *cradle-to-grave* in cui lo scenario previsto per la lana di canapa (incenerimento) produce una quantità di energia che in parte riduce la domanda energetica. È comunque importante notare che gran parte della richiesta energetica è dovuta ai processi di produzione di

fertilizzanti per la crescita della canapa o di produzione e fusione delle fibre in poliestere per stabilizzare la forma dei prodotti finiti o, infine, di sostanze che ne aumentino la bassa resistenza al fuoco. È interessante osservare comunque che se la destinazione d'uso della lana di canapa è il riempimento di laterizi, allora è possibile prendere in considerazione i seguenti scenari produttivi:

Fertilizzanti: lasciare che la canapa cresca senza l'ausilio di fertilizzanti, in virtù dei notevoli aumenti sulle quantità prodotte negli ultimi anni. L'associazione Assocanapa afferma che nel 2013 le aziende che hanno coltivato canapa in Italia sono state circa 140 con una superficie che ha toccato i 400 ettari. La stima del 2013 prevedeva per il 2014 almeno il raddoppio delle superfici coltivate, che avrebbero potuto anche superare 1000 ettari².

Fibre in poliestere: considerando come applicazione finale il riempimento di laterizio tramite materassini, la sola operazione di pressatura può ritenersi sufficiente per conferire la necessaria stabilità strutturale alla fibra di canapa, evitando pertanto l'aggiunta di fibra in poliestere. In caso di insuccesso in tale direzione, in alternativa si valuta l'impiego di acido polilattico (PLA) che è un polimero naturale derivato dal mais; quando tale acido è impiegato, in sostituzione del poliestere, si stima che la domanda energetica per la produzione di pannelli in lana di canapa si riduca di circa il 14% [10, 11]

Sostanze per incremento resistenza a fuoco: in caso di impiego come riempimento di laterizi la lana di canapa non è direttamente a contatto né con l'ambiente esterno né con quello interno di un edificio, pertanto si valuta la possibilità di evitare l'aggiunta di sostanze che ne migliorino la sua bassa resistenza al fuoco. È comunque importante precisare che l'aggiunta di sostanze che ne incrementino la resistenza alla formazione di organismi (muffe) resta imprescindibile.

L'eliminazione dei materiali sopraelencati consentirebbe una notevole riduzione nella domanda energetica della fibra di canapa.

Per ciò che concerne le emissioni di gas serra, dalla figura 8 si evince che la situazione di minor impatto ambientale della lana di canapa rispetto alla lana di roccia nell'analisi *cradle-to-gate* si ribalta a favore della seconda quando invece si tiene conto del processo di dismissione. Ciò era dovuto al fatto di considerare l'incenerimento come scenario possibile per la lana di canapa. Se la fibra in lana di canapa è invece destinata al riciclo, sarà assicurato un minor impatto in termini di emissioni di gas serra anche nell'analisi *cradle-to-grave*.

Particolare interesse è rivolto alla possibilità di sostituire le fibre in poliestere con altre tipologie di sostanze. Uno studio dell'Università di Stoccarda ha dimostrato la fattibilità di sostituire le fibre in poliestere con acido polilattico: ciò consentirebbe non solo una riduzione della domanda energetica globale, come in precedenza riportato, ma anche una riduzione delle emissioni di gas serra [11], in virtù anche del fatto che in tal modo, a fine vita, un materiale isolante in lana di canapa potrebbe essere indirizzato verso il compostaggio.

Non meno importante è l'aspetto relativo alla salute dell'uomo nell'impiego di questi materiali, sia durante la produzione e posa in opera, sia durante l'intera permanenza nelle pareti opache degli edifici. Sotto tale aspetto, notevoli sono i vantaggi della lana di canapa rispetto alla lana di roccia.

La lana di roccia, infatti, consta di fibre minerali tenute insieme da un legante, generalmente a base di formaldeide, che ha un impatto negativo sull'uomo sulla qualità dell'aria. La formaldeide, difatti, a partire dal 2016 è classificato come cancerogeno "presunto o certo" (classificato come CARC. 1B; H350) ed inoltre può causare irritazione agli occhi e al sistema respiratorio [12]. Inoltre, le fibre di lana di roccia hanno un

² <http://www.assocanapa.org/coltivare.htm>

diametro tale (3-6 μm) da causare problemi per la salute sia per inalazione che per contatto diretto sulla pelle potendo, le fibre, penetrarvi attraverso gli strati superficiali. Secondo il RIVM, l'Istituto Nazionale olandese per la Salute Pubblica e l'Ambiente, l'inalazione di fibre aventi un diametro sotto i 4-5 μm può causare fibrosi (RIVM, 2007), pur non essendo considerato cancerogeno [13].

Per quanto concerne invece la lana di canapa, non sono stati riscontrati significativi problemi relativi alla salute dell'uomo. L'emissione di composti organici volatili (COV) e di batteri è trascurabile [14]. In caso di elevata umidità (90%), la formazione di muffe è molto probabile; ad ogni modo il trattamento con fosfato di ammonio e borace, oltre ad incrementarne la resistenza a fuoco, protegge le fibre contro l'attacco di organismi. Ne consegue che l'aggiunta di queste sostanze, unitamente ad una corretta messa in opera del materiale isolante, siano sufficienti a scongiurare la crescita di organismi.

3.6 Conclusioni

La corretta valutazione della possibilità di sostituire un materiale isolante di sicura efficacia e di larga diffusione commerciale, qual è la lana di roccia, con materiali di natura vegetale, nella fattispecie lana di canapa, passa attraverso un'attenta e completa conoscenza dell'intero ciclo di vita degli stessi dalla fase di produzione, includendovi anche il reperimento delle materie di base, alla dismissione a fine vita.

Il presente capitolo ha avuto come obiettivo quello di confrontare le diverse implicazioni derivanti dall'impiego della lana di roccia e della lana di canapa, al fine di valutare la reale applicabilità della seconda in applicazioni di isolamento termico di pareti opache di edifici.

Data la varietà di tipologie di impatto sul sistema uomo-ambiente (domanda energetica, inquinamento ambientale, salute dell'uomo), è impossibile emettere un verdetto univoco a favore di uno dei due isolanti sotto investigazione. Si possono tuttavia trarre le seguenti conclusioni:

- 1) la domanda energetica per il ciclo di vita della lana di canapa è maggiore (di un fattore 3 per l'analisi *cradle-to-gate*, e di un fattore 2 per l'analisi *cradle-to-grave*) rispetto a quella della lana di roccia. Va tuttavia menzionato il fatto che l'aliquota di energia derivante da fonti rinnovabili utilizzata per la produzione della lana di canapa si attesta attorno al 25-30% del totale, a fronte di una quantità che non raggiunge il 10% per la lana di roccia (ad ogni modo si tratta di aliquote valide per la realtà olandese). In aggiunta tale domanda energetica fa riferimento all'utilizzo di fibre in poliestere per la stabilità strutturale della fibra di canapa durante il ciclo produttivo, che ha un notevole impatto sulla richiesta di energia; la possibilità di sostituire la fibra in poliestere con acido polilattico comporterebbe un'ulteriore riduzione di circa il 14% della domanda energetica [10, 11]. In tal modo la lana di canapa potrebbe risultare competitiva con la lana di roccia in termini di richiesta energetica globale;
- 2) la lana di canapa presenta un minore impatto in termini di emissioni di gas serra se ci si limita alla sola analisi *cradle-to-gate*, ovvero prendendo in considerazione solo il processo di produzione del materiale isolante. Se si estende l'analisi anche alla fase di dismissione (*cradle-to-grave*) la situazione si capovolge a favore della lana di roccia, se si considera l'incenerimento della fibra di canapa come percorso di fine vita, implicando un forte contributo all'emissione di gas serra.

Tuttavia notevoli benefici possono ottenersi se la fibra di canapa è completamente riciclata o se si sostituisce il poliestere con acido polilattico. Difatti la presenza di acido polilattico consentirebbe di smaltire i pannelli in fibra di canapa anche attraverso compostaggio;

- 3) l'utilizzo della lana di canapa mostra un minore impatto sull'ambiente in termini di eutrofizzazione e acidificazione. Tuttavia è da valutare se tale vantaggio permanga anche nel

caso si impieghi acido polilattico in sostituzione delle fibre in poliestere. L'acido polilattico difatti è prodotto a partire dal mais, la cui crescita avviene con l'impiego di fertilizzanti, e successivamente attraverso processi chimici di estrazione dell'amido e polimerizzazione del monomero di partenza: tali step possono avere impatti negativi in termini di eutrofizzazione e acidificazione dell'ambiente;

- 4) la lana di canapa ha implicazioni maggiori in termini di potenziale di eliminazione dell'ozono rispetto alla lana di roccia;
- 5) con riferimento alla salute dell'uomo, la lana di canapa appare notevolmente meno dannosa rispetto alla lana di roccia, purché la messa in opera avvenga correttamente evitando così la formazione di microrganismi (muffe) che altrimenti sarebbe inevitabile con tenori di umidità molto alta.

In definitiva la lana di canapa risulta essere preferibile in termini di impatti ambientali come l'eutrofizzazione e l'acidificazione e per ciò che concerne le implicazioni sulla salute dell'uomo, mentre presenta un peggior comportamento in termini di domanda energetica, emissioni di gas serra e potenziale di eliminazione dell'ozono. Ad ogni modo va considerato che la lana di canapa presenta margini di miglioramento se si interviene opportunamente sul suo processo produttivo. L'idea di impiegare ad esempio la canapa come riempimento dei fori di laterizi tradizionali, potrebbe consentire di non far ricorso alla presenza di poliestere, aprendo quindi nuovi e differenti scenari per il riutilizzo e il reimpiego della fibra di canapa a fine vita. In tale contesto, presso i laboratori del CR ENEA Brindisi è stata studiata l'influenza delle condizioni climatiche tipiche dei climi mediterranei su laterizi forati riempiti con fibra di canapa di origine locale, in presenza o meno di trattamenti opportunamente selezionati [15]. Il lavoro svolto ha consentito di verificare una soddisfacente resistenza della fibra di canapa alla degradazione quando sottoposta alle variazioni termoigrometriche investigate. Inoltre, prototipi di parete con laterizi riempiti in fibra di canapa sono stati investigati anche in relazione al comportamento termico, attraverso la determinazione della trasmittanza termica [16] e del comportamento in regime termico dinamico [17]. In entrambi i casi la presenza di canapa nei fori ha implicato un miglioramento del comportamento come involucro opaco rispetto ad una parete di laterizi presa come riferimento.

4 Messa a punto degli impasti

L'industria dei laterizi si è rivelata adatta al riutilizzo di materiali di scarto, poiché gli impasti utilizzati sono fortemente eterogenei, pur avendo come materia di base materia prima argillosa [18, 19]. Tali impasti, quindi come riportato in letteratura, sono in grado di inglobare materiali di scarto di varia natura, anche in percentuali significative, senza alterare le caratteristiche prestazionali richieste dalla normativa. In questo modo è possibile ottenere benefici dal punto di vista ambientale: riciclaggio e inertizzazione di scarti che sono spesso inquinanti e di difficile collocazione, e risparmio di materie prime argillose.

In alcuni casi l'aggiunta di scarti industriali alle materie prime dei laterizi produce miglioramenti sia sugli stessi processi di lavorazione (foggiatura, essiccamento e cottura), che sulle proprietà dei prodotti finiti (ritiro, porosità e resistenza meccanica). Infine, il contributo calorico apportato da molti tipi di scarti contribuisce al contenimento dei consumi energetici.

Gli scarti industriali possono essere raggruppati in quattro principali categorie, sulla base del loro effetto principale: scarti combustibili, ceneri volanti, scarti fondenti, scarti dimagranti e plastificanti. Per la realizzazione di impasti nel nostro studio, sono stati impiegati le ceneri volanti e gli scarti di canapa provenienti da cardatura in differente pezzatura.

4.1 Le ceneri volanti

Data la prossimità di approvvigionamento e quindi il basso impatto ambientale sul territorio locale, nel seguito del presente documento ci soffermeremo sul riutilizzo di scarti inorganici provenienti dalla Centrale Termoelettrica Federico II dell'Enel di Cerano, le ceneri, quale prodotto della combustione del carbone, come additivi per impasti di laterizi sostenibili

Le ceneri volanti sono un residuo delle centrali termoelettriche a carbone che producono miglioramenti sia sugli stessi processi di lavorazione (foggiatura, essiccamento e cottura), che sulle proprietà dei prodotti finiti (ritiro, porosità e resistenza meccanica) [20, 21]

Da un'analisi composizionale XRF condotta su un campione di argilla impiegata nella realizzazione degli impasti, è stato possibile determinare nella loro composizione la presenza di silice (49,3%) e allumina (16,4%), spesso combinate in composti allumino-silicatici, con presenze importanti di ossidi di calcio (15,7%) e ferro (9,5%) che conferisce al laterizio il tipico colore rossastro dopo la cottura (Tabella 4). La stessa indagine è stata eseguita sulle ceneri volanti, provenienti dalla centrale locale e si è potuto riscontrare una composizione chimica piuttosto simile all'argilla e con percentuali non molto differenti ovvero presenza di silice (52,5%) e allumina (27,8%), ossidi di calcio (4,7%) e ferro (6,8%) (Tabella 5).

Data l'affinità composizionale con l'argilla e data la loro distribuzione granulometrica, generalmente da 5 a 200 μ m, con dimensione media di 30-50 μ m, che non richiede un processo di macinazione, si è rafforzata la scelta di focalizzare lo studio degli additivi inorganici per gli impasti sulle ceneri. Inoltre la forma sferica consente una buona fluidità agli impasti [21] conferendo allo scarto un valore a vantaggio della sostenibilità della filiera produttiva del laterizio. Le ceneri volanti fungono così da materiale economico parzialmente sostitutivo dell'argilla. L'effetto degli additivi sulle proprietà degli impasti è generalmente dimagrante e favorisce l'essiccamento riducendo la formazione di screpolature e fessurazioni [20, 22]. A causa però della variabilità delle caratteristiche fisico-chimiche delle fly ash, è estremamente complesso tracciare un quadro unitario dei possibili utilizzi, tanto che in letteratura sono riportate sperimentazioni con impasti aventi un rapporto argilla/ceneri volanti variabile da 10:1 fino a meno di 1:1, poiché quando le quantità di ceneri volanti prevalgono sull'argilla dell'impasto si hanno drastiche diminuzioni del ritiro in secco (da 5% a 1%) accompagnate però da consistenti peggioramenti delle proprietà meccaniche dei manufatti [23, 24].

Tabella 4. Analisi XRF di un campione di argilla.

Spectrum: Argilla							
El	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	norm. Comp. C [wt.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O	8	K-series	43.37	60.89		0.00	0.00
Mg	12	K-series	2.16	2.00	MgO	3.59	0.01
Al	13	K-series	8.67	7.22	Al2O3	16.38	0.17
Si	14	K-series	23.02	18.41	SiO2	49.25	1.07
P	15	K-series	0.09	0.06	P2O5	0.20	0.00
S	16	K-series	0.12	0.08	SO3	0.30	0.00
K	19	K-series	2.78	1.60	K2O	3.35	0.00
Ca	20	K-series	11.23	6.29	CaO	15.71	0.04
Ti	22	K-series	0.57	0.27	TiO2	0.95	0.00
Cr	24	K-series	0.04	0.02	Cr2O3	0.06	0.00
Mn	25	K-series	0.28	0.11	MnO	0.36	0.00
Fe	26	K-series	7.38	2.97	FeO	9.50	0.01
Ni	28	K-series	0.01	0.01	NiO	0.02	0.00
Cu	29	K-series	0.02	0.01	CuO	0.02	0.00
Zn	30	K-series	0.06	0.02	ZnO	0.08	0.00
Rb	37	K-series	0.03	0.01		0.03	0.00
Sr	38	K-series	0.07	0.02	SrO	0.08	0.00
Zr	40	K-series	0.10	0.02	ZrO2	0.13	0.00
Rh	45	K-series	0.00	0.00		0.00	0.00
Total:			100.00	100.00			

Tabella 5 - Analisi XRF delle ceneri volanti della centrale termoelettrica di Cerano (BR).

Spectrum: Fly Ashes Cerano							
El	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	norm. Comp. C [wt.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O	8	K-series	46.65	62.55		0.00	0.00
Mg	12	K-series	1.25	1.10	MgO	2.07	0.01
Al	13	K-series	14.72	11.71	Al2O3	27.82	0.55
Si	14	K-series	24.53	18.74	SiO2	52.47	1.45
S	16	K-series	0.42	0.28	SO3	1.04	0.00
K	19	K-series	2.05	1.13	K2O	2.47	0.00
Ca	20	K-series	3.36	1.80	CaO	4.70	0.00
Ti	22	K-series	1.11	0.50	TiO2	1.85	0.00
Cr	24	K-series	0.03	0.01	Cr2O3	0.04	0.00
Mn	25	K-series	0.04	0.02	MnO	0.06	0.00
Fe	26	K-series	5.25	2.02	FeO	6.75	0.01
Ni	28	K-series	0.03	0.01	NiO	0.04	0.00
Cu	29	K-series	0.03	0.01	CuO	0.04	0.00
Zn	30	K-series	0.03	0.01	ZnO	0.04	0.00
Sr	38	K-series	0.41	0.10	SrO	0.48	0.00
Zr	40	K-series	0.10	0.02	ZrO2	0.13	0.00
Rh	45	K-series	0.00	0.00		0.00	0.00
Total:			100.00	100.00			

4.2 La fibra di canapa

Fibre naturali aggiunte agli impasti di argilla da sempre sono usate nella preparazione di mattoni in terra cruda, soprattutto in molti paesi del mediterraneo caratterizzate dal clima caldo. Sono laterizi costituiti da argilla cruda pressata ed essiccata naturalmente al sole, invece di essere sottoposta a cottura come nei mattoni tradizionali, spesso mescolati a fibre vegetali (canapa, canniccio o paglia) o con sabbia e ghiaia. Questo tipo di mattone in terra o argilla cruda rappresenta un valido sostituto dei mattoni cotti tradizionali e sta ritrovando oggi applicazione nella bio-edilizia, che cerca soluzioni efficaci ed alternative, all'insegna dell'eco-sostenibilità e del risparmio energetico. Inoltre le caratteristiche di questi mattoni, tra cui il PH neutro, li rendono altamente compatibili con svariati tipi di terreni e ideale per murature, pavimentazioni,

creazione di massetti e pannelli, riempimenti, intonaci e finiture. Il mattone in terra cruda caratterizzato quindi da una bassa inerzia termica trova applicazione in edifici costruiti in legno o con coperture in legno, in questo modo sfruttando la massa del materiale e la sua capacità di trasmettere il calore, è in grado di assorbire e rilasciare calore, attenuando così gli sbalzi termici tra interno ed esterno.

I laterizi cotti invece miscelati con le fibre naturali prive da impurità quali solventi ed adesivi, che fungono da porizzanti, sono mattoni leggeri e a più elevato potere isolante. Infatti gli additivi organici come segatura, paglia sminuzzata, fibre di canapa/canapulo o altri prodotti vegetali, molto utilizzati nell'antichità, sono usati da tempo con successo nella produzione di laterizi, per ridurre inconvenienti nell'essiccazione ed abbassare la densità dell'impasto cotto. La segatura è l'additivo più frequentemente usato per la formazione dei pori negli elementi di laterizio per l'isolamento termico. Da sempre questa è stata aggiunta, ed accettata senza problemi, all'argilla per la produzione di laterizi. Allo stesso modo sono molto utilizzati anche i trucioli di legno, la paglia polverizzata, canapulo in polvere o scaglie da risulta delle lavorazioni. Nelle fasi di produzione già durante il preriscaldamento dell'argilla mescolata alle fibre naturali hanno luogo dei processi di carbonizzazione a bassa temperatura che hanno come risultato l'emissione di idrocarburi. Questi, una volta liberi, vengono bruciati quasi subito, mentre i residui di carbone vengono ossidati solo alla temperatura di cottura finale dando un laterizio privo di qualsiasi sostanza degasante. Il laterizio può così essere smaltito in una discarica o essere riciclato, dato che l'inserimento della fibra naturale non produce materiali che possano formare eluati. Inoltre grazie all'effetto porizzante degli additivi si ottiene un prodotto più leggero ed una minore conduttività termica del laterizio, a vantaggio dell'isolamento termico. Il grado di alleggerimento e miglioramento della prestazione termica è regolata però da un rapporto o range ottimali che sono variabili in funzione delle caratteristiche fisiche dell'additivo usato. Fibre di canapa o similari inoltre sono già utilizzate in diversi campi, per esempio per la produzione di lana isolante in edilizia con successo

Tenendo conto delle caratteristiche che questi materiali di scarto possono conferire al prodotto finale, la cui produzione e distribuzione è ben strutturata, la scelta è stata piuttosto facile nel pianificare uno studio concepito per definire la leggerezza ed isolamento termico di un manufatto performante attraverso miscelazione meccanica, lavorabilità. La canapa (*Cannabis sativa*) è una pianta annuale di altezza variabile tra 1-3 m a seconda del contesto territoriale, coltivata nelle zone temperate (come Italia, Francia o altri paesi dell'Europa Orientale). La coltivazione della canapa presenta inoltre dei vantaggi dal punto di vista dell'impatto ambientale perché è una pianta che resiste bene a malattie e parassiti e richiede un uso modesto di pesticidi. Le fibre di canapa sono ottenute a partire dallo stelo mediante sfibratura meccanica. La pianta di canapa è composta da circa il 32% di fibra, 42% di canapule (fusto della canapa mondato delle fibre), 18% di midollo e l'8% di semi. Tutti questi componenti possono potenzialmente essere recuperati per la produzione di diversi prodotti: oli essenziali, profumi, cosmetici, lana di canapa, composti, fertilizzanti, alimenti, etc. La canapa nota per la qualità delle sue fibre, è stata utilizzata per secoli per i tessuti, articoli di cancelleria o per la fabbricazione di stoffa e corde [25]. Successivamente, la sua produzione è diminuita a causa della concorrenza di altre fibre vegetali come il cotone o delle fibre sintetiche. Tuttavia, negli ultimi anni, la canapa sta godendo di un rinnovato interesse soprattutto grazie allo sviluppo materiali per la bioedilizia [26, 27] con l'utilizzo di lana di canapa e fibre strutturate in forma di rotoli o pannelli e di spessore variabile. La conducibilità termica di questi prodotti varia da 0,038 a 0,04 W/m °C.

Per tutto questo la canapa è una pianta che si inserisce perfettamente in una dinamica di sviluppo sostenibile.

4.3 Miscelazione, lavorabilità ed essiccazione degli impasti

4.3.1 Impasto di argilla e fly-ash

Per una valutazione preliminare dei processi di miscelazione meccanica per lotti in scala da laboratorio, è stato usato inizialmente un mixer bivate avviato per circa 15 minuti, trascorsi i quali è stato estratto l'impasto (Figura 12) la cui consistenza è sembrata buona per la formatura manuale di un parallelepipedo. In questo modo è stata valutata la malleabilità e l'attitudine alla compattazione dell'impasto. Il risultato ha dimostrato che la miscela di argilla e ceneri volanti può essere utilizzata per la fabbricazione di laterizi. Una volta ottimizzati i rapporti materia prima e additivi, l'impasto è stato formato attraverso l'utilizzo del miscelatore a quattro vie (Figura 13) per la produzione di batch più consistenti passando così da qualche centinaio di grammi di impasto a miscele fino a 5 kg utilizzabili per produzione di mattoncini con un estrusore modello LWP 90 dotato d'impastatrice degasatrice interamente realizzato in acciaio inox AISI304, dotato di un corpo fisso e di un agitatore interno rotante, che permette una veloce ed efficace miscelazione.

La formatura dei campioni è avvenuta mediante pressione manuale in appositi stampi di alluminio e l'essiccazione è stata condotta in forno ventilato a 70 °C per 24 h, monitorando la perdita di acqua nel tempo.

Successivamente si è proceduto con la sinterizzazione con opportuno ciclo termico a 900 °C alla cottura dei laterizi.



Figura 12. Impasto di argilla e fly ash, miscelati con acqua.



Figura 13. Miscelatore a 4 vie (sinistra) e particolare dell'elica di miscelazione (destra).

Con l'argilla sono state utilizzate ceneri fornite da ENEL, prodotte nella centrale termoelettrica di Cerano (BR), quindi sono state preparate diverse composizioni di impasti, variando le percentuali dei componenti, in particolare il carico solido, al fine di renderlo plastico e formabile. L'impasto è stato ottimizzato con un carico solido massimo al 40% di ceneri.

Nella tabella 6 di seguito sono riportate le tre combinazioni più interessanti ottenute su cui sono state effettuate le caratterizzazione di conducibilità e prove meccaniche. Gli impasti realizzati sono stati identificati attraverso una sigla alfanumerica: i primi tre caratteri sono lettere che individuano i principali costituenti (A per l'argilla e FA per le fly ash) e i successivi quattro sono numeri che individuano la composizione in massa dell'impasto su base secca. La sigla AFAxxy ad esempio identifica pertanto una miscela di argilla e fly ash con xx% di argilla e yy% di fly ash.

In tabella 6 sono riportati i tre campioni realizzati crudi di argilla e cenere e le relative percentuali.

Tabella 6. Composizioni degli impasti a base di argilla e fly ash.

Campione	Argilla [g]	Ceneri [g]	Acqua [g]
AFA8020	80	20	30
AFA7030	70	30	30
AFA6040	60	40	30

In figura 14 sono riportati i tre campioni di argilla e fly ash prima e dopo il processo di sinterizzazione ottenuti con formatura a mano in stampo di alluminio.



Figura 14. Campioni di argilla e fly ash prima (sinistra) e dopo (destra) il processo di sinterizzazione.

4.3.2 Impasto di argilla e canapa

La canapa utilizzata è stata fornita dalla South Hemp Tecno srl di Crispiano (TA), unico distributore del sud Italia, sotto forma di fibra grezza di differente pezzatura e fino ad un massimo del 17% di pezzatura fine e media (Figura 15). La pezzatura più fine raggiunge una granulometria inferiore ai 500 micron proviene dalla South Hemp di Crispiano (TA).

La procedura per l'ottenimento di impasti in argilla e canapa è la stessa riportata nel paragrafo 4.3.1 per le miscele di argilla e fly ash, fino ad ottenere anche in questo caso composizioni ottimali a diverse percentuali in grado di mantenere lavorabilità, formatura per il manufatto finale.



Figura 15. Campioni di fibra di canapa a differente pezzatura.

Gli impasti realizzati sono stati identificati attraverso una sigla alfanumerica: i primi tre caratteri sono lettere che individuano i principali costituenti (A per l'argilla, CF per la canapa a pezzatura più fine, CM per la canapa a pezzatura media e CG per la canapa a pezzatura più grossa) e i successivi quattro sono numeri che individuano la composizione in massa dell'impasto su base secca. La sigla *ACFxxyy* ad esempio identifica pertanto una miscela di argilla e canapa fine con *xx%* di argilla e *yy%* di canapa.

In Tabella 7 di seguito sono riportate le combinazioni più ottenute

Tabella 7. Composizioni degli impasti a base di argilla e canapa.

Campione	Tipologia canapa	Argilla [g]	Canapa [g]	Acqua [g]
ACF7723	fine	50	15	38
ACF8317	fine	50	10	35
ACM8317	media	50	10	35
ACG8317	grossa	50	10	30

In Figura 16 sono riportati i quattro campioni crudi, essiccati ed infine cotti, di argilla e fibre di canapa con diversi gradi di finezza e con le percentuali riportate in Tabella 7. I provini sono stati ottenuti con formatura a mano in stampo di alluminio.



Figura 16. Campioni di argilla e canapa crudi (in alto), essiccati (al centro) e cotti (in basso).

4.4 Caratteristiche dei campioni prodotti

In Tabella 8 sono riportate le caratteristiche dei campioni realizzati: per ogni impasto sono riassunte le composizioni, il ritiro percentuale e la perdita di peso in essiccazione (secco) e in sinterizzazione (cotto) e la densità dell'impasto sinterizzato.

Tabella 8. Caratteristiche dei campioni di impasto realizzati.

Campione	Argilla [g]	Ceneri [g]	Canapa [g]	H ₂ O [g]	Tipologia canapa	Ritiro secco (%)	Ritiro cotto (%)	Perdita peso secco	Perdita peso cotto	Densità cotto [g/cm ³]
AFA8020	80	20	-	30	-	Nd	8	23	32	1,56
AFA7030	70	30	-	30	-	Nd	7	22	31	1,53
AFA6040	60	40	-	30	-	Nd	6,5	22	30	1,51
ACF7723	50	-	15	38	fine	7	8	36	54	0,95
ACF8317	50	-	10	35	fine	7	10	32	57	0,97
ACM8317	50	-	10	35	media	2	5	37	49	0,81
ACG8317	50	-	10	30	grossa	0	2	37	55	0,62

Si può osservare che le composizioni con canapa richiedono una percentuale di acqua superiore per l'ottenimento dell'impasto, e che la presenza di canapa riduce sia il ritiro in sinterizzazione che la densità del laterizio cotto, ritiro che diminuisce all'aumentare delle dimensioni delle fibre di canapa.

Si può altresì osservare che la densità e ritiro degli impasti in argilla e ceneri diminuiscono lievemente all'aumentare del contenuto di ceneri, fino al 40% del carico solido.

Nella realizzazione degli impasti con argilla e canapa a diversa finitura e percentuale si è potuto osservare che il tipo di canapa più grosso rende la formatura difficoltosa, mentre gli impasti con la canapa più fine e media risultano essere estremamente interessanti per la produzione di laterizi in termini di malleabilità e miscelazione. Per questo motivo i campioni con la canapa più grossa, AGC5010, risultati di difficile formatura sono stati esclusi dalla caratterizzazione finale.

4.5 Conclusioni

In base ai risultati preliminari ed alle caratteristiche dei prodotti realizzati, sono stati individuate e selezionate le materie prime e le percentuali di carico degli additivi per la produzione di laterizi, su cui eseguire le caratterizzazioni termiche e meccaniche a validare la possibilità di una produzione standardizzata.

Le caratterizzazioni per il comportamento termico e meccanico sono state eseguite in accordo rispettivamente alle norme:

- EN 12667:2002 *“Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Products of high and medium thermal resistance”*
- EN 772-1:2000 *“Methods of test for masonry units. Determination of compressive strength”*.

5 Caratterizzazione termica e meccanica degli impasti messi a punto

5.1 Tipologia di impasti impiegati

Lo studio è stato condotto utilizzando le seguenti tipologie di impasti (tra parentesi quadra è indicata la sigla identificativa dell'impasto) realizzate con la collaborazione di SALENTEC:

- | | |
|---------------------------------------|------------|
| 1. Argilla (100%) | [Arg. tq] |
| 2. Argilla (60%) + fly ash (40%) | [AFA6040]; |
| 3. Argilla (70%) + fly ash (30%) | [AFA7030]; |
| 4. Argilla (83%) + canapa fine (17%) | [ACF8317]; |
| 5. Argilla (83%) + canapa media (17%) | [ACM8317]; |

in cui le % indicate sono da intendersi in massa su base secca.

Le Figura 17-19 mostrano alcuni campioni investigati sui quali è stata calcolata la densità attraverso il rapporto tra massa e volumetria.



Figura 17. Impasti di argilla e canapa.



Figura 18. Impasti di argilla e fly ash.



Figura 18. Impasti di sola argilla.

5.2 Misura della conducibilità termica

La misura di conducibilità termica sui diversi impasti sopra menzionati è stata effettuata attraverso differenti tecniche e strumentazione in dotazione presso i laboratori ENEA, di seguito descritte.

5.2.1 Metodo Hot Disk

Il Metodo Hot Disk consente di misurare la conducibilità termica in maniera indiretta attraverso un aumento della temperatura generata da una corrente elettrica all'interno di un sensore. Il calore generato si diffonde all'interno del materiale in funzione della sua morfologia e della sua capacità termica.

La tecnica da ottimi risultati su materiali omogenei quali liquidi, paste, solidi e polveri siano essi elettricamente conduttivi o isolanti potendo coprire un range di misura per la conducibilità da 0,005 W/(mK) e 500 W/(mK) ed una gamma di temperature da -220 °C a 1200 °C. La flessibilità strumentale facilita lo studio di materiali e compositi con differenti gradi di anisotropia nella struttura o con diversi gradi di porosità, così come altre strutture di nuovi campioni impegnativi o con geometria complessa le cui le proprietà termiche sia di conducibilità termica che di diffusività termica non sempre sono note o di cui non è sempre facile trovare valori corretti in letteratura. Poiché il metodo fornisce il dato in maniera immediata, questo permette di effettuare il test anche nel giro di pochi secondi

Per quanto specificato la misura fa riferimento alla norma SVENSK STANDARD SS ISO 22007-2:2009 dove la tecnica con metodo Hot Disk è stato approvato nel 2008 come uno standard internazionale per la misurazione conducibilità termica e diffusività termica di plastica.

Le misure sono state eseguite con lo strumento TPS 2500 su provini di forma cilindrica (d=7cm, h=3cm), sebbene al momento, da letteratura lo strumento più adatto per i materiali in edilizia sembra essere il TPS 1500 adatto a valutare le differenze di impasto dovute ad umidità, degasamento o di composizione stessa in particolar modo per impasti di argilla.

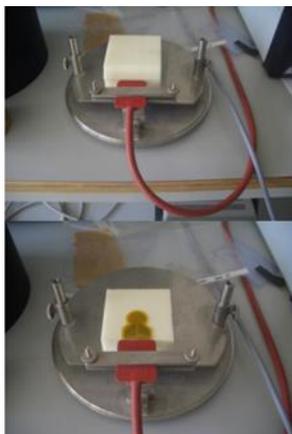


Figura 20. Particolare dello strumento.

5.2.2 TCi C Therm



Figura 21. Particolare dello strumento.

Il metodo per la misura della conducibilità in regime dinamico che lo strumento adotta è quello del transitorio all'interfaccia sensore/materiale, una corrente nota viene applicata all'elemento di

riscaldamento del sensore che fornisce una piccola quantità di calore. Il calore fornito genera un aumento della temperatura all'interfaccia tra il sensore e il campione - tipicamente inferiore a 2 °C che induce una variazione della caduta di tensione dell'elemento sensore.

Il tasso di incremento della tensione sensore viene utilizzato per determinare le proprietà termofisiche del materiale campione ,che saranno quindi inversamente proporzionali alla velocità di aumento della tensione del sensore. Inoltre con questa tecnica è possibile lavorare con spessori minimi di 2 mm per materiali isolanti ed i tempi di prova si riducono a pochi secondi.

La metodologia seguita per la valutazione della conducibilità termica non viene riferita a nessuna norma attualmente vigente.

5.2.3 Metodo piastra calda con anello di guardia e termoflussimetro

Gli stessi campioni sono stati analizzati con il metodo stazionario della piastra calda con anello di guardia e termoflussimetro secondo la norma UNI EN 1266:2002 e con la collaborazione di CertiMaC. Rispetto al metodo HOTDISK i campioni di forma cilindrica ($d=5\text{cm}$, $h=0.7\text{cm}$) sono stati preparati in riferimento a quanto precisato nella norma.

La prova che utilizza il termoflussimetro ad anello di guardia consente anche in questo caso la misura della conducibilità in maniera indiretta attraverso la resistenza termica del materiale sottoposto ad un flusso termico generato da un gradiente termico alle sue interfacce, in riferimento alla taratura effettuata con un materiale con caratteristiche termiche certificate.



Figura 22. Particolare dello strumento.

5.2.4 Isomet

Provini delle dimensioni di diametro 5x5 cm sono stati preparati per la misura della conducibilità termica in regime dinamico effettuata con lo strumento Isomet 2104 che si basa sull'analisi della risposta del materiale a flussi di calore indotto mediante riscaldamento elettrico utilizzando un resistore avente un contatto termico diretto con la superficie del campione, riducendo anche in questo caso i tempi di misura .

A differenza degli altri strumenti utilizzati che nella procedura di prova non fanno ad alcun riferimento normativo , con questa tecnica è richiesta una calibrazione di massima delle sonde con materiali di

riferimento permettendo una valutazione più affidabile dei dati nello studio e sviluppo di materiali isolanti nell'ambito del settore edilizio.



Figura 23. Particolare dello strumento.

5.2.5 Risultati

La Tabella 9 riassume i valori di conducibilità termica ottenuti attraverso i diversi metodi, confrontati con i valori di conducibilità tabellari per i materiali in edilizia (UNI EN 1745) mostrati in Figura 24. La Tabella 10 riporta i valori di conducibilità termica per le varie tipologie di impasto in relazione alle loro densità.

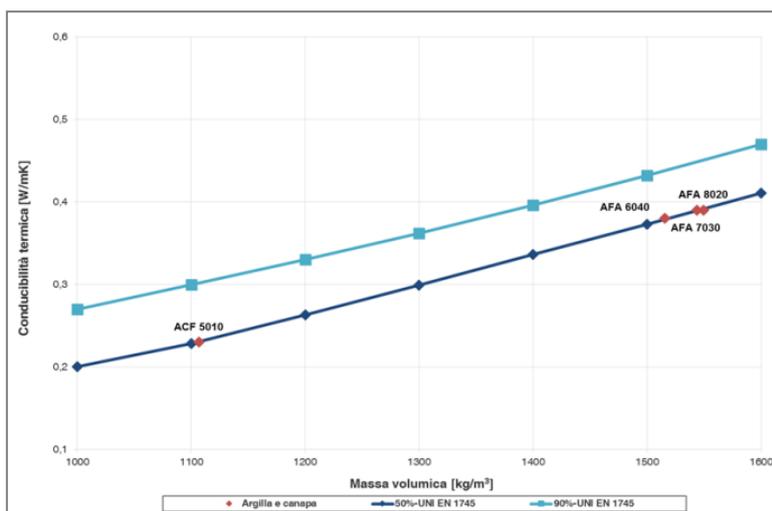


Figura 24. Conducibilità termica tabellare (UNI EN 1745).

Tabella 9. Confronto tra i valori di conducibilità termica dei vari impasti con le differenti tecniche impiegate.

Impasti	Termoflux λ w/mK dry 10	HotDisk λ w/mK	Tci C Therm λ w/mK	Isomet λ w/mK riportato a dry 10	Teorico 90%frattile λ w/mK dry 10
Arg. tq	0,52	0,62	-	0,531	0,51
AFA7030	0,428	0,49	0,55	0,38	0,38
AFA6040	0,423	0,47	0,43	0,4	0,42
ACF8317	-	0,305	0,22	0,2	0,23
ACM8317	0,142	-	0,04	-	0,19

Tabella 1. Confronto tra i valori di conducibilità per gli impasti in relazione alla loro densità.

Impasti	conducibilità termica [W/mK]	densità [g/cm ³]
Arg. tq	0,532	1,705
AFA6040	0,423	1,540
AFA7030	0,428	1,556
ACF8317	0,23	1,106
ACM8317	0,142	0,665

5.3 Caratterizzazione meccanica dei provini

Le tipologie di impasti AFA6040, AFA7030, ACF8317 sono state sottoposte a misure di resistenza a compressione presso il laboratorio del CR ENEA di Brindisi, impiegando una Macchina per prove di compressione MTS Alliance RT50 con capacità 50 kN e in accordo alle norme EN 772-1:2000 "Methods of test for masonry units. Determination of compressive strength".

Occorre premettere che le dimensioni dei provini a disposizione si discosta da quanto previsto dalla norma sopra citata: per tal motivo i risultati di seguito riportati non sono rappresentativi del comportamento della singola composizione ma sono da intendersi come propedeutiche a misure da effettuare in futuro su provini standard. Ciononostante, l'esecuzione dei test secondo la metodica stabilita dalla norma consente di eseguire una comparazione qualitativa dei differenti comportamenti degli impasti.

In particolare, i test di compressione sono stati eseguiti su n=4 campioni per ogni tipologia di impasto investigato, di forma cubica e lato 10 mm e realizzate con la collaborazione di SALENTEC. I provini sono stati dapprima condizionati per essiccazione in stufa a T=105°C per almeno 24 ore, seguita da raffreddamento a temperatura ambiente per almeno 4 ore, e fino a raggiungimento di una massa costante, secondo quanto previsto dalla norma UNI EN 772-1:2000. Dalla massa così ottenuta e dalla volumetria dei campioni (determinata con misurazioni attraverso un calibro a corsoio centesimale) si è pervenuti alla densità degli stessi. La tabella sottostante riepiloga i risultati della fase di essiccazione:

Tabella 11. Essiccazione dei provini sottoposti a test di compressione.

lotto	n. campione	massa [g]			variazione massa (%)		dimensioni [mm]			densità [g/cm ³]
		@ t=0	@ t=24h	@ t=48h	@ t=24h	@ t=48h	a	b	h	
AFA6040	1	1,630	1,630	1,630	0,0%	0,0%	10,08	10,15	10,06	1,58
	2	1,643	1,643	1,642	0,0%	0,1%	10,09	10,09	10,03	1,61
	3	1,646	1,646	1,646	0,0%	0,0%	10,07	10,09	10,08	1,61
	4	1,628	1,628	1,628	0,0%	0,0%	10,03	10,12	10,06	1,59
AFA7030	1	1,627	1,626	1,626	0,1%	0,0%	10,06	10,14	9,99	1,60
	2	1,622	1,621	1,620	0,1%	0,1%	10,09	10,08	10,1	1,58
	3	1,666	1,666	1,666	0,0%	0,0%	10,09	10,14	10,08	1,62
	4	1,649	1,648	1,648	0,1%	0,0%	9,92	10,14	10,06	1,63
ACF8317	1	1,244	1,243	1,243	0,1%	0,0%	9,88	10,11	10,08	1,23
	2	1,255	1,254	1,254	0,1%	0,0%	10,07	10,03	10,09	1,23
	3	1,238	1,238	1,237	0,0%	0,1%	10,07	10,03	10,14	1,21
	4	1,241	1,241	1,241	0,0%	0,0%	10,17	10,00	10,00	1,22

Successivamente, i provini sono stati sottoposti a test di compressione, posizionandoli tra le piastre della pressa ed applicando una velocità costante di avanzamento della piastra superiore, pari a 0,3 mm/min, fino al raggiungimento della rottura. Le figure 25 e 26 mostrano un particolare dell'esecuzione dei test e un provino a rottura raggiunta.

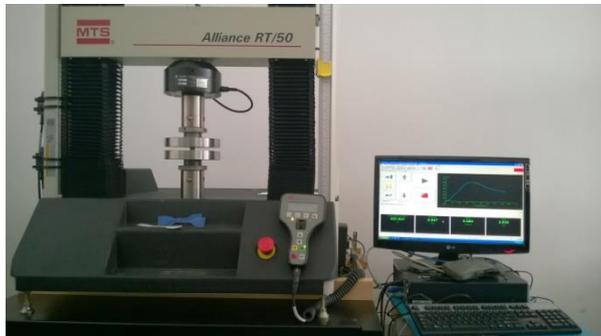


Figura 25. Particolare dell'esecuzione di un test di compressione.



Figura 1. Rottura di un provino a fine test.

In allegato si riportano i risultati dei test condotti sui campioni e le relative curve di “carico applicato-deformazione” e “resistenza a compressione-deformazione”. La resistenza a compressione del singolo campione (N/mm² o MPa) è data dal rapporto tra il carico di rottura raggiunto e la superficie lorda sottoposta al carico (lunghezza per larghezza). La Tabella 12 e la Figura 27 riassumono i principali risultati ottenuti.

Tabella 12. Risultati dei test di compressione sui provini.

lotto	n. campione	compressive strenght [MPa]	mean compressive strenght [MPa]	standard deviation compressive strenght [MPa]
AFA6040	1	46,368	50,785	3,655
	2	55,060		
	3	49,791		
	4	51,922		
AFA7030	1	37,154	51,078	11,485
	2	47,345		
	3	55,904		
	4	63,909		
ACF8317	1	15,715	9,021	4,515
	2	6,445		
	3	6,181		
	4	7,741		

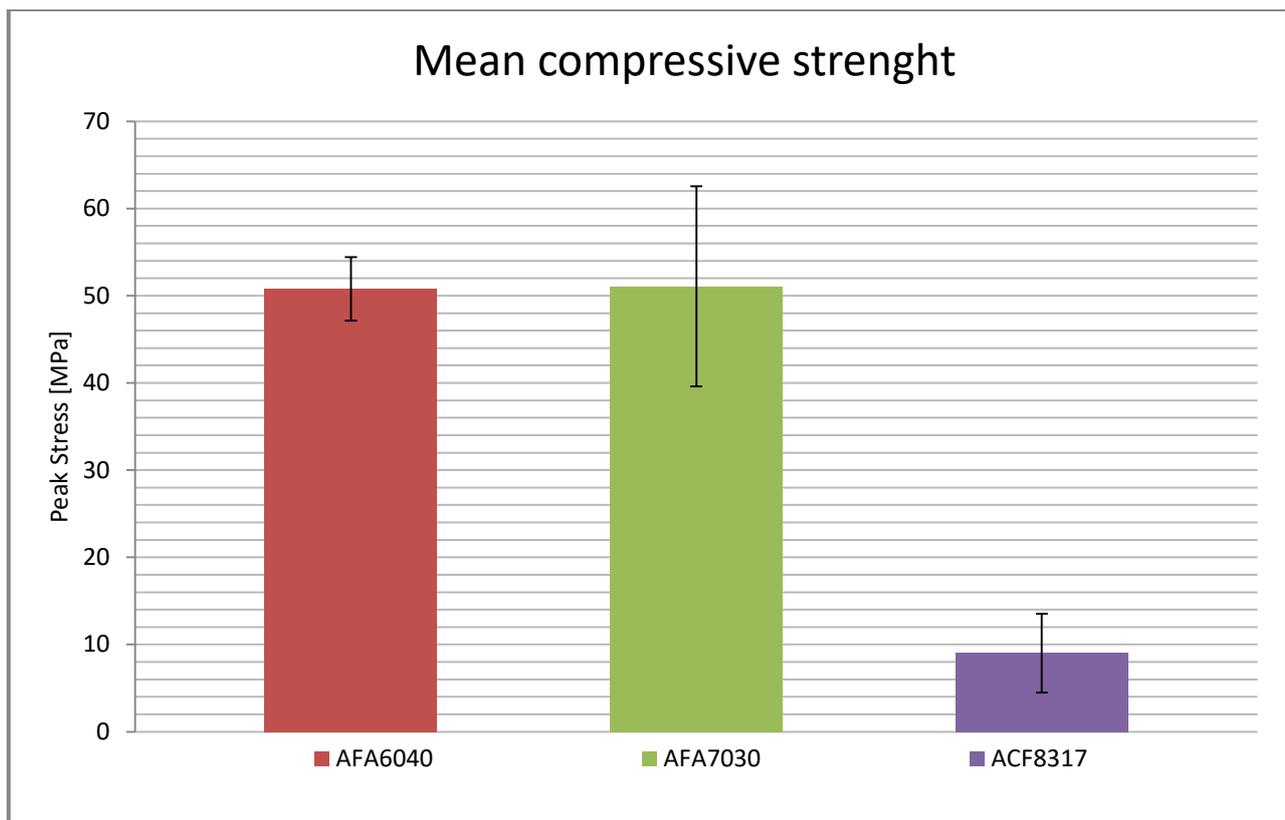


Figura 27. Carico di rottura a compressione per le differenti tipologie di impasti investigati.

Dai risultati raggiunti si evince in particolare che l'impasto in argilla e canapa ha una resistenza a compressione nettamente inferiore a quello in argilla e fly ash. Una motivazione è con probabilità l'elevato grado di porosità che caratterizza l'impasto di argilla e canapa, rispetto a quello riscontrato negli impasti di argilla e fly ash, che apparivano molto più compatti.

Si nota inoltre un comportamento pressoché invariato aumentando il tenore di ceneri dal 30 al 40 % all'interno dell'impasto.

6 Conclusioni

Lo scopo di questo studio è stato quello di valutare un'innovazione tecnologica che renda l'industria delle costruzioni in grado di realizzare prodotti edilizi innovativi, sostenibili e ad alto contenuto tecnologico, in grado di fornire prestazioni, in termini di risparmio energetico, superiori a quelle offerte dagli attuali standard edilizi, ma che allo stesso tempo siano meno impattanti sull'ambiente circostante.

Negli ultimi anni questo tema ha ritrovato nuovo interesse poiché accanto a motivazioni di carattere prettamente tecnico è cresciuto notevolmente l'interesse per le problematiche di natura ambientale. Difatti, il futuro delle costruzioni passa per l'innovazione ambientale e nella prospettiva dell'economia circolare oggi è davvero possibile un rilancio del settore che permetta di ridurre l'impatto sugli ecosistemi e di spingere, al contempo, la creazione di lavoro e di ricerca applicata.

Le migliori prospettive concernono i materiali ricchi in sostanze organiche, in quanto la loro combustione in fase di cottura permette un significativo risparmio energetico, anche se usati in quantità ridotte (<10%). Le proprietà tecnologiche dei prodotti subiscono variazioni generalmente tollerabili, e di sovente positive, quali un alleggerimento in pasta che permette ulteriori vantaggi economici in fase di trasporto e di posa e conferisce al prodotto migliori proprietà di isolamento termico. Non è un caso, quindi,

che la gran parte delle attività di ricerca faccia riferimento a scarti in grado di sviluppare calore in fase di cottura del laterizio. La grande variabilità composizionale dei rifiuti impone sempre la realizzazione, in ciascun caso, di una serie di sperimentazioni specifiche, preliminari all'uso industriale di un determinato tipo di rifiuto. Inoltre, è necessaria una frequente verifica delle caratteristiche di scarti già inseriti nel processo produttivo, allo scopo di prevenire i negativi effetti connessi con una eccessiva variabilità. L'uso di altri materiali di scarto influenza in particolare la plasticità degli impasti e la porosità e la resistenza meccanica dei prodotti cotti, ma non sempre in senso positivo.

In quest'ottica, il focus del presente documento è stato la messa a punto di impasti in laterizio innovativo che oltre a consentire un miglioramento delle prestazioni dal punto di vista energetico, risultino anche più sostenibili, attraverso l'impiego di scarti di altri processi industriali del territorio (simbiosi industriale). Data la prossimità di produzione, la scelta delle tipologie di scarti da reimpiegare è ricaduta sulle ceneri volanti prodotte dalla combustione del carbone della Centrale Federico II dell'ENEL di Cerano e sui prodotti derivanti dalla trasformazione primaria delle paglie di canapa (*Cannabis sativa* L.) eseguita dalla South Hemp Tecno srl (Crispiano – TA).

Presso i laboratori del CR ENEA di Brindisi sono stati realizzati differenti impasti in argilla e ceneri volanti e in argilla e fibra di canapa di differente pezzatura, al fine di valutare l'impatto della presenza degli scarti selezionati sulle caratteristiche fisiche e termiche, in primis conducibilità termica, densità e resistenza a compressione. I risultati delle misure condotte in accordo alla normativa internazionale di riferimento, hanno mostrato una riduzione sia della densità che della conducibilità termica per entrambe le tipologie di impasto realizzati, rispetto ai valori ottenuti per la sola argilla. La riduzione è più consistente per l'impasto realizzato adoperando fibra di canapa anziché ceneri volanti, attestando un miglior comportamento della prima in termini di isolamento termico e di alleggerimento del laterizio. Tuttavia l'impasto in argilla e canapa ha presentato una resistenza a compressione nettamente inferiore a quello in argilla e ceneri volanti. Una motivazione è con probabilità l'elevato grado di porosità che caratterizza l'impasto di argilla e canapa, rispetto a quello riscontrato negli impasti di argilla e ceneri, che apparivano molto più compatti. Occorre comunque premettere che le dimensioni dei provini a disposizione si discosta da quanto previsto dalla norma EN 772-1:2000 per la determinazione della resistenza a compressione e che pertanto i risultati ottenuti intendono solo fornire una valutazione qualitativa della differenza di comportamento degli impasti. Le misurazione effettuate sono quindi da intendersi propedeutiche alle misure da effettuare in futuro su provini di dimensioni standard.

I risultati sono incoraggianti circa l'impiego della tipologia di scarti selezionati per l'ottenimento di impasti in laterizio da impiegare nel settore dell'edilizia, confermando che il riciclaggio degli scarti industriali ed urbani nelle materie prime argillose è teoricamente utile sia per chi li produce (smaltimento corretto di materiali ingombranti ed inquinanti) sia per i produttori di laterizi (riduzione degli oneri di approvvigionamento di materie prime, risparmi energetici, migliori prestazioni tecnologiche in alcuni casi). La prossimità assicurata dalla provenienza locale degli scarti consente inoltre una riduzione degli oneri di trasporto, altrimenti non trascurabili e che inciderebbero in modo considerevole sui costi globali di produzione. In particolare la fibra ottenuta dalla canapa rappresenta un interessante materiale alternativo ai tradizionali materiali isolanti per i climi mediterranei.

7 Riferimenti bibliografici

1. The Economist Intelligence Unit, “Investing in energy efficiency in Europe's Buildings. A view from the construction and real estate sectors”, (2013), The Economist.
2. J. Laustsen, P. Ruyssevelt, D. Staniaszek, D. Strong, S. Zinettim, “Europe's Buildings Under the Microscope. A country-by-country review of the energy performance of buildings”, (2011), BPIE.
3. Legambiente, “Recycle. La sfida nel settore delle costruzioni” Secondo Rapporto dell’Osservatorio Recycle, (2016).
4. D.Lsg.152/06 – Allegato D “Elenco dei rifiuti istituito conformemente all’articolo 1, lettera a), della direttiva 75/442/CEE relativa ai rifiuti e all’articolo 1, paragrafo 4, della direttiva 91/689/CEE relativa ai rifiuti pericolosi di cui alla Decisione della Commissione 2000/532/CE del 3 maggio 2000 (direttiva Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio 9 aprile 2002)”.
5. Dati TERNA – 2012.
6. Dichiarazione ambientale 2014 – Impianto termoelettrico Federico II, Enel Produzione S.p.A.
7. M. Duijve, “Comparative assessment of insulating materials on technical, environmental and health aspects for application in building renovation to the Passive house level”, Master Thesis, (2012) Utrecht University.
8. B.P. Jelle, “Traditional, State-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities”, Energy and buildings, Volume 43, Issue 10 (2011), pp. 2549 – 2563.
9. S. Kowatsch, “Mineral wool insulation binders”, Ch. 10, (2010), Springer, Verlag Berlin Heidelberg.
10. [A.C. Schmidt, A.A. Jensen, A.U. Clausen, O. Kamstrup, D. Postlethwaite, “A comparative Life Cycle assessment of building insulation products made of stone wool, paper wool and flax”, The International Journal of Life Cycle Assessment, Volume 9, Issue 1 (2004), pp 53-46.
11. U. Bos, S. Deimling, 2008. “Development of a complete biogenous insulating material – LCA results”, (2008), LBP University of Stuttgart and PE International, Germany.
12. M. Haas, “NIBE’s Basiswerk Millieuclassificaties Bouwproducten”, vol 1 (2008). Jan van Arkel.
13. L. Lipworth, C. La Vecchia, C. Bosetti, J.K. McLaughlin, “Occupational Exposure to Rock Wool and Glass Wool and Risk of Cancers of the Lung and the Head and Neck: A Systematic Review and Meta-Analysis”, Journal of occupational and environmental medicine, Volume 51, Issue 9 (2009), pp. 1075 – 1087.
14. M. Koivula, H.R. Kymäläinen, J. Virta, H. Hakkarainen, T. Hussein, J. Komulainen, H. Kopone., M. Hautalaa, K. Hämeri, P. Kanerva, A. Pehkonen, A.M. Sjöberg, “Emissions from thermal insulations— part 2: evaluation of emissions from organic and inorganic insulations”. Building and environment, Volume 40, Issue 6 (2005), pp. 803-814.
15. A. Donatelli, D. Cuna D, M.A. Tagliente, M.L. Protopapa, A. Mevoli, P. Aversa, C. Blasi, L. Capodiecì, V.A.M. Luprano, “Effect of treatments on the aging behaviour of hemp fibres for building

- construction in the Mediterranean Area”, *Journal of Building Engineering*, Volume 11 (2017), pp 37-47.
16. A. Donatelli, P. Aversa, V.A.M. Luprano, “Set-up of an experimental procedure for the measurement of thermal transmittances via infrared thermography on lab-made prototype walls”, *Infrared Physics & Technology*, Volume 79 (2016), pp. 135-143.
 17. P. Aversa, D. Palumbo, A. Donatelli, R. Tamborrino, F. Ancona, U. Galietti, V.A.M. Luprano, “Infrared thermography for the investigation of dynamic thermal behaviour of opaque building elements: Comparison between empty and filled with hemp fibres prototype walls”, *Energy and Buildings*, Volume 152 (2017), pp. 264-272.
 18. B. Fabbri, M. Dondi, “La produzione del laterizio in Italia”, (2006), Faenza Editrice.
 19. B. Fabbri, M. Dondi, “Caratteristiche e difetti del laterizio”, (2006), Faenza Editrice.
 20. U. Barbieri, “Analisi delle possibilità di impiego delle ceneri volanti di carbone. Disponibilità e studio delle loro caratteristiche”, *Industria Ital. Laterizi*, Volume 4 (1986) 153-159; *Ceramurgia*, Volume 17/6 (1987) 246-250.
 21. F. Gambaro, M. Giordani, G. Ferraiolo, “L’impiego delle ceneri volanti in utilizzazioni industriali”, *La Ceramica*, Volume 1 (1977), pp. 7-10.
 22. F. Šrbek, “Possibilities of power station ash use: fly ash as correcting admixture or fundamental raw material at brickworks (czech)”. *Stavivo* 6 (1982), pp. 314-320.
 23. M. Anderson, G. Jackson, “The beneficiation of power station coal ash and its use in heavy clay ceramics”, *Trans. Jour. Brit. Ceram. Soc.*, Volume 82, Issue 2 (1983), pp-50-55.
 24. R.M. De Gutierrez, S. Delvasto, “Scorie di carbone: una materia prima alternativa per mattoni in laterizio”. *Ceramurgia* 26, (1996), pp.11-13.
 25. V. Cérézo, “Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d’un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique”, *Thèse de doctorat de l’ENTPE* (2005).
 26. S. Courgey, J. P. Oliva, “L’isolation écologique”, (2001), Editions Terre Vivante.
 27. M. Vignon, “Le chanvre et ses applications”, CERMAV Grenoble.

8 Abbreviazioni ed acronimi

Nel rapporto si fa uso dei seguenti acronimi e abbreviazioni:

nZEB	nearly Zero Energy Building
LCA	Life Cycle Assessment
FU	Functional Unit
AFA	Argilla-Fly Ash
ACF	Argilla-Canapa fine
ACM	Argilla-Canapa media
ACG	Argilla-Canapa grossa

9 Allegati

9.1 Allegato 1 – Report dei test di compressione

AFA 6040

Sample ID: AFA6040.mss
 Method: MTS EM Compression (Simplified)SI.msm Operator: ENEA

Sample Information:

Name	Value
SampleID	AFA6040

Sample Results:

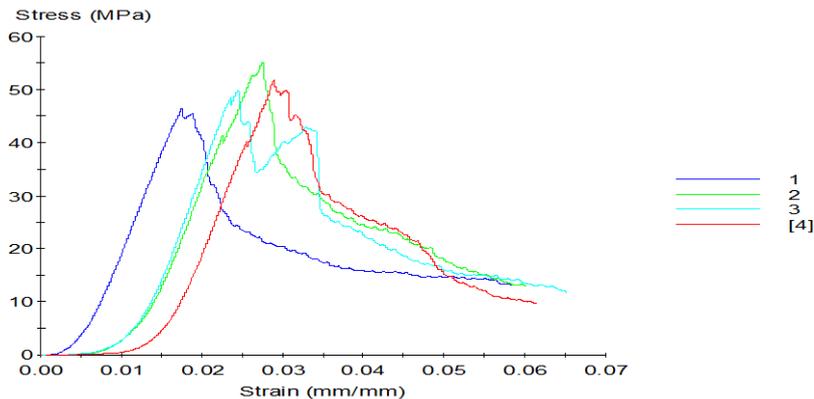
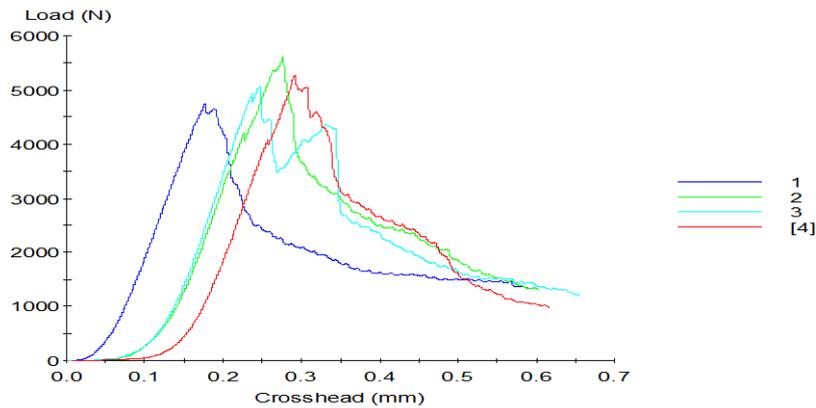
Specimen Results:

Specimen #	Width mm	Thickness mm	Numero campione	Platen Separation mm	Peak Load N	Peak Stress MPa	Modulus MPa (*)
1	10.15	10.08	01	10.060	4744.0	46.368	3918.397
2	10.09	10.09	02	10.030	5605.6	55.060	4110.811
3	10.09	10.07	03	10.050	5059.1	49.791	4273.870
4	10.12	10.03	04	10.060	5270.2	51.922	4107.272
MeaMedia	10.11	10.07		10.050	5169.7	50.785	4102.587
Std. Dev.	0.03	0.03		0.014	362.2	3.655	145.320

(*)in linear step

Test Inputs:

Name	Value	Units
Data Acq. Rate	30.0	Hz
extension_limit	8.000	mm
Speed Test	0.30	mm/min



AFA7030

Sample ID: AFA7030.mss
 Method: MTS EM Compression (Simplified)SI.msm Operator: ENEA

Sample Information:

Name	Value
SampleID	AFA7030

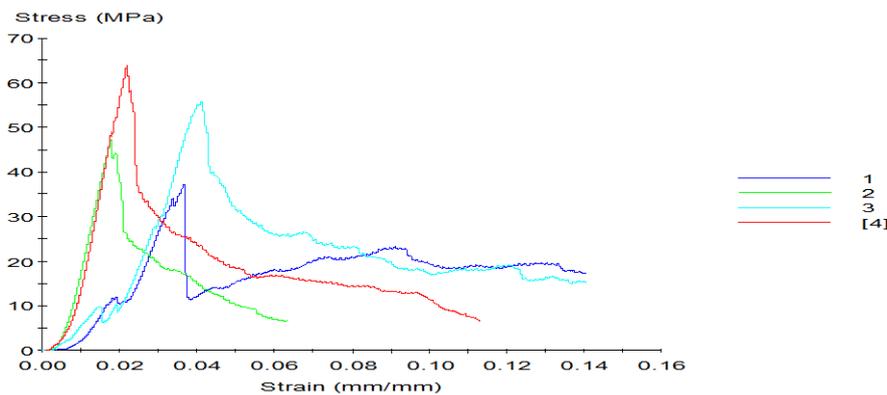
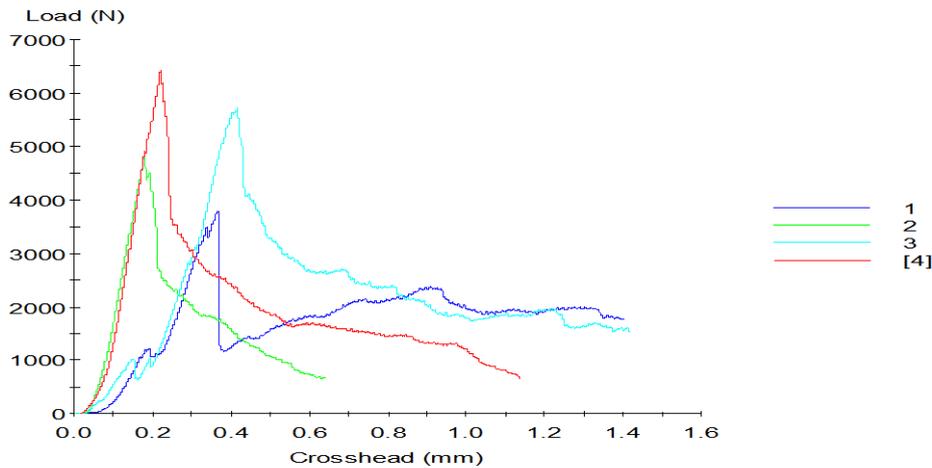
Specimen Results:

Specimen #	Width mm	Thickness mm	numero_campione	Platen Separation mm	Peak Load N	Peak Stress MPa	Modulus(*) MPa
1	10.14	10.06	13	9.990	3790.0	37.154	2304.324
2	10.08	10.09	14	10.100	4815.3	47.345	4032.905
3	10.14	10.09	15	10.080	5719.6	55.904	3257.185
4	10.14	9.92	16	10.060	6428.5	63.909	4862.167
MeaMedia	10.12	10.04		10.058	5188.4	51.078	3614.145
Std. Dev.	0.03	0.08		0.048	1142.3	11.485	1091.783

(*)in linear step

Test Inputs:

Name	Value	Units
Data Acq. Rate	30.0	Hz
Test Speed	0.30	mm/min



ACF8317

Sample ID: ACF8317.mss
 Method: MTS EM Compression (Simplified)SI.msm Operator: ENEA

Sample Information:

Name	Value
SampleID	ACF8317

Specimen Results:

Specimen #	Width mm	Thickness mm	numero_campione	Platen Separation mm	Peak Load N	Peak Stress MPa	Modulus (*) MPa
1	10.11	9.88	25	10.080	1569.7	15.715	1820.447
2	10.03	10.07	26	10.090	651.0	6.445	625.864
3	10.03	10.07	27	10.140	624.3	6.181	258.155
4	10.00	10.17	28	10.000	787.3	7.741	401.807
MeaMedia	10.04	10.05		10.078	908.1	9.021	776.568
Std. Dev.	0.05	0.12		0.058	446.8	4.514	712.178

(*) In linear step

Test Inputs:

Name	Value	Units
Data Acq. Rate	60.0	Hz
Test Speed	0.30	mm/min

