



Ricerca di Sistema elettrico

Componenti edili con prestazioni energetiche ottimizzate per i climi mediterranei e basati su miscele di calcecanapulo

V. A. M. Luprano, P. Aversa., C. Tripepi, A. Marzo,
B. Daniotti , G. Dotelli, S. Sabbadini, A. Rogora

COMPONENTI EDILI CON PRESTAZIONI ENERGETICHE OTTIMIZZATE PER I CLIMI MEDITERRANEI E BASATI SU MISCELE DI CALCECANAPULO

V. A. M. Luprano, P. Aversa, C. Tripepi, A. Marzo (ENEA)

S. Sabbadini, A. Rogora (Politecnico di Milano, Dipartimento Architettura e Studi Urbani)

B. Daniotti (Politecnico di Milano, Dipartimento Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito)

G. Dotelli Politecnico di Milano, Dipartimento. Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta")

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

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 con prestazioni energetiche ottimizzate per i climi mediterranei e basati su miscele di calcecanapulo

Responsabile del Progetto: Ing. Domenico Iatauro, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'accordo di collaborazione "*Componenti edili a base naturale per edifici nZEB*"

Responsabile scientifico ENEA: Dott.ssa Vincenza Anna Maria Luprano

Responsabile scientifico Politecnico di Milano: Prof. Alessandro Rogora

Indice

SOMMARIO.....	5
1. INTRODUZIONE.....	6
2. ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE.....	8
2.1 TECNICHE COSTRUTTIVE IN CALCECANAPULO: PANORAMA A LIVELLO NAZIONALE E INTERNAZIONALE DELLE VARIE TECNOLOGIE DI UTILIZZO 8	
2.1.1 <i>La canapa per l'edilizia</i>	8
2.1.2 <i>Il canapulo e le sue mescole</i>	9
2.1.2.1 Il canapulo come aggregato vegetale	10
2.1.2.2 I leganti per biocompositi a base di canapulo.....	12
2.1.3 <i>Riempimenti in calcecanapulo</i>	13
2.1.4 <i>Posa a spruzzo</i>	14
2.1.5 <i>Getti in calcecanapulo</i>	14
2.1.6 <i>Il blocco in calcecanapulo</i>	15
2.1.7 <i>Intonaci a miglioramento termico in calcecanapulo</i>	15
2.1.8 <i>Rasature e finiture in calcecanapulo</i>	16
2.1.9 <i>Normativa di riferimento</i>	16
2.2 PANORAMA DEI MANUFATTI EDILI IN CALCECANAPULO PRESENTI SU TERRITORIO NAZIONALE (PRODUZIONI E IMPORTAZIONI)	19
2.2.1 <i>Ditte che lavorano la pianta della canapa</i>	19
2.2.2 <i>Aziende che si occupano di canapa nel settore dell'edilizia</i>	19
2.2.2.1 Aziende produttrici italiane di blocchi in calcecanapulo.....	19
2.2.2.2 Aziende importatrici in Italia di blocchi in calcecanapulo.....	19
2.2.2.3 Aziende produttrici italiane di altri materiali in canapa.....	20
2.2.3 <i>Analisi blocchi calcecanapulo</i>	20
2.2.4 <i>Questionari</i>	20
2.2.5 <i>Risposte ai questionari</i>	22
2.2.6 <i>Analisi delle risposte raccolte</i>	26
3. ANALISI LCA DELLE MATERIE PRIME E DELLE TECNICHE IN CALCECANAPULO	29
3.1 STATO DELL'ARTE	29
3.2 LCA DEL BLOCCO IN CALCECANAPULO.....	30
3.2.1 <i>Unità funzionale (FU)</i>	30
3.2.2 <i>Confini del sistema</i>	31
3.2.3 <i>Qualità dei dati e metodi di allocazione</i>	31
3.2.4 <i>Metodi di caratterizzazione degli impatti</i>	32
3.2.5 <i>La parete modello</i>	32
3.3 ANALISI DEGLI IMPATTI (LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT, LCIA)	32
3.3.1 <i>Carbonatazione</i>	32
3.3.2 <i>Energia immagazzinata o Cumulative Energy Demand (CED)</i>	33
3.3.3 <i>Impronta di carbonio o Carbon Footprint (Greenhouse Gas Protocol)</i>	34
3.3.4 <i>Metodo CML-IA</i>	34
4. CARATTERIZZAZIONE IN LABORATORIO.....	38
4.1 REALIZZAZIONE PARETE IN BLOCCHI DI CALCECANAPULO PER PROVE DI LABORATORIO	38
4.2 SET UP SPERIMENTALE.....	40
4.3 TEST DI MISURA IN CAMERA CLIMATICA.....	43
4.3.1 <i>Set-up analisi sperimentale</i>	43
4.3.1.1 Descrizione della parete indagata	43
4.3.1.2 Strumentazione utilizzata	44

4.3.2	<i>Misure della trasmittanza</i>	45
4.3.2.1	Norme di riferimento.....	45
4.3.2.2	Apparato di prova.....	46
4.3.2.3	Cicli impostati in camera climatica	46
4.3.2.4	Risultati sperimentali e correlazione dati	47
4.3.2.5	Risultati numerici.....	48
4.3.3	<i>Test di comportamento termo-igroscopico al variare di temperatura ed umidità per diverse condizioni climatiche</i>	50
4.3.3.1	Misura dell'equilibrio igroscopico in condizioni standard su cubetti.....	50
4.3.4	<i>Studio sperimentale e numerico del comportamento termo igrometrico su muro a 23° e a 35°</i>	52
4.3.4.1	Norme di riferimento.....	52
4.3.4.2	Apparato di prova.....	52
4.3.4.3	Cicli impostati in camera climatica	52
4.3.4.4	Risultati sperimentali.....	53
4.3.4.5	Prove di porosità.....	54
4.3.4.6	Analisi numeriche	55
4.3.4.1	Valutazioni teoriche tramite simulazioni numeriche e dati sperimentali (ENEA)	58
5.	CONCLUSIONI.....	62
6.	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	64
7.	ALLEGATI.....	66

Sommario

Tra le soluzioni innovative e sostenibili per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'edilizia dei paesi a clima caldo-temperato con materiali naturali derivanti da sottoprodotti agricoli, la canapa ha un suo valore importante in questo periodo storico per la nascita di nuove filiere, incentivate anche da Leggi nazionali. In particolare, i materiali biocompositi di *calcecanapulo* hanno buone proprietà di traspirabilità e regolazione igrometrica e sono utilizzabili per applicazioni edili in ambienti a clima mediterraneo. Alla luce del recente sviluppo, in ambito italiano, di prodotti, aziende e cantieristiche rivolte ai materiali innovativi in *calcecanapulo*, questa ricerca ha la finalità di costituire le basi di un necessario supporto tecnico-scientifico per professionisti e imprese che vogliano confrontarsi con questo tipo di prodotto. E' stata effettuata, inizialmente, una valutazione delle prestazioni ambientali delle tecnologie in *calcecanapulo*, mediante l'analisi del ciclo di vita (LCA), al fine di valorizzare la sostenibilità di questo materiale in campo edile secondo la normativa europea EN 15804:2012. Sono state approfondite le tecniche e i loro campi applicativi, i loro limiti prestazionali al fine di avviare il lavoro, volto alla redazione di linee guida/norme consiliari, tenendo in considerazione i lavori svolti, o in corso di svolgimento, in altri paesi europei. In seguito è stato effettuato un piano di studi riguardanti una tecnica costruttiva in particolare, ossia blocchi in *calcecanapulo*, per la realizzazione di murature di tamponatura rifinite con rasatura superficiale. Allo scopo di studiare la funzionalità in opera di questi materiali, è stata messa a punto una metodologia di misura verificata prima attraverso prove di laboratorio (prestazioni termoigrometriche e termoflussimetriche) in camera climatica su una parete di 1 m², e poi confrontata con quella applicata in opera. La campagna di misure è stata pianificata ed effettuata prestando particolare attenzione alla funzionalità di questi materiali quando sono soggetti a climi caldo temperati.

1. Introduzione

Il futuro delle costruzioni passa per l'innovazione dei prodotti declinata con un'attenzione particolare all'ambientale. 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 (Rapporto Legambiente, 2016).

Nel recente Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018 riguardante l'aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» pubblicato sulla GU serie Generale n.42 del 20-02-2018 – Supplemento ordinario n.8, nel cap. 2 nei principi fondamentali, si richiede che *'Le opere e le componenti strutturali devono essere progettate, eseguite, collaudate e soggette a manutenzione in modo tale da consentirne la prevista utilizzazione, in forma economicamente sostenibile e con il livello di sicurezza previsto dalle presenti norme.'* Inoltre si richiede che queste nuove costruzioni rispettino un alto livello di durabilità, che può essere garantito progettando la costruzione, e la specifica manutenzione, in modo tale che il degrado della struttura, che si dovesse verificare durante la sua vita nominale di progetto, non riduca le prestazioni della costruzione al di sotto del livello previsto. Tale requisito può essere soddisfatto attraverso l'adozione di appropriati provvedimenti stabiliti tenendo conto delle previste condizioni ambientali e di manutenzione ed in base alle peculiarità del singolo progetto, tra cui: a) scelta opportuna dei materiali; ...h) adozione di sistemi di controllo, passivi o attivi, adatti alle azioni e ai fenomeni ai quali l'opera può essere sottoposta. Le condizioni ambientali devono essere identificate in fase di progetto in modo da valutarne la rilevanza nei confronti della durabilità. Tenendo conto dei punti sopra identificati del DM, il presente studio si focalizza sull'analisi e l'approfondimento di nuovi materiali che facciano un uso sostenibile delle risorse naturali e sullo sviluppo di metodologie di misura che possano fornire informazioni sul comportamento di questi materiali nelle condizioni ambientali di esercizio.

Tra le soluzioni innovative e sostenibili per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'edilizia dei paesi a clima caldo-temperato con materiali naturali derivanti da sottoprodotti agricoli, la canapa ha un suo ruolo importante, in questo periodo storico, per la nascita di nuove filiere, incentivate anche da Leggi nazionali. In particolare, i materiali biocompositi di calcecanapulo hanno buone proprietà di traspirabilità e regolazione igrometrica e sono utilizzabili per applicazioni edili in ambienti a clima mediterraneo. Alla luce del recente sviluppo, in ambito italiano, di prodotti, aziende e cantieristiche rivolte ai materiali innovativi in calcecanapulo, questa ricerca ha la finalità di costituire le basi di un necessario supporto tecnico-scientifico per professionisti e imprese che vogliano confrontarsi con questo tipo di prodotto.

Per il mercato italiano della produzione di materiali da costruzione, 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 climatiche nazionali. L'Italia, com'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 materiali 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. Sviluppare questa tipologia di nuovi prodotti non può che essere a vantaggio anche delle condizioni di comfort (sia invernale che estivo) ambientale.

Partendo da questi presupposti, sono state indagate le tecniche costruttive in calcecanapulo attraverso un attento studio del panorama a livello nazionale e internazionale delle varie tecnologie di utilizzo, effettuando un focus sul canapulo e sulle calce utilizzate come leganti nei prodotti italiani. E' stata eseguita

dal Politecnico di Milano un'analisi dei prodotti presenti sul mercato italiano attraverso, anche, la distribuzione di un questionario presentato a tutte le aziende operanti attualmente per la produzione di blocchi calcecanapulo, tecnica su cui si è deciso di focalizzare questo studio. I questionari sono stati poi elaborati e uno dei prodotti è stato scelto per effettuare sia le analisi in laboratorio che in situ.

Al fine di valorizzare la sostenibilità di questo materiale in campo edile, secondo la normativa europea EN 15804:2012, è stata effettuata anche una valutazione delle prestazioni ambientali delle medesime tecnologie in calcecanapulo, mediante l'analisi del ciclo di vita (LCA– Life Cycle Assessment) dal Politecnico di Milano. 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 sia delle materie prime impiegate che delle tecniche e delle tecnologie di produzione. A questo scopo è stata applicata la metodologia di analisi del ciclo di vita 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").

Poiché obiettivo di questo studio è la messa a punto di metodologie di misura per la valutazione del comportamento termico e termoigrometrico di queste murature, la scelta della tipologia di parete realizzata per i test da camera climatica è stata dettata dai seguenti requisiti:

- Utilizzo di tecnologia in calcecanapulo di rapida maturazione
- Stratigrafia composta da materiale il più possibile omogeneo e monomaterico
- Spessori e stratigrafie simili a quelle realizzate nei manufatti edilizi prescelti per le prove in situ

Questi parametri hanno portato alla scelta di una muratura realizzata in blocchi di calcecanapulo di produzione industriale e già commercializzati. I tempi di maturazione della parete si sono quindi limitati all'asciugatura della malta di allettamento e degli intonaci sulle due facce della muratura.

La strumentazione utilizzata per eseguire le prove in laboratorio presso il Politecnico di Milano è stata la seguente:

- Camera climatica in grado di testare una superficie pari a 1 m²,
- Sensori e termoflussimetri per l'analisi dei parametri messi a disposizione da ENEA.

Prove di trasmittanza e del comportamento termoigrometrico sono state eseguite da ENEA secondo la normativa vigente. Per entrambe le prove il comportamento rilevato dalle misure sperimentali sulla muratura è stato confrontato con il comportamento simulato numerico utilizzando software commerciali. Per quanto attiene alle misure termoigrometriche, per tenere conto delle condizioni ambientali esterne relative al Sud Italia, sono stati definiti ed eseguiti due cicli a temperatura fissa (23° e di 35°C) al variare dell'umidità relativa.

Prove per la determinazione delle proprietà di assorbimento igroscopico di cubetti in calcecanapulo forniti da tre diversi produttori di mattoni in calcecanapulo (compreso il produttore dei blocchi utilizzati per realizzare la muratura) sono state effettuate dal Politecnico di Milano utilizzando la camera climatica a 23°. Con questa prova è stato definito il contenuto di umidità del materiale in equilibrio con l'ambiente in cui viene utilizzato.

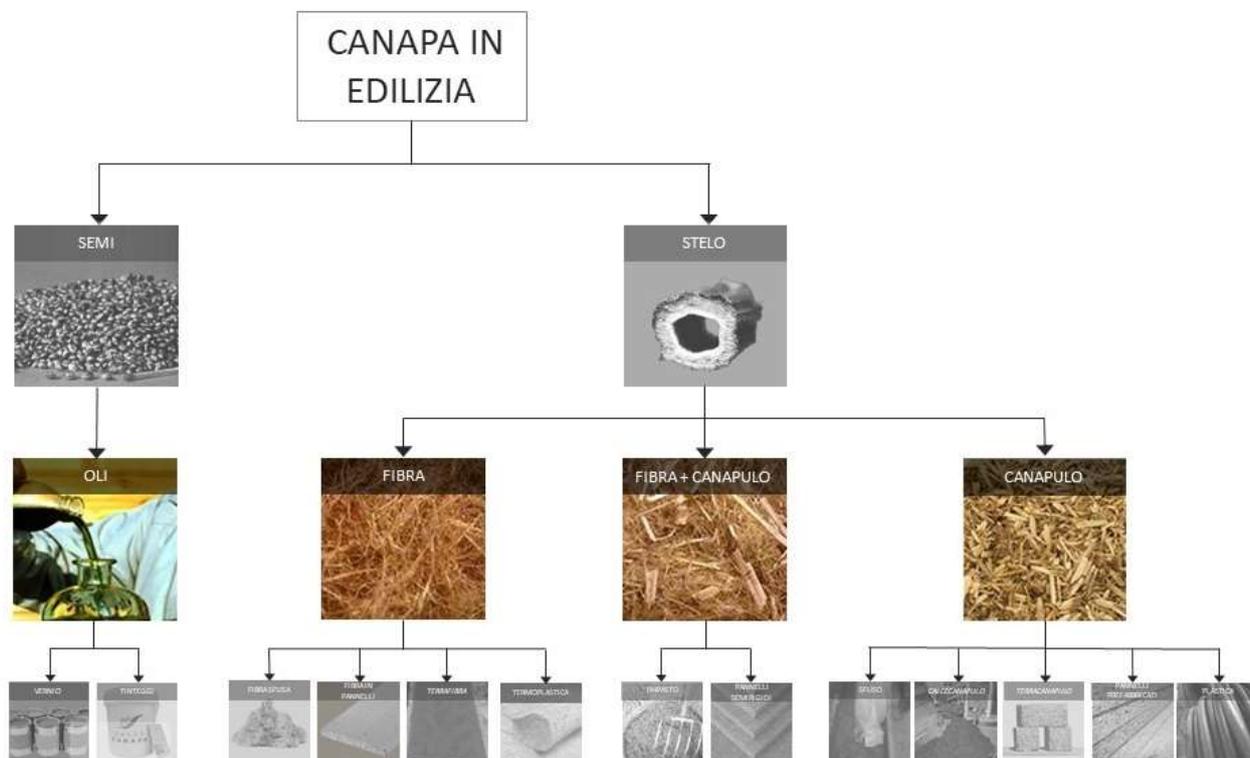
2. Analisi dello stato dell'arte

2.1 Tecniche costruttive in *calcecanapulo*¹: panorama a livello nazionale e internazionale delle varie tecnologie di utilizzo

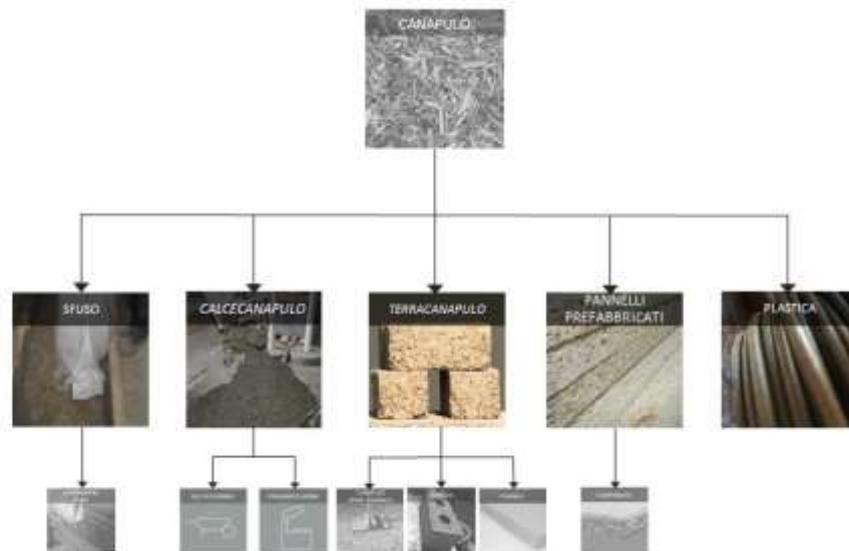
2.1.1 La canapa per l'edilizia

La pianta della canapa ha trovato nella storia diversi utilizzi per qualità e caratteristiche delle sue componenti (semi, fiori, stelo). Se si considera marginale l'impiego di olio di canapa per prodotti di trattamento e vernici, la parte più interessante per usi edili risiede nello stelo. La lavorazione per stigliatura separa la fibra che avvolge esternamente lo stelo dalla parte interna chiamata "paglia di canapa". Quest'ultima trinciata costituisce un cippato legnoso chiamato "canapulo". Il successo di questa pianta è storicamente legato al pregio delle sue fibre per tenacia e durabilità, tanto che fin dai tempi storici le sue fibre sono sempre state utilizzate oltre che per il settore tessile anche per quello idraulico per la sigillatura delle tubazioni.

Ma è con la crisi energetica dello scorso secolo e le prime attenzioni per l'isolamento degli edifici che alcuni pionieri francesi negli anni '90 hanno sperimentato anche l'uso del canapulo per riempimenti e tamponamenti coibenti. Parallelamente, lo sviluppo di prodotti industrializzati in forma di pannelli, materassini e feltri a base di fibre naturali ha incentivato anche l'utilizzo industriale delle fibre di canapa per gli stessi scopi di coibentazione termica con prodotti da posare a secco.



¹ Il termine italiano *calcecanapulo* è stato definito nell'ambito del programma europeo INATER¹ per definire tutti i materiali compositi e tecnologie che utilizzano impasti di canapa e leganti a base di "calci"



2.1.2 Il canapulo e le sue mescole

Il canapulo, nelle sue varie pezzature può essere utilizzato come isolante sfuso solo per riempimenti di intercapedini chiuse. Nel tempo il materiale sfuso può avere fenomeni di riassetto della granulometria che possono causare problemi di ponti termici non tanto per riempimenti di solai orizzontali ma soprattutto per riempimenti di intercapedini verticali (contropareti, vani di tamponamento ...) e di vani obliqui (es. spazi chiusi per isolamento coperture a falda ...). L'esigenza di rendere stabili questi riempimenti e di proteggere e trattare questa materia vegetale rispetto a rischi di attacchi batteriologici o di altra natura ha portato allo sviluppo di mescole del canapulo con leganti.

L'aspetto di durabilità e "igienizzazione" della paglia di canapa può essere risolto attraverso trattamenti "mineralizzanti". Processi che possono essere effettuati industrialmente o in cantiere. Ma solo la posa di impasti a umido, su con opportuni mix design, garantiscono la stabilità del materiale in opera.

Le mescole sviluppate dai primi pionieri del settore hanno testato il connubio del canapulo con "le" calci avviando la sperimentazione di mescole per getti e riempimenti.

Dallo sviluppo di ricette artigianali si è passati alla formulazione di leganti specifici industrializzati, prima tra tutti la tradical e poi allo sviluppo di nuove tecnologie di messa in opera a spruzzo o di industrializzazione di blocchi e pannelli.

Ma questo mix di un aggregato vegetale e di un legante minerale ha portato ad un vastissimo panorama di ricette e utilizzi con avviamento di cantieri-pilota non tutti andati a buon fine.

La maggior problematica dell'utilizzo di impasti ad umido con impiego di materiali vegetali risiede nei tempi di asciugatura molto lunghi con rischio di innescare processi di degrado del canapulo ed eventuale sviluppo di muffe o altri attacchi biologici.

Oltre agli aspetti di asciugatura in opera o in produzione delle mescole, le performances dipendono essenzialmente dalla qualità degli ingredienti, dalle reazioni tra i leganti e aggregati dai metodi di realizzazione delle mescole e della loro messa in opera.

Questo enorme ventaglio di casistiche comporta una grossa difficoltà di controllo dei prodotti e tecniche costruttive e giustifica in qualche modo le scelte strategiche optate in questo millennio dai francesi.

2.1.2.1 Il canapulo come aggregato vegetale

Rispetto agli aggregati minerali, considerati inerti se si escludono quelli che possono innescare fenomeni di reazioni pozzolaniche, i granulati vegetali per la loro composizione organica possono causare delle reazioni chimiche con i leganti tramite zuccheri, lignine e altre sostanze contenute nello stelo della canapa. La diversità di varietà di canapa inoltre può comportare la presenza di percentuali diverse delle sostanze in essa contenute e pertanto diversità di reazioni con i leganti prescelti. In Europa esiste un elenco delle varietà di canapa industriale certificate e pertanto coltivabili che fanno riferimento alla L.242/2016.

Dall'elenco che segue evidenziano in grassetto le 10 varietà di canapa italiana

1) Adzolviesi	24) Fedora 17	47) Lovrin 110
2) Antal	25) Felina 32	48) Marcello
3) Armanca	26) Férimon DE 4668	49) Markant
4) Asso	27) Férimon FR 8194	50) Monoica
5) Austa SK	28) Fibranova	51) Rajan
6) Beniko	29) Fibrante	52) Ratza
7) Bialobrzeskie CZ 1067	30) Fibrol	53) Santhica 23
8) Bialobrzeskie PL 893	31) Fibrol 79	54) Santhica 27
9) Cannakomp	32) Finola	55) Santhica 70
10) Carma	33) Futura 75	56) Secuieni jubileu
11) Carmagnola	34) Glecia	57) Silvana
12) Carmaleonte	35) Gliana	58) Succesiv
13) Chamaeleon	36) Glyana	59) Szarvasi
14) Codimono	37) Henola	60) Tiborszallasi
15) CS	38) Ivory	61) Tisza
16) Dacia Secuieni	39) KC Bonusz	62) Tygra
17) Delta 405	40) KC Dora	63) Uniko B
18) Delta ilosa	41) KC Virtus	64) Uso – 31
19) Denise	42) KC Zuzana	65) Villanova
20) Diana	43) KC Borana	66) Wielkopolskie
21) Dioica 88	44) Kompolti ibrid TC	67) Wojko
22) Eletta campana	45) Kompolti	68) Zeni
23) Epsilon 68	46) Lipko	

Fonte: http://ec.europa.eu/food/plant/plant_propagation_material/plant_variety_catalogues_databases/search/public/index.cfm?event=SearchVariety&ctl_type=A&species_id=240&variety_name=&listed_in=0&show_current=on&show_deleted=

Oltre alle sostanze contenute nella pianta influiscono sul risultato della miscela anche altri aspetti quali:

- curva granulometrica
- massa volumica apparente
- tasso di umidità
- pulizia e omogeneità del prodotto (la presenza di polveri, fibre, limi o argille che possono essere presenti come sostanze residuali dei processi di lavorazione influiscono sulle performance di alcune mescole specie se queste hanno basso contenuto di leganti o seguono processi industriali o meccanizzati di posa quali le pose a spruzzo.
- Colore

L'associazione francese Construire en Chanvre (CeC) ha standardizzato le qualità del canapulo garantendo dei metodi di prova standardizzati e certificando i prodotti.

La certificazione del prodotto permette di avere costanza di certe caratteristiche specifiche dei granulati di canapa e un'invariabilità di queste caratteristiche entro dei range stabiliti.

Si riportano qui di seguito i parametri contenuti nel label di CeC:

PARAMETRI	LIVELLI RICHIESTI
Quantita' di materia estratta dalla pianta di canapa	100% materia tratta dalla raccolta della coltura della canapa pura
Massa volumica apparente del prodotto finito	Variatione annuale $\pm 15\%$
Granulometria	Esecuzione delle analisi granulometriche e loro monitoraggio. Il 95% dei grani di canapulo devono avere una lunghezza inferiore alla $l_{dmax} \pm 10\%$
Tasso di umidita'	$< 19\%$
Tasso di polvere	$< 2\%$ del passante al setaccio 0,25
Colore	% grani non conformi $< 5\%$

Traduzione S. Sabbadini dal Label di Construire en Chanvre

Durante gli incontri per la tavola rotonda del convegno De Canapa Aedificatoria nell'ambito del Canapaforum 2018, è emerso che da parte di produttori e utilizzatori del settore edile, la qualificazione del canapulo dovrebbe evidenziare anche molti altri aspetti oltre a quelli già compresi nel label di Construire en Chanvre.

In particolare, si è evidenziato che mancano del tutto caratterizzazioni della pianta di origine e delle sue componenti chimici ed anche la caratterizzazione della curva granulometrica, oltre che della taglia. Ovvero le informazioni principali che contraddistinguono un aggregato vegetale. Oltre a queste caratteristiche essenziali ne sono state individuate anche altre che riportiamo qui di seguito, contenute nella bozza di lavoro per la caratterizzazione del prodotto canapulo.



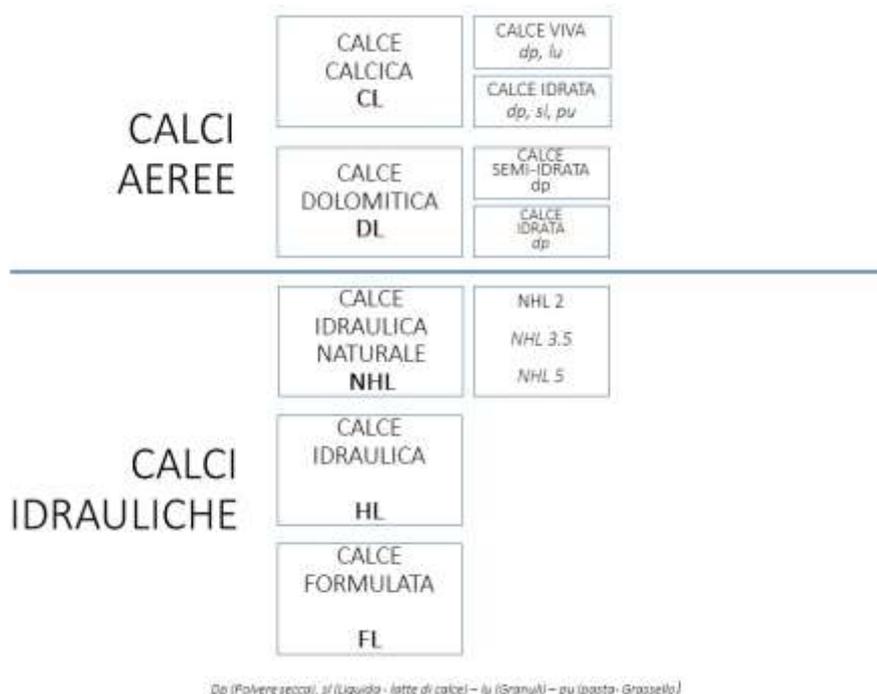
Un importante contributo sulla standardizzazione dei test per la caratterizzazione, a partire dal lavoro già avviato da Construire en Chanvre, può essere apportato anche dalla commissione RILEM sui materiali bio-based e dai suoi approfondimenti sulla canapa.

Sicuramente la messa a punto dei requisiti va approfondita con una tavola rotonda specifica sull'argomento a livello nazionale per poi porla a livello internazionale.

2.1.2.2 I leganti per biocompositi a base di canapulo

La nascita dei prodotti in calcecanapulo come prodotti ecologici per l'isolamento; la ricchezza e varietà produttiva dei paesi dove queste mescole sono nate e si sono sviluppate e un connubio nato per garantire la traspirabilità delle pareti sono questi i principi che hanno visto le prime sperimentazioni di mescole del canapulo con "le" calci.

Ma le calci come ben sappiamo offrono un ventaglio di prodotti alquanto diversificati e con comportamenti chimico-fisico anche molto diversi, basti pensare al mondo delle calci aeree e al mondo delle calci idrauliche



dp (Polvere secca), sl (Liquido - latte di calce) - lu (Sgranuli) - pu (pasta - Grassella)

Le produzioni industriali di leganti specifici per mescole in calcecanapulo, hanno formulazioni complesse che spesso portano ad idraulicizzare in parte o per intero le calci aeree tramite processi di reazioni pozzolaniche o aggiunte di leganti idraulici.

Oltre all'utilizzo "delle" calci sono stati impiegati anche leganti idraulici di tipo cementizio e altri leganti aerei quali il gesso. Alcune produzioni utilizzano malte bastarde che ibridano calci a leganti cementizi per conferire una presa e maturazione più rapida. Altre impiegano cementi naturali (tipo roman cement)

Sono presenti anche mescole elaborate con un legante naturale storico: la terra.

La presenza di malte in canapa e terra è documentata nella storia, alcuni intonaci sono state rinvenute e segnalate dall'arch. Sabbadini nelle partecipanze di Cento in provincia di Ferrara, nell'ambito del programma europeo INATER'. Diverse mescole per intonaci e finiture sono state formulate per cantieri bioedili. La ditta Cannabric in Spagna produce sia blocchi in terra e canapa sia mescole per malte intonaci e getti.

Oltre al tipo di legante utilizzato la formulazione del mix design dipende anche dal suo impiego. Mescole più isolanti e meno tenaci hanno bassi contenuti di leganti a differenza di quelle portanti.

Normalmente i produttori preparano confezioni separate dei leganti rispetto a quelle del canapulo, specificando dosaggi (in peso) e granulometrie a seconda del loro impiego e funzione.

travetto così da mantenere una camera d'aria che permette una migliore asciugatura o carbonatazione nel tempo in caso di mescole aeree. Oltre a intercapedini chiuse si possono anche isolare spazi sottotetti non calpestabili.

Lo stesso tipo di impasto può essere utilizzato anche per tamponamento di pareti chiuse tra pannelli. In questo caso necessita verificare la traspirabilità dei pannelli per garantire l'asciugatura dell'impasto.

Per i riempimenti si può utilizzare una granulometria di canapulo più grossolana 0-25mm

I riempimenti in coperture inclinate possono essere eseguiti anche con altra tecnica. Posa per strati successivi (6/8cm circa di spessore) di canapulo naturale o mineralizzato con spruzzo di legante liquido per ogni stato in modo tale da evitare scivolamenti del materiale e conseguenti realizzazioni di ponti termici.

In generale tutti i riempimenti in intercapedine su piani orizzontali possono essere realizzate anche con materiale sfuso a secco (canapulo naturale o mineralizzato)

2.1.4 Posa a spruzzo

Dalle tecnologie di insufflaggio degli isolanti sfusi e dalla posa di malte a spruzzo è nata l'ideazione di macchine specifiche per lo spruzzo di calcecanapulo. Per poter ottenere mescole performanti a livello termico sono stati sviluppati macchinari specifici e leganti idonei. I macchinari generalmente convogliano i materiali in un erogatore centrale che insuffla i granuli asciutti di canapulo e in due ugelli laterali che spruzzano il legante sotto forma di barbottina. Le materie prime in sacchi (sacchi di canapulo e sacchi di legante in polvere) vanno ad alimentare due contenitori separati. Il primo sgrana il canapulo dal suo costipamento in sacco e lo pompa nel tubo centrale. La seconda pompa miscela il legante con l'acqua permettendo la regolazione della liquidità della barbottina che viene spruzzata dagli ugelli laterali. Questa tecnologia prevede l'unione di aggregato vegetale e legante solo durante il breve tragitto aereo tra erogatori e parete e in gran parte direttamente su parete. In questo modo è possibile ottenere mescole molto "magre" e più performanti termicamente simili per densità a quelle per riempimenti. Accurate formulazioni del mix design del legante permettono esecuzioni in spessore grazie ad asciugature più rapide. Per la realizzazione di pareti verticali, questa tecnologia richiede delle superfici verticali (pannellature, tavolati ...) atte a ricevere il materiale a spruzzo. A seguito della messa in opera, con opportune guide predisposte il materiale può essere staggiato per ottenere superfici complanari e a piombo. Quando il materiale è a piena maturazione può essere utilizzato come supporto per intonaci, quanto i getti in calcecanapulo.

L'utilizzo di macchine che spruzzano impasti umidi è idoneo solo per posa di malte molto più "grasse" (vedi par 2.1.7)

2.1.5 Getti in calcecanapulo

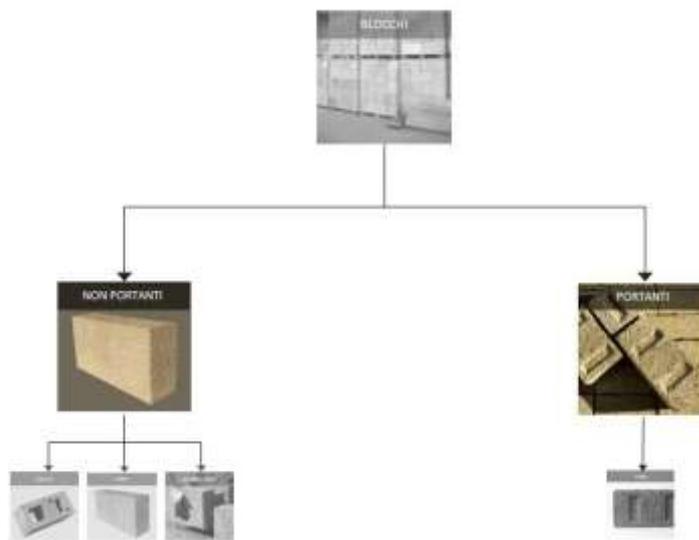
I getti prevedono che l'impasto una volta giunto a maturazione sia autoportante. Per questo motivo il dosaggio è più ricco in legante (rapporto medio tra legante e canapulo di 2:1 o 2,5:1³). Per la realizzazione di pareti verticali, l'impasto viene inserito all'interno di un sistema di cassetta, viene poi costipato e successivamente la cassetta viene rimossa per permettere una più veloce asciugatura. Questa operazione viene eseguita anche per contropareti per isolamenti a cappotto o coibentazioni interne. Su uno dei due lati la parete funge anche da cassetta a perdere. Il tamponamento in calcecanapulo ha funzione solo autoportante, l'edificio necessita pertanto di una struttura portante. Nel caso di strutture a telaio i pilastri possono essere posizionati internamente al getto, su uno dei due lati o esternamente ad esso. In ogni caso il getto di tamponamento o di chiusura non ha funzione collaborante di controventatura.

³ I rapporti sono in peso e non in volume

2.1.6 Il blocco in calcecanapulo

La produzione di blocchi riprende la filiera dei blocchi vibrocompressi. L'impasto all'oggi utilizzato dalle ditte produttrici è simile a quello per impasti a getto con granulometrie del canapulo idonee al formato dimensionale del blocco da produrre. Dosatori, miscelatori planetari e vibrocompressione utilizzano tecnologie già specifiche della filiera. L'utilizzo di leganti a base di calci richiede invece una maggiore attenzione alla fase di maturazione e stoccaggio del materiale.

I blocchi nascono principalmente con funzione isolante e fonoassorbente, e pertanto non avendo funzione portante vengono utilizzati per cappotti, contromurature isolanti, tamponamenti, divisori. In Europa esiste solo una ditta spagnola che produce blocchi portanti sia in calcecanapulo che in terracananapulo. Il metodo di fabbricazione per compressione e il tipo di impasto molto ricco in legante.



2.1.7 Intonaci a miglioramento termico in calcecanapulo

Gli intonaci in calcecanapulo per garantire un buon aggrappo al supporto murario e la necessaria lavorabilità in fase di posa richiedono una percentuale di legante ben superiore alle tecniche precedentemente menzionate con rapporti in peso a secco che variano da 4:1 a 5:1. Le mescole possono essere eseguite a partire da leganti in polvere o leganti in pasta (come il grassello). Le dimensioni dell'aggregato vegetale dipendono dallo spessore da applicare. Normalmente gli spessori massimi per intonaci a miglioramento termico in calcecanapulo sono di 6/8cm. Per tali spessori occorre prevedere più strati di posa. La messa in opera avviene a mano o a macchina. La posa a mano avviene tramite sistema tradizionale a cazzuola se la malta è sufficientemente grassa altrimenti viene spalmata sul supporto murario direttamente con frattazzo americano.

La posa a macchina può avvenire con intonacatrici a tazza⁴ o con altre intonacatrici di tipo tradizionale modificate ad hoc.

Come per tutti gli intonaci la buona aderenza al supporto dipende dalla sua preparazione preliminare per evitare che ci siano parti in distacco, parti pulverulente, gravi mancanze che provocano fessurazioni a ragnatela in fase di asciugatura e soprattutto il supporto deve garantire stabilità e rigidità (una particolare cura va adottata per pareti realizzate in pannelli che possono causare deformazioni nel tempo).

⁴ Sono intonacatrici che hanno una vasca di contenimento della malta sovrapposta alla pistola di erogazione (tipo intonacatrice tigre)

Complanarità e messa a piombo, come per gli intonaci convenzionali, avviene grazie al supporto di regole e stagge. L'aggregato vegetale a differenza di quello minerale trattiene molto più a lungo l'umidità. Per questo motivo i tempi di asciugatura e relativi rischi di degrado del materiale vanno tenuti in considerazione

Gli intonaci in calcecanapulo nascono prevalentemente per essere applicati in spessore su diversi supporti murari (pietra, laterizio, balle di paglia, pannelli di incannucciato) al fine di migliorarne le prestazioni termiche o per la loro elasticità dovuta all'aggregato vegetale.

Su murature a getto o a spruzzo in calcecanapulo, vengono impiegati intonaci a minore spessore (15-20mm) atti a completare la parete. In questo caso la granulometria del canapulo è di tipo 0-6mm. Internamente questa rasatura può essere lasciata faccia a vista e lavorata con metodi di spugnatura, frattazzatura a spugna o lamatura tramite cazzuola americana o spatola da decoratore.

2.1.8 Rasature e finiture in calcecanapulo

La grande esperienza e tradizione italiana di malte pregiate a base di calce ha portato allo sviluppo di prodotti di finitura unici nel mercato internazionale. Le prime mescole messe in commercio in Italia sono precedenti allo sviluppo delle tecniche in calcecanapulo su territorio nazionale. La finitura "manocalda" formulata da Spring Color nasce come tonachino decorativo bioedile con miglioramento termico offerto dalla presenza di canapulo micronizzato nell'impasto con grassello, carbonati di calcio.

Le finiture riprendono la grande tradizione degli intonachini a calce (calce aerea), a partire dal grassello di calce che in Italia è possibile trovare anche di lunga stagionatura⁵. Il connubio con polveri di canapulo chiaro (ovvero non maturato in campo), permette di ottenere non solo prodotti di rasatura da dipingere ma anche prodotti decorativi da lasciare facciavista. La possibilità di unire nell'impasto terre colorate amplia la gamma decorativa cromatica.

Per motivi di praticità commerciale alcuni prodotti preconfezionati sono realizzati con impasti a secco (a base di calce idrata) o in fusti con mescole in pasta o ancora in secchi suddivisi in bi-componenti (formulato a base di grassello e aggregato vegetale). La ditta ET di Vigevano ha sviluppato anche un metodo di colorazione del canapulo per ottenere effetti decorativi innovativi.

Per i tinteggi finali delle pareti sono nate anche pitture di canapa con funzione prevalentemente decorativa, applicabili a pennello per uso interno.

2.1.9 Normativa di riferimento

Il panorama normativo internazionale e in particolare quello europeo non ha emesso leggi specifiche per la costruzione in canapa.

Ad oggi a livello nazionale l'unico riferimento legislativo è la L. 242/2016 "*Disposizioni per la promozione della coltivazione e della filiera agroindustriale della canapa*", legge nata per incentivare non solo la coltivazione ma anche l'impiego e il consumo finale di semilavorati di canapa. In particolare, l'art. 2 comma d) sottolinea come dalla coltivazione della canapa è possibile ottenere anche "...materiale organico destinato ai lavori di bioingegneria o prodotti utili per la bioedilizia".

⁵ Il lavoro della banca della calce è nato specificatamente per garantire una longeva stagionatura dei grasselli di calce (oltre i 6 mesi)

In ambito francese l'Associazione *Construire en Chanvre*, si è costituita principalmente per rispondere alle esigenze del mercato edile e delle sue normative⁶ sviluppando:

- Formazione riconosciuta per professionisti, imprese e artigiani al fine di garantire la qualità della progettazione e della messa in opera;
- Label che garantiscono la qualità degli aggregati vegetali (canapulo)⁷ con procedure di accreditamento per i laboratori certificatori;
- Regole professionali per le diverse tecniche costruttive

Le regole professionali uscite in più edizioni costituiscono all'oggi a livello europeo il miglior riferimento per tutti gli operatori del costruire in canapa.

In parallelo si sono sviluppate anche due riferimenti di Linee guida:

- HEMP BUILDING BEST PRACTICE GUIDE, scritte nel 2016 da Steve Allin per l'Associazione internazionale IHBA (International Hemp Building Association)
- BETON ET MORTIER DE CHANVRE - GUIDE DES BONNES PRATIQUES, scritte da Jean Marc Naumovic per l'Associazione *Construire en Chanvre*

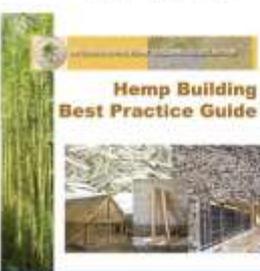
A livello europeo inoltre esistono due documenti EAD (European Assessment Document) elaborati dalla Commissione EOTA:

- EAD 040005-00-1201 (giugno 2015) Factory-Made Thermal and/or acoustic insulation products made of vegetable or animal fibres
- EAD 040138-00-1201 (novembre 2015) I-situ formed loose fill Thermal and/or acoustic insulation products made of vegetable fibres.

⁶ In Francia i vincoli delle coperture assicurative decennali richiedono che vi siano garanzie sull'esecuzione delle opere in termini di Regole professionali, certificazione di prodotto e formazione delle maestranze. Questo panorama esigente e restrittivo abbinato al fatto che la Francia è il primo paese che ha sviluppato tecniche costruttive in calcecanapulo ha fatto sì che è proprio in questo paese che si sono sviluppati i primi label e regole professionali

⁷ La certificazione di prodotti per i vari formulati dei leganti è già esistente per le diverse categorie di leganti (calci aeree, calci idrauliche, cementi ...), per i leganti naturali in terra sono in corso invece in Francia lo sviluppo di Regole professionali che prendono in considerazione anche intonaci e terre alleggerite.

QUADRO DELLE NORMATIVE ESISTENTI O IN FASE DI SVILUPPO A LIVELLO EUROPEO

	<p>REGLES PROFESSIONNELLES DE LA CONSTRUCTION EN CHANVRE REGOLE PROFESSIONALI SULLA COSTRUZIONE IN CANAPA</p>
	<p>Label Granulat Chanvre Construction Label del canapulo per l'edilizia</p>
	<p>BETON ET MORTIER DE CHANVRE - GUIDE DES BONNES PRATIQUES GUIDA DELLE BUONE PRATICHE - MALTE E GETTI IN CANAPA</p> <p>HEMP BUILDING BEST PRACTICE GUIDE GUIDA DELLE BUONE PRATICHE SULLA COSTRUZIONE IN CANAPA</p>



ARCH. SERGIO SABBADINI - sergio.sabbadini@potim.it

 <p>International Organization for Standardization</p>	www.iso.org	
		
<p>DTU</p>	<p>EUROCODE</p>	<p>UNI</p>
<p>DOCUMENT TECHNIQUE UNIFIE www.fr.wikipedia.org/wiki/Document_technique_unifie</p>	<p>www.it.wikipedia.org/wiki/Eurocodice</p>	<p>http://www.uni.com</p>
		
<p>REGLES PROFESSIONNELLES</p>	<p>EN</p>	<p>partecipa in rappresentanza dell'Italia all'attività normativa degli organismi internazionali di normazione ISO</p>
<p>Enduits sur supports composés de terre crue</p>		<p>LINEE GUIDA</p>
		<p>o</p>
<p>GBP</p>		<p>GUIDE DELLE BUONE PRATICHE</p>
<p>GUIDE DES BONNES PRATIQUES</p>		<p>www.it.wikipedia.org/wiki/Linee_guida</p>
		



ARCH. SERGIO SABBADINI - sergio.sabbadini@potim.it

2.2 Panorama dei manufatti edili in calcecanapulo presenti su territorio nazionale (produzioni e importazioni)

L'utilizzo di mescole in calcecanapulo in Italia è avvenuto una decina di anni fa, ovvero vent'anni dopo il loro primo utilizzo nei paesi limitrofi quali Francia, Svizzera, Inghilterra ...

Sempre una decina di anni fa è sorta la prima ditta che ha avviato lo sviluppo di prodotti industrializzati (Equilibrium) e da allora il crescente interesse per la canapa in tutti i settori ha portato allo sviluppo di altre aziende e prodotti per l'edilizia.

Lo sviluppo della coltivazione della canapa è stato incentivato dalla legge n. 242 del 2 dicembre 2016 "Disposizioni per la produzione della filiera agroindustriale della canapa" che regola il settore della canapa industriale.

Ma lo sviluppo di alcune materie prime, prodotti e tecniche costruttive è avvenuta anche grazie al lavoro e alla nascita di alcune associazioni tra le quali:

- ASSOCANAPA (Coordinamento nazionale per la canapicoltura in Italia - 1998)
- ANAB (Associazione Nazionale Architettura Bioecologica)
- FEDERCANAPA (2016)
- ROMAGNA CANAPA

2.2.1 Ditte che lavorano la pianta della canapa

Esistono all'oggi 2 centri di trasformazione fissi per la stigliatura e trasformazione della canapa uno in Piemonte e l'altro in Puglia (Allegato 1). Questi due impianti all'oggi non funzionano a pieno regime o con prodotti labelizzati con controllo di qualità, pur avendone le potenzialità. Oltre a questi due impianti principali ne esistono molti altri legati ad aziende agricole che utilizzano o adattano attrezzature proprie per una prima trasformazione.

In Toscana si è altresì sviluppata recentemente un'azienda che produce unità mobili per la trasformazione dello stelo della canapa.

2.2.2 Aziende che si occupano di canapa nel settore dell'edilizia

2.2.2.1 Aziende produttrici italiane di blocchi in calcecanapulo

Dopo una prima produzione di finiture in calce e polvere di canapulo, la prima azienda che si è occupata di una gamma completa di prodotti in calcecanapulo per l'edilizia è la start up Equilibrium fondata nel 2011 esclusivamente per questo settore. Le successive produzioni di blocchi da parte di altre ditte (Allegato 2) nascono da realtà già esistenti di produzione. Spesso sono realtà di aziende che già producevano blocchi o manufatti pfb in cls e pertanto avevano già la filiera produttiva da adattare ai nuovi materiali. In altri casi erano ditte specializzate in leganti.

2.2.2.2 Aziende importatrici in Italia di blocchi in calcecanapulo

L'esperienza più longeva straniera di produzione di blocchi in calcecanapulo ha favorito l'introduzione di importazioni in Italia (Allegato 3). In particolare quelli provenienti dalla Francia, sia per vicinanza, sia per longevità di brevetti sia perché sottoposti nel paese di produzione a certificazioni e rispetto di Regole Professionali

2.2.2.3 Aziende produttrici italiane di altri materiali in canapa

La filiera di pannelli isolanti in fibra di canapa nasce in Italia prima dello sviluppo della filiera dei prodotti in calcecanapulo. L'elenco delle aziende produttrici di altri materiali in canapa è riportato in Allegato 4. Un'azienda leader e pioniera del settore era partita con la produzione di materassini in Kenaf e poi in fibra di canapa. All'oggi è prevalentemente importatrice. L'altra azienda storica è toscana e si occupa di pannelli di diverse fibre tra cui quelle sintetiche riciclabili o altri prodotti di riciclo. La linea in canapa mista ad altre fibre sintetiche parte all'oggi da fibra d'importazione. Nata da una start up innovativa, la CMF Greentech ha invece messa a punto la filiera produttiva con tecnologia ceramica per la produzione di pannelli in canapulo con diversa densità e leganti, anche a base di terra.

2.2.3 Analisi blocchi calcecanapulo

Poiché la ricerca e sperimentazione di prove di laboratorio e in situ si è deciso di concentrarla sulle murature in blocco di calcecanapulo, l'approfondimento di analisi dei prodotti si focalizza su questo materiale.

Le Regole Professionali francesi non trattano all'oggi nello specifico la posa del blocco, forse perché è l'unico manufatto in calcecanapulo prodotto industrialmente e si presuppone che segua già delle certificazioni di produzione. Esistono tuttavia molti manuali di posa in opera redatti dalle ditte produttrici stesse. I blocchi infatti essendo nati prevalentemente per l'isolamento termico non seguono sempre le pose tradizionali di apparecchiatura muraria ma necessitano di approfondimenti tecnologici specifici che variano a seconda della geometria dei blocchi e della tipologia di malta di allettamento prevista.

Si riporta qui di seguito l'elenco dei principali manuali redatti da ditte italiane e straniere:

- Calce Canapa: Manuale di posa BlickWood
- Chanvribloc: Notice technique
- Equilibrium: Manuale tecnico del Biomattone
- Iso Hemp: Technical Data Sheet Iso Hemp Block

2.2.4 Questionari

Al fine di avere un panorama del mercato odierno sui prodotti a base di canapa e raccogliere informazioni specifiche e le esigenze da parte dei produttori e importatori italiani in primavera 2018 il partenariato ha redatto n. 2 questionari (Allegato 5) e distribuiti alle aziende individuate.

Questo lavoro ha comportato in primis l'individuazione di tutte le aziende operanti nel settore della canapa per l'edilizia.

Le 17 aziende individuate sono state raggruppate per categorie di prodotti:

- A) Blocchi in calcecanapulo
- B) Pannelli in canapa (canapulo e fibra)
- C) Materiali pronti all'uso per mescole in cantiere (es. leganti e aggregati vegetali per getti, riempimenti, intonaci, spruzzo ...)
- D) Produttori di canapa per l'edilizia in generale

Ogni azienda è stata pertanto codificata, per motivi di privacy, con numeri progressivi a seconda della categoria; per esempio A1 corrisponde alla prima società della categoria A (produttore di blocchi in calcecanapulo)

Per avere lo scenario completo delle aziende italiane che si occupano di canapa e dei loro prodotti, abbiamo scelto tre diverse modalità di raccolta dei dati:

- Materiale online: materiale disponibile sul web, accessibile da tutti (ad esempio: scheda tecnica, informazioni tecniche sul prodotto, ...)
- Richiesta ad ogni azienda di invio di materiale informativo più specifico e meno divulgato (ad esempio certificazioni, metodo di prova, analisi prestazionali specifiche. Questa raccolta integrativa era finalizzata a poter elaborare tabelle comparative sui dati prestazionali
- Elaborazione di questionari per elaborare grafici comparativi garantendo la privacy

Per quanto riguarda la raccolta dati on line dei produttori della categoria A, si elenca qui di seguito il materiale raccolto

ditta A1:

- Schede tecniche dei prodotti
- Manuale tecnico
- Scheda tecnica della calce
- Dichiarazioni sulle performance
- Brochure di presentazione dei prodotti e della loro applicazione
- Scheda tecnica del legante dolomitico naturale

ditta A2:

- Schede tecniche dei prodotti
- Manuale di applicazione
- Scheda tecnica Cemento Romano
- Storia proprietà e usi del Cemento Romano

ditta A3:

- Schede tecniche dei prodotti
- Informazioni sul blocco in calcecanapulo
- Costruzioni del futuro (pdf)

ditta A4:

- Catalogo dei prodotti

ditta A5:

- Schede tecniche dei prodotti
- Informazioni aggiuntive su certificazioni di prodotto e test di laboratorio

ditta A6:

- Scheda tecnica dei blocchi in calcecanapulo

ditta A7:

- Scheda del prodotto blocco in calcecanapulo

ditta A8: /

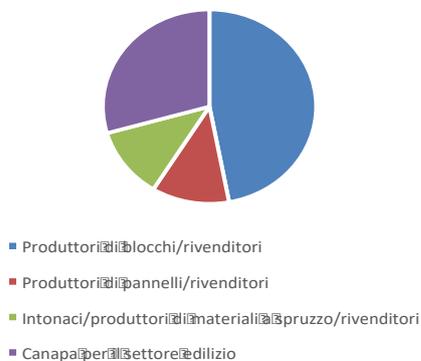
I questionari oltre a dare una panoramica sull'attuale stato dell'arte dell'uso della canapa in edilizia, avevano lo scopo di indagare sulle esigenze e mancanze per operare sul mercato esistente (carenze normative, riferimenti per le certificazioni di prodotto, formazione, maestranze specializzate ...).

Il questionario è rivolto sia ai produttori di blocchi (con 11 domande più specifiche per questa categoria di produttori) sia a ditte che trattano la canapa per l'edilizia con altri prodotti.

Il questionario è stato inoltrato a 17 aziende, di cui 8 si occupano della produzione di blocchi, 2 di pannelli, 2 di materiale sfuso e in ultimo 5 di canapa in generale per i prodotti edilizi.

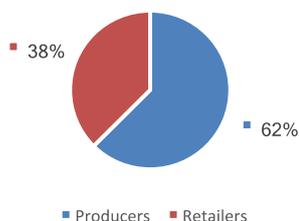
Entrando più in dettaglio per quanto riguarda le aziende produttrici di blocchi in canapa, si è riscontrato che il 62,5 % di queste producono direttamente il blocco, mentre il 38,5 % si occupano solo della vendita.

Numero delle aziende contattate per il questionario



Numero delle aziende contattate per il questionario	
Produttori di blocchi/rivenditori	8
Produttori di pannelli/rivenditori	2
Intonaci/produttori di materiali spruzzo/rivenditori	2
Canapa per il settore edilizio	5
Totale	17

Numero di aziende che si occupano dei blocchi



Numero di aziende che si occupano dei blocchi	
Producers	5
Retailers	3
Total	8

L'impostazione generale dei questionari si sviluppa in due parti: una prima che si concentra sul prodotto, la sua composizione, il modo in cui è stato realizzato e la certificazione, mentre la seconda sezione ha come obiettivo quello di verificare l'interesse dell'azienda a creare un gruppo nazionale di produttori di canapa con cui condividere informazioni e ottenere delle specifiche regole professionali e certificazione EOTA.

I questionari realizzati sono diversi per le quattro tipologie di prodotti che le diverse aziende trattano: blocchi (questionario A), pannelli (questionario B), materiale sfuso (questionario C) e prodotti in canapa in generale (questionario D).

2.2.5 Risposte ai questionari

Si riportano nelle tabelle sottostanti le risposte ottenute in relazione a tutti i campi di ricerca proposti, purtroppo per quanto riguarda le aziende produttrici di canapa come materiale sfuso non vi è stato alcun riscontro.

Questionario A – Blocchi

	1	2	3			
Code	Tipologia legante	Tipologia calce	% legante	% canapulo	% acqua	% altro
A1	Solo calce	Calce aerea	2/3 in peso del materiale secco	1/3 in peso del materiale secco	equivalente in peso del materiale secco e a seconda anche delle condizioni meteo	microorganismi 2-6 lt a m ³
A2						
A3	Solo calce + minerali e additivi naturali (senza cemento)	Calce idraulica + calce limitata	35%	27%	38%	/
A4	Solo calce	Calce aerea	40%	20%	40%	/
A5	Solo calce	Calce idraulica	34-38 %	18-20%	40-46 %	3-4 %
A6						
A7						
A8	Solo calce	Calce aerea	45%	22%	33%	/

4	5	6	7				
Additivi	Canapulo prodotto o acquistato	Da dove è importato il canapulo	Granulometria	Massa volumica apparente	Tasso umidità del canapulo	Tasso di polvere	Colore
Microorganismi naturali simbiotici come da brevetto per velocizzare l'asciugatura	Il truciolo di canapa viene acquistato già lavorato e separato dal resto della bacchetta	Francia	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota
Additivi naturali e minerali che garantiscono la durezza interna del blocco	Canapulo prodotto dalla Glärnsch Textil	Canapa da Austria, Svizzera o del Nord Italia	0,5-4 mm	110 kg/m ³	<15%	< 0,5%	Giallo (2 settimane di restatura)
Additivi naturali: microorganismi simbiotici che producono CO2 accelerando la carbonatazione	Acquistato da una azienda esterna	Francia e/o Romania	0,25 mm 0,60 mm	0,25 -> 110 kg/m ³ +/- 5% 0,60-> 130 kg/m ³ +/- 5%	in media del 13% sul prodotto finito	/	Beige
Fluidificanti e ritentori di acqua naturali	De Ottobre prodotto da Metalneo srl	Solo in parte è italiano	3+12 mm	110-130 kg/m ³	9-14 %	/	Biondo
No	Azienda esterna	Italia o Francia	5-25 mm	100-110 kg/m ³	/	/	Legno chiaro

Questionario A – Blocchi

Materiale estrapolato da pianta	Conoscenza metodi di prova	Certificazioni sulle caratteristiche del prodotto	Grado errore dimensionale/prestazionale	Asciugatura
Nota	Si	Si	/	Naturale (U T ambientali), con problemi di stoccaggio, 2 mesi
molto varia	Trasmittanza termica misurata dall' Inst. Franhofer Densità ad ogni produzione (appena uscita dalla macchina e dopo 30 giorni)	Solo necessarie in Italia e Svizzera. ETA per vendita in Austria e Germania	Peso umido/secco: Aggiunta di alcuni produttori di cemento non comunicandolo	Naturale e con ventilazione forzata (causa problemi di stoccaggio: 30 giorni per la vendita)
/	/	Solo alcuni. In corso test per certificazioni caratteristiche essenziali	/	Naturale (3 settimane in estate, 2 mesi in inverno) Causa problemi di stoccaggio
Dipende da tipo pianta	/	Si	±5 mm	Naturale, senza problemi di stoccaggio
/	/	Si test sui blocchi 40x25x12	±2 mm	Asciugatura naturale che causa problemi di stoccaggio (7-10 giorni)

Questionario B – Pannelli

Tipologia legante	Tipologia calce	% legante	% canapulo	% acqua	% altro	
B1						
B2	Calce con minerali reagenti ed eventuale aggiunta di resine naturali	Calce aerea	30	30	40	inclusi in legante

Additivi	Canapulo prodotto o acquistato	Da dove è importato il canapulo	Granulometria	Massa volumica apparente	Tasso umidità del canapulo	Tasso di polvere	Colore
Si, eco compatibili	Prodotto in azienda	/	5-20 mm	~ 110 kg/m ³	Variabile, di solito < 7%	Esente	Biondo

Materiale estrapolato da pianta	Conoscenza metodi di prova	Certificazioni sulle caratteristiche del prodotto	Grado errore dimensionale/prestazionale	Asciugatura
60-70 %	Si	In corso di verifica	Max 10 % dimensionale - Max 5 % prestazionale	Forzata

Questionario C – intonaci e tecniche a spruzzo

Nessuna delle due aziende (C1 e C2) hanno risposto ai questionari

Questionario D – canapa per utilizzo in edilizia

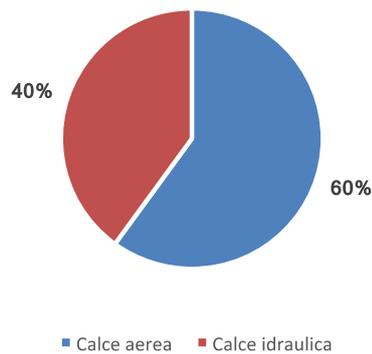
	Canapulo prodotto o acquistato	Da dove è importato il canapulo	Granulometria	Massa volumica apparente	Tasso umidità del canapulo	Tasso di polvere	Colore	Materiale estrapolato da pianta	Definizione sulle caratteristiche del prodotto	Grado errore dimensionale/prestazionale
D1										
D2	Produzione propria	/	1/3 / 5 / 15 mm	110-120 kg/m ³	10-12 %	Depolverato 2%	Bianco/grigio	75%	/	/
D3	Lavorazione di paglia di canapa italiana da propria filiera agricola	/	Da 500 micron a 220 mm	/	< 15 %	Nulla	Da biondo a grigio	/	ka	/
D4										
D5	Produzione propria	/	3 diverse pesature	/	/	/	/	/	ka	/

Come primo dato è importante specificare la percentuale di aziende che hanno risposto al questionario che è pari al 52,9 %, mentre il 47,1 % non ha inoltrato alcuna risposta. Visto l'interesse della ricerca per i

blocchi in canapa, si può constatare come il 62,5 % produttori di blocchi ha fornito delle informazioni, mentre la restante parte del 37,5 % non ha compilato il questionario proposto.

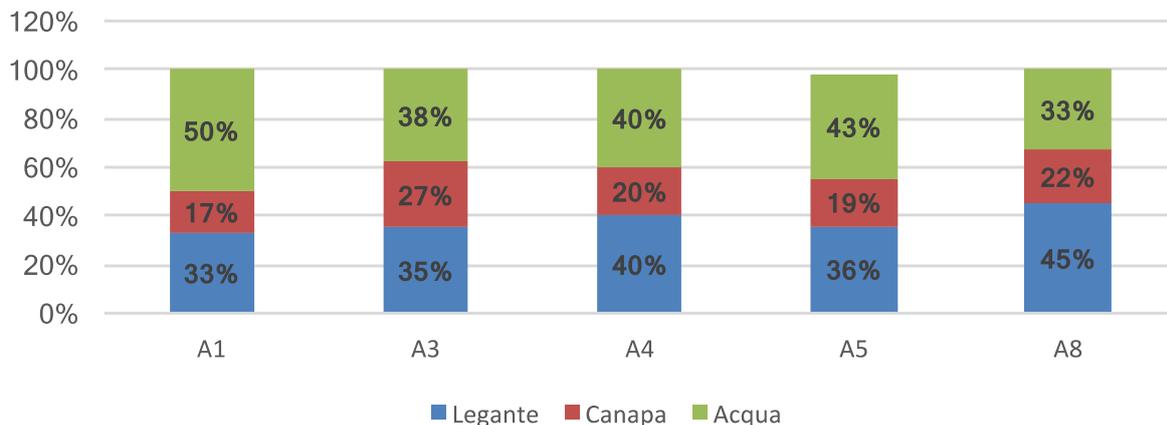
Per quanto riguarda i dati relativi alla tipologia di legante si è riscontrato l'uso prevalente della calce, solo alcune aziende aggiungono ad essa additivi naturali o minerali. La calce più utilizzata è quella tipo aereo, rispetto a quella idraulica.

2. Tipologia di calce



I dati raccolti relativi alla composizione del blocco per ogni azienda sono stati riassunti nel grafico sottostante che mostra le percentuali di legante, calce e acqua presenti nelle diverse tipologie di blocchi.

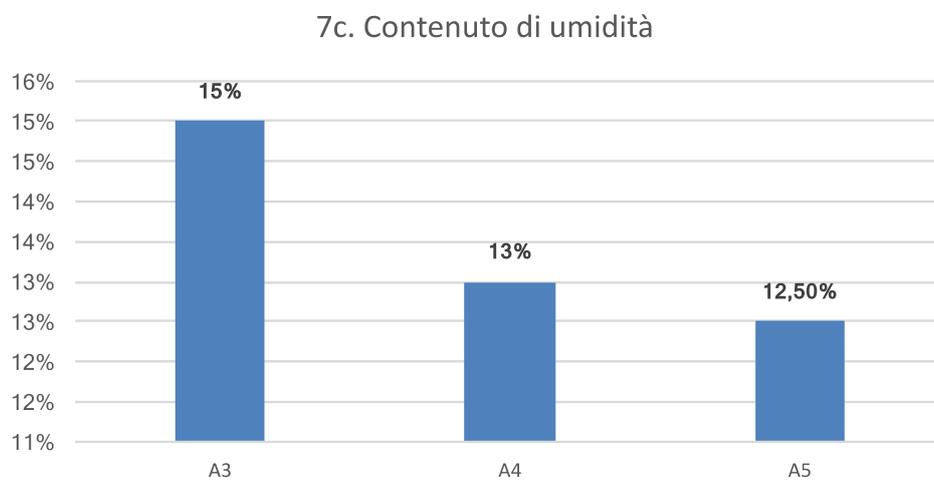
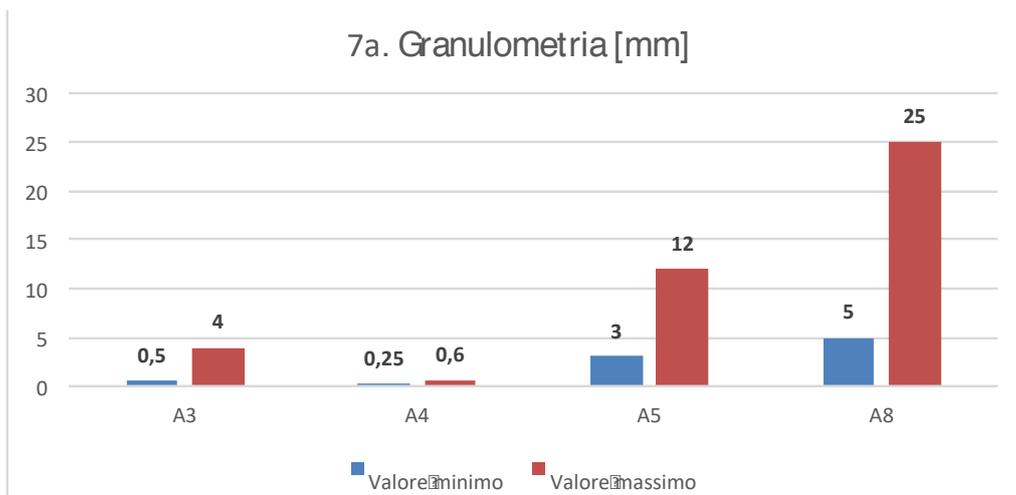
3. Composizione della miscela



In merito al tema degli additivi si è riscontrato che solo il 20 % dei produttori li utilizza, in particolare si tratta di additivi di origine naturale che hanno il compito di accelerare l'asciugatura e renderlo più solido in tempi ristretti.

Il canapulo è solitamente acquistato da aziende esterne a quelle produttrici, solo il 40 % la producono direttamente.

In relazione ai parametri indicati da *Constuire en chanvre*, risulta che ogni prodotto ha dei valori differenti dagli altri, per questo vista la loro eterogeneità non è facile riassumere tali caratteristiche. Nonostante ciò nelle tabelle sottostanti sono riassunte le caratteristiche più rilevanti.

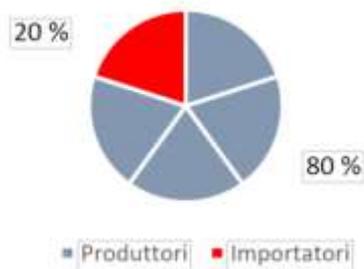
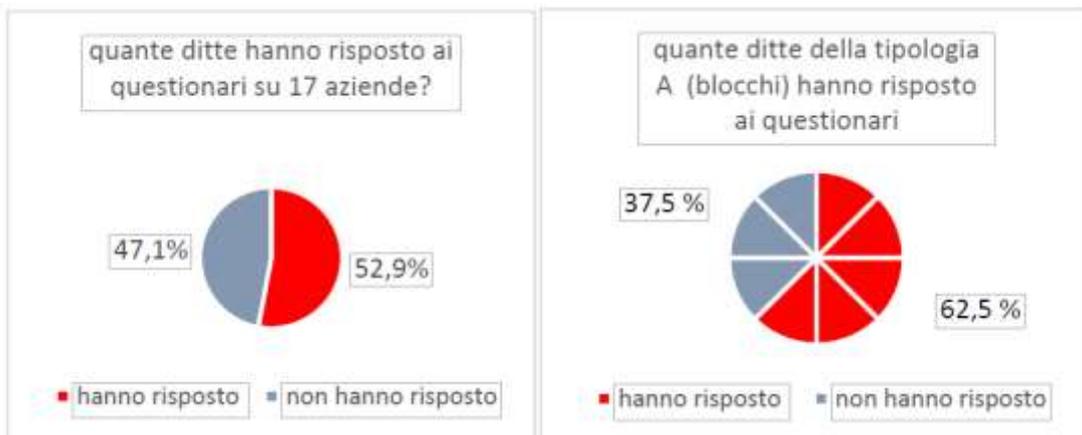


Le certificazioni relative alle caratteristiche dei prodotti non sono sempre note. Il grado degli errori che può essere riscontrato in ciascuna azienda si aggira intorno al 10% per quanto riguarda le caratteristiche dimensionali e il 5 % per quelle prestazionali.

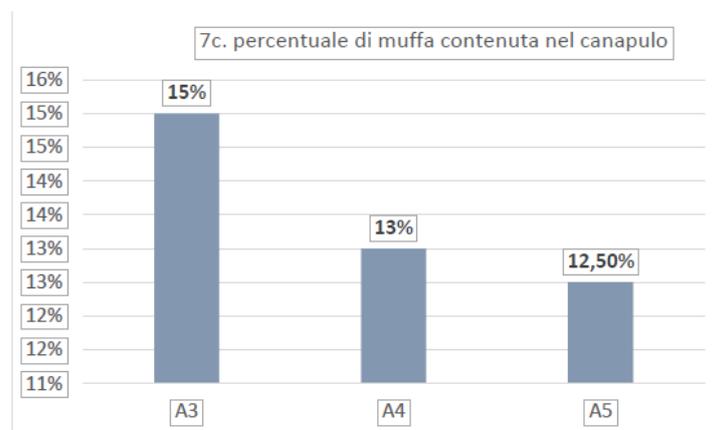
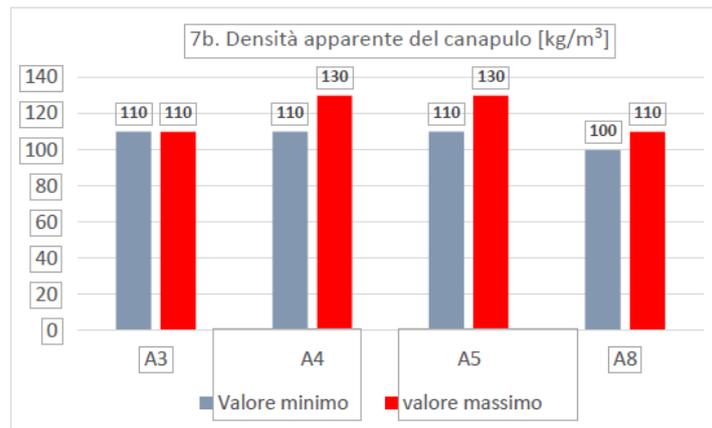
L'asciugatura dei prodotti è sempre naturale ad eccezione di alcune aziende e i tempi si aggirano attorno a 1 o 2 mesi.

2.2.6 *Analisi delle risposte raccolte*

Facendo riferimento alle ditte della tipologia A (blocchi in calcecanapulo) che hanno risposto ai questionari (5 su 8), si valuta anche quanti sono i produttori italiani rispetto a quanti importano dall'estero.



Alcune aziende forniscono dati qualitativi sul canapulo anche se sono difficili da confrontare perché non tutti usano label e standar riconosciuti e solo 3 aziende inoltre affermano di conoscere i metodi di prova delle caratteristiche riportate in scheda tecnica.



In conclusione, si può affermare che:

- alcune aziende usano calce aerea, altre idraulica. Tutto ciò può influenzare sulle prestazioni del prodotto finale?
- 2 aziende su 5 utilizzano additivi nella mescola;
- la granulometria del canapulo cambia da 0,25 mm a 25 mm, questa differenza di valore può influenzare le caratteristiche dei blocchi;
- 4 aziende su 5 dichiarano che ci sono problemi di stoccaggio relativi a questi prodotti; questo può essere un problema per la diffusione del materiale nel mercato edilizio? Solo un'azienda ha introdotto processi di essiccazione/maturazione industriale.

3. Analisi LCA delle materie prime e delle tecniche in calcecanapulo

3.1 Stato dell'arte

Un articolo di review recente (Ingrao et al., 2005) ha messo in luce le caratteristiche dei materiali edili a base canapa, sottolineandone anche la versatilità e le potenzialità in termini di riduzione degli impatti ambientali nel settore edile. Tuttavia, a oggi gli studi di sostenibilità ambientale basati sulla metodologia LCA sia della materia prima vegetale usata nella produzione del calcecanapulo sia dei manufatti a base di calcecanapulo è ancora limitata.

Per quanto riguarda la coltivazione della canapa e la produzione del canapulo, gli unici studi LCA sono quelli di Boutin et al. (2006), di Ip and Miller (2012) e di Zampori et al. (2013). Lo studio di González-García et al. (2010) fornisce dati primari spagnoli, ma è focalizzato sulla produzione di fibre e non di canapulo, come altri lavori indirizzati soprattutto allo studio della produzione di carta (Vieira et al., 2010).

Nello studio di Boutin et al. si utilizzano dati agricoli francesi, in quello di Ip and Miller sono utilizzati sia dati primari che secondari ottenuti da coltivatori inglesi, infine in quello di Zampori et al. si usano dati italiani. Al momento invece non sono disponibili dati relativi al canapulo e più in generale alla coltivazione della canapa nei database internazionali utilizzati nei maggiori software LCA. In particolare, ad oggi né il database Ecoinvent 3.4 (2017) né il database Agri-footprint 4.0 (2017) forniscono dati di processo relativi alla coltivazione della canapa per usi industriali. Infatti, in lavori recenti come in Florentin et al. (2018) si utilizzano i dati pubblicati nei precedenti lavori.

Per quanto riguarda i possibili leganti, cemento e calce, invece esiste abbondanza di dati sia nei principali database usati nei calcoli di LCA sia in letteratura (Salas et al. 2016; Petek Gursel et al., 2014). Poiché i dati sono facilmente disponibili e una revisione accurata della letteratura su calce e cemento andrebbe oltre gli scopi del presente documento, viene qui tralasciata.

Passando invece ai materiali a base di calce-canapulo, che nella letteratura inglese viene comunemente chiamato hempcrete e in quella francese beton de chanvre, gli studi LCA primari sono ancora pochi. Ad oggi, si trovano in letteratura due studi su calcecanapulo messo in opera a spruzzo (Boutin et al., 2006; Pretot et al., 2014), uno studio su materiale in cassaforma a rimuovere (Ip and Miller, 2012) e uno sui blocchi in calcecanapulo (Arrigoni et al., 2017). I dettagli costruttivi dei 4 casi suddetti si trovano in Tabella

Gli indicatori di impatto più studiati ed utilizzati nella letteratura del settore sono l'energia incorporata (Embodied Energy) e l'impronta di carbonio (Carbon Footprint), anche se i quattro studi suddetti in realtà analizzano uno spettro di categorie di impatto maggiore.

Gli studi LCA analizzati, in generale, arrivano alla conclusione che il calcecanapulo non solo ha un chiaro vantaggio rispetto ai materiali convenzionali in termini di energia incorporata, ma anche in termini di emissioni nette di CO₂. Ciò è dovuto principalmente al sequestro attivo di carbonio da parte della pianta di canapa durante la sua fase di crescita e il graduale sequestro del carbonio durante la reazione di indurimento della calce a riformare il carbonato di calcio. Nella Tabella 1 sottostante è riportato il bilancio complessivo del carbonio, inteso come CO₂-equivalente, da cui si vede che una notevole quantità di CO₂-equivalente rimane immagazzinata nel materiale (valori negativi).

È importante però ricordare che non tutti i metodi di calcolo dell'impronta di carbonio consentono di includere la CO₂ rimossa dall'ambiente come vantaggio (flusso negativo). In particolare, la metodologia messa a punto dall'IPCC non prevede che si includa il computo della CO₂ rimossa dall'atmosfera.

Le più recenti direttive in termini di Carbon Footprint (ISO 14067:2018) consentono di includere separatamente i contributi provenienti dallo stoccaggio di CO₂ nella biomassa, come è il caso del canapulo. Questo spiega i valori negativi di CO₂-equivalente riportati in Tabella 1.

Tabella 1. – Riassunto delle principali caratteristiche delle pareti in calcecanapulo analizzate in lavori recenti (Arrigoni et al., 2017)²¹; i dati si riferiscono ad 1 m² di parete (unità funzionale)

Study		Boutin et al. (2003)	Ip and Miller (2012)	Pretot et al. (2014)	Arrigoni et al. (2017)
Functional unit		1 m ²	1 m ²	1 m ²	1 m ²
Wall type		Non-load-bearing wall	Load-bearing wall	Load-bearing wall	Non-load-bearing wall
Thickness wall plus coating (in/out) (mm)		260 + 0/0	300 + 0/0	240 + 10/20	250 + 0/0
Construction method		Spray	Cast between temporary shuttering	Spray	Blocks
Density (kg/m ³)		330	275	From 390 to 460 (Collet and Pretot, 2014)	330
U-value (W/(m ² ·K))		0.42	0.19	0.36	0.27
Hempcrete					
Binder (kg)		54.5	50	45	44.5
Hydrated lime (%)		N.A.	75	75	80
Hydraulic lime (%)		N.A.	15	15	0
Cement (%)		N.A.	0	0	20
Other (%)		N.A.	10	10	0
Hemp shives (kg)		24.8	30	20.4	31.4
Binder-to-hemp mass ratio (kg/kg)		2.2	1.7	2.2	1.3
Water (kg)		37.2	75.0	67.0	58.6
Other materials					
Timber (kg)		5.5	4.6	20	0
Mortar (kg)		0	0	0	4.25
Hemp shives production					
Crop yield (t/ha)		7.75	7.5	8	15
Shives production (kg shives/kg)		0.60	0.52	0.60	0.75
GHG emissions (kg CO ₂ eq/kg shives)		0.254	0.192	N.A.	0.104
CO₂ uptake					
Hemp growth (kg CO ₂ eq/kg shives)		2.105	1.527	1.7	1.84
Binder carbonation (kg CO ₂ eq/kg binder)		0.249	0.571	0.462	0.012 (0.325)
GHG balance (kg CO ₂ eq/FU)		-35.53	-36.08	-1.6	-12.09 (-26.01)

N.A. non disponibile

3.2 LCA del blocco in calcecanapulo

È stato condotto, recentemente, uno studio dettagliato degli impatti del blocco in calcecanapulo utilizzando i dati primari forniti dall'azienda A4, secondo l'assegnazione del par.2.4.4.. Pertanto, i risultati che vengono qui riportati si riferiscono ad un particolare prodotto, anche se è corretto pensare che le differenze tra i diversi prodotti non siano molto elevate.

La LCA è stata effettuata seguendo le norme internazionali ISO (ISO 14040:2006 , ISO 14044:2006). L'obiettivo dello studio era di valutare gli impatti ambientali del ciclo di vita di un muro costituito da blocchi di calcecanapulo. I blocchi studiati sono prodotti da un'azienda italiana (A4 in par.2.4.4.) con un processo produttivo in tre fasi: miscelazione dei costituenti di base, pressatura e maturazione. Nelle sezioni seguenti l'unità funzionale (FU), i processi unitari e la qualità dei dati utilizzati nello studio sono presentati in dettaglio.

3.2.1 Unità funzionale (FU)

In conformità con l'obiettivo dello studio, l'unità funzionale (FU) considerata era di un metro quadrato di muro non portante realizzato con blocchi di calcecanapulo. Il coefficiente di trasferimento di calore complessivo della parete U era 0,27 W / (m² · K). Lo spessore del muro era di 0,25 m e una faccia era a contatto con l'aria. Non è stato considerato alcun rivestimento superficiale. Si supposeva che i blocchi

fossero posati manualmente e che tra i blocchi fosse applicata la malta. I flussi di riferimento per 1 FU sono riportati in Tabella 1. Dopo l'essiccazione, il peso dell'unità funzionale era stimato in circa 83,9 kg / m², considerando una densità di 330 kg / m³ e 500 kg / m³ rispettivamente per blocchi di calcecanapulo e malta.

3.2.2 Confini del sistema

Lo studio ha compreso le seguenti unità di processo:

- 1. Coltivazione e trasformazione della canapa;
- 2. Produzione dei leganti (estrazione e trasformazione delle materie prime minerali);
- 3. Trasporto di materie prime alla società di produzione del calcecanapulo
- 4. Produzione dei blocchi in calcecanapulo in azienda (incluso l'imballaggio per la commercializzazione del prodotto)

- 5. Trasporto dei blocchi di calcestruzzo al cantiere
- 6. Costruzione della parete con produzione in situ della malta di allettamento
- 7. Fase di uso intesa come processo di carbonatazione del legante

Nel processo unitario 4, sono stati considerati i consumi di acqua ed energia, nonché la produzione di imballaggi e il relativo trasporto verso il sito di produzione. Il processo unitario 6 comprende l'estrazione di materie prime per la produzione di malte, il loro trasporto verso il cantiere ed il consumo di acqua ed energia in loco.

La carbonatazione era l'unico processo considerato nella fase operativa del blocco (processo unitario 7). L'assenza di rivestimento sul sistema a parete risparmia il lavoro di manutenzione preso in considerazione in uno studio precedente (Pretot et al., 2014). Il processo di carbonatazione migliora le proprietà meccaniche del blocco nel tempo: pertanto, non si prevede alcuna sostituzione del materiale durante la vita dell'edificio. Al termine del ciclo di vita dell'edificio, il materiale può essere frantumato e riutilizzato per l'isolamento. La frantumazione accelererebbe il processo di carbonatazione dell'ossido di calcio non reagito. A nostra conoscenza, tuttavia, nessuna struttura in blocchi di calcecanapulo è già stata smantellata fino ad ora; la fase di fine vita è stata quindi esclusa dai confini del sistema. Tuttavia, la CO₂ assorbita dal materiale durante le fasi di produzione e di utilizzo rimarrà molto probabilmente immagazzinata nel materiale anche dopo la fine della vita dell'edificio.

3.2.3 Qualità dei dati e metodi di allocazione

Il sito di produzione dei blocchi si trova nel nord Italia; tutti i dati relativi ai processi di fabbricazione all'interno della fabbrica ("da cancello a cancello") e le informazioni relative ai trasporti di materie prime sono stati forniti dal produttore. Dati secondari sono stati utilizzati nell'inventario dei componenti della miscela: un precedente studio LCA sulla coltivazione della canapa (Zampori et al., 2013) era la fonte per i dati di lavorazione della canapa, mentre il database Ecoinvent 3.4 (Weidema et al., 2013) è stato utilizzato per i processi di produzione del legante.

Il modello di sistema cut-off, che attribuisce gli impatti ambientali della produzione primaria di un materiale al suo utente principale, è stato adottato per allocare gli oneri ambientali tra le diverse unità di processo (Weidema et al., 2013). Il modello del sistema è stato scelto in conformità alle regole stabilite dall'International EPD® System nel General Program (Environdec, 2013), da cui vengono poi create le specifiche regole di categorie di prodotto indispensabili ai fini della certificazione. Considerando il numero in rapida crescita di aziende del settore edilizio interessate a certificare i loro prodotti (Passer et al., 2015),

la metodologia è stata qui adottata al fine di avere un terreno comune per il confronto con altri componenti dell'edificio.

3.2.4 Metodi di caratterizzazione degli impatti

La valutazione dell'impatto è stata effettuata utilizzando le categorie d'impatto raccomandate dalla norma europea (CEN, 2012): consumo di risorse abiotiche (ADP), consumo di risorse fossili (fossile ADP), riscaldamento globale su un intervallo di tempo di 100 y (GWP), riduzione dello strato di ozono (ODP), acidificazione (AP), eutrofizzazione (EP), creazione fotochimica di ozono (POCP). I fattori di caratterizzazione sono quelli proposti dall'Istituto di studi ambientali dell'Università di Leiden per il metodo CML-IA Baseline (versione 3.04) (Leiden University, 2016). Inoltre, sono stati valutati gli impatti ambientali in termini di Cumulative Energy Demand (CED, versione 1.09) (Frischknecht et al., 2015) e con il metodo del Greenhouse Gas Protocol (GGP, versione 1.02) (World Resources Institute, 2012). Quest'ultimo metodo è stato inserito in quanto considera separatamente i diversi contributi di CO² equivalente: emissioni di natura fossile, emissioni di natura biogenica, emissioni dovute a cambio di uso del suolo, rimozioni di CO₂ atmosferica (comprensiva della CO₂ immagazzinata nelle biomasse).

Un ulteriore contributo alla rimozione della CO² atmosferica nel presente caso viene dalla carbonatazione del legante, in particolare la calce. A questo scopo è stata effettuata una analisi specifica del grado di carbonatazione del blocco di calce canapulo, studiandone il grado di avanzamento nel tempo. Lo studio è stato condotto su due differenti blocchi, che differiscono nella composizione del legante. Il primo, che è il caso base dello studio ed è quello attualmente sul mercato, è composto all'80% (in massa) di calce dolomite e 20% di cemento. Nel secondo caso il legante è composto solo da calce dolomitica. La carbonatazione è stata monitorata a diverse profondità all'interno del blocco: 0-2 cm, 2-4 cm, 4-6 cm, 6-8 cm, 8-10 cm.

3.2.5 La parete modello

Nella presente analisi è stata considerata una parete modello con la composizione riportata in Tabella 2. I dati sono riferiti a 1 m² di parete.

Tabella 2 – Composizione di 1 m² di parete composta di blocchi in calcecanapulo e malta di allettamento

Componente	Canapulo	Legante	Acqua	Peso totale
	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
Blocco in calcecanapulo	31.4	41.1	53.1	125.6
Malta	0.85	3.40	5.50	9.75

3.3 Analisi degli impatti (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)

3.3.1 Carbonatazione

In entrambi i campioni, la quantità di carbonati nei blocchi è aumentato con l'età del campione. Il tasso di carbonatazione però dipende fortemente dalla profondità di campionamento: nel campione composto solo da calce dolomitica la quantità di carbonati aumentata rapidamente nello strato più esterno da circa il 15% (in massa) del legante a 30 giorni dalla produzione del blocco fino a circa il 50% dopo 240 giorni, principalmente a spese della calce che ha mostrato una tendenza opposta. Nel secondo strato (2-4 cm), la quantità di carbonati aumenta significativamente solo dopo 150 giorni di invecchiamento, mentre negli

strati più interni la carbonatazione è molto limitata; un aumento dei carbonati può essere rilevato ad una profondità di 4-6 cm dopo 8 mesi, mentre è ancora trascurabile oltre i 6 cm di profondità. Il campione del caso base, contenente sia la calce dolomitica che il cemento, ha mostrato un comportamento simile sia nel tempo che in profondità, tranne per il fatto che la quantità di carbonati è sempre maggiore in termini assoluti dovuto al maggior contenuto iniziale di carbonati nel legante. Complessivamente, assumendo 1 faccia esposta all'aria, si stima che la quantità di CO₂ catturata dopo 240 giorni sia di 7 g per kg di legante per il campione contenente solo calce dolomitica e 12 g per kg di legante per il blocco contenente anche cemento.

Nel complesso possiamo dire che in tempi brevi il contributo di rimozione di CO₂ atmosferica ad opera del meccanismo di carbonatazione del legante non è fondamentale. Invece, su tempi lunghi è ipotizzabile una carbonatazione quasi completa.

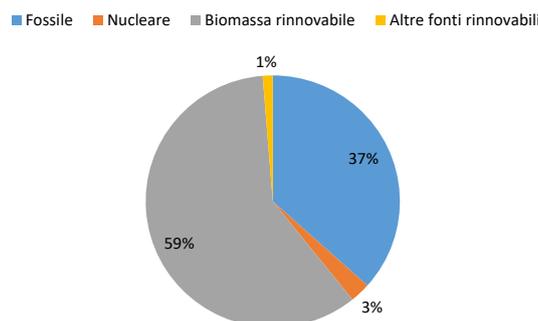
3.3.2 Energia immagazzinata o Cumulative Energy Demand (CED)

I risultati dell'analisi della valutazione d'impatto in termini di energia immagazzinata sono riassunti in Tabella 3. I numeri delle unità di processo si riferiscono a quanto descritto precedentemente.

Tabella 3 – Energia immagazzinata per 1 m² di parete suddivisa nelle diverse unità di processo

Fonte energetica	Unità di processo	1	2	4	3+5	6	7	1-7
		Produzione del canapulo	Produzione del legante	Produzione del blocco di calce-canapulo	Trasporti	Costruzione della parete	Fase di uso	Totale
Fossile	MJ	78	144	19.2	99.7	18.2	-	359
Nucleare	MJ	1.03	14	2.66	0.59	6.99	-	25.2
Biomassa rinnovabile	MJ	567	0.49	0.52	0.13	14.9	-	583
Alter fonti rinnovabili	MJ	0.32	8.81	1.26	0.14	2.01	-	12.5

In termini assoluti la maggior parte di energia incorporata nel muro proviene da fonti rinnovabili, grazie alla significativa presenza di canapa nei blocchi e nella malta. A questo proposito, è importante sottolineare che il rapporto legante/canapulo nel mattone è espresso come rapporto di massa, ma essendo la densità del canapulo molto bassa il volume di materiale contenuto in un blocco è elevato e quindi anche l'energia immagazzinata nella biomassa e non utilizzata a scopi termici. Un'altra voce importante dell'energia immagazzinata è la produzione del legante e la fase di trasporto. L'energia da fonti nucleari e altre fonti rinnovabili (eolico, idroelettrico e solare fotovoltaico), che rappresenta una piccola parte della la domanda totale di energia è principalmente dovuta al consumo di elettricità e deriva dalla natura del mix energetico nazionale. Nel grafico sottostante sono evidenziati i contributi percentuali totali all'energia immagazzinata per unità funzionale.



3.3.3 Impronta di carbonio o Carbon Footprint (Greenhouse Gas Protocol)

Il bilancio delle emissioni di gas a effetto serra associate all'unità funzionale è riportato in Tabella 4. Le emissioni fossili e l'assorbimento di CO₂ rappresentano i due termini principali del bilancio, mentre le emissioni da fonti biogeniche e la trasformazione del territorio sono trascurabili. La principale fonte di emissioni fossili è la calcinazione della calce, che si svolge in fornace ad alta temperatura. Al contrario, l'assorbimento di CO₂ è il risultato della fotosintesi e dei processi di carbonatazione: la canapa assorbe CO₂ durante la sua crescita, mentre il legante inizia ad assorbire CO₂ dopo essere entrato in contatto con l'aria durante il processo di miscelazione con acqua, che è necessaria per veicolare la CO₂ atmosferica. Dopo 240 giorni dalla produzione del blocco la parete ha convertito una certa quantità di CO₂ atmosferica. Il bilancio delle emissioni dopo 240 giorni è quindi sensibilmente negativo, pari ad un assorbimento netto di -11,24 kg CO₂-eq per metro quadrato di parete. Ciò significa che la parete ha agito come se fosse un assorbitore di carbonio, immagazzinando più CO₂ di quanta non sia stata emessa durante la produzione. Se il muro fosse completamente carbonatato, il bilancio complessivo della CO₂ equivalente sarebbe ancora più fortemente negativo, infatti, considerando la natura e la quantità di leganti utilizzati per 1 m² di parete si avrebbe un assorbimento di 14.45 kg CO₂ eq /m², con un conseguente bilancio complessivo di - 25.69 kg CO₂ eq / m². Questo risultato è in ottimo accordo con quanto ritrovato da Arrigoni et al. (2017)²¹ e riportato in Tabella 4.

Tabella 4 – Carbon Footprint di 1 m² di parete in kg CO₂ equivalente

	1	2	4	3+5	6	7	1-7
Categoria di impatto	Produzione del canapulo	Produzione del legante	Produzione del blocco di calcecanapulo	Trasporti	Costruzione della parete	Fase di uso	Totale
Emissioni fossili	1.75	35.40	1.02	6.52	3.32	-	48.02
Emissioni biogeniche	0.01	0.18	0.03	0.01	0.10	-	0.34
Uso del suolo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00
rimozione	-58.0	-0.04	-0.04	-0.01	-1.51	- 0.53	-59.60

3.3.4 Metodo CML-IA

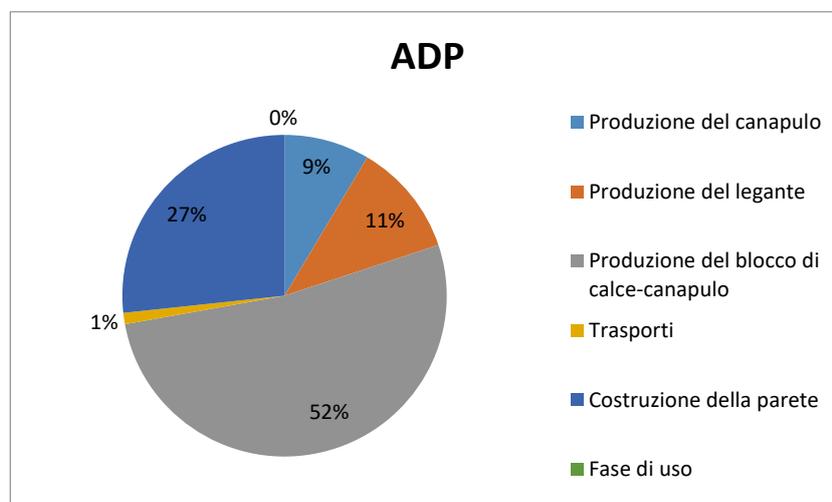
La Tabella 5 riassume gli impatti ambientali di 1 m² di muro fatto di blocchi di calcecanapulo utilizzando il metodo CML-IA baseline. Si tenga presente che il metodo CML utilizza per quanto riguarda il GWP i fattori di caratterizzazione forniti nell'ultimo rapporto dell'IPCC 2013, che come anticipato non include i contributi di CO₂ immagazzinata o rimossa dall'ambiente.

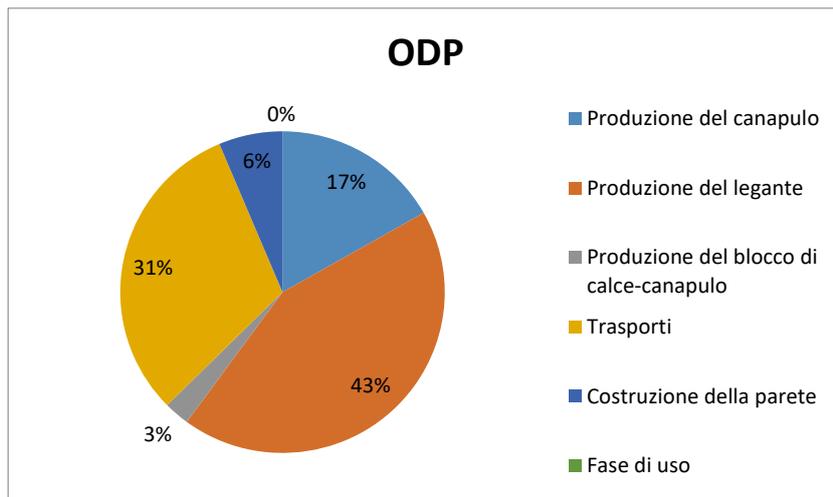
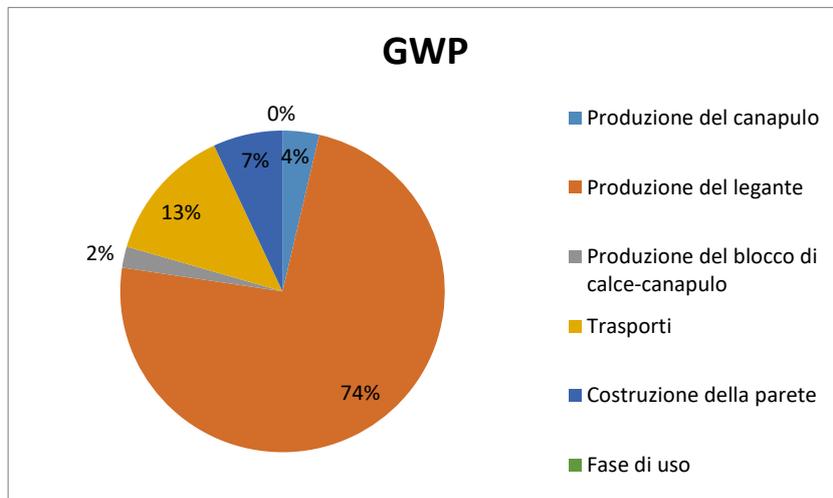
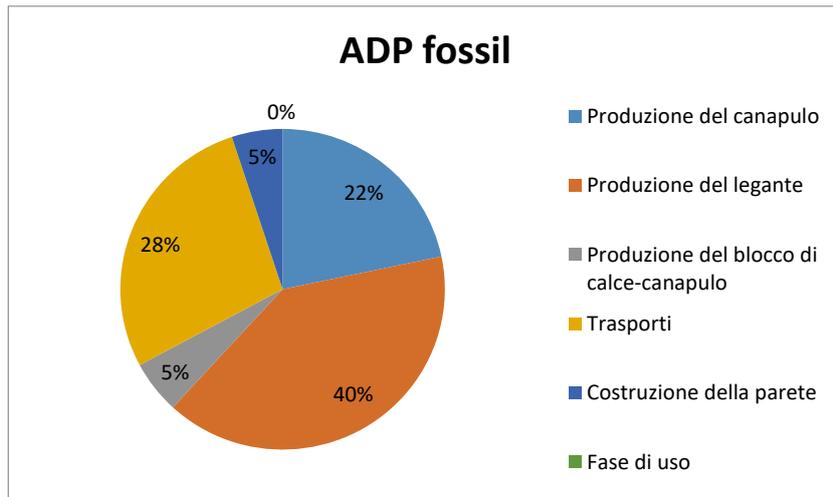
Il processo di produzione del legante è la principale causa di impatti per tutte le categorie considerate, tranne che per il consumo di risorse abiotiche ADP; la calcinazione della calce e la produzione di clinker sono invece le principali fonti di emissioni per questo processo. Un'altra importante fonte di impatti ambientali è la fase di trasporto, principalmente a causa del consumo di gasolio. Una parte importante di consumo di diesel, responsabile per l'esaurimento dei combustibili fossili, era dovuto al funzionamento dei macchinari utilizzati nella coltivazione della canapa. L'elevato valore di ADP nella fase 4 di produzione del blocco deriva dal consumo di energia elettrica nello stabilimento produttivo.

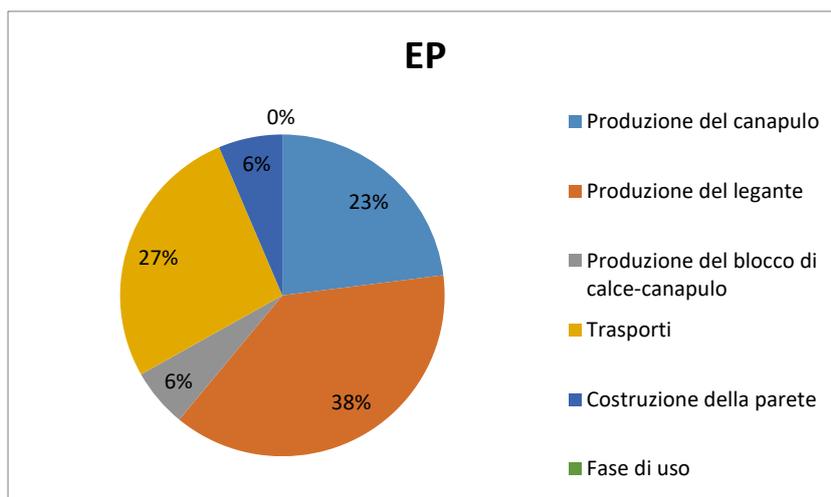
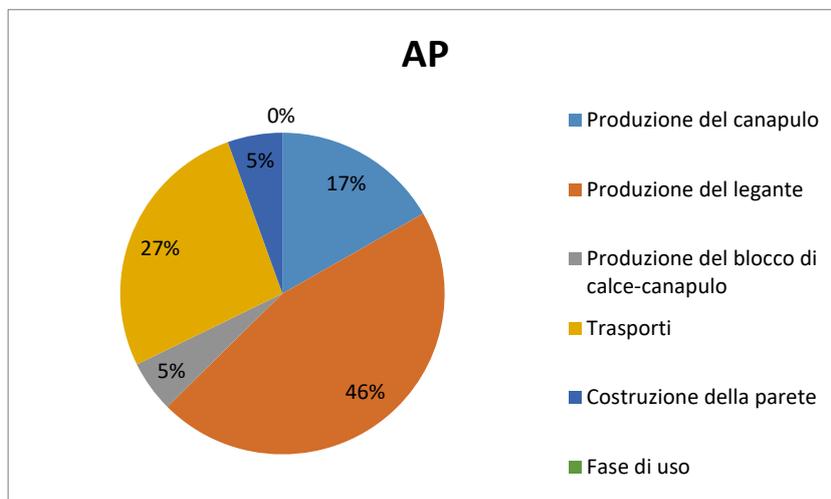
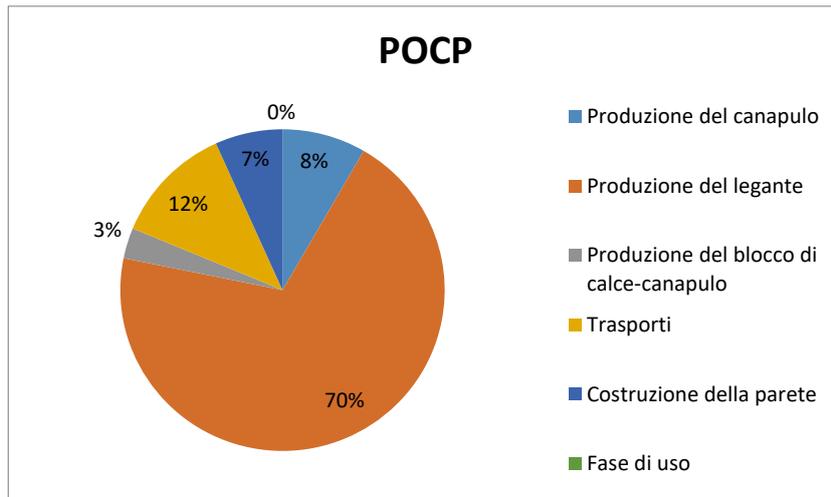
Tabella 5 – Impatti ambientali di 1 m2 di parete calcolati con il metodo CML-IA baseline

	Unità di processo	1	2	4	3+5	6	7	1-7
Categoria di impatto		Produzione del canapulo	Produzione del legante	Produzione del blocco di calce-canapulo	Trasporti	Costruzione della parete	Fase di uso	Totale
ADP	mg Sb eq	0.15	0.2	0.92	0.02	0.47	-	1.75
ADP fossil	MJ	78	144	19.2	99.7	18.2	-	358.73
GWP	kg CO ₂ eq	1.75	35.41	1.02	6.52	3.33	-	48.04
ODP	mg CFC-11 eq	0.66	1.7	0.1	1.22	0.25	-	3.93
POCP	g C ₂ H ₄ eq	0.57	4.77	0.21	0.82	0.46	-	6.84
AP	g SO ₂ eq	13.6	37.3	4.2	21.8	4.45	-	81.33
EP	g PO ₄ ⁻⁻⁻	3.64	6.01	0.93	4.24	1.01	-	15.82

I contributi percentuali delle diverse unità di processo sono evidenziati nei grafici sottostanti, da cui si vede chiaramente che in tutte le categorie ad esclusione dell'ADP la produzione del legante (calce e cemento) è la causa maggiore di impatto.







4. Caratterizzazione in laboratorio

Per studiare il comportamento del calcecanapulo al variare dei parametri termici e igrometrici in clima mediterraneo è stata messa a punto una metodologia di prova testata prima in laboratorio con una camera climatica in grado di effettuare test su un muro di 1 m² e poi in situ.

La scelta della tipologia di parete realizzata per i test da camera climatica è stata dettata dai seguenti requisiti:

- Utilizzo di tecnologia in calcecanapulo di rapida maturazione
- Stratigrafia composta da materiale il più possibile omogeneo e monomaterico
- Spessori e stratigrafie simili a quelle realizzate nei manufatti edilizi prescelti per le prove in situ

Questi parametri hanno portato alla scelta di una muratura realizzata in blocchi di calcecanapulo di produzione industriale e già commercializzati. Tra tutti i prodotti da costruzione realizzati in canapa, infatti, i blocchi di calcestruzzo sono i più innovativi, perché rappresentano la soluzione alle esigenze di edifici nuovi e tradizionali, offrendo un elevato risparmio energetico, combinato con la sostenibilità di materiali e prodotti, pur rimanendo, in termini di forma e dimensioni, molto vicino alla cultura e ai sistemi costruttivi più conosciuti dai professionisti. I tempi di maturazione della parete si sono, quindi, limitati all'asciugatura della malta di allettamento e degli intonaci sulle due facce della muratura. Con queste prove si è inteso misurare la trasmittanza termica e il comportamento termoigrometrico sull'intera parete con blocchi in calcecanapulo, sottoposta a condizioni al contorno controllate di laboratorio per poi confrontarla con le misure in opera. E' stato studiato in particolare il comportamento della parete sottoposta a temperature e umidità tipiche dei climi mediterranei.

4.1 Realizzazione parete in blocchi di calcecanapulo per prove di laboratorio

Il blocco in calcecanapulo utilizzato è quello prodotto dall'azienda A4 con formato di 500x200x300mm (prod. 10-15 Marzo 2018)

Rispetto agli spessori delle murature in blocchi di calcecanapulo per le prove in situ che sono di 360mm, la scelta di optare per uno spessore di muratura di 300mm è stata dettata dal sistema di collegamento alla struttura del carrello della camera climatica su cui il telaio sarebbe stato montato. I blocchi di uso di 360 mm avrebbero infatti compromesso l'equilibrio della struttura sul carrello.

La messa in opera ha seguito un'apparecchiatura muraria ad una testa con posa sfalsata dei giunti per ottenere uno spessore della porzione di muratura di 300mm.

La posa è stata effettuata da maestranze specializzate e secondo le prescrizioni di posa indicate nello specifico manuale per murature con malta di allettamento. La malta utilizzata è in calcecanapulo ed è definita 400 in riferimento ai dosaggi degli ingredienti e peso specifico finale della malta (3 parti di legante dolomitico naturale LDN + 1 parte di canapulo + azienda A4). La malta è stata posizionata sia come allettamento dei corsi orizzontale sia per i giunti verticali.

La muratura è stata poi completata con una malta di intonaco di corpo di 15mm di spessore sulle due facce della muratura (intonaco premiscelato a base di calce idraulica NHL 5, premiscelato ICN) azienda A4. Tale malta è stata posata a regole e staggia per garantire la complanarità e regolarità dello spessore e finita di lavorare schiacciata e "lamata" al fine di ottenere una superficie più liscia appetibile per la posa della strumentazione.

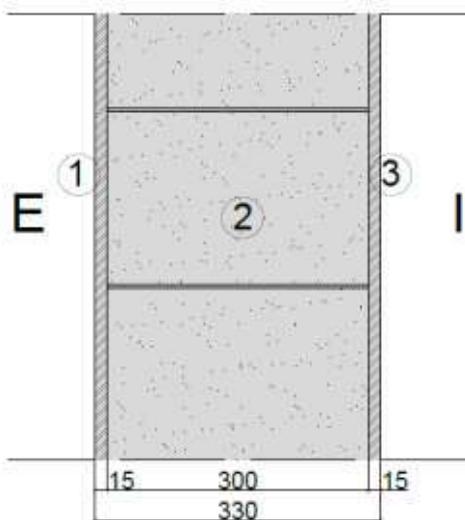
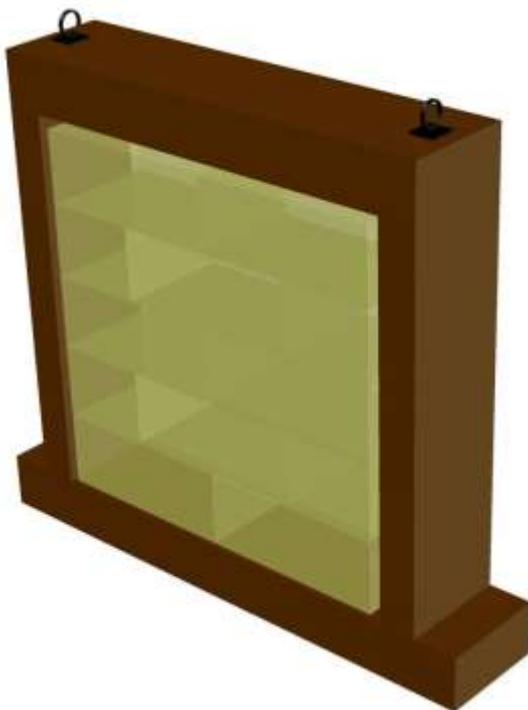


Lo spessore finale della parete intonacata sui 2 lati è di 330mm. La realizzazione della parete è stata eseguita all'interno di un telaio in legno, necessario sia per problemi di trasporto che per la sua collocazione a contatto con la camera climatica. Il telaio ligneo è composto da un dormiente in legno lamellare di 150x330x1500mm, da n. 2 montanti costituiti da pannelli di OSB larghi quanto lo spessore della muratura (330mm) e spessi 100mm e da un traverso superiore di chiusura di 150mm.

La parete è stata realizzata nel maggio 2018 ed è stata trasportata c/o il laboratorio di durabilità dei materiali del Politecnico di Milano in data 7 giugno 2018.

La dimensione totale della parete in calcecanapulo è di 1060x1050x330mm, con un calcolo della trasmittanza di 0,22 m²K/W

La dimensione della parete con telaio è di 1350x1250x330mm.



Layer	Description	Th. cond. λ [w/m*K]	Thick. [m]	Th. res. R [m ² *K/W]
R_{se}				0,040
1	External plaster made by Hydraulic Lime 2,0 with the addition of a fibre-reinforced net ^A	0,47	0,015	0,032
3	Hempcrete blocks laid with mortar realised mixing hemp's shives and Natural Dolomitic Binder (ratio shives-to-binder 1:4,5) ^B	0,07	0,300	4,286
3	Internal plaster made by Hydraulic Lime 2,0 with the addition of a fibre-reinforced net ^C	0,47	0,015	0,032
R_{si}				0,130
Total thickness [m]				0,33
Total thermal resistance R [m ² *K/W]				4,52
Total thermal transmittance U (1/R) [W/m ² *K]				0,22

4.2 Set up sperimentale

Al fine di eseguire nel modo corretto le prove di trasmittanza termica, è stato necessario eseguire alcune attività preliminari, in particolare per la predisposizione di un telaio che sostenesse e racchiudesse la parete da testare, della superficie di 1 m², realizzata in blocchi di calcecanapulo intonacati su entrambi i lati, come già descritto;

La strumentazione utilizzata è la seguente:

- Una camera climatica che permettesse almeno di testare una superficie pari a 1 m²,

Nella configurazione di prova concordata la parete costituita in blocchi di calcecanapulo inseriti all'interno della cornice lignea, doveva essere fissata alla camera climatica per essere sottoposta al gradiente di temperatura utile per la misura del flusso termico.

Lo schema è riportato in Figura 1.



Figura 1: Indicazione della posizione in cui il telaio ligneo verrà posizionato davanti alla camera climatica

Al fine di fissare la parte alla camera climatica, si è reso necessario eseguire diverse operazioni. Sempre supportati dal tecnico di laboratorio, sono stati smontati alcuni elementi presenti sullo sportello di chiusura della camera climatica, rimontandoli poi sul telaio ligneo facendo attenzione a fissarli nelle giuste posizioni così da permettere la corretta aderenza del telaio della parete alla camera climatica.

Di seguito si riportano alcune immagini riguardanti le fasi di installazione della parte con una breve descrizione.



Figura 2: Camera climatica utilizzata (Angelantoni 2100 CH)

Confronto tra lo sportello che chiude normalmente la camera climatica, ancora montata sul carrello e il telaio ligneo con all'interno la parete in blocchi di calcecanapulo prima di essere installata sul carrello.



Figura 3: Confronto tra lo sportello metallica della camera climatica e il telaio ligneo

Posa del telaio ligneo sul carrello metallico della camera climatica.



Figura 4: Fasi di posa della parete sul carrello metallico

Installazione di elementi metallici e posa del silicone sigillante lungo il perimetro interno della parete.



Figura 5: Posa del silicone sigillante

4.3 Test di misura in camera climatica

4.3.1 Set-up analisi sperimentale

4.3.1.1 Descrizione della parete indagata

La tecnica utilizzata per realizzare lo strato d'intonaco, di spessore 15mm su ciascun lato, è la cosiddetta posata schiacciata e "lamata" che consente di ottenere una superficie liscia e complanare (intonaco premiscelato a base di calce idraulica NHL 5, premiscelato ICN).

Per quanto riguarda invece il biomattone, è stato utilizzato un prodotto commerciale, indicato in relazione come A4 (prod. 10-15 Marzo 2018), avente spessore 300mm e posato con malta di allettamento 400. La malta di allettamento 400 è costituita da 1 parte di canapulo + 3 parti di legante dolomitico naturale LDN.



LEGENDA

1. Intonaco premiscelato a base di calce idraulica NHL 5, premiscelato ICN;
2. Biomattone BA30
3. Malta di allettamento 400



Figura 6: Schema parete: sezione trasversale

Si riportano in Tabella 6 le caratteristiche degli elementi stratigrafici della parete rilevanti ai fini dello studio del comportamento termoigrometrico e in Tabella 7 le caratteristiche tecniche dell'apparato strumentale.

Tabella 6 - Caratteristiche rilevanti degli elementi stratigrafici della parete

Materiale strato	Spessore <i>s</i> [m]	Densità apparente ρ_{app} [kg/mc]	Porosità ε [mc/mc]	Capacità termica specific <i>c</i> [J/kgK]	Conduttività termica λ [W/mK]	Resistenza al vapore μ
Intonaco di calce	0.015	1350 ^I	0.300 ^{II}	1000 ^{IV}	0.47 ^{VI}	8 ^{VII}
Biomattone	0.300	330 ^I	0.788 ^{III}	1870 ^V	0.07 ^{VI}	4.5 ^{IV}

$\rho_{app} = M_{tot}/V_{tot}$ dove con M_{tot} e V_{tot} s'intendono inclusi i vuoti
 $\varepsilon = 1 - (\rho_{app} / \rho_{reale})$ dove $\rho_{reale} = M_{sol}/V_{sol}$ dove con M_{sol} e V_{sol} s'intende la parte solida esclusi i vuoti
^I valori di materiale asciutto forniti dalla Ditta
^{II} assegnato in base ai valori tipici medi di un intonaco di calce
^{III} valore misurato nei Laboratori ENEA di Faenza
^{IV} valore forniti dalla Ditta
^V valore fissato su indicazione della Ditta
^{VI} valore forniti dalla Ditta
^{VII} valore ricavato dalla scheda tecnica dell'intonaco di calce naturale

In base ai valori riportati in Tabella 6, la resistenza termica della parete risulta:

$$R_{tot} = \sum Ri = \sum si/\lambda_i = 4.35 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}.$$

La parete oggetto di studio è stata sottoposta a test in camera climatica per i quali ENEA ha:

- Definito i cicli di temperatura e umidità;
- Definito le caratteristiche tecniche strumentali;
- Installato in opera la rete di sensori;
- Eseguito le misurazioni e l'analisi dei risultati;
- Implementato modello di simulazione numerica.
-

4.3.1.2 Strumentazione utilizzata

Le misurazioni in camera climatica (CHALLENGE CH 1200 SP) sono state condotte presso il Laboratorio di Prove del Politecnico di Milano con l'ausilio della strumentazione ENEA indicata di seguito (le cui caratteristiche tecniche sono riportate in Tabella 7):

- kit termoflussimetrico Capetti;
- sensori di temperatura PT1000;
- sensori temperatura ambiente
- distanziometro laser Bosch;
- anemometro a filo caldo TROTEC

Tabella 7 - Caratteristiche tecniche dell'apparato strumentale

STRUMENTO	CARATTERISTICHE
<p>Camera climatica Angelantoni CH1200 per test di comportamento termico e comportamento termoigrometrico</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Capacità utile: 1152 lt - Dimensioni interne: 1000x1130x1020 (LxPxH) mm - Dimensioni esterne: 1250x2160x2036 H* mm (*Altezza senza ruote, con ruote aumenterà di circa mm 58) - Campo di temperatura: -40/+180°C - Precisione di temperatura nel tempo: $\pm 0,25^{\circ}\text{C} \dots \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ - Velocità di variazione della temperatura (in accordo a norme IEC 60068-3-5): in salita: 4°C/min. da -40° a +180°C in discesa: 4°C/min. da +180 a -40°C (valori medi senza carichi interni con T ambiente di +20/+22°C) - Campo di umidità relativa: dal 10% al 98% nel campo +5/+95°C - Campo del punto di rugiada: +2/+94°C per prove continuative; -20/+2°C per prove non continuative relate alle condizioni climatiche di partenza ed al tempo di test - Precisione U.R.: $\pm 1\% \dots \pm 3\%$ e comunque non meno di $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ sulla differenza psicrometrica - Consente la programmazione e l'esecuzione dei cicli di T e UR, nonché l'attivazione di tutte le funzioni accessorie.
<p>Sistema di sensori Capetti Kit termoflussimetrico</p>	<p>Sonda termoflussimetrica conforme alla ISO 9869 :diametro 50 mm, spessore 5 mm, sensibilità 50 $\mu\text{V}/\text{m}^2$, precisione $\pm 5\%$(@T=20°C),intervallo di temperatura compreso tra -30°C e +70°C, resistenza termica del sensore inferiore a 6.25·10⁻³ m²K/W, intervallo compreso tra -2000 e +2000 W/m²</p>
<p>Sensori di temperatura a parete</p>	<p>PT1000 classe A con piastra in alluminio, intervallo di misurazione da -20°C a 40°C, risoluzione 0,01°C, precisione 0,1°C, intervallo per umidità relativa da 10 al 90%</p>
<p>Sensori Temperatura e Umidità Ambiente</p>	<p>PT1000 classe A per rilevamento temperatura ed umidità ambientale ,intervallo di misurazione da -10° 60°C , e da 10 a 90% , risoluzione 0,01°C , precisione 0,1 °C</p>
<p>Distanziometro laser Bosch</p>	<p>GLM 80 Professional, campo di misura 0,05 – 80,00, Diodo laser 635 nm, < 1 mW, Peso, ca. 0,14 kg;</p>
<p>Anemometro a filo caldo TROTEC 3000</p>	<p>TS 430 SDI, campo di misurazione da 0,0°C fino a +50,0°C, precisione +1,0°C adatto per rilievi fino a 2m/s.</p>

4.3.2 Misure della trasmittanza

4.3.2.1 Norme di riferimento

Parete per prove in camera climatica: UNI ISO 9869-1:2014, Isolamento termico - Elementi per l'edilizia - Misurazione in situ della resistenza termica e della trasmittanza termica - Parte 1: Metodo del termoflussimetro.

Calcolo della trasmittanza: Metodo di calcolo UNI EN ISO 6946/2005, Componenti ed elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica.

4.3.2.2 Apparato di prova

- La definizione e l'applicazione delle metodologie per la messa a punto della misura termoflussimetrica è stata a cura di ENEA (Aversa et al., 2016):
 - posa dei sensori del kit termoflussimetrico sulle facce interna (lato laboratorio) ed esterna (lato camera climatica) della parete, con l'impiego di una gommina adesiva (Figura 8 e 8);
 - posizionamento dei sensori ambientali per la misurazione delle temperature interna ed esterna (Figura 9).

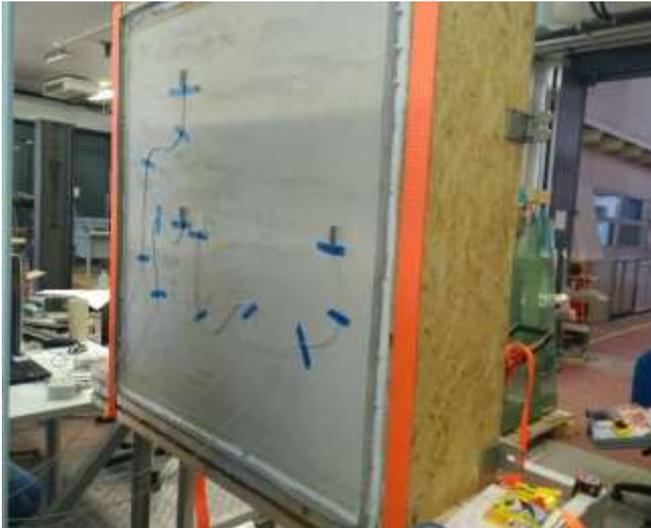


Figura 7: Posa del kit termoflussimetrico faccia esterna



Figura 8: Posa del kit termoflussimetrico faccia interna



Figura 9: Posizionamento sensori ambientale



4.3.2.3 Cicli impostati in camera climatica

I cicli in camera climatica, per la determinazione della trasmittanza, sono stati applicati con le seguenti modalità:

- 168 h ciclo stazionario a $10^{\circ} \pm 3^{\circ} \text{C}$ (temperatura nella camera climatica)
- 168 h ciclo stazionario UR% $50\% \pm 2\%$ (UR % nella camera climatica)

- Temperatura interna al laboratorio pari a 28°C ed UR % 50± 2
- Acquisizione dati con frequenza di 10'.

4.3.2.4 Risultati sperimentali e correlazione dati

La campagna di sperimentazione mirava a valutare l'efficacia dell'approccio su pareti collocate in ambienti fortemente termicamente condizionati; pertanto, dopo il condizionamento degli ambienti, quando applicati, le temperature e il flusso di calore sono stati monitorati fino a completata acquisizione. Nella misurazione della conduttanza termica è stato applicato un approccio integrale stimando in particolare la conduttanza termica come il valore medio nell'intervallo [t=0 e t =7gg] (Figura 10).

Una volta calcolata la conduttanza termica $\Lambda = 1/\Sigma Ri = 1/\Sigma (si/\lambda_i)$ e noti i coefficienti laminari interno (h_{si}) ed esterno (h_{se}), la trasmittanza termica U dell'elemento opaco è stata calcolata come inverso della sommatoria di resistenze laminari interna ($1/h_{si}$) ed esterna ($1/h_{se}$) e della sommatoria delle resistenze dei singoli strati (1). Le resistenze laminari interna ed esterna rappresentano la somma del contributo dello scambio termico per irraggiamento (h_{ri} , h_{re}) e convettivo (h_{ci} , h_{ce}).

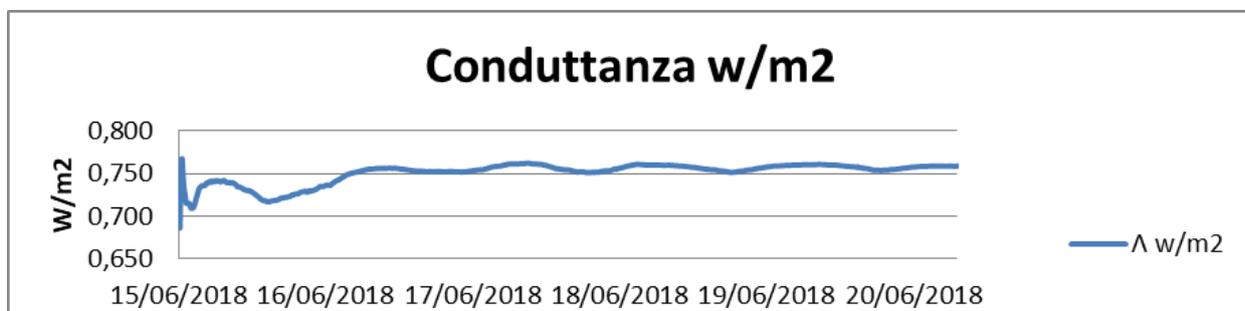
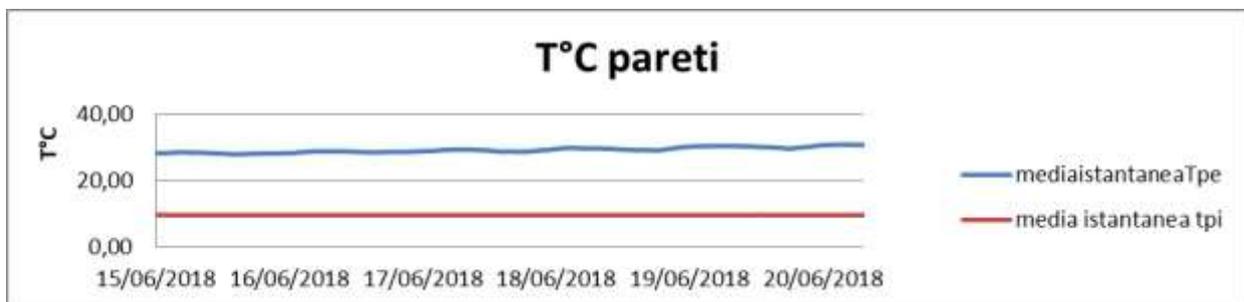
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{si}} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{h_{se}}} \quad (1)$$

Dove:

Coefficiente laminare esterno h_{se} [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

Coefficiente laminare interno h_{si} [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

Conduttanza termica Λ [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]



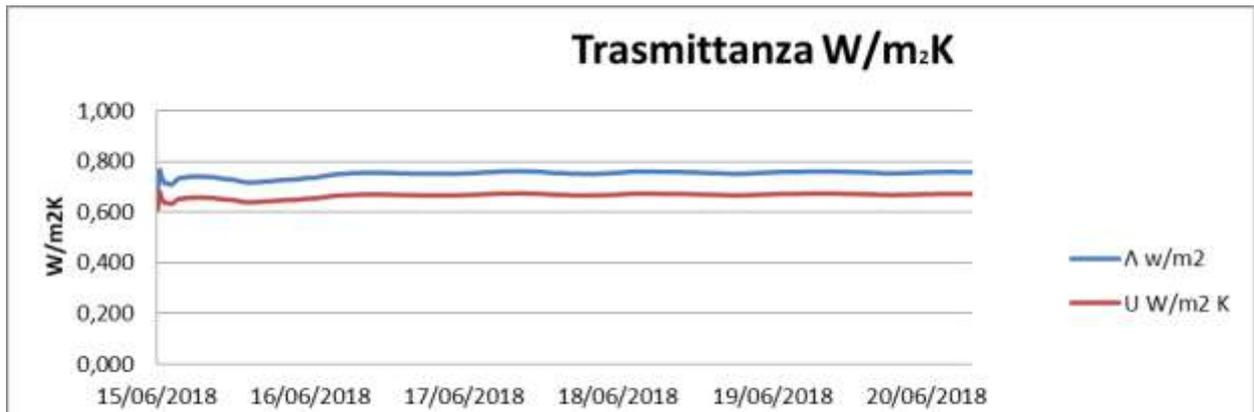


Figura 10: Determinazione sperimentale della trasmittanza.

Il valore della Trasmittanza misurata strumentalmente è risultato pari a 0,66 W/m²K. Esso è stato corretto per tener conto delle perturbazioni della ventola, utilizzando la formulazione (2), elaborata e pubblicata da ENEA (Donatelli et al., 2016), ottenendo un valore finale della trasmittanza calcolata da parametri misurati pari a 0,21 W/m²K.

$$U = \frac{5.67 \varepsilon_{tot} \left[\left(\frac{T_{wc}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{out}}{100} \right)^4 \right] + 3.8054 \nu (T_{wc} - T_{out})}{T_{int} - T_{out}} \quad (2)$$

Tale valore sperimentale risulta essere simile al valore numerico, calcolato secondo la ISO 6946:2007, e pari a 0,22 W/m²K, come di seguito riportato.

4.3.2.5 Risultati numerici

Si riportano di seguito in Tabella 8 i parametri di Resistenza e Trasmittanza ottenuti numericamente mediante software di calcolo PAN 7.0.

Tabella 8 – Risultati numerici

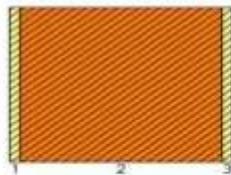
Tipo di componente								Chiusura verticale	
Stratigrafia	s	ρ	μ	c	λ	R	opz.		
(int-est)	[cm]	[kg/m ³]	[-]	[J/kg°C]	[W/m°C]	[m ² C/W]	$\lambda \rightarrow R$		
Strato limitare interno							0.13		
I INTONACO	1,5	1350	8	850	0,470				
II BIOMATTONNE	30,0	330	4,5	1870	0,070				
III INTONACO	1,5	1350	8	850	0,470				
IV									
V									
VI									
VII									
VIII									
IX									
X									
Strato limitare esterno							0.04		

Parametro	Modulo	Sfasamento
Ammettenza termica interna (Y_i)	2,229 W/(m ² K)	3,08 h
Ammettenza termica esterna (Y_{ee})	2,552 W/(m ² K)	3,72 h
Trasmittanza termica periodica ($Y_{p,t}$)	0,012 W/(m²K)	4,72 h
Capacità termica areica interna (c_i)	30,5 kJ/(m²K)	
Capacità termica areica esterna (c_e)	34,9 kJ/(m ² K)	
Resistenza termica (R)	4,520 (m ² K)/W	
Trasmittanza termica (U)	0,221 W/(m²K)	
Fattore di attenuazione (f)	0,064	

Spessore (s)		33,0 cm
Massa superficiale (m)		140 kg/m ²
Sfasamento (p)		19,28 h

LEGENDA		
s	=	spessore
ρ	=	massa volumica
μ	=	fattore di resistenza al vapore
c	=	calore specifico
λ	=	conduttività termica
R	=	resistenza termica

Descrizione struttura



1	INT	Intonaco
2	MUR	Biomattone
3	INT	Intonaco

	s	ρ	λ	c	μ	M_s	R	S_0	α
	[m]	[kg/m ³]	[W/mK]	[J/kgK]	[-]	[kg/m ²]	[m ² K/W]	[m]	[m ² /Me]
							0,04		
1	0,015	1350,0	0,470	1000,0	8,0	20,3	0,03	0,12	0,348
2	0,300	330,0	0,070	1870,0	4,5	99,0	4,28	1,35	0,113
3	0,015	1350,0	0,470	1000,0	8,0	20,3	0,03	0,12	0,348
							0,13		

Elenco simboli

- s Spessore
- ρ Densità
- λ Conduttività
- c Calore specifico
- μ Fattore di resistenza al vapore
- M_s Massa superficiale
- R Resistenza termica
- S_0 Spessore equivalente d'aria
- α Diffusività

Parametri stazionari

Spessore totale	0,330 m
Massa superficiale	139,5 kg/m ²
Massa superficiale esclusi intonaci	99,0 kg/m ²
Resistenza	4,52 m ² K/W
Trasmittanza U	0,22 W/m ² K

Parametri dinamici

	Valori invernali	Valori estivi
Trasmittanza periodica $Y_{p,t}$	0,01 W/m ² K	0,01 W/m ² K
Fattore di attenuazione	0,05	0,05
Sfasamento	19h 25'	19h 40'
Capacità interna	32,5 kJ/m ² K	32,7 kJ/m ² K
Capacità esterna	37,4 kJ/m ² K	35,5 kJ/m ² K
Ammettenza interna	2,37 W/m ² K	2,39 W/m ² K
Ammettenza esterna	2,73 W/m ² K	2,59 W/m ² K

Verifica trasmittanza

Calcoli eseguiti con il software PAN 7.0

4.3.3 *Test di comportamento termo-igroscopico al variare di temperatura ed umidità per diverse condizioni climatiche*

4.3.3.1 *Misura dell'equilibrio igroscopico in condizioni standard su cubetti*

Il metodo di prova per la determinazione delle proprietà di assorbimento igroscopico consiste in due diverse tipologie di test, come definito nella norma (UNI EN ISO 12571, 2013), che consentono di ricavare i parametri necessari al tracciamento delle curve di equilibrio igroscopico. Tali misure sono state effettuate dal Politecnico di Milano.

Obiettivo

L'obiettivo è la determinazione del contenuto di umidità, μ , di un materiale, quando raggiunge le condizioni di equilibrio con l'ambiente in cui verrà utilizzato.

La norma prevede due metodi alternativi per determinare tale caratteristica:

1. *Metodo dell'essiccatore*: usando un essiccatore e una pesa.
2. *Metodo della camera climatica*: usando una camera climatica.

Nel nostro caso, il metodo di prova scelto è stato il secondo.

Attrezzatura

Seguendo il metodo della camera climatica, l'attrezzatura necessaria è:

- Una bilancia;
- Una camera climatica con la capacità di regolare:
 - L'umidità relativa ($\pm 5\%$);
 - La temperatura (± 2 K);

Dimensioni e preparazione dei campioni per la prova

La normativa non indica dimensioni specifiche per i campioni, ma prescrive una massa minima di almeno 10 g e che, per i materiali con una densità a secco minore di 300 kg/m³, l'area minima deve essere di 100 mm x 100 mm.

I prodotti utilizzati nei test per la determinazione delle proprietà di assorbimento igroscopico hanno in generale densità maggiore di 300 kg/m³ (o che si approssima a tale valore) e forma cubica con le seguenti dimensioni:

- Spessore: 100 ± 1 mm;
- Lunghezza: 100 ± 1 mm;
- Larghezza: 100 ± 1 mm.

Il numero minimo dei campioni da adottare per la prova è 3.

Le curve di assorbimento di riferimento sono stabilite ad una temperatura di $(23 \pm 0,5)$ ° C.

Procedura della prova

La procedura per il tracciamento della curva di assorbimento è riportata di seguito:

1. Inserimento dei campioni in camera climatica ad una prefissata umidità relativa;
2. Acquisizione del peso del campione
3. Calcolo del valore del contenuto di umidità (μ) per ciascun campione con la formula seguente:

$$\mu = \frac{m - m_0}{m_0}$$

Dove m è il peso dopo aver raggiunto un valore costante ed m_0 è il peso del campione asciutto.

4. Aumento dell'umidità relativa e ripetizione della procedura;

È necessario effettuare almeno 4 misurazioni in un range di umidità relativa tra 30% e 95% (precisamente 30%, 50%, 70% e 85%).

Di seguito si presentano i risultati delle prove. In particolare, in Tabella 9 sono riportati i pesi dei campioni al variare dell'umidità relative ed in Figura Y sono riportati i grafici delle curve di equilibrio igroscopico per i vari campioni.

Tabella 9 - Peso dei campioni al variare dell'umidità relativa [g]

Umidità relativa (%)	0%	30%	50%	70%	80%	85%
A3	279	283	285	288	290	292
A4	366	370	374	378	381	384
A5 (26/04/18)	383	389	392	396	399	402
A5 (17/05/18)	375	379	381	387	389	391

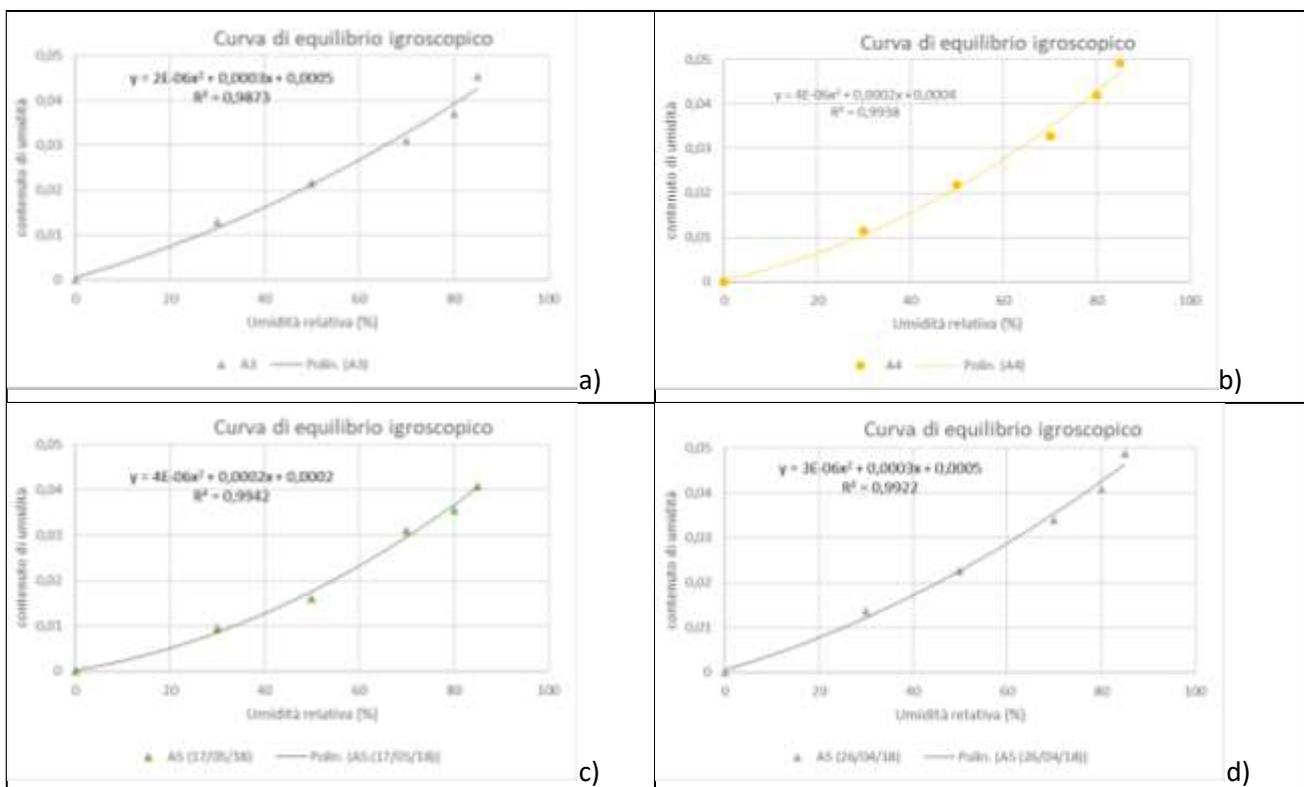


Figura 11: Curva di equilibrio igroscopico per i campioni testati: a) A3; b) A4; c) A5, produz. 17/05/18; A5, produz. 26/04/18

4.3.4 Studio sperimentale e numerico del comportamento termo igrometrico su muro a 23° e a 35°

4.3.4.1 Norme di riferimento

- UNI EN ISO 13788: 2013 - Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo.
- UNI EN ISO 13786: 2018 - Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo.
- UNI EN 15026: 2008 - Prestazione termoigrometrica dei componenti e degli elementi di edificio - Valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica.
- UNI EN ISO 13790: 2008 - Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento.

4.3.4.2 Apparato di prova

- A cura dell'ENEA la messa a punto del metodo e del set up sperimentale per la valutazione del comportamento termoigrometrico (Figura 12):
 - Sensori di temperatura e umidità superficiale Capetti;
 - Sensori temperatura ambiente Capetti;
 - Distanziometro laser Bosch;
 - Anemometro a filo caldo TROTEC.

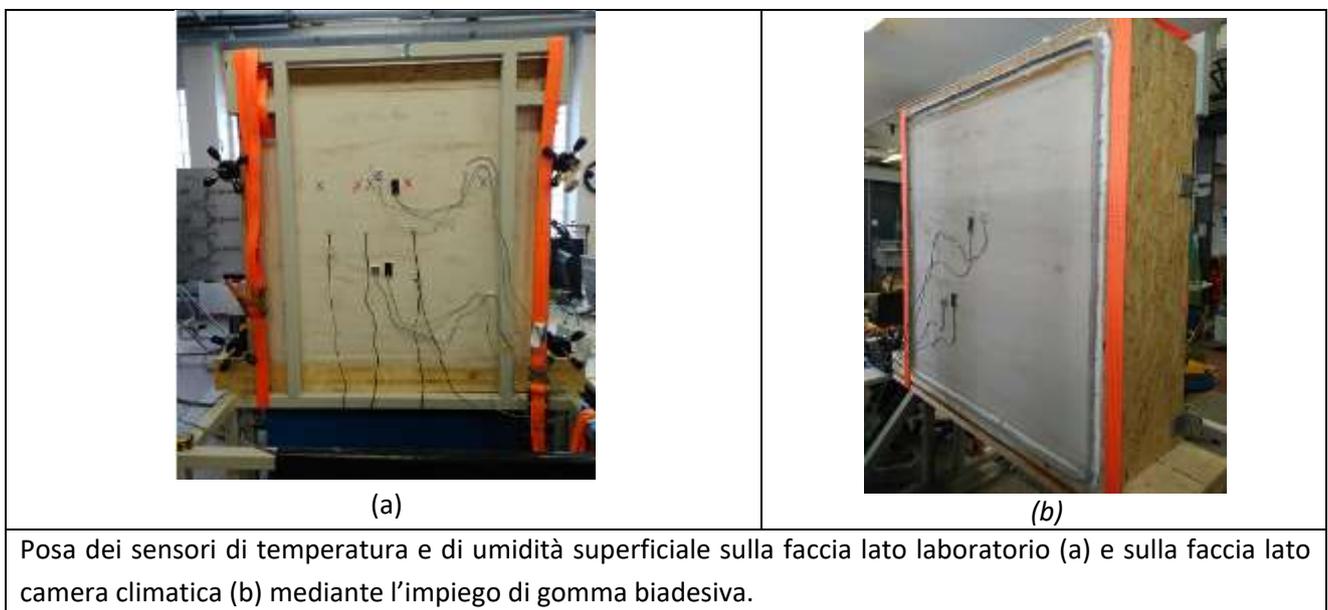


Figura 12: Set up sperimentale per misure termoigrometriche

4.3.4.3 Cicli impostati in camera climatica

Sono stati eseguiti due cicli in camera climatica a temperatura fissa ($T=23^{\circ}\text{C}$ e $T=35^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa variabile) come numericamente descritti in Tabella 10 e graficamente rappresentati in Figura 13 e Figura 14.

Tabella 10: Leggi di variazione UR nei cicli in camera climatica

Umidità relativa (%)	Tempo (min)
30%	180
50%	180
30%	180
70%	180
30%	180
80%	180

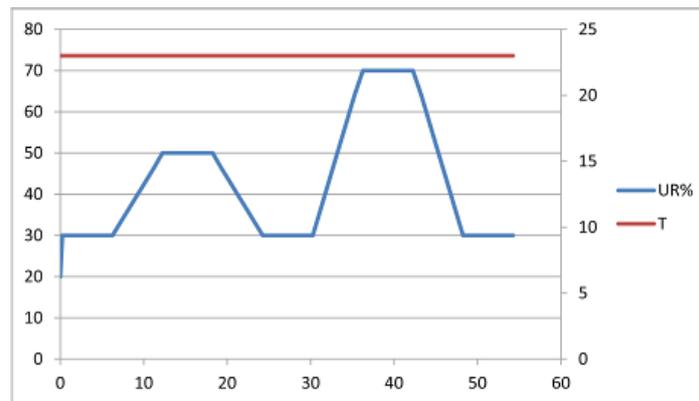


Figura 13: Ciclo camera climatica T= 23 °C, UR variabile gradienti con 30%,50%,70%

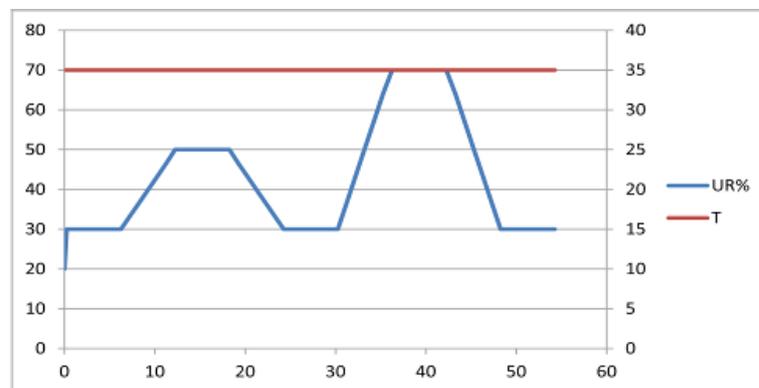


Figura 14: Ciclo camera climatica T= 35 °C, UR variabile con gradienti 30%,50%,70%

4.3.4.4 Risultati sperimentali

In Figura 15 e Figura 16 si riportano i risultati sperimentali dell'andamento di temperatura e umidità relativa sulla superficie interna ed esterna della parete per effetto dei cicli a 23°C e 35°C descritti in precedenza.

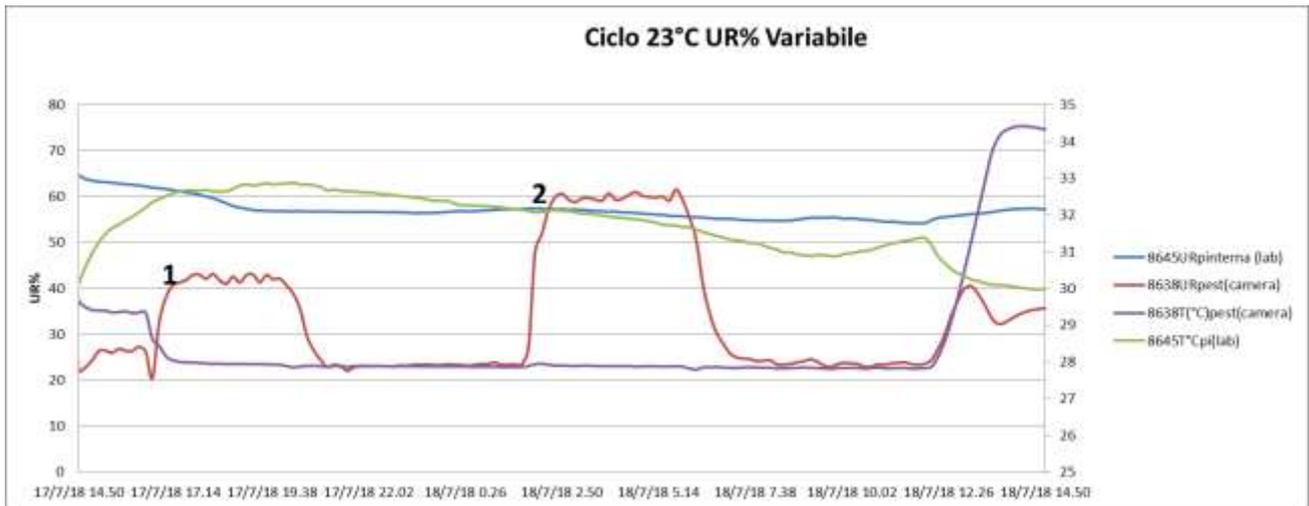


Figura 15: Andamento grafico dell’umidità pareti da ciclo camera climatica T= 23°C UR variabile

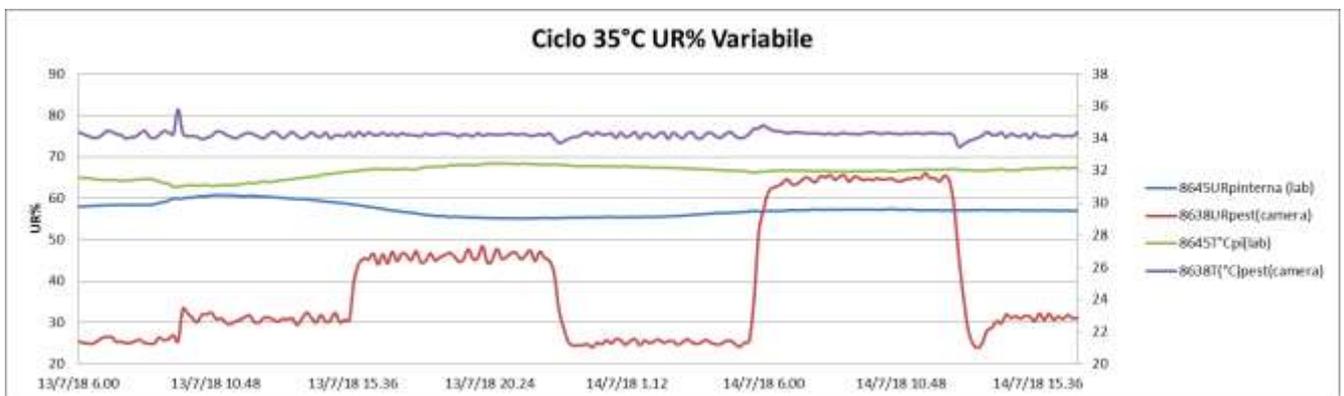


Figura 16: Andamento grafico dell’umidità pareti da ciclo camera climatica T= 35°C UR variabile

4.3.4.5 Prove di porosità

La misura della porosità è stata condotta presso i Laboratori ENEA di Faenza mediante il picnometro ad elio. Il picnometro ad elio consente di determinare la densità reale (o assoluta) di polveri e solidi. L’accuratezza della misura è garantita dall’utilizzo dell’elio come fluido di permeazione che, grazie alle piccole dimensioni degli atomi, riesce a penetrare in pori ed interstizi delle dimensioni di 0,25 nm di diametro.

Sono state effettuate tre misure, ciascuna su un campione diverso, ottenendo i valori riportati in Tabella 11.

Tabella 11. Calcolo della porosità dei blocchi

Campione	Volume geometrico [m ³]	Peso [kg]	Densità apparente [kgm ⁻³]	Volume parte solida [m ³]	Densità reale [kgm ⁻³]	Volume vuoti [m ³]	Porosità [%]
1	43,37·10 ⁻⁶	16,19·10 ⁻³	370	9,18·10 ⁻⁶	1770	34,19·10 ⁻⁶	78,84
2	40,76·10 ⁻⁶	15,51·10 ⁻³	380	7,79·10 ⁻⁶	1990	32,97·10 ⁻⁶	80,89
3	53,81·10 ⁻⁶	16,68·10 ⁻³	310	8,83·10 ⁻⁶	1890	44,98·10 ⁻⁶	83,60

Nelle simulazioni numeriche il valore di porosità adottato sarà pari a 81,11 %, corrispondente alla media delle misure.

4.3.4.6 Analisi numeriche

Sono state svolte da ENEA anche le analisi di simulazione numerica dinamica di calore e umidità della stessa parete sottoposta ai cicli di camera climatica precedentemente descritti. Le simulazioni numeriche sono state svolte utilizzando il software di calcolo WUFI® che permette di simulare, in maniera dinamica, il comportamento energetico e igrotermico di strutture ed edifici secondo UNI EN 15026 e UNI EN 13790 (modello statico e dinamco).

WUFI® è l'acronimo di **W**ärme **U**nd **F**euchte **I**nstationär che, tradotto letteralmente, significa "transitorietà di calore e umidità". I software WUFI® consentono, infatti, di studiare come cambiano i parametri termici e igrometrici nei muri degli edifici per effetto delle condizioni climatiche esterne. Le analisi sono definite termoigrometriche poiché tengono conto dell'accoppiamento tra i parametri. E' risaputo, infatti, che alti livelli di umidità corrispondono ad elevate perdite di calore e che le condizioni di temperatura nelle componenti degli edifici influenzano il trasporto di umidità. Il diagramma di flusso, riportato in Figura 17 mostra sinteticamente come il procedimento di calcolo su cui si basa il software consista nel risolvere, simultaneamente e in maniera iterativa, le equazioni accoppiate del trasporto e accumulo di calore e umidità nella parete.

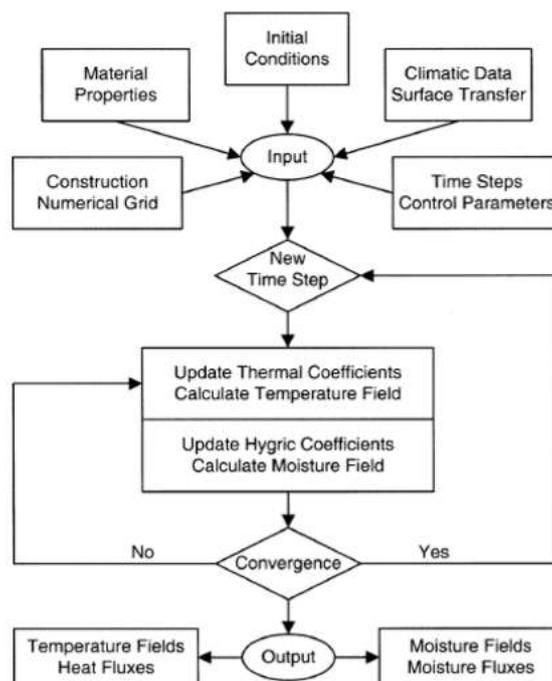


Figura 17: Diagramma di flusso del procedimento di calcolo di WUFI® [H.M. KUNZEL, 1995]

I dati relativi ai materiali, inseriti nel programma di simulazione numerica WUFI, sono sintetizzati nella Tabelle 12 seguente.

Le condizioni iniziali sono quelle rilevate in laboratorio, mentre i cicli di umidità e temperatura introdotti come clima esterno in fase di simulazione sono gli stessi imposti in camera climatica e riportati nelle Figura 13 e Figura 14 del paragrafo precedente.

L'output della simulazione è rappresentato dai profili temporali di temperatura e umidità relativa sulle superfici lati interno ed esterno della parete riporti di seguito (Figura 18 - Figura 21).

Tabella 12. Dati di input materiali (WUFI)

Strato/dati sul materiale

Strato/Nome del materiale: **Intonaco di calce idraulica premiscelato NHL 5**

Densità apparente [kg/m ³]: 1250	Umidità tipica di cantiere [kg/m ³]: 0
Porosità [m ³ /m ³]: 0,3	Spessore di strato [m]: 0,015
Capacità termica specifica [J/kgK]: 1000	Conducibilità termica di progetto [W/mK]:
Conducibilità termica [W/mK]: 0,47	Colore:
Fattore di resistenza alla diffusione di vapore [-]: 3	

Funzioni igrotermiche Informazioni materiale

Funzione di assorbimento igroscopico

Coefficiente di trasporto liquido, succhiamento
 Coefficiente di trasporto liquido, redistribuzione
 Fattore di resistenza alla diffusione di vapore, Dipende dall'umidità
 Conducibilità termica, Dipendente dall'umidità
 Conducibilità termica, in base alla temperatura
 Entalpia, in base alla temperatura

Approssimare

Nr.	UR [-]	Contenuto ... [kg/m ³]
1	0	0
2	0,5	20
3	0,8	30
4	0,9	50
5	0,95	70
6	0,98	120
7	0,99	180
8	0,998	210
9	1	230

Correggere materiale

Nome materiale: **Biomattone A4**

Densità apparente [kg/m ³]: 330	Umidità tipica di cantiere [kg/m ³]: 0
Porosità [m ³ /m ³]: 0,811	Conducibilità termica di progetto [W/mK]:
Capacità termica specifica [J/kgK]: 1870	Colore:
Conducibilità termica [W/mK]: 0,07	
Fattore di resistenza alla diffusione di vapore [-]: 4,5	

Funzioni igrotermiche Informazioni materiale Spessore Assegnare il catalogo

Funzione di assorbimento igroscopico

Coefficiente di trasporto liquido, succhiamento
 Coefficiente di trasporto liquido, redistribuzione
 Fattore di resistenza alla diffusione di vapore, Dipende dall'umidità
 Conducibilità termica, Dipendente dall'umidità
 Conducibilità termica, in base alla temperatura
 Entalpia, in base alla temperatura

Approssimare

Fattore di approssimazione:

Contenuto d'umidità di riferimento [kg/m³]: 65,09

Saturazione di acqua libera [kg/m³]: 95,92

Nr.	UR [-]	Contenut... [kg/m ³]
1	0	0
2	0,1	5,31
3	0,2	11,2
4	0,3	17,7
5	0,4	25
6	0,5	33,1
7	0,55	37,6
8	0,6	42,4
9	0,65	47,5
10	0,7	52,9
11	0,75	58,8
12	0,8	65,1
13	0,85	71,9
14	0,9	79,2

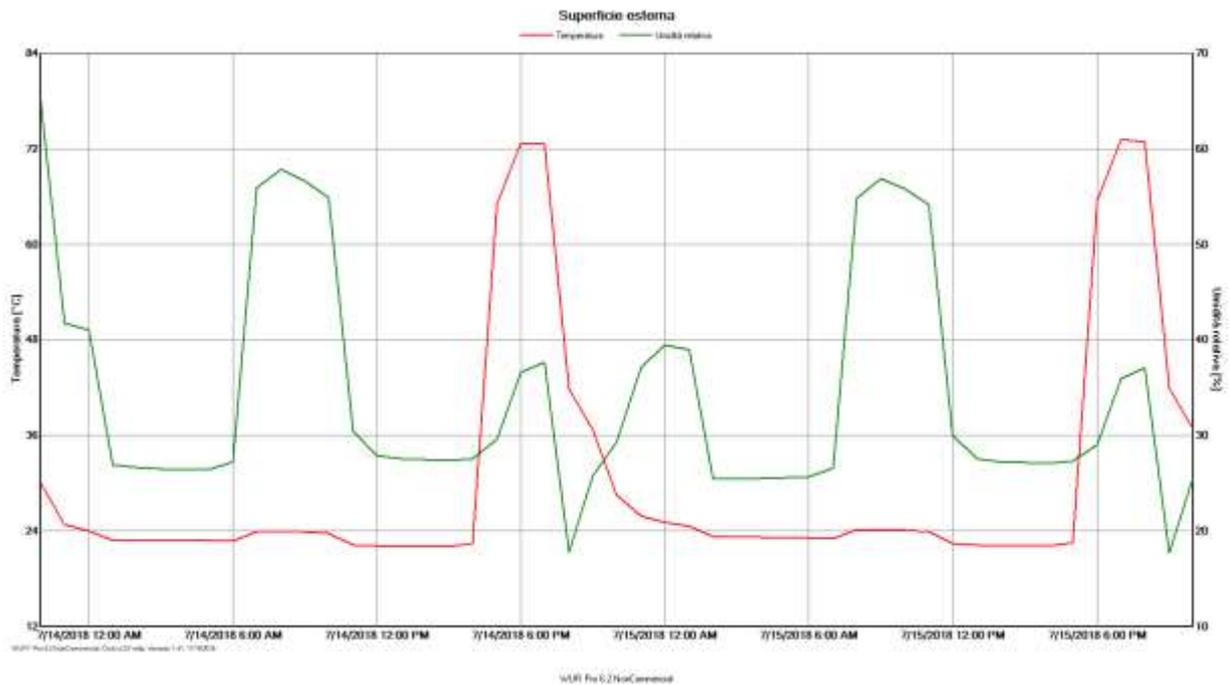


Figura 18: Andamento grafico dell'umidità e della temperatura sulla parete esterna (camera) imponendo $T=23^{\circ}\text{C}$ e UR variabile

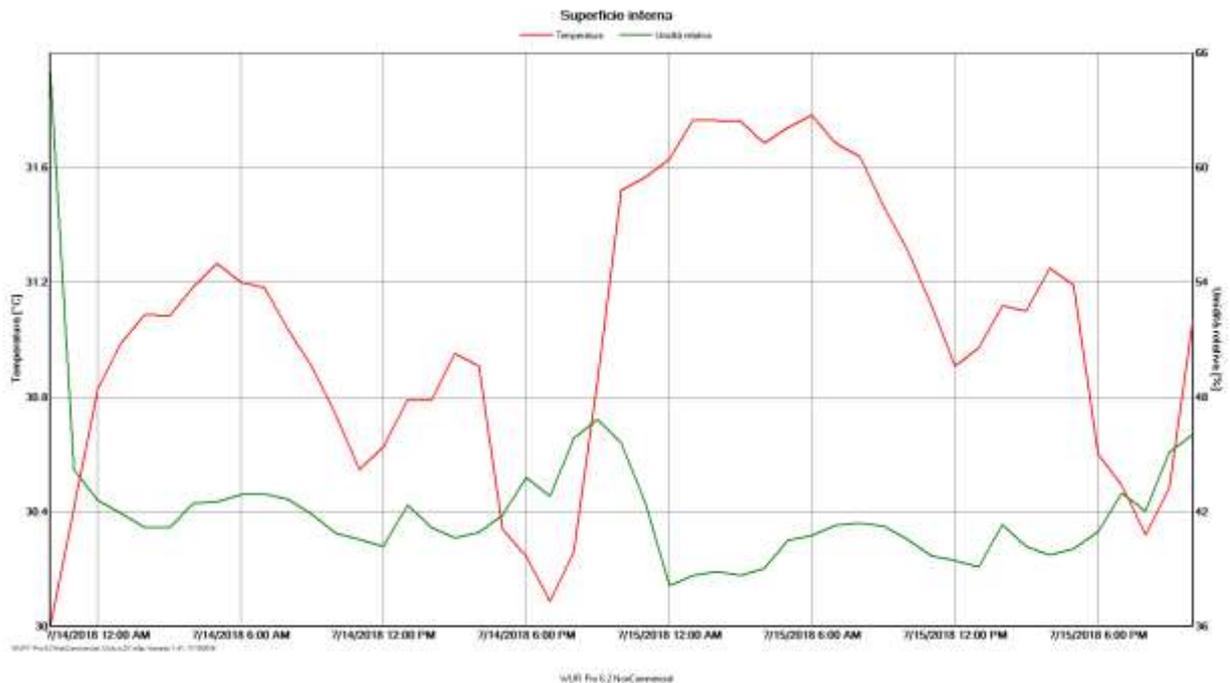


Figura 19: Andamento grafico dell'umidità e della temperatura sulla parete interna (laboratorio) imponendo $T=23^{\circ}\text{C}$ e UR variabile

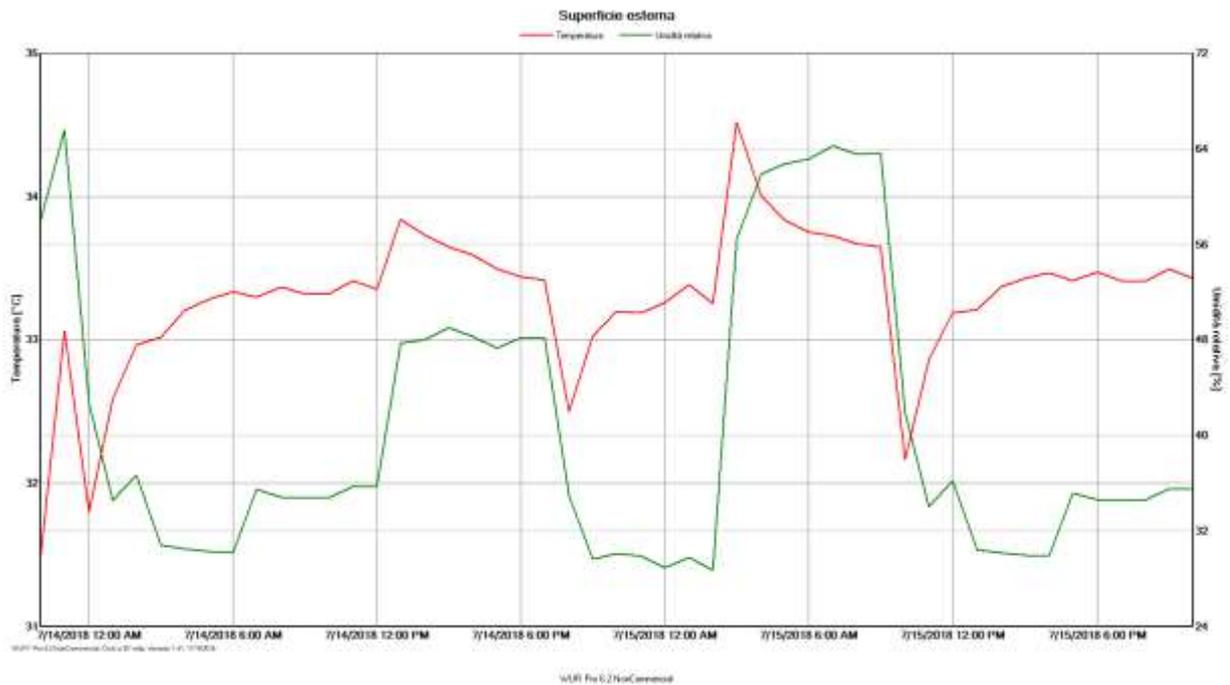


Figura 20: Andamento grafico dell’umidità e della temperatura sulla parete esterna (camera) imponendo $T=35^{\circ}\text{C}$ e UR variabile

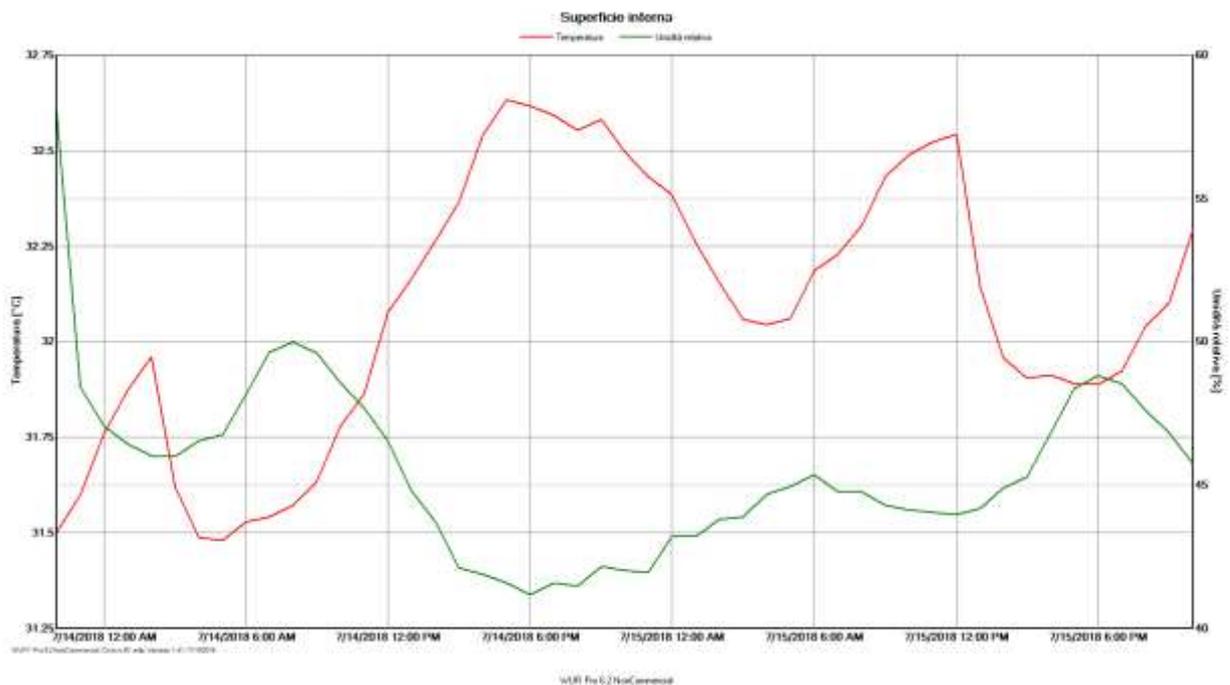


Figura 21: Andamento grafico dell’umidità e della temperatura sulla parete interna (laboratorio) imponendo $T=35^{\circ}\text{C}$ e UR variabile

4.3.4.1 Valutazioni teoriche tramite simulazioni numeriche e dati sperimentali (ENEA)

I risultati dei test, come descritto di seguito, sono stati analizzati seguendo un approccio integrato mediante il confronto tra misure sperimentali e simulazioni numeriche. Lo scopo è definire e calibrare

modelli matematici che siano in grado di riprodurre e prevedere il comportamento energetico e la risposta termoigrometrica di edifici in condizioni climatiche reali.

Si osserva che, sia considerando il **ciclo a 23°C** sia considerando il **ciclo a 35°C**, i risultati delle analisi sperimentali e numeriche siano concordanti evidenziando come gli andamenti dell'UR sulla superficie lato esterno e della temperatura sia lato esterno che lato interno siano analoghi per forma e per valori. Per quanto riguarda l'UR sulla parete lato interno invece, sebbene gli andamenti siano concordanti, si evidenzia una differenza sistematica di circa il 15% tra il valore registrato sperimentalmente e quello ricavato numericamente.

In particolare, nel ciclo a 23°C, secondo quanto riscontrato sperimentalmente, la UR lato parete interna si assesterebbe intorno al 57-58% mentre dalle simulazioni numeriche si dedurrebbe un valore di circa il 40%. Sia sperimentalmente che numericamente la temperatura lato parete interna si assesta intorno ai 30-31°C.

Analizzando il ciclo a 35°C, secondo quanto riscontrato sperimentalmente, si evince un'oscillazione nel valore della UR lato parete interna che poi si assesta ancora una volta intorno al 57-58% mentre dalle simulazioni numeriche si dedurrebbe una risalita finale fino a circa il 50%. Gli andamenti delle temperature sperimentali e numeriche lato parete interna sono analoghi con circa 0,5°C di differenza nel valore finale (32,5°C sperimentale, 32°C numerico)

Nella correlazione tra dati sperimentali e dati numerici, si può valutare anche il comportamento del biomattone in queste particolari condizioni di esercizio, in termini di sfasamento e di attenuazione. In particolare, si può osservare che lo sfasamento tra l'umidità interna ed esterna è abbastanza concorde tra la simulazione numerica e la misura sperimentale e risulta di circa 8 ore.

Per quanto riguarda la temperatura, si può osservare la buona tenuta della parete, considerando che non ci sono variazioni nel tempo rispetto ai valori impostati.

Invece, con riferimento al fattore di smorzamento sulla faccia interna della parete, non è correttamente valutabile poiché la parete sembra aver raggiunto l'equilibrio per un valore dell'umidità relativa di circa il 50%, valore misurato nel laboratorio per l'intero ciclo di misure. Pertanto la parete non risponde prontamente alle variazioni di umidità diverso da questo valore.

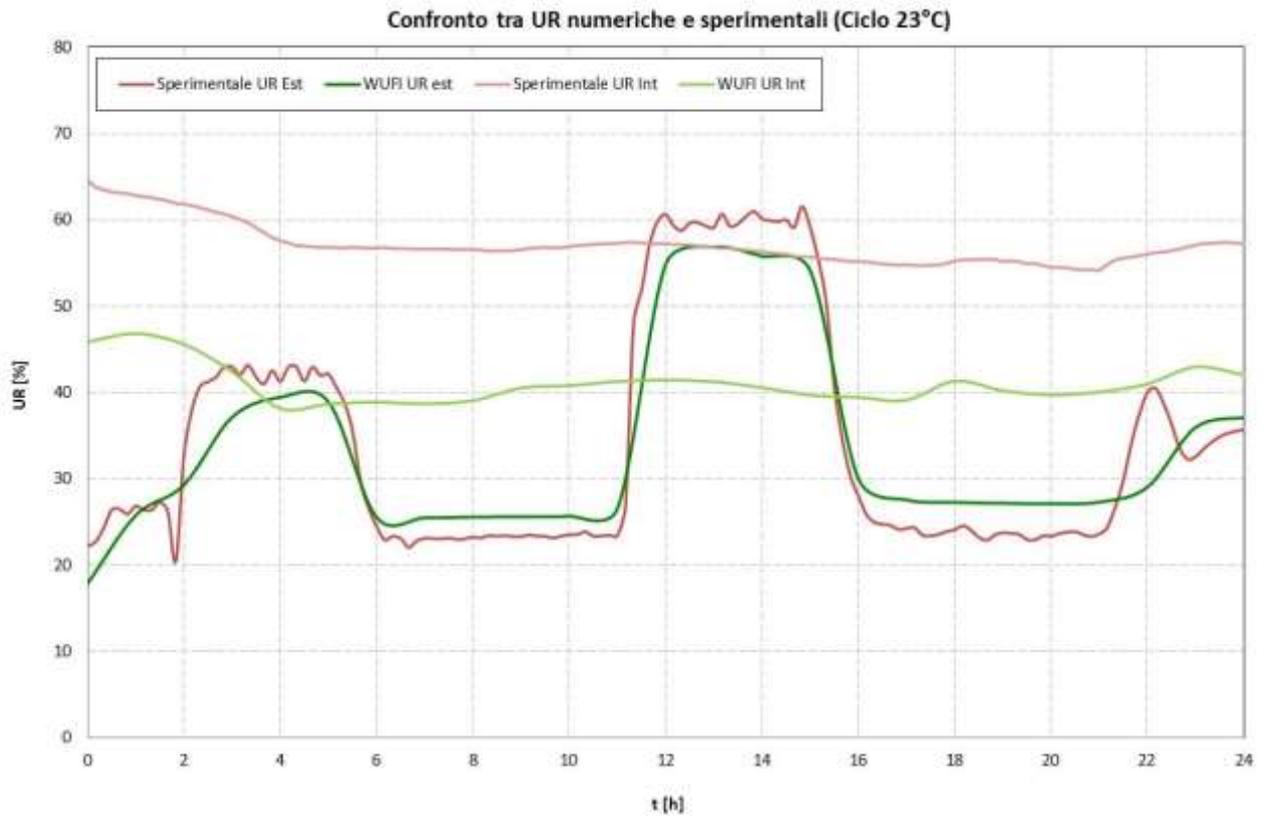


Figura 22: Confronto tra UR numeriche e sperimentali imponendo $T=23^{\circ}\text{C}$ e UR variabile

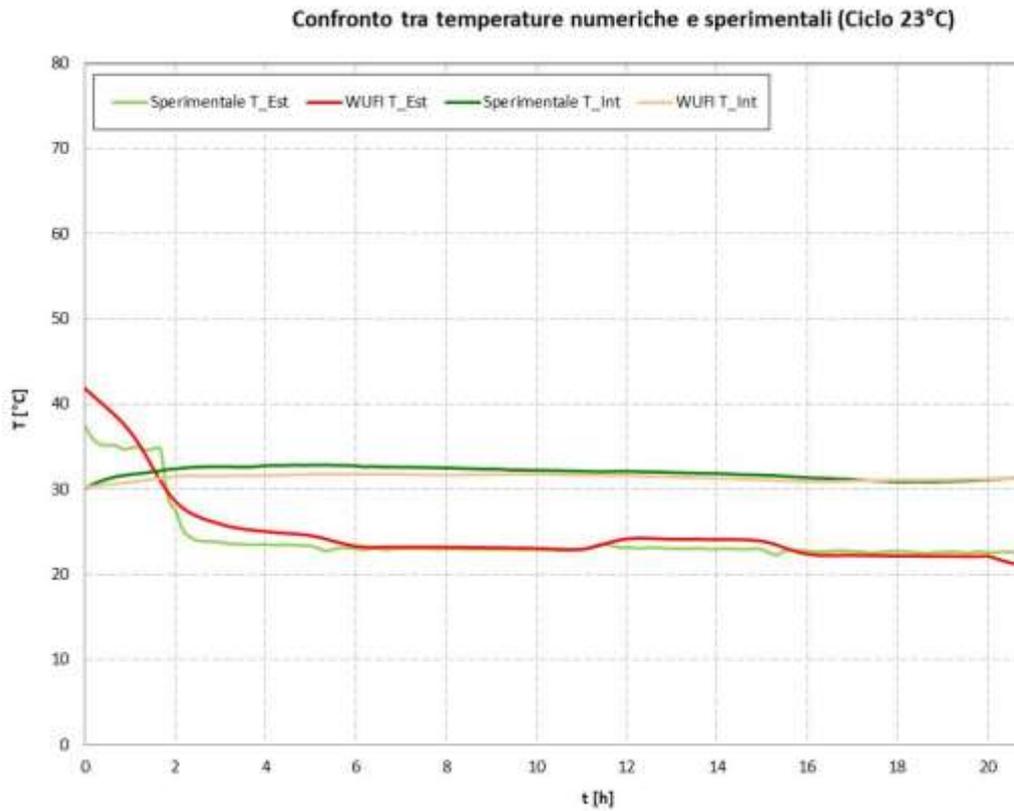


Figura 23: Confronto tra temperature numeriche e sperimentali imponendo $T=23^{\circ}\text{C}$ e UR variabile

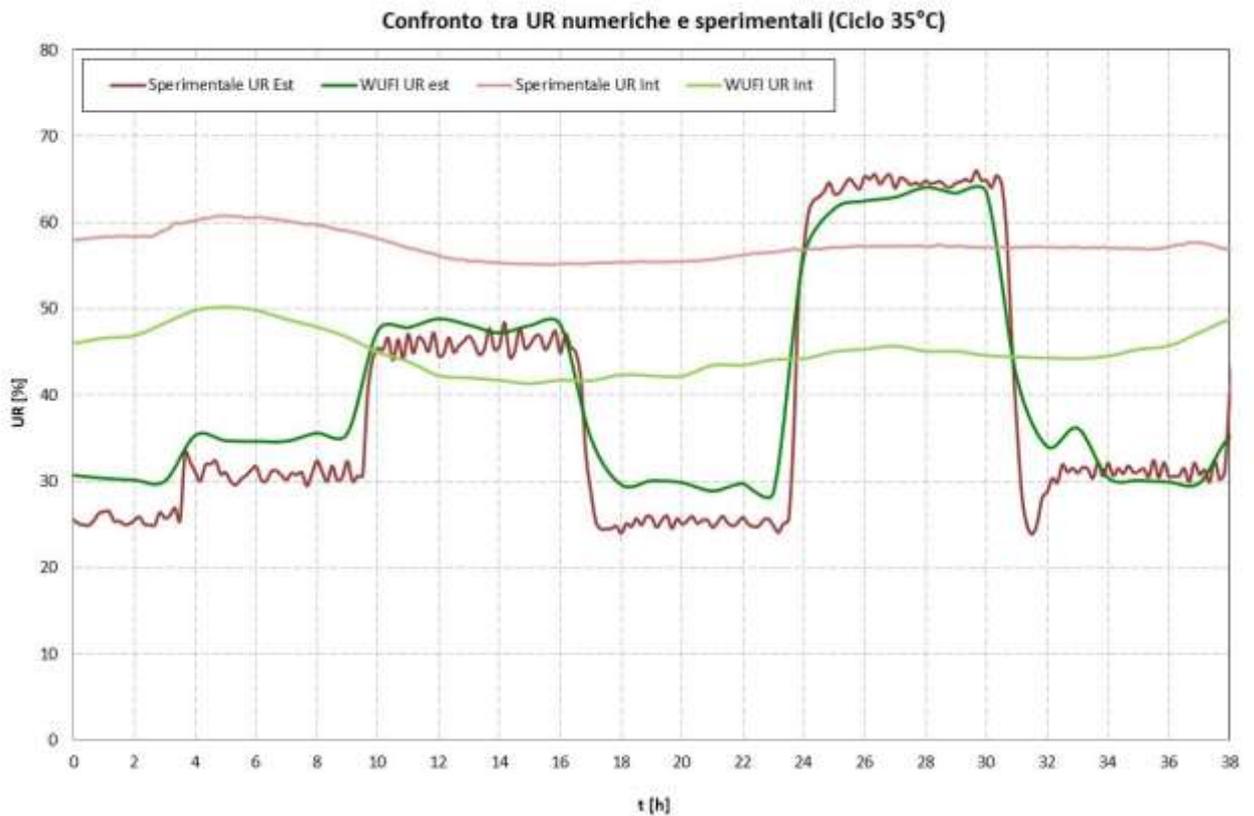


Figura 24: Confronto tra UR numeriche e sperimentali imponendo $T = 35^{\circ}\text{C}$ e UR variabile

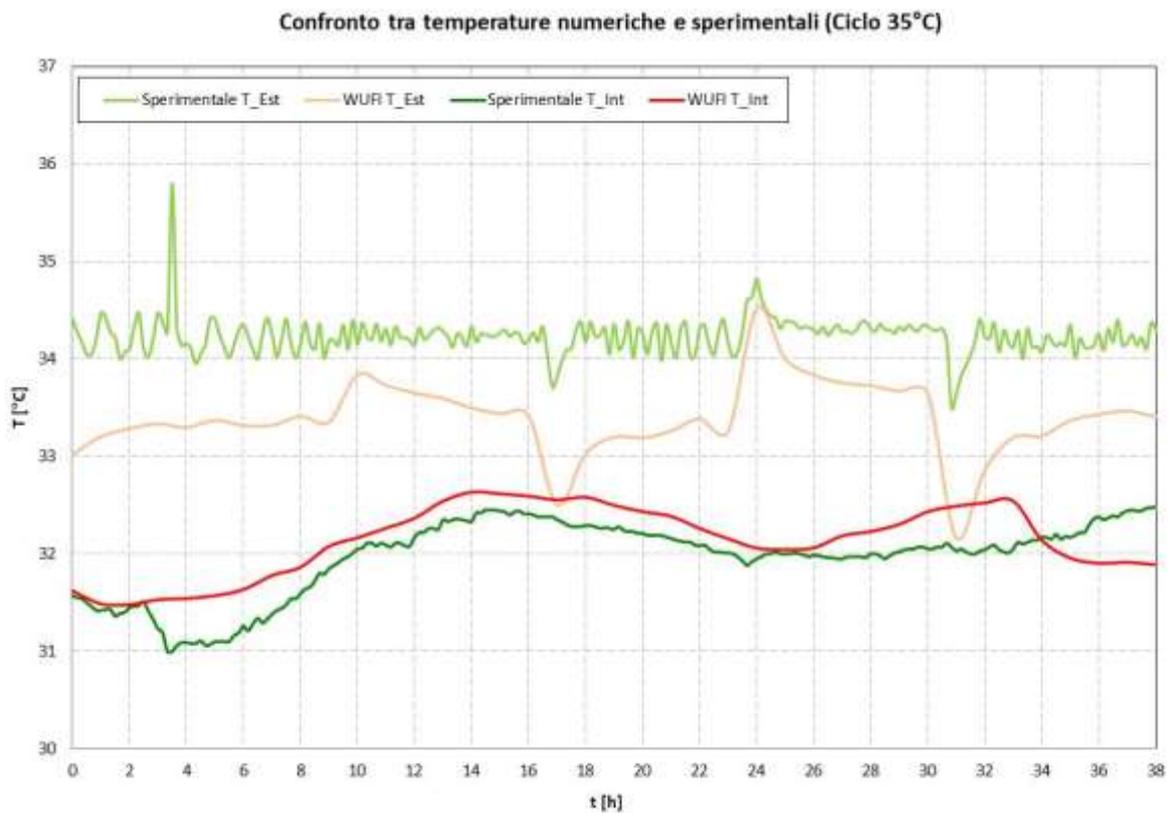


Figura 25: Confronto tra temperature numeriche e sperimentali imponendo $T = 35^{\circ}\text{C}$ e UR variabile

5. Conclusioni

Questo studio ha messo in evidenza che, tra le soluzioni innovative e sostenibili per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'edilizia dei paesi a clima caldo-temperato con materiali naturali derivanti da sottoprodotti agricoli, la canapa ha un suo ruolo importante, in questo periodo storico, per la nascita di nuove filiere, incentivate anche da Leggi nazionali. In particolare, i materiali biocompositi di calcecanapulo hanno buone proprietà di traspirabilità e regolazione igrometrica e sono utilizzabili per applicazioni edili in ambienti a clima mediterraneo.

Tra tutti i prodotti da costruzione realizzati in calcecanapulo, il presente studio è stato focalizzato sui blocchi di calcecanapulo perché rappresentano la soluzione alle esigenze di edifici nuovi e tradizionali, offrendo un elevato risparmio energetico, pur rimanendo, in termini di forma e dimensioni, molto vicini alla cultura e ai sistemi costruttivi più conosciuti dai professionisti. Un'attenta analisi del mercato italiano di blocchi in calcecanapulo è stata effettuata coinvolgendo direttamente le aziende produttrici.

Dal punto di vista dell'analisi degli impatti (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) il bilancio delle emissioni dopo 240 giorni è risultato sensibilmente negativo, pari ad un assorbimento netto di $-11,24 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ per metro quadrato di parete. Ciò significa che la parete ha agito come se fosse un assorbitore di carbonio, immagazzinando più CO_2 di quanta non sia stata emessa durante la produzione. Il processo di produzione del legante è risultata la principale causa di impatti per tutte le categorie considerate, tranne che per il consumo di risorse abiotiche ADP; la calcinazione della calce e la produzione di clinker sono invece le principali fonti di emissioni per questo processo. Un'altra importante fonte di impatti ambientali è la fase di trasporto, principalmente a causa del consumo di gasolio.

Per studiare il comportamento di una muratura di 1 m^2 in blocchi di calcecanapulo al variare dei parametri termici e igrometrici tipici del clima mediterraneo, sono state effettuate misure di laboratorio in una camera climatica. Con queste prove si è inteso misurare la trasmittanza termica e il comportamento termoigrometrico sull'intera parete con blocchi in calcecanapulo, sottoposta a condizioni al contorno controllate di laboratorio per poi confrontarla con le misure in opera.

Per entrambe le prove il comportamento rilevato dalle misure sperimentali sulla muratura è stato confrontato con il comportamento simulato numerico utilizzando software commerciali. Per quanto attiene alle misure termoigrometriche, per tenere conto delle condizioni ambientali esterne relative al Sud Italia, sono stati definiti ed eseguiti due cicli a temperatura fissa (23° e di 35°C) al variare dell'umidità relativa. Sono state svolte inoltre analisi di simulazione numerica dinamica di calore e umidità della stessa parete sottoposta ai cicli di camera climatica precedentemente descritti. Le simulazioni numeriche sono state svolte utilizzando il software di calcolo WUFI® che permette di simulare, in maniera dinamica, il comportamento energetico e igrotermico di strutture ed edifici secondo UNI EN 15026 e UNI EN 13790 (modello statico e dinamico).

I risultati dei test sono stati analizzati seguendo un approccio integrato mediante il confronto tra misure sperimentali e simulazioni numeriche con lo scopo di definire e calibrare modelli matematici che siano in grado di riprodurre e prevedere il comportamento energetico e la risposta termoigrometrica di edifici in condizioni climatiche reali.

Si è osservato che, sia considerando il ciclo a 23°C sia considerando il ciclo a 35°C , i risultati delle analisi sperimentali e numeriche sono analoghi per forma e valori, rispetto gli andamenti dell'UR sulla superficie lato esterno e della temperatura sia lato esterno che lato interno. Per quanto riguarda l'UR sulla parete lato interno invece, sebbene gli andamenti siano concordanti, si evidenzia una differenza sistematica di circa il 15% tra il valore registrato sperimentalmente e quello ricavato numericamente.

Nella correlazione tra dati sperimentali e dati numerici, si può valutare anche il comportamento del biomattone in queste particolari condizioni di esercizio, in termini di sfasamento e di attenuazione. In particolare, si può osservare che lo sfasamento tra l'umidità interna ed esterna è abbastanza concorde tra la simulazione numerica e la misura sperimentale e risulta di circa 8 ore.

Per quanto riguarda la temperatura, si può osservare la buona tenuta della parete, considerando che non ci sono variazioni nel tempo rispetto ai valori impostati.

Invece, con riferimento al fattore di smorzamento sulla faccia interna della parete, non è correttamente valutabile poiché la parete sembra aver raggiunto l'equilibrio per un valore dell'umidità relativa di circa il 50%, valore misurato nel laboratorio per l'intero ciclo di misure. Pertanto la parete non risponde prontamente alle variazioni di umidità diverso da questo valore.

Prove per la determinazione delle proprietà di assorbimento igroscopico di cubetti in calcecanapulo forniti da tre diversi produttori di mattoni in calcecanapulo (compreso il produttore dei blocchi utilizzati per realizzare la muratura) sono state effettuate utilizzando la camera climatica a 23°. Con questa prova è stato definito il contenuto di umidità del materiale in equilibrio con l'ambiente in cui viene utilizzato.

Il valore della trasmittanza misurata strumentalmente è risultato pari a 0,66 W/m²K. Esso è stato corretto per tener conto delle perturbazioni della ventola ottenendo un valore finale della trasmittanza calcolata da parametri misurati pari a 0,21 W/m²K. Tale valore sperimentale risulta essere simile al valore numerico, calcolato secondo la ISO 6946:2007, e pari a 0,22 W/m²K.

6. Riferimenti bibliografici

Arrigoni, A., R. Pelosato, P. Melià, G. Ruggieri, S. Sabbadini and G. Dotelli (2017). "Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks." *Journal of Cleaner Production* 149: 1051-1061.

Aversa, Patrizia & Donatelli, Antonio & Piccoli, Giuseppe & Luprano, V.A.M.. (2016). Improved Thermal Transmittance Measurement with HFM Technique on Building Envelopes in the Mediterranean Area. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*. 11. 10.1515/sspjce-2016-0017.

Boutin, M.-P., Flamin, C., Quinton, S., Gosse, G., 2006. Study on the Environmental Characteristics of Hemp through the Analysis of its Life Cycle (in French). Ministry of Agriculture, Agrifood, and Forestry, Paris, France.

Cascione V., Valutazione igrometrica di soluzioni tecniche d'isolamento dell'involucro edilizio per il recupero energetico in Italia per mezzo di simulazioni dinamiche. Tesi di Laurea, Politecnico di Bari, 2016. Database Version 3. Ecoinvent Report 1 (v3). The ecoinvent Centre, St. Gallen, Switzerland (www.ecoinvent.org).

Donatelli, Antonio & Aversa, Patrizia & Luprano, V.A.M.. (2016). Set-up of an experimental procedure for the measurement of thermal transmittances via infrared thermography on lab-made prototype walls. *Infrared Physics & Technology*. 79. 10.1016/j.infrared.2016.10.005.

Durlinger, B., Koukouna, E., Broekema, R., van Paassen, M., Scholten, J., Agri-footprint 4.0 (14-12-2017), Gouda, NL (www.agri-footprint.com).

Florentin, Y., D. Pearlmutter, B. Givoni and E. Gal (2017). "A life-cycle energy and carbon analysis of hemp-lime bio-composite building materials." *Energy and Buildings* 156: 293-305.

Gonzalez-Garcia, S., A. Hospido, G. Feijoo and M. T. Moreira (2010). "Life cycle assessment of raw materials for non-wood pulp mills: Hemp and flax." *Resources Conservation and Recycling* 54(11): 923-930.

Ingrao, C., A. Lo Giudice, J. Bacenetti, C. Tricase, G. Dotelli, M. Fiala, V. Siracusa and C. Mbohwa (2015). "Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51: 29-42.

Ip, K. and A. Miller (2012). "Life cycle greenhouse gas emissions of hemp–lime wall constructions in the UK." *Resources, Conservation and Recycling* 69: 1-9..

ISO 14040:2006 Environmental Management and Life Cycle Assessment - Principles and Framework.

ISO 14040:2006 Environmental Management and Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines.

Kunzel H.M., Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. Tesi di Dottorato, Fraunhofer IRB, Stoccarda 1995.

Legambiente, "Recycle. La sfida nel settore delle costruzioni" Secondo Rapporto dell'Osservatorio Recycle, (2016)

Petek Gursel, A., E. Masanet, A. Horvath and A. Stadel (2014). "Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review." *Cement and Concrete Composites* 51: 38-48.

Pretot, S., F. Collet and C. Garnier (2014). "Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating." *Building and Environment* 72: 223-231.

Salas, D. A., A. D. Ramirez, C. R. Rodríguez, D. M. Petroche, A. J. Boero and J. Duque-Rivera (2016). "Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review." *Journal of Cleaner Production* 113: 114-122.

Zampori, L., G. Dotelli and V. Vernelli (2013). "Life cycle assessment of hemp cultivation and use of hemp-based thermal insulator materials in buildings." *Environmental Science and Technology* 47(13): 7413-7420.

Vieira, R. d. S., P. Canaveira, A. da Simoes and T. Domingos (2010). "Industrial hemp or eucalyptus paper?" *International Journal of Life Cycle Assessment* 15(4): 368-375.

Weidema, B.P., Bauer, C., Hischier, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., Vadenbo, C.O., Wernet, G., 2013. *The Ecoinvent Database: Overview and Methodology. Data Quality Guideline for the Ecoinvent*

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