



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

TESI di Laurea
Facoltà di Architettura
Corso di laurea Magistrale a ciclo unico

**INNOVAZIONE TECNOLOGICA
DEI CONGLOMERATI:
IL CONGLOMERATO A BASE DI CANAPA
POSATO A SPRUZZO**

Candidata: ANTONELLA ADDUCI

Relatori:

Prof. Arch. Carola Clemente

Prof. Ing. Francesco Mancini

Correlatore:

Prof. Ing. Marc'Antonio Liotta

Tutor:

Prof. Ing. Marco Viviani



A.A. 2014/2015



Indice

Indice	III
SOMMARIO	7
1 INTRODUZIONE	9
1.1 Contestualizzazione	9
1.2 Obiettivi e metodologie	12
2 ARCHITETTURA SOSTENIBILE: L'IMPORTANZA DELLE SCELTE PROGETTUALI	15
2.1 Efficienza energetica	15
2.1.1 Efficienza energetica in Italia.....	17
2.2 Sistemi per la valutazione della sostenibilità.....	19
2.3 Interventi di bioedilizia e sviluppo sostenibile.....	21
2.4 Progettazione integrata e soluzioni progettuali.....	22
2.4.1 Interventi passivi	22
2.4.2 Interventi attivi	30
3 SISTEMI DI ISOLAMENTO ECOEFFICIENTE.....	35
3.1 Isolanti “bio”	35
3.2 Classificazione dei materiali isolanti	36
3.3 Caratteristiche prestazionali.....	38
3.3.1 Comportamento termico.....	39
3.3.2 Capacità e inerzia termica.....	42
3.3.3 Comportamento termoigrometrico	43
3.3.4 Comportamento igroscopico.....	44
3.3.5 Comportamento acustico.....	45
3.4 Principali riferimenti normativi per l'analisi dei materiali isolanti	46
4 LA CANAPA.....	47
4.1 Caratteristiche botaniche	47
4.1.1 Composizione.....	50
4.2 Cenni storici.....	51
4.3 Benefici ambientali	53
4.4 Derivati.....	55
4.4.1 Produzione di carta	55

4.4.2	Produzione di fibra tessile.....	56
4.4.3	Nutraceutica.....	56
4.4.4	Cosmesi.....	57
4.4.5	I prodotti illeciti.....	57
4.4.6	Dalla coltivazione ai prodotti di bioedilizia.....	58
5	HLC – HEMP LIME CONCRETE.....	67
5.1	Caratteristiche del conglomerato.....	67
5.2	Storia passata e recente.....	69
5.3	Proprietà meccaniche e termiche.....	71
5.3.1	Fattori di influenza.....	71
5.3.2	Caratteristiche e campi di applicazione.....	89
6	PROGRAMMA SPERIMENTALE.....	91
6.1	protocollo di prova per la misura delle performance.....	91
6.2	Normative di riferimento.....	97
6.3	Esperienza diretta.....	98
6.3.1	Test calorimetrici.....	98
6.3.2	Procedura per la caratterizzazione delle proprietà meccaniche.....	102
6.3.3	Procedura per la caratterizzazione delle proprietà termiche ..	109
7	CONCLUSIONI.....	117
	BIBLIOGRAFIA.....	121

SOMMARIO

Questa tesi ha seguito un percorso di ricerca finalizzato a descrivere i principi di formulazione di un biocomposito, ottenuto con una miscela a base di acqua, calce aerea e canapulo, considerando il procedimento di messa in opera per proiezione. In questo quadro, la principale difficoltà consiste nel tenere conto della porosità e la capacità di assorbimento dell'acqua da parte dell'aggregato vegetale, che ne condizionano il comportamento meccanico e le capacità di isolamento termico.

Dato un importante numero di parametri che intervengono nell'elaborazione del materiale, quello che si è tentato di fare è un piano di esperienze rivolte ad ottenere le massime informazioni, con un numero limitato di composizioni. Lo scopo è esaminare l'influenza dei parametri studiati, oltre che sulle proprietà meccaniche e termiche, di cui la letteratura fornisce ampi riferimenti, sulle caratteristiche e la velocità della fase di presa del conglomerato di canapa prodotto, incidenti sulla qualità, l'aderenza al supporto e, conseguentemente, la durabilità.

1 INTRODUZIONE

1.1 CONTESTUALIZZAZIONE

“... La Distribuzione poi è la vantaggiosa amministrazione del materiale, e della sua quantità, ed il governo, e la parsimonia della spesa ne' lavori, fatta con considerazione. Questa si osserverà in modo, se prima l'Architetto non cercherà di quelle cose, le quali non si potranno avere, o che non possono provvedersi ... Indi facendo attenzione sulle case altrui, ed aggiungendovi alle proprie idee altre cose nuove, di giorno in giorno andavano migliorando le abitazioni”

Marco Vitruvio Pollione – De Architectura 15 a.C.

In un contesto mondiale in cui il concetto di sviluppo sostenibile è divenuto sempre più importante, uno degli obiettivi primari è ovviamente quello di ridurre l'impatto ambientale delle attività antropiche. Il protocollo di Kyoto, il più noto tra quelli prodotti in ambito ambientale e in vigore dal 2005, prevede, grazie all'impegno dei paesi industrializzati, una significativa riduzione delle emissioni di alcuni gas ad effetto serra, responsabili del riscaldamento del nostro pianeta. L'obiettivo prefissato per il 2050 è raggiungere una riduzione dell'80% di tali emissioni (CE, Comunicazione della commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale europeo e al Comitato delle Regioni, 2011). Un contenimento dei consumi energetici può essere raggiunto attraverso il miglioramento dell'efficienza dei processi produttivi, un uso consapevole e scrupoloso delle risorse non rinnovabili, affiancato da uno sfruttamento maggiore di quelle rinnovabili. Per percorrere strade alternative a quelle attuali è necessario correggere il sistema produttivo e gli stili di vita delle società (soprattutto quelle dei Paesi industrializzati), puntando ad ottenere il massimo benessere possibile con le risorse a disposizione, ma in condizioni di sostenibilità ambientale, economica e sociale.

L'interesse nei confronti della sostenibilità inizia a prendere forma a partire dalla Conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente umano, tenutasi a Stoccolma nel 1972: per la prima volta si richiama l'attenzione sul fatto che, per migliorare in modo duraturo le condizioni di vita, occorre salvaguardare

le risorse naturali a beneficio di tutti, attraverso una collaborazione internazionale, e si identifica l'ambiente come "scopo imperativo per tutta l'umanità"; anticipando di pochissimo la grande crisi petrolifera del 1973, che avrebbe poi sancito la fine dell'epoca d'oro del consumismo spensierato. Si segna quindi un punto di svolta, di cambiamento netto di mentalità. Diventa tangibile quanto, la vita di tutti i giorni, sia drammaticamente dipendente dal petrolio, e le forti restrizioni sui rifornimenti esercitate dai Paesi esportatori, pongono l'accento sulla necessità di attuare interventi di risparmio e trovare forme alternative di energia, inducendo così l'industria energetica a pensare di apportare trasformazioni anche ai sistemi di produzione.

La progressiva partecipazione globale alla discussione sui concetti di ambiente e sostenibilità, ha portato al susseguirsi di una serie di programmi, strategie e politiche trasversali, finalizzate alla tutela ambientale, alla prosperità economica, alla coesione sociale. Allo stesso tempo però, si avverte l'esigenza di conciliare un'equa distribuzione delle risorse con elevati standard di vita e una continua crescita economica, che non deve arrestarsi. Infatti, nonostante l'avvio di numerose proposte e strategie mondiali indirizzate ad uno sviluppo sostenibile, negli ultimi quarant'anni si è continuato, e si continua tuttora, ad assistere ad una crescita esponenziale dei consumi, ai quali si cerca di far fronte attuando nuovi modelli di sviluppo, produzione energetica da fonti alternative, coinvolgendo i cittadini attraverso l'informazione e la partecipazione nei processi decisionali legati alle attività umane, suggerendo differenti stili di vita e influenzando le scelte dettate dal consumo (CE, Vivere bene entro i limiti del nostro pianeta, 2013).

Diventa quindi opportuno individuare e percorrere strade diverse da quelle attuali, correggendo i sistemi produttivi in modo tale che questi comportino un utilizzo delle risorse naturali che sia oculato e razionale. Per raggiungere tale obiettivo è necessario ridurre gli sprechi pur riuscendo a mantenere lo stesso livello di benessere e operare azioni concrete sull'efficienza, intesa proprio come migliore rapporto tra la potenza in uscita (prestazione) e la potenza in entrata (utilizzo delle risorse).

$$\text{Efficienza} = \frac{\text{prestazione fornita}}{\text{utilizzo delle risorse}}$$

La norma internazionale ISO 50001:2011, che specifica i requisiti minimi da attuare per migliorare un sistema di gestione dell'energia, definisce l'efficienza energetica come "rapporto o altra relazione quantitativa tra i risultati in termini di prestazioni, servizi, beni o energia, e l'immissione di energia".

Tra i settori protagonisti dell'economia mondiale e del consumo energetico vi è quello delle costruzioni, che ad oggi rappresenta circa il 40% della domanda totale (2010/31/UE, 2010), ma allo stesso tempo è il settore che offre il più alto margine di risparmio potenziale di energia. Tale risultato può essere concretamente raggiunto attraverso un'attenta gestione dell'intero processo edilizio, e con il conseguimento degli obiettivi internazionali volti a garantire alte prestazioni di rendimento, grazie al lavoro sinergico svolto dall'involucro e dagli impianti.

I cosiddetti edifici a basso consumo e le case passive, sono generalmente basati su alti livelli prestazionali di isolamento e capacità di inerzia termica dell'involucro. La minimizzazione del consumo energetico però inizia, prima che dalla costruzione degli edifici, dalla fabbricazione delle materie prime e dei prodotti per l'edilizia, fase che spesso implica la combustione di fossili e quindi immissione di anidride carbonica in atmosfera. Per questo la bioarchitettura ha come scopo quello di ridurre gli impatti negativi sull'ambiente durante l'intero ciclo di vita dell'edificio, *"dalla culla alla tomba"*, ossia sin dalle prime fasi che coinvolgono la progettazione e la scelta dei componenti, fino alla manutenzione ed eventuale dismissione dell'opera.

All'interno della norma ISO 14040:2006, viene definito il metodo di studio LCA (*Life Cycle Assessment*). Si tratta di una metodologia atta a valutare gli impatti ambientali di prodotti, servizi e attività umane, considerandone l'intero ciclo di vita, attraverso un approccio scientifico, che permette di comprendere le conseguenze ambientali causate direttamente o indirettamente dalle scelte effettuate, identificarne le opportunità di miglioramento e le soluzioni preferibili all'interno di uno spettro di possibili opzioni. Inizialmente usato per i prodotti industriali, attualmente questo strumento viene sfruttato anche in altri settori e in particolare in quello delle costruzioni. In Europa, il comitato tecnico CEN/TC 350 ha sviluppato degli standard ufficiali allo scopo di armonizzare la creazione di indicatori di performances ambientali e di sostenibilità detti EPD (*Environmental Product Declarations*) per i prodotti e materiali da costruzione. I numerosi strumenti di valutazione sviluppati per i diversi livelli del processo costruttivo, possono essere usati come supporto alle decisioni progettuali.

A differenza dei prodotti industriali, gli edifici sono soggetti a maggiore variabilità: ogni organismo edilizio è unico. Tale unicità è rappresentata da numerosi aspetti: la tecnica costruttiva, le caratteristiche dell'involucro e le tecnologie impiegate, la forma, la posizione geografica e l'assemblaggio locale, effettuato da manodopera. E' stato studiato che la fase più nociva è quella operativa, con una percentuale di impatto del 62-98%, mentre quella

di costruzione copre l'1-20% e quella di smaltimento lo 0,2-5% (Pretot, Collet, & Garnier, 2014).

Al fine di ridurre l'impatto ambientale, uno degli approcci possibili è quello di ridurre i flussi di calore degli edifici, responsabili di un'elevata domanda energetica. Da un punto di vista termico, questo risultato può essere raggiunto migliorando le prestazioni passive degli edifici e, l'utilizzo di materiali ecologici con buone proprietà isolanti è quindi il primo passo per un uso razionale delle risorse e uno degli strumenti chiave per realizzare una buona opera edilizia.

1.2 OBIETTIVI E METODOLOGIE

La ricerca e l'innovazione nel campo dei prodotti e materiali da costruzione, affiancate dallo studio di materie prime di origine naturale a basso impatto ambientale, lavorano allo scopo di proporre valide alternative a quelle tradizionali di origine sintetica, che hanno forti ripercussioni ambientali, tanto nella fase di produzione quanto durante quella di smaltimento.

Tra questi, il conglomerato di canapa e calce è annoverato come isolante bio-composito per l'edilizia; con il termine bio-composito si indica un materiale per il quale almeno uno dei costituenti principali derivi da risorse rinnovabili, la cui peculiarità sia quella di poter essere facilmente ripristinata senza provocare un impoverimento delle materie prime e dell'energia disponibile in natura. Gli studi condotti finora mostrano che tale prodotto ha un impatto positivo sull'ambiente anche per la sua capacità di sintetizzare il carbonio presente nell'aria durante la fase di carbonatazione del prodotto finito applicato e durante la fase di coltivazione della pianta stessa, la *Cannabis Sativa* industriale, che costituisce l'aggregato leggero del conglomerato (Pretot, Collet, & Garnier, 2014).

Per poter rispondere in maniera esaustiva alla domanda di mercato tuttavia è necessario che i materiali innovativi introdotti nel sistema commerciale siano corredati di specifiche tecniche, adeguate alle normative vigenti, e siano in grado di soddisfare determinati requisiti in termini di sicurezza, omogeneità di comportamento e durabilità. Il soddisfacimento di tali requisiti porterà ad ottenere un prodotto definito, certificato e dunque garantito per le performance dichiarate dall'impresa, tutelando così sia quest'ultima sia il consumatore. In tal modo sarà anche possibile fornire al progettista un utile strumento conoscitivo e comparativo per indirizzare in maniera ottimale le scelte tecnologiche. Usando gli standard armonizzati dalle direttive, il produttore sarà in grado di fornire una dichiarazione di performance (DoP)

del suo articolo come definito nel Regolamento dei Prodotti da Costruzione (CPR) e applicarvi il marchio CE.

Il CEN/TC 88, comitato tecnico proprio dei materiali e prodotti per l'isolamento termico, indica nelle sue normative:

- terminologia e definizioni,
- lista delle proprietà richieste rispetto alle diverse applicazioni,
- metodi per la determinazione di tali proprietà,
- procedure di campionatura,
- criteri di conformità,
- specificazioni ed etichettatura (CEN).

Il complesso quadro normativo, oltre a voler tutelare impresa e consumatore, controllando il mercato e fornendo parametri di confronto, specifica l'iter da seguire per poter proporre l'inserimento di altri materiali e prodotti, nell'elenco di quelli già certificati.

Il seguente lavoro di tesi si propone per illustrare un metodo di procedura per testare il conglomerato di canapa e calce, posato in situ con la tecnica della proiezione, prodotto dall'azienda svizzera a conduzione familiare *Pittet Artisans s.a.r.l.*. Tale ditta ha intrapreso una collaborazione con il laboratorio del dipartimento di ingegneria civile dell'HEIG-VD (*Haute École d'Ingenierie et Gestion du Canton de Vaud*) per poter lanciare sul mercato il loro innovativo sistema isolante a base di canapulo e calce, garantito e tutelato da una dichiarazione di performances meccaniche e termiche normalizzate.

Nella Confederazione Svizzera, lo strumento normativo è redatto dalla SIA (società svizzera degli ingegneri e degli architetti), l'associazione professionale per specialisti qualificati nell'ambito della costruzione, della tecnica e dell'ambiente che si prefigge come scopo principale, pianificare in modo sostenibile e qualitativamente valido, lo spazio di vita e favorire la divulgazione della cultura architettonica. Per quanto riguarda i materiali isolanti, la norma di riferimento è la SIA 279 - *Materiali da costruzione termicamente isolanti - Requisiti generali e valori termici caratteristici di materiali isolanti termici, prodotti di muratura e altri materiali termicamente rilevanti* – pubblicata nel 2011.

L'approccio di studio è stato di tipo sperimentale; al laboratorio sopracitato è stato chiesto di testare il prodotto per vari aspetti:

- Verificare le caratteristiche di miscela, l'appropriatezza del tipo di legante e le relative percentuali dei componenti;

- Effettuare dei test sul materiale al fine di ottenere una caratterizzazione fisico-chimica;
- Ottenere una caratterizzazione delle proprietà meccaniche del prodotto;
- Testare le capacità isolanti.

Per ciascuna prova, l'intento è di ottenere dei valori di riferimento che possano essere utilizzati per la redazione di una scheda tecnica con un duplice obiettivo: sia a scopo di commercializzazione, sia per proporre al comitato tecnico di competenza una prassi di prova di riferimento per questo tipo di materiale, non ancora disponibile in normativa, che possa fare da guida a chi si occuperà di prodotti analoghi.

2 ARCHITETTURA SOSTENIBILE: L'IMPORTANZA DELLE SCELTE PROGETTUALI

2.1 EFFICIENZA ENERGETICA

Una delle caratteristiche del fare architettura è la complessa consapevolezza interdisciplinare che un progetto di qualità richiede. Ogni edificio è unico come unici sono il processo preliminare antecedente alla sua realizzazione e tutte le scelte effettuate sono *ad hoc*. Lo scopo è quello di avviare una filiera trasversale che sia in grado di dar vita ad un prodotto capace di mettere in relazione l'uomo con lo spazio costruito e l'ambiente naturale, per poter egli stesso plasmare il paesaggio in cui riconoscersi. Definizione di paesaggio: Il termine "*Paesaggio*" designa una determinata parte di territorio, così come è percepita dalle popolazioni, il cui carattere deriva dall'azione di fattori naturali e/o umani e dalle loro interrelazioni; dal Codice dei beni culturali e del paesaggio Secondo l'art. 131, comma 1 del DLgs 22 n. 42 del 2004. Il progettista assume quindi un ruolo di responsabilità nei confronti delle relazioni tra edificio, utente ed ambiente. La soddisfazione dell'esigenza sociale di benessere e salvaguardia dell'ambiente è raggiungibile attraverso interventi di trasformazione del territorio.

Negli ultimi anni il concetto di efficienza energetica è stato ampliato e gioca un ruolo trainante nell'intero sistema economico mondiale.

Nel settore delle costruzioni il margine potenziale di miglioramento per l'efficienza è ampio, è stimato il 42% sull'uso finale del consumo di energia per gli edifici esistenti dell'U.E. (CE, Comunicazione della commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale europeo e al Comitato delle Regioni, 2011), soprattutto in funzione del raggiungimento degli obiettivi ambientali della Commissione Europea indicati per il 2020, sia per quanto riguarda la riqualificazione del patrimonio edilizio esistente, sia nella costruzione del nuovo (Fig. 2.1).

Capitolo 2

Tra gli obiettivi di progresso che l'UE è chiamata a raggiungere nel medio-lungo periodo, ossia per il 2020, quelli riguardanti gli ambiti del cambiamento climatico e dell'energia sono:

- Ottenere una riduzione almeno del 20% - 30% del tasso di emissioni di CO₂ rispetto al 1990;
- Soddisfare il 20% del fabbisogno energetico a partire da fonti rinnovabili;
- Aumentare del 20% l'efficienza energetica.

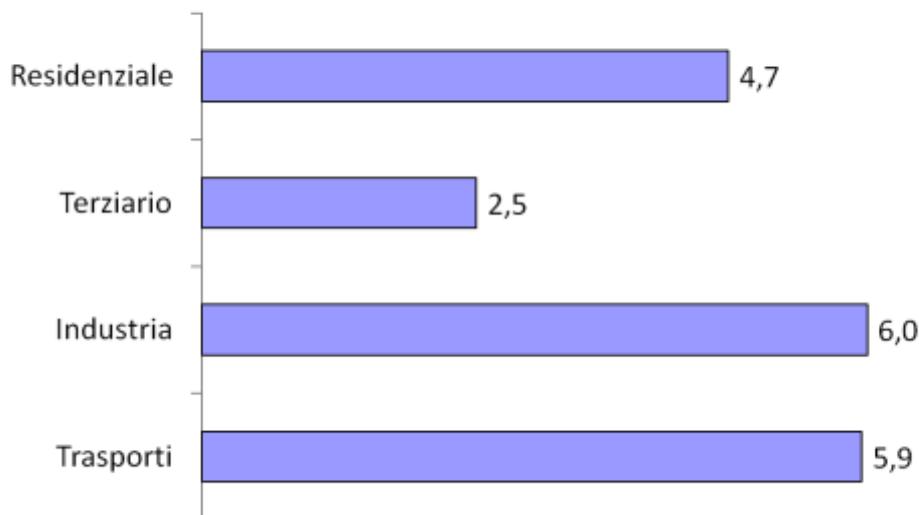


Figura 2.1 - Risparmio di Energia finale al 2020 per settore (Mtep/a) - ENEA

Questi obiettivi rappresentano intenti comuni, da conseguire a livello sia nazionale che europeo e, affiancati da altri riguardanti occupazione, innovazione, istruzione, povertà/emarginazione, danno vita ad un circolo virtuoso in grado di generare benessere al sistema sociale nella sua complessità globale. Ad esempio, investire nelle tecnologie pulite servirà non solo a combattere i cambiamenti climatici, ma contemporaneamente anche a creare nuove opportunità commerciali e di lavoro, migliorare il livello di istruzione, divulgare informazioni e fare educazione.

L'ambiente rappresenta un patrimonio ideale, un "bene supremo" come definito da Aristotele, capace di legare e accomunare le persone e dove in esso ci sono conciliazione e solidarietà. Senza un bene considerato collettivo, capace di legare e accomunare le persone, la società non esisterebbe, ed è per questo che l'ecosistema necessita di attenzione e di accorgimenti quotidiani da parte di tutti, in ogni settore.

Le azioni di efficientamento contribuiscono al raggiungimento di tutti gli obiettivi di politica energetica:

- riduzione dei costi energetici grazie al risparmio dei consumi;
- riduzione dell'impatto ambientale;
- miglioramento della sicurezza di approvvigionamento autonomo e riduzione della dipendenza energetica;
- sviluppo economico generato da un settore con forti ricadute sulla filiera nazionale.

Il miglioramento delle performance rappresenta inoltre uno strumento da privilegiare nelle strategie attuabili per l'abbattimento delle emissioni, in quanto si tratta del più economico intervento, e induce un ritorno sugli investimenti spesso positivo per il Paese, grazie al raggiungimento di livelli ottimali del rapporto costo/beneficio.

Costruire Edifici a Energia Quasi Zero (NZEB- *Nearly Zero Energy Building*) è l'obiettivo che l'Unione Europea si è posta per il 2020. Entro il 31 Dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno rispondere ai requisiti di Edifici a Energia Quasi Zero. Per gli edifici destinati a funzioni pubbliche questa scadenza è anticipata al 31 Dicembre 2018.

Saranno edifici ad altissima prestazione energetica, nei quali il fabbisogno molto basso o quasi nullo verrà coperto in misura significativa da energia derivante da fonti rinnovabili. Per il raggiungimento di questo obiettivo è stata emanata la Direttiva comunitaria 2010/31/CE che dal 1° Febbraio 2012 ha sostituito la 2002/91/CE, dove si trovano le indicazioni per le metodologie di calcolo e i requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici e le linee guida nazionali per la certificazione energetica.

Rispondere alle prescrizioni di normativa non è però sufficiente in un processo progettuale complesso e multidisciplinare come risulta essere quello di architettura. Tutte le differenti fasi, nel loro susseguirsi e relazionarsi, dovranno superare i limiti dell'agire settoriale ed avere come scopo comune quello di garantire il comfort ambientale dell'utente, volendo contenere al limite l'utilizzo di fonti energetiche non rinnovabili e le emissioni di CO₂.

2.1.1 Efficienza energetica in Italia

In Italia, il patrimonio edilizio esistente è rappresentato per il 63,8% da edifici costruiti prima del 1971, periodo caratterizzato da assenza assoluta di legislazione energetica nel settore civile, che ha inevitabilmente portato ad ottenere delle opere architettoniche che esibiscono performance scadenti

(CRESME, 2014), definite da strutture leggere con livelli di isolamento minimi, o nella maggior parte dei casi, nulli. Prima del 1946, nonostante la mancanza di isolamento, gli elevati spessori delle abitazioni in muratura consentivano, almeno in parte, di sopperire alle alte conducibilità termiche dei materiali impiegati.

Le prime disposizioni nazionali in materia di certificazione energetica nel settore delle costruzioni, sono state emanate con la legge 9 gennaio 1991, n. 10, volta a favorire l'uso razionale dell'energia, lo sviluppo delle fonti rinnovabili e la riduzione dei consumi di energia nei processi produttivi.

In Italia, dove il panorama normativo regionale è piuttosto variegato, la direttiva europea 2010/31 UE, che *promuove il miglioramento della prestazione energetica degli edifici, tenendo conto delle condizioni locali e climatiche nonché delle prescrizioni relative al clima degli ambienti interni e all'efficacia sotto il profilo dei costi*, è interpretata dalla legge 90/2013, conosciuta come "legge 90", la quale indica:

- una metodologia di calcolo della prestazione energetica degli edifici (che potrebbe essere differenziata a livello nazionale o regionale);
- l'applicazione di requisiti minimi di rendimento energetico per edifici di nuova costruzione e/o sottoposti a ristrutturazioni importanti;
- piani nazionali destinati ad aumentare il numero di edifici a energia quasi zero;
- il metodo per la certificazione energetica (obbligatoria) di edifici ed unità immobiliari.

Tra le novità introdotte dall'aggiornamento del DM 26/06/2015 di tale legge, si trova la definizione di requisiti minimi di prestazione energetica, secondo i quali gli interventi con impatto sulla riqualificazione si differenziano in relazione all'importanza espressa in termini percentuali:

- **RISTRUTTURAZIONE di PRIMO LIVELLO:** interventi su più del 50% della superficie disperdente, completati dalla sostituzione dell'impianto termico;
- **RISTRUTTURAZIONE di SECONDO LIVELLO:** interventi su più del 25% della superficie disperdente e/o sostituzione dell'impianto termico;
- **RIQUALIFICAZIONI:** interventi secondari su superfici inferiori al 25%.
- Il decreto riporta inoltre schemi e modalità di riferimento per la compilazione della relazione tecnica di progetto e l'adeguamento del DM 26/06/2009 sulle linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.

L'efficienza energetica delle costruzioni è quindi associata all'ottenimento di ottimali prestazioni a partire da:

- Opportuna scelta delle caratteristiche dei materiali e dei sistemi che costituiscono l'involucro edilizio e i livelli di isolamento termico;
- Ottimale progettazione e dimensionamento degli impianti termici;
- Sfruttamento delle energie rinnovabili;

I requisiti prescrittivi e prestazionali indicati dalla normativa avranno delle ricadute sulle scelte progettuali e morfologiche finali dell'opera.

Per soddisfare ad esempio il requisito prescrittivo del coefficiente medio globale di scambio termico per unità di superficie disperdente H'_T [W/m²K], la quantità totale di superfici vetrate dovrà essere attentamente esaminata e calcolata; allo stesso modo, per quanto riguarda l'indice di prestazione termica utile E_p [kWh/m²], si dovranno valutare gli apporti solari o i ponti termici della struttura.

2.2 SISTEMI PER LA VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ

Le principali cause delle dispersioni energetiche del patrimonio edilizio esistente sono individuabili in:

- errata progettazione degli ambienti in relazione alle destinazioni d'uso;
- ventilazione non controllata degli ambienti;
- orientamento non ottimale degli edifici;
- alto valore del coefficiente di trasmittanza;
- decadimento prestazionale del materiale isolante;
- errata posa in opera dell'isolante;
- utilizzo di materiali isolanti di scarsa qualità e con bassi livelli prestazionali;
- scelte di materiali isolanti non idonei;
- dispersioni per effetto di ponti termici;
- decadimento prestazionale nella tenuta dei serramenti.

Riqualificare energeticamente un edificio significa intervenire sulla razionalizzazione dei flussi energetici che intercorrono tra il sistema edificio, costituito dalle tecnologie dell'involucro e degli impianti, e l'ambiente esterno.

Il concetto di riqualificazione energetica dell'esistente, correlato a quello di sostenibilità delle nuove costruzioni, è promosso a livello internazionale da

politiche che individuano nel modo di costruire, una chiave di volta per la salvaguardia dell'ambiente, la salute e il benessere dell'uomo. Un'intensa attività legislativa e di redazione di norme tecniche sul rendimento energetico definisce parametri di efficienza sempre più restrittivi e criteri di risparmio sempre più vincolanti, imponendo interventi di adeguamento del patrimonio esistente a standard prestazionali più elevati nelle fasi di progettazione, realizzazione e gestione del *green building* (2010/31/UE, 2010).

La qualità delle opere nella loro complessità, viene considerata sulla base del risultato ottenuto da diversi sistemi di certificazione puntuali che prevedono la valutazione della risposta del progetto edilizio, ad una serie di requisiti prestazionali (indicatori), preventivamente definiti, riguardanti l'inserimento dell'opera nel contesto, l'efficienza nell'uso delle risorse, le emissioni in atmosfera, la compatibilità ambientale dei materiali, la qualità dell'ambiente indoor, l'utilizzo di soluzioni tecnologiche innovative.

Agli indicatori viene associato un punteggio e dalla somma pesata dei punteggi si ottiene la valutazione finale complessiva dell'edificio che ne determina la relativa classe prestazionale: eccellente, ottima, buona, sufficiente.

Tra i percorsi volontari più diffusi a livello internazionale si segnalano:

- il sistema di autocertificazione volontaria statunitense LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) in uso dal 2000;
- Valutazioni redatte sulla base del metodo LCA (*Life Cycle Assessment*), standardizzata a livello internazionale dalle norme ISO 14040-4.
- Il *Water Footprint*, indicatore del consumo di acqua dolce, espressa in volume totale utilizzato per produrre beni o servizi;
- Il sistema francese HQE (*Heaute Qualité Environmentale*) introdotto agli inizi degli anni Novanta;
- GBTool, messo a punto dal 1996 dal *Green Building Challenge*, che fornisce lo strumento di base di elenco dei criteri prestabiliti di valutazione, che ciascun Paese renderà conforme alla propria normativa vigente, alle prassi consolidate e alle caratteristiche ambientali del proprio territorio.

In Italia:

- Il Protocollo ITACA, predisposto dal 2002 dall'Istituto per l'Innovazione e Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale, è utilizzato nei processi di valutazione e certificazione da molte regioni italiane per definire il livello di performance ambientale degli edifici e per promuovere ed incentivare i programmi di edilizia sostenibile. Seguire le

indicazioni di prestazione in accordo con tale protocollo, significa anche ottenere delle agevolazioni finanziarie.

- Il sistema CasaClimaPiù introdotto dalla provincia di Bolzano nel 2004 che grazie ad un apposito sistema, calcola il fabbisogno energetico dell'edificio e in base al consumo vi applica una categoria.

Un altro marchio che premia prodotti e i migliori servizi dal punto di vista ambientale è Ecolabel: è un'etichetta, guidata dal Reg. (CE) n. 66/2010, che attesta il basso impatto ambientale nell'intero ciclo di vita del prodotto o del servizio e ne testimonia quindi gli elevati standard prestazionali. È attualmente uno strumento volontario, ma che certifica un'eccellenza, favorendo il miglioramento dei prodotti e una diversificazione tra quelli concorrenti sul mercato, incoraggiando gli imprenditori a voler realizzare articoli rispondenti ad ottimali standard di sostenibilità.

L'obiettivo di tali sistemi di certificazione è quello di promuovere la realizzazione di edifici sostenibili attraverso il miglioramento della cultura ambientale e tecnologica dei committenti, dei progettisti e di tutti gli attori del processo edilizio, indirizzando al contempo le scelte di acquisto degli utenti attraverso una maggiore trasparenza del mercato.

2.3 INTERVENTI DI BIOEDILIZIA E SVILUPPO SOSTENIBILE

Figlio degli anni '70, il concetto di casa ecologica nasce in Germania dapprima diffondendosi tra gli ecologisti, per poi essere riconosciuto come valido a livello mondiale. Il termine bioedilizia è infatti la traduzione del termine tedesco "Baubiologie", che significa "studio della vita o degli esseri viventi in relazione alle costruzioni", introdotto per la prima volta nel 1976 da Anton Shneider; si tratta di un approccio progettuale rispettoso dell'equilibrato rapporto tra ambiente, inteso come risorse disponibili, salute, intesa come modo di abitare, e architettura, cioè le modalità progettuali e costruttive.

Iniziano a diffondersi così le case ecologiche, edifici realizzati nel rispetto dell'ambiente che riescono comunque a garantire la massima funzionalità: si tratta di abitazioni costruite con materiali ecosostenibili e caratterizzate da sistemi impiantistici che, a partire da fonti naturali rinnovabili come sole e vento, consentono autonomia ed efficienza energetica.

Al centro della strategia per uno sviluppo sostenibile ci sono quindi la minimizzazione e il controllo del consumo energetico di tutto il ciclo di vita dei prodotti - edifici compresi - dalla produzione delle materie prime fino al

loro eventuale smaltimento (“dalla culla alla tomba”) (ISO14040 - Life Cycle Assessment, 2006).

2.4 PROGETTAZIONE INTEGRATA E SOLUZIONI PROGETTUALI

Con queste premesse il progetto architettonico non può essere considerato chiuso all’interno di un’area disciplinare specifica, ma spazia attraverso diverse competenze, alla ricerca della massima organicità della scelta, avendo come fine la risoluzione di un problema sistemico.

Organicità e quindi integrazione progettuale, significa ottenere una collaborazione prestazionale tra le tecnologie individuali e il sistema architettonico globale; per il conseguimento di questo obiettivo comune è richiesto che tutti gli attori della filiera, dai finanziatori ai progettisti, ai committenti e a tutti i partecipanti al processo edilizio, siano coinvolti fin dalle fasi preliminari del progetto. Come si evince dal rapporto “Energia e ambiente” dell’Enea, entro il 2020 la produzione di anidride carbonica potrebbe essere ridotta del 57% grazie agli interventi di efficienza energetica nel settore delle costruzioni.

L’economicità dell’intervento di efficientamento energetico può essere attribuito alla massimizzazione degli apporti energetici gratuiti derivanti da opportune soluzioni progettuali. Già solo agendo sulla forma e sull’orientamento dell’edificio e ideando una buona esecuzione dell’involucro, si ottengono sensibili abbattimenti dei costi di esercizio e una limitazione dell’uso dei tradizionali impianti termici. La necessità di minimizzare le dispersioni si coniuga con l’opportunità di utilizzare le superfici esterne per integrare sistemi di protezione attiva e passiva, con sistemi di captazione delle energie rinnovabili.

Le procedure di certificazione energetica, sancite dalla più recente normativa (D.M. 26/06, 2015), orientano la scelta dei materiali e delle tecnologie da utilizzare in tutte le fasi della progettazione. Gli indubbi benefici per l’ambiente e la vivibilità dello spazio antropizzato offerti dalla possibilità di costruire in modo sostenibile, sono agevolati dalle prescrizioni vigenti delle leggi finanziarie.

2.4.1 Interventi passivi

Sono da considerarsi passivi tutti gli interventi attuabili in fase di progettazione dell’edificio, applicati al costruito al fine di regolare gli scambi

termici tra ambiente interno ed esterno senza l'intervento di mezzi meccanici quali pompe, ventilatori, caldaie.

I sistemi solari passivi vengono classificati in tre tipologie principali:

- Sistemi a guadagno diretto: la radiazione solare attraversa lo spazio interno e viene immagazzinata nella massa termica interna all'edificio;
- Sistemi a guadagno indiretto: la radiazione solare non entra direttamente nello spazio abitato, ma colpisce una massa in grado di accumulare energia termica e trasferirla successivamente per irraggiamento o convezione agli ambienti interni (muro solare isolato, muro di Trombe, *roof-pond*);
- Sistemi a guadagno isolato: la radiazione solare raccolta in uno spazio separato viene trasferita ad una massa di accumulo o distribuita nello spazio interno (barra-Costantini, serra isolata, sistema termosifone).

Queste soluzioni progettuali sono direttamente legate a delle valutazioni fatte durante la fase preliminare dell'ideazione e che riguardano:

- il fattore di forma dell'edificio
- la scelta dell'orientamento rispetto ai punti cardinali e ai venti prevalenti
- la scelta tecnologica applicata all'involucro.

Tutti questi accorgimenti (Fig. 2.2), interagendo sinergicamente tra loro, influenzano in maniera sostanziale l'efficienza energetica di un edificio, favorendo e controllando opportunamente il soleggiamento, l'illuminazione e la ventilazione naturale, considerati i principali fattori ai quali poter attribuire il comfort e la salubrità ambientale.

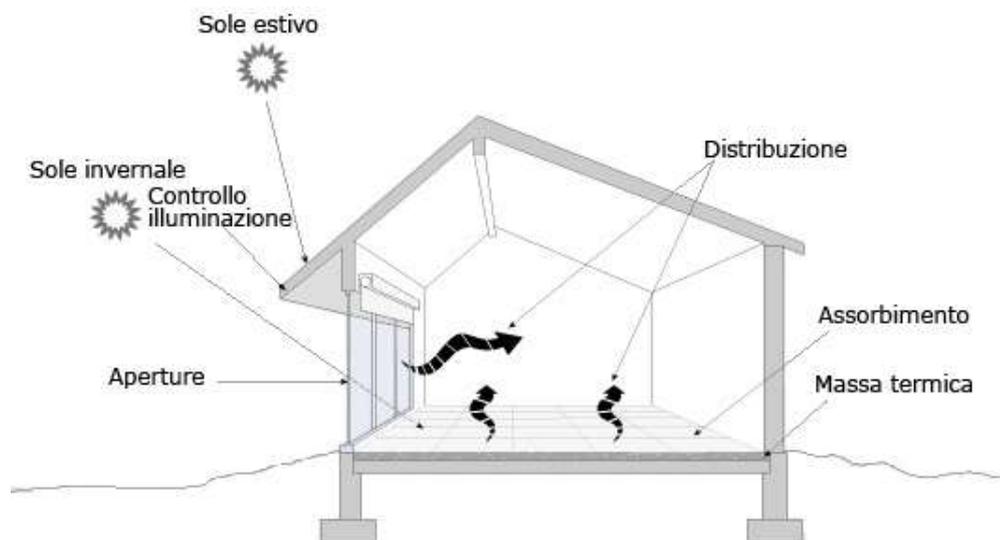


Figura 2.2 - Elementi di controllo solare passivo

Il fattore di forma

Partendo dall'aforisma del Modernismo, enunciato da Sullivan alla fine del XIX sec. “la forma segue la funzione”, nell'era contemporanea, che concentra particolari attenzioni alla promozione di un'edilizia sostenibile, l'obiettivo della progettazione deve essere qualcosa di più: una mediazione tra forma, funzione ed efficienza, per il conseguimento della massima qualità edilizia.

La geometria di un edificio, o di un ambiente, e la sua orientazione nello spazio sono il risultato di un complesso processo progettuale in cui interagiscono diverse componenti di natura urbanistica, estetica, funzionale, tecnica, economica e ambientale. La forma dell'edificio è spesso vincolata dal contesto urbano o da indicazioni del regolamento edilizio ma, nel caso in cui non vi fossero vincoli, una progettazione consapevole può controllare le prestazioni e il comportamento termico dell'opera.

La scelta della forma costituisce un passaggio fondamentale ai fini della qualità edilizia dell'impresa da realizzare, sia in termini di qualità architettonica sia in termini di benessere, efficienza e competitività economica.

Forma, dimensioni e orientamento rappresentano variabili strettamente correlate tra di loro; devono essere considerate congiuntamente al contesto territoriale ed urbano in cui l'edificio sarà realizzato con l'obiettivo di ottenere la migliore efficienza energetica possibile.

Il fattore di forma o compattezza di un edificio si calcola come rapporto tra la superficie disperdente dell'involucro, data dalla somma delle superfici delle chiusure verticali e delle chiusure orizzontali superiori ed inferiori, e il volume complessivo dell'edificio ($F=S/V$). Quanto minore è il valore del fattore di forma, tanto minore è la dispersione termica, poiché è minore la superficie dell'involucro che si relaziona agli ambienti esterni.

Oltre alla compattezza, altre caratteristiche della forma che incidono sull'efficienza energetica dell'edificio sono la porosità e la snellezza. La prima è definita come la proporzione tra volume pieno e vuoto; la seconda è la proporzione dell'edificio rispetto al suo sviluppo verticale.

Un'elevata porosità determina un raffrescamento passivo dovuto alla ventilazione naturale; essa è quindi consigliabile in territori caratterizzati da climi caldi.

Un edificio snello, che ha un ridotto contatto con il terreno e un'elevata esposizione agli agenti atmosferici, non è consigliabile dal punto di vista

energetico, ma favorisce la compattezza urbana (es: grattacielo). E' per questo che per i climi freddi è auspicabile la realizzazione di edifici compatti in grado di minimizzare le dispersioni termiche.

Per zone di clima temperato, secondo quanto visto finora, la soluzione ottimale sarebbe quindi prevedere la possibilità di un edificio ad assetto variabile (Fig. 2.3).

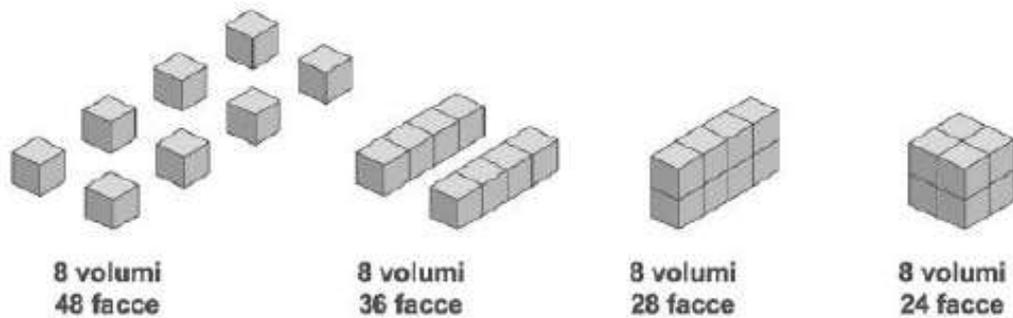


Figura 2.3 - Fattore di forma: differenti rapporti S/V per edifici porosi, lineari, compatti

L'orientamento dell'edificio

Come per la forma, la scelta dell'orientamento degli edifici dipende da molti fattori: la topografia locale, le eventuali vedute panoramiche, la radiazione solare, l'intensità e la direzione dei venti, il clima acustico, la qualità dell'aria, i requisiti di privacy. L'orientamento del fabbricato e l'esposizione delle singole facciate possono influire notevolmente sulle future prestazioni dell'edificio e sul comfort degli spazi interni, contribuendo anche a determinare il valore commerciale dell'immobile.

L'orientamento di un edificio è identificato dal punto cardinale verso il quale è rivolta una facciata di riferimento, e definisce l'angolo azimutale di deviazione dal Sud geografico. La scelta dell'orientamento è fondamentale per consentire la massimizzazione degli apporti solari in inverno e una gestione efficace di quelli estivi.

La purezza dell'aria, la nuvolosità, le ore del giorno, le stagioni e tutti i fattori che dipendono dalla posizione del sole, sono elementi che influenzano la variabilità degli apporti energetici solari, che ovviamente non si manifestano in forma concentrata e costante. Gli apporti solari gratuiti sono importanti da considerare nella stima della richiesta energetica stagionale di un edificio, mentre, in fase di dimensionamento degli impianti di riscaldamento e quindi

Capitolo 2

per il calcolo del carico termico invernale, è opportuno trascurarli in ottica precauzionale.

Le superfici che costituiscono l'involucro di un edificio sono differentemente soggette alle radiazioni, oltre che per il loro orientamento rispetto ai punti cardinali, anche per la loro inclinazione rispetto al sole, variabile a seconda dell'ora del giorno e delle stagioni. Durante le stagioni fredde, più precisamente dall'equinozio d'autunno in settembre a quello di primavera a marzo (sono solo undici i giorni dell'anno durante i quali alba e tramonto avvengono rispettivamente a Est e Ovest), il sole sorge a Sud-Est e cala a Sud-Ovest. Ne consegue che il lato meridionale di un edificio sarà esposto al sole per tutta la durata del giorno, subendo radiazioni quasi ortogonali alla superficie verticale e ottenendo così il massimo apporto energetico. Nei restanti sei mesi dell'anno, durante le stagioni più calde, il sorgere del sole avviene a Nord-Est, mentre il tramonto si verifica a Nord-Ovest: la posizione solare è più inclinata rispetto al suolo e si raggiungono alti picchi di temperatura (Fig. 2.4 – 2.5).

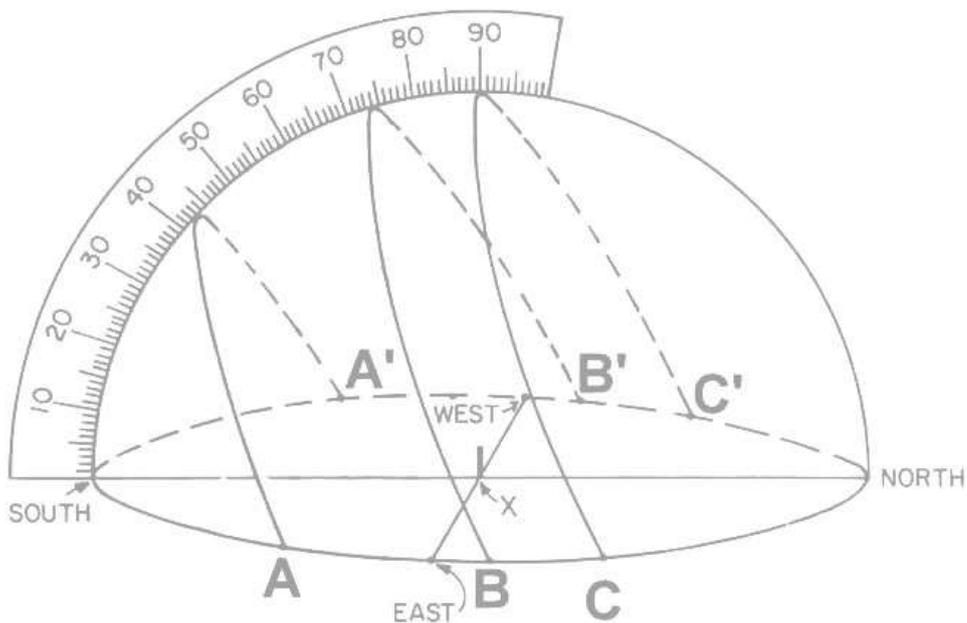


Figura 2.4 - Percorso del sole

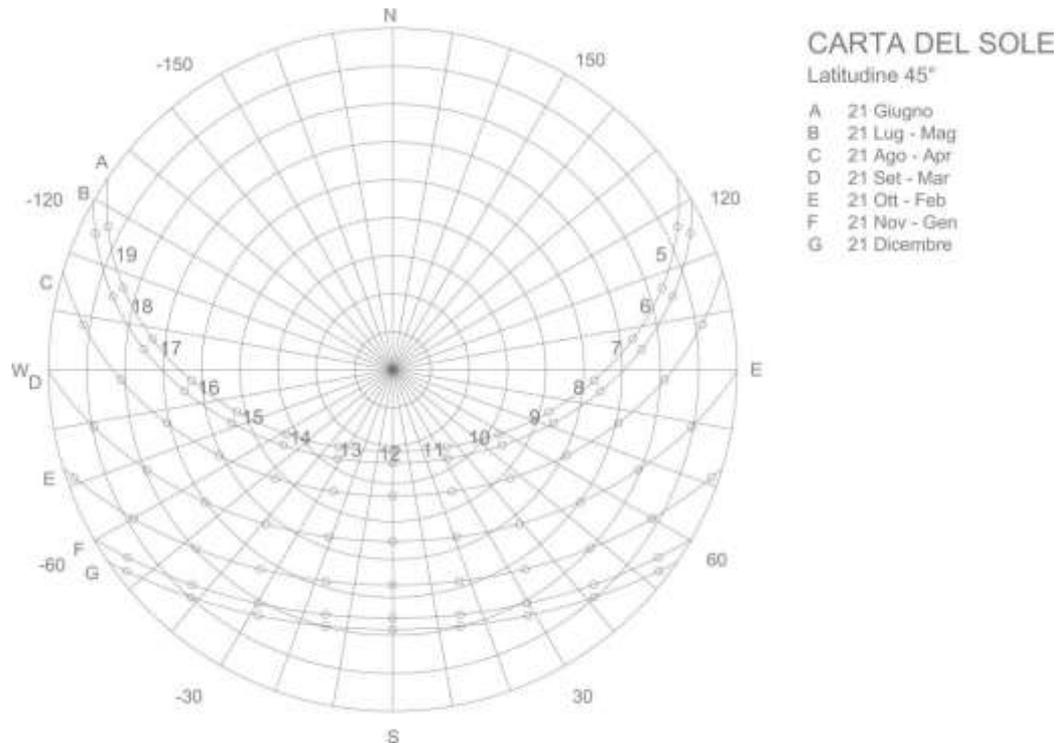


Figura 2.5 - Diagramma solare polare

Come per il fattore di forma, anche per l'attuazione di strategie progettuali idonee in funzione dell'orientamento non è possibile prescindere dal contesto climatico di riferimento. Per zone caratterizzate da climi più rigidi, è opportuno combinare un prospetto esposto a Nord che sia ben isolato e dotato di piccole aperture (per limitare le dispersioni termiche), con uno esposto a Sud che sia in grado di captare l'irraggiamento diretto con lo scopo di minimizzare il fabbisogno energetico invernale e migliorare il clima termoigrometrico degli ambienti. Tale orientamento consente di sfruttare l'energia solare incidente mediante sistemi solari passivi e solari attivi (termici o fotovoltaici) da posizionare sulle facciate o in copertura.

Dall'orientamento dipende anche l'apporto gratuito della ventilazione naturale; dal punto di vista progettuale, gli obiettivi da perseguire riguardano da un lato la protezione dell'edificio dai venti freddi invernali, dall'altro lo sfruttamento dei moti d'aria per il raffrescamento estivo. Sfruttare o creare schermi può essere utile per ridurre le dispersioni invernali per convezione o per infiltrazione (Fig. 2.6).

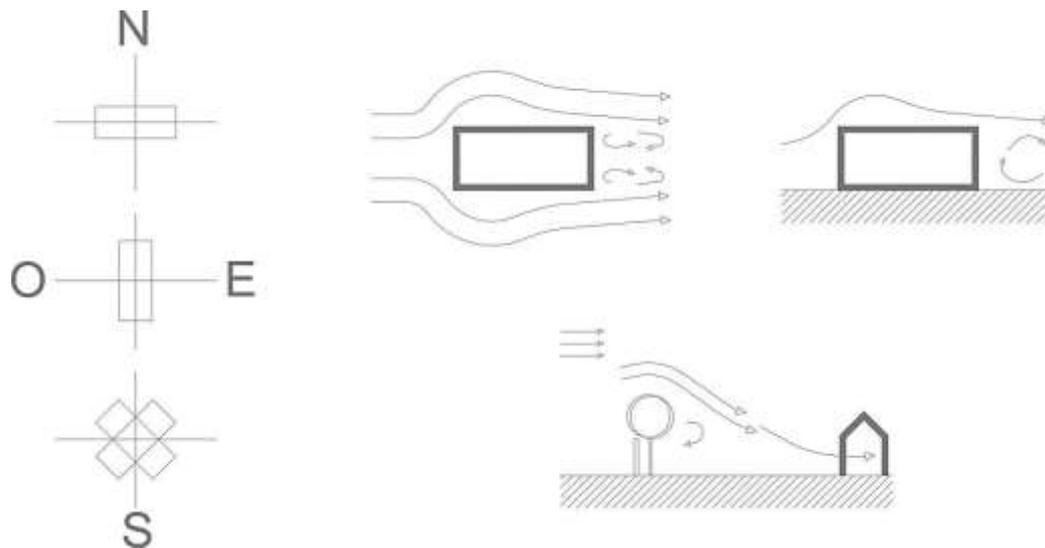


Figura 2.6 - Edificio diversamente orientato e influenze sulla potenzialità di ventilazione

Sistemi di ombreggiamento

Una schermatura solare, in base alla definizione dettata dal decreto legge 311/06, è un sistema che "*applicato all'esterno di una superficie vetrata trasparente permette una modulazione variabile e controllata dei parametri energetici e ottico luminosi in risposta alle sollecitazioni solari*".

Prevedere e progettare dei sistemi di ombreggiamento delle facciate, in rapporto all'orientamento, restituisce un rilevante effetto sul carico termico e sul comfort abitativo: strutture semplici e leggere, efficacemente posizionate, garantiscono una gestione ottimale e dinamica della luce naturale senza penalizzare il contributo delle superfici vetrate, ma riducendo la temperatura interna ed esterna delle stesse che, se irraggiate direttamente, diventerebbero corpi radianti, contribuendo quindi all'innalzamento del carico termico.

I sistemi di schermatura possono essere costituiti da elementi:

- fissi
- orientabili (manuali o motorizzati)
- orizzontali
- verticali
- realizzati in diversi materiali e finiture (acciaio, alluminio, legno, cotto, vetro etc.)
- aggettanti.

Sulla facciata a Nord è possibile prevedere dei sistemi fissi, mentre in quella rivolta a Sud risultano particolarmente efficienti frangisole e lamelle

orizzontali, meglio se mobili o selettive. Nelle facciate Est ed Ovest, difficilmente schermabili nelle prime ore del mattino o poco prima del tramonto, possono essere utilizzati sistemi con lamelle verticali.

Questi elementi, contribuendo al miglioramento prestazionale energetico dell'edificio, rientrano nel piano di detrazione fiscale del 65% della spesa in fase di ristrutturazione di edifici esistenti, come previsto dal D. Lgs 311/2006 relativo al rendimento energetico in edilizia.

Dal punto di vista compositivo-formale, le schermature contribuiscono all'arricchimento visuale della facciata: basti pensare a porticati, logge, balconi, pensiline, sistemi di verde.

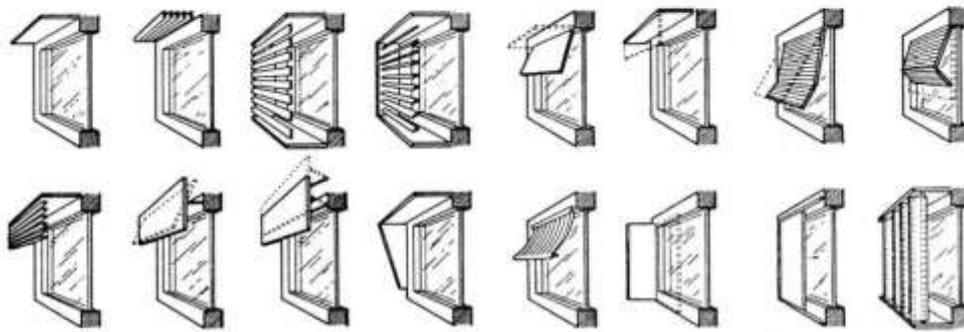


Figura 2.7- Varie tipologie di schermature solari

Sistemi di isolamento dell'involucro

Lo scopo principale del sistema di isolamento termico è quello di limitare le dispersioni e quindi il flusso di calore che si genera naturalmente tra ambiente interno ed esterno. Questa circostanza può essere ostacolata in primo luogo con un involucro edilizio costituito da materiali poco conduttivi e opportunamente isolanti.

Con il termine involucro edilizio si intende l'insieme di tutte le strutture verticali, siano esse opache o trasparenti, strutture di copertura, strutture orizzontali a contatto con il terreno o ambienti non riscaldati che separano lo spazio esterno da quello interno.

Come sottolineato nella "Terza conferenza interministeriale europea sull'abitare sostenibile" del Giugno 2002, l'adeguamento del patrimonio immobiliare mediante lavori di isolamento termico potrebbe consentire una riduzione delle emissioni di CO₂ degli edifici e dei relativi costi energetici del 42%.

La scelta dei materiali costituenti il sistema involucro, effettuata in sede di progetto, è uno dei momenti chiave per ottenere una buona prestazione energetica dell'opera e deve essere fatta tenendo conto della destinazione d'uso, della disponibilità delle materie prime e del contesto climatico in cui l'edificio sarà inserito.

I materiali e i prodotti che costituiscono l'involucro influiscono su:

- capacità di traspirazione
- qualità dell'aria interna
- dispersioni termiche
- comportamento igrometrico

È di grande attualità prediligere l'applicazione di materiali isolanti naturali, di origine organica piuttosto che sintetica, con un ridotto impatto ecologico.

Le normative forniscono gli indicatori di prestazione con relativi procedimenti di calcolo per verificare che i valori di tali materiali siano compatibili con i requisiti minimi indicati nelle direttive. Il soddisfacimento di tali richieste si ottiene previa valutazione delle caratteristiche del prodotto, in coerenza con lo scopo di applicazione richiesto dal progetto.

La stima delle prestazioni degli involucri edilizi e del loro variare in relazione alle condizioni ambientali esterne, costituisce un passaggio ineludibile nella progettazione e messa in produzione di sistemi e componenti di facciata. È a questo proposito che nel mercato dei materiali per l'isolamento degli edifici si sta assistendo ad un forte incremento di proposte innovative per tecnologie di prodotto e posa in opera. È importante capire come valutare l'efficacia di materiali e sistemi per l'isolamento termico in accordo alla normativa vigente, con l'obiettivo di sensibilizzare il progettista e gli altri attori del processo edilizio verso scelte consapevoli da un punto di vista tecnico. Il commercio di materiali e prodotti isolanti è soggetto a regole che favoriscono l'uniformità dell'informazione e di conseguenza il confronto tra loro, facilitato ancor più dalle DoP (dichiarazioni di prestazione).

2.4.2 Interventi attivi

Sono da considerarsi attivi tutti gli interventi attuabili parallelamente alla fase di progettazione, applicati al costruito con il fine di regolare gli scambi termici tra ambiente interno ed esterno attraverso l'uso di strumenti meccanici.

I mezzi per garantire il benessere al variare dei parametri climatici esterni sono riconducibili a due grandi categorie: quella degli elementi costruttivi di

separazione tra ambiente esterno ed interno, che costituiscono l'involucro edilizio, e quella degli impianti tecnici. Nell'ambito del processo edilizio, la progettazione degli impianti non costituisce una fase indipendente, ma si caratterizza per una continua interazione con la progettazione architettonica dell'opera. Questo processo interattivo può giocare un ruolo positivo, e quindi arricchire l'opera nel suo insieme o, al contrario, trasformarsi in conflittualità in grado di penalizzare il risultato complessivo.

Sistemi impiantistici da fonti energetiche rinnovabili

I sistemi attivi captano, accumulano, trasformano e utilizzano l'energia proveniente da fonti rinnovabili con una tecnologia di tipo impiantistico. Le principali tecnologie che riescono a sfruttare le risorse naturali per garantire un migliore comportamento termico ed energetico del sistema edificio sono:

1. Solare termico
2. Sistema fotovoltaico

Le altre tecnologie che utilizzano fonti rinnovabili (eolica, geotermica, moto ondoso, maremotrice, idraulica), presentano ancora notevoli difficoltà di applicazione, sia per le caratteristiche tecniche, sia per la presenza di vincoli ambientali, storici e normativi, nonché per l'effettiva disponibilità della fonte energetica alternativa.

Impianto solare termico (o pannello solare)

I collettori solari piani (o pannelli) sono dispositivi che servono a catturare e convertire l'energia elettromagnetica contenuta nella radiazione solare ed utilizzarla per produrre energia termica a bassa ($<60^{\circ}\text{C}$), media ($60^{\circ}\text{C} < T < 120^{\circ}\text{C}$) o alta temperatura ($>120^{\circ}\text{C}$) con scopi propri del riscaldamento degli ambienti, o dell'acqua calda sanitaria.

L'impianto solare termico è composto principalmente dai seguenti elementi:

1. Collettore solare (o pannello solare termico): rappresenta l'elemento preposto alla captazione della radiazione solare, alla sua conversione in energia termica e alla successiva trasmissione al fluido termovettore (miscela di acqua e glicole propilenico);

2. Serbatoio di accumulo: costituisce la riserva di acqua calda prodotta dall'impianto e pronta all'uso.
3. (eventuale) pompa di circolazione: è il dispositivo che genera la movimentazione del fluido termovettore, in caso di impianti che non sfruttano la circolazione naturale.
4. Tubazioni, valvole, carpenteria, sistemi di fissaggio, ecc.

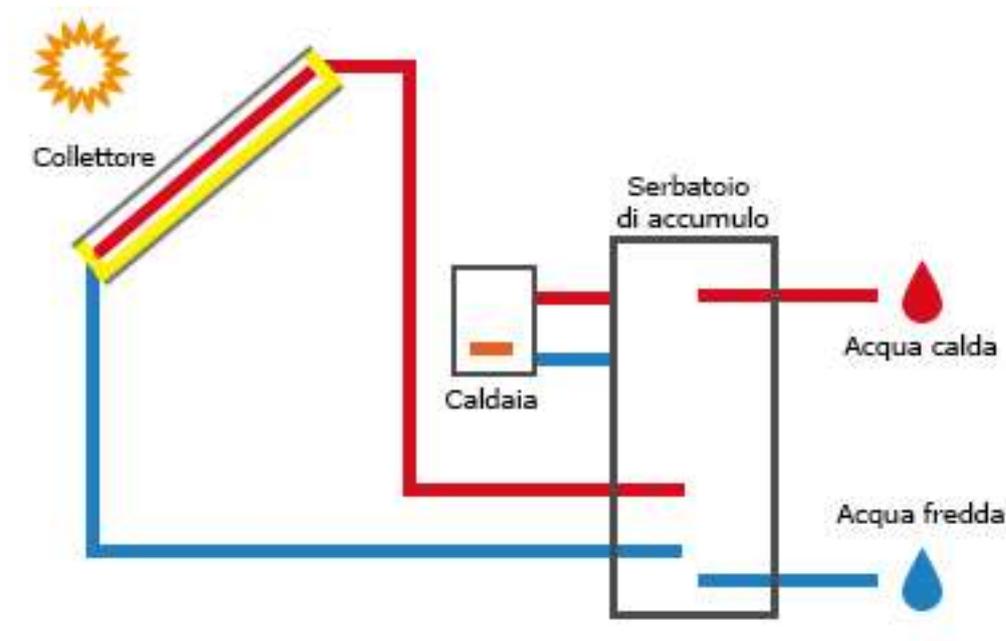


Figura 2.8- Schema di funzionamento di un collettore solare

L'installazione dei collettori prevede la disponibilità di una superficie esterna all'immobile servito (tetto, facciata, terrazzo ecc.) o un terreno che ne consenta l'esposizione verso Sud, con un'inclinazione ottimale rispetto al piano orizzontale variabile dai 15° ai 60°.

Impianto solare fotovoltaico

L'impianto solare fotovoltaico, sfruttando le caratteristiche di alcuni materiali semiconduttori, ha la funzione di convertire l'energia elettromagnetica contenuta nella radiazione solare, in energia elettrica direttamente utilizzabile, accumulabile in batterie o vendibile alla rete elettrica nazionale.

L'impianto fotovoltaico è composto dai seguenti elementi principali:

1. Modulo fotovoltaico (o pannello fotovoltaico): rappresenta l'elemento, composto da una o più celle fotovoltaiche, preposto alla captazione della radiazione solare e alla sua conversione in energia elettrica;
2. Sistema di conversione (inverter): sono i dispositivi elettronici in grado di permettere il funzionamento ottimale dei moduli, nonché la connessione tra il sistema fotovoltaico (in corrente continua) ed il sistema elettrico nazionale (in corrente alternata);
3. (eventuali) sistemi di accumulo (batterie) e regolatori di carica: dispositivi presenti solo nei sistemi non connessi alla rete elettrica nazionale (stand-alone), servono ad accumulare l'energia prodotta per consentirne l'utilizzazione in un tempo successivo;
4. Sistemi di protezione e manovra (quadri elettrici): contengono gli interruttori automatici per la protezione dai guasti;
5. Contatori dell'energia: dispositivi di contabilizzazione dell'energia prodotta, immessa e prelevata dalla rete;
6. Cavi, connettori, carpenteria, sistemi di fissaggio, ecc.

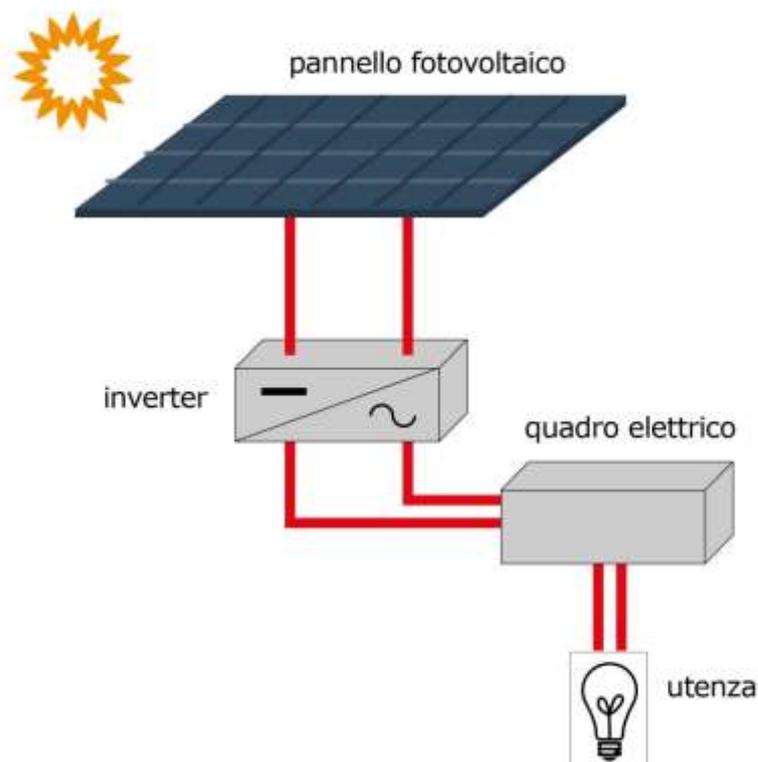


Figura 2.9- Principali elementi costituenti un sistema fotovoltaico

3 SISTEMI DI ISOLAMENTO ECOEFFICIENTE

3.1 ISOLANTI “BIO”

L'attuale volontà globale di una maggiore coscienza nei confronti dell'ambiente, individuato come bene comune, ha determinato profonde modifiche al processo progettuale, introducendo un nuovo parametro da valutare – l'energia- che lo rende più complesso. Ai consueti requisiti dei materiali da dover soddisfare, legati a sicurezza, stabilità, resistenza e durabilità, si affiancano, assumendo particolare rilevanza, quelli relativi al comportamento termico e igrometrico, strettamente connessi alle prestazioni energetiche di tutti i componenti che costituiscono l'organismo edilizio.

Come sottolineato nel capitolo precedente, agire sull'involucro è considerato il primo, più conveniente ed efficace passaggio per limitare le dispersioni termiche, ottenendo un miglioramento sia dell'aspetto energetico dell'edificio che del comfort abitativo, attraverso l'attuazione di una serie di scelte progettuali può assicurare il mantenimento delle condizioni di benessere degli ambienti, minimizzando l'uso degli impianti tradizionali. L'integrazione sinergica di interventi passivi e attivi è in grado di gestire come risorsa i flussi termici in entrata e uscita, trasformandoli in apporti gratuiti.

Parlare oggi di involucro edilizio vuol dire riferirsi ad un sistema tecnologico di chiusura adatto a svolgere diverse funzioni, responsabile dell'equilibrio fra condizioni interne ed esterne degli ambienti, oltre che capace di contribuire all'immagine, alla forma e alla qualità delle città. La specializzazione degli strati funzionali dell'unità tecnologica di chiusura degli edifici, e la copiosa possibilità compositiva, offerta dalle soluzioni tecniche, consentono al progettista di sfruttare al meglio le caratteristiche del sito e degli elementi utilizzati, senza rinunciare alle opportunità creative.

Un elemento ormai ineludibile tra gli strati funzionali, è quello dedicato all'isolamento termico. È opportuno però evidenziare che “isolare”, inteso come i flussi di calore che attraversano l'involucro, è un concetto relativamente recente; non vanta origini antiche come invece i materiali propriamente da costruzione come legno, laterizio, calce, dei quali la conoscenza di caratteristiche e prestazioni è molto più dettagliata. In Italia, è solo dalla metà degli anni '70, ovvero subito dopo l'allarme scatenato dalla crisi energetica del 1973, che ha iniziato a diffondersi l'uso degli isolanti.

L'ancora più recente introduzione del prefisso "bio" (bio-architettura, bio-climatica, bio-compatibile ecc.), identifica una nuova gamma di prodotti che si differenziano da quelli correntemente utilizzati grazie alla loro origine naturale, cioè non derivante da processi chimici, ma può essere animale, vegetale o minerale, e che richieda un basso contenuto di energia per il suo intero ciclo di vita.

La distribuzione di materiali isolanti naturali mostra ancora molti aspetti critici, rispetto a quella dei materiali convenzionali, ma la conoscenza ne va incentivata e diffusa. Il costo al momento superiore potrebbe abbassarsi grazie ad un incremento della produzione e delle vendite. Oltre il prezzo economico immediato, però, va anche considerato il prezzo ambientale a lungo termine che tutti paghiamo; se maggiore isolamento implica un extracosto iniziale, in pochi anni di gestione può voler dire fonte di reddito in quelli successivi, contribuendo ad aumentare il valore economico e prestazionale dell'immobile.

3.2 CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI ISOLANTI

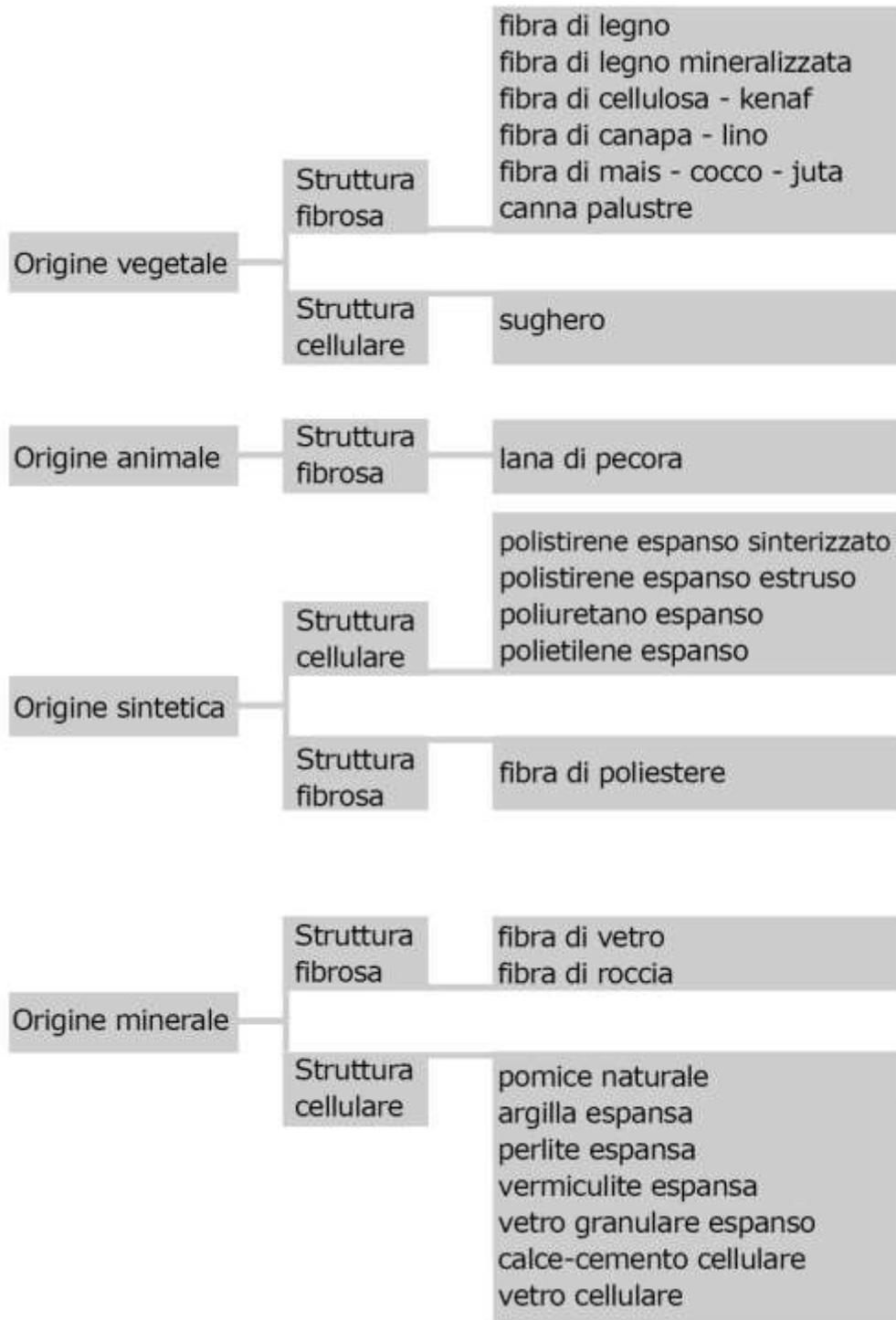
La classificazione è un primo e semplice strumento di divulgazione, conoscenza e approfondimento dell'informazione tecnica.

La più immediata suddivisione dei materiali isolanti è quella effettuata in base alla loro origine, che può essere sintetica o naturale (minerale, vegetale o animale), o alla loro struttura, che può essere fibrosa o cellulare (Tab. 3.1).

Questa però, non descrive in modo sufficientemente completo e approfondito la vasta gamma di materiali presenti oggi sul mercato: in base alla loro composizione vi sono materiali misti, che nascono dall'unione di materie prime di origine diversa per migliorare il loro comportamento prestazionale, o materiali che si differenziano per il loro processo produttivo e le trasformazioni a cui vengono sottoposti, e la forma con la quale vengono presentati in commercio.

Inoltre, per una scelta in armonia con l'obiettivo di sostenibilità ambientale, a parità di prestazioni è preferibile scegliere un prodotto con bassa energia inglobata, ovvero la quantità di energia usata per la sua fabbricazione. Questa deriva dalla somma dell'energia necessaria al reperimento delle materie prime, al processo produttivo, all'imballaggio (consumo di energia).

Tabella 3.1 - Classificazione in base all'origine, dei principali materiali isolanti



3.3 CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI

L'integrazione dei materiali isolanti nel sistema di involucro comporta numerosi benefici:

- Controllo dei flussi termici attraverso l'involucro edilizio, flussi dispersi nel periodo invernale ed entranti in quello estivo;
- Controllo delle temperature superficiali interne, finalizzato al soddisfacimento delle esigenze di comfort termico;
- Controllo dei fenomeni di condensa superficiale;
- Riduzione delle fluttuazioni di temperatura in ambienti non climatizzati.

Fino a circa quarant'anni fa, la gestione dell'habitat interno degli edifici, era affidata al solo controllo della temperatura con i vari sistemi di riscaldamento invernale (camini, stufe, caloriferi) mentre il contributo dell'involucro si limitava alla sua capacità di inerzia termica, dovuta ai forti spessori murari. Oggi, invece, sono riconosciute come importanti varie proprietà termofisiche che caratterizzano le prestazioni degli isolanti, tanto in inverno quanto in estate, alle quali è affidata la qualità dell'aria in un senso più ampio. Il quadro esigenziale sociale si è evoluto, ed è stato introdotto il concetto di comfort ambientale legato, non solo alla temperatura, ma anche all'umidità dell'aria, al livello di luminosità e rumorosità rilevati all'interno dello spazio abitato.

Le principali caratteristiche dei materiali che si riferiscono nello specifico alle proprietà isolanti sono:

- Comportamento termico
- Capacità e inerzia termica
- Comportamento termoigrometrico
- Comportamento acustico
- Comportamento igroscopico

È importante sottolineare che il comportamento dell'elemento di involucro in cui è inserito un materiale isolante è fortemente correlato alle proprietà complessive della stratigrafia e al posizionamento dell'isolante rispetto alla massa resistente.

3.3.1 Comportamento termico

Il metodo rappresentativo per valutare i fenomeni di trasmissione del calore consiste nell'affrontare l'analisi termica dei componenti isolanti con un approccio semplificato: studiare il comportamento in un regime termico stazionario con grandezze costanti nel tempo di un materiale considerato perfettamente omogeneo ed isotropo.

La conducibilità termica λ [W/mk] è la proprietà fondamentale che caratterizza la prestazione termica di un materiale isolante omogeneo. È un'attitudine specifica del materiale che dipende esclusivamente dalla sua natura, e non dalla sua forma o spessore. Essa rappresenta il flusso termico indotto da una differenza di temperatura unitaria che, in regime stazionario, attraversa l'unità di spessore di un materiale omogeneo in direzione perpendicolare alle linee isoterme (Fig. 3.1).

La conduttività dei materiali è influenzata da fattori quali: le condizioni di esercizio, l'invecchiamento, le modalità di posa e le caratteristiche di produzione.

Da essa dipende la resistenza termica di uno strato isolante di dato spessore, che si ottiene dalla relazione:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

dove:

d = spessore dello strato [m]

λ = conducibilità termica dello strato [W/mk]

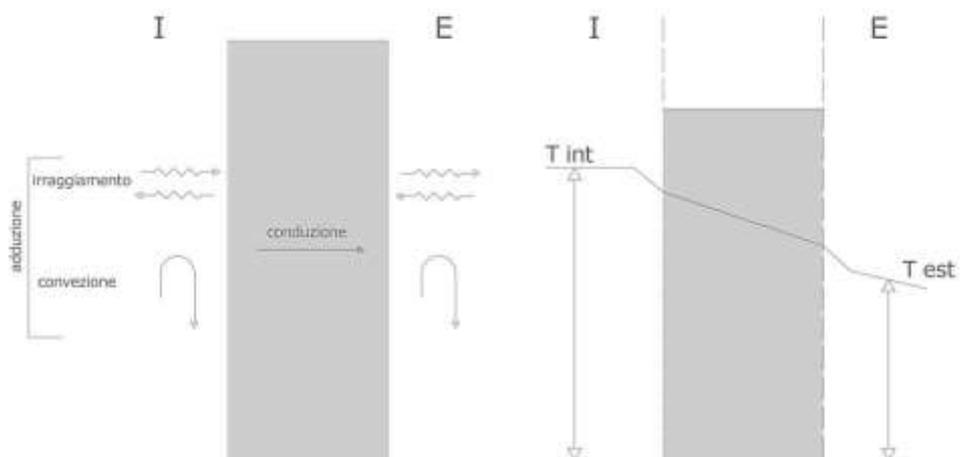


Figura 3.1 - Trasmissione del calore attraverso una parete omogenea

Capitolo 3

Le metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, secondo quanto indicato nella Direttiva 2010/31/CE, considerano come parametro di rendimento dei sistemi chiusura, la trasmittanza termica.

La trasmittanza termica tiene conto di tutti i fenomeni di trasmissione del calore che interessano l'involucro ed è definita dall'inverso della somma delle resistenze termiche superficiali di adduzione e delle resistenze interne dei singoli strati che costituiscono l'involucro (Fig. 3.2).

Si determina con la relazione:

$$U = \frac{1}{R}$$

con:

$$R = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$$

dove:

R_{si} = resistenza termica superficiale interna [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

R_n = resistenze termiche di progetto dei vari strati [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

R_{se} = resistenza termica superficiale esterna [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

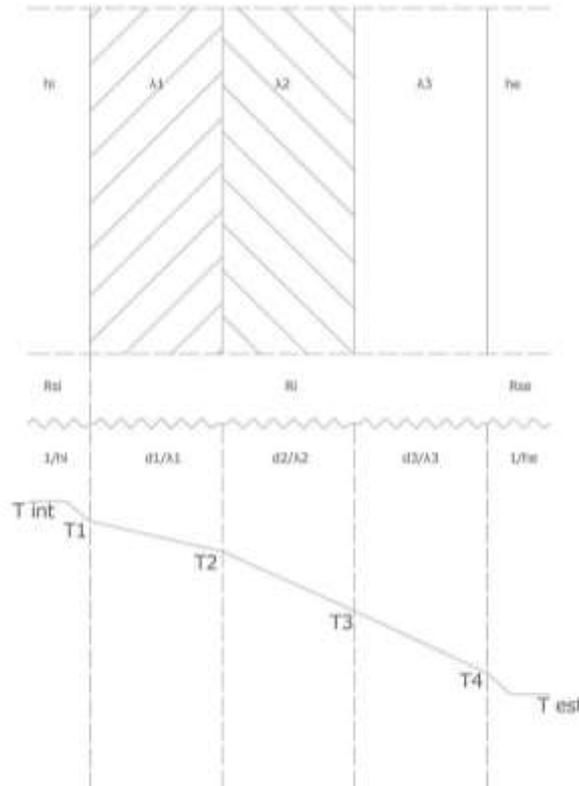


Figura 3.2 - Resistenza termica di una parete composta

La caratteristica di trasmittanza termica U [W/mK], esprime la potenzialità del sistema parete di moderare i flussi termici entranti o uscenti, controlla le temperature superficiali interne al fine di soddisfare i requisiti di comfort termico evitando l'insorgenza di fenomeni di condensa superficiale.

La trasmittanza termica, o fattore di trasmissione globale:

$$U = \frac{\Phi}{A \cdot \Delta T} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

indica il flusso termico Φ , trasmesso nell'unità di tempo, che in condizioni stazionarie attraversa l'unità di area A di componente di involucro per differenza unitaria di temperatura interna ed esterna ΔT .

La trasmissione del calore attraverso i componenti opachi dell'involucro, avviene secondo tre modalità:

- Per convezione, tra le superfici interna ed esterna dell'involucro. L'aria a contatto con l'involucro scambia calore, cambia di temperatura e, conseguentemente di densità, dando vita a movimenti ascensionali o discendenti che contribuiscono al trasferimento del calore (moti convettivi);
- Per irraggiamento, tra le superfici interna ed esterna dell'involucro, e i corpi che sono presenti nell'ambiente interno ed esterno, attraverso l'emissione e l'assorbimento di radiazioni infrarosse;
- Per conduzione all'interno dei mezzi continui (solidi o fluidi in quiete) di cui si compone l'involucro per effetto di scambi di energia tra particelle contigue.

Poiché le trasmissioni del calore per convezione e irraggiamento coesistono, e sono difficilmente separabili nei loro effetti, si è soliti considerarli insieme e parlare di trasmissione per adduzione.

Il flusso di calore Φ che in condizioni stazionarie passa per adduzione e conduzione attraverso l'involucro, è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura ΔT tra l'ambiente interno ed esterno, all'area A interessata dal flusso e alla trasmittanza termica dell'involucro secondo la formula:

$$\Phi = \frac{Q}{t} = U \cdot A \cdot \Delta T [W]$$

Per molti materiali isolanti è possibile fare riferimento ai metodi di calcolo e valori riportati nelle norme che risultano piuttosto complete per i prodotti

convenzionali, ma mancano del tutto informazioni sulla maggioranza degli isolanti ecocompatibili, per i quali ci si deve affidare ai valori dichiarati dal produttore.

3.3.2 Capacità e inerzia termica

Ogni elemento costituente l'involucro e la struttura edilizia, così come ogni corpo di massa non trascurabile posto all'interno dell'edificio, possiede una capacità termica che rappresenta la quantità di calore necessario per variare di un grado la sua temperatura. La capacità termica di un corpo (espressa in J/K) è uguale al prodotto fra la sua massa (kg) e il calore specifico del materiale di cui è composto (J/kgK). Per cui, a parità di calore specifico, maggiore è la massa di un corpo, maggiore sarà la sua capacità termica (Fig. 3.3).

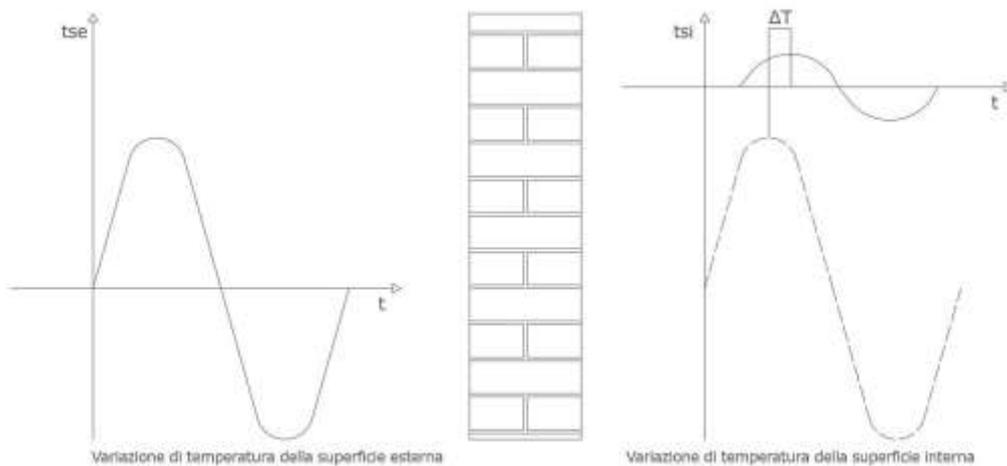


Figura 3.3 - Attenuazione di temperatura dovuta all'inerzia termica della parete

Il termine inerzia è generalmente utilizzato per descrivere la capacità di un materiale o di una struttura edilizia di immagazzinare energia termica e di ritardare la trasmissione del calore.

Si dice che un corpo è dotato di elevata inerzia termica quando la sua temperatura varia molto lentamente nel tempo in conseguenza di rapide variazioni della temperatura dell'ambiente in cui il corpo stesso si trova.

Perché un corpo attesti elevata inerzia termica è necessario che la sua capacità termica sia elevata e che il coefficiente di trasmissione del calore dall'ambiente al corpo e viceversa sia abbastanza piccolo. L'inerzia termica

dipende dunque dal calore specifico (c_p), dalla sua massa superficiale (M_s) e dalla conduttività termica del materiale (λ).

Gli effetti di un'elevata inerzia termica sono quelli di attenuare e sfasare nel tempo le fluttuazioni di temperatura all'interno dell'ambiente dovute alle variazioni di temperatura esterna.

I benefici conseguibili con un'ottimale inerzia termica riguardano sia la possibilità di contenere la temperatura interna degli ambienti nel periodo estivo, sia la possibilità di sfruttare al meglio gli apporti energetici solari nel periodo invernale, aumentando in entrambi i casi il comfort termico e riducendo al contempo i consumi energetici per la climatizzazione.

Nel periodo estivo, di giorno, l'involucro accumula calore esterno rilasciandolo all'interno attenuato e in ritardo, quando la temperatura dell'aria è minore ed è possibile raffrescare gli ambienti tramite ventilazione naturale.

Nel periodo invernale, durante il giorno, la massa termica contribuisce ad immagazzinare il calore proveniente dalla radiazione solare, rilasciandolo nelle ore serali e notturne, quando è maggiormente necessario. Evita inoltre il rapido abbassamento di temperatura dei locali.

Questo comportamento permette di affidare alla parete un importante ruolo di regolazione delle variazioni di temperatura degli ambienti e può essere verificato attraverso la valutazione di due parametri: il fattore di attenuazione f_a ed il coefficiente di sfasamento ϕ . Il fattore di attenuazione f_a qualifica la riduzione di ampiezza dell'onda termica nel passaggio tra ambiente esterno ed interno; il coefficiente di sfasamento ϕ (espresso in ore) rappresenta il ritardo temporale del picco di flusso termico della parete, rispetto a quello che sarebbe considerato istantaneo.

3.3.3 Comportamento termoigrometrico

Un'altra verifica importante è quella dedicata ai fenomeni di condensazione, causa di fenomeni di degrado, con il conseguente peggioramento delle prestazioni e del livello di qualità dell'aria, e la comparsa di muffe ed efflorescenze, che può avvenire all'interfaccia fra due strati oppure all'interno delle cavità proprie del materiale.

Tutti i materiali, compresi i componenti edilizi, sono infatti interessati da fenomeni di diffusione del vapore acqueo, determinati dalla naturale migrazione del vapore da ambienti a pressione maggiore, verso quelli a pressione di vapore minore. La differenza di pressione che si genera tra

ambienti a temperatura diversa, causa la diffusione del vapore acqueo nelle pareti.

Tale fenomeno è evitabile con una progettazione consapevole della stratigrafia dell'involucro, al fine di evitare l'insorgenza di ponti termici; si manifesta infatti quando il vapore ad una determinata pressione, durante l'attraversamento della parete, raggiunge il valore di saturazione entrando in contatto con una superficie più fredda, causandone la condensazione e il cambiamento di stato da aeriforme a liquido.

Le proprietà influenti la diffusione sono le resistenze termiche e la permeabilità al vapore di ogni strato.

Il fenomeno è estremamente complesso, tuttavia l'approccio convenzionale di verifica si basa sul metodo semplificato del calcolo della temperatura di rugiada e pressione di saturazione, con il supporto del grafico di Glaser, che permette di effettuare l'analisi partendo dalla conoscenza delle proprietà termiche e igrometriche principali degli strati componenti la parete.

La permeabilità al vapore acqueo μ è definita come la portata di vapore che si diffonde attraverso un materiale omogeneo di spessore unitario in direzione perpendicolare alle isobare, per una differenza parziale di pressione unitaria, in determinate condizioni di temperatura e umidità [kg/msPa]. È un valore generalmente fornito dai produttori e calcolato come fattore di resistenza al vapore μ , che non dipende dalla forma o dallo spessore, ma è dato dal rapporto tra la resistenza alla diffusione del vapore del materiale considerato e quello di uno strato d'aria di uguale spessore, al quale è attribuito un fattore di resistenza pari a 1. Esso è quindi un indice di quante volte è più grande la resistenza di un determinato strato di materiale rispetto ad uno di aria dello stesso spessore.

Un valore di μ inferiore a 10 indica una diffusione elevatissima; da 50 a 500 una diffusione limitata (relativamente impermeabili); da 500 a ∞ la diffusione è tendente allo 0 (barriere al vapore).

3.3.4 Comportamento igroscopico

L'igroscopicità è la capacità di una sostanza di assorbire prontamente le molecole d'acqua presenti nell'ambiente circostante, ed è espressa in valore percentuale.

Conoscere l'attitudine del materiale isolante in presenza di acqua o umidità è importante poiché determina nell'elemento modificazioni sia dal punto di vista fisico, riguardanti ad esempio le variazioni di peso, di resistenza

meccanica, di conducibilità termica, sia per un maggiore rischio di attaccabilità chimica e biologica che si verifica in ambienti umidi.

Materiali definiti ugualmente igroscopici possono reagire diversamente tra loro. Una delle proprietà più influenti del comportamento igroscopico è la porosità, che conseguentemente incide anche sulla risposta dell'elemento ad azioni di gelo-disgelo. Ad esempio in alcuni materiali la singola fibra è impermeabile e l'acqua va a riempire gli interstizi tra di esse, sostituendosi all'aria, con conseguente e drastica riduzione della capacità isolante del materiale; in altri l'acqua viene assorbita dalle singole fibre, con conseguente incremento di volume, ma minore effetto sulle caratteristiche di isolamento termico.

3.3.5 Comportamento acustico

Dal punto di vista acustico un materiale isolante interviene a tre diversi livelli:

- Fonoassorbimento;
- Fonoisolamento per rumori di propagazione aerea;
- Fonoisolamento per rumori che si trasmettono tramite le strutture.

In relazione al fonoassorbimento, cioè alla capacità di assorbire il suono incidente, il parametro caratterizzante è il coefficiente di assorbimento acustico α , valore adimensionale che esprime il rapporto tra l'energia sonora assorbita e quella incidente. Sono fonoassorbenti i materiali porosi caratterizzati da struttura fibrosa o alveolare aperta; è determinante per il livello di prestazione, lo spessore del materiale e la sua applicazione.

Il parametro che caratterizza invece il comportamento di un componente in merito alla sua capacità di ridurre la trasmissione del rumore aereo tra ambienti contigui, è il potere fonoisolante R , espresso in dB e dato dalla relazione:

$$R = 10 \log \frac{1}{t}$$

dove t è il coefficiente di trasmissione, ottenuto dai rapporti tra l'energia sonora trasmessa e l'energia sonora incidente.

Il potere fonoisolante indica dunque l'attitudine di un materiale ad impedire la propagazione del suono nell'aria; dipende essenzialmente dalla sua massa frontale, ma sono parametri influenti anche la stratigrafia, la permeabilità all'aria, la presenza e la dimensione di cavità, il tipo di posa e ancoraggio.

I materiali isolanti più adeguati sono quelli ad alta intensità, ma è comunque la stratigrafia complessiva dall'elemento parete che determina il valore finale.

Per quanto riguarda il fonoisolamento da rumori che si propagano per via strutturale, come il rumore da calpestio sui solai, il parametro di riferimento è il livello di pressione sonora di calpestio, definito come il livello medio di pressione sonora nell'ambiente disturbato quando sul pavimento di quello disturbante agisce un generatore di calpestio.

Per valutare il grado di isolamento da rumore di un pavimento si definisce l'attenuazione del livello di rumore da calpestio ΔL [dB]. Come per il potere fonoisolante, anche per l'indice di attenuazione del rumore di calpestio, il valore finale è stabilito dalla stratigrafia complessiva della parete.

3.4 PRINCIPALI RIFERIMENTI NORMATIVI PER L'ANALISI DEI MATERIALI ISOLANTI

EN 13172:2012 Prodotti isolanti termici - Valutazione di conformità

- **Comportamento termico:**

Metodi di prova:

UNI EN 12667; 12939 Materiali da costruzione e isolanti termici per l'edilizia. "Resistenza termica e conduttività con il metodo della piastra calda con anello di guardia"

UNI EN 1602:2013 Isolanti termici per l'edilizia. "Determinazione della massa volumica apparente"

- **Comportamento termoigrometrico:**

UNI 10351:2015 Materiali e prodotti per l'edilizia. "*Proprietà termoigrometriche: procedura per la scelta dei valori di progetto*" (integrazione e aggiornamento della UNI EN ISO 10456)

UNI EN 12086:2013 Isolanti termici per edilizia. "*Determinazione delle proprietà di trasmissione del vapore acqueo*"

- **Comportamento igroscopico:**

UNI EN 12091:2013 Isolanti termici per edilizia. "*Determinazione alla resistenza al gelo-disgelo*"

- **Comportamento acustico:**

UNI EN 29053:1993 Materiali per applicazioni acustiche. "*Determinazione della resistenza al flusso d'aria*"

4 LA CANAPA

4.1 CARATTERISTICHE BOTANICHE

La diffusione della *Cannabis Sativa L.* in varie regioni del mondo, e la sua adattabilità a climi e ambienti differenti hanno conferito alla specie botanica caratteristiche diverse (Fig. 4.1) a seconda del luogo di crescita. Attualmente si associano tali caratteristiche a tre varietà differenti, dalla classificazione suggerita dal botanico russo D.E. Janichevsky (1924):

- *Cannabis Sativa* dalle dimensioni ragguardevoli, può raggiungere un'altezza di quattro metri; la produzione di resina non è particolarmente abbondante e il periodo di fioritura varia tra le 9 e le 12 settimane;
- *Cannabis Indica* non supera gli 1,5-2 metri di altezza, la produzione di resina è generosa e il periodo di fioritura è compreso tra le 6 e le 9 settimane;
- *Cannabis Ruderalis* non arriva al metro di altezza, il periodo di fioritura molto breve si aggira intorno alle 4 settimane ed è molto resistente alle basse temperature, può quindi crescere spontaneamente anche ad altitudini elevate.

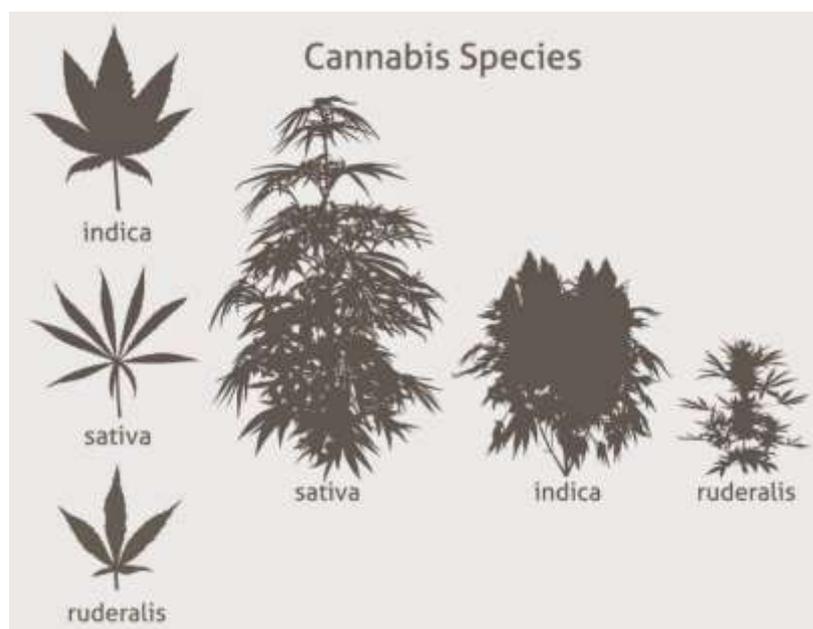


Figura 4.1 - Specie botaniche appartenenti alla famiglia delle cannabaceae

Nel 1976 però, due studiosi canadesi, Small e Cronquist, confermarono la proposta di Linneo del 1753, il quale parlò esclusivamente di *Cannabis Sativa* come unica specie molto variabile e dalla quale l'uomo, attraverso una selezione artificiale, è in grado di dare origine a nuove tipologie.

La *Cannabis*, della famiglia delle *Cannabaceae*, è una pianta dioica, ovvero presenta due tipi di piante diverse relative al genere: quella maschio, che produce polline, e la pianta femmina che, fecondata, produce semi e fiori.

Le inconfondibili foglie a sette punte partono tutte dallo stesso stelo, in numero variabile e sono sottili, di verde intenso, dai bordi seghettati, con evidenti nervature e una sottile peluria. Lo stelo diventa molto resistente man mano che la pianta si avvia a maturazione, e può tranquillamente superare i cinque metri di altezza. L'apparato radicale, invece, rivela un fittone di 30-40 centimetri da cui si diramano sottili ramificazioni. Pianta annuale, la cannabis ha un ciclo breve, con semi piantati all'inizio della primavera, fioritura a metà estate e maturazione autunnale. I semi germogliano in meno di una settimana e l'impollinazione avviene generalmente con il vento, poiché insetti come le api non sono attratti dai fiori della cannabis (Fig. 4.2).



A	Infiorescenza della pianta maschile	7	Fiore pistillato con ovale
B	Infiorescenza della pianta femminile	8	Seme con bracteolo
1	Fiore staminato	9	Seme senza bracteolo
2	Organo riproduttivo del fiore staminato	10	Seme (visione laterale)
3	Organo riproduttivo del fiore staminato	11	Seme (sezione trasversale)
4	Grani di polline	12	Seme (sezione longitudinale)
5	Fiore pistillato con bracteolo	13	Seme (senza pericarpio)
6	Fiore pistillato senza bracteolo		

Figura 4.2 - Aspetti morfologici delle cannabaceae

Se coltivate per fibra, generalmente le piante vengono tenute molto vicine tra loro, e in tal modo si allungano a dismisura, senza produrre rami, con un piccolo cespuglio in cima. In questi casi non si procede neppure alla divisione tra maschi e femmine, cosa invece essenziale per coltivazioni a scopo medico e/o intossicante. Sono i fiori della femmina a produrre la maggiore quantità della sostanza resinosa contenente il principio attivo, il delta-9-tetraidrocannabinolo, meglio noto con la sigla THC. Le infiorescenze spuntano all'estremità dei rami, e così raccolte proteggono lo sviluppo dei semi, ovali e coriacei. Pur se le ricerche non sono ancora definitive, pare che la pianta produca tale sudorazione come difesa dall'eccessivo calore, in modo da trattenere l'umidità necessaria alla maturazione dei semi: quando il processo riproduttivo è concluso, la resina non viene più prodotta.

Sono oltre 460 i componenti chimici della pianta, e più di 60 rivelano la struttura tipica dei cannabinoidi.

Tra questi, il delta-9-THC, presente intorno all'1-5% del peso totale, è l'unico finora scoperto ad avere notevoli proprietà psicoattive. Tale percentuale si riduce a meno dello 0.5 % nelle piante coltivate per fibra, che invece sono ricche di cannabinolo.

Estremamente forte e resistente, la cannabis riesce a svilupparsi e riprodursi allo stato selvatico praticamente ovunque, pur se preferisce terreni sciolti e sabbiosi, ricchi di azoto e potassio. Non richiede particolari attenzioni, salvo discrete innaffiature in fase germinativa. Le tecniche di coltivazione differiscono molto tra loro a seconda delle zone e della destinazione finale.

La cannabis è una pianta molto adattabile a suoli e condizioni climatiche differenti (Fig. 4.3). Essa preferisce terreni composti da una percentuale di sabbia (dal 35 al 55%), che permette la circolazione idrica, l'ossigenazione e la ramificazione delle radici, di argilla (dal 10 al 25%), capace di mantenere un'umidità sufficiente nei periodi asciutti e trattenere i nutrienti, e di limo (dal 25 al 45%). La cannabis è in grado di tollerare una portata di precipitazioni dai 30 ai 400 cm all'anno, una temperatura media annuale compresa tra i 6 e i 27°C e un valore di pH tra 4.5 e 8.2.

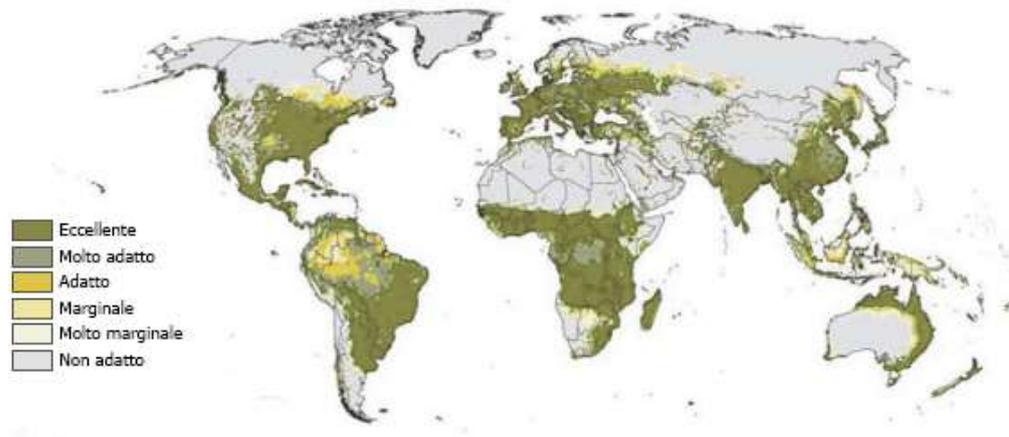


Figura 4.3 - Aree geografiche adatte alla canapicoltura

4.1.1 Composizione

La pianta di cannabis e i suoi prodotti, sono costituiti da un elevato numero di componenti chimici con attività biologica più o meno nota.

A seconda della parte della pianta, della varietà considerata e dalla condizioni di coltivazione, la percentuale di fitocannabinoidi presenti varia notevolmente. I fitocannabinoidi generalmente caratteristici della cannabis sono: il tetraidrocannabinolo, il cannabidiolo, il cannabinolo, il cannabigerolo e il cannabicromene.

Il cannabigerolo (CBG) è stato il primo cannabinoide ad essere identificato.

Il cannabidiolo (CDB) è stato isolato dall'olio estratto dalla cannabis sativa nel 1940 (Adams, Hunt, & Clark, 1940) ma la sua struttura corretta è stata determinata solo nel 1963 (Mechoulam & Shvo, 1963). Questo componente, e il corrispondente acido, l'acido cannabidiolico (CBDA) sono presenti in percentuali elevate nella cannabis utilizzata per produrre fibre tessili. Il CDB è importante per l'attività sul sistema nervoso centrale, che non induce effetti psicotici, ma al contrario sembra avere proprietà antipsicotiche (Mason, Morgan, Stefanovic, & Curran, 2008).

Il Delta-9-Tetraidrocannabinolo (THC) rappresenta il principale costituente psicoattivo, essendo il primo responsabile dell'attività che i derivati della pianta di cannabis esercitano sul sistema nervoso centrale di chi li assume, e la percentuale presente nella pianta, ne definisce la potenza.

4.2 CENNI STORICI

Non è quella da “stupefacente” ma la canapa per usi industriali, in cui l'Italia eccelleva fino agli anni Cinquanta. Nel 1950 la Campania era tra le prime Regioni italiane per la coltura della canapa da fibra. La coltivazione in questa Regione, insieme a quelle della Emilia -Romagna, del Veneto e del Piemonte, poneva l'Italia al secondo posto nella produzione mondiale di fibra di canapa (Legambiente, 2015).

Numerosi reperti archeologici ritrovati non fanno altro che confermare come in ogni epoca storica le diverse popolazioni del pianeta avessero imparato a coltivare ed usare la canapa per molti scopi. Archeologi, antropologi, economisti e storici concordano sul fatto che da molto prima del 1000 a.C. e fino alla fine del XIX secolo la canapa fosse diffusamente coltivata, fornendo materia prima per i più diversi usi: fibre, tessuti, olio per illuminazione, carta, medicina, cibo.

Pare che i primi impieghi nel campo medicale e per la produzione di fibra risalgano addirittura al XXVII secolo prima di Cristo; a quel tempo sembra venisse usata la canapa che cresceva spontanea. Le sue proprietà terapeutiche e ludiche erano ben note agli antichi abitanti di India, Cina, Medio Oriente e Asia Sud-Orientale, i quali la selezionarono principalmente per il contenuto in resina. In Europa ed in Estremo Oriente la canapa è stata coltiva in prevalenza per la produzione di fibra e di semi.

La *Cannabis Sativa L.* è una pianta originaria dell'Asia Meridionale, la vasta regione che comprende il subcontinente indiano e l'altopiano iraniano. Questi territori furono storicamente abitati da popolazioni seminomadi che, conoscendo la canapa e utilizzandola per gli scopi più diversi, la diffusero in Europa, attraverso le loro migrazioni, già a partire dal VII sec a.C.

Nel corso del XVI sec, la canapa si diffuse nel continente americano per la richiesta espressa dai primi insediamenti europei di avere un'importante risorsa per la produzione in loco di tessuti, filati e altri prodotti di prima necessità.

Nel 1937, con il “Marijuana Tax Act”, inizia la campagna denigratoria e quindi il declino della coltivazione della canapa. Grazie all'influenza mediatica di Hearst, padre del giornalismo scandalistico, nonché direttore delle più importanti e influenti testate giornalistiche americane dell'epoca, durante gli anni del proibizionismo, in collaborazione con H. J. Anslinger, capo dell'ufficio narcotici, inizia la battaglia contro la canapa, mascherata con il nome messicano “*marijuana*”, e fu inserita nella lista degli stupefacenti e

delle sostanze dannose che creano dipendenza, associata a “negri, ispanici, filippini...” alla musica jazz, al compimento di atti impuri, facendo quindi leva su un diffuso sentimento razzista.

La canapa e la sua versatilità facevano paura.

La nascente e promettente industria petrolchimica si sentiva minacciata dall'estesa coltivazione della *Cannabis Sativa L.* Infatti molti dei prodotti derivanti dai processi industrializzati quali carta, fibre tessili, olii combustibili, farmaci e altro, possono essere realizzati con materie prime derivanti dalla canapa. Il pioniere dell'automobile Henry Ford affermava infatti, alla fine degli anni '20 che *“il carburante del futuro sta per venire dal frutto, dalla strada o dalle mele, dalle erbacce, dalla segatura, insomma, da quasi tutto. C'è combustibile in ogni materia vegetale che può essere fermentata e garantire alimentazione”* e nel 1941 la *Hemp Body Car* era una realtà: costituita per il 70% da plastiche vegetali, ricavate dai semi di canapa e soia, con un motore alimentato da metanolo di canapa, ovvero canapa distillata, il cui impatto inquinante era pari a zero (Fig. 4.4).



Figura 4.4 - 1941 H. Ford presenta la "Hemp car"; 2013 Lotus presenta Eco Elise, prototipo realizzato con materiali rinnovabili, compresi lavorati della canapa

Dal 1955, in America viene proibita la coltivazione della canapa, e da qui in tutto il mondo, questa pianta viene associata direttamente alla sostanza stupefacente che si ricava da alcune specie.

La riscoperta è avvenuta in Europa all'inizio degli anni '90, grazie al contributo dell'UE per la coltivazione e lo sviluppo di tecnologie innovative per la trasformazione delle piante da fibra.

In Italia la coltivazione è tornata possibile dal 1998, nonostante fino a trent'anni prima fosse stato il Paese produttore con la qualità migliore e secondo solo alla Russia per superficie coltivata. Ciò è stato possibile in virtù della Circolare del Ministero delle Politiche Agricole (Direzione Generale delle Politiche Agricole ed Agroindustriali Nazionali) del 2 dicembre 1997, in cui vengono definite le modalità da seguire da parte degli agricoltori interessati, onde prevenire confusione con le coltivazioni da droga.

4.3 BENEFICI AMBIENTALI

La piantagione di canapa allenta, addolcisce e ombreggia il terreno. Le foglie che cadono formano una pacciamatura naturale e preservano l'umidità del suolo. Il sistema di radici a fittone, permette alla pianta una maggiore autonomia dal punto di vista dell'approvvigionamento idrico e, penetrando in profondità, aerea il suolo e ne previene l'erosione; la materia organica che si genera dalla sua macerazione, dopo la coltivazione, rende il terreno più facilmente lavorabile, oltre ad essere un'ottima coltura di rotazione per aumentare la salute del suolo.

È inoltre un bio-accumulatore, cioè una pianta capace di immagazzinare nelle foglie eventuali metalli pesanti presenti nel terreno, senza compromettere il suo accrescimento: peculiarità che la rende impiegabile per la fitodepurazione (Conrad & Hansen, 2007).

Diversi studi internazionali dimostrano che vengono accumulati nichel, piombo, cromo, rame e cadmio nelle foglie, ma non nella fibra che risulta comunque commercializzabile. Se coltivata in fanghi di depurazione non industriali si ottiene un incremento di biomassa associato al decremento della concentrazione di inquinanti nel suolo. La canapa industriale è quindi un ottimo strumento di bonifica per terreni contaminati.

È possibile concludere che la canapa migliora i terreni. Dopo il passaggio di questa coltura sono infatti riferiti consistenti incrementi delle produzioni di cereali ed eccezionali performance delle colture orticole. Uno dei fattori di tale azione è, come si è visto in precedenza, dovuto all'azione delle sue

radici. Con esse infatti, la canapa raggiunge profondità notevoli dove preleva i nutrienti che in seguito, spogliandosi delle foglie, in parte restituisce allo strato superficiale determinando anche un'azione contro la desertificazione. A questo bisogna aggiungere l'azione meccanica svolta dalla radice, nonché la presenza nella pianta stessa di sostanze che hanno proprietà battericide e insetticide. La canapa poi protegge i terreni dal dilavamento e, durante la fase vegetativa, trattiene notevoli quantità di azoto prelevato dal terreno impedendone la percolazione in falda.

Essendo caratterizzata da un rapido accrescimento contribuisce in modo sensibile, all'assorbimento di carbonio, e quindi all'abbattimento dei valori di CO₂ presenti in atmosfera.

Si può far riferimento a due ricerche di Van der Werf: una del 2004 e l'altra del 2008 nelle quali sono state confrontate le colture da seme tradizionali quali grano, barbabietola da zucchero e patate con la canapa. È stato dimostrato che la richiesta di energia per la coltivazione della canapa è nettamente inferiore a quella necessaria per le altre; inoltre gli impatti ambientali di canapa in termini di eutrofizzazione, cambiamento del clima, acidificazione, e tossicità terrestre erano chiaramente più bassi.

4.4 DERIVATI



Figura 4.5 - I molteplici usi e prodotti derivanti dalla lavorazione della pianta di canapa

4.4.1 Produzione di carta

L'uso della fibra di canapa per la polpa di carta, risale a più di 2000 anni fa. La più antica testimonianza di pezzo di carta del mondo, venne scoperto dagli archeologi nel 1975 in una tomba presso Sian, in Cina. Consiste in un frammento di 10 cm² che può essere datato tra gli anni 140 e 87 a.C.

Benché la canapa fosse la merce più trattata nel mondo sino agli anni trenta del 1800 attualmente, solo il 5% della carta mondiale viene fatta da piante annuali come la canapa, il lino, il cotone, parti della canna da zucchero, lo sparto, la paglia del fieno, le canne, il sisal, l'abaci, le foglie di banano, l'ananas ed altre specie esotiche (Aldrich, 1997).

Il recente rinnovato interesse nella canapa come produttrice di fibra per la carta sembra originare da un forte motivo ambientale. Tutte le foreste primarie d'Europa, e la maggior parte di quelle Americane, sono state distrutte, tra gli altri motivi per produrre la carta, ad un costo ambientale enorme. In queste regioni la canapa ha un numero di vantaggi notevole come

fonte alternativa di fibra per la carta. La canapa non necessita di pesticidi o erbicidi e produce da tre a quattro volte fibra in più per ettaro all'anno delle foreste.

E infine: il riciclaggio della carta è stato inventato per sopperire all'errore di eliminare le nostre foreste primarie. Tecnicamente parlando, non si ha bisogno di riciclare la carta di canapa perché è un materiale grezzo rinnovabile. Uno svantaggio nell'utilizzare la canapa o altre piante annuali come fonte di fibra per la carta è che la tecnologia attuale è stata ottimizzata per la produzione di fibra legnosa, così ci sarebbe bisogno di riconvertire gli attuali impianti per applicare questa tecnologia alla fibra di canapa.

4.4.2 Produzione di fibra tessile

La fibra di canapa è più robusta e resistente al logorio e alla trazione di quella di altre piante: se ne realizzavano vele per le navi, corde per legare i fasciami e per le imbarcazioni, tende militari, calzature, abbigliamento da lavoro; erano di canapa i primi jeans *Levi's*.

Nel nostro Paese, gran parte dell'antica biancheria da casa era di canapa fine. Con la selezione delle varietà e l'affinamento delle tecniche di lavorazione della canapa tessile, l'Italia aveva raggiunto nel mondo il primato per la produzione di filati e tessuti di canapa di qualità.

La fibra di canapa che si fila nel mondo oggi proviene soprattutto dalla Cina, che ne è il maggior produttore.

4.4.3 Nutraceutica

Un nutraceutico è un "alimento-farmaco", ovvero un alimento che associa componenti nutrizionali, selezionati per caratteristiche quali alta digeribilità, ipo-allergenicità, alle proprietà curative di principi attivi naturali.

I semi di cannabis sono una fonte poco conosciuta di acidi grassi Ω -3.

100 g di olio di semi di cannabis contengono circa 19 g di acido alfa-linoleico. Il rapporto di circa 3:1 di acidi grassi Ω -6 e Ω -3 rende l'olio di semi di cannabis un alimento nutritivo di grande qualità. Il seme contiene approssimativamente il 30% in peso di olio, e non contiene THC; non ha quindi effetti psicoattivi.

I semi di canapa contengono il 20-25% proteine, 20-30% carboidrati, 10-15% fibre e tutti gli aminoacidi essenziali, inoltre i semi risultano ricchi di numerose molecole dalle proprietà benefiche per la salute dell'uomo.

Oltre all'olio, dalla macinazione dei semi, si può ottenere una farina senza glutine, naturalmente ricca di proteine, acidi grassi essenziali, vitamine e minerali, con la quale ottenere diversi prodotti derivati quali ad esempio la pasta.

4.4.4 Cosmesi

In cosmesi l'olio di semi di canapa è considerato un vero toccasana. Contiene il più alto quantitativo di acidi grassi essenziali, molto utili per pelle e capelli. Ha eccellenti proprietà emollienti, che agendo in profondità, aiutano a preservare la pelle da arrossamenti, irritazioni ed infiammazioni. Oltre ad essere ricco di proteine e vitamine, è facilmente assorbibile, non unge, nutre, e combatte i radicali liberi.

Un altro prodotto utile in cosmesi e aromaterapia, è l'olio essenziale, derivato dalla distillazione in corrente di vapore dei fiori di canapa. Questo agisce sulle infiammazioni e la cicatrizzazione ed è utile in caso di affaticamento muscolare, crampi e gonfiori. In aromaterapia, l'olio essenziale possiede un'azione calmante, rilassante, stimolante, riequilibrante. Esso decongestiona il sistema respiratorio.

4.4.5 I prodotti illeciti

I prodotti illeciti della cannabis, rientrano in tre categorie principali: la *marijuana*, l'*hashish* e la cannabis liquida (olio di cannabis). Essi presentano diverse percentuali medie di Delta-9-Tetraidrocannabinolo (THC).

Sono le infiorescenze femminili della cannabis che contengono la percentuale maggiore di Δ^9 -THC (10-12%; fonte UNODC 2009). La *marijuana* è il termine con cui si indica la sostanza stupefacente ottenuta dalle infiorescenze essiccate. La percentuale media della presenza di THC è del 5%.

L'*hashish* è il nome attribuito ai prodotti ottenuti dalla lavorazione della resina di cannabis. Esso contiene una percentuale di Δ^9 -THC variabile tra il 4% e il 21%.

La cannabis liquida è un estratto concentrato sia di materia erbosa che di resina. La percentuale di componente psicoattivo è anche superiore del 60%.

4.4.6 Dalla coltivazione ai prodotti di bioedilizia

La canapa industriale, *Cannabis Sativa L.*, è una pianta annuale principalmente coltivata in Cina e in Europa; la Francia detiene il primato di produzione europeo con 65000 tonnellate di paglia per una superficie coltivata di 10000 ettari (ADEME).

Lo stelo della pianta contiene all'esterno le fibre e il cuore di esso, la parte legnosa, è chiamata canapulo. Le fibre sono abitualmente utilizzate nella produzione di carta, per la realizzazione di tessuti o per il rinforzo di polimeri. Il canapulo è un sotto prodotto industriale utilizzabile per le lettiere di animali, grazie alle sue proprietà assorbenti, o come granulato vegetale per la produzione di materiali da costruzione a scopo di isolamento termico e acustico.

Le fibre vegetali, usate sin dall'antichità come coesivizzanti antifessurativi di conglomerati e intonaci, grazie alle loro caratteristiche di leggerezza e porosità vengono oggi spesso impiegate nel confezionamento di prodotti isolanti. La canapa per usi edili è stata riscoperta da circa trenta anni. In Francia, nel 1986, l'idea di impiegare il canapulo come aggregato per il confezionamento di un conglomerato leggero e isolante, è stata iniziata da Charles Rasseti, in collaborazione con la *Chanvriere de l'Aube* per il rinnovamento della *Maison de la Turquie*, a Nogent sulla Senna (Fig. 4.6) (Bouloc, 2006).

Solitamente miscelato con leganti "naturali" quali gesso e calce, il canapulo costituisce l'aggregato del così detto "calcestruzzo di canapa", considerato un materiale "bio" in ragione dei suoi molteplici benefici ambientali: miglioramento del suolo nella fase di coltivazione, misurato dispendio energetico per la sua produzione, aspetto legato anche alla buona resa delle colture, bilancio positivo di CO₂ oltre che durante la crescita delle piante anche nella fase di esercizio del materiale, pochi o nessun problema di gestione e smaltimento a fine vita.



Figura 4.6 - Maison de la Turquie, a Nogent sulla Senna; 1986, primo rinnovamento edilizio con conglomerato alleggerito con la canapa

Attualmente, la produzione di elementi da costruzione a base della miscela acqua-canapulo-legante (mattoni, blocchi etc..) non ha ancora raggiunto rilevanti dimensioni industriali. Nonostante esista una forte domanda di mercato, per mancanza di norme e un lento procedimento di realizzazione, i progettisti esitano ancora troppo spesso a sceglierlo come materiale da applicare alle loro opere. Tuttavia, i moderni procedimenti di fabbricazione e l'approfondimento sul comportamento meccanico e fisico, sono in grado di contribuire continuamente ed efficacemente al progresso delle performance.

Capitolo 4

Sono disponibili diversi prodotti per l'isolamento delle costruzioni derivanti dalle fibre della *Cannabis Sativa* e dal canapulo. Tra questi:

- Pannelli in fibra di canapa (isolamento interno, esterno, in intercapedine);
- Blocchi prefabbricati con canapa e calce;
- Aggregato riempitivo per massetti e caldane isolanti;
- Conglomerato applicato a riempimento in casseri;
- Conglomerato applicato a spruzzo direttamente a parete;
- Intonaco isolante.



PANNELLI IN FIBRA DI CANAPA

I pannelli in fibra di canapa trovano applicazione in intercapedini di strutture lignee, cappotti interni, cappotti esterni ventilati, coperture ventilate, pareti divisorie interne, controsoffitti, massetti per solai. Attraverso la pressione ed il trattamento delle fibre, che possono essere mescolate a fibre di poliestere/polipropilene/fibre di vetro in percentuale ridotta, si ottengono pannelli semirigidi e rotoli con proprietà termoisolanti di diverse dimensioni e spessori.



BLOCCHI PREFABBRICATI CON CANAPA E CALCE

Il *Biomattone*TM (marchio registrato *Equilibrium*) è un materiale isolante massiccio che combina proprietà di isolamento e massa termica. È composto da un legante di calce idraulica naturale e legno di canapa. Rispettando i principi di sostenibilità sociale ed ambientale, ha tutte le qualità richieste ad un materiale da costruzione in linea con lo sviluppo sostenibile: alta capacità isolante, bassa energia per la produzione e capacità di assorbire CO₂ dall'atmosfera. Pur non avendo caratteristiche strutturali, combinato con una struttura portante a telaio, assolve sia la funzione di tamponamento che di isolamento. Il sistema di imballaggio e trasporto, la movimentazione e lo stoccaggio in cantiere, il taglio, la posa in opera, le scanature per gli impianti, come anche gli ancoraggi, sono del tutto simili a quelli di prassi nell'utilizzo di blocchi tradizionali, salvo per qualche piccolo accorgimento dovuto alle qualità isolanti.

Per ottenere una malta adatta alla realizzazione di murature isolanti omogenee, si può realizzare una miscela usando il canapulo come aggregato, insieme alla calce in dosi simili alla malta da intonaco: 6:1.



CONGLOMERATO DI CANAPA E CALCE

Con la miscela di calce (aerea e/o idraulica) e canapulo è possibile realizzare l'isolamento di tetti, sottotetti e vespai, cappotti isolanti interni ed esterni. Si adatta ad applicazioni sia in cantieri di piccola che di grande dimensione.

Oltre all'isolamento termico, questo conglomerato è in grado di offrire un alto livello di comfort abitativo, grazie alle capacità igroscopiche e di traspirabilità che consentono al materiale di avere il ruolo di volano termico e regolatore di umidità, contribuendo alla salubrità dell'ambiente interno.

Questo prodotto è utilizzato sia per le nuove costruzioni che per le rinnovazioni degli edifici.

La messa in opera può essere effettuata secondo la tecnica del riempimento e pressatura, o per proiezione in via umida o secca della miscela. Quest'ultima tecnica di applicazione ha il vantaggio di essere più rapida, economica ed omogenea, di ridurre notevolmente i tempi di asciugatura, e di migliorare le caratteristiche isolanti del materiale.



INTONACO ISOLANTE

La miscela si è dimostrata efficace anche per lavori di intonacatura. Per produrre un materiale lavorabile, il mix deve contenere una maggiore quantità di calce (es. Termointonaco Equilibrium rap. 4:1). Oltre che negli edifici completamente realizzati con il conglomerato di canapa e calce, l'intonaco sta confermando il suo successo anche applicato a muri tradizionali ed è estremamente efficace per il miglioramento delle performance termiche di costruzioni in pietra. Mantiene infatti le proprietà isolanti, può far fronte ad alcuni problemi di umidità e rimane confortevole al tatto.



CANAPALITHOS® - WALL SYSTEM & DESIGN

L'attualità dell'interesse nei confronti di questo innovativo materiale, insieme alla sua versatilità, sono dimostrate dalla continua ricerca ad esso dedicata, sia nel campo della produzione industriale per la realizzazione di sistemi tecnologici da applicare ad interventi di bio-architettura, come in quello del design.

L'azienda *CMF greentech*, nata in Italia da un progetto di ricerca avviato nel 2008, ha prodotto per l'Esposizione Universale di Milano EXPO2015 elementi di arredo urbano con biocomposito a base di canapulo, ed aveva già precedentemente presentato un sistema ad elevate prestazioni di resistenza termica e fonoassorbente costituito da un preassemblaggio di pannelli *Canapalithos*® di densità e spessori variabili: l'anima del *sandwich* ha uno spessore da 200 a 300 mm ed è caratterizzata da una bassa densità del composito pari a 350 kg/m³; a rinforzarla e ad aumentarne le caratteristiche meccaniche, sono applicati sulle facce interne ed esterne, due pannelli a media intensità, pari ad un valore di 500-700 kg/m³ con uno spessore di 20/30 mm. Il sistema prevede inoltre un vano verso la parte interna dell'edificio, dove far circolare le reti di servizio, luce, acqua, canali di ventilazione, ecc. chiusa da un pannello ad alta densità, 1000 kg/m³ per 20/30 mm di spessore, in grado di sostenere anche il mobilio pensile. Per la superficie esterna può essere previsto un ulteriore strato di protezione e finitura il quale, opportunamente distanziato, costituisce un'intercapedine d'aria, in collaborazione al controllo termico della parete.

5 HLC – HEMP LIME CONCRETE

5.1 CARATTERISTICHE DEL CONGLOMERATO

Il conglomerato di canapa e calce è un materiale biocomposito ottenuto dalla combinazione della parte legnosa dello stelo di canapa, conosciuta come canapulo, ed un legante a base di calce aerea miscelati con acqua.

Il canapulo è il materiale riempitivo leggero ($\approx 110 \text{ kg/m}^3$), o meglio chiamato aggregato, mentre la calce costituisce la matrice legante e conservante. Il canapulo è solitamente un sottoprodotto della lavorazione della fibra di canapa, ed è naturalmente ricco di silice rispetto ad altre fibre vegetali, componente utile per l'indurimento della calce. Una volta indurita, la miscela si trasforma in un materiale rigido e leggero con ottime caratteristiche di isolamento e durezza.

Il conglomerato di calce e canapa è utilizzato in edilizia come materiale isolante, essendo possibile ottenere delle miscele con una conducibilità termica compresa tra $0,05 < \lambda < 0,07 \text{ W/mK}$ accostata ad importanti capacità di inerzia termica e traspirabilità; la prima comporta uno sfasamento termico che varia dalle 8 alle 17 ore in funzione dello spessore e densità del materiale, il che consente ai muri isolati, e di conseguenza agli ambienti interni da essi confinati, di non subire una repentina variazione termica dovuta alla temperatura esterna, grazie a buone prestazioni di resistenza ai flussi di calore e, inserito all'interno di un sistema di involucro edilizio, è in grado di contribuire alla realizzazione della condizione di benessere termico interno e alla riduzione delle dispersioni, con la conseguente riduzione del fabbisogno energetico dell'intero edificio.

Per quanto riguarda invece la traspirabilità, essa consente di evitare la formazione di condense interstiziali che sono la causa principale del deterioramento dei materiali da costruzione e della formazione di muffe, oltre ad essere dannose per il comfort abitativo. Anche l'igroscopicità di questo prodotto, ovvero la capacità di una sostanza di assorbire prontamente le molecole d'acqua presenti nell'ambiente circostante, regola naturalmente l'umidità in funzione dell'equilibrio da raggiungere con le condizioni al contorno.

Le sue interessanti proprietà igroscopiche e isolanti, sia termiche che acustiche, sono dovute all'alta porosità dell'aggregato (circa l'80% del volume delle particelle di canapulo), ma questa caratteristica è anche direttamente

responsabile di un comportamento meccanico atipico che rende il prodotto non idoneo ad usi strutturali.

E' oggi possibile progettare questo materiale secondo l'uso richiesto, grazie alla letteratura che illustra come e quanto incidano i principali parametri di influenza legati alla formulazione del materiale e al processo di produzione.

Da diversi anni la ricerca scientifica si occupa di approfondire la conoscenza di questa miscela, con lo scopo di comprenderne il comportamento meccanico e termico, e redigere delle informazioni tecniche che possano segnare le linee guida di riferimento per gli operatori dell'edilizia sul suo corretto utilizzo.

È un prodotto capace di sequestrare carbonio dall'atmosfera sia durante il periodo di coltivazione della pianta, attraverso la fotosintesi clorofilliana, che durante la lunga fase di carbonatazione della calce, immagazzinando approssimativamente 35 kg/m² di CO₂ (calcolo relativo ad un muro di 25 cm di spessore, per un periodo di 100 anni) e ridurre quindi le emissioni attive, contribuendo a contenere l'impronta ecologica delle costruzioni esistenti (Arnaud & Etienne, 2012) (Fig. 5.1).

HLC - Hemp Lime Concrete

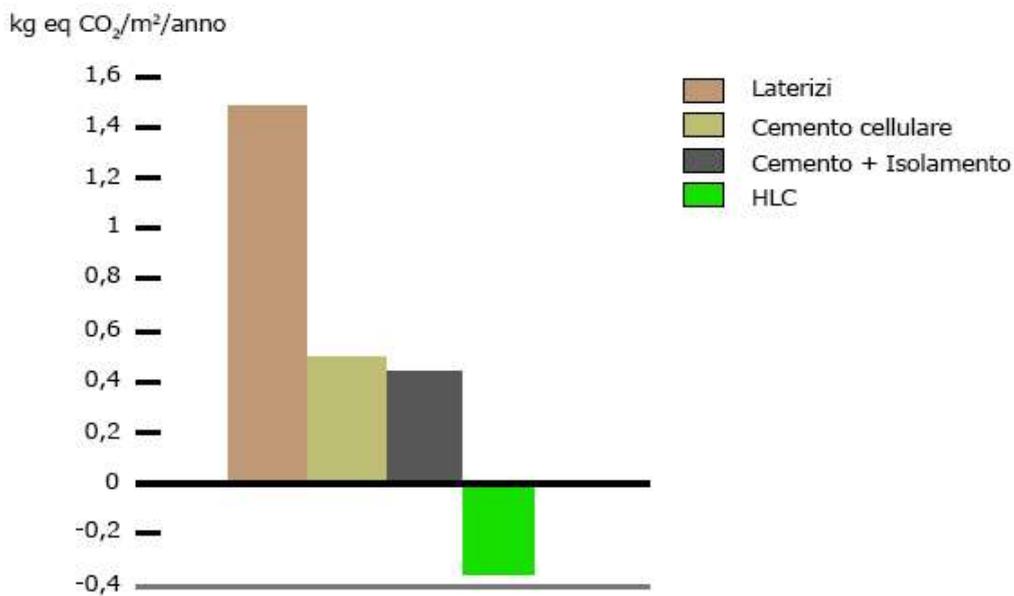


Figura 5.1 - Impronta ecologica conglomerato di canapa, Lhoist

Altro aspetto che rende questo prodotto adatto per l'edilizia sostenibile è la riutilizzabilità della miscela calce-canapulo-acqua, essendo una composizione naturale; il materiale di risulta delle demolizioni, polverizzato, può essere nuovamente mescolato e usato come inerte.

5.2 STORIA PASSATA E RECENTE

In Europa e nel mondo

L'uso della canapa miscelata con la calce ha iniziato a diffondersi nell'industria edile intorno ai primi anni '90. Sembra tuttavia che la tecnica fosse già conosciuta ed utilizzata circa 1500 anni fa; infatti a Sud della Francia, nell'antica Gallia, è stato ritrovato un ponte costruito con un conglomerato di calce e canapa durante il periodo Merovingio, tra il 500 ed il 751 d.C. Da questo ritrovamento degli anni '80 è iniziato a crescere l'uso dell'"*hemcrete*" in Europa, dove la canapicoltura non era stata criminalizzata, come era accaduto negli Stati Uniti. La Francia è il più grande produttore di canapa, con circa 4000 tonnellate di canapulo utilizzate nell'industria edile. E' infatti francese l'associazione *Construire en Chanvre* (CenC), fondata nel 1998 da professionisti del settore delle costruzioni, che ha stabilito le regole professionali di messa in opera del conglomerato di canapa e fornisce la procedura di riferimento per ottenere l'etichettatura di laboratorio, al fine di garantire la qualità e le performance del prodotto, in collaborazione con il Ministero dell'Agricoltura e l'Agenzia della qualità per le Costruzioni.

Ricerche scientifiche e test vengono costantemente condotti dal "*Centre Scientifique et Technique du Batiment*" e da "*Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat*", così come dal gruppo multinazionale belga *Lhoist*, leader mondiale nella produzione di calce.

Un altro Paese che dimostra attivo interesse per questo innovativo materiale è il Regno Unito, anche se qui è stato introdotto piuttosto di recente. La *Lime Technology*, in collaborazione con *Lhoist UK* ed *Hemcore*, il maggiore trasformatore di canapa industriale del Regno Unito, al momento producono e distribuiscono canapulo e calce legante con il marchio registrato *Tradical® Hemcrete®*.

La ricerca sul conglomerato di canapa e calce viene attualmente condotta in diverse Università del Regno Unito, ma ciò nonostante questo materiale rappresenta ancora un'innovazione nel settore edile e non è quindi coperto da standard o linee guida ufficiali. Per questo motivo, dal 2006, diverse aziende e professionisti si sono uniti a formare la *Hemp Lime Construction Products Association*, con lo scopo di promuovere l'uso del biocomposito all'interno dell'industria britannica e divulgare i suoi benefici rispetto ai consueti metodi costruttivi.

Negli Stati Uniti d'America, l'introduzione di questo prodotto è stata rallentata dalla proibizione alla coltura della canapa industriale, a causa della sua diretta associazione alla "marijuana". Il presidente Obama ha firmato

L'Agricultural Act del 2014 rimuovendo le restrizioni federali alla canapicoltura. Fino ad allora gli Stati Uniti hanno dovuto contare sull'importazione, soprattutto da Canada e Cina, per soddisfare la crescente richiesta della canapa.

In Europa, Regno Unito e Canada, può essere legalmente coltivata attraverso un sistema di certificazione che dichiara un basso contenuto di THC (<0,2%), il componente psicoattivo presente nel seme.

Le varietà di Cannabis ammesse alla coltivazione nell'ambito dell'UE sono elencate, nel Regolamento (CE) n. 327/2002, dove vi è anche indicata la procedura di prelievo e controllo per determinare il tenore di delta9-tetraidrocannabinolo (THC) delle piante.

In Italia

Agli inizi del 1998, è nato il Coordinamento Nazionale per la Canapicoltura (ASSOCANAPA), che si impegna a favorire lo sviluppo della canapicoltura in Italia, operando assistenza tecnica gratuita agli agricoltori, alle aziende e alle associazioni di categoria. Grazie alla collaborazione con diversi Enti di ricerca nazionali ed europei, anche in Italia si sta sviluppando il mercato dei prodotti naturali ed ecocompatibili indirizzati ai settori di edilizia, arredamento, tessile e cosmetica.

Il 28 Luglio 2015 è stata presentata in commissione Agricoltura, la bozza del testo di legge per rilanciare la filiera italiana della canapa. Nell'art. 1, dove vengono elencate le finalità della norma, si legge:

La presente legge reca norme per il sostegno e la promozione della coltivazione e della filiera della canapa (Cannabis sativa L.), quale coltura in grado di contribuire alla riduzione dell'impatto ambientale in agricoltura, alla riduzione del consumo dei suoli e della desertificazione e alla perdita di biodiversità, nonché come coltura da impiegare quale possibile sostituta di colture eccedentarie e come coltura da rotazione.

La presente legge si applica alle coltivazioni di canapa delle “varietà ammesse” iscritte nel Catalogo comune delle varietà delle specie di piante agricole, ai sensi delle disposizioni dell'articolo 17 della direttiva 2002/53/CE del Consiglio, le quali non rientrano nell'ambito di applicazione del testo unico delle leggi in materia di disciplina degli stupefacenti e sostanze psicotrope, prevenzione, cura e riabilitazione dei relativi stati di tossicodipendenza di cui al decreto del Presidente della Repubblica 9 ottobre 1990, n. 309, come modificato dalla presente legge.

Il sostegno e la promozione riguardano la coltura della canapa finalizzata:

a) alla coltivazione e alla trasformazione;

- b) alla incentivazione dell'impiego e consumo finale di semilavorati di canapa provenienti da filiere prioritariamente locali;
- c) a sostenere lo sviluppo di filiere territoriali integrate che valorizzino i risultati della ricerca e perseguano l'integrazione locale e la reale sostenibilità economica e ambientale;
- d) alla produzione di alimenti, cosmetici, materie prime biodegradabili e semilavorati innovativi per le industrie di diversi settori;
- e) alla realizzazione di opere di bioingegneria, bonifica dei terreni, realizzazione di attività didattiche e di ricerca.

Nel panorama italiano, tra le imprese che si occupano di bioedilizia, si distinguono: *Equilibrium* e *Calcecanapa*®, nate entrambe nel 2011, operano nell'industria del “*green building*” con lo scopo di produrre soluzioni per lo sviluppo di costruzioni ad alte performance con materiali biocompositi a base di calce e canapa, e *CMFgreentech* che dal 2008 si occupa di lavorare materiali nati da sottoprodotti di scarto, in impianti produttivi specifici, per riproporli sotto forma di prodotti eco-sostenibili e innovativi.

5.3 PROPRIETÀ MECCANICHE E TERMICHE

Dalla combinazione di canapulo e legante di calce si ottiene un materiale da costruzione con proprietà meccaniche, termiche e acustiche che differiscono dal calcestruzzo tradizionale. Il biocomposito ha una più bassa densità, una minore conduttività termica e migliori proprietà di isolamento acustico, ma non ha una buona portanza di carico.

5.3.1 Fattori di influenza

Diversi studi sono stati effettuati per comprendere i principali fattori di influenza sulle proprietà del materiale, quali: la qualità e la quantità percentuale del legante nella miscela, soprattutto per quanto riguarda la cinetica di idratazione, e la capacità di assorbimento dell'acqua da parte delle particelle vegetali che determinano la quantità totale di liquido presente nel composto.

I parametri che principalmente influenzano le proprietà del calcestruzzo di canapa possono essere classificati in due categorie: quelli relativi alla composizione (mix design), e quelli legati alla modalità di messa in opera.

L'importanza del mix design

Per quanto riguarda la prima categoria, i parametri studiati sono:

- La natura del legante
- Il rapporto di massa legante/granulato
- La densità iniziale
- Il rapporto di massa acqua/legante
- La dimensione del granulato

Questo è un processo di selezione degli ingredienti adatti alla miscela e determinazione delle loro relative proporzioni, con l'obiettivo di produrre un materiale che abbia un valore minimo di lavorabilità, forza e durabilità, tuttavia con il minor dispendio possibile di risorse, economiche e ambientali.

I leganti

Si definiscono leganti tutti quei materiali che consentono la preparazione di composti di tipo fluido aventi la peculiare caratteristica di essere in grado, passando allo stato solido, di unire tenacemente i materiali da costruzione.

E' possibile raggrupparli in due grandi gruppi: i leganti aerei e i leganti idraulici.

I primi hanno la caratteristica di compiere il percorso descritto solo se esposti all'aria, o meglio, all'anidride carbonica dissolta nell'aria. Quelli comunemente utilizzati nell'edilizia sono essenzialmente la calce aerea, e il gesso.

I secondi, invece, sono in grado di passare allo stato solido anche o solo se immersi in acqua. Quelli comunemente utilizzati sono la calce idraulica, il cemento e i suoi derivati.

L'elemento che consente di contraddistinguere i leganti idraulici da quelli aerei, è l'"indice di idraulicità", valore direttamente proporzionale alla quantità di argille presente nei calcari, che può essere naturale o ricavata artificialmente. Più propriamente è il rapporto fra la somma delle percentuali in peso dei suoi ossidi a comportamento acido (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) e la percentuale degli ossidi a comportamento basico (CaO , MgO ossido di magnesio).

$$I = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

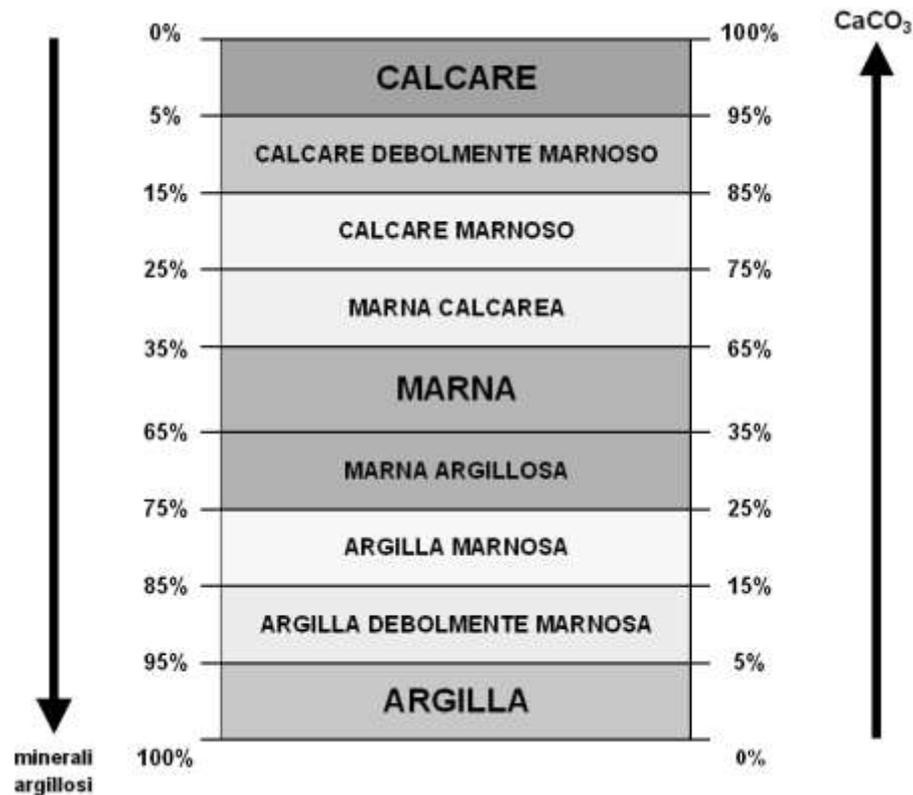


Figura 5.2 - Litotipi

La calce aerea

La calce è un prodotto che si ottiene dalla cottura del calcare ad una temperatura di 950/1000°C. È questo il processo responsabile della liberazione di anidride carbonica, durante il quale si modifica la forma e la composizione chimica della roccia sedimentaria originaria, che diventa ossido di calcio.

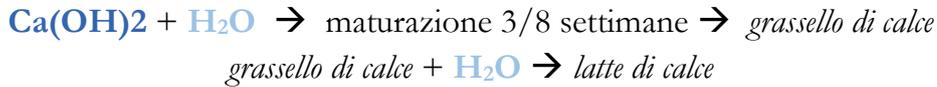
calcare $\text{CaCO}_3 \rightarrow \sim 950\text{ }^\circ\text{C}$ (- CO_2) liberazione di anidride carbonica $\rightarrow \text{CaO}$
ossido di calcio (*calce viva*)

Per essere utilizzata, la calce viva ottenuta dalla cottura deve essere spenta con l'acqua, per innaffiamento o immersione, reagendo violentemente allo shock termico.



Capitolo 5

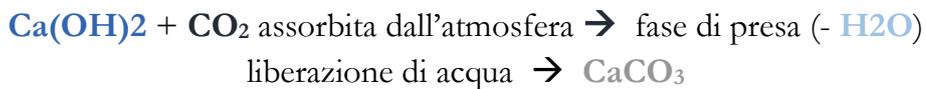
L'idrato di calcio è una polvere asciutta con la quale si prepara il grassello, un composto gelatinoso ottenuto aumentando il contenuto di acqua e lasciandolo maturare da 3 a 8 settimane.



La resa in grassello, ovvero la quantità di grassello che si ottiene da un kg di legante aggiungendo lo stesso quantitativo di acqua, fornisce una misura della qualità della calce, poiché è funzione delle impurità presenti e della reattività della calce.

La calce viene usata sotto forma di grassello; è indispensabile una giusta maturazione di questo, in quanto il processo di idratazione causa un aumento di volume del composto, che si protrae nel tempo e che deve avvenire prima possibile rispetto all'utilizzo finale.

Il grassello, un volta posto in opera, viene attaccato dalle particelle di anidride carbonica dissolte nell'aria, e per carbonatazione dell'idrato di calcio si trasforma nuovamente in calcare, con la perdita di acqua.



E' quindi la fase di carbonatazione a determinare l'aspetto "carbon negative" della calce, e che contribuisce ad ottenere un bilancio positivo delle emissioni durante il ciclo di vita del prodotto (Fig. 5.3)

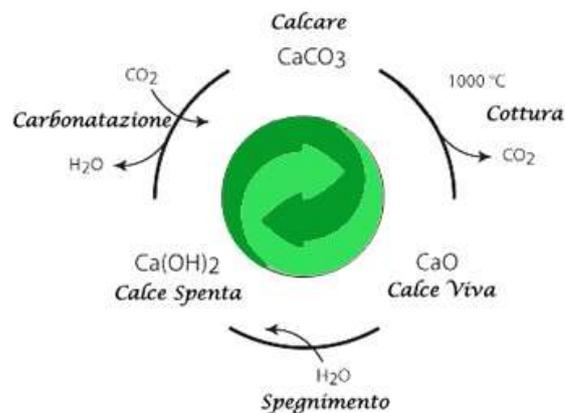
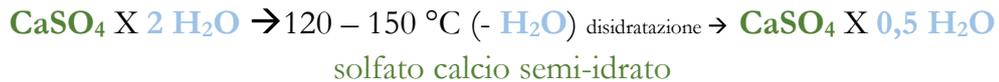


Figura 5.3 - Ciclo della calce e varie fasi

Il gesso

Il gesso è un materiale di aspetto bianco-grigio e polveroso che si ricava dalla trasformazione di rocce sedimentarie. Mediante cottura a 120-150 °C del solfato di calcio bi-idrato, si ottiene il solfato di calcio semi-idrato, che impastato con acqua fornisce una malta a presa rapidissima e dall'indurimento immediato, con un sensibile aumento di volume.



I successivi livelli di cottura producono gessi con caratteristiche diverse:

- la cottura a 200 °C produce il gesso da costruzione, o anidride solubile, caratterizzato da una presa più lenta di quella a base di solfato di calcio semi-idrato e da una maggiore stabilità volumetrica.



- A temperature di cottura che superano i 1000 °C si verifica una separazione dell'ossido di calcio, ottenendo come risultato un legante dall'attività idraulica e con una maggiore resistenza meccanica.



La presa del gesso non si verifica per azione dell'aria, ma per reidratazione del solfato di calcio disidratato alla cottura, con la rapida formazione di cristallo dello stesso materiale di partenza. L'acqua in eccesso evapora velocemente, lasciando un solido poroso, igroscopico e dotato di scarsa resistenza meccanica.

L'utilizzo del gesso in edilizia non è quello di un vero e proprio legante, ma si usa come additivo negli intonaci di calce per velocizzarne la presa, e aggiunto in moderate quantità, durante la macinazione del clinker, per ottimizzare il tempo di presa del cemento.

Per spiegare il fenomeno del ritardo e dell'accelerazione della presa del gesso, bisogna osservare il rapporto di solubilità. La presenza di una sostanza estranea in soluzione o sospensione nell'acqua di impasto del gesso, può aumentare o diminuire la velocità di dissoluzione del solfato di calcio semi-

idrato ed anche del solfato di calcio bi-idrato, provocando un aumento o diminuzione del grado di saturazione necessario all'innesco della cristallizzazione.

Tra i sistemi attuabili per ritardare la presa del gesso, c'è quello di ricorrere ad aggiunte di acqua, o utilizzarla a temperatura più alta rispetto a quella dell'ambiente, per rallentare il processo di evaporazione.

La calce idraulica

Le fasi che contraddistinguono il processo per ottenere le calci idrauliche, sono diverse e caratterizzate dalla crescente temperatura di cottura. Portando la temperatura a 900 °C si ottiene un processo già visto nella calce viva, ovvero la decomposizione del calcare CaCO_3 con l'anidride carbonica. Il processo completo, a 1000 °C, porta alla formazione di un composto misto di ossido di calcio, legato a silicati, alluminati e ferriti (prodotti di decomposizione dell'argilla), i quali conferiscono all'insieme proprietà idrauliche, che rendono delicata la fase di spegnimento di questi composti. Il dosaggio dell'acqua deve essere preciso, per consentire l'idratazione dell'ossido di calcio, senza innescare il processo di presa dei silicati, alluminati e ferriti.



L'aggregato: porosità e densità

Il termine aggregato indica il materiale tenuto unito da un insieme coerente costituito dalla matrice legante.

Le diverse proprietà tecniche dei materiali edilizi dipendono principalmente dalla loro composizione chimica e mineralogica, dalla micro e macrostruttura e dalla porosità. Quest'ultima è definita come la proprietà dei materiali solidi di presentare, distribuiti nella massa apparente, un numero più o meno grande di vacuoli. La porosità può essere una proprietà naturale insita nel materiale, essere prodotta artificialmente, o verificarsi come effetto indesiderato del processo produttivo. Tale proprietà ha in ogni caso una grande influenza sulle performance dei prodotti, condizionandone il comportamento meccanico, termico, elettrico e acustico. In particolare, all'aumentare della porosità diminuiscono: il peso per unità di volume, la resistenza meccanica e la conduttività del materiale. La porosità inoltre condiziona la risposta del materiale ai liquidi (tasso di umidità, coefficiente di imbibizione, permeabilità, resistenza alla diffusione del vapore acqueo) ma al tempo stesso ne favorisce la traspirabilità. È dunque l'opportuno posizionamento e l'interazione con gli altri materiali che costituiscono il sistema tecnologico dell'involucro, a determinare il corretto funzionamento della parete.

L'importante porosità del canapulo (circa l'80% del volume) (Fig. 5.4-5.5) influenza le performance fisiche del conglomerato di canapa, che sono allo stesso tempo uniche e tecnicamente molto interessanti: una delle caratteristiche ottenute dalla miscela con questo tipo di aggregato, è la leggerezza (densità di circa 400 kg/m^3 in funzione della quantità di legante), una forte duttilità meccanica, ma anche la capacità di regolare l'umidità negli ambienti assorbendo e/o rilasciando acqua in relazione alle condizioni al contorno; un altro aspetto dovuto alla porosità delle particelle di canapulo è la conduttività termica, che dipende dalla formulazione della miscela, ma normalmente rientra nei valori di $0.06 - 0.12 \text{ W/mK}$ (Arnaud & Etienne, 2012).

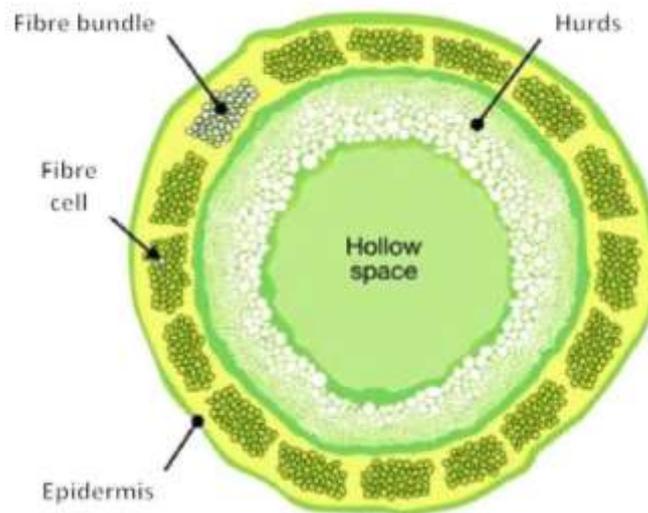


Figura 5.4 - Rappresentazione di una sezione di stelo di canapa

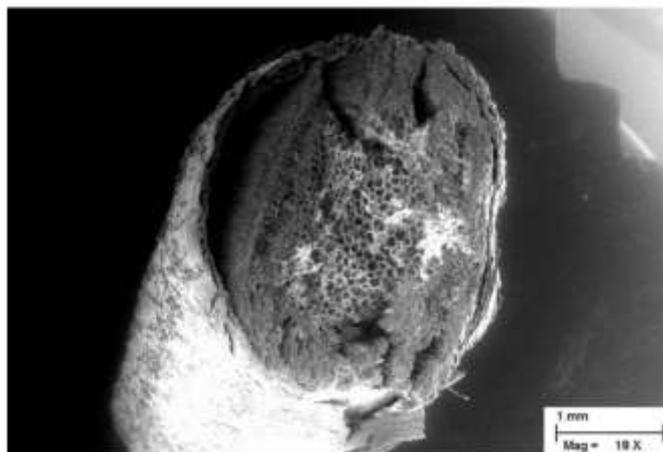


Figura 5.5 - Immagine microscopica del canapulo

È stato osservato che la quantità di canapulo determina proporzionalmente una perdita di massa (con una variazione compresa tra il 37% e il 47%), dovuta all'acqua che l'aggregato vegetale trattiene e rilascia, in funzione delle condizioni ambientali esterne al materiale. Questa capacità di copioso assorbimento idrico provoca una difficoltà nella produzione del conglomerato in quanto, effettuata con le tecniche convenzionali di miscelazione e getto, induce ad una significativa aggiunta di acqua, che risulta poi eccessiva rispetto a quella strettamente necessaria allo spegnimento della calce, e quindi per attivare la cinetica di presa del legante (Elfordy, Lucas, Tancret, Scudeller, & Goudet, 2008).

L'equilibrio idrico è comunque raggiunto a 10 mesi di maturazione, preceduti da diverse fasi del processo di idratazione (Arnaud & Cerezo, 2001).

Nei materiali porosi “convenzionali” (rocce, schiume, ceramiche etc.) tutte le proprietà possono essere espresse in funzione della porosità con diversi modelli matematici. Nel presente caso, il concetto di porosità non può essere così determinato in quanto non è conosciuto nessun valore di riferimento sulla densità del materiale “compatto” (Elfordy, Lucas, Tancret, Scudeller, & Goudet, 2008). La sezione al microscopio evidenzia due dimensioni differenti di cavità: la macro-porosità, composta da pori più ampi, definisce un basso fattore di resistenza al vapore ($\mu \sim 5$) e dunque un'alta traspirabilità; la micro-porosità determina diverse proprietà di trasferimento dell'umidità (Evrard, 2006).

La valutazione del grado di assorbimento dell'aggregato è importante in quanto un aggregato non saturo sottrae acqua all'impasto, uno a superficie bagnata al contrario cede acqua, compromettendo il rapporto finale acqua/legante (Fig. 5.6).

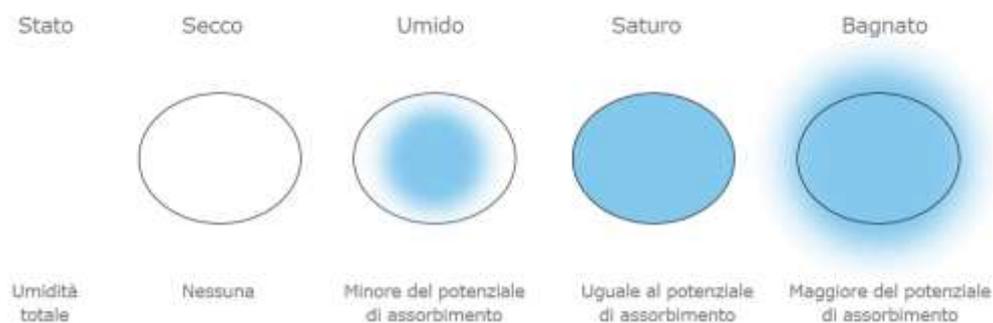


Figura 5.6 - Vari gradi di assorbimento d'acqua dell'aggregato

Un aggregato è detto gelivo se sensibile all'azione di gelo/disgelo. È una caratteristica strettamente relazionata alla porosità. Attualmente non esistono degli standard per misurare la resistenza al gelo-disgelo del conglomerato di canapa, ad ogni modo sono stati condotti degli studi guidati dalla EN 15304:2010, che hanno analizzato 10 cicli di gelo/disgelo in un intervallo di temperature comprese tra -15 °C e 20 °C , applicati al materiale in questione per una durata del test di 9 mesi. Nessuna rottura è stata determinata dai cicli di gelo/disgelo e analisi al microscopio non hanno individuato nessun cambiamento nella microstruttura della matrice (Walker, Pavia, & Mitchell, 2014).

È stato dimostrato che tutte le proprietà, sia meccaniche che termiche, cambiano all'aumentare della densità del materiale (Elfordy, Lucas, Tancret,

Scudeller, & Goudet, 2008) (Fig. 5.7). La dipendenza della conducibilità termica del materiale alla sua densità si manifesta con una relazione inversamente proporzionale con la percentuale in peso del canapulo: più questa percentuale cresce, più decresce la densità del composto e con essa la conducibilità termica. Confrontando i diversi risultati presentati dalla letteratura scientifica si capisce che le proprietà termiche dipendono dalla quantità di canapulo presente nel composto, seppur non in proporzione lineare; significa che pur aumentando il contenuto di aggregati, probabilmente esisterà un valore massimo al di là del quale non è conveniente andare.

L'influenza invece della granulometria, comparata alla quantità percentuale nel composto, è molto bassa (Benfratello, et al., 2013).

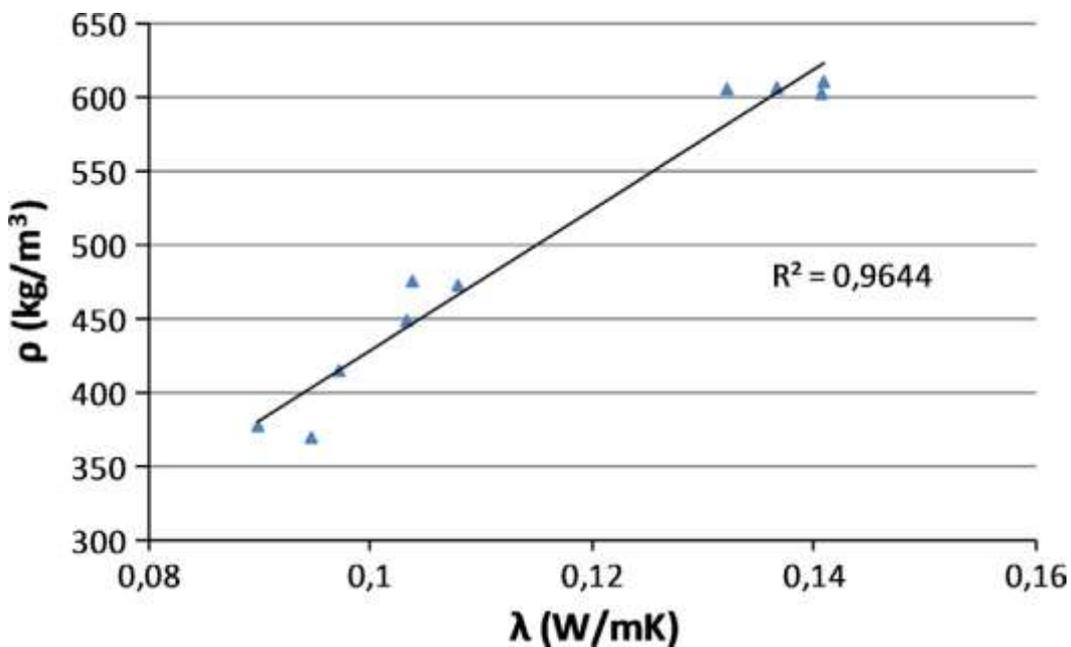


Figura 5.7 - Influenza della densità sulla conducibilità termica

La composizione della miscela

Sono stati effettuati diversi esperimenti allo scopo di comparare conglomerati di canapa e calce, confezionati con diversi tipi di leganti, e ottenere la miscela ottimale. Gli aggregati di canapa assorbono grandi quantità di acqua (circa il 325% del loro peso in 24h) e questo può minare il processo di idratazione (Walker, Pavia, & Mitchell, 2014); si ritiene quindi opportuno che la matrice sia costituita da materiali con una rapida reattività.

Notoriamente questo non è un prodotto usato per assolvere funzione portante, ma associato ad una struttura a telaio (generalmente lignea nelle nuove costruzioni) costituisce esso stesso muro di tamponamento isolante; per questo motivo è necessario conoscere i valori di carico sopportati. Il precoce sviluppo della resistenza è importante per come il conglomerato possa sostenere il proprio peso quando ancora in fase umida, per consentire la scasseratura senza che avvenga il collasso del materiale nell'interasse del telaio portante. La rilevanza di conoscere la durata di questa fase è utile inoltre per evitare il danneggiamento degli aggregati prima della presa, in modo che il canapulo possa mantenere la sua porosità e garantire le prestazioni termiche e acustiche, senza essere pressato dalla sollecitazione di carico (Arnaud & Cerezo, 2001).

La resistenza a compressione tipica per una miscela 2:1 (legante:aggregato) è compresa in un intervallo di 0.2 e 0.12 MPa anche se principalmente dipende dalla densità, dal tipo di legante, e dall'età di maturazione. Per quanto riguarda la forza a flessione, degli studi hanno dichiarato resistenze tra i 0.06 e 1.2 MPa.

E' stato discusso il contributo dell'idraulicità del legante alla resistenza del conglomerato. Diverse sono state le opinioni e i risultati, che ad ogni modo attribuiscono uno sviluppo maggiore della resistenza iniziale all'uso di cemento idraulico commerciale.

Tuttavia, la calce idrata usata sin dall'antichità, miscelata ad aggregati organici, ha dimostrato empiricamente un'ottima durabilità a lungo termine. Il materiale è inoltre considerato resistente all'attacco di muffe e insetti, grazie all'alcalinità propria della calce ed è un prodotto resistente al bio-deterioramento, all'attacco di microorganismi in condizioni ambientali cicliche, che alternano cioè periodi di alta umidità ad altri di siccità, come si possono considerare in Europa (Walker, Pavia, & Mitchell, 2014).

Il comportamento meccanico del conglomerato di canapa e calce è simile a quello del legno e di altri solidi cellulari; si comprime con continuità all'applicazione del carico, e presenta una curva di deformazione che può essere divisa in tre parti: inizialmente, dove la curva è lineare, il materiale

presenta un comportamento elastico; la zona di plateau indica un primo cedimento del provino al quale sussegue una più ampia deformazione a parità di carico; con l'andamento della curva che segue la fase di plateau, si assiste all'inizio del collasso del legante con l'aumentare della sollecitazione che cresce rapidamente in relazione alla deformazione (Fig. 5.8).

La presenza della canapa cambia drasticamente la curva di legame costitutivo.

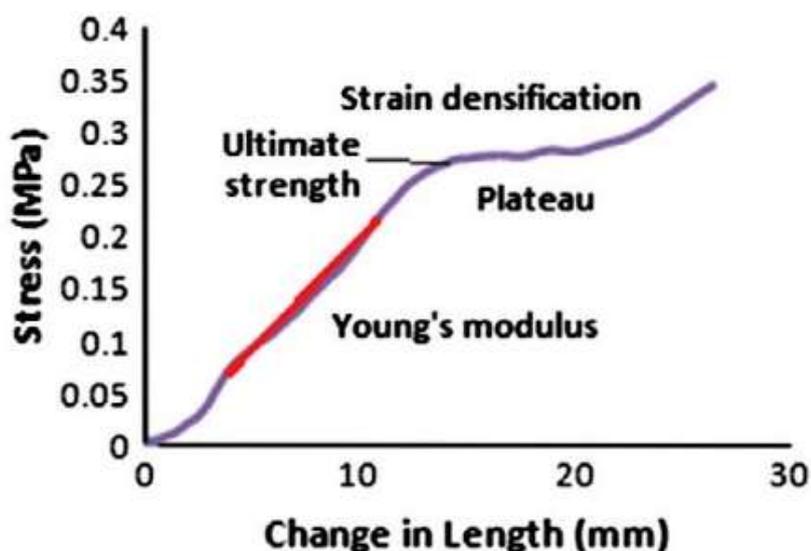


Figura 5.8 - Comportamento tipico del HLC sottoposto a carico di compressione assiale

Per determinare il comportamento ottimale della matrice, gli esperimenti vengono solitamente condotti osservando e confrontando miscele caratterizzate da qualità e quantità diverse di leganti, a varie fasi nel tempo di maturazione.

Si propone qui una tabella tipo dei dati utili a tale procedura:

Quantità canapulo	Quantità legante	Quantità acqua	Data fabbricazione	Età di maturazione	Densità iniziale	Densità finale	Variazione
peso [Kg] e/o %	peso [Kg] e/o %	peso [Kg] e/o %	gg/mm/aa	gg - mm	ρ [Kg/m ³]	ρ [Kg/m ³]	%

L'andamento dei grafici delle prove meccaniche, evolvono in funzione di due parametri principali:

- la quantità di legante
- il tempo di maturazione

Durante la fase di presa, il comportamento del materiale è duttile (deformazione plastica), non è quindi previsto che avvenga la rottura, in quanto gli idrati del legante non ancora hanno creato una connessione, e gli sforzi sono sostenuti dal canapulo. In questo momento l'andamento è simile a quello del calcestruzzo classico: il provino presenta una forte deformabilità, di circa il 15%.

Con il tempo, gli idrati si connettono e gradualmente creano una rete continua, attraverso la quale si trasmettono gli stress delle sollecitazioni. Le caratteristiche del legante diventano piano piano preponderanti nella miscela (Arnaud & Etienne, 2012).

La rottura è dovuta al cedimento della matrice di legante. Questo comportamento, detto fragile, determinerebbe una rottura senza deformazione. Va notato però che il provino continua a deformarsi plasticamente, presentando tuttavia una certa coesione (Fig. . Questa è una caratteristica propria del materiale attribuibile al tipo di aggregato vegetale.

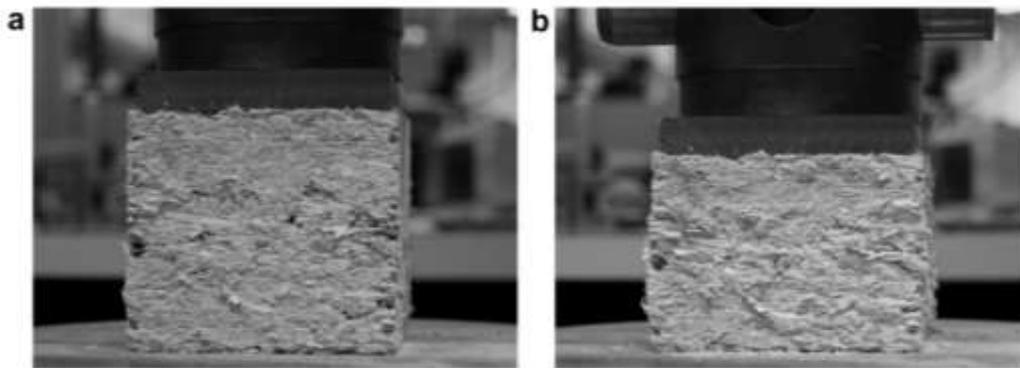


Figura 5.9 - Prove a compressione; foto prima (a) e dopo (b) il test

Questa dualità fragile-duttile, si presenta in tutte le formulazioni, e solo il dosaggio del legante sembra influire sul momento in cui il comportamento passa da uno stato all'altro.

La resistenza a compressione subisce variazioni in funzione del tempo e in base alla percentuale di legante. In ogni caso, a 9 mesi di maturazione si ottiene una stabilizzazione dei valori e, ad 1 anno, il valore di riferimento di R_c ; a partire da quel momento, l'incremento dei valori è direttamente proporzionale alla quantità di legante.

L'importanza di conoscere la composizione dei leganti, sta nel fatto che queste determinano l'evoluzione delle performance nel tempo: una grande quantità di calce aerea, ad esempio, determina una maturazione completa in tempi molto lunghi, rispetto ai leganti idraulici; altri studi hanno dimostrato

che l'alta alcalinità del cemento può compromettere la maturazione del composto, reagendo con le molecole solubili proprie della pianta e rilasciando sottoprodotti che ostacolano la presa (Diquélou, Gourlay, Arnaud, & Kurek, 2015).

Posa in opera

Il metodo di posa in opera deve poter rispondere alle esigenze del materiale applicato. Generalmente nella scala industriale non sono accettabili tempi di presa molto lunghi responsabili della durata di realizzazione dell'opera – maggiori tempi di stagionatura incidono sulla produttività del cantiere. Ad esempio per quanto riguarda i calcestruzzi convenzionali da costruzione, è accettato dalle normative che essi raggiungano la maturazione, e con essa le prestazioni minime garantite dalla Resistenza caratteristica a meno di un mese, precisamente a 28 giorni, per essere considerati idonei al ruolo di “autoportanza”. Prima di questo periodo stabilito, non possono essere applicati carichi di esercizio.

La maturazione è fortemente influenzata dalle condizioni ambientali esterne: le basse temperature rallentano le reazioni di idratazione dei leganti, ma ne favoriscono una migliore lavorabilità per tempi più lunghi; temperature al di sotto dello zero implicano il congelamento dell'acqua di impasto, compromettendo la lavorabilità le prestazioni finali. Un processo di maturazione esposto a temperature troppo alte può causare un'eccessiva evaporazione superficiale, producendo un essiccamento precoce e una disidratazione più rapida della zona corticale, rispetto a quella più interna e la conseguente insorgenza di tensioni meccaniche può causare delle fessurazioni.

L'evaporazione nella zona esterna è quindi regolata da:

- Temperatura esterna;
- Velocità dell'aria
- Umidità relativa

All'aumentare delle prime due, e al diminuire dell'ultima, aumenta la rapidità dell'evaporazione.

Le naturali escursioni termiche, più o meno drastiche, sono giornaliere o stagionali.

Alle condizioni ambientali al contorno sono legate:

- Il mantenimento della lavorabilità

- I tempi di presa
- Lo sviluppo delle resistenze meccaniche

A parte i blocchi prefabbricati ottenuti con il conglomerato di canapa e calce, le principali modalità di posa in opera in situ per questo materiale sono la tecnica di riempimento dei casseri con compattazione e la tecnica della proiezione.

La produzione attraverso miscelazione convenzionale e getto, data la grande capacità di assorbimento dell'acqua da parte del canapulo, richiederebbe un significativo eccesso di acqua per poter ottenere una miscela omogenea e lavorabile, rispetto a quello strettamente necessario per attivare il processo di idratazione del legante. Un altro problema riscontrato con questa tecnica è dovuto alla leggerezza dell'aggregato (circa 80-110 kg/m³) per il quale non è possibile ottenere una compattazione dovuta alla forza di gravità, sempre in relazione alla porosità del materiale. Per far fronte a questi problemi è stato sviluppato un altro processo di produzione: esso consiste nella proiezione della miscela direttamente sul muro.

La macchina per la proiezione del calcestruzzo è un'invenzione brevettata nel 1951.

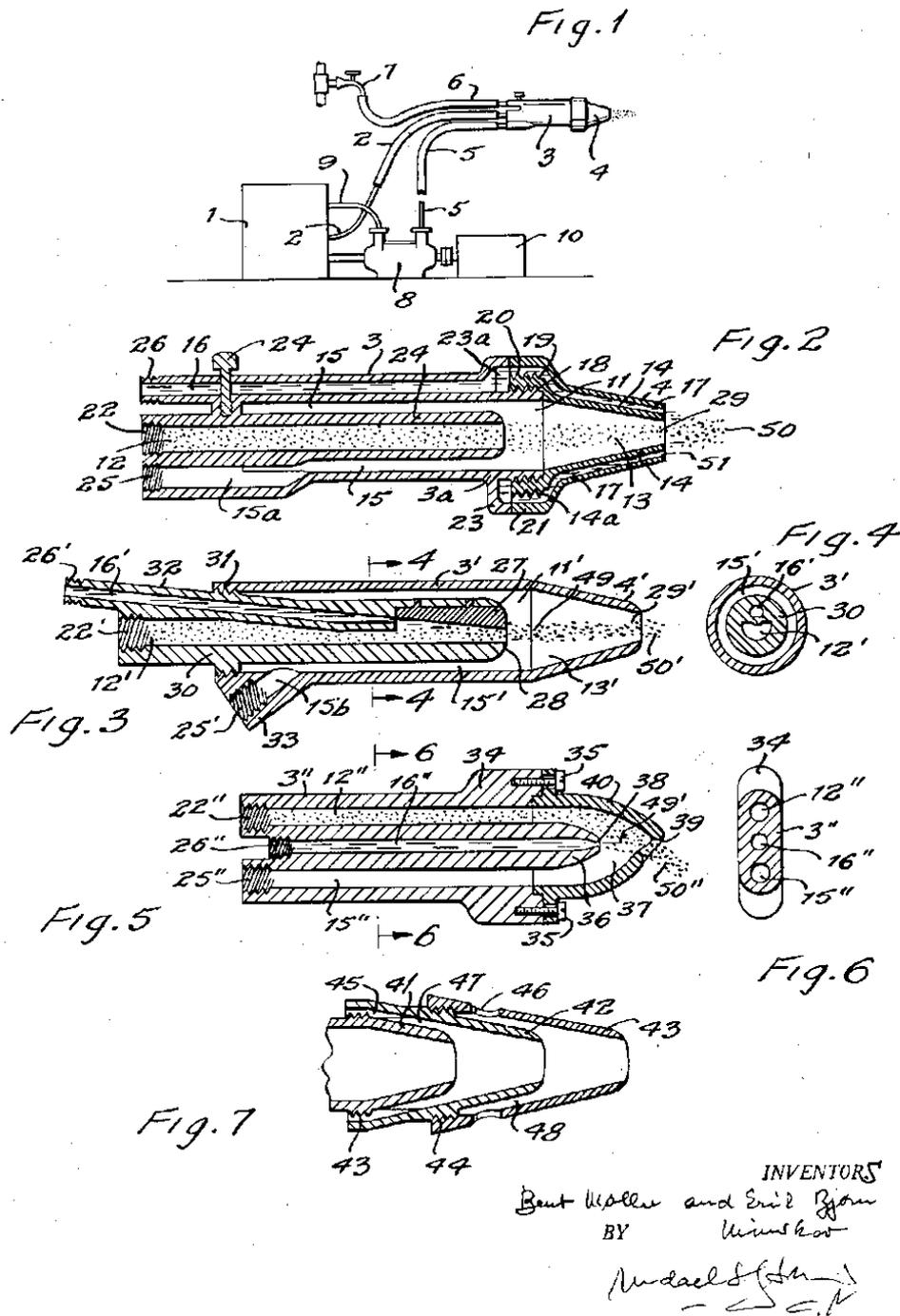
Aug. 28, 1951

B. MOLLER ET AL

2,565,696

CONCRETE PROJECTION APPARATUS

Filed Oct. 22, 1947



INVENTORS
 Bent Moller and Eric Bjorn
 BY *Mindael*
 - C.A.

Figura 5.10 - 1951: brevetto di un apparato di proiezione per il calcestruzzo

Originariamente pensata per essere utilizzata con la tradizionale miscela di calcestruzzo, è già da diversi anni utilizzata per:



Figura 5.11 - Applicazioni calcestruzzo proiettato; Asquapro

- Realizzazione di tunnel, parcheggi e costruzioni sotterranee;
- Rivestimento di pareti rocciose, terrapieni e argini;
- Riparazione e consolidamento di strutture in calcestruzzo e calcestruzzo armato;
- Riabilitazione di strutture in muratura (muri, ponti, gallerie sotterranee);
- Costruzione di case, piscine, rocce finte, pareti di arrampicata;
- Soluzioni architettoniche caratterizzate da morfologia irregolare.

Descrizione della tecnica di proiezione

Essendo la capacità assorbente della canapa, una delle maggiori criticità da affrontare nel processo di produzione del conglomerato, questa tecnica di posa in opera si è dimostrata particolarmente efficace per un prodotto a base di aggregati vegetali.

Una miscela asciutta di legante e canapulo viene condotta dall'aria in un tubo flessibile al quale, nella parte terminale, confluisce una derivazione a sezione minore che introduce acqua per umidificare il composto (Fig. 5.12). In

questo modo gli aggregati non hanno molto tempo per assorbire significative quantità di acqua, ed è introdotta quasi solo quella necessaria ad avviare la cinetica della matrice legante.

Gli effetti di questo processo sono di tre tipi:

- Riduzione dei tempi di presa, limitati al periodo necessario alla carbonatazione della calce;
- Migliore compattezza e densità del materiale, grazie alla velocità di proiezione;
- Incremento delle proprietà meccaniche e termiche, legate alla compattezza del materiale.

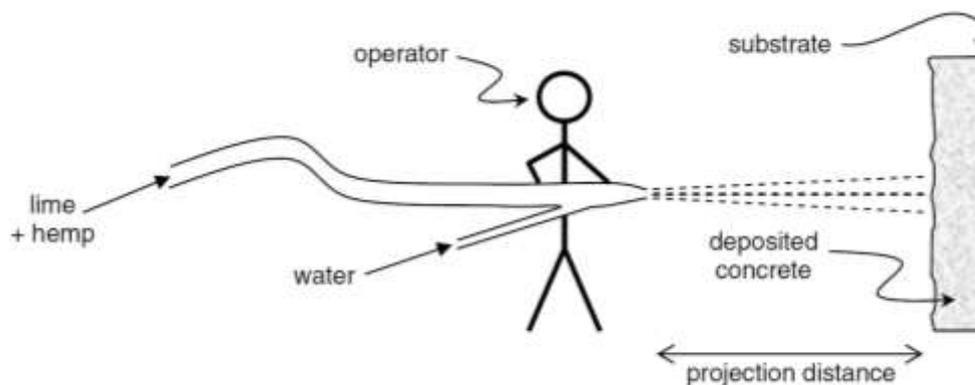


Figura 5.12 - Fattori di influenza del processo di posa in opera per proiezione

Questa tecnica inoltre si dimostra particolarmente efficace per i materiali con scopo isolante, soprattutto utilizzati nell'edilizia di recupero, in quanto consente di riempire e uniformare sezioni di muro dal profilo non compatto, collaborando ad omogeneizzare il comportamento termico della parete e scongiurare l'insorgere di ponti termici, come non si potrebbe fare altrettanto con l'applicazione di pannelli rigidi.

E' determinante una buona aderenza all'interfaccia tra il supporto e lo strato di conglomerato proiettato: una scarsa coesione tra la parete e l'isolante potrebbe causare uno scorrimento del materiale con conseguente distacco, minando il livello di performance atteso. A questo proposito le variabili sono individuabili, oltre che nella natura e quantità del legante utilizzato, nel tipo di substrato ed eventuale pretrattamento delle superfici per aumentarne la rugosità. La finitura superficiale è importante per gli strati destinati al mutuo contatto, in quanto aumenta sensibilmente il coefficiente di attrito, responsabile di sostenere il carico immediato del materiale, fino alla fase di

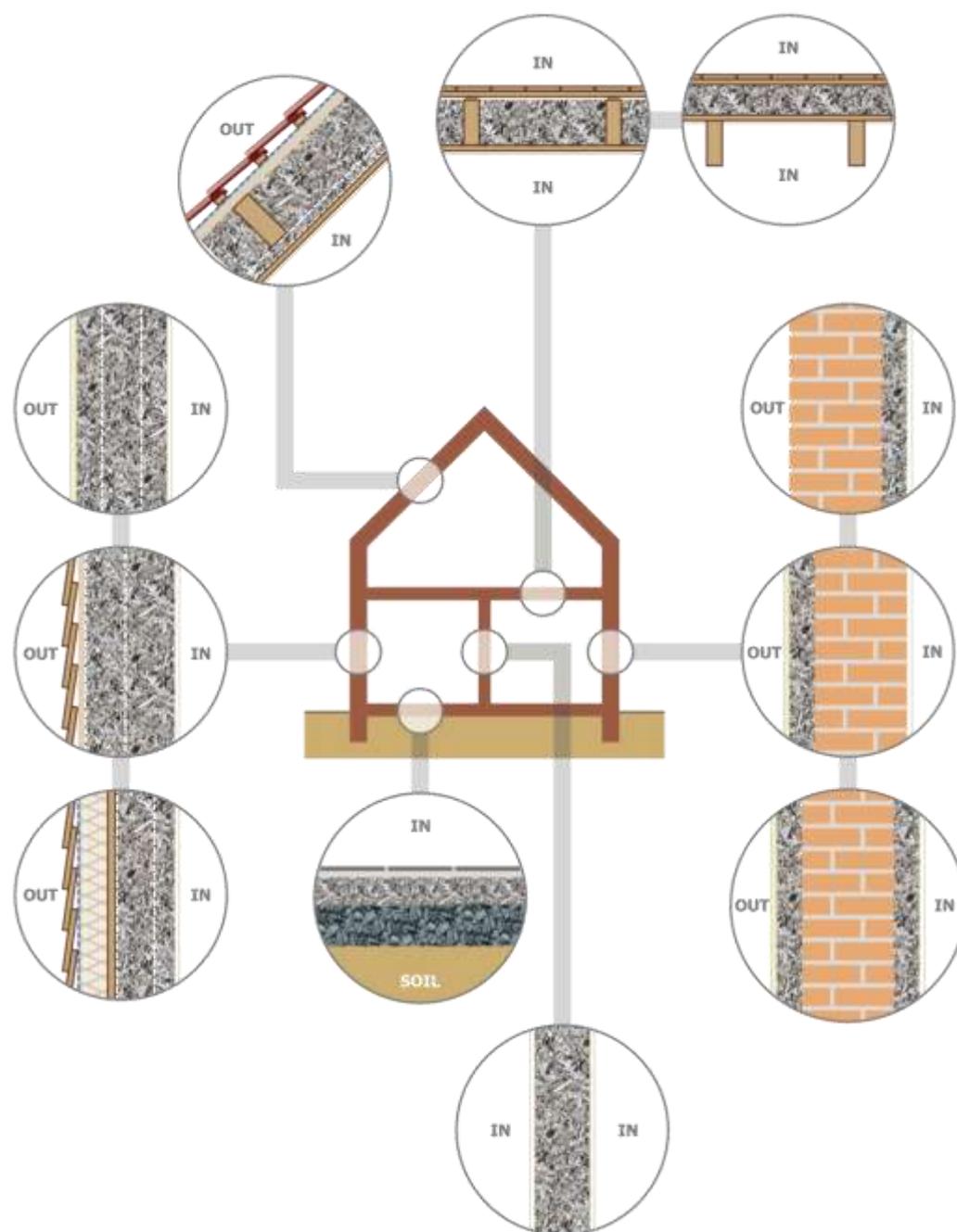
presa, durante la quale entra in campo la composizione chimica del legante che determina la qualità dell'aderenza a lungo termine.

Attualmente, il dipartimento di ingegneria civile dell'HEIG-Vd, si sta occupando di ricerche centrate sul miglioramento dell'aderenza tra il prodotto finito e il suo sostegno, attraverso lo studio di leganti a presa immediata, idonei con i componenti del calcestruzzo di canapa, per rendere questo prodotto maggiormente commercializzabile e adatto a più campi di applicazione.

Un'altra caratteristica dovuta al processo di fabbricazione per proiezione è la compattezza della densità, che non si ottiene con la tecnica del getto e pigiatura. Studi hanno dimostrato che il canapulo tende a posizionarsi sul piano normale alla direzione di proiezione, e che la densità è leggermente più alta al centro dello spessore, ma senza una variazione significativa: la deviazione standard della densità è di circa 90 kg/m^3 (Elfordy, Lucas, Tancret, Scudeller, & Goudet, 2008). Grazie a questa uniformità, il prodotto finito garantisce un comportamento omogeneo delle sue caratteristiche.

5.3.2 Caratteristiche e campi di applicazione

- Materie prime da risorse rinnovabili
- Isolante termico
- Traspirante
- Capacità di inerzia termica
- Salubrità – caratteristiche termoigrometriche
- Riutilizzabile
- Materiale *carbon negative*



- Massetti isolanti
- Tamponature isolanti
- Isolamento di tetto e sottotetto
- Isolamento a cappotto interno/esterno

6 PROGRAMMA SPERIMENTALE

6.1 PROTOCOLLO DI PROVA PER LA MISURA DELLE PERFORMANCE

I parametri per la formulazione del conglomerato di canapa ad oggi sono generalmente scelti sulla base di quelli raccomandati dalle regole professionali (Association Construire en Chanvre 2007), dal momento che è un materiale in attesa di una procedura *ad hoc* normalizzata e i metodi standard di formulazione forniscono un metodo di base, da dover poi verificare in laboratorio in situ.

Per essere conforme alle Regole Professionali di messa in opera proposte dal CenC, ad oggi il calcestruzzo di canapa deve presentare delle performance minime in condizioni standard (20 °C – 50% HR). Queste performance sono definite per ogni applicazione e sono le seguenti:

CAMPO di APPLICAZIONE	MODULO di ELASTICITA' [MPa]	RESISTENZA a COMPRESSIONE [MPa]
	Valore minimo in condizioni standard	Valore minimo in condizioni standard

PARETE VERTICALE	> 15 MPa	> 0,2 MPa
SUOLO	> 15 MPa	> 0,3 MPa
TETTO	> 3 MPa	> 0,05 MPa
RIVESTIMENTO	> 20 MPa	> 0,3 MPa

I campioni sono valutati a 60 e 90 giorni, secondo il protocollo di prova descritto nel documento proposto dal CenC.

Tale protocollo riguarda:

- La misurazione delle caratteristiche meccaniche
- La misurazione delle caratteristiche termiche

Per quanto riguarda le **caratteristiche meccaniche**, la procedura di prova prevede:

	Produzione provini	Conservazione	Preparazione	Test
Materiale necessario	<ul style="list-style-type: none"> ● Modello betoniera ● stampo 16x32 cm ● Bilancia Pressa o materiale di compattazione	Camera climatica a T e HR regolate	<ul style="list-style-type: none"> ● Camera climatica a T e HR regolate ● sega 	Pressa idraulica o meccanica per test a compressione conforme alla EN 12390-4 con sensore di forza da 50 kN
Procedura	<p>A. <u>Produzione miscela</u> I componenti sono miscelati nella betoniera secondo le indicazioni dei produttori (ordine d'introduzione, dosaggio e tempi di mescolamento)</p> <p>B. <u>Produzione provini</u> Il calcestruzzo di canapa viene riversato nello stampo in 6 strati di 5 cm, ciascuno compattato con una forza di 0,05 MPa.</p>	I provini sono introdotti nella camera climatica regolata subito dopo la fabbricazione e scasserati sulla faccia inferiore e superiore all'inizio del settimo giorno, in modo da garantirne la ventilazione.	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>Essiccazione</u> I provini liberi dallo stampo devo essere lasciati nella camera climatica regolata a 50°C+/-1°C e <4% HR per un intervallo di tempo compreso tra 96-144 h. l'essiccazione è ottenuta quando la variazione di massa tra due pesate successive distanziate 24h è inferiore all'1%. <ul style="list-style-type: none"> ● <u>Scasseratura</u> Dopo l'essiccazione i provini vengono segati perpendicolarmente alla generatrice del cilindro. 	Assicurarsi circa la pulizia della piastra della macchina e le facce d'appoggio dei provini. Centrare i provini sulla piastra inferiore con una precisione di +/- 5% del diametro del provino. Il testo è condotto ad una velocità di 5mm/min. <u>Resistenza alla compressione</u> Il carico è applicato fino alla rottura del provino. A. <u>Modulo di Young</u> Applicare un carico inferiore del 40% rispetto a quello applicato per ottenere la deformazione massima registrata con la prova di compressione semplice. È consigliato procedere su 5 provini per ottenere un minimo di 3 valori di riferimento.

	Produzione provini	Conservazione	Preparazione	Test
Valori e parametri	<ul style="list-style-type: none"> •nomi costituenti •ordine d'introduzione •dosaggio •tempo di mescolamento Identificazione provini	<ul style="list-style-type: none"> •Temperatura: 21°C+/-2°C •HR: 50% +/-5% Tempo di conservazione: 60 e 90 giorni	<ul style="list-style-type: none"> •Temperatura: 50°C+/-1°C HR: <4% 	Velocità di spostamento: 5mm/min
Misure e calcoli	Si misura la massa del provino e se ne deduce la massa volumica (densità) a partire dal calcolo del volume totale	La temperatura e l'HR della camera sono misurate durante tutto il periodo di conservazione	Dopo la scasseratura, i provini sono pesati e misurati	<ul style="list-style-type: none"> •Area della sezione del provino: Ac [m²] •Altezza nominale del provino: h₀ [m] •Curva della forza in funzione dello spostamento •Carico massimo sopportato: F [N] •Resistenza alla compressione: f_{c,t}= F/Ac [MPa] Modulo di Young (pendenza della fase quasi-elastica della curva di deformazione (%)) sulla parte quasi lineare del comportamento.

Contenuto del rapporto di test (indicazioni e valori obbligatori):

1. Identificazione dei provini
2. Data di fabbricazione
3. Enunciazione dei dati utili alla messa in opera (identificazione delle materie prime utilizzate, dosaggio)
4. Parametri di fabbricazione del conglomerato (ordine d'introduzione nella betoniera, tempo di mescolamento)
5. Massa iniziale di ogni provino
6. Massa volumica apparente iniziale di ogni provino
7. Massa di ogni provino asciutto
8. Massa volumica apparente di ogni provino asciutto
9. Dimensioni nominali di ogni provino (h_0 , A_c)
10. Data di test
11. Carico massimo F [N] per ogni provino
12. Resistenza a compressione [MPa] per ogni provino
13. Curva di evoluzione della forza in funzione dello spostamento alla fine del test
14. Modulo di Young [MPa] di ogni provino
15. Descrizione della rottura e/o una foto di ogni provino al termine del test
16. Dichiarazione dello staff tecnico responsabile del test che è stato realizzato conformemente al protocollo qui esposto
17. La conclusione del rapporto deve pronunciarsi sulla conformità o meno del materiale per l'applicazione prevista.

Caratteristiche termiche:

	Produzione provini	Conservazione	Preparazione	Test
Materiale necessario	<ul style="list-style-type: none"> ●betoniera ●stampo di dimensioni minime 20x20x5 cm ●Bilancia 	<p>Camera climatica a T e HR regolate</p>	<p>Camera climatica a T e HR regolate</p>	<p>Dispositivo di prova che permetta di effettuare il test della piastra calda con anello di guardia, conformemente alla norma EN12664</p>
Procedura	<p>C. <u>Produzione miscela</u></p> <p>D. I componenti sono miscelati nella betoniera secondo le indicazioni dei produttori (ordine d'introduzione, dosaggio e tempi di mescolamento).</p> <p>E. <u>Produzione provini</u></p> <p>F. Il calcestruzzo di canapa viene riversato nello stampo e compattato con una forza di 0,05 MPa.</p> <p>Questo nel caso in cui non si possano effettuare dei carotaggi direttamente dal muro.</p>	<p>I provini sono introdotti nella camera climatica regolata subito dopo la fabbricazione. In caso di prelevamento dal muro, vengono effettuate riprese fino al ritorno in laboratorio (massimo 7 giorni) e subito inserite in condizioni di conservazione.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●<u>Essiccazione</u> 48h prima del test, i provini allo stato secco, destinati alla misurazione della conduttività termica, vengono messi in camera climatica ●<u>Limitazione degli effetti convettivi</u> <p>È indispensabile per evitare trasferimenti di energia per convezione, posizionare un sottile rivestimento impermeabile sulle facce del provino.</p>	<p>Le misurazioni sono effettuate su:</p> <ul style="list-style-type: none"> ●Provini allo stato secco ●Provino in condizioni standard (20°C,50%HR) <p>Per ogni provino sono effettuate 3 misurazioni, su almeno 3 campioni diversi.</p>

	Produzione provini	Conservazione	Preparazione	Test
Valori e parametri	<ul style="list-style-type: none"> •nomi costituenti •ordine d'introduzione •dosaggio •tempo di mescolamento •Identificazione provini 	<ul style="list-style-type: none"> •Temperatura: 21°C+/-2°C •HR: 50% +/-5% Tempo di conservazione: min 28 giorni e fino a quando la massa si dimostri costante (variazione di massa a 24h <0,5%) 	<ul style="list-style-type: none"> •Temperatura: 50°C+/-0,5 °C •HR: 0% HR +/- 5% •Tempi: 48h 	<ul style="list-style-type: none"> •Temperatura iniziale del materiale: T0=21°C+/-2°C •Gradiente minimo θ di 10°C con temperature sulle facce inferiori e superiori di T0+θ/2 e T0-θ/2
Misure e calcoli	Si misura la massa del provino e se ne deduce la massa volumica (densità) a partire dal calcolo del volume totale		Prima di ogni prova i provini sono pesati e viene calcolata la massa volumica	<ul style="list-style-type: none"> •Conduktività termica media in condizioni secche •Conduktività termica media in condizioni standard •Variazioni

Contenuto del rapporto di test:

1. Identificazione dei provini e modalità di ottenimento
2. Data di fabbricazione
3. Enunciazione dei dati utili alla messa in opera (identificazione delle materie prime utilizzate, dosaggio)
4. Parametri di fabbricazione del conglomerato (ordine d'introduzione nella betoniera, tempo di mescolamento)
5. Massa iniziale di ogni provino
6. Massa volumica apparente iniziale di ogni provino
7. Massa del provino prima e dopo le due misure per la conducibilità
8. Massa volumica apparente del provino prima e dopo le prove
9. Date della prove
10. Conducibilità termica a secco
11. Conducibilità termica in condizioni standard
12. Una dichiarazione dello staff tecnico responsabile che le prove siano state effettuate conformemente al protocollo sopra descritto.

6.2 NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Le norme descrivono le caratteristiche dei prodotti e contengono le modalità per effettuare i test, la valutazione di conformità e l'etichettatura.

Il comitato tecnico internazionale di riferimento per la normazione nel campo dei materiali e dei prodotti per l'isolamento termico degli edifici è il CEN/TC 088 (Comitato Europeo di Normazione). Esso riguarda: terminologia e definizioni, lista delle proprietà richieste, procedure di campionatura, criteri di conformità, specifiche per l'isolazione di materiali e prodotti, valutazione ed etichettatura dell'isolamento di materiali e prodotti.

In Svizzera la normativa di riferimento per i "Materiali isolanti da costruzione" è redatta dalla Commissione SIA 279

Le norme sono regole comuni che hanno lo scopo di tutelare il consumatore e controllare il mercato, portando ad ottenere specifiche di prodotto e prestazioni garantite, attraverso le quali poter effettuare un confronto equo tra articoli della stessa categoria.

Il programma di lavoro del CEN/TC 088 per l'anno in corso, prevede l'inserimento della definizione di specifiche riguardanti materiali realizzati in situ e compositi (sistemi non omogenei) o con spessore variabile.

Da questo si evince che attualmente non sono ancora disponibili valori e procedure normative per il conglomerato di canapa posato con la tecnica della proiezione direttamente in situ.

Per questo motivo, il lavoro di tesi qui presentato, ha come scopo quello di seguire un progetto di studio mirato alla formulazione di una prassi di riferimento sull'esecuzione dei test, che possa essere esibita al comitato tecnico di pertinenza, che si occuperà, previa opportune valutazioni, di normalizzare il criterio proposto.

Normalizzare un prodotto significa anche svilupparne le potenzialità commerciali; quindi il percorso di ricerca, mira a migliorarne, regolarizzarne e certificarne le caratteristiche fisico-meccaniche, oltre che ottimizzarne le performance per renderlo il più adattabile possibile ad ogni tipo di supporto.

6.3 ESPERIENZA DIRETTA

Partendo dall'osservazione diretta di diversi casi reali, e attraverso la presenza in cantiere, a stretto contatto con la ditta artigianale svizzera *Pittet Artisans sarl*, si è evidenziato un ampio spettro di variabili che contribuiscono alla formulazione e conseguentemente alle performance del prodotto finito. È stata condotta (ed è tutt'ora in corso) una campagna sperimentale in laboratorio e in situ per raccogliere i dati necessari alla caratterizzazione del materiale.

6.3.1 Test calorimetrici

I test al calorimetro sono stati effettuati per verificare la velocità di presa di diversi leganti.

Le prove sono state eseguite con differenti miscele e percentuali dei componenti, per valutare il tempo di reazione tra i composti chimici.

Prova del 29.10.2015

Verifica delle proprietà acceleranti del cloruro di calcio (CaCl_2), della cenere e del nitrato di calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$).

COMPONENTI:

Ricetta 1 (channel 1 e 3)

1. Calce aerea
2. Cenere 50%
3. Acqua a/l 0,7

Ricetta 2 (channel 2 e 4)

1. Calce aerea 100%
2. Acqua a/1 0,7

Ricetta 3 (channel 5 e 6)

1. Calce idraulica 100%
2. Acqua a/1 0,7

Ricetta 4 (channel 8 e 10)

1. Calce idraulica
2. CaCl_2 4%
3. Acqua a/1 0,7

Ricetta 5 (channel 9 e 11)

1. Calce idraulica
2. $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 4%
3. Acqua a/1 0,7

Dal grafico qui presentato (Fig. 6.1) è possibile determinare la quantità di calore, espresso in energia, sviluppato dalle diverse paste in relazione al tempo e individuare quindi la velocità con la quale gli elementi entrano nella fase di presa. Il picco della curva dichiara il valore massimo di calore prodotto dagli elementi, che indica il passaggio al momento di idratazione e successivo indurimento (la stabilizzazione dei valori della curva) della miscela.

È evidente, ad esempio, come la presenza del nitrato di calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) nella ricetta 5, identificata nel grafico con la serie 8 e 10, acceleri lo sviluppo del calore della pasta a base di calce idraulica, rispetto al cloruro di calcio (CaCl_2) della ricetta 4 (serie 7-9).

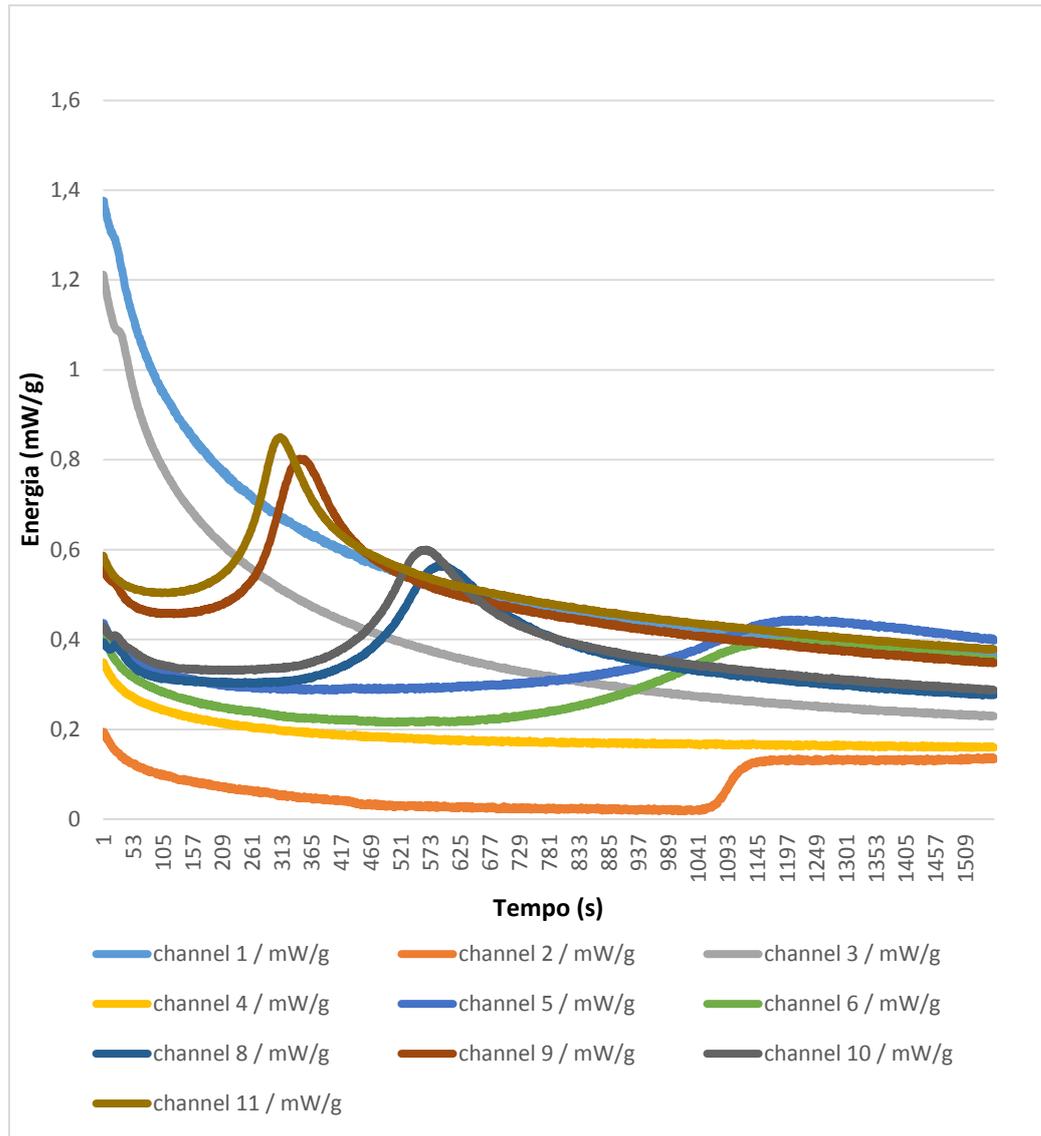


Figura 6.1 - Sviluppo di energia in funzione del tempo delle paste leganti. Il picco max individua l'inizio della fase di idratazione. Prova del 29-10-2015.

Prova del 3.12.2015

Verifica della velocità di presa di una miscela a base di gesso [$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$] e calce aerea [CaOH_2] in diverse percentuali.

COMPONENTI:

Ricetta 1 (R1/1-R1/2)

1. Gesso
2. Calce aerea 33%
3. Acqua a/l 0,5

Ricetta 2 (R2/1-R2/2)

1. Gesso
 2. Calce aerea 12%
 3. Acqua a/l 0,5
- Ricetta 3 (R3/1-R3/2)

1. Gesso
2. Calce aerea 6%
3. Acqua a/l 0,5

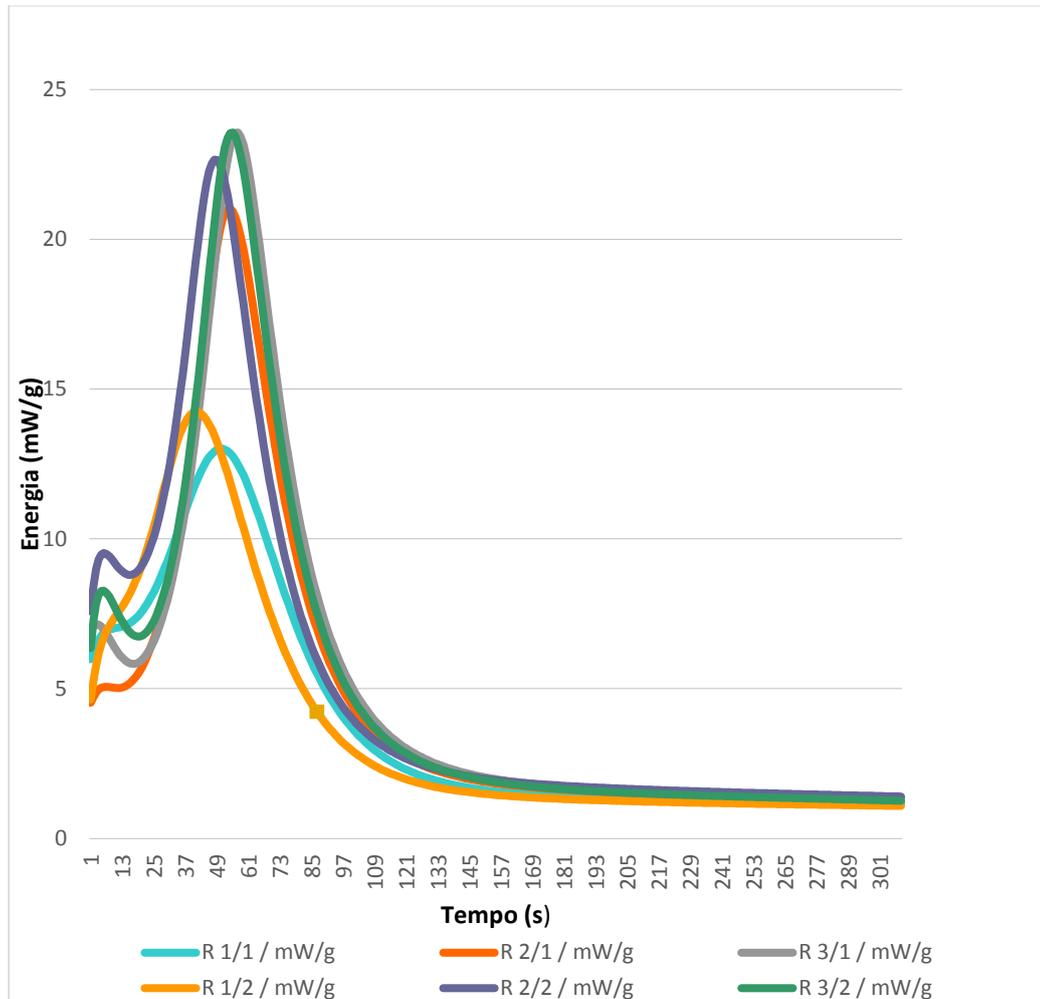


Figura 6.2 - Sviluppo di energia in funzione del tempo delle paste leganti. Il picco max individua l'inizio della fase di idratazione. Prova del 3-12-2015

Il gesso è una sostanza nota per i suoi rapidissimi tempi di presa, ed è per questo che abbiamo pensato di aggiungerlo alla miscela costituita da canapulo e calce, allo scopo di velocizzare la reazione del composito limitandone la quantità di acqua usata.

È anche un composto che può essere usato come additivo per regolare la presa dei conglomerati cementizi: i solfati avvolgono i granuli di cemento ritardandone l'idratazione.

La composizione chimica del canapulo è paragonabile a quella del legno; in tale composizione è presente la lignina, il costituente più abbondante dopo la cellulosa ed è quello responsabile della sua rigidità e resistenza. È insolubile in acqua, mentre è solubile nelle soluzioni acquose di alcali. Con l'aggiunta di acqua e particolari enzimi avviene il legame peptidico che trasforma la cellulosa, circondata dalla lignina, in zuccheri (processo di fermentazione utilizzato per la produzione di biomasse). Questo componente, durante la fase di bagnatura e miscelazione del conglomerato, reagisce con l'alta alcalinità dei leganti, causando il rilascio di sottoprodotti (zuccheri) che formano una sottile barriera attorno ai granuli del legante, ritardandone il processo di presa e quindi lo sviluppo delle resistenze meccaniche necessarie al materiale per essere posato e non incidere rovinosamente sulle tempistiche di cantiere.

6.3.2 Procedura per la caratterizzazione delle proprietà meccaniche

Realizzazione dei campioni

Nonostante il crescente utilizzo del conglomerato di canapa nelle sue varie forme (pannelli e mattoni prefabbricati, cappotto isolante gettato e spruzzato), non si trovano ancora in letteratura programmi sperimentali specifici alla procedura di confezionamento dei provini in coerenza con il metodo di posa per proiezione.

Una delle prime incongruenze con la quale ci si scontra per rispettare la procedura di riferimento fornita dalle Regole Professionali sul conglomerato di canapa, è proprio la fabbricazione del provino.

Per ottenere un campione esemplificativo, attendibile alle effettive caratteristiche del prodotto finito, non si può prescindere dalla valutazione del metodo di posa in opera. Ecco perché, un provino di dimensioni standard ottenuto con la tecnica di getto e pigiatura, non può essere rappresentativo delle prestazioni di un conglomerato spruzzato.

Il metodo qui esposto, consente di verificare l'omogeneità del getto, della disposizione degli aggregati rispetto alla superficie di supporto, e di

conseguenza, quella del comportamento meccanico e termico, come non si potrebbe fare con la fabbricazione di un provino gettato in uno stampo di dimensioni standard.

Test meccanici

Nonostante il conglomerato di canapa non sia utilizzato per svolgere funzione strutturale, è importante conoscerne i valori di carico sopportati al fine di valutarne la capacità di auto-portanza e durabilità.

Test di compressione

- **carico uniforme:** SIA 279.066 / EN 826

scopo della prova:

Definire il massimo carico sopportato dal provino sotto uno sforzo di compressione applicato ad una velocità di spostamento costante.

Descrizione della prova:

- In situ

Il composito è proiettato sul muro. Dopo un periodo di stagionatura (da definire) della superficie campione, verrà effettuata la prova con un dispositivo portatile che sarà applicato direttamente in situ e fissato al supporto. Tale macchina è costituita da una piastra indeformabile in acciaio a contatto con la superficie superiore del provino, che tramite un pistone, applica la forza di carico uniforme. La superficie inferiore è bloccata da una piastra piana, indeformabile e fissa per impedire lo scorrimento verso il basso del materiale, determinando la prova di compressione.

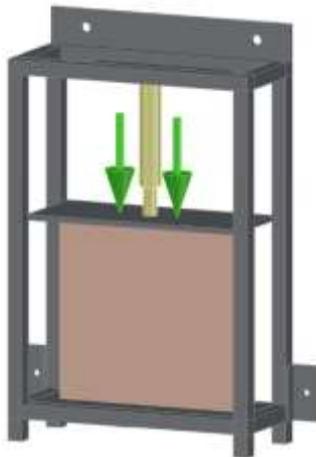


Figura 6.3 - Dispositivo per test di compressione da effettuare in situ.

- In laboratorio

La modalità qui illustrata nelle immagini, già abitualmente usata per la campionatura di materiali posati con sistemi analoghi, prevede che il getto a spruzzo sia effettuato direttamente in situ, alle condizioni effettive di messa in opera (qui: T_{est} 3°C), in apposite casseformi (nel nostro caso 150x50x20 cm) e, previa maturazione, essiccazione (periodo da definire) e scasseratura in laboratorio, verrà tagliato in campioni dalle dimensioni standard facilmente manovrabili, che possano essere misurati con i macchinari comunemente usati per i test secondo le indicazioni della norma SIA 279.066 / EN 826.



Figura 6.4 - Realizzazione del provino in cantiere

- **carico concentrato:** SIA 279.083 / EN 12430

scopo della prova:

Definire il valore massimo sopportato di carico a compressione mono-assiale puntiforme, applicato ad una velocità costante.

Descrizione della prova:

- In situ

Come nella prova di resistenza a compressione a carico uniforme, verrà testato un campione di conglomerato direttamente spruzzato sul supporto, ma il dispositivo applicherà il carico attraverso un punzone, al posto della placca piana.

- In laboratorio

Come nella prova di resistenza a compressione a carico uniforme, le prove dovranno essere realizzate secondo le modalità proposte dalla normativa di riferimento SIA 279.083 / EN 12430.

- **Determinazione dello scorrimento viscoso a compressione (fluage):**
SIA 279.071/EN 1606

Scopo della prova:

Lo scorrimento è determinato confrontando la deformazione per schiacciamento, rilevata a intervalli di tempo regolari, di più campioni (almeno 9) sollecitati con diverse condizioni di carico costanti e applicate per un periodo definito. Le dimensioni dei provini dovrebbero essere le stesse di quelle usate per la prova di compressione a carico uniforme (EN 826).

Descrizione della prova:

- In situ

Il conglomerato di canapa è direttamente spruzzato sul muro. Durante la posa in opera saranno applicati dei sensori di deformazione a fibra ottica all'interno dello spessore del materiale. Potrà essere prevista una guaina di revisione per la gestione dei cavi. Dopo il periodo di essiccazione (da definire), i sensori saranno controllati in periodi di tempo definiti (secondo le indicazioni della SIA 279.071 / EN 1606) e rilevato lo spostamento del campione. La possibilità di lasciare i sensori incorporati nel conglomerato per una durata di tempo indeterminata, consente di effettuare rilevamenti e valutazioni a lungo termine.

- In laboratorio

I campioni sono preparati in cantiere secondo la modalità di posa in opera; dopo il periodo di essiccazione (da definire) sono testati al *fluage* secondo la procedura di laboratorio indicata dalla normativa SIA.071 / EN 1606.

Test a trazione

- **trazione del materiale:** SIA 279.072/EN 1607

Scopo della prova:

Definire la forza di carico massima che può essere applicata al provino e calcolare la resistenza a trazione.

Descrizione del dispositivo di misura:

Il dispositivo qui presentato è stato ideato appositamente allo scopo di poter effettuare la prova di trazione del conglomerato di canapa posato a spruzzo. È costituito da 2 cubi contigui di 20x20x20 cm, dei quali la faccia di comunicazione interna è forata, per consentire la continuità del materiale. L'apparecchio è smontabile e apribile per consentire il getto all'interno.

I convenzionali metodi di fabbricazione dei provini per il test a trazione, non risultano idonei per questo materiale, in quanto la superficie che si ottiene con tale materiale e metodo di posa, non è perfettamente piana e continua, rendendo fallace l'incollaggio della piastra normalmente utilizzata per la prova a trazione.

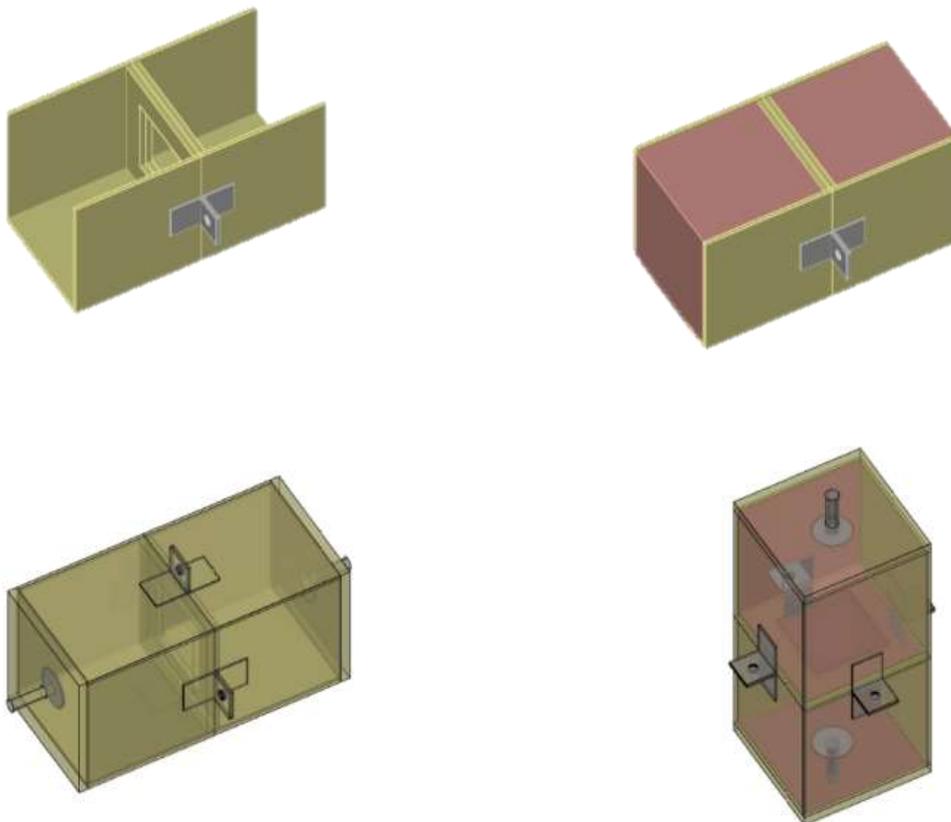


Figura 6.5 - Dispositivo per test a trazione da effettuare in laboratorio

Descrizione della prova:

- In situ

I campioni sono preparati direttamente in cantiere, dove la miscela viene spruzzata all'interno del dispositivo portatile.



- In laboratorio

Il dispositivo portatile, riempito con il conglomerato spruzzato, verrà fatto maturare in laboratorio (periodo da definire) per poi essere sottoposto alle misurazioni della forza massima di trazione. Le facce laterali del parallelepipedo chiuso sono dotate di barre di acciaio che costituiscono le teste del provino, e saranno raccordate agli afferraggi della macchina di prova.

Alcune indicazioni possono essere riprese dalla norma 279.072 / EN 1607 (Resistenza a sforzo di trazione applicato perpendicolarmente alle facce).

- **Misurazione dell'aderenza al supporto per trazione diretta**

Scopo della prova:

Determinare la forza massima di trazione che può essere applicata al conglomerato di canapa prima di essere staccato dal supporto (calcestruzzo, mattoni, legno, pietra etc..) e calcolare la resistenza al tiro.

Descrizione della prova:

- in situ

Il dispositivo portatile è fissato direttamente sul muro. Il calcestruzzo di canapa è spruzzato all'interno dello stampo forato, in modo da garantire una zona di adesione tra il prodotto ed il suo supporto. Dopo un periodo di essiccazione (da definire) dell'isolante, viene effettuato il test di trazione secondo il metodo del *pull off* con un dispositivo mobile, fino al distacco completo del campione dal muro.

Alcune indicazioni sulla procedura possono essere riprese dalla norma EN 1542.



Figura 6.6 - Dispositivo per test a trazione da effettuare in situ con il metodo del pull-off

Test a taglio

- **Aderenza al supporto:** SIA 279.080/EN 12090

Scopo della prova:

Determinare la resistenza a taglio dell'adesione tra due superfici di materiali diversi, attraverso test di push-off.

Descrizione della prova:

- In situ

Il calcestruzzo di canapa è proiettato sul muro. Dopo un periodo di stagionatura (da definire), verrà effettuata la prova con un dispositivo portatile che sarà applicato direttamente in situ e fissato al supporto. Tale macchina è costituita da una piastra indeformabile in acciaio a contatto con la superficie superiore del provino, che tramite un pistone, applica la forza di carico. La superficie inferiore del campione è libera per consentirne e determinarne lo spostamento dovuto alla sollecitazione.

Alcune indicazioni di riferimento sulle configurazioni di prova, posso essere trovate nella SIA 279.080/EN 12090.

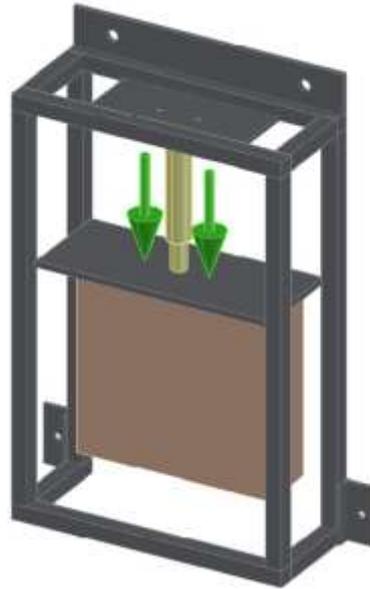


Figura 6.7 - Dispositivo per il test di aderenza all'interfaccia con il supporto da effettuare in situ

6.3.3 Procedura per la caratterizzazione delle proprietà termiche

Test per il calcolo della conducibilità termica

Nei laboratori dell' HEIG-Vd sono state effettuate delle prove per verificare le proprietà di isolamento termico del materiale, su diretta richiesta della committenza, la ditta svizzera *Pittet Artisans Sàrl*, produttrice e installatrice del conglomerato di canapa. Esistono diversi laboratori che si occupano di effettuare misurazioni delle performance dei prodotti e che sono adibiti al rilascio di certificati conformi alle normative vigenti, ma considerata l'attuale assenza di dispositivi specificamente adatti per questo tipo di materiale, si è deciso di progettare nella sopracitata sede, un sistema che permettesse di approssimare il coefficiente di conducibilità termica λ [W/mK], il principale parametro che caratterizza la proprietà di isolamento termico di un materiale, per avere un valore di riferimento. La conducibilità termica esprime il *flusso di calore che nelle condizioni di regime stazionario passa attraverso una parete di materiale omogeneo dello spessore di 1m, per m² di superficie e per una differenza di 1°C tra le due facce opposte e parallele della parete di materiale considerato* (definizione coefficiente di

Capitolo 6

conducibilità λ da UNI 7357/74 – Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento degli edifici).

Scopo della prova:

Determinazione della resistenza termica di provini allo stato secco, seguendo i principi del metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termo-flussimetro. La prassi normalizzata è descritta nelle norme EN 12664-7.

Descrizione del dispositivo di misura (da EN 12664-7):

Nel metodo della piastra calda con anello di guardia, il provino da testare viene posizionato tra l'elemento riscaldante e l'elemento raffreddante (Fig. 6.8). Il primo è costituito da un dispositivo centrale di misura e da un anello di guardia mantenuti alla stessa temperatura, in modo da generare un flusso termico monodimensionale attraverso il campione di prova.

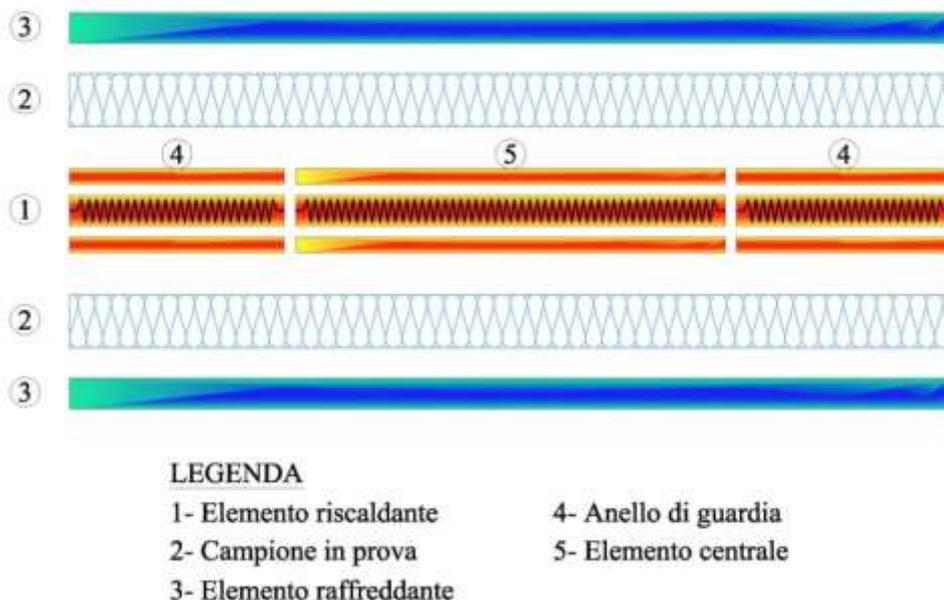


Figura 6.8 - schema degli elementi costituenti la piastra calda con anello di guardia

Descrizione della prova:

- In laboratorio

Quella descritta di seguito è la procedura di prova effettuata su un campione allo stato secco di conglomerato di canapa avente dimensioni: 500x500x82 mm.

La conduttività termica è data dalla relazione seguente:

$$\lambda = \frac{P s}{A \Delta T} = \left[\frac{W}{mK} \right]$$

Dove:

P= potenza dissipata dall'elemento centrale [W]

s= spessore del campione di materiale [m]

A= area dell'elemento centrale [m²]

ΔT = differenza di temperatura tra la superficie calda e la superficie fredda del campione [K]

Al fine di calcolare in maniera ottimale la differenza di temperatura tra le superfici opposte del campione di materiale, è necessario che questo e gli strumenti di misura termostatica siano isolati dalle condizioni esterne. A tale proposito è stato utilizzato un involucro di polistirene dello spessore di 200 mm.

L'elemento riscaldante è stato simulato da una serpentina metallica dentro la quale viene fatta circolare, con l'aiuto di una pompa, dell'acqua calda mantenuta a temperatura costante grazie ad un termostato. Il tubo è uniformemente distribuito su una placca metallica a contatto con una delle facce del campione.

Gli strumenti di misura utilizzati sono:

- Il flussometro, per determinare il flusso di calore percorrente la piastra.
- La termocoppia, per misurare l'intervallo di temperatura tra le facce del provino.
- Software per l'acquisizione dei segnali ed elaborazione dati.

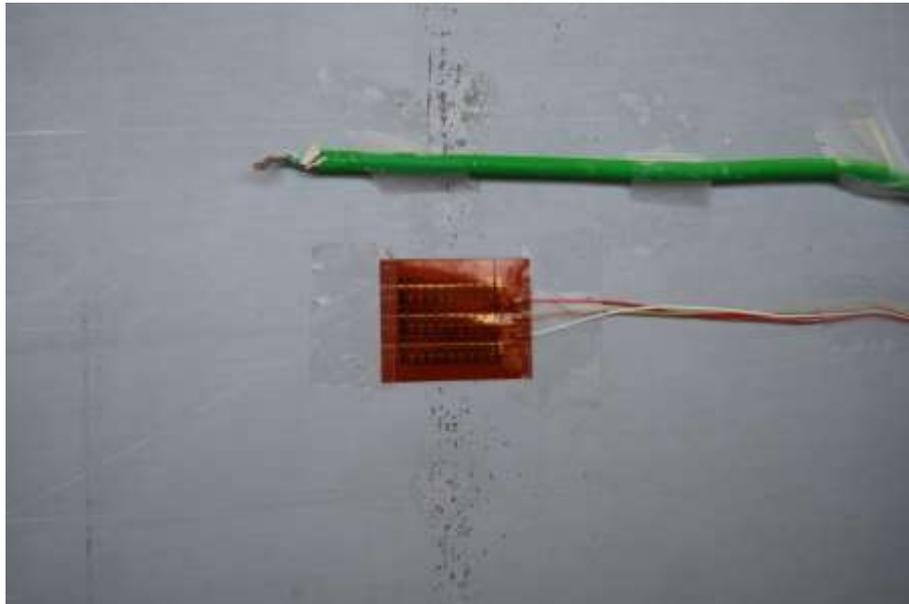


Figura 6.9 - Test per il calcolo della conducibilità termica

L'esperimento sopra descritto ha permesso di attribuire al conglomerato di canapa un valore di conducibilità relativamente basso, che si attesta intorno a $0,07 \text{ W/mK}$, tale da poter essere comparato ad altri prodotti isolanti in commercio.

Il grafico qui presentato, restituisce i valori di conducibilità per un campione di 82 mm di spessore.

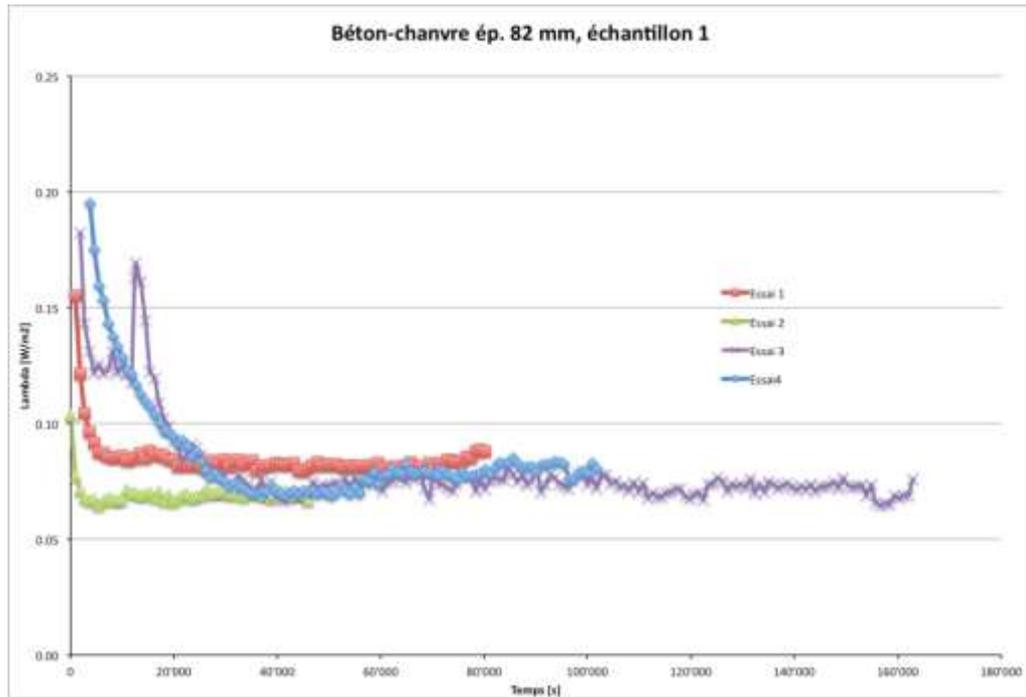


Figura 6.10 - Valori ottenuti della conducibilità termica su un campione di 8 cm

Anche il laboratorio svizzero dell'EMPA – Materials Science and Technology, al quale è stato sottoposto il medesimo provino, ha certificato un valore analogo.



Empa
 Überlandstrasse 129
 CH-8600 Dübendorf
 T +41 58 765 55 11
 F +41 58 765 62 44
 www.empa.ch

Entwurf - Conception

Pittet Artisans
 Grand Pré 3

1512 Chavannes sur Moudon

Kurzbericht Nr. 461'118

Prüfauftrag: **Wärmeleitfähigkeitsmessung**
Auftraggeber: Pittet Artisans
Prüfobjekt: Hanfputzplatte 500 mm x 500 mm x 80 mm.
Kundenreferenz: Hr. S. Pittet
Ihr Auftrag vom: 29.5.2012, April 2012
Eingang des Prüfobjektes: 8. Juni 2012
Ausführung der Prüfung: bis 18. Juni 2012
Prüfverfahren: EN 12667 mit den 2-Plattengeräten SOP 118.001
 Normabweichung: - Messung mit Referenzprobe
 - Platte war zuwenig eben
Probeprobereitung: Schleifen, Anlieferungsfeuchte

Resultat

Probekörperdicke [mm]	Dichte [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ_{10}^{21} [W/(mK)]
77.6	252	0.072 ± 0.03

1) Wärmeleitfähigkeit bei der Mitteltemperatur 10°C

Dübendorf, 10.7.2012

Prüfleiter:

Notified Body NB 2260



B. Bin...

STS-Nr. 086

Anmerkung: Die Untersuchungsergebnisse haben nur Gültigkeit für das geprüfte Objekt. Das Verwenden des Berichtes zu Werbezwecken, der
 blosses Hinweisen darauf sowie auszugsweises Veröffentlichendes bedürfen der Genehmigung der Empa (vgl. Merkblatt). Bericht und
 Unterlagen werden 30 Jahre archiviert.

Figura 6.11 - Certificazione sul valore di conducibilità termica

Per ogni prova il resoconto deve includere:

- nome dello sperimentatore;
- data e ora della prova;
- caratteristiche tecniche principali della strumentazione utilizzata;
- caratteristiche geometriche dell'elemento in prova;
- identificazione inequivocabile delle posizioni di prova;
- età del calcestruzzo (se conosciuta);
- condizione di umidità superficiale del calcestruzzo al momento della prova;
- temperatura ambiente e del materiale in prova;
- schema esplicativo della sezione dell'elemento con indicazione di eventuali punti non rilevabili per le condizioni al contorno (ad es. presenza di impianti o tubature metalliche che falsano il segnale);
- tabella riassuntiva dei risultati.
- Allegare foto della strumentazione installata.
- L'operazione va eseguita o diretta da personale qualificato e certificato quale sperimentatore di questa tipologia di indagine.

7 CONCLUSIONI

Questa tesi è un contributo allo studio dell'influenza dei parametri di composizione e di messa in opera del conglomerato a base di canapulo posato a spruzzo, nei confronti delle caratteristiche meccaniche, termiche e della velocità di messa in opera.

Lo scopo principale della ricerca è quello di cercare di ridurre al minimo la quantità di legante presente nel composto, al limite consentito dall'efficienza e dalla durabilità del prodotto, per lasciare più spazio possibile alle interessanti capacità isolanti e termo-igrometriche naturali dovute alla struttura porosa dell'aggregato vegetale.

La prima fase consiste nel definire le materie prime impiegate per la formulazione del composto, per qualità e quantità.

Nel mercato di prodotti analoghi, la formulazione generalmente usata per lo stesso scopo, di isolamento termico a cappotto applicato per proiezione direttamente sul supporto verticale, presenta un rapporto legante/aggregato di almeno 2:1, fino a 4:1. Il biocomposito qui presentato e discusso ha un rapporto di 1,5:1. Oltre questo parametro di variabilità delle prestazioni, un altro molto influente e da controllare direttamente in cantiere è quello acqua/legante. L'acqua è l'elemento necessario a rendere lavorabile la miscela, a provocare la cinetica di idratazione del legante, quindi la sua presa e lo sviluppo della resistenza, ma è anche un componente che può impregnare eccessivamente il canapulo (che ha una capacità di assorbimento fino a 5 volte il suo peso) compromettendo non solo l'incremento delle proprietà meccaniche e isolanti, ma incidendo negativamente anche sui tempi di realizzazione dell'opera. Il giusto dosaggio è quindi fondamentale.

La modalità di messa in opera per proiezione, è considerata particolarmente idonea per questo tipo di materiale: la miscela può essere inserita nel tubo della macchina spruzzatrice allo stato secco, o pre-umidificata, e consente di aggiungere acqua direttamente all'uscita dalla bocchetta. Questo sistema non permette all'aggregato vegetale di avere il tempo di assorbire molta acqua, ma solo di avviare la stechiometria con il legante, opportunamente caratterizzato da tempi rapidi di reazione.

È stato inoltre osservato, che un altro parametro di influenza è determinato dal metodo di afflusso dell'acqua, nel tubo con la miscela. L'acqua inserita

Capitolo 7

direttamente con una derivazione nella lancia di spruzzatura, è risultata essere eccessiva, causando delle colature del materiale applicato.

Sono in fase di sperimentazione sistemi di gocciolatura effettuata attraverso perforazioni della bocchetta, o nebulizzazione esterna.



Tenendo conto dell'elevato numero di parametri coinvolti nella realizzazione del conglomerato di canapa posato a spruzzo, lo studio riportato in questo lavoro di tesi non può essere considerato esaustivo rispetto ad una valutazione complessiva del comportamento del prodotto finito, ma ha

permesso di approfondire la conoscenza in merito, anche attraverso l'osservazione diretta di un metodo di posa in opera specifico.

In questo percorso è stato individuato un margine di progresso apprezzabile ed è da considerarsi significativo in quanto solleva delle riflessioni importanti sui possibili campi di osservazione e miglioramento, per quanto riguarda ad esempio:

- la modalità di fabbricazione del provino;
- le percentuali e la qualità dei componenti di miscela;
- il tempo di maturazione per lo sviluppo delle proprietà meccaniche;
- la compattezza del getto in tutto lo spessore, che determinerebbe un comportamento omogeneo di tutte le caratteristiche prestazionali (meccaniche e isolanti).



Va ricordato e sottolineato inoltre che, allo stato attuale, questo è un materiale isolante per il quale non esistono riferimenti e vincoli normativi, ed esula da qualsiasi destinazione d'uso con finalità strutturali.

BIBLIOGRAFIA

CRITERI DI PROGETTAZIONE SOSTENIBILE

- Arbizzani, E. (2008). *Tecnologia dei sistemi edilizi*. Maggioli Editore.
- Carpentieri, A., Tieri, G. B. (2007). *La certificazione energetica degli edifici*. Sistemi Editoriali.
- Casini, M. (2009). *Costruire l'ambiente*. Edizioni Ambiente.
- Fassi, A., Maina, L. (2006). *L'isolamento ecoefficiente*. Edizioni Ambiente.
- Felber, C. (2012). *L'economia del bene comune*. Tecniche Nuove.
- Lavagna, M. (2005). *Sostenibilità e risparmio energetico: soluzioni tecniche per involucri eco-efficienti*. Milano: Libreria Clup.
- Milardi, M. (2015). *L'edificio risorsa. Caratteri e indicatori di eco-efficienza in edilizia*. Roma: Edilizia Nuova Cultura.
- Oleotto, E., Bassi, L. (2011). *Guida agli isolanti naturali*. EdicomEdizioni
- Paolella, A. (2004). *Abitare i luoghi. Insediamenti, tecnologia, paesaggio*. Pisa: BFS edizioni.

MATERIALI

- Bertolini, L. (2010). *Materiali da costruzione*. Vol. I,II. Città Studi Edizioni.
- Frigione, G. Mairo, N. (2006). *Materiali per l'edilizia. Una guida ai materiali strutturali, ausiliari e di rivestimento*. Hoepli.
- Turco, A. (2001). *Il gesso. Lavorazione – trasformazione – impieghi*. Hoepli.

CANAPA – STORIA E APPLICAZIONI

- Aldrich, M. (1997). *History of therapeutic cannabis*. In *Cannabis in Medical Practice* (p. 35-55). Mary Lynn Mathre.
- Bevan, R. a. (2008). *Hemp lime construction*. BRE Press.
- Bouloc, P. (2006). *Le chanvre industriel: production et utilisations*. France Agricole Editions.

Bibliografia

- Conrad, C. (1998). *Cannabis. I mille usi di una pianta miracolosa*. Roma: Castelvecchi.
- Herer, J., Brokers, M. (1997). *Canapa – Cannabis – Marijuana*. Milano: Parole di Cotone edizioni.
- Michka. (1998). *Canapa: la rinascita della cannabis*. Milano: Leoncavallo.
- Wishnia, S. (2004). *La Cannabis. Proprietà, storia, impieghi, folklore*. Roma: L’Airone editrice.

LETTERATURA SCIENTIFICA INTERNAZIONALE

- Adams, R., Hunt, M., Clark, J. (1940). “Structure of cannabidiol, a product isolated from the marihuana extract of Minnesota wild hemp”. I. *Journal of the American Chemical Society*, 62(1), 196-200.
- Arnaud, L., Cerezo, V. (2001). *Qualification physique des matériaux de construction à base de chanvre*. Vaulx-en-Velin: ENTPE.
- Arnaud, L., Etienne, G. (2012). “Experimental study of parameters influencing mechanical properties”. *Construction and Building Materials*(28), 50-56.
- Benfratello, S., Capitano, C., Peri, G., Rizzo, G., Scaccianoce, G., Sorrentino, G. (2013). “Thermal and structural properties of a hemp–lime biocomposite”. *Construction and Building Materials*(48), 745-754.
- Conrad, K., Hansen, H. (2007). “Sorption of zinc and lead on coir”. *Bioresource Technology*, 98(1), 89-97.
- Diquélou, Y., Gourlay, E., Arnaud, L., Kurek, B. (2015). “Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix”. *Cement & Concrete Composites*(55), 112-121.
- Elfordy, S., Lucas, F., Tancret, F., Scudeller, Y., Goudet, L. (2008). “Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hempcrete") manufactured by a projection process”. *Construction and Building Materials*(22), 2116-2123.
- Evrard, A. (2006). “Sorption behaviour of lime-hemp concrete and its relation to indoor comfort and energy demand”. *PLEA 2006 - 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Geneva.
- Mason, O., Morgan, C., Stefanovic, A., Curran, H. (2008). “The psychotomimetic states inventory (PSI): measuring psychotic-type

- experiences from ketamine and cannabis”. *Schizophrenia research*, 103(1), 138-142.
- Mechoulam, R., Shvo, Y. (1963). “Hashish: the structure of cannabidiol”. *Tetrahedron*, 19(12), 2073--2078.
- Pretot, S., Collet, F., Garnier, C. (2014). “Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating”. *Building and Environment*(72), 223-231.
- Walker, R., Pavia, S., Mitchell, R. (2014). “Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes”. *Construction and Building Materials*(61), 340-348.

SITI INTERNET CONSULTATI

- ADEME. *Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Energie*. Consultato in Ottobre 2015 da <http://www.ademe.fr/>
- ANAB. *Associazione nazionale architettura bioecologica*. Da <http://www.anab.it/>
- Assocanapa. *Assocanapa, coordinamento nazionale per la canapicoltura*. Consultato in Ottobre 2015 da <http://www.assocanap.org/>
- CalceCanapa. *CalceCanapa*. Consultato in Novembre 2015 da <http://www.calcecanapa.it/>
- CenC. *Construire en chanvre*. Consultato in Settembre 2015 da <http://www.construire-en-chanvre.fr/>
- Chanvre info. *GreenMe*. Consultato in Ottobre 2015 da <http://www.chanvre-info.ch/info/it/La-polpa-della-canapa-e-la.html/>
- CMFgreentech. *Canapalithos*. Da <http://www.cmfgreentech.com/it/canapalithos/>
- CTI. *Comitato termotecnico italiano*. Da <http://www.cti2000.it/>
- Equilibrium. *Equilibrium bioedilizia*. Da <http://equilibrium-bioedilizia.it/>
- Legambiente. *Legambiente*. Consultato in Ottobre 2015 da <http://www.legambiente.it/contenuti/comunicati/la-canapa-all-expo-nuova-speranza-dell-agricoltura-italiana/>
- Lhoist. Lhoist – Minerals and lime producer. Consultato in Settebre 2015 da <http://www.tradical.com/pdf/hemp-lime-technology.pdf>
- Pittet Artisans sàrl. *Art du chanvre*. Da http://www.pittet-artisan.ch/art_chanvre.asp/

Bibliografia

Standardization. CEN. Consultato in Ottobre 2015 da http://standards.cen.eu/dyn/www/?fp=204:7:0:::FSP_ORG_ID:6071&cs=1660CD08D7D1FC52C51B1D3D78839FD32/

UNI. Ente italiano di normazione. Da <http://www.uni.com/>

ATTI DI CONVEGNI E REPORT

CE. (2011). *Comunicazione della commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale europeo e al Comitato delle Regioni*. Bruxelles.

CE. (2013). *Vivere bene entro i limiti del nostro pianeta. 7° PAA - Programma generale di azione dell'Unione in materia di ambiente fino al 2020*.

Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat. Arnaud, L.; Cerezo, V (2001). Contratto di ricerca. *Qualification physique des matériaux de construction à base de chanvre*.

CRESME. (2014). *Valutazione della convenienza e dell'impatto economico dell'isolamento termoacustico degli edifici*.

ENEA (2014). *Documento di predisposizione del Piano d'Azione italiano per l'Efficienza Energetica 2014*.

ENEA (2015). *Rapporto annuale efficienza energetica*.

Ministere de l'Agriculture et de la Peche (2006) *Etude des caracteristiques environnementales du chanvre par l'analyse de son cycle de vie*.