



Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura

Dottorato di ricerca in Valutazione e mitigazione dei rischi urbani e territoriali

Coordinatore: Prof. Massimo Cuomo

Ciclo XXXIV

Ing. Matteo Vitale

**Natural material for sustainable construction
from agricultural by-products**

Materiale naturale per l'edilizia sostenibile dai sottoprodotti agricoli

Tutor: Prof. Santi Maria Cascone

Co-Tutor: Prof. Maria Del Mar Barbero Barrera

Anno accademico 2020-21

Sommario

Abstract - english	5
Abstract – italiano	7
Introduzione	9
1. Sostenibilità in edilizia	15
1.1 Il riciclo dei materiali da costruzione.....	15
1.2 Materiali naturali in edilizia	28
2. Stato dell’arte.....	43
2.1 Il sottoprodotto agricolo in edilizia	44
2.2 Tecniche realizzative dei materiali	60
2.3 Analisi del settore agricolo	64
3. Materiale oggetto di analisi	78
3.1 Reperimento dei sottoprodotti	78
3.2 Caratterizzazione del materiale.....	79
4. Metodologia per la preparazione dei campioni	82
4.1 Preparazione dei campioni in granuli	83
4.2 Campioni pressati a freddo	85
4.3 Campioni pressati durante l’essiccazione	87
4.4 Campioni pressati a caldo.....	91
4.5 Metodo di essiccazione.....	93
5. Analisi condotte	95
5.1 Analisi SEM	95
5.2 Proprietà chimiche	96

5.3	Ritiro	97
5.4	Densità apparente	97
5.5	Proprietà termiche	98
5.6	Proprietà meccaniche	103
5.7	Proprietà acustiche	105
5.8	Test assorbimento acqua.....	107
6.	Risultati delle analisi	109
6.1	Analisi microscopica	109
6.2	Ritiro	113
6.3	Densità	115
6.4	Caratterizzazione termica	117
6.5	Caratterizzazione meccanica	120
6.6	Caratterizzazione acustica	124
6.7	Assorbimento acqua	127
7.	Ulteriori indagini in presenza di micelio	132
7.1	Materiali	132
7.2	Metodi.....	133
7.3	Risultati.....	135
8.	Analisi economica	138
8.1	Scenario industriale	138
8.2	Analisi del processo produttivo	139
9.	Prospettive future.....	145
10.	Conclusioni	147

11.	Bibliografia.....	150
12.	Allegati.....	173
12.1	Riassunto.....	175
12.2	Disegni.....	177
12.3	Rivendicazioni.....	179
12.4	Descrizione.....	182
12.5	Verbale di deposito.....	199

Abstract - english

The construction sector represents one of the largest "consumers" of raw materials in the world. The processes of materials extraction, production and transport contribute to the production of CO₂, a greenhouse gas which is the main cause of global warming. At the same time, environmental regulations aimed at protecting fragile ecosystems are making it increasingly difficult and expensive to extract and use certain resources, causing prices to rise significantly. The replacement of high CO₂ production products with low environmental impact materials would improve the overall impact of the building stock, which today accounts for 40% of total energy consumption. In response to these problems, the following research aims to evaluate the use of alternative building materials to those currently used, characterized by a high environmental impact. Although the insulating products currently on the market and traditionally used have excellent thermal performance (e.g. extruded polystyrene, expanded polystyrene, polyurethane foam, etc.), they are derived from fossil fuels such as petroleum. Studies conducted on various agricultural by-products have shown how some properties that characterize these resources (such as high porosity, low thermal conductivity and good thermo-hygrometric properties) make them particularly suitable for the production of insulating materials for the building envelope. Furthermore, the development of materials containing these wastes, often called in the literature as "bio-based insulations" or "bio-insulations", represents an important opportunity to enhance the enormous quantities of agricultural by-products generated each year. In this thesis is initially presented the numerous projects where agricultural by-products in the construction sector is used to produce insulating panels. The analysis is aimed at knowing the production processes and the properties of these materials. However, in this context, the oranges transformation by-product has not yet been assessed. In fact, the orange is the most widespread citrus fruit in the world and

every year more than 124 million tons are consumed. From the transformation of the orange derives an enormous amount of waste, largely composed of peels, seeds and pulp residues. Currently, there isn't a strategy that provides for the recovery of this by-product, which uncontrolled disposal causes severe environmental problems. Starting from oranges transformation, in this study an application of by-products in construction sector is hypothesized and different samples with different production processes were made with: bulk granules, cold-pressed, pressed during drying process and hot-pressed procedure. All samples are free of binders and additives, entirely composed of the by-product and therefore completely natural. The products obtained were characterized as regards their physical properties (density, water absorption, swelling and durability), thermal (conductivity), mechanical (flexural strength and modulus of elasticity) and acoustic (acoustic absorption) properties. After the tests carried out, it is believed that the panel derived from the pressing and simultaneous drying of wet orange peels is the one with the best thermal and mechanical properties. The results showed a thermal conductivity of the panel of 0.065 W / mK and a flexural strength of 0.09 MPa. To improve the durability of the material, additional studies were conducted in order to add mycelium to the compound. The properties of the mycelium have improved the permeability of the samples to water, while maintaining the natural composition of the formulation. In summary, considering the results obtained during this research, it can be said that the by-product from citrus fruits shows a high potential for use as a panel in construction. The data obtained are of great importance, not only because a solution is proposed for the valorisation and recycling of transformation by-products, but also because an alternative to traditional construction products is provided. In fact, further development of bio-based insulations as an alternative to traditional thermal insulators could be encouraged by the high availability of orange.

Abstract – italiano

Il settore delle costruzioni rappresenta uno dei più grandi “consumatori” di materie prime al mondo. I processi di estrazione dei materiali, produzione e trasporto, contribuiscono alla generazione di CO₂, un gas serra che costituisce la principale causa del surriscaldamento globale. Al contempo, le regolamentazioni volte a proteggere gli ecosistemi fragili, stanno rendendo sempre più difficile e costosa l'estrazione e l'uso di determinate risorse, causando un aumento significativo dei prezzi. La sostituzione dei prodotti ad alta produzione di CO₂ con dei materiali a basso impatto ambientale, migliorerebbe l'impronta complessiva del patrimonio edilizio, che oggi rappresenta il 40% del consumo energetico totale. In risposta a questi problemi, la seguente ricerca ha come obiettivo quello di valutare l'utilizzo di materiali da costruzione alternativi a quelli attualmente utilizzati, caratterizzati da un alto impatto ambientale. Infatti, sebbene i prodotti isolanti attualmente in commercio e tradizionalmente utilizzati abbiano prestazioni termiche eccellenti (ad es. polistirene estruso, polistirene espanso, schiuma di poliuretano, ecc.), essi sono derivati da combustibili fossili come il petrolio. Studi condotti su diversi sottoprodotti agricoli hanno mostrato come alcune proprietà che caratterizzano queste risorse (come l'elevata porosità, la bassa conducibilità termica e le buone proprietà termoisolanti) li rendano particolarmente idonei per la produzione di prodotti termoisolanti per l'involucro edilizio. Inoltre, lo sviluppo di materiali contenenti questi scarti, spesso denominati in letteratura “*bio-based insulations*” o “*bio-insulations*”, rappresenta un'importante opportunità per valorizzare le enormi quantità di sottoprodotti agricoli generati ogni anno. In questa tesi sono inizialmente presentati i numerosi progetti di impiego di quest'ultimi nel settore edilizio per produrre pannelli isolanti. L'analisi è finalizzata a conoscere i processi produttivi e le proprietà di questi materiali. Tuttavia, in tale contesto, il sottoprodotto di trasformazione delle arance non

è stato ancora preso in considerazione. L'arancia, infatti, è l'agrume più diffuso in tutto il mondo e ogni anno ne vengono consumate più di 124 milioni di tonnellate. Dalla trasformazione di questo agrume deriva un'enorme quantità di scarti, in gran parte composti da bucce, semi e residui di polpa. Attualmente, non esiste una precisa strategia che preveda il recupero di questo sottoprodotto, il cui smaltimento, spesso incontrollato, provoca forti problemi ambientali. A partire da questi, la seguente ricerca ne ha ipotizzato una applicazione in edilizia tramite la produzione di campioni con diversi processi produttivi: in granuli sfusi, pressati a freddo, pressati durante l'essiccazione e pressati a caldo. Tutti i provini sono privi di leganti e di additivi, composti interamente dal sottoprodotto e quindi completamente naturali. I prodotti ottenuti sono stati caratterizzati per quanto riguarda le loro proprietà fisiche (densità, assorbimento d'acqua, rigonfiamento e durabilità), termiche (conducibilità), meccaniche (resistenza a flessione e modulo di elasticità) ed acustiche (assorbimento acustico). Alla luce delle prove effettuate, si ritiene che il pannello derivato dalla pressatura e contemporanea essiccazione delle bucce di arancia umide sia quello con le migliori proprietà termiche e meccaniche. I risultati hanno mostrato una conducibilità termica del pannello di 0,065 W/mK e una resistenza a flessione di 0,09 MPa. Per migliorare la durabilità del materiale, sono stati condotti ulteriori studi che hanno previsto l'aggiunta di funghi al composto. Ad oggi, l'utilizzo dei sottoprodotti di arancia come substrato di crescita del micelio non era stato valutato. Lo studio ha dimostrato la possibilità di realizzare dei campioni utilizzando il micelio come legante ed i sottoprodotti di agrumi come fibra, mantenendo la composizione naturale del formulato. In sintesi, considerando i risultati ottenuti in questa ricerca, si può affermare che il sottoprodotto dagli agrumi mostra un potenziale utilizzo in edilizia. I dati ottenuti sono di grande importanza, non solo perché viene proposta una soluzione per la valorizzazione dei derivati dalla trasformazione, ma anche perché viene fornita una alternativa ai tradizionali prodotti da costruzione. Infatti, l'elevata disponibilità dell'agrume può incentivare ulteriori sviluppi di bio-based insulators.

Introduzione

Il problema dell'approvvigionamento energetico e la crescente domanda di risorse naturali rendono necessario l'implementazione di soluzioni volte a ridurre al minimo gli impatti ambientali. Per far fronte all'aumento della popolazione che migra dalle aree rurali agli spazi urbani, le città continuano ad espandere le loro periferie. La principale conseguenza di questo fenomeno è l'aumento della domanda energetica, la cui tendenza crescente continuerà in futuro [1]. Le aree urbane ospitano la maggior parte della popolazione mondiale e sono al contempo responsabili e vittime di un rischio ambientale rilevante. Il percorso di dottorato, dal titolo «Valutazione e mitigazione dei rischi urbani e territoriali», in cui rientra questa ricerca, ha proprio l'obiettivo di ridurre i suddetti rischi nel territorio antropizzato. Le ricerche condotte presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università degli Studi Catania trattano la risoluzione di problemi delle comunità come: il rischio sismico, il rischio stradale, il rischio idraulico e la difesa dell'ambiente, con particolare riferimento alla gestione dei rifiuti e alla riqualificazione energetica. Le manifestazioni del rischio ambientale, come ad esempio i cambiamenti climatici o gli eventi estremi di precipitazione, aumentano sempre più di intensità, durata e frequenza [2]. Se a questo si associa l'eccessiva immissione nell'ambiente di CO₂ e lo sfruttamento incontrollato di risorse, emerge un grande rischio soprattutto per le generazioni future [3]. In tal senso, è possibile agire nel settore dell'edilizia con azioni volte a mitigare gli effetti dannosi nell'ambiente. Il principale responsabile delle emissioni in ambiente di gas serra è il consumo energetico del patrimonio edilizio. Nei paesi sviluppati, il consumo di energia per edifici residenziali e commerciali è pari a circa il 40% dell'energia totale utilizzata [4]. Un'azione per ridurre tali consumi potrebbe essere quella di migliorare l'isolamento termico degli edifici [5], nonché ridurre i consumi energetici nella fase realizzativa [6]. Il miglioramento dell'efficienza energetica e del

processo di produzione potrebbe offrire una notevole riduzione delle emissioni di CO₂ e potrebbe ridurre lo sfruttamento delle risorse non rinnovabili [7]. È noto che i materiali isolanti derivati da prodotti petrolchimici, come il polistirolo [8], o da materiali naturali che utilizzano elevate quantità di risorse energetiche per il processo di fabbricazione, come lana di vetro e lana di roccia, causano effetti dannosi sull'ambiente [9]. In questa direzione, è possibile osservare come vi sia una crescente attenzione verso il riutilizzo di materiali di risulta, anche di origine agricola, al fine di rispondere alle attuali esigenze di sostenibilità ambientale [10]. Ad oggi però i procedimenti costruttivi vedono ancora poco diffusi prodotti di edilizia simili; una possibile motivazione è la carenza di un quadro normativo adeguato, capace di indirizzare correttamente il progettista nelle scelte più opportune [11]. Inoltre, la scarsa conoscenza delle reali potenzialità di tali materiali non ne permette l'effettiva comparazione con quelli attualmente in commercio. Se ad oggi infatti se ne conoscono in parte le applicazioni come prodotti, è anche vero che questi sono limitati a sviluppi confinati in determinate aree di studio. Oltre a ciò, sapere dell'esistenza di tali materiali prescinde dall'effettiva conoscenza tecnica e dalle potenzialità intrinseche possedute.

Il settore che viene preso come esempio per lo sviluppo di questo progetto è la coltivazione di agrumi; in particolare, i sottoprodotti utilizzati sono le bucce delle arance. Nello scenario europeo, l'Italia è il secondo produttore di agrumi dopo la Spagna [12]. La più grande regione italiana interessata agli agrumi è la Sicilia, con una produzione annua stimata di 15 milioni di quintali. In particolare, la regione Sicilia rappresenta una delle realtà agricole italiane più significative. Da un'analisi preliminare si è visto che la maggior parte delle aziende agricole italiane è concentrata nelle regioni del Mezzogiorno, in particolare Puglia, Campania, Calabria e Sicilia sono le prime quattro regioni dove, complessivamente è stato rilevato quasi il 48% delle aziende agricole italiane [13]. Se questi valori si confrontano con quelli riguardanti gli

scarti di lavorazione, derivanti da tali attività, e alla necessità emergente di risolvere il problema dei materiali da costruzione, viene fuori una grossa potenzialità di tali aree, dove sarebbe possibile sfruttare un materiale da costruzione al 100% naturale e biodegradabile. Definito il campo di applicazione del progetto di ricerca, sono di conseguenza stabiliti anche gli elementi specifici che rientrano nel perimetro delle attività di studio, ovvero la creazione di componenti e tecniche edilizie derivanti da elementi naturali e riciclabili della tradizione siciliana. A partire dal background iniziale, questa ricerca vuole analizzare le risorse naturali – derivanti dagli scarti della filiera alimentare – presenti nel Sud Italia, con l'obiettivo di inserire nella filiera produttiva dell'Italia Meridionale una selezione di materiali e prodotti per l'edilizia sostenibile. La finalità della ricerca è quindi quella di investigare sull'applicazione di materiali isolanti naturali derivanti da processi produttivi agricoli, proponendo una produzione di materiali per l'edilizia ed analizzandone le prestazioni. I materiali isolanti mirano a garantire prestazioni adeguate e consentire significativi risparmi energetici. Tuttavia, le prestazioni termiche non sono l'unico requisito da valutare. Altri parametri, come gli impatti sull'ambiente e sulla salute umana, dovrebbero essere considerati mediante l'analisi del ciclo di vita del prodotto. L'applicazione di questi principi rientra nel concetto più ampio di «economia circolare», volto a ridurre l'estrazione di materie prime e riutilizzare le risorse già presenti nel territorio.

La ricerca è stata condotta seguendo la metodologia elencata nei seguenti punti:

- Studio dello stato dell'arte e approfondimento bibliografico, riguardo le attuali applicazioni dei materiali di recupero dagli scarti alimentari.
- Analisi delle attuali realtà agricole in Sicilia, con particolare riferimento ai processi di lavorazione. L'obiettivo è quello di valutare una partecipazione del processo industriale alla realizzazione di bio-materiali per uso edile.

- Sviluppo delle applicazioni dei nuovi materiali nel settore dell'edilizia. Esame e scelta del metodo costruttivo ed applicativo più adeguato (pannelli, blocchi, materiali di riempimento, ecc.)
- Sperimentazione pratica mediante la creazione di provini, al fine di creare una etichettatura per componente.
- Analisi delle principali proprietà quali: meccaniche, termiche, acustiche e di resistenza al deterioramento dei nuovi prodotti proposti.
- Confronto dei dati ricavati dallo studio con i materiali naturali attualmente in commercio. Considerazioni riguardo la qualità tecnica, e costi dei sistemi ipotizzati.

Definite le fasi della ricerca è possibile associare, orientativamente, una computazione temporale dello studio, individuando per ogni anno due dei punti sopra elencati.

In merito alla terza fase, l'approvvigionamento di rifiuti naturali può essere ottimizzato se si conoscono accuratamente il tipo di colture locali e i processi di trasformazione. In tal senso, un possibile fornitore "quotidiano" di scarti di trasformazione delle arance potrebbero essere le apparecchiature che commercializzano le spremute di arance fresche. Queste macchinette si stanno sempre più diffondendo nei luoghi pubblici e nei supermercati, generando quindi una grossa quantità di rifiuti. Inoltre, gli scarti generati, anche se derivanti da apparecchiature differenti, presentano delle caratteristiche simili in termini di dimensioni e peso unitario. La scelta della tipologia più opportuna del campione da analizzare dipende da molteplici fattori. In questa ricerca, il punto di partenza per la modellazione dei sistemi edilizi proposti sono state le ricerche svolte su materiali analoghi. La quarta fase, nonché la scelta del tipo di materiale e la sua prototipazione ha visto come risultato un pannello di rivestimento con buone caratteristiche di isolamento termico ed acustico. Per realizzare quanto descritto è necessario procedere con prove sperimentali su campioni di materiali

creati in laboratorio (quinta fase). Le prove di laboratorio hanno valutato la conducibilità termica del pannello, nonché le caratteristiche di isolamento acustico e le proprietà meccaniche.

Il lavoro di tesi si articola in 8 capitoli:

- Capitolo 1: affronta la sostenibilità in edilizia con riferimento al settore del riciclo e l'utilizzo di materiali naturali. La possibilità di conoscere con accuratezza le soluzioni già attuate e le attività di ricerca in corso, rappresenta un elemento imprescindibile per l'avanzamento dello studio. L'approfondimento è mirato ad evidenziare le caratteristiche termo-acustiche e le modalità di applicazione di prodotti appositamente realizzati per l'impiego in edilizia.
- Capitolo 2: riguarda lo stato dell'arte, con particolare attenzione all'utilizzo dei sottoprodotti agricoli in edilizia. Da questo studio è emerso il potenziale di molti materiali che oggi vengono definiti sottoprodotti, ma che potrebbero diventare una materia prima seconda per produrre nuovi componenti.
- Capitolo 3: illustra la scelta dei materiali selezionati. Vengono evidenziate le principali caratteristiche, la provenienza del materiale ed i relativi processi di lavorazione subito prima della produzione dei campioni. Particolare attenzione è stata rivolta al processo di produzione; i materiali organici naturali, infatti, seppur simili tra loro presentano delle differenze in termini di composizione chimico-fisica, rendendo quindi necessaria una attenta analisi preventiva sulla struttura del materiale e sul miglior metodo di trasformazione. Un obiettivo di questa prima fase della ricerca è quello di trovare il migliore processo con cui si possano realizzare i provini. Sono state condotte alcune prove per ottimizzare ad esempio il processo di essiccazione della materia prima.
- Capitolo 4: illustra i processi scelti per la realizzazione dei campioni, la strumentazione utilizzata e le principali caratteristiche fisiche dei provini.

Questo lavoro è stato in parte realizzato presso i laboratori dell'Universidad Politecnica de Madrid. I campioni oggetto di studio sono tutti costituiti da materiali ampiamente disponibili sul territorio, facilmente reperibili e a basso costo.

- Capitolo 5: descrive le prove di caratterizzazione effettuate sui provini in laboratorio, gli apparati utilizzati, le modalità di misura e le normative di riferimento. Sono state effettuate prove sperimentali di caratterizzazione termica, meccanica ed acustica. Per la misurazione di questi parametri sono state realizzate appositamente le apparecchiature sperimentali, presso l'Università di Catania e l'Universidad Politecnica de Madrid.
- Capitolo 6: riporta i risultati delle prove sperimentali di caratterizzazione. Le proprietà ottenute dai campioni vengono confrontate con quelle di prodotti attualmente in commercio. L'analisi comparativa è stata condotta per valutarne i minori impatti ambientali e di riciclabilità, nonché l'eventuale miglioramento delle prestazioni tecniche.
- Capitolo 7: illustra lo studio condotto presso la Vrije Universiteit Brussel, riguardo la realizzazione di provini con micelio e sottoprodotti degli agrumi.
- Capitolo 8: tratta l'analisi economica per una eventuale produzione del materiale da realizzare industrialmente, secondo i sistemi di produzione illustrati.

1. Sostenibilità in edilizia

1.1 Il riciclo dei materiali da costruzione

Dalla fine della seconda guerra mondiale fino alla seconda metà degli anni ottanta, il settore delle costruzioni, ad eccezione di poche situazioni particolari, non ha mai avuto la necessità di porsi il problema del riciclo dei materiali. Le uniche due tematiche riguardanti la salvaguardia dell'ambiente interessavano, da un lato l'impatto ambientale del costruito sul territorio, dall'altro il contenimento dei consumi energetici [14]. La grande disponibilità di materie prime per le costruzioni ha infatti portato, in quegli anni, allo sfruttamento indiscriminato delle risorse. Tale situazione ha portato nel tempo all'introduzione di strumenti normativi volti a regolamentarne l'estrazione e il riutilizzo futuro [15]. Un approccio circolare potrebbe aiutare il settore delle costruzioni a ridurre il suo impatto ambientale e ad evitare l'aumento dei costi, i ritardi e altre conseguenze dei mercati delle materie prime. Il modello di economia circolare ha radici in teorie risalenti agli anni '70: il concetto di "cradle to cradle" di Braungart e McDonough, di "performance economy" di Stahel e il modello "rigenerativo" di Lyle, hanno consentito di radicare una teoria economica a livello mondiale [16]. La Ellen MacArthur Foundation, un ente di beneficenza dedicato a promuovere la transizione globale verso l'economia circolare, ha sviluppato un diagramma "a farfalla" (Fig. 1) basandosi sul concetto che i flussi di materiale possono essere suddivisi in due cicli di interazione: i cicli di risorse tecniche e biologiche [17]. All'interno del ciclo biologico, le risorse rinnovabili e vegetali sono utilizzate, rigenerate e restituite in modo sicuro alla biosfera, come nel compostaggio o nella digestione anaerobica. Allo stesso modo, i prodotti creati dall'uomo dovrebbero essere progettati in modo tale che, alla fine della loro durata di servizio, ovvero quando non possono più essere riparati e

riutilizzati per il loro scopo originario, possano essere riutilizzati o ricondizionati in nuovi prodotti; ciò eviterebbe l'invio di rifiuti in discarica e creerebbe un ciclo chiuso.

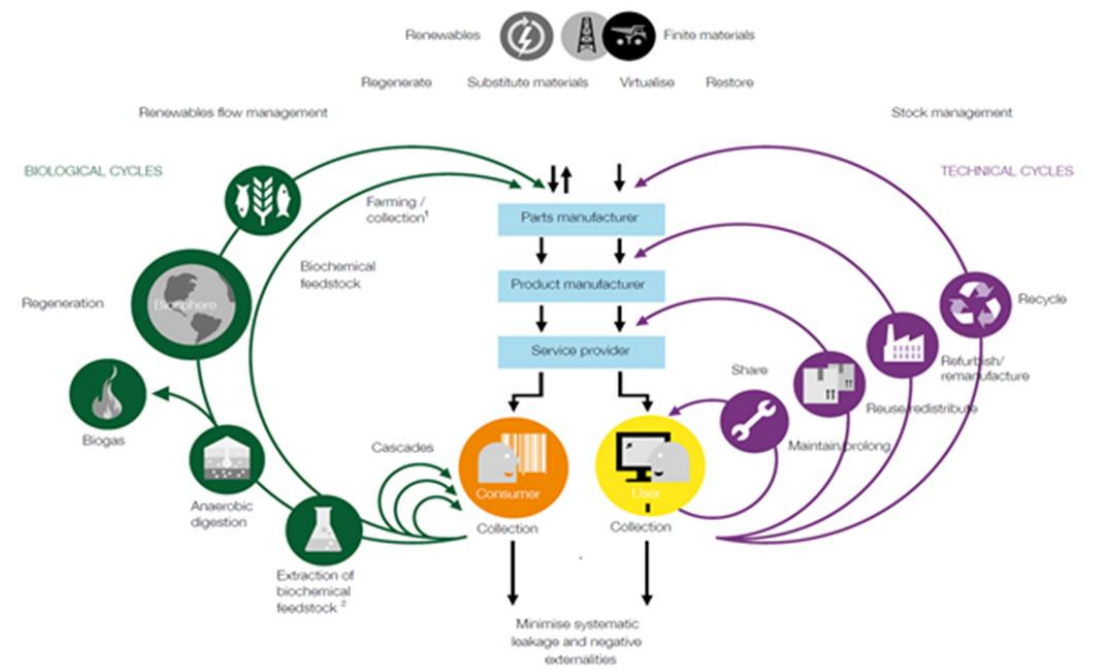


Figura 1 Diagramma "a farfalla" rappresentante il ciclo dei materiali - © 2016, ARUP

Legambiente, il 4 novembre 2017, ha presentato il primo rapporto dell'Osservatorio Recycle [18] sul riciclo dei materiali edili, mettendo in evidenza un dato sulla produzione di rifiuti: ogni anno vengono prodotti quasi 45 milioni di tonnellate di rifiuti inerti tra calcinacci, mattoni, vetro, sabbia, residui di cantieri edili e demolizioni. Oggi il 62,5% di quanto viene estratto in Italia è composto da inerti ed attualmente esistono almeno 15000 cave usate e abbandonate, di cui oltre la metà sono ex cave di sabbia e ghiaia [19]. Dal punto di vista normativo, sono numerose le leggi in ambito europeo volte alla riduzione e valorizzazione dei rifiuti. Stati come Olanda, Belgio e Danimarca raggiungono capacità di riciclo dei rifiuti edili pari all'80%. L'Italia ha tutt'oggi ridotte percentuali di riciclo, solo il 10% circa dei materiali da costruzione viene recuperato e riutilizzato [20]. Sebbene le normative tendono oggi ad imporre requisiti di prestazione energetica sempre crescenti, è opportuno indagare sugli impatti ambientali generati dai materiali utilizzati per l'isolamento termico, nonché sulla conformità normativa delle abitazioni di nuova costruzione. L'introduzione dei Criteri Ambientali Minimi [21]

mira a consentire, nel settore dell'edilizia pubblica, il raggiungimento di requisiti standard minimi di materiale riciclato determinati sul peso globale [22]. Con l'introduzione nel 2015 dei "criteri ambientali minimi" si inseriscono dei criteri premianti per i progettisti orientati alla riduzione degli impatti ambientali, valorizzazione e recupero dei componenti edilizi esistenti [21]. Nel settore dell'edilizia, infatti, è necessario progettare componenti che siano facilmente scomponibili e separabili. La maggior parte dell'energia consumata dagli edifici è associata alle esigenze di riscaldamento e raffreddamento degli ambienti interni. Per ridurre tali consumi, oltre ad intervenire sui sistemi impiantistici, è necessario ridurre le dispersioni termiche presenti in molti componenti edilizi. Tra questi, le pareti esterne comportano una perdita variabile tra il 29% e il 59% delle perdite termiche totali [11]. I coibenti termici, attraverso la riduzione del consumo di energia nella fase operativa, riducono notevolmente l'impatto ambientale degli edifici. Tuttavia, questi materiali non influenzano solo le prestazioni termiche degli edifici, ma rappresentano anche un onere ambientale importante durante la fase della costruzione. La produzione e la costruzione dei tamponamenti rappresentano infatti il 13% dell'energia totale consumata durante il processo di costruzione [23]; il dato evidenzia la necessità di analizzare questi componenti, al fine di migliorare le prestazioni energetiche complessive di un edificio. In tal senso, oltre i materiali strutturali come l'acciaio o il calcestruzzo, anche i materiali che costituiscono le chiusure opache e trasparenti rappresentano una grossa percentuale da dover dismettere [24]. Tuttavia, la cultura del riciclo non si limita oggi al riutilizzo delle macerie derivanti dalle demolizioni, ha bensì dato origine ad un settore di ricerca finalizzato a studiare l'intero ciclo di vita di un prodotto, sin dalla sua creazione. L'edilizia sta ampliando i propri confini rivolgendo la propria attenzione verso tutti quei prodotti che prima erano solo considerati elementi da discarica, come scarti di produzione, rifiuti di costruzione e demolizione o sottoprodotti di derivazione agricola. Utilizzare materiali di origine naturale è un'attività capace di risolvere due grandi problemi: la dismissione di ingenti quantitativi

di scarti industriali, e il forte impatto ambientale proveniente dai materiali edili [25]. Alcune aziende hanno mostrato un interesse crescente verso il settore del riciclo ed in particolare quello dell'edilizia. Ad esempio, la società americana ReWall ha sviluppato, tramite un processo di triturazione, un materiale dal riutilizzo degli imballaggi per bevande; questo può essere utilizzato come rivestimento interno degli edifici o, se compattato, come un materiale strutturale da costruzione. Alfred Heineken, proprietario della famosa fabbrica di birra, nel 1960 ha progettato una bottiglia dotata di una particolare forma che permette, una volta svuotata, di essere riutilizzata come mattone [26].

Nei prossimi paragrafi verranno approfonditi tali principi in relazione ai materiali tradizionali impiegati in edilizia e alle tecniche di riciclo.

1.1.1 Il calcestruzzo

Dall'attività di recupero dei rifiuti speciali non pericolosi provenienti da costruzioni e demolizioni edili, da scarti industriali, e rifiuti di cava, si producono gli aggregati riciclati (aggregati di natura inerte come sabbie, pietrisco, ecc.) impiegati nel confezionamento del calcestruzzo. La Normativa Europea classifica gli aggregati riciclati al pari di quelli naturali e artificiali e li dichiara utilizzabili per tutte le differenti destinazioni d'uso, superando così i passati pregiudizi culturali e tecnici. Pertanto, equiparandoli dal punto di vista prestazionale, risulta indifferente usare gli aggregati naturali o riciclati [27]. L'impiego degli aggregati riciclati per uso strutturale è vincolato dal possesso della Marcatura CE e della DoP (Dichiarazione di Prestazione) prevista dal regolamento UE n. 305/2011 del 9 marzo emanato dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea. Quest'ultima fissa condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione, abrogando la Direttiva 89/106/CEE "Prodotti da costruzione" [28]. Un'azienda italiana nel settore è la società Calcestruzzi Ericina Libera Soc. Coop., con sede a Trapani, che dal 2008 produce e vende aggregati riciclati attraverso l'utilizzo dell'impianto di riciclaggio denominato R.O.S.E.

(Recupero Omogeneizzato Scarti Edilizia). Tale azienda, in ottemperanza alle direttive europee, possiede un sistema certificato FPC (controllo della produzione in fabbrica) e tutti i prodotti sono dotati di marcatura CE e di DoP, in conformità alle norme UNI EN 12620, 13242, 13043, 13139 e al regolamento (UE) n. 305/2011 che ne attestano ufficialmente l'idoneità tecnica del prodotto per l'impiego previsto. L'impianto di riciclaggio denominato R.O.S.E. è affiancato dal sistema EURO-ECO che ha come scopo il recupero del calcestruzzo e recupero delle acque di lavaggio delle autobetoniere e delle pompe. Attraverso la coclea separatrice, viene separato il calcestruzzo in inerti e acqua contenente in sospensione il cemento e le particelle di limo. Gli inerti recuperati e opportunamente lavati possono essere reimmessi nel ciclo produttivo del calcestruzzo; l'acqua invece viene fatta affluire in apposite vasche, dotate di agitatori per tenere il materiale solido in sospensione, e viene utilizzata, con apposite pompe sommerse, sia nel ciclo di produzione del calcestruzzo che nel lavaggio delle stesse autobetoniere. Le caratteristiche ed i vantaggi di questo impianto sono:

- Recupero degli inerti;
- Risparmio di circa il 70% di acqua pulita;
- L'acqua riciclata, con in sospensione le particelle di cemento e limo, migliora la qualità del calcestruzzo;
- Pulizia dell'impianto;
- Rispetto per l'ambiente.

Un'altra azienda italiana nel settore è il Gruppo Seipa, con sede a Roma. A completare il ciclo produttivo eco-compatibile, il gruppo romano dispone nel proprio stabilimento di un moderno impianto di depurazione per il recupero delle acque di percolazione delle discariche di inerti. I percolati opportunamente depurati vengono reimpiegati nel confezionamento della miscela di calcestruzzo.

Con i sistemi descritti è possibile riutilizzare fino al 30% di aggregati riciclati. La percentuale di materia riciclata, sia dalla Calcestruzzi Ericina che dal Gruppo Seipa, è dimostrata da una dichiarazione ambientale di Prodotto di Tipo III (EPD), conforme alla norma UNI EN 15804 e alla norma ISO 14025. Per quanto riguarda invece il calcestruzzo strutturale, è noto che le proprietà dell'aggregato riciclato determinano prestazioni chimiche, fisiche e meccaniche inferiori rispetto all'aggregato naturale. La sostituzione nel calcestruzzo di una determinata classe di resistenza di aggregati naturali con aggregati riciclati produce una riduzione della resistenza alla compressione, della resistenza a trazione per flessione e del modulo elastico (20% circa), mentre la resistenza a trazione risulta equivalente o talvolta superiore (10% circa), come anche la tensione di aderenza con le barre di acciaio, il grado di vulnerabilità alla fessurazione per ritiro igrometrico, resistenza a cicli di gelo e disgelo, resistenza all'attacco solfatico e resistenza alla penetrazione di agenti aggressivi per le armature metalliche. Le prove su elementi strutturali contenenti percentuali di calcestruzzo riciclato, dimostrano invece che la presenza di aggregati riciclati non influenza la loro capacità resistiva. Anche le prestazioni a collasso di elementi inflessi in calcestruzzo riciclato armato, che sono governate essenzialmente dallo snervamento delle armature e dalla loro capacità deformativa, non appaiono essere diverse da quelle ottenute con calcestruzzi realizzati con aggregati naturali. Gli aggregati riciclati sono annoverati anche nelle Norme Tecniche per le Costruzioni attualmente in vigore, emanate con il D.M. 17 gennaio 2018, che citano: "[...] sono idonei alla produzione di calcestruzzo per uso strutturale gli aggregati ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali, artificiali, ovvero provenienti da processi di riciclo conformi alla norma europea armonizzata UNI EN 12620 e, per gli aggregati leggeri, alla norma europea armonizzata UNI EN 13055-1". Esistono esempi virtuosi nel territorio nazionale che dimostrano che si può costruire con l'utilizzo di questi materiali come il Palaghiaccio di Torino, il Molo del Porto di La Spezia ed il tratto autostradale dell'A4 detto Passante di Mestre.

1.1.2 Laterizi

Dai dati contenuti nel rapporto 2017 di Legambiente [24] si può vedere come in Italia si producono circa 20000 tonnellate di laterizi ogni anno, in 344 industrie; un dato molto importante che pesa nel settore delle costruzioni sia in termini di estrazione di materia prima che di rifiuti da conferire in discarica. Per la preparazione si usano infatti argille, che devono essere fusibili e devono contenere una certa quantità di carbonati per dare porosità in cottura. Per far fronte all'elevato numero di rifiuti provenienti da laterizi e all'ingente numero di cave ormai dismesse e abbandonate sul territorio nazionale, le aziende produttive stanno lentamente puntando la propria attenzione verso i laterizi prodotti da materiale di scarto riciclato. Una azienda che opera nel settore a livello europeo è la Wienerberger. Come richiesto dai Criteri Ambientali Minimi (CAM) introdotti nel nuovo Codice Appalti, tutti i laterizi Wienerberger contengono almeno il 10% di materiale riciclato sul peso del prodotto. In Italia esistono già delle applicazioni concrete, basta citare il progetto di Social Housing per la realizzazione del nuovo isolato residenziale Casanova EA8 a Bolzano, composto da 85 unità residenziali suddivise in tre blocchi compatti, e il 20% del contenuto dei laterizi utilizzati è stato ricavato da materiale riciclato e di recupero. L'argilla utilizzata per la produzione dei laterizi generalmente proviene per il 75% da cantieri di altre realizzazioni edili, e solo la rimanenza è estratta da cave realizzate allo scopo. In questo modo si ottengono due risultati: la limitazione dello sfruttamento delle risorse naturali e la riduzione del quantitativo di materiale conferito in discarica. Un'altra azienda italiana che sfrutta il ciclo produttivo descritto sopra è la Giussani Laterizi, con la differenza che i prodotti Giussani contengono il 70% di materiale riciclato o recuperato. La percentuale di materia riciclata, sia da Wienerberger che da Giussani, è dimostrata da una dichiarazione ambientale di Prodotto di Tipo III (EPD), conforme alla norma UNI EN 15804 e alla norma ISO 14025.

1.1.3 Acciaio

L'acciaio è un materiale riutilizzabile al 100% e può essere riciclato potenzialmente infinite volte senza perdere le sue proprietà; in quanto tale è il materiale più riciclato al mondo [29]. L'acciaio prodotto da materiale di riciclo non presenta alcun degrado nelle proprietà meccaniche, risultando così indistinguibile dal nuovo. La riciclabilità dell'acciaio è, inoltre, favorita dalle sue proprietà magnetiche che lo rendono più facilmente separabile da altri materiali diversi presenti nei vari prodotti. Grazie al riciclo dell'acciaio si ottiene una produzione sostenibile che consente la riduzione del consumo di risorse naturali e di energia, una minore emissione di CO₂ e una minore produzione di rifiuti [30]. La percentuale di riciclo dei profili di acciaio si attesta su valori superiori al 90%. Nell'Unione Europea, nel 2014 circa il 40% della produzione siderurgica è stata realizzata grazie al recupero e riciclo di materiale ferroso, che viene rifuso per dare vita a nuovi prodotti in acciaio. L'Italia si attesta come primo produttore europeo di acciaio a forno elettrico, e tale percentuale è significativamente più elevata e supera, nel 2014, il 72%. Le acciaierie italiane sempre nel 2014 hanno riciclato complessivamente oltre 18 milioni di tonnellate di rottame ferroso, di cui circa l'87% di origine europea (65% proveniente dalla raccolta nazionale, il 22% importato da altri Paesi Europei e il rimanente 13% da Paesi Terzi). I principali processi di lavorazione e valorizzazione che subiscono i rifiuti in acciaio prima di essere conferiti nelle acciaierie e fonderie, sono principalmente quattro: la rigenerazione, la distagnatura, la frantumazione e la riduzione volumetrica:

- **Rigenerazione:** Un'attività molto importante è quella di ricondizionamento e rigenerazione degli imballaggi in acciaio usati. In particolare i fusti e le cisternette con gabbia in acciaio, per le loro caratteristiche di solidità e resistenza, possono subire diversi processi di rigenerazione per rendere gli imballaggi nuovamente utilizzabili.

- Distagnatura: Con tale processo i materiali conferiti ai centri di trattamento subiscono un processo di separazione dello stagno, elemento contrastante nei processi di fusione effettuati dalle acciaierie, dalla frazione ferrosa. Prima di procedere alla fase di separazione dello stagno, il materiale deve essere depurato il più possibile dagli elementi estranei, quali inerti e frazioni organiche, in modo da evitare l'inquinamento dei bagni alcalini utilizzati nel processo. Maggiore è il pre-trattamento di pulizia del materiale, migliore sarà il grado di distagnatura, come pure più elevata la resa dello stagno che si deposita sui catodi. La presenza di inquinanti nei liquidi provoca infatti la caduta dello stagno nei fanghi.
- Frantumazione: La frantumazione rappresenta una ulteriore strada con cui possono essere avviati a riciclo sia i materiali metallici provenienti da raccolta differenziata che quelli provenienti da raccolta non differenziata.
- Riduzione volumetrica: La riduzione volumetrica si basa sulla pressatura del materiale, dando luogo al confezionamento degli imballaggi in pacchi di diversi formati. Lo scopo di questo trattamento è l'ottimizzazione dei trasporti e una più conveniente valorizzazione del materiale.

I materiali metallici opportunamente lavorati dalle fasi precedenti sono pronti per essere inviati presso le acciaierie o fonderie, che per produrre l'acciaio utilizzano il forno elettrico. Per questo processo produttivo la materia prima è costituita da rottame di ferro che viene caricato, assieme a sostanze fondenti (prevalentemente calce), nel forno elettrico, ove, per effetto del calore prodotto dall'energia elettrica fornita tramite un sistema trifase di elettrodi, avviene la fusione. L'acciaio liquido, così prodotto, viene colato in grandi contenitori, denominati siviere, e avviato a stazioni, denominate forno siviera, in cui si effettuano le operazioni metallurgiche, consistenti nell'eliminazione di impurità non metalliche e nell'aggiunta di piccole frazioni percentuali di altri metalli in dipendenza dell'analisi richiesta dal tipo di acciaio in corso di produzione.

1.1.4 Legno

Ogni anno milioni di tonnellate di rifiuti di legno vengono dismessi, un rifiuto naturale inquinante, che se smaltito in discarica sottrae spazio a rifiuti non riciclabili. Il legno, in un ambiente anaerobico come la discarica, subisce un processo di metanizzazione e libera metano, un gas serra 20 volte più nocivo dell'anidride carbonica [31]. Se il gas non viene captato e utilizzato, e pochissime strutture sono attrezzate per farlo, si libera inevitabilmente nell'aria. Ogni anno finisce nelle discariche o viene bruciata una quantità di legno equivalente a circa 6 milioni di tonnellate [32]. Riciclare il legno è pertanto una scelta razionale e importante: contribuisce alla salvaguardia del patrimonio forestale, riduce i volumi destinati alla discarica, determina un minor impatto ambientale e riduce le emissioni di gas serra [33]. In Italia sono presenti diverse aziende che si occupano di legno riciclato, tra cui Gruppo Saviola, con sede a Viadana (Mantova), che sfrutta legno riciclato al 100% per la produzione di pannelli truciolari. Ogni anno l'azienda recupera e trasforma circa 1,5 milioni di tonnellate di legno, salvando dall'abbattimento l'equivalente di 10000 alberi al giorno. Il Gruppo Saviola è stato il primo operatore sul mercato italiano a sviluppare la raccolta differenziata del legno. Non tutto il legno usato può diventare pannello ecologico: la materia prima viene accuratamente selezionata e solo il legno che presenta determinate caratteristiche di salubrità viene accettato. In particolare, viene impiegato legno proveniente da costruzioni e demolizioni edili, pallet, truciolari, mobili vecchi, imballaggi in legno e residui di lavorazione. Con alcune tipologie di scarto del legno si producono anche bricchetti di legno pressato utilizzabili come combustibile in stufe tradizionali, al posto della legna ottenuta tagliando alberi nuovi, e blocchi di legno-cemento.

Per garantire il rispetto di requisiti chimico-fisici, il legno subisce rigorosi controlli di carattere qualitativo. Il processo di riciclo del legno si articola nelle seguenti fasi lavorative:

- Prima riduzione volumetrica: Il legno subisce una prima riduzione di volume presso i centri di raccolta e poi, negli impianti di riciclaggio, viene ripulito e lavato, quindi è ridotto in scaglie, cioè frantumato meccanicamente in piccoli pezzi.
- Separazione: Successivamente vengono eliminati meccanicamente i corpi estranei minori (chiodi, sassolini, sabbia del cantiere edile, ecc.). Le cosiddette trappole, infatti, consentono di separare tutto ciò che non è legno, senza adoperare solventi chimici o reagenti di nessun tipo, come ad esempio la vasca per affondare materiali inerti come i sassi, le calamite per attrarre il ferro, e le centrifughe che operano una separazione per gravità. Anche i materiali diversi dal legno sono destinati al riciclo. Tutti gli scarti di produzione (ferro, plastica, carta, alluminio, vetro, presenti nel legno in entrata), una volta separati, vengono poi inoltrati alle opportune aziende che li riciclano.
- Seconda riduzione volumetrica: Il legno viene ulteriormente raffinato, rendendo le fibre ancora più piccole.
- Essiccazione e pulitura: La materia prima legnosa passa ad un essiccatoio e successivamente viene avviata ai pulitori pneumatici a secco.
- Lavorazione finale: Il semilavorato ottenuto dal riciclo, amalgamato con resine naturali tipo amido e pressato a freddo e a caldo, forma il protopannello che dà origine a pannelli di legno di varie misure, usati per la costruzione di mobili e rivestimenti interni ed esterni [34].

La parte legnosa non valorizzabile derivata dalla vagliatura e pulizia del materiale viene bruciata per alimentare i processi. Solo il legno che non può essere riciclato viene reimpiegato come biomassa per l'autoalimentazione. Si produce così energia elettrica e termica da utilizzare nel ciclo produttivo, così da ridurre drasticamente il consumo di combustibili fossili e chiudere il ciclo produttivo [35].

1.1.5 Plastica

La plastica è una sostanza organica che nasce da risorse naturali, prevalentemente petrolio, di cui la produzione mondiale assorbe circa il 4% annuo. Le materie plastiche nell'edilizia hanno una durata teorica superiore ai 40 anni e sono ampiamente utilizzate per svariati motivi: resistenza, leggerezza, isolamento termoacustico, facilità nell'installazione, riciclabilità e riduzione dei costi [36]. Ma questo materiale, anche se di origine naturale, se lasciato in ambiente, rappresenta un alto fattore inquinante, oltre che un serio problema per la vita degli animali [37]. Le soluzioni ottimali per sfruttare la plastica al suo fine vita, dal punto di vista ambientale ed economico, al giorno d'oggi sono: la termovalorizzazione, il riciclo chimico e il riciclo meccanico. La termovalorizzazione, ovvero l'incenerimento diretto, con o senza residui, è la tecnica più pratica ed economica che consente di recuperare tutto il contenuto energetico della plastica che, derivando dal petrolio, è propriamente considerata come una fonte di energia. Il riciclo chimico consente di produrre nuovi materiali a seguito di una scomposizione termica delle plastiche nei relativi monomeri. Il riciclo meccanico richiede diversi stadi e gradi di pulizia delle plastiche dismesse, soprattutto quando sono eterogenee. Si ottengono scaglie o granuli che verranno utilizzati per la produzione di nuovi oggetti. Il materiale ottenuto è tanto migliore quanto più la plastica di partenza è omogenea. Per ottenere una plastica di buona qualità bisogna effettuare preselezione e trattamento della materia da riciclare, perché il mercato dei riciclati in plastiche miste è molto ristretto. La selezione alza i costi: di conseguenza questo tipo di procedimento diventa antieconomico e di più difficile percorribilità. Nonostante ciò vi sono esempi di impiego, come in Germania, dove da decenni si riciclano consistenti volumi di tubi e profili in PVC. Numerosi studi di ecoefficienza, per i vari settori di impiego, hanno portato all'identificazione di un conveniente rapporto tra riciclo ed altre forme di valorizzazione.

Il settore delle costruzioni utilizza circa un quinto delle materie plastiche prodotte ogni anno, qualcosa come 9,7 milioni su 46,4 milioni di tonnellate, ma è responsabile solo del 5,5% dei rifiuti plastici che, nello stesso periodo, devono essere smaltiti (1,4 milioni su 24,7 milioni) con una netta prevalenza di isolanti (22%), tubi e raccordi (20,5%), pavimenti e coperture in generale (19%) e infissi (7%). Il risultato, dal punto di vista ambientale, è che nel 2010 è stato riciclato il 56% dei rifiuti plastici generati da questo comparto, mediante riciclo meccanico (20%) o recupero energetico (36,2%). Ciò che emerge è la forte disparità tra paesi: Italia e Spagna hanno un tasso di recupero intorno al 20%, il Regno Unito circa il 30%, mentre nei paesi scandinavi si arriva a recuperare circa l'80% della plastica, sfruttando però in modo massiccio il recupero energetico. Ma il picco si raggiunge in Germania, dove si arriva a recuperare il 96% dei rifiuti in plastica dall'edilizia. Un esempio di riciclo è rappresentato dai modelli Eco Espanso 100 ed Eco Por GO31 di Isolconfort s.r.l., pannelli in polistirene espanso sinterizzato, 100% ecocompatibili. La percentuale di materia riciclata è dimostrata da una dichiarazione ambientale di Prodotto di Tipo III (EPD), conforme alla norma UNI EN 15804 e alla norma ISO 14025.

1.2 Materiali naturali in edilizia

Tra i fattori più importanti alla base della progettazione di un'abitazione vi è il comfort termico e acustico. Il contenimento dei consumi energetici del patrimonio edilizio rende necessario l'utilizzo di componenti dalle buone prestazioni, in particolare quelle termiche. Pertanto la scelta dei materiali isolanti da utilizzare deve essere molto accurata. Ma la scelta dei prodotti per l'edilizia necessita di attenzionare anche l'impatto ambientale durante tutto il ciclo di vita del materiale. Tra i molteplici prodotti isolanti è possibile distinguere due macro categorie, a seconda dei materiali grezzi e delle tecniche di fabbricazione utilizzati. Il primo tipo è il risultato dell'innovazione tecnologica che combina leggerezza, ridotto spessore e alte prestazioni dei materiali; questo comprende, ad esempio, i VIP (pannelli per isolamento sotto vuoto), i GFP (pannelli riempiti di gas) e aerogel [38]. Spesso questi materiali nascono in risposta ad esigenze del settore aerospaziale, il cui obiettivo è quello di ridurre la densità e massimizzare le prestazioni. Le buone prestazioni di questi materiali devono essere però associate ai costi ambientali, in particolare quelli relativi alla produzione e alla dismissione. La seconda macro categoria comprende materiali naturali, basati su fibre naturali o derivanti da attività di riciclo [39]. La diffusione di quest'ultimi è dovuta alla loro facile disponibilità, al basso costo e al minor impatto ambientale. A tal proposito oggi vengono scelti, sempre di più, materiali isolanti naturali realizzati con fibre riciclabili e biodegradabili, senza l'utilizzo di alcun prodotto chimico. Questi materiali sono accomunati da una buona lavorabilità, traspirabilità e buona resistenza termoacustica. La presente ricerca si inquadra nell'ambito delle soluzioni volte ad integrare nuovi materiali nel processo edilizio, con particolare riferimento agli scarti dell'odierna filiera agricola. Una prima analisi condotta riguarda lo stato dell'arte sui principali prodotti isolanti di origine naturale. Di seguito vengono riportati alcuni biomateriali isolanti termoacustici più efficienti dal punto di vista prestazionale e maggiormente diffusi a livello commerciale.

1.2.1 Sughero

Il sughero è un materiale naturale utilizzato sin dall'antichità ed è oggi utilizzato principalmente per la produzione di tappi per bottiglie. Il sughero è divenuto nel tempo una delle soluzioni più adottate nel campo degli isolanti, in quanto resistente agli insetti, atossico e 100% ecologico. Gli agglomerati di sughero si dividono in due categorie: compositi in sughero e sughero isolante. La prima categoria si ottiene incollando le particelle di sughero con leganti (poliuretano o gomma). Le caratteristiche fisiche e chimiche dei leganti determinano la resistenza dell'agglomerato e quindi le sue applicazioni. La seconda categoria è composta dal solo sughero, senza leganti esterni o altro materiale aggiunto. Questi ultimi possono essere utilizzati nel settore dell'edilizia come granuli, come pannelli, rotoli o blocchi di diverso spessore, densità e finitura: possono essere lucidati, cerati, verniciati o rivestiti con uno strato vinilico.

I pannelli in sughero isolante sono prodotti dalla corteccia della quercia da sughero, che viene macinata e cotta all'interno di appositi serbatoi a pressione con vapore acqueo alla temperatura di circa 370°C. La torrefazione non altera le caratteristiche del materiale, al contrario lo migliora, perché consente al granulo di espandersi, incorporando aria e migliorando le sue caratteristiche di isolamento. Durante questo processo il sughero si espande e viene legato dalla propria resina. Un grande vantaggio di questo materiale è, infatti, la possibilità di auto-legarsi grazie alla resina sugherina posseduta all'interno. Il processo di pressatura a temperature elevate consente la fusione delle resine naturalmente contenute nella corteccia, che fungono da colla naturale per aggregare i granuli e formare il pannello [40].

Durante il processo di produzione, oltre il 75% di materiale diventa prodotto di scarto. Questo materiale di scarto può essere riutilizzato mediante triturazione, ottenendo un prodotto in granuli. La produzione di granuli di sughero è una soluzione sostenibile

che ricicla un prodotto di scarto mantenendo sostanzialmente le caratteristiche del materiale originale.

Il sughero ha buone proprietà termoisolanti con un'elevata capacità di accumulo del calore, è dotato di un'ampia resistenza agli agenti chimici, naturali e insetti, con un'eccellente elasticità [41]. La traspirabilità fa del sughero una buona scelta in materia d'isolamento termico: esso non permette la formazione di condensa e, di conseguenza, la formazione di muffe. È un materiale riutilizzabile e riciclabile, infatti al termine della propria vita, può essere usato come combustibile. È stato anche dimostrato che il sughero ed il gesso sono reciprocamente compatibili e che è possibile produrre nuovi materiali da costruzione miscelando questi componenti in diverse frazioni di volume (Fig. 2). Il risultato dei test di conducibilità termica mostrano un miglioramento delle proprietà di isolamento termico ($0,18 \text{ W/mK}$) rispetto a un normale pannello in cartongesso ($0,30 \text{ W/mK}$) [42].

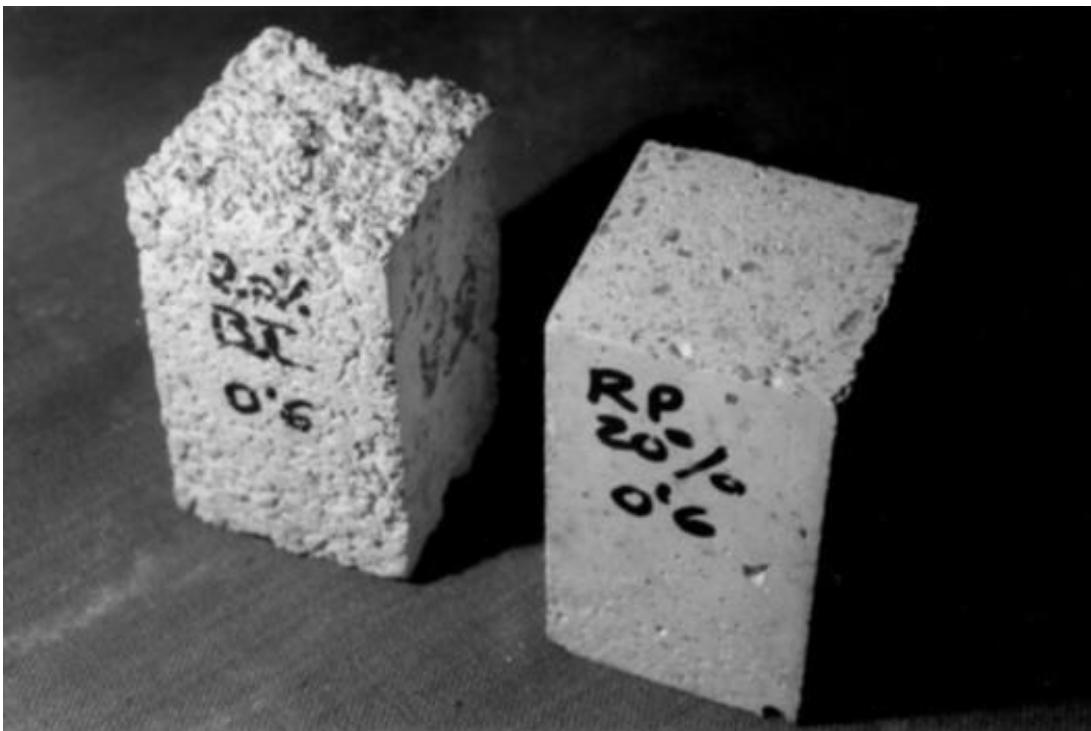


Figura 2 Campioni di materiale ottenuto dalla miscelazione di gesso e sughero- © 1999, Hernández et al.

1.2.2 Lana di pecora

Un prodotto naturale è rappresentato dalla lana di pecora, una soluzione che da sempre protegge gli animali dalle intemperie, dai climi freddi e dai climi caldi. La lana di pecora è un prodotto isolante con buone caratteristiche prestazionali, tra cui resistenza, proprietà idrofobiche, capacità igrometriche e resistenza al fuoco [43]. La lana di pecora è una risorsa rinnovabile, poiché la pecora produce in media tra il 2,3 e il 3,6 kg di lana grezza all'anno che, per la salute dell'animale, devono essere tosati [44]. La lana tosata dalla pecora viene lavata con sapone e soda per rimuovere le impurità e il grasso in eccesso, viene poi trattata con sostanze di protezione contro le tarme e contro il fuoco. I prodotti commerciali isolanti in lana di pecora nel settore delle costruzioni possono essere suddivisi in due categorie [45]:

- materassini morbidi in 100% lana di pecora, con spessori compresi tra 4 e 6 cm, utilizzati principalmente per l'isolamento di tetti a falde;
- pannelli semirigidi in lana di pecora (70-80%) e fibre di poliestere (20-30%), con spessori compresi tra 5 e 12 cm. La rigidità, ottenuta attraverso la parziale fusione delle fibre di poliestere, ne consente l'applicazione anche nelle pareti.

Riguardo le proprietà termiche, in condizioni normali la conducibilità della lana varia tra 0,038 e 0,054 W/mK, ma può incrementare con l'aumento dell'acqua contenuta nel materiale o con l'aumento della sua densità [46]. L'interno della lana di pecora è igroscopico, il che significa che è capace di assorbire il vapore acqueo senza perdere le proprietà termoigrometriche. Inoltre, è in grado di assorbire e neutralizzare prodotti chimici pericolosi e maleodoranti, tra cui biossido di azoto, anidride solforosa e formaldeide [47]. Il materiale è sostenibile poiché al 100% naturale, ma necessita di additivi come l'acido borico per prevenire attacchi di funghi e insetti. Il dispendio energetico per la produzione del materiale è piuttosto basso ed è prevalentemente dovuto alla fase di lavaggio e trattamento di pulitura del materiale grezzo [48].

1.2.3 Paglia pressata

La paglia è stata utilizzata come materiale da costruzione per molti secoli e, grazie alle sue eccezionali proprietà fisiche - come l'isolamento termico, acustico e la bassa emissione di carbonio - ha visto un incremento di utilizzo nell'ultimo decennio [49]. La paglia, grazie alla presenza di cellulosa, emicellulosa, lignina e silice, è caratterizzata da un'elevata resistenza a flessione e trazione. Inoltre, il gambo è ricoperto da uno strato ceroso che lo rende leggermente idrofobo. Finora diversi ricercatori hanno studiato l'uso della paglia come materiale da costruzione e ne hanno determinato le proprietà igrotermiche. Considerando i materiali lignocellulosici, diversi tipi di canne sono state utilizzate come fibre di alleggerimento nel calcestruzzo, malta o come balle di paglia nelle costruzioni portanti. La paglia è prodotta da steli essiccati come riso, frumento, orzo, segale o lino, dopo la raccolta. Molti dei primi edifici in balle di paglia sono stati realizzati con paglia disponibile localmente. Tipicamente è costituita da un insieme di piccoli pezzi, di spessore compreso tra 1 e 2 mm, che vengono compressi lungo il loro asse longitudinale. La densità della paglia varia a seconda del tipo materiale, dal grado di umidità e dalla compattazione, ma in generale è di almeno 100 kg/m³. Il suo valore di conducibilità termica, di 0,046 W/mK, è simile a quello delle fibre di legno, del cippato ed è inferiore a quello delle canne e dei cereali [50]. La paglia pressata è ecologica, permeabile al vapore e viene adoperata per realizzare pannelli isolanti termoacustici, generati da un processo di estrusione ad alta temperatura e pressione, senza l'apporto di collanti chimici. Il processo di produzione ha una ridotta emissione di CO₂, per cui i pannelli rappresentano un materiale da costruzione ecosostenibile. I pannelli sono riciclabili al 100%, resistenti al fuoco, fonoassorbenti, resistenti ed accumulano bene il calore. Il materiale rappresenta quindi un materiale ecologico per eccellenza, con un impatto ambientale molto basso.

1.2.4 Fibra di legno

Uno dei materiali più utilizzati nella bioedilizia è quello della fibra di legno naturale, biodegradabile ed ecosostenibile. Le prestazioni meccaniche delle fibre vegetali dipendono principalmente dalla struttura, dalla composizione e dalla morfologia. I vantaggi nell'utilizzo della fibra di legno sono la loro bassa densità, bassi costi e la sostenibilità del materiale. Le tecniche odierne vedono la realizzazione di pannelli rigidi per l'isolamento acustico e termico [51]. Tra le caratteristiche più importanti di questo materiale va evidenziata la sua traspirabilità, un fattore importante per il benessere abitativo e l'elevata inerzia termica. Le fibre di legno possono essere legate utilizzando resine naturali in sostituzione delle colle ad alto contenuto di formaldeide. Alcuni studi hanno inoltre realizzato dei pannelli in fibra di legno senza l'utilizzo di collanti, mediante un processo di pressatura a caldo che permette di auto-incollare le fibre [52]. In particolare, la lignina è stata ampiamente studiata come "adesivo naturale". Alcuni studi hanno dimostrato che la lignina può essere utilizzata come "adesivo naturale" nella preparazione di bio-compositi in sostituzione dei tradizionali adesivi sintetici. Rispetto ai tradizionali pannelli in fibre di legno, il biomateriale preparato con il metodo di pressatura a caldo non richiede l'aggiunta di adesivi, ha delle buone proprietà meccaniche ed è resistente all'acqua e al calore. Le eccellenti proprietà fisiche e meccaniche, oltre l'assenza di formaldeide, consentirebbero di sostituire i tradizionali pannelli in MDF con questo materiale. Inoltre, il metodo proposto consentire il riciclo al 100% della fibra di legno di scarto, ottenendo un'elevata resa produttiva ed un potenziale riduzione dei costi.

1.2.5 Fibra di canapa

La canapa si rivela essere una vera e propria risorsa per il mondo della bioedilizia. È un materiale naturale caratterizzato da una buona capacità di accumulo del calore, oltre che essere dotata di un'ottima capacità di trattenere la CO₂ e ridurre le emissioni di sostanze nocive [53]. Durante la fase di utilizzo i micro-pori presenti nel materiale consentono continui processi di micro-condensazione ed evaporazione, fornendo così al prodotto delle ottime proprietà di isolamento termo-acustico e di comfort termigrometrico. La canapa non è soggetta all'attacco di muffe o d'insetti: per questo motivo è possibile utilizzarla sia all'interno che all'esterno dei fabbricati. Al termine del ciclo di vita, inoltre, può essere riutilizzata per creare altri prodotti come la carta o il cartone.

Riguardo le tecniche realizzative esistono diversi prodotti realizzati dalla canapa, come i pannelli, blocchi con cemento o con leganti naturali. Dalla sua lavorazione è possibile non solo ricavare dei pannelli isolanti termoacustici, ma anche cere, vernici oltre che intonaci e finiture [54]. Per quanto riguarda l'applicazione dei pannelli isolanti termoacustici, questi possono essere impiegati nelle intercapedini delle pareti oppure per isolare controsoffitti e sotto pavimenti. Il materiale è anche commercializzato in forma di blocchi non strutturali composti da una miscela di canapa, calce e cemento [55]. Quest'ultimi rappresentano un prodotto da costruzione naturale che negli ultimi anni ha visto un crescente utilizzo in numerosi paesi europei [56]. Una valutazione sperimentale del processo di carbonatazione avvenuto all'interno del legante durante la fase di utilizzo ha mostrato che il bilancio complessivo delle emissioni è positivo, grazie all'assorbimento di CO₂ durante la crescita della canapa. Una variante introdotta da una società italiana prevede di creare un pannello con un legante a base di pappa reale, producendo pannelli senza colle chimiche e completamente naturali [18]. Le caratteristiche del materiale lo rendono adatto anche per la composizione dei pannelli in cartongesso [57]. In particolare, i risultati dei test effettuati su pannelli in

cartongesso additivati con fibre di canapa, hanno mostrato che le fibre migliorano il comportamento meccanico del materiale alle alte temperature, evitando il collasso fragile della matrice in caso di rottura. Oltre al ruolo di irrigidimento, le fibre danno un buon contributo anche alla resistenza alla flessione, soprattutto durante la prima fase del trattamento termico.

1.2.6 Kenaf

Il kenaf è una fibra vegetale simile alla canapa che appartiene alla famiglia delle malvacee ed è una coltivazione completamente rinnovabile con raccolti annuali. È un materiale ecosostenibile con molte qualità: la pianta assorbe più anidride carbonica di qualsiasi altra specie coltivabile, depura il suolo da elementi tossici, apporta notevoli quantità di ossigeno al terreno, e non necessita di apporti continui d'acqua [58]. Gli scarti del processo di estrazione della fibra vengono adoperati come combustibili ecologici. Il ciclo di lavorazione che va dalla pianta al prodotto finito ha un modesto consumo energetico. Le fibre di kenaf vengono compattate con un procedimento meccanico e legate mediante l'apporto di calore, senza l'impiego di alcun tipo di additivo chimico [59]. Le qualità intrinseche della fibra di kenaf rendono i materiali inattaccabili da insetti e roditori e conferiscono resistenza alle muffe e alla putrefazione. Il kenaf possiede inoltre caratteristiche di isolamento termico e acustico, resistenza alle sollecitazioni termiche ed una buona elasticità [60]. Un esempio di questa produzione è rappresentato dal modello Fiberkenaf Pan della Diasen o anche Isolkenaf della K.E.F.I. S.p.a.

1.2.7 Fibra di cellulosa

La fibra di cellulosa è un materiale isolante a base biologica derivato dal riciclaggio degli scarti della carta [61]. L'uso della cellulosa è recentemente aumentato grazie alle buone proprietà del materiale, come la bassa conducibilità termica e la biodegradabilità. Riguardo il processo produttivo, la cellulosa viene ricavata dagli scarti di produzione della carta, scomposta in fibre e miscelata con l'aggiunta di sali minerali e polvere di boro, ottenendo così la fibra di cellulosa [62]. Riguardo i consumi energetici del processo produttivo, questo materiale, richiedendo pochi processi di trasformazione, è caratterizzato da una bassa emissione di CO₂ in ambiente. Durante la preparazione della fibra, vengono aggiunti degli additivi inorganici per inibire la crescita di muffe e incrementare la resistenza al fuoco. L'utilizzo dei sali di boro è fondamentale nel processo di produzione della fibra di cellulosa, in quanto aumentano la resistenza al fuoco e garantiscono una protezione contro parassiti e roditori [63].

Il prodotto finale dell'isolamento cellulosico può presentarsi in due forme: come pannello, in cui le fibre vengono incollate con un legante come il poliestere, o più comunemente, le fibre vengono fornite sfuse, da applicare manualmente su superfici come solai, soffitti o pareti. Le capacità termoisolanti della fibra di cellulosa rendono il materiale utilizzabile in bioedilizia per isolare le abitazioni. Infatti, la conducibilità termica di pannello in fibra di cellulosa è analoga a materiali come il sughero, il poliuretano o la lana di vetro. Un altro vantaggio nell'utilizzo della fibra di cellulosa, oltre la facile riciclabilità, sono le proprietà di assorbimento acustico [64].

1.2.8 Fibre tessili

La produzione mondiale di fibre è costantemente aumentata negli ultimi decenni, superando i 100 milioni di tonnellate l'anno [65]. Gli avanzi tessili sono una delle risorse di rifiuti predominanti a livello mondiale; solo nell'UE vengono lavorati circa 5,8 milioni di tonnellate di prodotti tessili ogni anno. Da queste lavorazioni solo il 25% di questi tessuti viene riciclato da enti di beneficenza e imprese industriali; la restante parte viene conferita in discarica o negli inceneritori di rifiuti urbani [66]. Gli scarti tessili sono ricavati da tutti gli scarti di fibre e tessuti prodotti durante il processo di produzione, nonché tutti gli indumenti non più utilizzati e scartati dagli utenti. Questi rifiuti sono composti da più fibre, naturali o sintetiche, come cotone, lana, seta, poliestere, nylon e polipropilene. L'aumento dei costi di smaltimento di questi rifiuti, associato alla carenza di risorse minerarie e naturali nel settore dell'edilizia, rende questo materiale una potenziale alternativa ai tradizionali materiali da costruzione [67]. Il processo di produzione di queste fibre è principalmente meccanico, a bassa emissione di calore e con un ridotto consumo energetico. Secondo diversi studi, le fibre tessili possono essere utilizzate come materiali da costruzione per l'isolamento termico [68][69]. In tal senso, l'applicazione di questo materiale nei tamponamenti esterni ha incrementato l'isolamento termico fino al 40% rispetto alle tradizionali pareti con intercapedine d'aria. La conducibilità termica e le proprietà dei rifiuti tessili sono simili ad altri materiali isolanti convenzionali come il polistirene espanso, il polistirene estruso o la lana minerale [70]. Le strutture fibrose sono anche dei buoni materiali fonoassorbenti. Diversi autori hanno studiato le prestazioni acustiche di questi materiali [71][72][73]. Lee et al. [70], propongono l'uso di fibre di poliestere riciclate per produrre materiali fonoassorbenti. I risultati hanno dimostrato un buon coefficiente di assorbimento acustico alle medie e alte frequenze, ma un coefficiente di assorbimento acustico inferiore alle basse frequenze. Diversi autori hanno condotto ricerche sull'uso delle fibre tessili per produrre mattoni leggeri [74][75][76][77]. I

risultati hanno mostrato che l'aumento del contenuto di fibre di scarto tessili, prevalentemente cotone, aumenta la porosità dei mattoni, rendendoli più leggeri rispetto ai tradizionali blocchi in cemento. Una struttura più porosa ha consentito un miglioramento delle prestazioni termiche e un aumento dell'assorbimento d'acqua, riducendo il coefficiente di conducibilità termica del 29,3% rispetto ai blocchi tradizionali. Inoltre, Payam et al. [78], hanno effettuato una caratterizzazione meccanica e di durabilità di un composito cementizio rinforzato con microfibre di scarto tessile, mostrando le proprietà del materiale ed i risultati per l'edilizia. La fibra di lino, ad esempio, viene ricavata da piante provenienti da coltivazioni biologiche, con lavorazioni non inquinanti e con scarsa richiesta energetica. Le fibre vengono unite assieme, strato per strato, per mezzo di un adesivo naturale a base di amido (Fig. 3). Durante la lavorazione vengono impiegati sali di boro per proteggere il materiale isolante dai parassiti e dalle muffe. Il lino non contiene proteine animali, quindi non viene attaccato dalle tarme, inoltre è innocuo per la salute e facilmente lavorabile [79].



Figura 3 Pannelli realizzati da scarti di fibre tessili presso l'UNSW Centre for Sustainable Materials Research and Technology (SMaRT)

1.2.9 Fibra di juta

La juta è una delle fibre naturali più comunemente usata come rinforzo poiché a basso costo ed è attualmente la fibra maggiormente prodotta. La juta è un tipo di fibre della famiglia delle Tiliaceae il cui nome scientifico è *corchorus capsularis*. La produzione mondiale complessiva di fibra di juta è di circa 2300×10^3 ton [80]. La juta, che può raggiungere i 3,5 m di altezza, è molto fragile ma con una buona flessibilità dovuta all'alto contenuto di lignina (fino al 12-16%). Le fibre di juta hanno una minore resistenza all'umidità, agli acidi e ai raggi UV rispetto ad altre fibre naturali [81]. Al contrario, la loro tessitura fine, la loro resistenza al calore e al fuoco la rendono utilizzabile per una vasta gamma di applicazioni anche nel settore edile [82]. Questo materiale, infatti, è al 100% naturale e non presenta aggiunta di additivi. Viene compattato attraverso una procedura meccanica, con la quale le fibre vengono disposte verticalmente rispetto al senso di rotazione del cilindro meccanico; questo procedimento permette di ottenere un prodotto morbido ma allo stesso tempo compatto e resistente. I pannelli in fibra di juta sono particolarmente indicati per l'isolamento acustico di pavimenti, ma posseggono anche ottime prestazioni per l'isolamento termico di pareti o soffitti [83].

1.2.10 Canna palustre

La canna palustre è un materiale con elevate proprietà isolanti sia termiche che acustiche. La canna palustre viene raccolta nelle zone paludose o lacustri, viene essiccata e successivamente, tramite assemblaggio con filo di ferro zincato, vengono formati i pannelli. Il pannello viene montato dividendo le canne in base alla loro altezza e una volta formato può essere tagliato sia in senso longitudinale che trasversale, assumendo le dimensioni più utili al suo utilizzo. I pannelli in canna palustre, oltre ad essere una base per l'intonaco tradizionalmente conosciuto, sono altamente traspiranti e utilizzati per creare cappotti sia interni che esterni, in quanto resistono all'umidità ed evitano pertanto rischi di rigonfiamenti e rotture degli intonaci. Il pannello

viene fissato al supporto murale con dei semplici tasselli e può essere rivestito con qualsiasi tipo di intonaco. Una volta dismesso, separato dal filo di ferro, diventa totalmente biodegradabile.

1.2.11 Bambù

Il bambù è un materiale da costruzione storicamente utilizzato nell'edilizia. La maggior parte delle case tradizionali in Indonesia e in Asia utilizza il bambù come materiale da costruzione, sia come materiale strutturale che non strutturale. L'utilizzo del bambù è dovuto al fatto che la pianta cresce abbondantemente nelle foreste pluviali tropicali; i tempi di crescita della pianta, compresi tra 3-5 anni, rendono il prodotto molto più reperibile e facilmente rigenerabile [84]. Dopo l'inizio dell'era industriale, l'uso del bambù come materiale da costruzione si è ridotto notevolmente, lasciando spazio a materiali più performanti come l'acciaio o il calcestruzzo. Tuttavia il bambù, che è considerato un materiale economico, rappresenta un prodotto sostenibile utilizzabile in edilizia [85]. Grazie alla sua rapida crescita, il bambù è una delle migliori fonti di materiale ligno-cellulosico nelle aree tropicali e subtropicali. Durante la crescita della pianta, il bambù rilascia ossigeno nell'aria, migliorando l'impatto ambientale complessivo del ciclo produttivo. Gli usi di questo materiale nelle costruzioni sono molto comuni come ad esempio la creazione di pannelli compositi [86]. Alcuni studi hanno valutato l'utilizzo dei rifiuti derivanti dalla piallatura di questo materiale, ritenuti un sottoprodotto, formaldeide per formare pannelli ondulati altamente resistenti mediante l'utilizzo della resina. Il processo di stampaggio del pannello viene eseguito con una pressa a caldo, con un successivo incollaggio di due fogli in MDF [87]. Altri processi produttivi prevedono una pressatura a caldo della segatura di bambù e di una colla naturale, ottenendo dei pannelli termoisolanti dalle buone proprietà meccaniche [88]. Infatti, seppur meccanicamente presenta delle qualità inferiori, le prestazioni termiche del bambù sono assimilabili a quelle del legno [89].

1.2.12 Piume di animali

Le piume di animali rappresentano un buon materiale di scarto naturale dalle buone proprietà termiche [90]. Piume di anatra, oca e altri volatili da allevamento, miscelate e pressate con altri materiali con potere termoisolante, consentono di ottenere pannelli isolanti naturali applicabili in edilizia. Un gran quantitativo di questo materiale deriva, ad esempio, del riciclo dei piumini [91]. Il materiale, preventivamente trattato a 150°C per eliminare qualsiasi elemento allergenico o batterico, viene solitamente prodotto in rotoli. Il prodotto confezionato è composto da piume (70%), lana di pecora (10%) e fibre tessili (20%). Presenta una struttura complessa e fitta permettendo la regolazione dell'umidità degli ambienti interni e l'isolamento sia termico che acustico. Il prodotto viene utilizzato in edilizia per isolamento di muri, solai, tetti e posizionato su opportuni telai di sostegno lignei o metallici. Opportuni trattamenti lo rendono imputrescibile e inattaccabile da parassiti e tarme [92].

1.2.13 Micelio

Il micelio è la parte vegetativa del fungo ed è considerato uno dei più grandi organismi viventi sulla terra [93]. Recentemente l'uso del micelio è stato studiato come sostituto naturale della resina poiché, attraverso il suo naturale processo di crescita, crea una fitta rete di fibre ed agisce come un legante [94]. A differenza di altri organismi, i funghi possono scomporre la cellulosa in glucosio per nutrirsi e generare le fibre di micelio. La densità e la morfologia della rete dipendono fortemente dall'ambiente circostante e dai nutrienti disponibili [95]. Questa rete di fibre si lega a tutto ciò che si trova nelle sue vicinanze, permettendogli di incollare i granuli del substrato. I materiali a base di micelio sono classificati come materiali bio-compositi [96], composti da un substrato e una matrice. La matrice è creata dal micelio durante la sua crescita, mentre il substrato è costituito da materiali ricchi di cellulosa come le fibre di legno. Il substrato conferisce al composito la sua caratteristica rigidità e resistenza, mentre la matrice protegge il substrato e agisce come legante naturale. Alcuni degli studi hanno

analizzato compositi di micelio combinati con altri substrati come: fibre di carbonio, fibre di vetro [97] canapa, lino, paglia di grano [98], crusca di frumento [99], fecola di patate o caffè [100]. In tutti questi studi, il differente substrato ha conferito delle caratteristiche prestazionali diverse, seppur il legante è sempre costituito dal micelio che si auto-lega naturalmente [101]. Nell'ultimo decennio, i biocompositi a base di micelio sono stati analizzati nel settore delle costruzioni come alternativa ecologica ai materiali termoisolanti [102]. Elsacker et al. [98] ha mostrato che questi compositi hanno una conduttività termica di 0,08 Wm/K e una densità di 57–99 kg/m³. Inoltre, Yang et al. [103] ha dimostrato che un biocomposito a base di micelio ha caratteristiche prestazionali comparabili alla schiuma di polistirene espanso. Sono numerosi gli artisti e gli architetti che hanno realizzato piccole strutture in micelio dal fungo Ganoderma [104]. Ad esempio, Mycotecture sono mattoni a base di micelio utilizzati per la realizzazione di un prototipo di edificio sostenibile a Kunming, nel sud della Cina [105]. Ad oggi, quasi tutti i pannelli di fibra a media densità o i pannelli isolanti utilizzano la colla per legare e comporre i materiali, il micelio potrebbe rappresentare un valido sostituto naturale della colla.

2. Stato dell'arte

La prima fase della ricerca ha riguardato l'analisi bibliografica e lo studio dello stato dell'arte. Questa fase è stata di fondamentale importanza per consentire un migliore inserimento del tema trattato all'interno delle tematiche di studio di altri gruppi di ricerca. Negli ultimi 10 anni, infatti, il numero di pubblicazioni in tutto il mondo riguardo il riutilizzo di sottoprodotti agricoli ha avuto un trend di crescita positivo, vedendo ogni anno raddoppiare il numero di articoli in merito [106]. Dallo studio sono emersi, oltre alle informazioni tecniche utili per procedere correttamente, dati importanti e significativi per la ricerca in corso. In primo luogo, l'utilizzo di un sottoprodotto agricolo, per realizzare materiali da costruzione, è strettamente influenzato dalle tradizioni di ogni Paese, dalle colture locali e dagli sviluppi tecnologici del luogo. Questa pratica, che spesso rimane ancora nella fase della sperimentazione, vede l'utilizzo di svariati materiali di origine naturale e diverse tecniche produttive. I Paesi con in maggior numero di pubblicazioni in merito sono India e Cina ma, anche se in numero di pubblicazioni inferiore, la tematica viene affrontata in quasi tutti i Paesi. Riguardo la trasformazione del sottoprodotto in materiale per l'edilizia, questa è spesso legata alle tecnologie possedute e talvolta si limita ad utilizzare materiali e strumenti "low cost", come casseforme in legno o trituratori manuali. In alcuni istituti di ricerca è stata invece analizzata la risposta prestazionale di questi materiali alle fasi produttive con pressature ad alta frequenza o ad alta pressione con immissione di vapore.

L'indagine di seguito illustrata si è focalizzata sulla raccolta delle informazioni sulle proprietà termiche, acustiche e meccaniche dei materiali, nonché le metodologie di realizzazione dei campioni ed il tipo di legante utilizzato.

2.1 Il sottoprodotto agricolo in edilizia

L'industria delle costruzioni è ancora fortemente legata ai materiali tradizionali, a soluzioni costruttive ad alto impatto ambientale e a processi a bassa efficienza. Gli scarti organici provenienti dall'agricoltura, rappresentano un nuovo potenziale materiale da costruzione, interamente riciclabile, disponibile in grandi quantità e a costi ridotti. In accordo con questi principi, questa ricerca propone un'analisi di un'area potenzialmente in grado di fornire materiali a tali processi. Infatti, ogni attività di trasformazione di un prodotto naturale comporta inevitabilmente la produzione di un sottoprodotto non più utilizzabile per l'applicazione desiderata. Un possibile impiego di questi materiali è individuata nella realizzazione di prodotti da costruzione, i quali rappresentano oggi circa il 34,7% dei rifiuti totali generati in Europa [107]. L'utilizzo di elementi alternativi in edilizia permetterebbe non solo di ridurre le emissioni di gas serra associate al settore, ma anche di diminuire lo sfruttamento delle risorse non rinnovabili e limitare la produzione di rifiuti [108]. In Italia e nel mondo si stanno sviluppando aziende e startup che propongono di utilizzare i sottoprodotti della catena produttiva alimentare, e più in generale quelli organici, per sviluppare materiali ecologici per l'edilizia. Alla base di questi studi vi è la volontà di eliminare la differenza tra rifiuti e risorse e di concepire i rifiuti come punto di partenza per qualcosa di nuovo. Dalla filiera vitivinicola, ad esempio, si ottengono fecce, raspi e vinacce. Da questi prodotti è possibile estrarre pigmenti vegetali per produrre pitture e resine certificate, totalmente ecologiche e naturali, traspiranti, con una base di calce e quindi battericide [109]. Dagli scarti della produzione vinicola una ricerca ha realizzato mattoni per l'edilizia leggeri, con ridotta conducibilità termica e buone proprietà meccaniche [110]. Dagli scarti del carciofo, di cui si consuma principalmente il cuore gettando via anche il 70-80% del vegetale, si possono ricavare fibre che, mescolate con delle bio-resine, danno vita a un materiale simile alla vetroresina.

Dall'ortica, pianta da sempre discriminata per le sue proprietà urticanti, si può ottenere un materiale composito 100% biodegradabile con proprietà simili alla fibra di carbonio e di vetro. Durante la sua coltivazione l'ortica è anche in grado di depurare terreni inquinati. Anche dagli scarti di produzione latteo-caseari si può produrre un materiale per la bioedilizia. Il gruppo italiano Edilatte acquista scarti dalle aziende latteo-casearie e li utilizza come materie prime per i suoi prodotti. Per ottenere 1 kg di formaggio si producono 8 kg di siero, con una carica inquinante molto elevata. Edilatte da questi scarti crea pitture, intonaci, coloranti e additivi utilizzando anche scarti del settore boschivo, viticolo, birrario, patate, cenere di legna e gusci di uova. Questi scarti vengono trasformati in filler (aggreganti) naturali che migliorano la viscosità, la compattezza e la coesione degli impasti per l'edilizia sostituendo gli additivi sintetici.

Altri elementi di scarto che possono rivivere sono i batteri e i funghi. Dai funghi prodotti con le biomasse di scarto la startup italiana Mycoplast, in collaborazione con la startup olandese Mycotirial, produce una bioplastica utilizzata in svariati settori. La base su cui avviare la produzione dei funghi, infatti, può essere la paglia di grano o di riso, la lolla di riso, la segatura, i fondi di caffè o le bucce d'uva. Dopo la lavorazione, si ottiene un materiale flessibile, leggero, resistente agli urti, all'acqua e al fuoco. Riguardo i funghi in edilizia, verrà esposto nell'ultimo capitolo di questa tesi un lavoro riguardo l'utilizzo dei sottoprodotti degli agrumi come base per la crescita del micelio e la formazione di pannelli.

Nei paragrafi successivi viene mostrato lo stato dell'arte riguardo l'utilizzo dei sottoprodotti agricoli finalizzati alla produzione di materiali per l'edilizia [111].

2.1.1 Pannocchia di mais

La produzione mondiale di mais nel 2003 è stata di oltre 600 milioni di tonnellate, leggermente più di riso e grano [112]. Da uno studio su antichi edifici situati nel nord del Portogallo, è emerso che le pannocchie di mais sono state un materiale ampiamente utilizzato come riempimento e come isolamento delle tamponature esterne [113]. Nel processo di trasformazione, la pannocchia di mais viene spesso trattata come un rifiuto agricolo da incenerire, con conseguenti impatti ambientali negativi. J. Pinto et al. hanno ipotizzato un riutilizzo alternativo di questo prodotto, mediante la trasformazione in pannelli isolanti termo-acustici [114]. Le ricerche hanno inoltre riscontrato somiglianze significative in termini di microstruttura e composizione chimica tra la pannocchia di mais e il polistirene estruso. I pannelli sono stati creati utilizzando leganti di resina formaldeide, pressati ed essiccati in forni a temperatura controllata [115]. A. B. Akinyemi et al. hanno valutato, oltre l'isolamento termico del materiale, anche l'isolamento acustico del pannello ottenuto dai sottoprodotti frantumati di pannocchia di mais (Fig. 4) [116]. I risultati mostrano che le prestazioni acustiche sono paragonabili a prodotti commercialmente utilizzati come la lana di vetro o il polistirolo espanso. Una diversa tecnica realizzativa prevede la pressatura dei pannelli con una piastra calda ad alta temperatura, senza l'utilizzo di leganti [117].



Figura 4 Scarti agricoli di pannocchie dopo il processo industriale e dopo la triturazione

Questo processo, utilizzando la polimerizzazione naturale, ha ottenuto caratteristiche termiche soddisfacenti. Altri pannelli di isolamento termico, combinate con buone prestazioni acustiche sono stati realizzati legando le pannocchie di mais con la colla per legno. Un altro scarto alimentare oggetto di studio è la fibra di mais ricavata dai chicchi [118]. Il materiale è ottenuto dall'estrusione e dalla successiva filatura dell'acido lattico che si ottiene dalla fermentazione delle pannocchie di mais. Per la produzione di pannelli viene utilizzata una miscela composta da fibre bicomponente e fibre di acido polilattico modificate [119]. Il materiale è autoestinguento, con ridotte emissioni di fumo e biodegradabile.

2.1.2 Durian

Il Durian (*Durio zibethinus*) è un frutto prodotto principalmente nei paesi del sud-est asiatico. La buccia è un prodotto di scarto dell'industria di trasformazione e può essere utilizzata per vari scopi, compresa la realizzazione di pannelli isolanti in edilizia. Il processo di fabbricazione prevede la triturazione della buccia e la miscelazione con la resina urea-formaldeide in un tamburo rotante a umidità controllata. Successivamente la miscela viene pressata ad alta temperatura e lasciata asciugare per 24 ore. I risultati ottenuti dai test sui campioni sperimentali sono soddisfacenti per ipotizzare l'uso del materiale come isolante per l'edilizia [120]. La densità dei pannelli ottenuti è compresa tra 288 Kg/m³ e 910 kg/m³. Riguardo le proprietà termiche, la conducibilità è compresa tra 0,074 W/mK e 0,134 W/mK.

2.1.3 Noce di cocco

Un altro sottoprodotto agricolo dalle buone proprietà meccaniche e termiche è la fibra ricavata dal guscio di cocco. Le noci di cocco, in genere, crescono nelle aree costiere dei paesi tropicali. La fibra di cocco appartiene alla famiglia delle fibre dure, fibre costituite principalmente da cellulosa e lignina. Secondo i rapporti dell'Organizzazione per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO), il leader mondiale nella produzione di cocco è l'Indonesia, con circa 180.000.000 tonnellate prodotte, gran parte destinate all'esportazione, seguita dalle Filippine con 153.532.000 tonnellate, dove circa un quarto della superficie agricola totale è dedicata alla produzione di cocco, e poi l'India, con circa 119.300.000 tonnellate di cocco prodotte [121]. Una noce di cocco è solitamente composta dal 50% di buccia, 15% di guscio, 25% di polpa e 10% di acqua [122]. L'alto contenuto di lignina presente nelle noci di cocco consente l'uso delle resine trattenute dal materiale come legante naturale. Il pannello può quindi essere ottenuto in modo naturale e senza l'aggiunta di leganti chimici, mediante un processo di pressatura a caldo. Il materiale è caratterizzato da una conducibilità termica di 0,054 W/mK e da una buona resistenza all'acqua e ai batteri. Sono stati condotti esperimenti su bucce di cocco tritate e pressate a 108 °C. I risultati di resistenza ottenuti sono paragonabili a quelli del legno MDF; queste caratteristiche di resistenza vengono mantenute anche dopo l'immersione in acqua, risultando complessivamente migliore del legno [123]. Le fibre di cocco, dopo essere state essiccate, sono state analizzate anche nella forma di pannelli creati con l'aggiunta di adesivi chimici e naturali. C. F. da Silva et al. hanno testato la possibilità di ottenere un pannello stampato ad alta temperatura con l'aggiunta di urea formaldeide e resina poliuretana bicomponente a base di olio di ricino [124]. Complessivamente, le proprietà termiche (conducibilità termica di 0,054 W/mK) del materiale lo rendono adatto all'applicazione come isolante per pareti e soffitti, rappresentando una valida alternativa come prodotto edile sostenibile.

2.1.4 Gusci delle noci

I gusci delle noci sono un materiale di scarto disponibile in grandi quantità in diverse parti del mondo. Il principale produttore al mondo di noci è la Cina, ed è anche la prima interessata a trovare un uso a questi sottoprodotti diverso dall'incenerimento o dal conferimento in discarica. Un valido riutilizzo di questi sottoprodotti prevede la creazione di pannelli in legno MDF con aggiunta di gusci di noce triturati [125]. Questi pannelli usano come collante una resina a base di formaldeide, prodotto noto per il rilascio nell'ambiente di sostanze volatili pericolose per la salute umana. È stato dimostrato da G. Pelozo et al., che l'aggiunta di gusci di noci nei pannelli in MDF migliora la qualità interna dell'aria attraverso una minore emissione di sostanze organiche inquinanti. Le migliori proprietà del pannello sono garantite dalla porosità dei gusci di noci, che trattengono le microparticelle e ne evitano in rilascio in ambiente (Fig. 5). Rispetto ai tradizionali pannelli in MDF, l'incremento della porosità migliora le proprietà termiche del materiale, che ha una conducibilità di 0,076 W/mK [126].

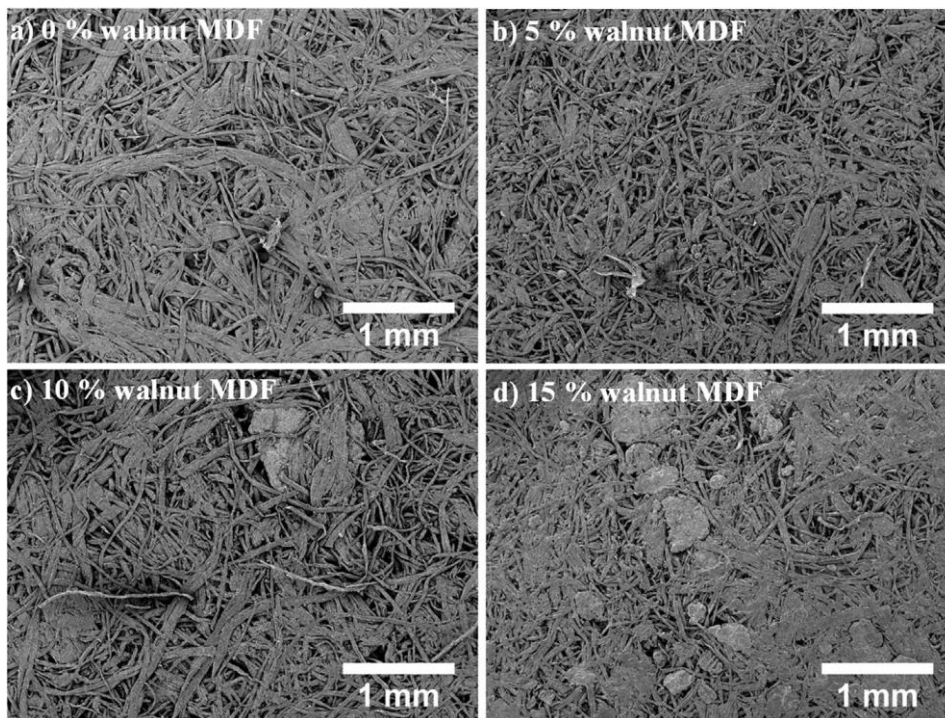


Figura 5 Immagini al microscopio elettronico di pannelli MDF con diverso contenuto di guscio di noce (ingrandimento x30) [da Silva CF, Stefanowski B, Maskell D, Ormondroyd GA, Ansell MP, Dengel AC, Ball RJ: Improvement of indoor air quality by MDF panels containing walnut shells. *Build. Environ.* 2017]

2.1.5 Gusci delle arachidi

La maggior parte della produzione di arachidi, stimata in circa 900.000 tonnellate all'anno, avviene in Argentina. Dalla lavorazione delle arachidi derivano diversi prodotti tra cui i gusci, che sono ottenuti dagli impianti di selezione e lavorazione. Di solito i gusci vengono smaltiti mediante incenerimento oppure vengono usati come combustibili per le caldaie. L'incenerimento dei gusci, però, provoca impatti ambientali significativi, come la produzione di grandi quantità di CO₂ e la generazione di microparticelle. I gusci di arachidi rappresentano quindi un materiale di scarto abbondante dal basso valore di mercato, ma con un potenziale utilizzo come materiale da costruzione [127]. M. Lamrani et al. hanno dimostrato che l'aggiunta di questo materiale ai tradizionali pannelli in gesso migliora le caratteristiche di isolamento termico, raggiungendo una conducibilità termica di 0,14 W/mK [128]. Questa miscela ottimizza le prestazioni del gesso, consentendo di ottenere pannelli dalle migliori prestazioni. Oltre a migliorare le prestazioni del gesso, i gusci di arachidi possono essere utilizzati per realizzare dei pannelli isolanti [129] (Fig. 6). Il processo di fabbricazione del pannello si basa sulla pressatura a caldo mediante un adesivo a base di poliestere. La conduttività termica di 0,043 W/mK ne consente l'applicazione in edilizia come materiale termo-isolante [130].



Figura 6 Pannelli commerciali ottenuti dai sottoprodotti delle arachidi - kokoboard

2.1.6 Riso

Il riso è il terzo alimento più prodotto al mondo dopo la canna da zucchero e il mais [131] con un consumo di 509,1 milioni di tonnellate a fronte di una produzione di 510,6 milioni di tonnellate. L'Asia, in particolare la Cina, guida ancora la classifica mondiale della produzione di riso, con oltre 450 milioni di tonnellate, seguita da Africa, 21 milioni, Nord America, 5,7 milioni, e infine Europa e Sud America. Per quest'ultima rappresenta la fonte primaria di cibo per metà della popolazione mondiale e produce di conseguenza grandi quantità di sottoprodotti. Circa il 40/60% in peso del riso secco rappresenta un sottoprodotto, in funzione del metodo di coltivazione e alla tecnica di raccolta [132]. Si è stimato che per ogni tonnellata di riso lavorato si producano 270 chilogrammi di sottoprodotti tra lolla (200 Kg) e pula (70 Kg), oltre a 1,3 tonnellate di paglia. Questi sottoprodotti sono un potenziale materiale isolante per l'edilizia derivante dalla lavorazione del riso [133]. I test su materiale sfuso hanno mostrato, oltre a una vantaggiosa resistività termica (0,05 W/mK), una buona resistenza al fuoco, resistenza alla corrosione e assorbimento d'acqua (Fig. 7). Per quanto riguarda la produzione di materiali isolanti, la paglia di riso è stata utilizzata per realizzare pannelli mediante pressatura a caldo ad alta frequenza [134]. Questa procedura consente di ridurre i tempi di pressatura e aumentare la resistenza finale del pannello, mantenendo una conduttività di 0,052 W/mK [135].

La lolla di riso, il guscio protettivo che si forma durante la crescita del chicco, equivale a circa il 20% del peso del chicco. Proprio la lolla, il cascame ottenuto dal riso grezzo viene largamente impiegata per alcuni prodotti commerciali in edilizia. La lolla è costituita per circa il 45% da cellulosa e per la restante parte da ossido di silicio e nutrienti. È leggera, voluminosa, imputrescibile e inattaccabile da muffe e insetti grazie all'elevato contenuto in silice [134]. A differenza della paglia di cereali, la paglia di riso infatti, non può essere utilizzata nella zootecnica a causa dell'elevata percentuale di silicio contenuta. Da qui l'idea di utilizzare la paglia in edilizia, fornendo

un materiale dai numerosi vantaggi come: buon isolamento termico e acustico, impermeabile e resistente agli agenti atmosferici, economico, traspirabile, biodegradabile e maneggiabile con facilità. L'Italia, in questo settore, rappresenta un'eccellenza europea con diverse aziende e startup attive sul territorio nazionale. La società RiceHouse [136] propone il riutilizzo dei prodotti di scarto agricoli del riso come materiale da costruzione, come ad esempio RH100, un intonaco per l'isolamento termico formulato unicamente con materie prime come la calce naturale e la lolla di riso. Oltre l'isolamento termoacustico, il materiale riduce l'inquinamento indoor assorbendo CO₂. Altri prodotti sono, ad esempio, un intonaco di finitura a base di calce naturale e pula di riso, oppure un massetto alleggerito da utilizzare come riempimento e livellamento su solai in legno e in laterocemento.

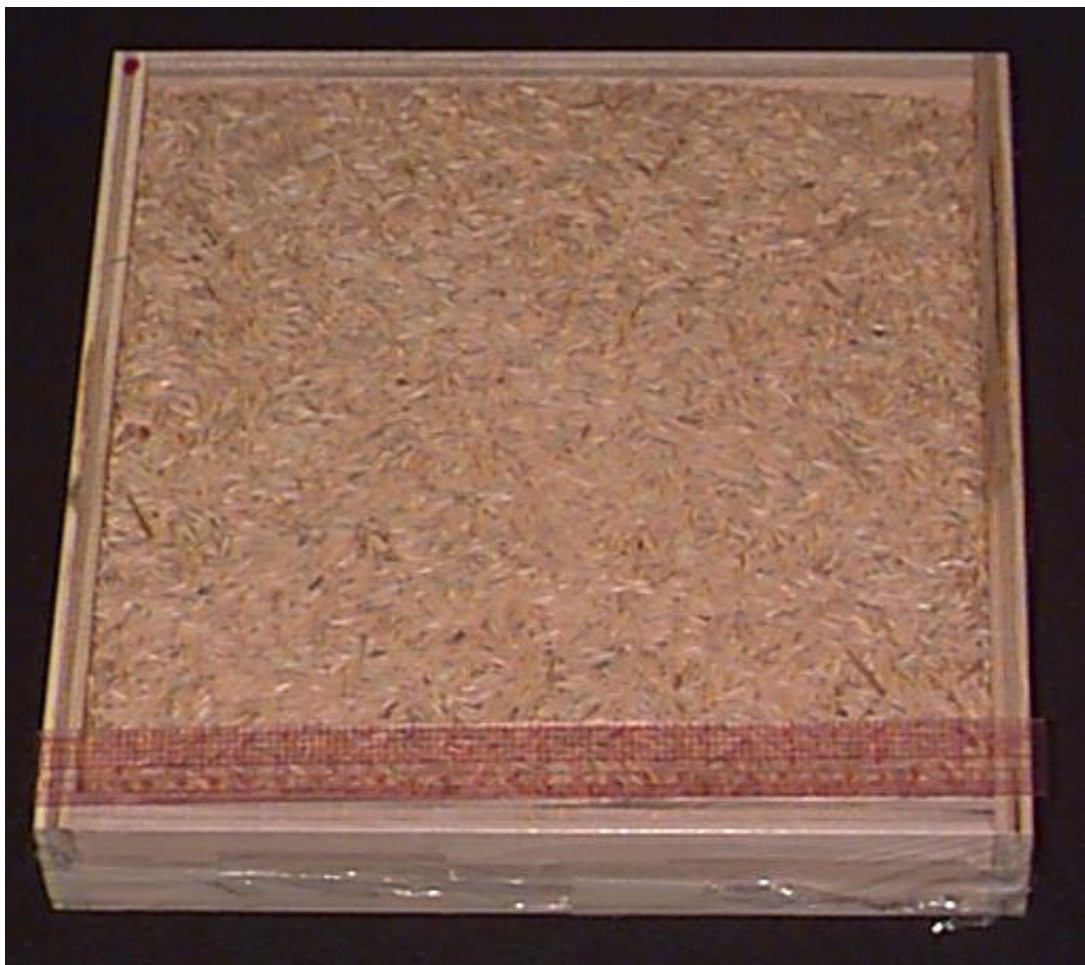


Figura 7 Foto del campione di prova ottenuto dalla lolla di riso [D. W. Yarbrough, K. E. Wilkes, P. A. Olivier, R. S. Graves, and A. Vohra, Therm. Conduct. (2005)]

La paglia, composta da cellulosa, lignina, cere, minerali e silicati, mescolata con lana di scarto e trattata con una soluzione di soda, può essere poi utilizzata per la produzione di pannelli termoisolanti e fonoassorbenti autoportanti. Il mattone in paglia prodotto è un elemento costruttivo capace di garantire la perfetta traspirabilità delle pareti, e di evitare pertanto fenomeni di condensa superficiale. È biodegradabile, maneggiabile con facilità e presenta costi ridotti in termini di energia combustibile per la raccolta, l'imballaggio e il trasporto in cantiere. Infine, è un materiale capace di ridurre le emissioni di anidride carbonica nell'atmosfera. I blocchi da costruzione sono realizzati in paglia e lolla di riso e colla con la dimensione di circa 30x30x60, pesano meno di 14 kg e possono essere maneggiati facilmente da una sola persona. Un telaio in legno e paglia di riso, di spessore 42 cm, raggiunge una trasmittanza termica di 0,12 W/m²K, con un tempo di sfasamento di 23h, oltre alle indubbe qualità di traspirabilità [137]. Dalla lolla di riso è possibile realizzare anche un materiale di rivestimento superficiale per esterni, simile al legno tropicale per estetica e lavorabilità, al 100% ecocompatibile e riciclabile: il prodotto è composto dal 60% di lolla di riso, 22% di sale comune e 18% di olio minerale [138].

2.1.7 Ananas

Una risorsa alternativa derivante da residui agricoli sono le foglie di ananas. Tradizionalmente, dopo la raccolta dei prodotti, i residui (fusto, foglie di ananas, ecc.) sono destinati all'incenerimento, con conseguenti problemi ambientali di inquinamento. L'utilizzo di questi scarti agricoli, oltre ad essere economicamente vantaggioso per gli agricoltori, previene l'inquinamento atmosferico dovuto alla combustione di residui e gli effetti negativi sulla qualità dell'aria, sulla salute umana e sull'ambiente. Il processo produttivo prevede il taglio manuale delle foglie di ananas per una lunghezza di circa 20 cm e la successiva immersione in una soluzione di NaOH al 10% in peso per 30 minuti. Le fibre ammorbidite ottenute vengono essiccate in forno a 80°C per 12 ore. I campioni essiccati vengono poi tritati in particelle di 2-5 mm di lunghezza e nuovamente essiccate in forno a 80°C per 12 ore. Il pannello può essere prodotto spruzzando il lattice di gomma naturale pretrattato sulle fibre di ananas, ottenendo un materiale con densità compresa tra 178-232 kg/m³. (Fig. 8). L'adesivo utilizzato consente, oltre a ridurre i costi di produzione, di preservare l'ambiente dagli inquinanti tipici delle colle chimiche. Per quanto riguarda le proprietà termiche, si è visto che la conducibilità dei pannelli da fibre di ananas, di 0,039 W/mK, è paragonabile alle schiume di lana di vetro e al polistirene [139]. Il materiale proveniente da rifiuti agricoli è composto per oltre l'80% di cellulosa e può essere utilizzato anche come rinforzo in poliestere fibroso, consentendo anche un miglioramento delle caratteristiche di prestazione termica [140].

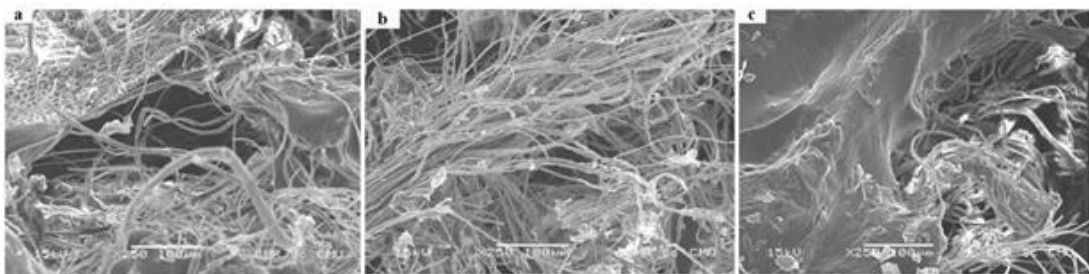


Figura 8 Campioni ottenuti dalle fibre di ananas con il rapporto fibre legante pari a 1:2 (a), 1:3 (b) e 1:4 (c) [139]

2.1.8 Opuntia

L'Opuntia ficus indica, comunemente chiamata pianta di fico d'India, è una pianta molto diffusa nel sud Italia. Oltre a produrre un frutto, è conosciuta per i suoi svariati utilizzi per la formulazione di gel o di olio. Ci sono altri utilizzi di questa pianta, originaria del Messico, oggi parte importante della macchia mediterranea, che vanno segnalati. La Sicilia oggi è la prima regione europea produttrice del frutto: A. de Vecchi et al. [141], presso l'Università di Palermo hanno ottenuto un pannello termoisolante per l'edilizia dall'essiccazione e frantumazione delle foglie di fico d'India. Il prodotto, atossico e riciclabile, presenta valori di conducibilità simili al polistirene (Fig. 9). Le pale di fico d'India, utilizzate per la produzione del pannello isolante, subiscono diverse fasi del ciclo produttivo: compressione, essiccazione, frantumazione e confezionamento. Il semilavorato viene mescolato con un collante a base di poliestere e pressato per formare il pannello isolante. Prima dell'essiccazione, fase utile per la successiva frantumazione, le pale devono essere necessariamente compresse; da questo processo viene generata una grande quantità di liquido, molto richiesto dalle industrie farmaceutiche, cosmetiche e alimentari. Il materiale in eccesso o di scarto, può inoltre essere utilizzato come fertilizzante nel settore agricolo.



Figura 9 Immagine del pannello ottenuto dai sottoprodotti di potatura dell'Opuntia Ficus Indica [141]

I risultati ottenuti sui sistemi di isolamento termico che riciclano il materiale di scarto della potatura di *Opuntia ficus indica*, sono soddisfacenti. In particolare, il materiale è stato trattato con l'aggiunta di colla per ottenere un pannello isolante, mostrando valori di conducibilità termica di 0,071 W/mK. Lo stesso materiale è stato valutato anche come materiale di riempimento sfuso, con valori di conducibilità molto migliori (0,057 W/mK). La conducibilità termica dei granuli di *Opuntia ficus indica* è paragonabile a quella della vermiculite, inferiore a quella di argilla espansa, pomice, vetro espanso granulato e granuli di cellulosa [141]. Il fattore che limita lo sfruttamento industriale dei cladodi di *Opuntia ficus indica* è il loro elevato tenore di umidità (fino al 93%), che comporta un elevato consumo energetico per l'essiccazione. Tuttavia, investire su questo nuovo materiale avrebbe notevoli vantaggi, ovvero, la disponibilità di enormi quantitativi di pale di fico d'india e l'ampia diffusione della pianta su tutto il territorio siciliano. I coltivatori del frutto, infatti, devono potare la pianta almeno una volta l'anno: il ritiro del materiale potato, garantirebbe da un lato la materia prima necessaria per la realizzazione dei pannelli, dall'altro lo sgravio dei costi di smaltimento per l'agricoltore. È dunque chiaro che questa pianta, oltre a produrre un frutto ricco di vitamine e oligoelementi, potrebbe consentire l'avvio di altre aziende, a basso impatto ambientale e di potenziale successo.

2.1.9 Girasole

Un altro sottoprodotto utilizzabile in edilizia sono i residui agricoli dell'estrazione di olio di girasole [135]. Il girasole è coltivato per l'alto contenuto di olio ricavabile dai suoi semi. Quest'ultimo, infatti, rappresenta fino all'80% del suo valore economico. Il processo industriale per la produzione dell'olio si compone di quattro fasi: triturazione, spremitura, estrazione dell'olio e raffinazione. Da ogni processo di estrazione deriva un sottoprodotto composto dagli steli (prevalentemente fibre e proteine). Analisi condotte sul materiale sfuso hanno mostrato una conducibilità termica del materiale di 0,065 W/mK. P. Evon et al. mirano a produrre, mediante un processo di pressatura

a caldo, dei pannelli di fibra isolante a media densità (da 500 a 900 kg/m³) e dallo spessore di 10 mm - 20 mm. Durante la pressatura di questo sottoprodotto le proteine e le fibre agiscono rispettivamente come leganti e come fibre di rinforzo, ottenendo un pannello completamente naturale privo di leganti esterni (Fig. 10) [142]. Le condizioni di termo-pressatura hanno avuto un'influenza importante sulla densità del pannello e sulle proprietà meccaniche e di isolamento termico. I valori più bassi di temperatura dello stampo (140 °C), pressione applicata (150 kgf/cm²) e tempo di stampaggio (40s) hanno generato il pannello meno denso, dalle buone proprietà termiche ma scadenti proprietà meccaniche. La temperatura di 160 °C ha fornito un buon compromesso tra proprietà meccaniche e proprietà di isolamento termico [143]. La conducibilità termica di 0,038 W/mK risulta simile ad altri isolanti commerciali come il polistirene o la lana di roccia [144]. Una possibile applicazione di questo pannello, composto principalmente da fibre e proteine lignino-cellulosiche, è l'isolamento termico di pareti o soffitti [145].

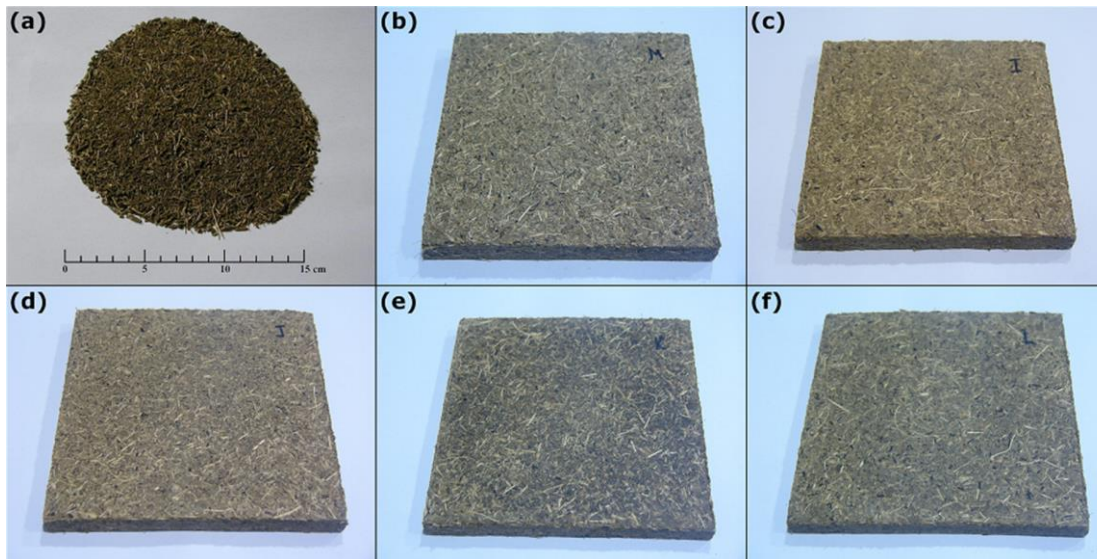


Figura 10 Campioni ottenuti dai sottoprodotti dei girasoli in granuli sfusi (a) e con processo di pressatura con temperature di pressatura che variano dai 140 °C a 200 °C (b-f) [143]

2.1.10 Caffè

Il caffè è una delle bevande più consumate al mondo. Un prodotto ottenuto durante il processo di tostatura dei chicchi di caffè è la pula. P. Ricciardi et al. hanno valutato l'uso di questo materiale di scarto nella realizzazione di pannelli (Fig. 11) [146]. Il processo di fabbricazione del pannello è stato analizzato in tre varianti: pressato a caldo, pressato a freddo e con l'aggiunta di colle esterne. Da un'analisi comparativa delle caratteristiche termiche e acustiche, risulta che il pannello pressato a freddo è il migliore. Quest'ultimo rappresenta, inoltre, il miglior processo di produzione di pannelli sostenibili, grazie alla minore richiesta energetica e quindi minore impatto ambientale [147].

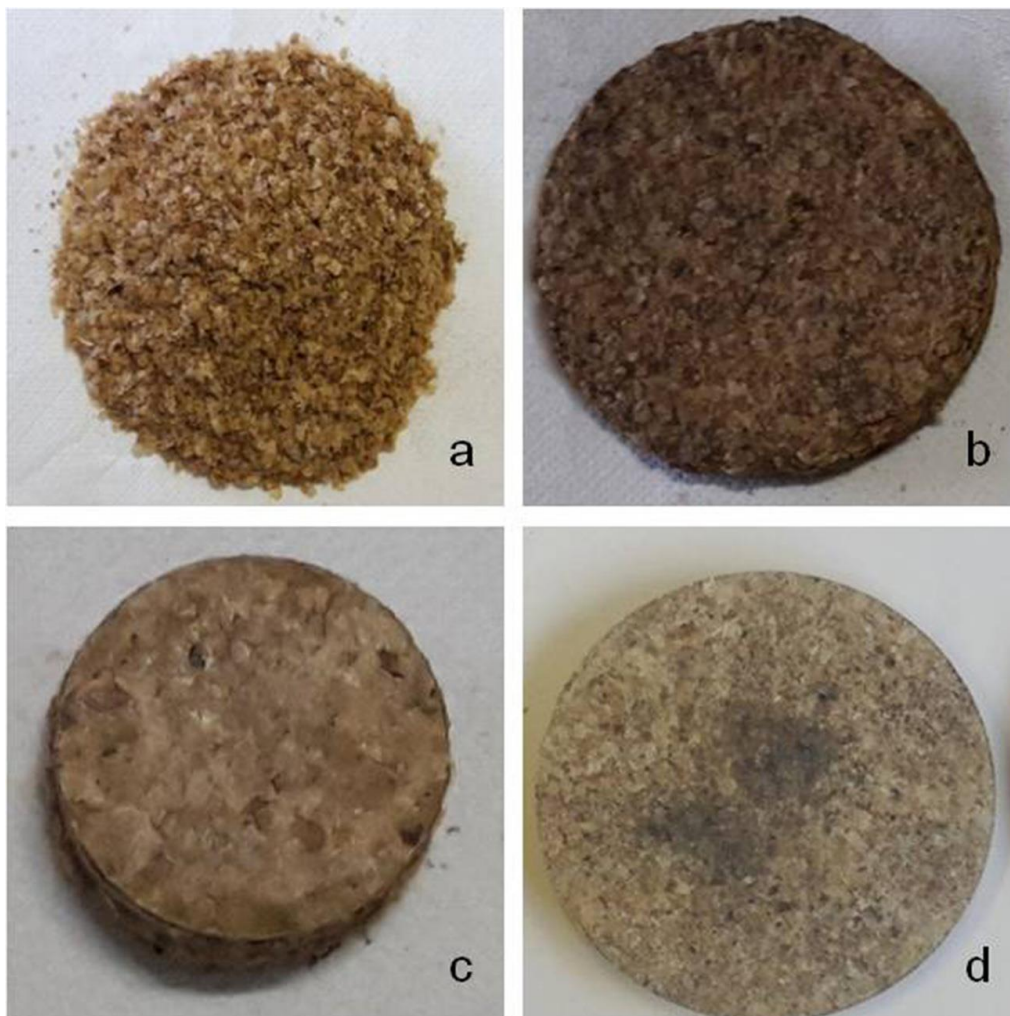


Figura 11 Foto dei campioni dai sottoprodotti del caffè in granuli sfusi (a) incollati (b), pressati a freddo (c) e pressati a caldo (d) [Ricciardi P, Torchia F, Belloni E, Lascaro E, Buratti C: Environmental characterisation of coffee chaff, a new recycled material for building applications. *Constr. Build. Mater.* 2017]

Un altro sottoprodotto dell'industria del caffè sono i fondi di caffè esauriti. Considerando le enormi quantità di questo prodotto diffuse in tutto il mondo, ci sono state molte proposte per riutilizzare questo materiale. Uno di questi è il miglioramento termico degli intonaci. Lachheb et al. [148] hanno esaminato i benefici termici e ambientali dei fondi di caffè esauriti, attraverso simulazioni annuali per una tipica casa marocchina situata a Marrakech. I risultati hanno indicato che i carichi di raffreddamento e riscaldamento dell'edificio possono essere ridotti fino al 20% integrando questo materiale naturale al sistema costruttivo tradizionale. L'integrazione dei fondi di caffè riduce la conduttività dell'intonaco fino a 0,31 W / mK, garantendo un potenziale contenimento energetico degli edifici. Da un punto di vista ambientale, il materiale proposto ha ridotto le emissioni fino a 1500 kg di CO₂ all'anno.

2.1.1 Canna da zucchero

La bagassa è un sottoprodotto dalla lavorazione della canna da zucchero prodotta in grandi quantità e destinata principalmente alla combustione. La canna da zucchero è un materiale costituito principalmente da fibre lignocellulosiche e potrebbe rappresentare una valida alternativa ad alcuni isolanti sintetici commerciali [149]. R. Widyorini et al. hanno condotto uno studio sulle proprietà termiche dei materiali naturali fibrosi, mostrando una conducibilità termica della canna da zucchero pari a 0,046 W/mK [150]. La bagassa normalmente contiene - a seconda della varietà della canna e del metodo di raccolta - zuccheri residui; questi potrebbero causare problemi nella produzione di pannelli incollati con resina poiché potrebbero essere chimicamente incompatibili ed interferire con il legante. È stata quindi valutata la possibilità di creare un pannello senza l'aggiunta di leganti esterni, mediante un processo di pressatura a caldo. Gli zuccheri residui presenti in questo sottoprodotto agiscono come legante e auto-incollano il pannello senza necessità di ulteriori additivi. [151].

2.2 Tecniche realizzative dei materiali

Esaminate le ricerche in corso riguardo le applicazioni in edilizia dei sottoprodotti agricoli, si procede in questo capitolo evidenziando le differenti tecniche realizzative che hanno portato alla formazione dei campioni, con particolare riferimento al tipo di leganti utilizzati. I provini selezionati sono tutti sotto forma di pannelli e derivano dall'utilizzo di un sottoprodotto agricolo o di produzione di materiali naturali. La tabella 1 riassume il legante utilizzato nel processo di produzione o, nel caso di assenza di legante, la tecnica di incollaggio. Dalla tabella è possibile notare come il legante più diffuso per i pannelli di legno sia la resina a base di formaldeide. Purtroppo questo prodotto provoca emissioni dannose per la salute umana a causa del rilascio in ambiente di microparticelle volatili. Alcuni materiali naturali, mediante un processo di pressatura, consentono di sfruttare le colle già presenti all'interno. Il processo di pressatura a freddo richiede la minima quantità di energia, tuttavia, in alcuni materiali, non è stato possibile far liberare leganti naturali alle basse temperature. Pertanto, la pressatura a caldo si rivela spesso la tecnica realizzativa più utilizzata poiché riesce a far liberare le resine naturali e ne favorisce l'incollaggio. Quando questo legame naturale non è possibile, viene aggiunta un collante esterno per migliorare l'aggregazione tra le particelle. Tra queste si distinguono: quelle naturali, come le colle a base di lattice o di pappa reale e quelle sintetiche come quelle a base poliuretanica o di polistirene. F. Hernández-Olivares et al. e M. Lamrani et al. hanno inoltre ipotizzato l'utilizzo di sottoprodotti per migliorare le prestazioni termiche del gesso. La tabella a seguire (Tab.2) mostra le conducibilità calcolate su campioni di gesso a cui sono stati aggiunti dei materiali organici. I risultati evidenziano dei miglioramenti nelle prestazioni termiche rispetto i valori ottenuti con il solo gesso. La conducibilità di un pannello in cartongesso è di circa 0,21 W/mK e può essere migliorata a 0,12 W/mK con l'aggiunta di granuli di sughero. Il miglioramento delle prestazioni termiche di un pannello in cartongesso permette di migliorare la qualità degli interventi sul costruito.

Sottoprod.	Legante							Legante + processo			Riferimenti	
	Resina epossidica	Resina con formaldeide	Calcio	Gesso	Lattice di gomma	Legante in poliestere	Legante a base di pappa reale	Colla poliuretantica	Pressatura a freddo senza legante	Pressatura a caldo senza legante		Pressatura a caldo con legante
Pannocchia		x						x			x	[114][115] [117]
Sughero				x						x		[41][40]
Durian	x										x	[120]
Cocco	x							x		x	x	[123][124]
Canapa			x				x		x			[18]
Guscio di noce		x										[125]
Gusci di arachide				x		x					x	[128][127]
Bambù		x									x	[87]
Riso			x							x		[134][137]
Ananas					x	x						[139][140]
Opuntia	x											[141]
Girasole										x		[135]
Canna da zucchero										x		[151]
Caffè								x	x	x		[147][148]

Tabella 1 sottoprodotti e tipologie di leganti utilizzati per la formazione dei campioni

Riguardo le proprietà termiche, invece, la Tabella 3 riassume i valori della conducibilità termica dei materiali ottenuti dai sottoprodotti agricoli elencati nei paragrafi precedenti.

<i>Materiali</i>	<i>Conducibilità</i>	<i>Riferimento</i>
	[W/mW]	
Sughero e gesso	0,12	[40]
Arachidi e gesso	0,14	[127]

Tabella 2 Conducibilità di materiali a base di gesso e sottoprodotti agricoli

I materiali naturali rappresentano sicuramente un'ottima soluzione nel panorama dell'architettura sostenibile. La loro produzione è destinata sicuramente a crescere e migliorare. Tuttavia la loro applicazione presenta alcuni limiti che attengono sia alla fase di coltivazione delle fibre che alla fase realizzativa.

Per superare tali limiti spesso si ricorre a procedure di produzione o ibridazioni che di fatto riducono la sostenibilità degli stessi. Nel processo di coltivazione, gli aspetti più importanti da tenere in considerazione per la valutazione dell'impronta ambientale sono legati alla lavorazione del terreno, alla semina, alla raccolta e ai processi di fertilizzazione; in particolare la concimazione rappresenta il maggior contributo alle emissioni di GHG: essa produce tra il 42% e il 76% delle emissioni totali dalla produzione vegetale [152]. Com'è noto, le piante immagazzinano le emissioni di carbonio attraverso la fotosintesi e il suolo immagazzina carbonio nella sua forma organica. Tuttavia, a seconda del tipo di vegetazione, del clima e del terreno, alcune colture potrebbero avere un contributo negativo al bilancio di carbonio, rilasciando emissioni ad un tasso superiore a quello che possono immagazzinare.

Riguardo il processo produttivo, in alcuni casi, l'esigenza di renderli durevoli, porta ad accoppiarli con materiali meno sostenibili o non riciclabili, come succede ad esempio alla cellulosa, solitamente impiegata come isolante termico, commercializzata sotto forma di fiocchi, grani e pannelli che spesso viene resa ignifuga (ma anche repellente

nei confronti di funghi, insetti e ratti) attraverso l'aggiunta del sale di boro. Frequentemente i materassini di lana di pecora, non avendo alte capacità di resistenza, vengono irrigiditi con reti in fibre di poliestere sintetico (perdendo così l'attributo di riciclabilità). Un processo simile avviene per la produzione del lino usato come coibente sotto forma di pannelli, feltri e manicotti. Anche in questo caso, alla matrice naturale vengono aggiunte, come sostegno, fibre in poliestere sintetico (10-12 % in peso). Qualche volta, per una migliore resistenza al fuoco e come trattamento antimuffa, nei coibenti naturali si somministrano, oltre ai sali di boro, anche silicati di sodio, sali di potassio, solfati di ammonio o composti alogenati [153].

<i>Materiale</i>	<i>Conducibilità</i> [W/mK]	<i>Riferimento</i>
Sughero	0,047	[42]
Girasoli	0,088	[144]
Pannocchie	0,101	[114]
Noci	0,088	[133]
Canna da zucchero	0,046	[150]
Cocco	0,054	[120]
Ananas	0,035	[139]
Durian	0,063	[120]
Lolla di riso in granuli	0,046	[133]
Paglia di riso	0,051	[134]
Fichi d'india	0,071	[141]

Tabella 3 Conducibilità termica di alcuni materiali ottenuti da sottoprodotti agricoli

2.3 Analisi del settore agricolo

2.3.1 Produzione agricola

La condizione fondamentale per avviare un processo di economia circolare è conoscere i flussi di rifiuti. In accordo con questi principi, è stata condotta una prima analisi di un settore, potenzialmente in grado di fornire materiale ai processi di economia circolare. Il settore che viene preso come esempio per lo sviluppo di questa analisi è la coltivazione degli agrumi; in particolare, il rifiuto analizzato sono le bucce di agrumi. L'arancia è il frutto più coltivato al mondo e rappresenta circa il 50-60% della produzione totale di agrumi. Nel 2016 sono state prodotte più di 124 milioni di tonnellate di agrumi, di cui circa il 50-60% è stato consumato fresco e il restante 40-50% è stato destinato alla trasformazione industriale [154]. Da questa produzione deriva un'enorme quantità di rifiuti; considerando che il 50% è composto da bucce, lo scarto prodotto è di circa 3,4 milioni di tonnellate. Il grosso quantitativo di rifiuti prodotto rimane in parte inutilizzato. Ad oggi, questi sottoprodotti vengono principalmente destinati all'alimentazione zootecnica, al compostaggio, alla formazione di biogas o al settore farmaceutico. Riguardo questi processi sono stati condotti molteplici studi [161] [162] [163], finalizzati a migliorarne i rendimenti ed incrementarne gli utilizzi. Il territorio del Sud Italia ben si sposa con la ricerca in corso poiché, grazie alle molteplici coltivazioni, aumenta la disponibilità di materie prime seconde. Nel panorama europeo, l'Italia è il secondo produttore di agrumi dopo la Spagna [155] (Fig. 12). In Italia le superfici agricole sono 143.540 ha. Per quanto riguarda la distribuzione geografica, la Sicilia assume saldamente il ruolo di leader nazionale (52%), con 80.478 ha coltivati, seguita dalla Calabria (29%) con 35.834 ha (Fig. 13). La Sicilia è quindi la più grande regione italiana interessata all'agrumicoltura, con una produzione stimata di 15 milioni di quintali.

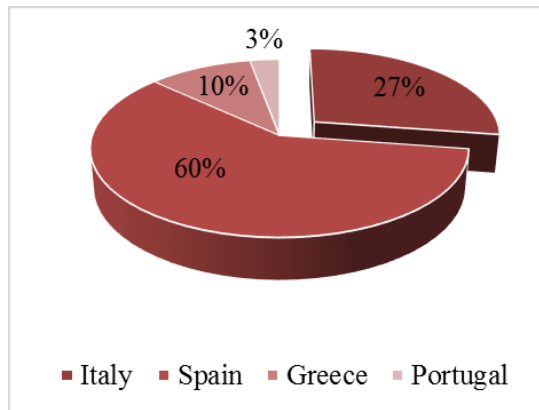


Figura 12 Produzione di agrumi in Europa (Ton)

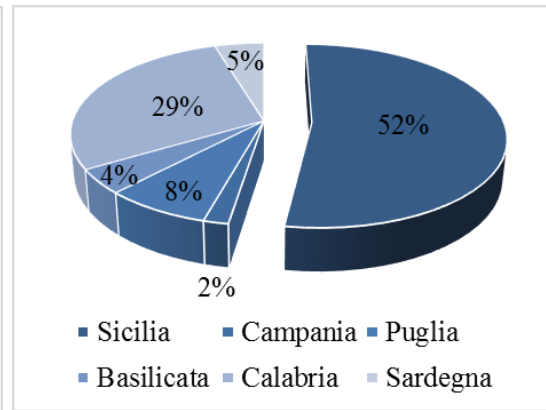


Figura 13 Produzione di agrumi in Italia - dettaglio per regioni

Le produzioni non adatte al mercato del fresco, sia per la piccola pezzatura dei frutti, sia per le varietà che non soddisfano le esigenze di distribuzione, sono destinate alla trasformazione industriale. Le industrie coinvolte nella prima trasformazione degli agrumi in Italia sono 103 [156]. Più della metà di queste industrie sono in Sicilia, in Calabria e il resto in Campania. Da 480.000 tonnellate di prodotti lavorati in Sicilia, è possibile stimare una produzione di circa 230.000 tonnellate di scarti di lavorazione. Tra i principali sottoprodotti della trasformazione vi sono scorze, porzioni di polpa e semi (Tab. 4) [121]. Tutti i processi di trasformazione utilizzati nell'industria degli agrumi danno origine a tre prodotti principali: succo, olio essenziale e un elemento costituito da residui di bucce, polpa e semi, chiamato pastazzo. Le percentuali relative di ogni singolo componente per unità di prodotto lavorato sono circa 35 - 45% per il succo, 0,2 - 0,5% per l'olio essenziale e 55 - 65% per il pastazzo. I primi due sono i prodotti maggiormente commerciabili, mentre il terzo è considerato un sottoprodotto di scarso valore o scarto di lavorazione.

Period	Orange		Small fruit		Lime		Total	
	(000 t)	%	(000 t)	%	(000 t)	%	(000 t)	%
1970-79	209	13,2	8	2,5	152	19,5	369	13,7
1980-89	526	27,3	43	10,4	240	31,9	809	26,1
1990-99	630	31,8	68	13,6	272	40,8	970	30,8
2004-05	903	42,9	201	32,8	171	28,6	1275	38,5

Tabella 4 Produzione di arance destinate alla trasformazione industriale ed impatto sulla produzione nazionale (000t)

2.3.2 Quadro normativo: rifiuto o sottoprodotto

Non tutti i residui di produzione sono giuridicamente “rifiuti”. Infatti, alcuni di essi non acquistano mai la natura di rifiuto, altri invece la perdono all'esito di un procedimento di recupero. In particolare, ai sensi della vigente normativa dei “rifiuti” godono di un regime di favore per la loro gestione. Il fatto che una sostanza sia un materiale residuale di produzione o di consumo costituisce un indizio che si tratti di un rifiuto, e la sola circostanza che una sostanza sia destinata a essere riutilizzata, o possa esserlo, non può essere determinante per la sua qualifica o meno come rifiuto. Tuttavia, una materia prima seconda che deriva da un processo di fabbricazione o di trasformazione può costituire non tanto un rifiuto quanto un sottoprodotto. L'Art. 12 del D.Lgs. 205/2010, introduce l'Art. 184 bis nel D.Lgs. 152/2006 (Testo Unico Ambientale), che chiarisce il concetto di sottoprodotto e lo rende nettamente distinguibile dal concetto di rifiuto definito nell'Art. 10 del D.Lgs. 205/2010.

L'Art. 10 del D.Lgs. 205/2010, intende per:

- Rifiuto: qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o abbia l'obbligo di disfarsi;
- Sottoprodotto: qualsiasi sostanza od oggetto che soddisfa le condizioni di cui all'articolo 184- bis, comma 1, o che rispetta i criteri stabiliti in base all'articolo 184-bis, comma 2.

L'Art. 12 del D.Lgs. 205/2010 (Sottoprodotto e cessazione della qualifica di rifiuto) nell'articolo 184-bis definisce che: è un sottoprodotto e non un rifiuto ai sensi dell'articolo 183, comma 1, lettera a), qualsiasi sostanza od oggetto che soddisfa tutte le seguenti condizioni:

- la sostanza o l'oggetto è originato da un processo di produzione, di cui costituisce parte integrante, e il cui scopo primario non è la produzione di tale sostanza od oggetto;

- è certo che la sostanza o l'oggetto sarà utilizzato, nel corso dello stesso o di un successivo processo di produzione o di utilizzazione, da parte del produttore o di terzi;
- la sostanza o l'oggetto può essere utilizzato direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale;
- l'ulteriore utilizzo è legale, ossia la sostanza o l'oggetto soddisfa, per l'utilizzo specifico, tutti i requisiti pertinenti riguardanti i prodotti e la protezione della salute e dell'ambiente e non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o la salute umana.

Se, oltre alla mera possibilità di riutilizzare la sostanza di cui trattasi, il detentore consegue un vantaggio economico nel farlo, la probabilità di tale riutilizzo è alta. In un'ipotesi del genere la sostanza in questione non può più essere considerata un onere di cui il detentore cerchi di «disfarsi», bensì una risorsa. La nota 14843 del 01/03/2012 emanata dalla Regione Siciliana, riferendosi all'articolo 184 bis, di cui sopra, definisce il pastazzo di agrumi come un sottoprodotto dell'industria di trasformazione agrumaria. Nella stessa nota, per la definizione di sottoprodotto si fa riferimento all'art. 183 comma 1 lettera n) del D.lgs 152/2006, ma nel 2012 (anno in cui è stata emanata la Nota in oggetto) tale lettera non era più corrispondente alla definizione di "sottoprodotto", a seguito delle modifiche indotte dal D. Lgs. 205/2010.

In conclusione un bene, un materiale o una materia prima risultante da un processo di fabbricazione che non è destinato a produrlo, può essere considerato come un sottoprodotto solo se il suo riutilizzo interviene nel corso del processo di produzione. Quindi, nell'ipotesi di utilizzare il pastazzo all'interno di un nuovo processo produttivo questo potrebbe essere considerato un rifiuto da indirizzare al riciclo. Tuttavia, l'inserimento del ciclo di fabbricazione del pannello all'interno del processo agro-industriale ne consentirebbe la catalogazione come sottoprodotto. Questo costituisce un aspetto normativo contrastante che in futuro potrebbe essere risolto.

2.3.3 Utilizzo del sottoprodotto di agrumi

La composizione chimica degli scarti della lavorazione degli agrumi offre ampie possibilità di utilizzazione, sia come fonte di sostanze ad alto valore aggiunto (pectine, flavonoidi, vitamine), sia come alimento zootecnico [157]. Se fino al più recente passato la gestione dei rifiuti è stata considerata solo in un'ottica di smaltimento, l'obiettivo oggi perseguito è quello di ridurre la quantità degli stessi e di promuovere, nel contempo, proficue attività di recupero e di riciclaggio. A queste esigenze è rispondente anche la pratica del compostaggio, volta al recupero e alla valorizzazione di quei materiali organici, come il pastazzo, che, diversamente, vedrebbero quale ipotesi di collocazione alternativa il conferimento in discarica. La tabella 5 mostra i principali derivati ottenuti dalla produzione di agrumi in Sicilia.

	Juice natural (t)	Juice technical (t)	Oils essential (t)	Peel (t)	Feed animal (t)	Citrus pulp dry (t)	Pressed (t)	Pulps (t)	Plant extracts (t)
Oranges	86.942,0	4.530,0	259,0	4.337,0	100.066,0	2.016,0	1.554,0	458,0	6.443,0
Lemons	54.247,0	3.913,0	588,0	2.646,0	108.032,0	199,0	3.633,0	101,0	4.806,0
Tangerines	14.712,0	92,0	37,0	1.170,0	9.097,0	17,0	0,0	2,0	0,0
Grapefruits	67,0		0,1	4,0	142,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tot.	155.968,0	8.535,0	884,1	8.157,0	217.337,0	2.232,0	5.187,0	561,0	11.249,0

Tabella 5 Derivati dagli agrumi in Sicilia

I derivati dagli agrumi sono utilizzabili per fini agronomici, come ammendante o mangime. Di recente si stanno sviluppando riutilizzi ad alto valore aggiunto, come la produzione di fibre, combustibile o come matrice organica per la produzione di biogas [158]. L'obiettivo di questa ricerca non è quello di sostituire le tecniche attualmente utilizzate, ma quello di integrare un ciclo produttivo agricolo esistente. Il settore farmaceutico e cosmetico, ad esempio, utilizzano i sottoprodotti agricoli per estrarre sostanze organiche tramite un processo di triturazione e pressatura che separa la parte liquida da quella solida. Per chiudere il processo produttivo in modo "circolare", è possibile riutilizzare la parte solida per creare nuovi materiali.

Nei paragrafi successivi vengono illustrate le possibili applicazioni ed i principali utilizzi del pastazzo di agrumi.

1.1.1.1 Utilizzo come alimento zootecnico

Sin dalla nascita dell'industria di trasformazione agrumaria l'impiego più diffuso dei sottoprodotti degli agrumi (allo stato fresco, insilato o essiccato) è stato l'alimentazione zootecnica, soprattutto per l'elevato livello nutritivo dei propri componenti [159]. Infatti, dal punto di vista normativo, le scorze di agrumi sono chiaramente ed esplicitamente definite in termini sia di prodotto agricolo, sia di alimento zootecnico. In particolare il D. Lgs. 360/99 riporta nell'allegato I la definizione generale dei mangimi e nell'allegato II include tra le materie prime per mangimi il "pastazzo di agrumi, sottoprodotto ottenuto per pressione degli agrumi durante la produzione di succo di agrumi". Si può stimare che tale destinazione assorba una quota, molto variabile fra le diverse industrie e fra le varie campagne agrumarie, di almeno il 70-80% della produzione annua. Potenzialità e convenienza economica di tale utilizzazione sono limitate dall'elevato contenuto di umidità, che rende onerosi i costi di trasferimento dell'unità di sostanza secca nello spazio (dall'industria di trasformazione all'utilizzatore) e nel tempo. Allo stato attuale solo piccole quantità di pastazzo vengono essiccate per essere successivamente destinate all'industria mangimistica. Il grosso della produzione, invece viene in parte utilizzato tal quale per alimentazione animale o avviato allo smaltimento in discariche più o meno controllate. Il pastazzo, caratterizzato in generale da una discreta appetibilità per gli animali, viene utilizzato in sostituzione, generalmente parziale, delle fonti energetiche più comunemente utilizzate, quali i cereali. L'utilizzo allo stato fresco è possibile solo nel limitato periodo di tempo coincidente con la campagna di lavorazione prevalentemente in insediamenti zootecnici localizzati in prossimità delle industrie di trasformazione. La convenienza economica dell'utilizzo del pastazzo fresco in

allevamenti distanti dal luogo di produzione è limitata essenzialmente dai costi di trasporto [160].

1.1.1.2 Utilizzo per la produzione di compost

Il compostaggio è un processo biologico di tipo aerobico caratterizzato da: stabilizzazione, igienizzazione e umificazione degli scarti organici. Nel contesto di una migliore valorizzazione dei sottoprodotti dell'industria agrumaria si inserisce la possibilità di utilizzare i residui di lavorazione degli agrumi, come matrice per la produzione di un compost di qualità [161]. Il compost da pastazzo di agrumi rappresenta un ottimo ammendante per il recupero della fertilità organica e chimica dei suoli, dunque corregge e migliora la qualità di un terreno agricolo. Le caratteristiche precedentemente riportate mettono in evidenza il carattere di elevata qualità del pastazzo per quanto riguarda la composizione chimico - fisica. In particolare il contenuto di acqua, la presenza di micro elementi e il bassissimo contenuto di metalli pesanti, fanno sì che questa tipologia di sottoprodotto dell'industria agrumaria, rappresenti una matrice idonea per la realizzazione di un processo di stabilizzazione mediante compostaggio. Le fasi del processo di compostaggio sono: raccolta e caratterizzazione delle materie prime, miscelazione della biomassa, processo bio-ossidativo, maturazione della sostanza organica e condizionamento finale. Durante la fase attiva di bio-ossidazione accelerata, in cui sono più rapidi ed intensi i processi degradativi a carico delle componenti organiche maggiormente fermentescibili, si raggiungono elevate temperature; a tal fine occorre drenare l'eccesso di calore e fornire l'ossigeno necessario per le reazioni biochimiche. Durante la fase di maturazione si completano i fenomeni degradativi a carico delle molecole meno reattive e le esigenze di drenaggio di calore e quelle di adduzione di ossigeno sono minori rispetto alla fase attiva. Il compost ottenuto alla fine del processo non contiene residui visibili delle matrici di partenza e si presenta di colore scuro, omogeneo e di granulometria fine. I risultati analitici indicano che i compost

prodotti con i residui dell'industria agrumaria hanno delle caratteristiche di elevata qualità ambientale ed agronomica, rientrando ampiamente nei restrittivi limiti imposti dalle normative relative agli ammendanti organici.

1.1.1.3 Estrazione di pectina dai residui dell'industria agrumaria

Il sottoprodotto dagli agrumi si può considerare una fonte di sostanze ad alto valore aggiunto, come ad esempio di pectina. La pectina trova impiego nell'industria alimentare come gelificante, soprattutto nella realizzazione di marmellate e confetture. L'Europa è uno dei principali consumatori di pectina con circa 600 t all'anno [162]. Il concentrato di pectina, a causa del suo odore molto sgradevole, non può essere utilizzato nella maggior parte delle applicazioni e per questo motivo viene prodotta allo stato solido, dalla precipitazione con alcool o sali [163]. Il tradizionale processo di produzione è mostrato nella figura 14. La produzione industriale di pectina avviene attraverso le seguenti fasi: nella prima fase, le bucce di agrumi devono essere accuratamente lavate per eliminare il maggior numero di impurezze solubili [164]. Le bucce vengono poi sottoposte ad un processo di essiccazione, che diminuisce il tasso di umidità e consente la stabilizzazione della buccia per lo stoccaggio, riducendo il costo di trasporto. Queste fasi sono di solito eseguite in strutture vicino agli impianti di produzione di succhi di agrumi. L'estrazione di pectina viene effettuata ad alta temperatura e in ambiente acido. Successivamente, una separazione centrifuga consente di ottenere un liquido molto fluido e torbido, che viene filtrato per ottenere un liquido chiarificato e concentrato. Viene aggiunto etanolo a questo concentrato, causando flocculazione. Poi, in un nuovo processo di separazione, il tutto viene premuto in una pressa a nastro, ottenendo la pectina imbevuta di etanolo. Questo materiale viene sottoposto ad essiccamento, macinazione e raffinazione, lasciando una polvere bianca che è pectina commerciale. Questo schema di produzione presenta i seguenti inconvenienti: la necessità di un intenso trattamento del materiale grezzo che comporta la generazione di una grande quantità di rifiuti inquinanti, un

processo di estrazione in mezzo acido ad alta temperatura, e una fase di purificazione in alcool che comporta elevati costi di installazione e di produzione e genera una grande quantità di scorie inquinanti.

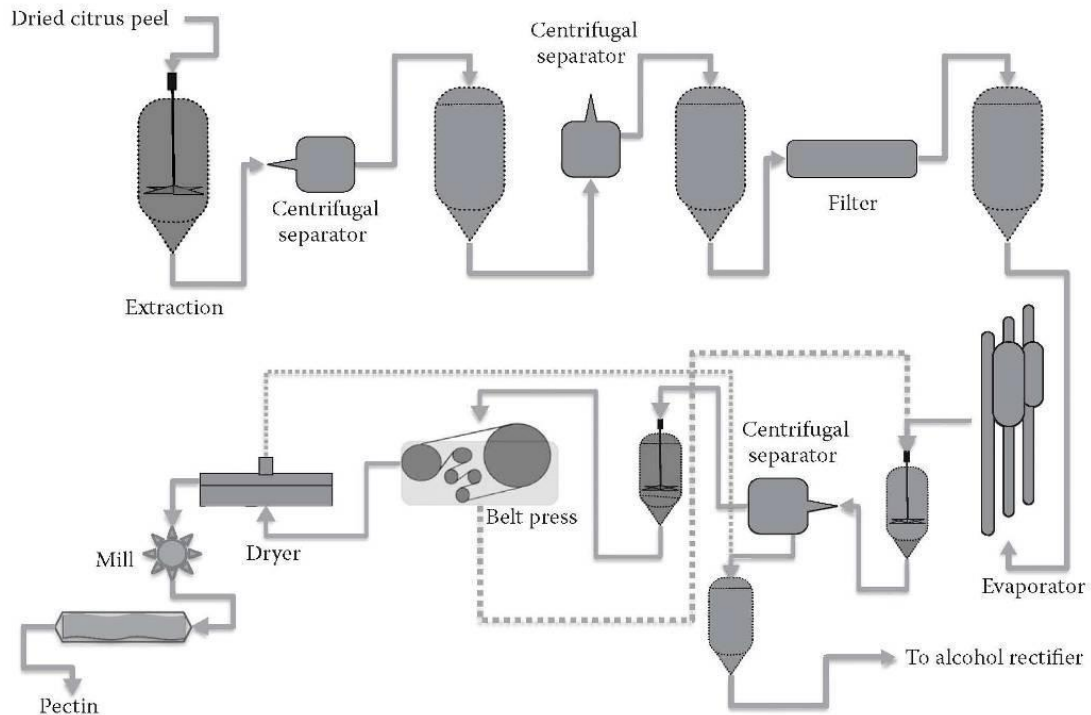


Figura 14 Diagramma di flusso per la produzione industriale di pectina da agrumi

1.1.1.4 Utilizzo per estrarre fibre alimentari

La fibra alimentare è nota da oltre 2000 anni in forme diverse; essa è definita come l'insieme di polisaccaridi e di materiali di scarto vegetale che sono resistenti all'idrolisi dagli enzimi digestivi umani, e non possono essere metabolizzati o assorbiti [165]. Dunque la fibra alimentare è da considerarsi come un componente naturale del cibo [166]. Le fibre tradizionalmente utilizzate nella tecnologia alimentare provengono da cereali, tuttavia, le fibre di frutta e verdura, anche se meno studiate, hanno maggiori qualità nutrizionali e tecnologiche. Nel caso delle fibre alimentari da frutti, stanno guadagnando maggiore importanza rispetto a quelle dai cereali perché presentano un rapporto di fibra dietetica totale (TDF) più equilibrato [167]. Il contenuto di TDF è influenzato anche dal metodo di estrazione: in generale, la maggior parte di frutta e

verdura hanno valori compresi tra 1% e il 2,2% di TDF. L'assunzione di fibra alimentare nei paesi sviluppati è carente e diversi studi su linee guida alimentari consigliano un aumento del consumo di prodotti ricchi di fibre come frutta e verdura [168]. In tal senso, la fibra ottenuta dalla scorza di agrumi costituisce una valida alternativa alla fibra a base di cereali. Il processo di estrazione prevede che la premiscela composta da frutto, buccia e noccioli viene pressata ed integrata con acqua in una proporzione variabile da 1:3 a 1:10; il tutto viene poi sottoposto a trattamento enzimatico chimico a temperatura controllata, che determina le caratteristiche finali della fibra ottenuta. Successivamente viene posta in un essiccatore rotativo e frammentato in granuli. Questi granuli sono macinati e la polvere risultante viene setacciata fino a raggiungere la dimensione media delle particelle richiesta. Il processo di ottenimento di fibra alimentare da scorze di agrumi è descritto nella Figura 15.

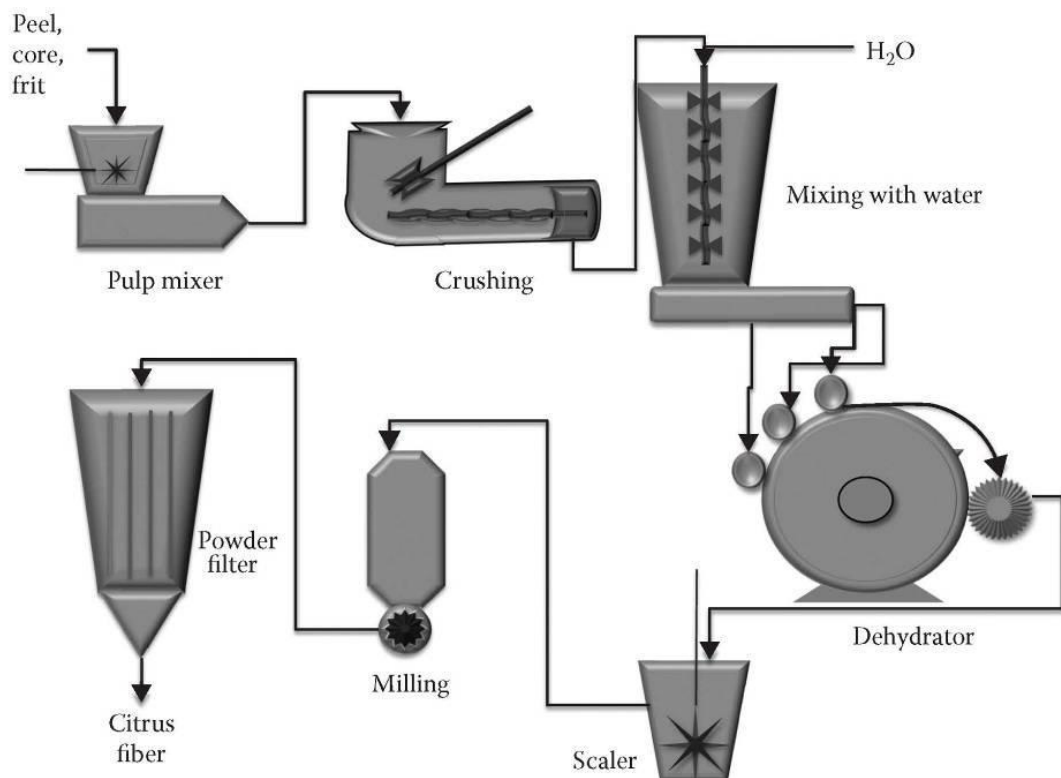


Figura 15 Produzione di fibre di agrumi

1.1.1.5 Recupero di limonene dalla lavorazione degli agrumi

Il limonene è un idrocarburo, che prende il suo nome dal limone; la buccia del limone, come gli altri agrumi, contiene grandi quantità di questo composto chimico, che è in gran parte responsabile dell'odore caratteristico. Il principale composto chimico presente in natura e di maggior interesse in campo industriale e merceologico è il D-limonene. Il limonene è comune nella produzione di prodotti cosmetici e dato il suo odore di arancia il D-limonene è usato nell'industria alimentare come insaporitore. Viene utilizzato in botanica come insetticida e viene aggiunto ai prodotti detergenti per conferire il tipico odore di arancia. Attualmente, ci sono tre modi per ottenere limonene come sottoprodotto di agrumi:

- recupero con un evaporatore, dal calore residuo che proviene dal processo di essiccazione della buccia;
- stripping sulla emulsione di olio essenziale, utilizzando estrattori senza centrifughe;
- distillazione.

Da un punto di vista commerciale, è interessante che l'industria di succo di agrumi crei una grande quantità di rifiuti, utilizzati per ottenere limonene. Il basso costo di limonene (2 - 7 €/ kg), estratto dai residui ha suscitato grande interesse per l'industria chimica. Per queste ragioni, il suo mercato è in espansione.

1.1.1.6 Estrazione di oli essenziali dalle bucce di agrumi

La buccia degli agrumi contiene numerose cellule dalle quali si può estrarre l'olio. La buccia d'arancia fresca produce circa 0,54% di olio con il metodo di spremitura a freddo. L'olio di scorza di agrumi ha raggiunto una grande importanza commerciale nell'integrazione di diversi tipi di bevande, dolci e prodotti da forno. È utilizzato anche in cosmesi e la purezza degli oli di agrumi è determinata misurando il loro peso specifico, indice di rifrazione e la rotazione ottica.

1.1.1.7 Produzione di bioetanolo dai sottoprodotti degli agrumi

I residui di lavorazione della frutta, contengono zuccheri che possono essere convertiti in etanolo attraverso la fermentazione [169]. L'etanolo è una fonte di energia molto versatile perché può essere utilizzato come combustibile per il trasporto; tuttavia, la sua produzione è un processo costoso che coinvolge fermentazione e distillazione.

Il vantaggio significativo del processo di conversione della biomassa in biocarburanti può consentire la sostituzione del 30% di carburanti convenzionali utilizzati globalmente per tutti i trasporti [170]. Sarebbe impossibile raggiungere questo obiettivo utilizzando etanolo solo a base di cereali. In questo senso, l'uso di scorze di agrumi come fonte di biomassa fermentescibile per il bioetanolo è una opzione molto interessante [171]. In Florida si producono circa 4.000.000 di galloni di etanolo all'anno dai rifiuti degli agrumi.

Il processo di produzione di biocarburanti attraverso la digestione anaerobica di frutta e scarti vegetali può essere suddiviso in quattro fasi. Nella prima fase, le materie prime come cellulosa, emicellulosa e lignina devono subire degradazione da enzimi extracellulari. Nella seconda fase, i componenti organici solubili contenenti prodotti idrolizzati quali aminoacidi, zuccheri e acidi grassi a catena lunga vengono convertiti in acido, alcool, idrogeno e anidride carbonica. Nella terza fase, i prodotti acidificati sono convertiti in acido acetico, idrogeno e biossido di carbonio da acetogenesi. Nella quarta fase, il metano può essere prodotto attraverso metanogenesi da batteri [172]. Tuttavia, a causa del basso contenuto di cellulosa nella frutta e nei rifiuti vegetali, i prodotti intermedi, come acidi grassi volatili, si formano più facilmente durante l'acidificazione, che a sua volta inibisce la successiva metanogenesi. Pertanto, il controllo del PH delle materie prime diventa estremamente importante.

1.1.1.8 Digestione anaerobica dei sottoprodotti della lavorazione degli agrumi
I rifiuti dalla lavorazione degli agrumi hanno un alto contenuto organico, costituito da vari carboidrati solubili e insolubili, che rendono tale biomassa suscettibile e interessante per la digestione anaerobica [173]. In particolare il pastazzo rappresenta una biomassa per produrre biogas, con le seguenti caratteristiche:

- resa specifica in metano: 330 Nm³ di CH₄/ t SV;
- elevata acidità (gestione oculata dei carichi, monitoraggio attento per evitare acidosi);
- importanza del monitoraggio del processo biologico per evitare fenomeni di inibizione (acidosi).

Tuttavia, il problema principale di questi rifiuti è la loro disponibilità stagionale. Oltre a questo, una limitazione importante nella digestione anaerobica dei rifiuti di frutta e verdura è la rapida acidificazione di questi rifiuti (diminuzione del PH nel reattore) e la produzione di grandi quantità di VFAS, che inibiscono l'attività dei batteri metanogeni [172]. Inoltre la presenza di D-limonene nella buccia, e le acque reflue ostacolano il processo di digestione anaerobica. Nonostante il noto effetto inibitorio del D-limonene, vari sono i processi sviluppati per utilizzare efficacemente il pastazzo per la produzione di biogas. Questi processi consistono tipicamente nella riduzione delle dimensioni [174] accoppiata con pretrattamento a vapore, distillazione [175] estrazione con solvente [176] e aggiunta di enzimi [177]. Kaparaju et al. [173] hanno recentemente riportato i risultati di esperimenti fatti sui rifiuti dagli agrumi, concludendo che essi anaerobicamente digeriti possono essere utilizzati in modo sicuro. Tutti gli esperimenti di digestione anaerobica sono stati effettuati a temperatura termofila, ed è stato utilizzato un processo per produrre biogas dai rifiuti di agrumi e per valutare il potenziale di biometanazione di queste materie prime. Le bucce di arancia sono state prontamente convertite in biogas: in 25 giorni è stato prodotto un totale di 0,627 m³ di metano. Anche le acque reflue dalla lavorazione degli

agrumi sono un ottimo substrato per la digestione anaerobica. Sulla base del potenziale di biometanazione, è stato stimato che il biogas prodotto mediante digestione anaerobica di scarti di agrumi può essere utilizzato come combustibile per generare elettricità, anche per soddisfare il fabbisogno di calore di processo degli impianti. I valori di rendimento di metano misurati sperimentalmente, sono stati utilizzati per stimare l'energia elettrica e termica prodotta in un piccolo impianto di trattamento di agrumi in Florida. Tale impianto, ad esempio, produce 162.000 t di agrumi ogni anno. L'impianto consuma 324.000 kWh di elettricità all'anno e 50.064 MMBtu / anno (52.817 GJ / anno) di combustibili fossili sotto forma di olio combustibile e gas. Il consumo totale di energia della struttura di trasformazione (combustibili fossili ed energia elettrica) è 55.592 MMBtu/anno (58.650 GJ). La generazione di biogas, forma di energia utilizzabile, dai rifiuti della lavorazione degli agrumi allevia l'uso di combustibili fossili per produrre energia.

3. Materiale oggetto di analisi

3.1 Reperimento dei sottoprodotti

La prima fase di prove del programma di sperimentazione ha riguardato la ricerca e la selezione di materiali provenienti dal riciclo e dallo scarto di altre lavorazioni agricole, per la realizzazione di pannelli termoisolanti da utilizzare in edilizia. Nell'ambito della ricerca in oggetto, in conseguenza dello studio bibliografico, è stata scelta come materia prima seconda lo scarto di lavorazione delle arance. La produzione di agrumi in Sicilia, infatti, consente un alto approvvigionamento di materiale, favorendo un'ottima integrazione con il territorio e semplificando gli interventi di smaltimento. La maggior parte della preparazione dei campioni da destinare alle analisi è stata eseguita in laboratorio, di conseguenza era necessario che la materia prima avesse le seguenti caratteristiche:

- essere ampiamente disponibile;
- essere facilmente reperibile;
- essere facilmente maneggiabile;
- avere basso costo.

I sottoprodotti di trasformazione delle arance sono stati ottenuti da macchine per estrarre il succo d'arancia collocate in caffetterie e supermercati (Fig. 16). In particolare, questi spremitori sono dotati di un sistema automatico che produce in tempo reale un succo di arancia fresco a partire dall'agrume raccolto. L'ampia diffusione di queste attrezzature e la semplice accessibilità nelle aree urbane ha semplificato la raccolta del sottoprodotto, garantendo al contempo una tracciabilità e selezione dei materiali. Molte caffetterie e supermercati sono dotati di questo

apparecchio che ogni giorno produce molti kg di scarti che vengo normalmente gettati nei rifiuti.

Il materiale utilizzato per le prove in laboratorio è stato reperito dalla caffetteria universitaria, che utilizza una tipologia omogenea di agrumi in termini di pezzatura e qualità. Si è utilizzato un sottoprodotto composto da buccia, semi e residui di polpa.



Figura 16 Estrattore di succo commerciale

3.2 Caratterizzazione del materiale

Per l'esecuzione delle prove di laboratorio sono stati utilizzati i sottoprodotti ottenuti dalle attrezzature descritte nel paragrafo precedente. Prima del processo di spremitura l'agrume è composto dal 60/65% di buccia, 30/35% polpa e la restante parte dai semi. Dopo il processo di trasformazione, l'arancia è prevalentemente composta da buccia, semi e parte di polpa non spremuta. Per preparare il materiale

da adottare nelle prove di sperimentazione, sono state eseguite delle attività di triturazione ed essiccazione, ottenendo due prodotti, classificabili in:

- Prodotto umido (PU)
- Prodotto secco (PS)

Il prodotto umido è ottenuto dalla sola triturazione del sottoprodotto mediante mulino manuale (Fig. 17), mentre il prodotto secco ha subito un processo di essiccazione e successiva triturazione con mulino manuale.



Figura 17 Triturazione del sottoprodotto di arance tramite mulino manuale

La densità del sottoprodotto è di 900 kg/m^3 per il PU e di $200\text{-}300 \text{ kg/m}^3$ per il PS. La variazione di densità tra PU e PS è dovuta al rilevante contenuto di acqua degli agrumi. Infatti, il contenuto di acqua varia dal 90% per il materiale umido all'8-10% per il materiale essiccato.

L'essiccazione del materiale è stata effettuata mediante forno ventilato alla temperatura di $50 \text{ }^\circ\text{C}$ per 48h. Il termine del processo è stato definito quando la

variazione di peso per tre misurazioni consecutive è stato minore dell'1%. La pesatura del prodotto ha permesso di determinare il contenuto d'acqua nei campioni freschi, pari al 78%. A seguito dell'essiccazione le bucce sono state nuovamente triturate (con mulino manuale) e setacciate, ottenendo granuli di diversa pezzatura (fig. 18), opportunamente predisposti per la realizzazione dei provini da sottoporre alle prove di caratterizzazione.

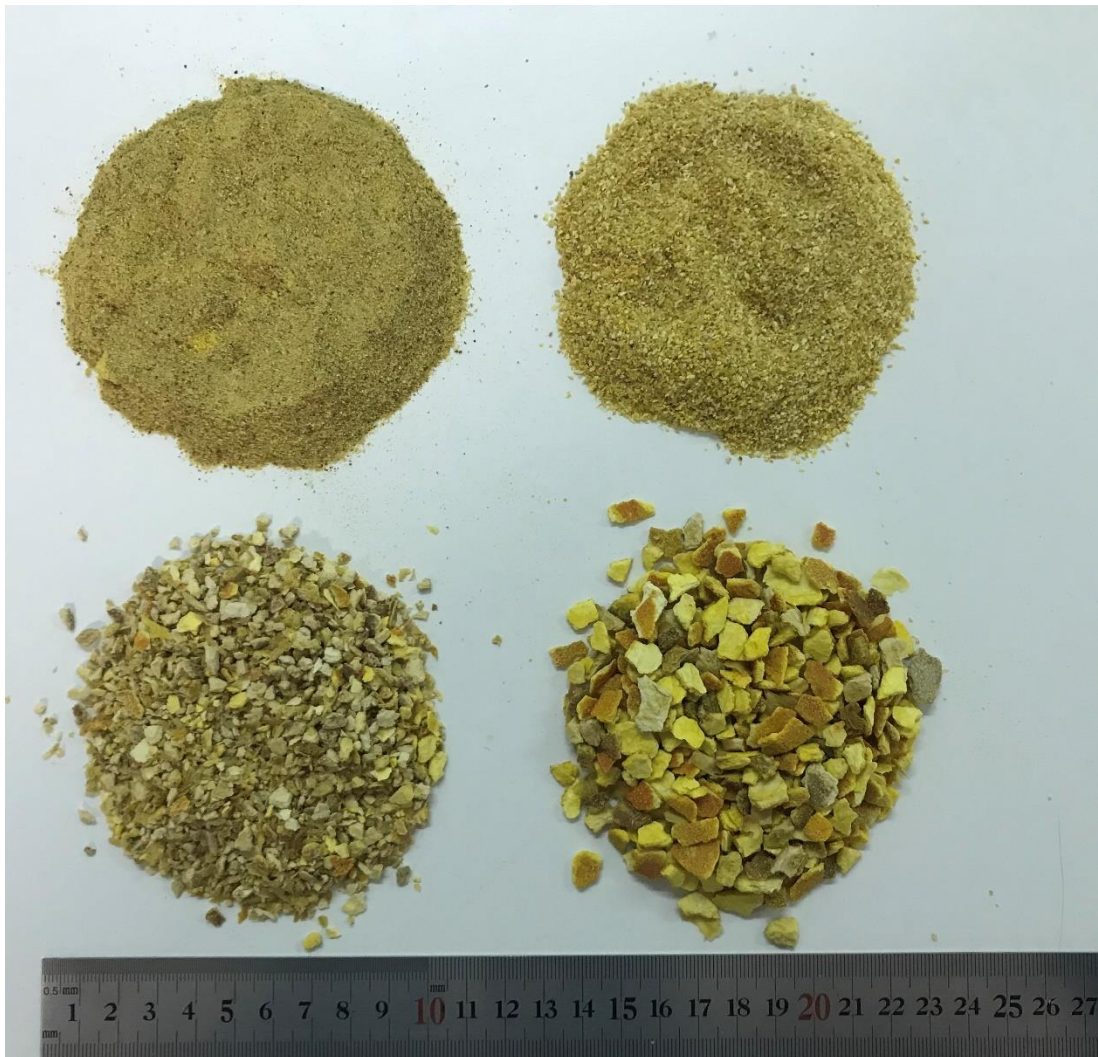


Figura 18 Granuli di buccia di aranci essiccati e triturati

4. Metodologia per la preparazione dei campioni

Dopo aver analizzato le caratteristiche del materiale, in questo capitolo vengono illustrate le metodologie di produzione dei campioni in forma di pannelli per il loro impiego in edilizia.

I provini oggetto di studio sono stati realizzati presso il laboratorio materiali delle seguenti università:

- Università di Catania (UNICT)
- Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
- Vrije Universiteit Brussel (VUB)

I campioni preparati possono essere classificati in quattro tipologie:

- Campioni realizzati mediante l'impiego di materiale granulare sfuso,
- Campioni realizzati mediante l'impiego di pressa a freddo,
- Campioni realizzati mediante pressatura durante l'essiccazione,
- Campioni realizzati mediante pressa a caldo.

Il materiale granulare sfuso è stato realizzato per valutare le proprietà del materiale senza ulteriore trasformazione. Il processo di pressatura a freddo è stato il primo metodo realizzativo dei provini in forma di pannello, caratterizzato da un basso consumo energetico, ma anche da difetti alcuni sui risultati finali. Questo ha condotto ad implementare il processo con un sistema di pressatura contemporanea all'essiccazione. Infine, viene mostrato una ulteriore sperimentazione con pressa a caldo, che ha evidenziato alcune difficoltà legate al processo.

4.1 Preparazione dei campioni in granuli

I primi campioni preparati in laboratorio hanno avuto l'obiettivo di caratterizzare il materiale in forma sfusa. La preparazione dei provini è quindi stata ottenuta dalla sola essiccazione in forno ventilato a 50 °C per 48h del PU (Fig. 19).



Figura 19 Essiccazione scarti di agrumi tritati.

Dopo l'essiccazione, le bucce sono state triturate con un mulino manuale, ottenendo una dimensione massima dei grani di circa 6 mm (Fig. 20). I granuli ottenuti sono stati setacciati e selezionati in base alla granulometria ottenuta. La Figura 21 mostra la curva granulometrica e la selezione dei provini. Di seguito i campioni realizzati:

<i>Campioni</i>	<i>N. Campioni</i>	<i>Granulometria</i>
G1	1	0,65 < d < 1,25 mm
G2	1	con 1,25 < d < 4 mm
G3	1	con 4 mm < d < 6 mm

I diametri minori di 0,65 mm e maggiori di 6 mm sono stati scartati.



Figura 20 Granulometrie di scarti delle arance essiccate e setacciate, dal tipo $d > 6$ mm (a sinistra) al tipo $d < 0,65$ mm (a destra).

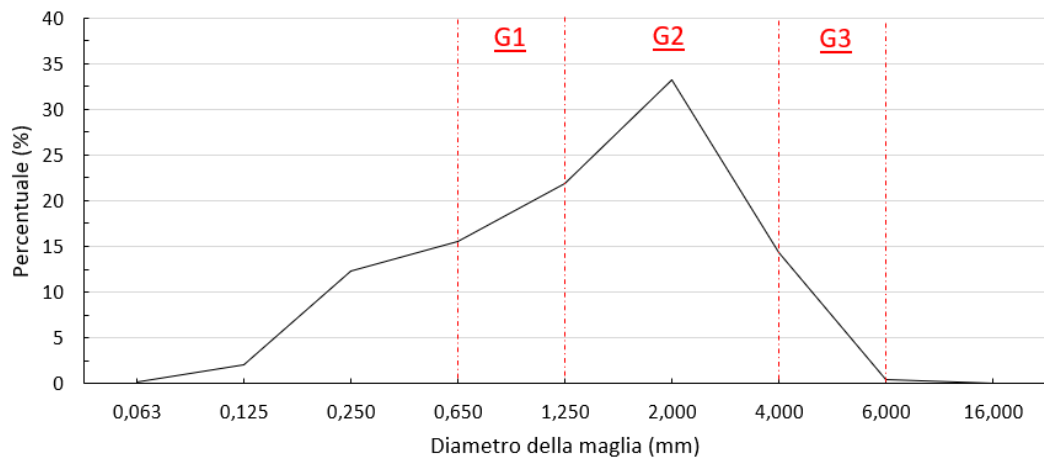


Figura 21 Curva granulometrica e selezione dei campioni analizzati

Le tre granulometrie ottenute sono state suddivise in tre contenitori, uno per ciascun campione, delle dimensioni esterne: 30 cm x 30 cm x 3 cm. I risultati ottenuti sono la media di tre misurazioni successive sui granuli inseriti nel contenitore in modo omogeneo e senza alcun processo di compattazione (Fig. 22).

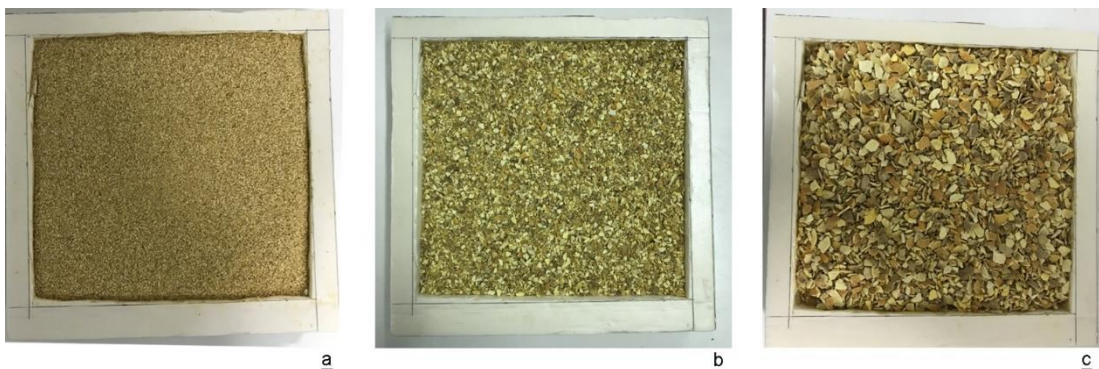


Figura 22 Foto dei campioni per la prova termica: a) $0,65 < d < 1,25$ mm; b) $1,25 < d < 4$ mm; c) 4 mm $< d < 6$ mm

4.2 Campioni pressati a freddo

Il secondo processo di realizzazione dei provini per la concezione di pannelli prevede la pressatura del materiale ed una successiva essiccazione in forno ventilato. Riguardo i campioni predisposti è possibile distinguere diverse tipologie in funzione del materiale di partenza utilizzato:

- Utilizzo di solo parte umida.
- Combinazione di parte umida (500 g) e parte secca (250 g) con spessore grani secchi: $1,25 \text{ mm} > ps > 0,65 \text{ mm}$.
- Combinazione di parte umida (500 g) e parte secca (180 g) con spessore grani secchi: $4 \text{ mm} > ps > 1,25 \text{ mm}$.

I provini sono stati ottenuti da un processo di pressatura a freddo su stampi in legno $250 \times 250 \times 30 \text{ mm}$ come nello schema mostrato in Fig. 23. Su tutti i provini è stata impressa la stessa pressione di $0,02 \text{ MPa}$, equivalente ad un peso di 126 Kg , ottenuto con due lastre in marmo da 9 kg e blocchi cilindrici in cemento di 12 kg ciascuno. Ogni campione è stato mantenuto in pressione per 15 h alla temperatura ambientale di $21 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ e umidità relativa di $50 \pm 10\%$.

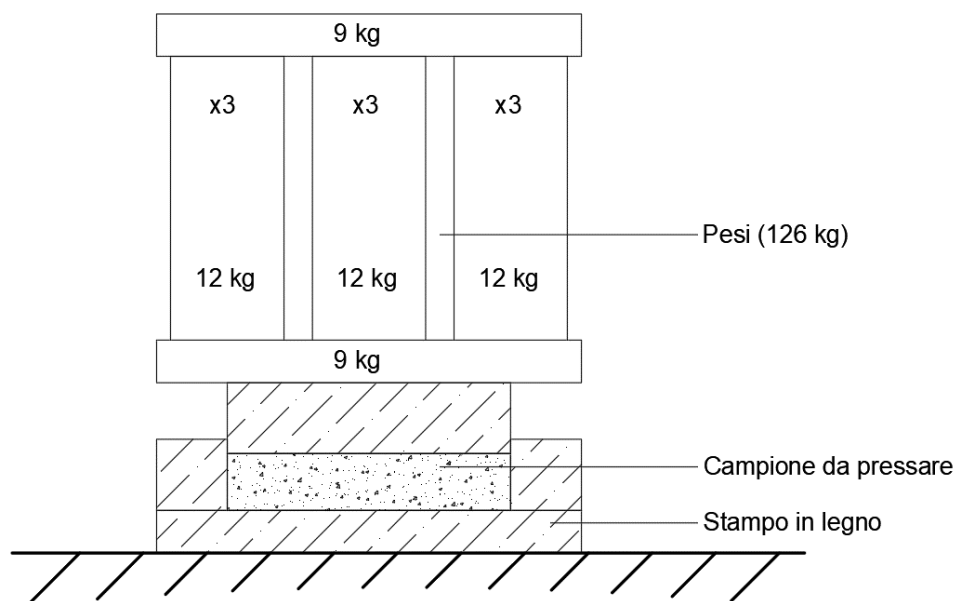


Figura 23 Schema pressa a freddo

Tre provini sono derivati dalla compattazione e pressatura del materiale ottenuto dalla macinazione del prodotto fresco, tre dalla miscelazione di prodotto umido e prodotto essiccato in granuli con diametro 1,25 mm > ps > 0,65 mm ed altri tre dalla miscelazione di prodotto umido e prodotto essiccato in granuli con diametro 4 mm > ps > 1,25 mm (Tab. 6). Terminata la pressatura i provini sono stati essiccati a 50 °C per 48h in essiccatore ventilato (Fig.24).

<i>Campioni</i>				<i>Peso parti per campioni</i>	
Nome	N. Campioni	% umido	% secco	Umido [g]	Secco [g]
CW100	3	100	0	500	0
CW75_G2	3	75	25	500	180
CW70S_G1	3	70	30	500	250

Tabella 6 Campioni realizzati mediante pressatura a freddo e successiva essiccazione



Figura 24 Essiccazione dei campioni pressati a freddo

4.3 Campioni pressati durante l'essiccazione

Un terzo metodo realizzativo dei campioni prevede la fase di pressatura contemporanea al processo di essiccazione. A tal fine è stata progettata e realizzata una pressa (Fig. 25) che consente di eseguire contemporaneamente la pressatura e l'essiccazione del pannello.

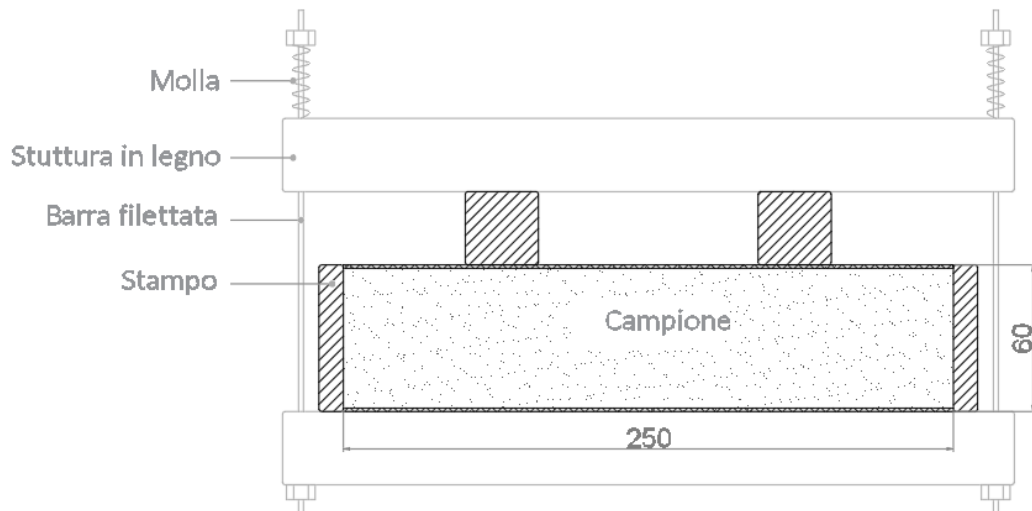


Figura 25 Schema pressa realizzazione campioni

La pressa è realizzata mediante uno stampo in legno con due piastre in acciaio superiormente ed inferiormente. La pressione sul campione è esercitata dalle due piastre mediante 4 molle poste ai lati. L'evaporazione dell'acqua è consentita dalle piastre forate poste sopra e sotto il campione, mentre le molle poste superiormente consentono di mantenere in pressione i campioni anche in seguito alla riduzione di volume. I provini sono stati realizzati utilizzando questa pressa che, oltre a ridurre i tempi di esecuzione, migliora la forma del pannello, che appare più regolare. Per ottimizzare la produzione dei campioni e per consentire una corretta misurazione dei valori in laboratorio, sono state eseguite 3 presse in legno con una dimensione interna dello stampo 250x250x60 mm (Fig. 26). Per ciascuna tipologia di campione sono stati realizzati tre provini identici, pressati ed essiccati a 50 °C per 48h. Al termine del processo di essiccazione tutta l'acqua presente nel provino risulta evaporata.

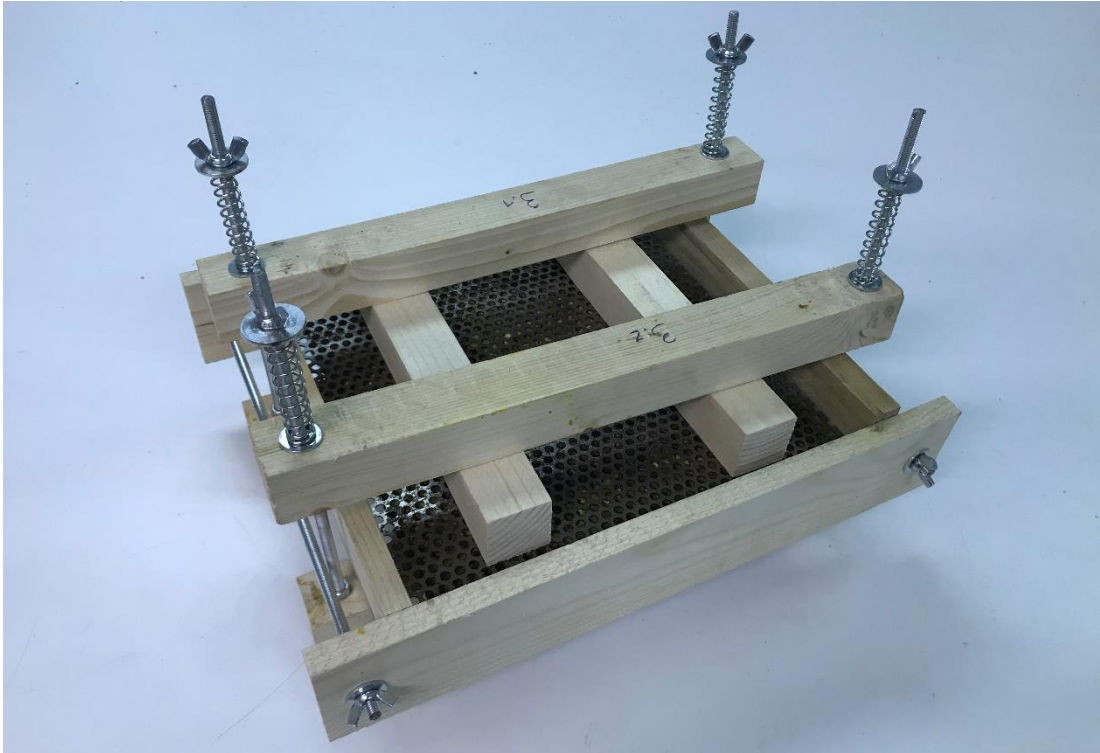


Figura 26 Immagine della pressa in legno utilizzata per pressare i campioni durante il processo di essiccazione

Al fine di identificare la migliore composizione, con questi stampi sono stati realizzati dei campioni mescolando il prodotto umido (PU) e il prodotto secco (PS). Come mostrato in Tabella 7, si distinguono 5 tipi di provini in cui il W100 è costituito solo da parte umida, il W90 dal 90% di parte umida e dal 10% in peso di parte secca, il W85 dall'85% di parte umida e dal 15% di parte secca, e così fino al W75 (Fig. 27). I provini si differenziano solo per la diversa combinazione di parte umida e parte secca. La granulometria utilizzata per la parte secca è la G2, con $1,25 < d < 4$ mm.

<i>Campioni</i>				<i>Peso parti per campioni</i>	
Nome	N. Campioni	PU [%]	PS [%]	PU [g]	PS [g]
W100	3	100	0	2000	0
W90	3	90	10	1800	200
W85	3	85	15	1700	300
W80	3	80	20	1600	400
W75	3	75	25	1500	500

Tabella 7 Campioni realizzati dalla miscelazione di scarti umidi e pre-essiccati



Figura 27 Campioni realizzati tramite essiccazione e pressatura contemporanea.

Di seguito (Fig. 28) viene illustrato il progetto della pressa manuale in acciaio.

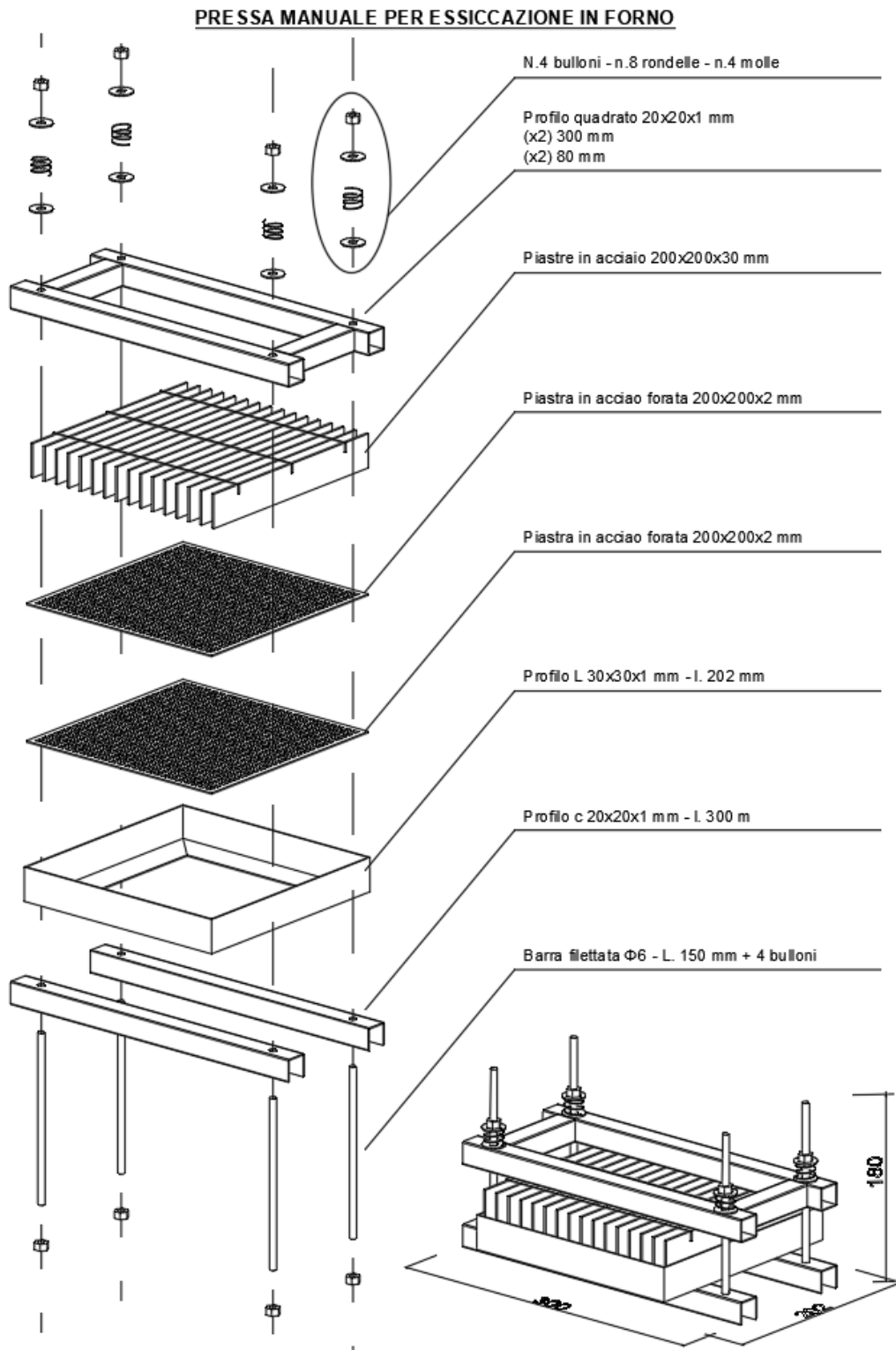


Figura 28 Progetto pressa manuale in acciaio

4.4 Campioni pressati a caldo

Un ulteriore metodo realizzativo ipotizzato per la creazione dei campioni si basa su un sistema di pressatura con piastre calde.

La strumentazione in oggetto consente di regolare le temperature della piastra inferiore e superiore, oltre che la pressione di stampa (Fig. 29). Per la determinazione della temperatura è stato impostato un valore di 180 °C per entrambe le piastre ed il campione è stato pressato per 10 s ad una pressione di 0,3 Mpa.



Figura 29 Pressa a caldo per esecuzione campioni

Per la realizzazione del provino è stato utilizzato il prodotto umido, pre-essiccato per 8h a 50°C. Il campione è stato posto all'interno di uno stampo in sughero delle dimensioni interne di 150x150x10 mm; durante la pressatura lo stampo ha ridotto lo spessore fino a arrivare a 5 mm. Tale metodo realizzativo possiede dei vantaggi per i tempi brevi di esecuzione, ma anche delle problematiche relative al grosso quantitativo d'acqua che viene liberato durante la pressatura a caldo. La generazione di un grosso quantitativo di vapore, infatti, fa aumentare la pressione all'interno dello stampo, che viene liberata non appena la pressa termina il processo, con una conseguente rottura dello stesso. L'inserimento di una valvola di sfiato migliorerebbe questo processo, ma ne renderebbe al contempo impossibile l'esecuzione perché si perderebbe l'elasticità dello stampo, necessaria per eseguire la pressatura. La Figura 30 mostra un pannello ottenuto da questo processo, caratterizzato da un basso spessore e dalla formazione di piccole bolle d'aria. In conclusione, è possibile affermare che il metodo descritto non risulta adeguato poiché non consente di avere un campione con morfologia e consistenza adeguate.



Figura 30 Campione ottenuto da pressatura con piastre calde

4.5 Metodo di essiccazione

Come illustrato nei paragrafi precedenti, il processo di essiccazione per ottenere il prodotto secco è avvenuto in forno ventilato per 48h. La scelta di questo metodo di essiccazione è chiaramente derivata dalla possibilità di settare una determinata temperatura e mantenerla costante durante tutto il processo. L'essiccazione è una attività importante e rappresenta un costo economico ed ambientale per il processo. Una corretta essiccazione è fondamentale per il ciclo produttivo e per il bilancio energetico complessivo. Dabaied et al. hanno dimostrato come il processo di essiccazione al sole riduce notevolmente l'energia consumata e le emissioni di CO₂ [178]. In particolare, gli autori dimostrano che per ogni 1000 mattoni prodotti, utilizzando mattoni essiccati al sole al posto dei mattoni cotti in forno, si ha una riduzione fino a 5907 kg di CO₂ e fino a 5305 MJ di energia. Per valutare l'efficacia di altri metodi di essiccazione, è stato condotto uno studio comparativo per determinare il miglior metodo di essiccazione tra quello in forno e quello al sole. Tradizionalmente, infatti, questa fase avviene in due possibili modi: esponendo il materiale, preventivamente lavato, al sole, all'aria aperta, o collocando il materiale in forni a gas naturale, a temperature attorno ai 50°C e con una forte corrente d'aria che asporta il vapore d'acqua. Due campioni sono stati posti rispettivamente in un forno essiccatore a 50°C e in essiccazione al sole nella terrazza in copertura del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura di Catania (Fig. 31). Trascorse 24h il campione posto al sole è stato essiccato completamente, mentre quello posto nel forno essiccatore si presentava al 50% di essiccazione. Questo risultato, derivato dalle alte temperature raggiunte esternamente nel periodo in cui è stata svolta la prova (mese di Luglio), evidenzia un risultato significativo. Il periodo di raccolta e trasformazione degli agrumi, tra Gennaio e Aprile, consentirebbe di sfruttare le alte temperature estive per eseguire i processi di essiccazione necessari. Il clima delle aree Mediterranee favorisce molto il processo di asciugatura naturale al sole e, se venissero strutturate delle serre

idonee per svolgere tale attività, garantirebbe un forte risparmio energetico durante la fase produttiva. A tal fine, l'impatto energetico dei materiali naturali, nella fase produttiva, dovrebbe essere minore rispetto i materiali tradizionali. Le dichiarazioni sui prodotti e l'etichettatura sono uno strumento utile per dimostrare la rispondenza ai requisiti di salute e sicurezza per quanto riguarda l'assenza di sostanze tossiche e nocive, ma anche la conoscenza dei valori energetici necessari alla realizzazione del prodotto.



Figura 31 Prova di essiccazione al sole di campioni di pale di Ficus indica

5. Analisi condotte

5.1 Analisi microstruttura

Le tecniche di microscopia a scansione sono emerse come utili strumenti scientifici per l'analisi di materiali di interesse architettonico o archeologico, sin dalla commercializzazione della prima strumentazione di nei primi anni '60. [179]

La tecnica si basa su un fascio di elettroni che scansiona il campione in linee parallele per ottenere un'immagine al livello di zoom richiesto. Il fascio di elettroni viene prodotto in una colonna ad alto vuoto, dove il riscaldamento di un filamento (tungsteno, lantanio esafluoro, ecc.) genera gli elettroni. Quest'ultimi vengono poi accelerati da una differenza di potenziale controllata dall'operatore, che può variare tra 200 V e 500 kV, a seconda del campione.



Figura 32 Strumentazione per analisi SEM - Scanning Electron Microscopy

Al fine di aumentarne la conduttività, il campione in esame viene rivestito superficialmente da un film in oro o carbonio. Una analisi della microstruttura dei campioni è stata ottenuta mediante un microscopio elettronico a scansione (SEM) modello JEOL JSM 6400, con una tensione di accelerazione di 20kV (Fig. 32). In questo caso, i provini sono stati preventivamente rivestiti con un sottile film d'oro.

Questo test è stato eseguito sul prodotto secco in granuli e sui campioni W75 e W100 al fine di indagare sulle modifiche di microstruttura sulle diverse composizioni e motivare i risultati delle prove termiche e meccaniche.

5.2 Proprietà chimiche

Le proprietà chimiche degli agrumi sono influenzate dalle condizioni climatiche esterne, dal metodo di coltivazione e dal tipo e maturazione del frutto. Tuttavia, seguendo la letteratura (Tab. 8), il sottoprodotto dell'arancia è chimicamente composto principalmente da cellulosa, pectina, zucchero, acidi, lipidi, elementi minerali, olio essenziale e vitamine [161][157][142][159][160] con un pH compreso tra 3,5 e 5,8.

<i>Parametri</i>	<i>Sottoprodotti di arance umidi [% parte secca]</i>
Contenuto d'acqua	72.5 – 87.0
Particelle volatili	93.8 – 96.7
Proteine	5.3 – 8.3
Grassi	0.9 – 3.7
Fibre	10.6 – 42.1
Amido	1.0 – 2.9
Zuccheri	15.0 – 46.6
Calcio	0.7 – 0.8
Pectine	15.3 – 25.0

Tabella 8 Composizione chimica dei sottoprodotti di trasformazione delle arance

5.3 Ritiro

Durante la termocompressione il pannello perde una grande quantità di acqua, con conseguente riduzione di volume. Il ritiro è stato misurato per valutare la quantità di riduzione del volume nei campioni dopo il processo di pressatura ed essiccazione. La formula utilizzata per calcolare il restringimento è la seguente:

$$\Delta V [\%] = \frac{(V_w - V_d) \times 100}{V_w}$$

dove V_w è il volume del pannello prima del processo di pressatura ed essiccazione e V_d è il volume dopo il processo di pressatura ed essiccazione.

Il test è stato eseguito su campioni pressati a freddo e pressati durante il processo di essiccazione, dopo essere stati posti per 48h in condizioni di laboratorio (21 ± 1 °C e $50 \pm 10\%$ di umidità relativa). La misurazione sul pannello è stata ottenuta come media di tre misurazioni ai lati e al centro del campione. È stato utilizzato un calibro digitale VOGEL modello 202112 con una risoluzione di 0,01 mm.

5.4 Densità apparente

La densità apparente è stata determinata come rapporto tra la massa e il volume dei campioni in forma di pannelli, mediante misurazione diretta secondo la norma europea 1602 [39]. Sono stati utilizzati una bilancia elettronica con una precisione di 0,01 g e un calibro digitale VOGEL modello 202112 con una risoluzione di 0,01 mm.

Tutti i provni prodotti, ad eccezione di quello pressato a caldo, sono stati prima normalizzati alle condizioni di laboratorio (21 ± 1 °C e $50 \pm 10\%$ di umidità relativa) poi pesati e misurati, calcolando la media di tre risultati per ciascun campione.

5.5 Proprietà termiche

Per la determinazione della trasmittanza termica si è fatto riferimento alla norma UNI EN ISO 8990 [3]. La norma specifica i principi per la progettazione dell'apparecchiatura di prova e stabilisce i requisiti minimi che devono essere soddisfatti per la determinazione in laboratorio della proprietà di trasmissione termica in regime stazionario di componenti per edilizia e di componenti simili per uso industriale. Essa descrive inoltre le apparecchiature, le tecniche di misura ed i dati da indicare nel resoconto di prova. Molti materiali isolanti termici e sistemi sono tali che il calore trasferito attraverso di essi è una complessa combinazione di conduzione, convezione e radiazione; i metodi descritti da questa norma internazionale misurano la quantità totale di calore trasferito da un lato all'altro del provino, per una data differenza di temperatura, indipendentemente dai modi di trasmissione del calore individuali.

Per la determinazione delle proprietà termiche del materiale sono state confrontate due metodologie di calcolo: la prima metodologia prevede l'utilizzo di un apparecchio a piastra riscaldante, il secondo metodo un apparato con doppia camera calibrata. Entrambi i tipi di apparecchiatura riproducono le condizioni al contorno convenzionali di un campione posto tra due fluidi, di solito aria a pressione atmosferica, entrambi a temperatura uniforme.

Il primo test è stato condotto secondo la norma europea EN ISO 13787 [180] con lo strumento modello HFM 436 Lambda della società Netzsch (Fig. 34). I campioni sono stati posti tra due piastre riscaldate a temperature diverse. La temperatura delle piastre e la temperatura media del campione sono state definite dall'utente. Il flusso di calore q attraverso il campione viene misurato da un trasduttore di flusso di calore calibrato una volta raggiunto l'equilibrio termico. Le temperature delle piastre sono

state controllate da sistemi di riscaldamento/raffreddamento Peltier a due vie, integrati con uno scambiatore di calore ad aria forzata che genera un flusso a circuito chiuso.

Secondo la tecnica di prova standardizzata, sono stati utilizzati campioni di misure pari a 250x250 mm con uno spessore medio di 20 mm. [181] i provini sono stati misurati a 10 °C e 23 °C e un gradiente di temperatura di 20 °C per valutare l'influenza della temperatura sulla conduttività termica.

Le misurazioni sono state effettuate sui campioni secchi ($\mu = 0$) e dopo sette giorni di stazionamento in condizioni di laboratorio (21 ± 1 °C e $50 \pm 10\%$ di umidità relativa).

I campioni soggetti a questi test sono tutti quelli realizzati, quindi ottenuti da:

- Triturazione del prodotto essiccato (G1 – G2 – G3);
- Pressatura a freddo (CW100 - CW75_G2 - CW70S_G1);
- Pressatura contemporanea all'essiccazione (W75–W80–W85–W90–W100).

Per i campioni in granuli è stato utilizzato uno stampo, come mostrato in figura 33.

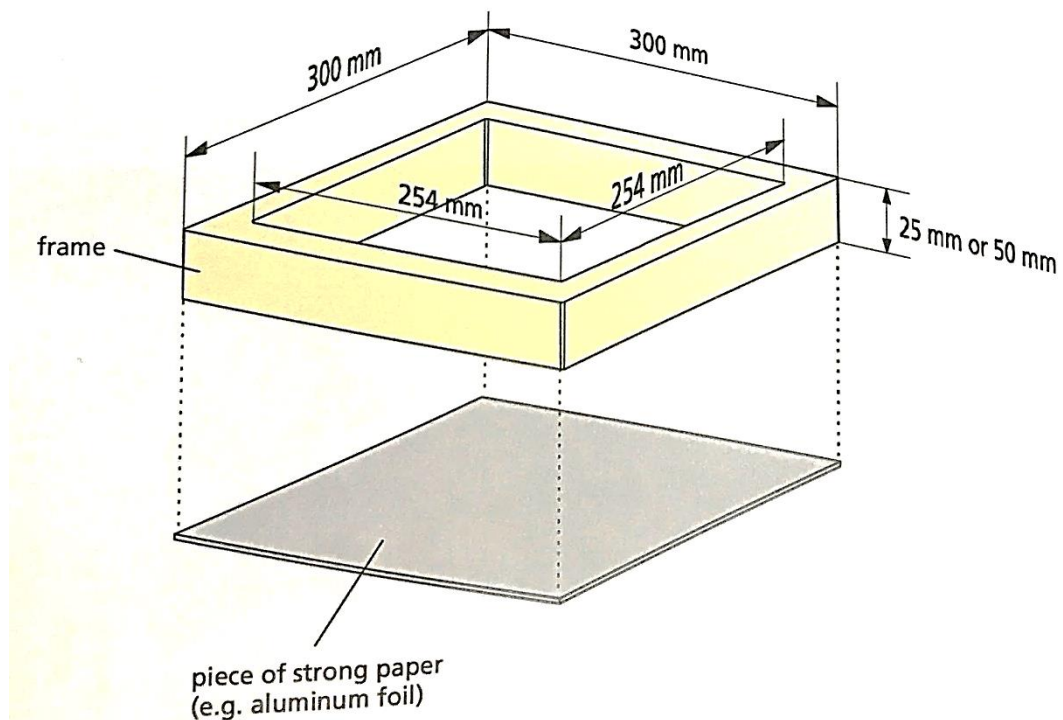


Figura 33 Stampo per campioni in granuli sfusi



Figura 34 Apparecchio per il calcolo della conducibilità termica con il metodo delle piastre riscaldate, modello Netzsch HFM 436 Lambda,

Per la seconda metodologia di prova il provino viene posto tra una camera calda e una fredda, le cui temperature interne sono note; quindi, dalle misure effettuate in regime stazionario dell'aria sono calcolate le proprietà di trasmissione termica del campione. La componente convettiva dipende dalla temperatura e dalla velocità dell'aria, mentre la componente radiativa dipende dalla temperatura e dall'emissione totale emisferica delle superfici del provino; gli effetti di tali componenti sono conglobati nel concetto di "temperatura ambiente" e di un "coefficiente di scambio termico superficiale".

L'apparato strumentale impiegato, costruito presso i laboratori dell'Escuela di Edification de Madrid (Fig. 35) è composto da una struttura di sostegno, dove viene alloggiato il campione di prova, costruita in legno. La struttura è munita di organi di spinta che agiscono orizzontalmente sul perimetro del campione, serrandolo alla struttura ed evitando il passaggio di aria dai bordi perimetrali. Le due camere

climatizzate (calda e fredda), si trovano ai due lati del campione. Quest'ultimo deve quindi essere selezionato o costruito in modo da essere rappresentativo e deve essere montato o sigillato in modo che né l'aria né l'umidità possano entrarvi dai bordi o passare dal lato caldo a quello freddo e viceversa.

Il periodo di misura deve essere tale da garantire il raggiungimento della stabilità per le prove in regime stazionario ed esso dipende da molti fattori come la resistenza termica e la capacità termica del provino, i coefficienti di temperatura superficiale, la presenza di trasporto di massa o di redistribuzione dell'umidità all'interno del provino.

La camera calda è dotata di un sistema scaldante costituito da un filo resistivo controllato da un regolatore PID.



Figura 35 Strumentazione impiegata per la misura della trasmittanza dei campioni

Inoltre, per evitare la stratificazione dell'aria ed assicurare un corretto scambio convettivo, la camera è dotata di una ventola. Il sistema è munito di 4 termocoppie interne per il monitoraggio delle temperature dell'aria e delle superfici interessate dallo scambio termico. Le misure sono eseguite in condizioni di regime stazionario dell'aria, delle temperature delle superfici e dell'energia immessa nella camera calda. Da questi dati sono calcolate le proprietà di trasmissione termica del provino. Infatti, conoscendo le temperature superficiali in corrispondenza di una zona di misura centrale e noto il flusso termico attraverso il campione è stata determinata la conducibilità termica. Le prove sono state effettuate mantenendo una differenza di temperatura di almeno 20°C tra le due camere.

Questi test sono stati eseguiti sui provini pressati a freddo e pressati durante il processo di essiccazione. Ogni misurazione è stata eseguita su due provini dello stesso tipo ed i risultati sono stati ottenuti come media dei valori ricavati dalle due metodologie di calcolo. I campioni in granuli sono stati esclusi da quest'ultima prova per l'impossibilità di collocare il materiale nella strumentazione in posizione verticale.

5.6 Proprietà meccaniche

La caratterizzazione meccanica del materiale è stata eseguita utilizzando un test di resistenza a flessione con prova a tre punti. Per ottenere la curva forza-spostamento è stata utilizzata una macchina di prova universale, mostrata in Figura 36. È stata utilizzata una cella di carico di 5 kN, con una velocità di spostamento di 10 mm/min e una distanza tra gli appoggi di 100 mm. Il valore massimo di abbassamento registrabile era limitato a 14,6 mm.

Secondo la norma europea EN [182], i valori del Modulo di Rottura (MOR) per sollecitazione flessionale sono stati determinati utilizzando la seguente equazione:

$$\sigma [N \text{ mm}^{-2}] = \frac{3 F_m L}{2 b d^2}$$

dove:

F_m è la forza applicata (N),

L è la distanza tra i supporti (mm),

b è la larghezza del campione (mm)

d è lo spessore del campione (mm).

A causa della capacità di deformazione dei campioni, è stato utilizzato il metodo descritto dalle norme RILEM TFR1 [183] come riferimento per l'acquisizione del carico. In base a ciò, il carico massimo è stato considerato quando l'abbassamento ha raggiunto un valore pari al 10% della campata. I risultati sono la media di tre misurazioni su campioni ottenuti dalla pressatura contemporanea all'essiccazione di dimensioni di 250 x 250 mm e spessore medio di 2 cm. Per ciascun campione è stato misurato lo spessore, la larghezza ed il test è stato effettuato rompendo il campione quadrato in due parti e successivamente rompendo le due parti rimanenti aventi una larghezza dimezzata.



Figura 36 Test rottura dei campioni a tre punti per la determinazione della resistenza a flessione

Inoltre, è stato calcolato anche il modulo di elasticità (MOE) alla resistenza alla flessione con la seguente equazione:

$$MOE [N mm^{-2}] = \frac{F L^3}{y 48 I}$$

dove:

F è la forza applicata (N),

L è la distanza tra i supporti (mm),

y è la deformazione del campione (mm)

I è il momento d'inerzia (mm⁴).

5.7 Proprietà acustiche

Per caratterizzare il comportamento acustico dei campioni realizzati, è stato misurato il parametro che ne quantifica le capacità fonoassorbenti, ovvero, il coefficiente di assorbimento α , definito come la frazione di energia sonora assorbita rispetto a quella incidente. Per eseguire le misurazioni è stato utilizzato un emettitore della Microflown Technologies, impiegato per la determinazione in situ dell'assorbimento acustico. Questo strumento è costituito da un piccolo altoparlante sferico e da una sonda di pressione e velocità (PU Probe). Da una sorgente sonora, posizionata a 23 cm di distanza dalla sonda PU, viene generato rumore bianco verso il campione misurato. L'altoparlante emette un rumore a banda larga e la sonda PU registra sia i segnali di pressione che quelli di velocità. La pressione sonora e la velocità delle particelle acustiche vengono misurate direttamente sulla superficie del materiale. La gamma di frequenza di misurazione è stata impostata tra i 200 Hz e i 10 kHz. Il limite inferiore è definito dall'altoparlante, le cui ridotte dimensioni non consentono di estendere la gamma alle frequenze più basse. Il limite superiore è invece stabilito dalla difficoltà di calcolare la fase dell'impedenza al di sopra di tale frequenza, poiché si riduce l'attendibilità dei risultati. Il coefficiente di assorbimento e riflessione può essere ottenuto direttamente dall'impedenza misurata, che è il rapporto complesso tra pressione sonora e velocità delle particelle.

Questo esperimento è stato condotto utilizzando un modello Plane-wave poiché è stato dimostrato che fornisce risultati equivalenti a quelli ottenuti in un tubo ad impedenza [184]. I risultati delle misurazioni sono stati elaborati tramite un software dedicato, che fornisce un'interfaccia per gestire le misurazioni indipendentemente dal fatto che siano correlate a campioni di materiale diversi o a punti diversi di un solo campione. La Figura 37 mostra la configurazione per le misurazioni di assorbimento acustico con la pistola ad impedenza Microflown Technologies. L'attrezzatura è stata avvitata ad un treppiede e posta perpendicolarmente al piano di riferimento al centro

del campione e ad 1 cm di distanza dal campione. La strumentazione è inoltre dotata di un sistema per non trasmettere le vibrazioni generate dall'altoparlante sferico ai sensori. La norma ISO 11654 stabilisce una procedura per ottenere un unico parametro, il coefficiente di assorbimento acustico ponderato, α_w , per valutare il grado di assorbimento acustico fornito dal materiale. Questo valore ponderato è ottenuto dai valori del coefficiente di assorbimento acustico in banda 1/3 d'ottava misurati dalla strumentazione [185]. Le misurazioni sono state eseguite tre volte consecutive su campioni realizzati con i granuli sfusi (G1 – G2 e G3) e sui pannelli ottenuti dal processo di essiccazione contemporaneo alla pressatura (W75 – W80 – W85 – W90 – W100).



Figura 37 Misurazione del coefficiente di assorbimento acustico su campione in granuli.

5.8 Test assorbimento acqua

Per valutare il comportamento del materiale in presenza d'acqua sono state eseguite delle prove di immersione e saturazione, secondo la norma europea EN ISO 29767:2020 [186][187] e la normativa EN 1609 [186]. Il test di immersione, in accordo con i test di assorbimento per i materiali isolanti prevede l'immersione dei campioni in 5 mm d'acqua e ne valuta nel tempo l'assorbimento (Fig. 38). I provini, di misura 100x100 mm e spessore medio di 20 mm, sono stati posti a contatto con l'acqua su un lato ed è stato valutato:

- Assorbimento
- Rigonfiamento
- Altezza di assorbimento

I provini, ricavati dalle prove meccaniche a rottura, sono stati essiccati e mantenuti in ambiente a condizioni climatiche standard di a 23°C e 50% u.r.



Figura 38 Immagine del test assorbimento d'acqua su un lato dei campioni

Durante la prova i campioni sono stati posti a contatto con acqua distillata su un solo lato (100 x 20 mm) ed è stata misurata la variazione di peso a diversi intervalli: 5, 10, 20, 30, 90 e 360 min fino a 24 h.

È inoltre stato misurato il rigonfiamento del lato esposto all'acqua. Per le misure è stato utilizzato un calibro digitale VOGEL modello 202112 con una risoluzione di 0,01 mm.

Il coefficiente di assorbimento è calcolato come segue:

$$Wp [g/mm^2] = \frac{m_i - m_0}{A}$$

dove:

m_i , in g, è il peso in tempi diversi,

m_0 , in g, è il peso originario del campione essiccato,

A , in mm^2 , è l'area del campione a contatto con l'acqua.

I campioni testati sono quelli ottenuti dalla pressatura contemporanea all'essiccazione (W75 – W80 – W85 – W90 – W100) ed i risultati ottenuti sono stati calcolati come la media di due campioni per ciascuna tipologia.

6. Risultati delle analisi

6.1 Analisi microstruttura

L'analisi microscopica è stata eseguita sui granuli di buccia essiccata (G2) e sui pannelli ottenuti dalla pressatura contemporanea all'essiccazione (W75 e W100).

A livello strutturale le bucce delle arance sono composte da due strati (Fig. 39c e 39d) uno strato esterno compatto e uno interno poroso. Il primo è comunemente chiamato "flavedo" e rappresenta circa il 10% del peso dell'arancia (Fig. 39a); mentre la parte porosa interna detta "albedo" rappresenta il 17% del peso dell'agrume [36] (Fig. 39b).

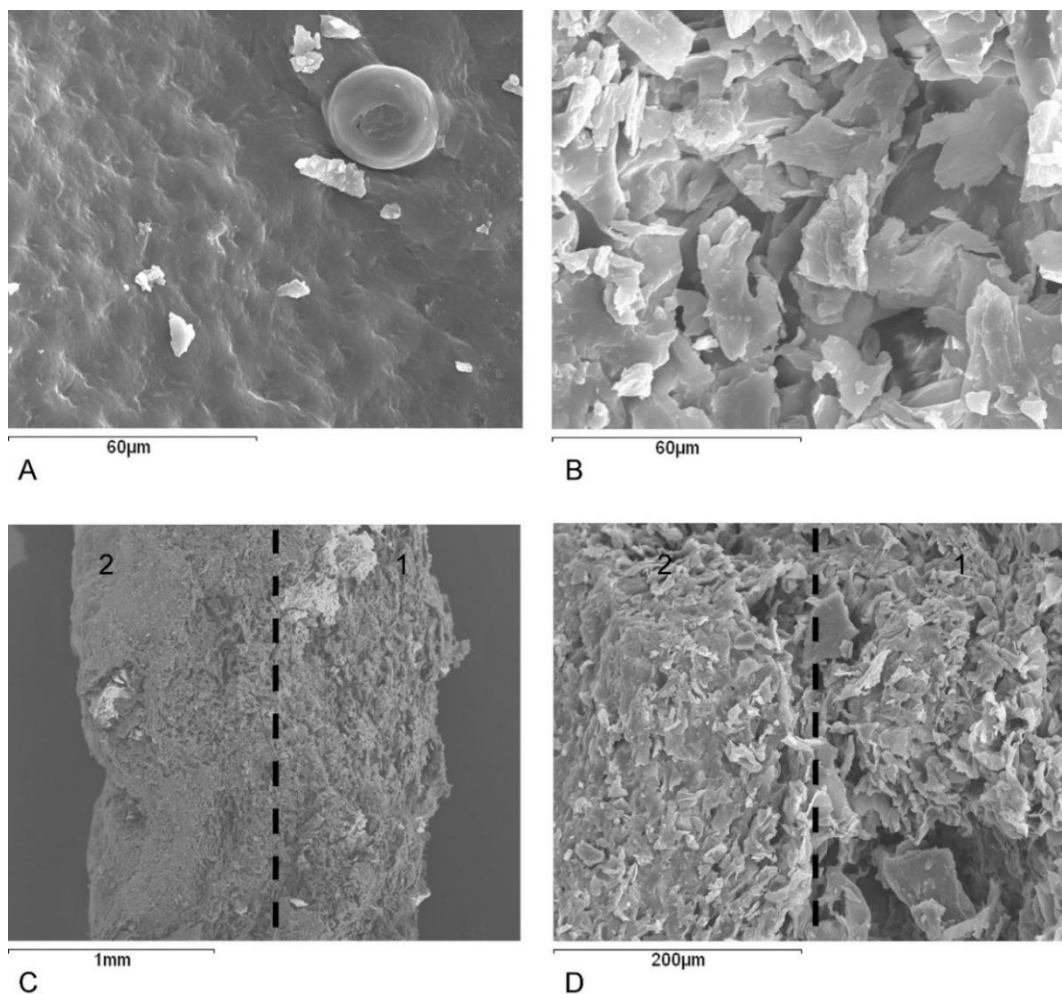


Figura 39 Immagine da scansione al microscopio elettronico (SEM) della buccia di arancia essiccata. A: parte esterna, B: parte esterna, C e D mostra la sezione trasversale della buccia

Le figura 40 mostra al microscopio elettronico il granulo di buccia di arancia essiccato nelle sue due parti. La parte esterna chiamata flavedo (Fig. 40a), costituisce il 40% della buccia ed è prevalentemente liscia, con alcuni infossamenti del diametro compreso tra 0,5 e 0,8 mm. Nel campione di tipo G1 questi affossamenti vengono interrotti poiché le dimensioni dei grani sono inferiori, mentre i campioni G2 e G3 continuano a mantenere la struttura. Questa parte esterna più compatta costituisce la parte rigida, che evita lo sgretolamento del materiale e ne conferisce una struttura resistente. La rimanente parte interna della buccia (Fig. 40b) è costituita dall'albedo, struttura spugnosa ricca d'acqua, che durante l'evaporazione lascia spazio a tante sacche d'aria dal diametro di circa 40 μm . Questa struttura, leggera e spugnosa, si mantiene in tutti e tre i campioni e fornisce il maggior contributo alle prestazioni termiche del materiale. La microstruttura della buccia, seppur eterogena, può essere quindi suddivisa in due parti principali, una esterna rigida che assolve alla funzione "strutturale" ed una interna spugnosa che svolge la funzione di isolamento termico.

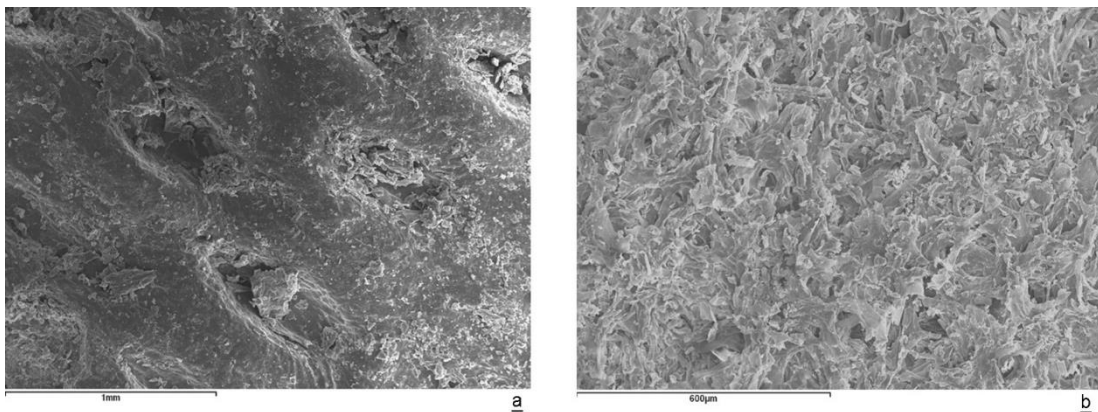


Figura 40 Immagini da SEM: a) parte esterna della buccia di arancia; b) parte interna della buccia di arancia

La struttura interna (Fig. 41a) può essere paragonata a prodotti commerciali come il polistirene estruso (XPS) (Fig. 41b) o la perlite espansa (Fig. 41c). Confrontando i tre materiali, in termini di microstruttura è possibile trovare somiglianze in quanto tutti hanno una struttura cellulare di tipo chiuso. Come previsto, l'XPS ha una forma molto

più regolare e uniforme rispetto struttura cellulare della buccia di arancia. Il polistirene è caratterizzato da sacche di diametro circa 200 μm , la perlite di circa 40 μm . In termini di microstruttura, la perlite espansa risulta essere simile ai granuli di arance essiccati. Questa differenza si riscontra anche nella densità e nella conducibilità termica. L'XPS ha una densità di 35 Kg/m^3 ed una conducibilità di 0,035 W/mK , valori nettamente inferiori rispetto i granuli di agrumi. La perlite espansa, invece, con una densità di 100 Kg/m^3 ed una conducibilità 0,045 W/mK , si avvicina ai granuli di arancia nelle prestazioni, ma si differenzia per l'omogeneità e la continuità del materiale.

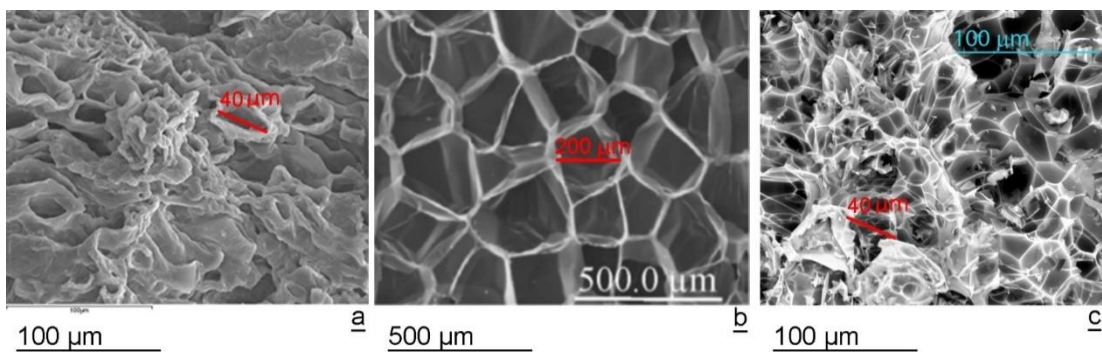


Figura 41 Immagini da SEM: a) microstruttura buccia di arancia; b) microstruttura XPS c) microstruttura perlite espansa

Il confronto delle microstrutture è stato effettuato utilizzando come riferimento solo la parte interna dei granuli. Questa parte, come già detto, è quella che conferisce la proprietà di isolamento al materiale e costituisce circa il 60% della buccia. La restante parte, costituita dalla parte esterna della buccia più i residui di semi, contribuiscono a migliorare le prestazioni meccaniche dei granuli, ma ne peggiorano le proprietà termiche. Questo fornisce un'importante informazione sul potenziale utilizzo del materiale oggetto di studio come prodotto di isolamento termico. Inoltre, il sottoprodotto di trasformazione degli agrumi è un materiale naturale e biologico, in contrasto con l'XPS e la perlite espansa, prodotti lavorati industrialmente, con conseguenti dispendi energetici.

Per quanto riguarda i campioni dei pannelli, è stato effettuato un confronto tra il pannello W100, costituito da sola parte umida, ed il pannello W75, costituito dal 75%

di parte umida e 25% di parte secca. Le differenze nella struttura microporosa tra W100 e W75 sono mostrate nella figura 42. Nel campione W75, la maggiore quantità di parte secca ha provocato una struttura porosa meno compatta, mentre nel W100 è stata osservata una struttura porosa coesa. Questa differenza può essere spiegata dal miglior attaccamento tra le particelle di arancia dovuto alle sostanze umide come la pectina, lo zucchero e all'omogeneità nella struttura, rispetto all'aggiunta di altre particelle.

Inoltre, i campioni hanno mostrato delle variazioni cromatiche che vanno dall'arancione (W75 - W80 - W85 - W90) al marrone (W100). L'imbrunimento del materiale è molto probabilmente causato dalla reazione di Maillard che coinvolge zuccheri e proteine presenti nelle bucce d'arancia [188]. In alternativa, può essere causato dalla caramellizzazione degli zuccheri vegetali o dalla pirolisi del materiale organico [189]. Questi fenomeni hanno provocato un indurimento della superficie esterna del pannello che, oltre a conferire una maggiore resistenza meccanica, ne migliora l'assorbimento d'acqua e l'attacco biologico.

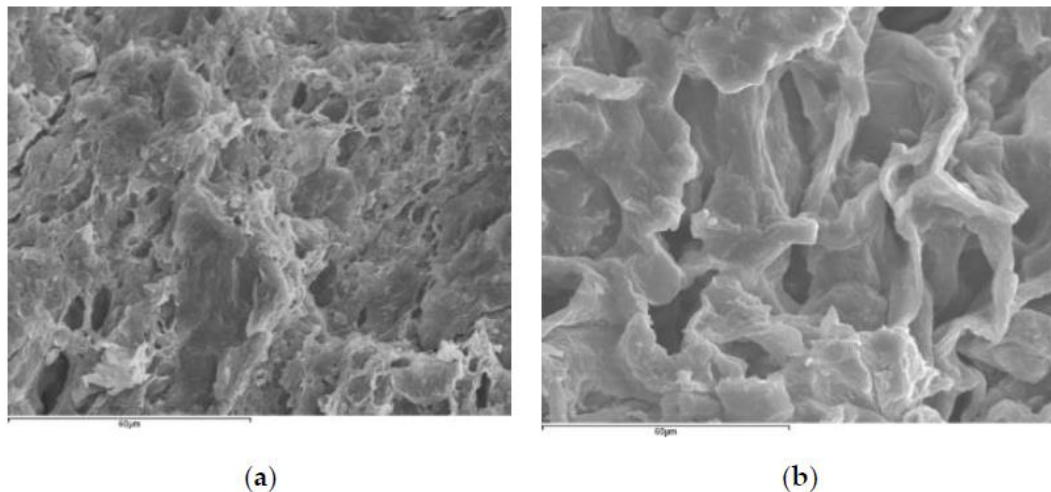


Figura 42 Immagine al microscopio elettronico del pannello W100 con trama compatta e pori più piccoli (a) e pannello W75 con porosità maggiore (b).

6.2 Ritiro

Per quanto riguarda i campioni pressati a freddo, le prime annotazioni in seguito all'essiccazione in forno del materiale composto solo da parte umida sono relative alla notevole riduzione di volume (10%) e alla curvatura del pannello, entrambe derivanti dall'abbondante evaporazione di acqua. Per ridurre questi due fenomeni, sono stati realizzati dei provini ottenuti dalla miscelazione di materiale umido e materiale essiccato, miscelati in rapporti diversi. Tutte le tipologie di campioni sono risultate auto-legate, senza cioè l'aggiunta di leganti esterni, evidenziando un'ottima proprietà del materiale. I provini realizzati miscelando parte umida e parte secca hanno mostrato un decremento di volume inferiore – con una riduzione della formazione di fessure - e minore curvatura (Fig. 43).

Nonostante il fenomeno dell'imbarcamento sia migliorato con l'aggiunta dei granuli essiccati, questa manifestazione rimane sempre evidente ed i provini CW75_G2 e CW70S_G1 continuano a mostrare curvature e fessurazioni. Il terzo metodo realizzativo dei campioni, in cui è stata aggiunta una pressa con piastre forate e molle, migliora questo comportamento. Le molle consentono infatti, di mantenere la pressione costante anche dopo la riduzione di volume con l'obiettivo di ottenere un pannello planare e senza imbarcamento. Riguardo le tipologie di provini ottenuti con questo processo (W75–W80–W85–W90–W100), a causa delle differenze significative nel contenuto di acqua nelle miscele vi è stato un diverso fenomeno di restringimento. In particolare, il restringimento è diminuito con l'aggiunta di parte secca.

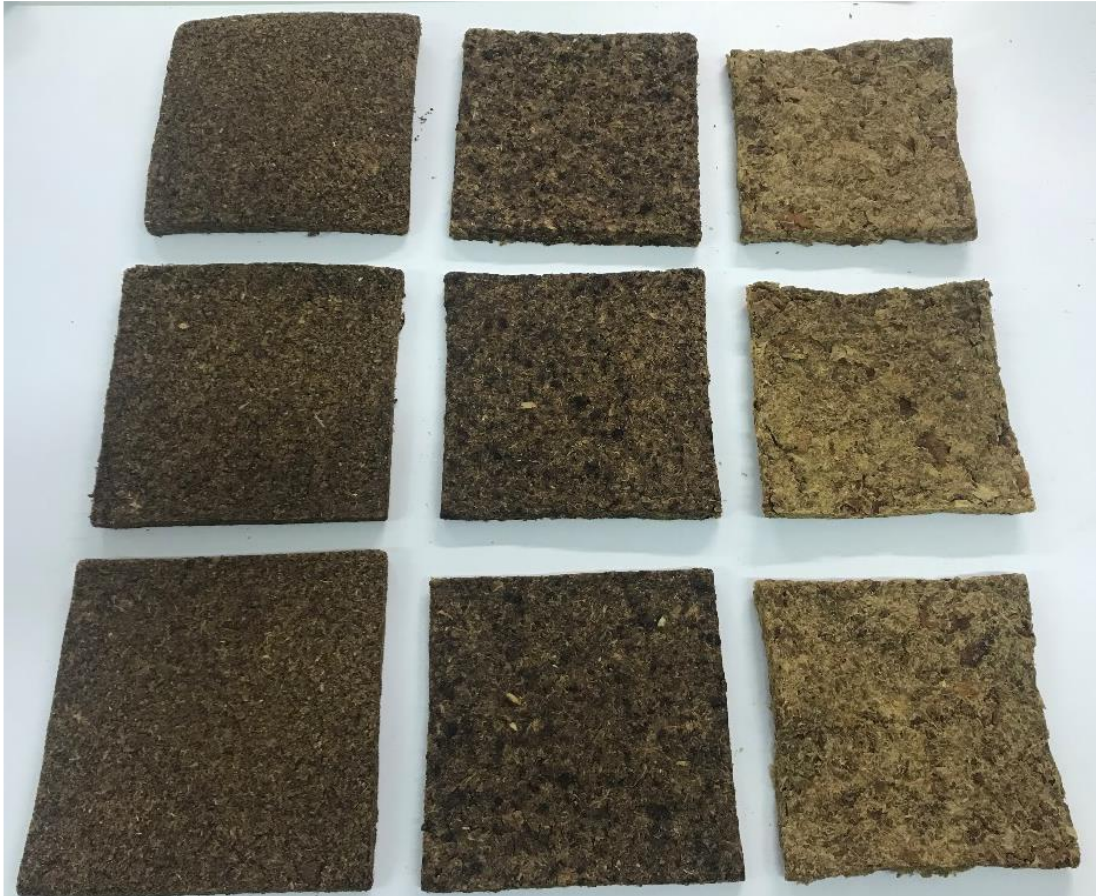


Figura 43 Campioni ottenuti dall'essiccazione degli scarti di agrumi freschi tritati (a destra), della miscelazione con prodotto secco tipo "G2" (al centro) e tipo "G1" (a sinistra).

Di conseguenza, come mostrato in Figura 44, lo spessore dei pannelli da W90 a W75 è aumentato linearmente ed il massimo valore di restringimento è stato osservato in W100 (100% prodotto umido) con il 70% di riduzione in spessore.

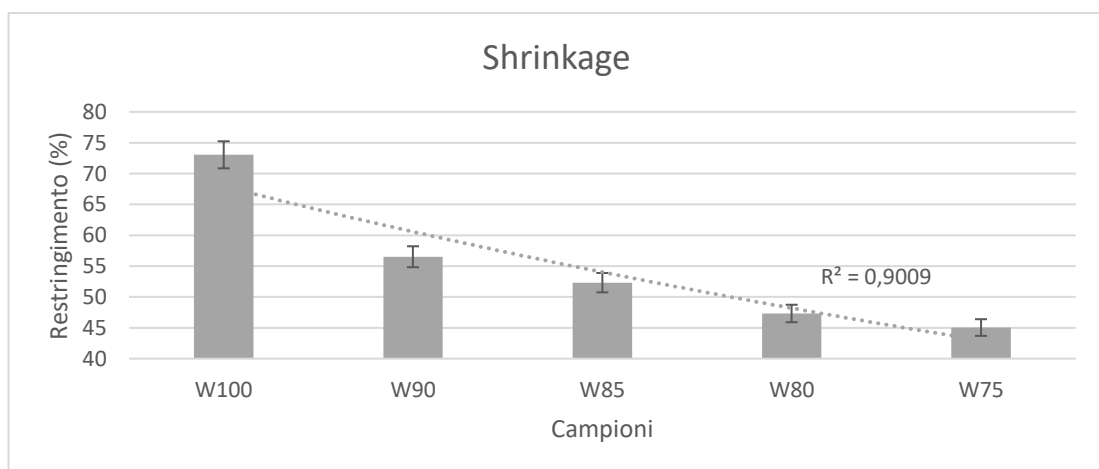


Figura 44 Restringimento dei campioni dopo il processo di essiccazione.

6.3 Densità

La tabella 9 mostra la composizione e la densità dei granuli analizzati. La densità varia a seconda dei grani ed in particolare il valore aumenta al diminuire del diametro dei grani.

<i>Sottoprodotti arance diametro granuli essiccati</i>	<i>Densità [kg/m³]</i>
G1: 0,65 < d < 1,25 mm	509,52
G2: 1,25 < d < 4 mm	497,37
G3: 4 mm < d < 6 mm	492,71

Tabella 9 Densità dei granuli di buccia di arancia essiccati

Nei campioni pressati a freddo la densità maggiore è stata misurata con il campione ottenuto dalla miscelazione di prodotto umido e granuli di diametro inferiore ($520,74 \pm 9 \text{ kg/m}^3$). Viceversa, il minimo valore di densità è stato misurato nei campioni ottenuti con l'aggiunta di granuli di diametro maggiore ($503,00 \pm 7 \text{ kg/m}^3$). La tabella 10 mostra i valori di densità ottenuti per ogni tipologia di campione.

<i>Nome campioni</i>	<i>Densità [kg/m³]</i>
CW100	507,32
CW75_G2	503,00
CW70S_G1	520,74

Tabella 10 Densità dei campioni pressati a freddo

Nei provini pressati durante il processo di essiccazione la densità varia tra $468,63 \pm 12 \text{ kg/m}^3$ (W75) e $558,46 \pm 13 \text{ kg/m}^3$ (W100). La Figura 45 mostra come la densità apparente diminuisce all'aumentare del quantitativo di granuli essiccati. Al contrario, la maggiore densità apparente è stata ottenuta con il pannello W100 (ottenuto solo con bucce triturate umide).

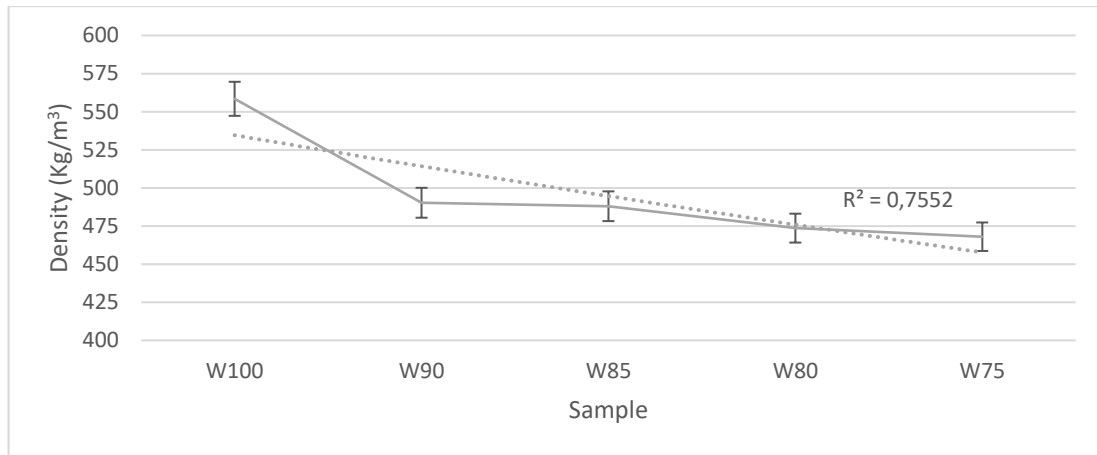


Figura 45 Densità e spessore dei campioni dopo il processo di essiccazione.

Poiché tutti i valori di densità sono inferiori a 640 kg/m^3 , i campioni possono essere classificati secondo l'ANSI come pannelli truciolari a bassa densità [190]. Inoltre, la densità media di $509,19 \text{ kg/m}^3$ è paragonabile ai valori ottenuti in letteratura con sottoprodotti agricoli come la pannocchia di mais [114], le noci [133] e il durian [120], come riassunto nella Tabella 11.

Sottoprodotto agricolo utilizzato	Densità [kg/m³]	Riferimento
Sughero	108,7	[42]
Girasoli	500,0	[144]
Pannocchia	413,0	[114]
Noci	599,1	[133]
Canna da zucchero	686,0	[150]
Cocco	338,0	[120]
Ananas	210,0	[139]
Durian	442,0	[120]
Gusci di riso	153,8	[133]
Paglia di riso	250,0	[134]
Opuntia	450,0	[141]

Tabella 11 Densità dei materiali da costruzione ottenuti da sottoprodotti agricoli.

6.4 Caratterizzazione termica

Per valutare le prestazioni termiche del materiale è stata condotta una analisi preliminare dei granuli di buccia di arancia essiccati.

La tabella 12 mostra i valori di conducibilità termica dei grani ed in particolare il valore aumenta al diminuire del diametro dei grani. La Figura 46 mostra la relazione tra i valori di conducibilità termica e la densità dei campioni. I valori di conducibilità sono direttamente correlati alla densità dei provini. La maggiore percentuale di vuoti riduce la densità e garantisce un migliore isolamento termico [191], pertanto, i granuli di diametro minore conducono più calore rispetto ai granuli più grandi.

Sottoprodotti arance	Densità	Conducibilità termica		
		10 °C	20°C	30°C
	[kg/m ³]	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]
G1: 0,65 < d < 1,25 mm	509,52	0,068	0,072	0,078
G2: 1,25 < d < 4 mm	497,37	0,066	0,071	0,075
G3: 4 mm < d < 6 mm	492,71	0,066	0,070	0,073

Tabella 12 Densità e conducibilità termica dei granuli di buccia di arancia essiccati

Confrontando i risultati ottenuti, i granuli hanno una conducibilità maggiore rispetto altri sottoprodotti agricoli come la buccia del riso (0,05 W/mK), la fibra di canna da zucchero (0,048 W/mK), la fibra di cocco (0,053 W/mK) [192] ed hanno una conducibilità paragonabile, seppur maggiore, a quella dei granuli ottenuti dai cladodi di *Opuntia ficus-indica* (0,057 W/mK) [133]. I campioni a grana più grossa hanno una conducibilità inferiore ad alcuni prodotti commerciali come l'argilla espansa (0,09 W/mK), la pomice (0,10 W/mK), la vermiculite espansa (0,08W/mK), il granulato di vetroschiuma (0,07 W/mK) e dei granuli di cellulosa (0,069 W/mK).

Nei campioni pressati durante il processo di essiccazione (W75–W80–W85–W90–W100), la determinazione della conducibilità termica è stata calcolata a 10 °C e 23 °C sui provini asciutti e dopo una settimana dall'essiccazione.

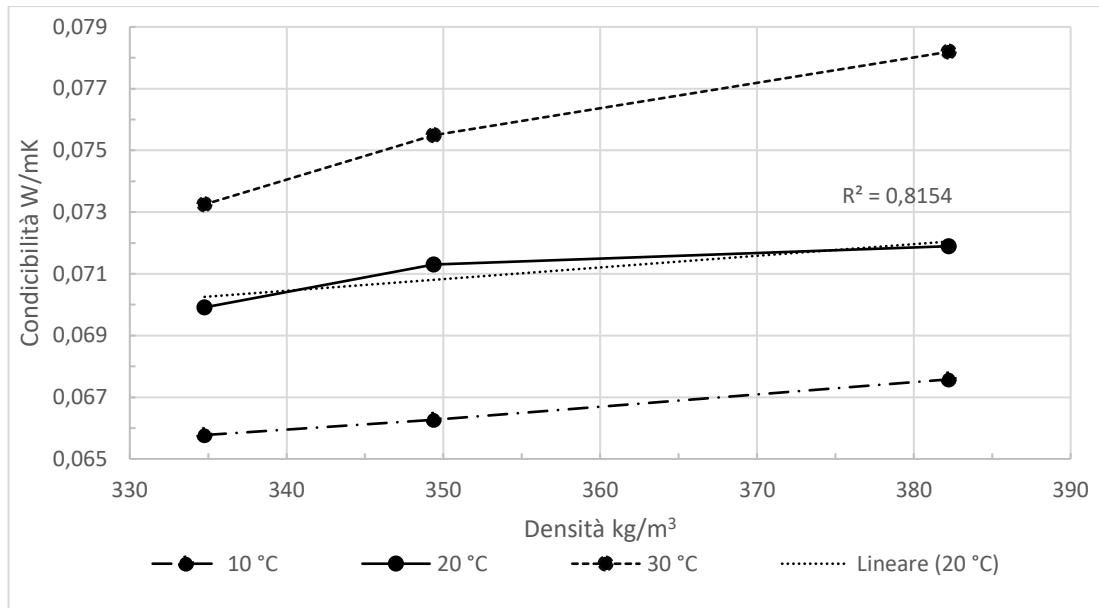


Figura 46 Conducibilità termica dei campioni analizzati in funzione della densità

I risultati ottenuti mostrano una conducibilità media di 0,072 W/mK, in un range compreso tra 0,066 W/mk e 0,078 W/mk. La conducibilità minima rilevata di 0,066 W/mk è del campione W100. Questi valori di conducibilità mostrano una interessante proprietà di questo materiale di isolamento termico.

Confrontato le proprietà di questo materiale con altri di densità simile, si nota come le prestazioni siano uguali e talvolta superiori ad altri prodotti sperimentali. Il campione W75 (campione con la maggiore quantità di parte secca) ha mostrato la minore densità le maggiore conducibilità termica [38]. Mentre la conducibilità termica media del pannello W100, di 0,066 W/mK, aumenta di 1,2 volte per raggiungere 0,077 W/mK in W75 (Figura 47). Come si è visto dalle analisi microscopiche, queste proprietà possono essere giustificate dal tipo di microstrutture ottenute dall'utilizzo sulla composizione di parte umida e parte secca. Il materiale umido, infatti, genera pori d'aria chiusi con una resistenza termica maggiore rispetto a quelli aperti nel caso di PS. Durante l'essiccazione, la sostituzione dell'acqua contenuta nell'agrume con l'aria diventa maggiore nei campioni con una maggiore percentuale di PU (W100). Questa ipotesi è in linea con l'aumento della conducibilità termica dopo una settimana. Infatti, l'assorbimento dell'umidità dall'atmosfera [193], e quindi l'aumento della conducibilità,

è maggiore nei campioni con porosità aperta; contrariamente al campione W100, che mantiene quasi inalterata la conducibilità.

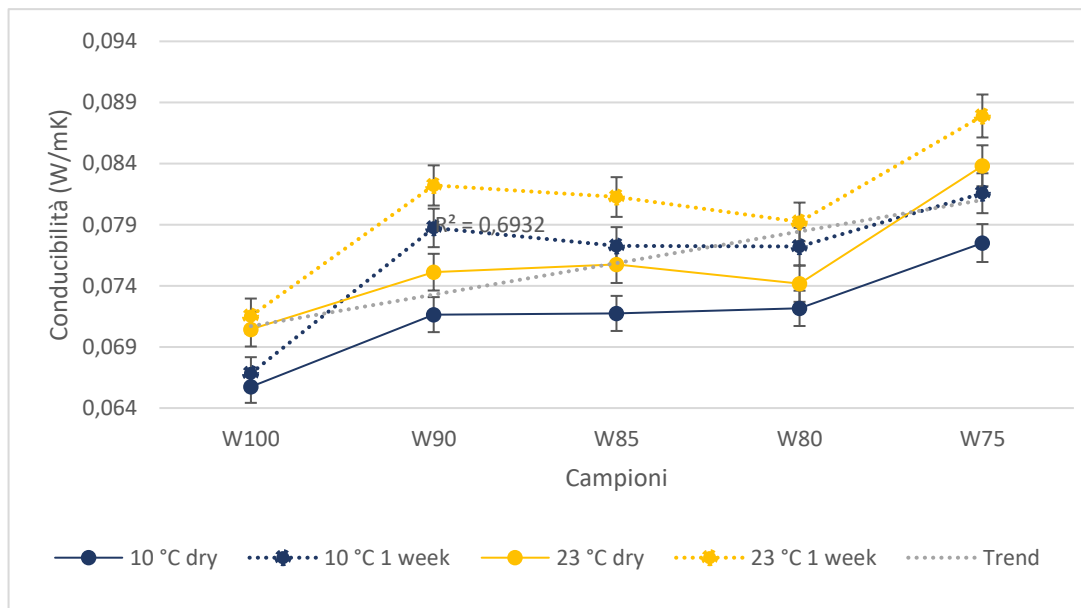


Figura 47 Conducibilità termica dei pannelli calcolata a 10 °C e 23 °C dopo il processo di essiccazione e dopo una settimana.

Le differenze devono essere evidenziate tra i risultati a 10 °C, che è la temperatura di riferimento per i materiali da costruzione, e quelli a 23 °C. Come ci si aspettava [194], maggiore è la temperatura di prova, maggiore è la conduttività termica in un intervallo dal 4% al 12%. È particolarmente interessante nel caso di materiali igroscopici come questo. Rispetto alla letteratura, i campioni di buccia d'arancia hanno mostrato una conduttività termica maggiore rispetto ad altri isolanti commerciali non naturali come lana minerale o il polistirene. Tuttavia, i valori di conducibilità ottenuti dai pannelli a buccia d'arancia sono in linea con la conduttività di altri materiali isolanti da sottoprodotti agricoli come il durian [120] e il ficus indica [141]. Inoltre, la conducibilità è inferiore al pannello truciolare realizzato dalla pannocchia [114], girasole [144] e guscio di noce [133], e maggiore rispetto al truciolare realizzato con guscio di cocco [120], foglie di ananas [139], canna da zucchero [150] e paglia di riso [134].

6.5 Caratterizzazione meccanica

Di seguito vengono riportati i valori di resistenza a flessione ottenuti dalla media dei risultati dai test sui campioni dei pannelli. La Figura 48 mostra che l'incorporazione di bucce essiccate nella composizione dei provini (W75) ha provocato una drastica riduzione della resistenza alla flessione. Mentre W100 ha mostrato 0,09 MPa di resistenza alla flessione, il valore è sceso a 0,02 MPa in W90 ed è rimasto quasi costante negli altri. Risulta evidente come i pannelli tipo W100 abbiano delle prestazioni meccaniche superiori rispetto gli altri. Una possibile spiegazione di questa proprietà potrebbe ritrovarsi nel fenomeno di bruciatura superficiale che ha subito il pannello, che potrebbe aver conferito un miglior comportamento meccanico.

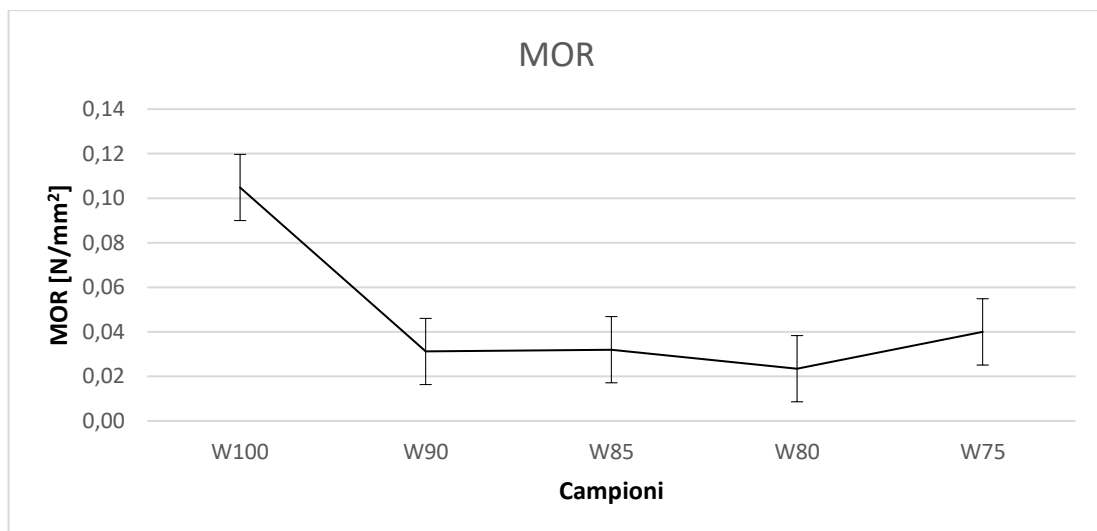


Figura 48 Resistenza a flessione dei campioni

Inoltre, la riduzione del volume provocata nei campioni con elevato contenuto di bucce umide genera una microstruttura più densa ed omogenea rispetto all'aggiunta di bucce essiccate. Nei pannelli diversi dal W100, una discontinuità nella microstruttura ha generato una perdita di legame tra le particelle e una perdita di resistenza meccanica. Il fenomeno avviene analogamente in altri materiali con l'aggiunta di aggregati, ad esempio cemento con l'aggiunta di perlite [195] o plastica [196].

Per tutti i campioni analizzati, rispetto alla letteratura, la resistenza meccanica risulta inferiore ad altri pannelli da sottoprodotti agricoli come la pannocchia [115], il cocco [120] e il girasole [145], sebbene simili a quelle dalla bagassa [151]. Tuttavia, le differenze possono essere spiegate non solo dalle proprietà del materiale stesso, ma dalle differenze nel processo di fabbricazione. Migliori prestazioni possono essere ottenute imprimendo una maggiore pressione in fase di preparazione o addirittura, contrariamente alla ricerca in corso, aggiungendo un legante esterno.

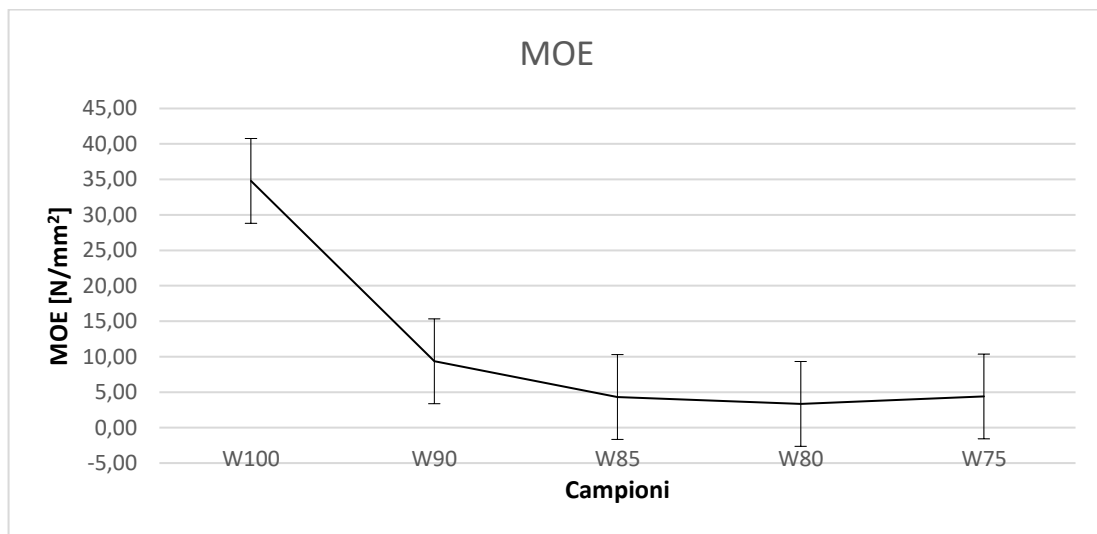


Figura 49 Modulo di elasticità dei campioni

Il modulo di elasticità (MOE) ha seguito lo stesso schema del MOR (Figura 49) e la rigidità è risultata maggiore nel campione senza bucce essiccate (W100). Infatti, W100 ha mostrato un modulo di elasticità quasi 10 volte superiore al W75 con rispettivamente $34,79 \text{ N/mm}^2$ e $3,57 \text{ N/mm}^2$. Questa prestazione può essere spiegata ancora una volta della formazione di pori chiusi e dalla omogeneità nella miscela rispetto alle altre. Come osservato al microscopio, inoltre, una possibile modifica alla microstruttura è dovuta dalla reazione di Maillard, dalla caramellizzazione o dalla pirolisi del materiale organico [188]. La reazione di Maillard, dalla decomposizione degli zuccheri e degli amminoacidi, potrebbero aver generato dei legami di interazione e migliorato le proprietà meccaniche [197]. Infatti, come si può osservare in Figura 50, la curva sforzo-deformazione ha mostrato una rigidità maggiore nei

campioni W100, che è drasticamente ridotta nel W90. Va evidenziato che il campione W75 ha mostrato un aumento di resistenza rispetto agli altri provini misti con PS. Questo potrebbe essere giustificato dall'equilibrio tra bucce essiccate e bucce umide, che ha favorito la coesione del pannello.

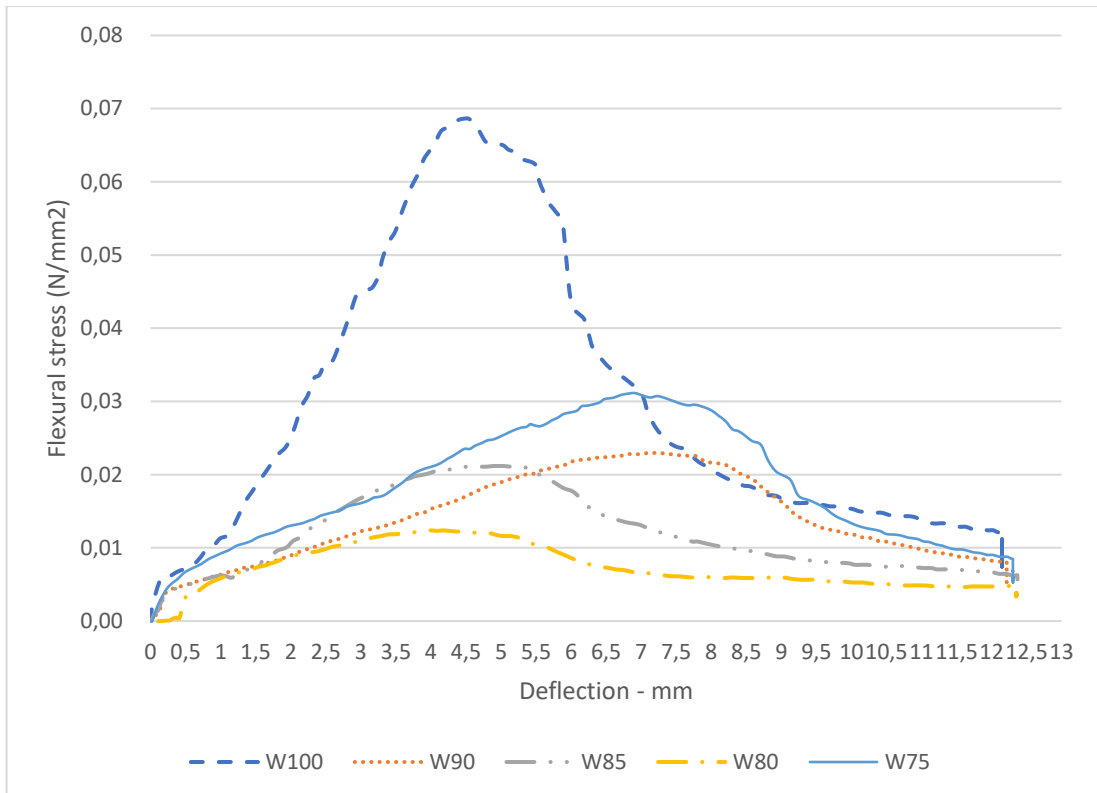


Figura 50 Curva sollecitazione flessionale-deflessione dei campioni a buccia d'arancia

DATI			MOR				
Nome campione	h - Larghezza (mm)	b - Spessore (mm)	Carico massimo (kN)	Carico massimo (N)	l - lungh. utile (mm)	Tensione max (MOR)	Media (MOR)
Sample name	Width (mm)	Thickness (mm)	Max Load (kN)	Max Load (N)	Span (mm)	Flexural stress (N/mm ²)	Average
100.2	209,3	15,81	0,259	259	160	0,09	
100.2.1	109	15,81	0,141	141	160	0,18	0,13
100.2.2	102,4	15,81	0,088	88	160	0,13	
85.2	228	26,245	0,142	142	160	0,02	0,06
85.2.1	121	26,245	0,106	106	160	0,07	
85.2.2	102	26,245	0,097	97	160	0,09	
90.1	218	27,255	0,112	112	160	0,02	
90.1.1	153	27,255	0,063	63	160	0,02	0,02
90.1.2	-	27,255	-	-	-	-	
80.2	246	26,25	0,058	58	160	0,01	
80.2.1	125	26,25	0,021	21	160	0,01	0,02
80.2.2	111	26,25	0,057	57	160	0,04	
100.1	211	18,385	0,164	164	160	0,05	0,08
100.1.1	98	18,385	0,076	76	160	0,10	
100.1.2	109,7	18,385	0,074	74	160	0,08	
75.1	225,9	27,255	0,261	261	160	0,05	
75.1.1	131	27,255	0,083	83	160	0,04	0,05
75.1.2	95	27,255	0,061	61	160	0,06	
90.2	227	22,545	0,129	129	160	0,03	
90.2.1	108,05	22,545	0,048	48	160	0,04	0,04
90.2.2	115,7	22,545	0,063	63	160	0,05	
75.2	236,6	27,3925	0,138	138	160	0,02	
75.2.1	116,6	27,3925	0,051	51	160	0,03	0,03
75.2.2	121,5	27,3925	0,052	52	160	0,03	
85.1	223,7	27,0525	0,1	100	160	0,02	
85.1.1	118	27,0525	0,093	93	160	0,06	0,04
85.1.2	86	27,0525	0,024	24	160	0,03	
80.1	225,9	29,995	0,105	105	160	0,02	
80.1.1	128,7	29,995	0,077	77	160	0,04	
80.1.2	95,3	29,995	0,027	27	160	0,02	0,03

Tabella 13 Dati prove meccaniche test rottura per determinazione MOR

6.6 Caratterizzazione acustica

Per valutare le proprietà acustiche del materiale sono state condotte delle prove per determinare l'assorbimento acustico. Il parametro rappresentativo misurato è il coefficiente di assorbimento α . Quando $\alpha = 1$, tutta l'energia dell'onda incidente viene dissipata ed il suono è completamente assorbito. Quando $\alpha = 0$, il suono non viene affatto smorzato. Questo coefficiente α dipende dalla frequenza del suono, viene misurato sull'intera gamma di frequenze e viene mediato su bande di frequenza chiamate ottave; ciò consente un confronto più semplice tra i materiali. Di seguito vengono riportati i valori ottenuti dai campioni analizzati W75, W80, W85, W90 e W100 (Fig. 51). I risultati mostrano un buon coefficiente di assorbimento nelle frequenze comprese tra 1000 Hz e 2000 Hz. In particolare, migliori valori di assorbimento acustico sono ottenuti dai provini W75 e W80, mentre valori peggiori sono ottenuti dai campioni W100. L'assorbimento acustico medio del materiale è $\alpha_{\text{medio}} = 0,837$, in un range compreso tra $\alpha_{\text{max}} = 0,887$ e $\alpha_{\text{min}} = 0,759$. Valori migliori di assorbimento sono ottenuti dai provini che presentano una superficie esterna maggiormente porosa. Al contrario, valori peggiori sono ottenuti dal campione W100, che presenta una superficie esterna più liscia e quindi capace di dissipare peggio le onde sonore impattanti.

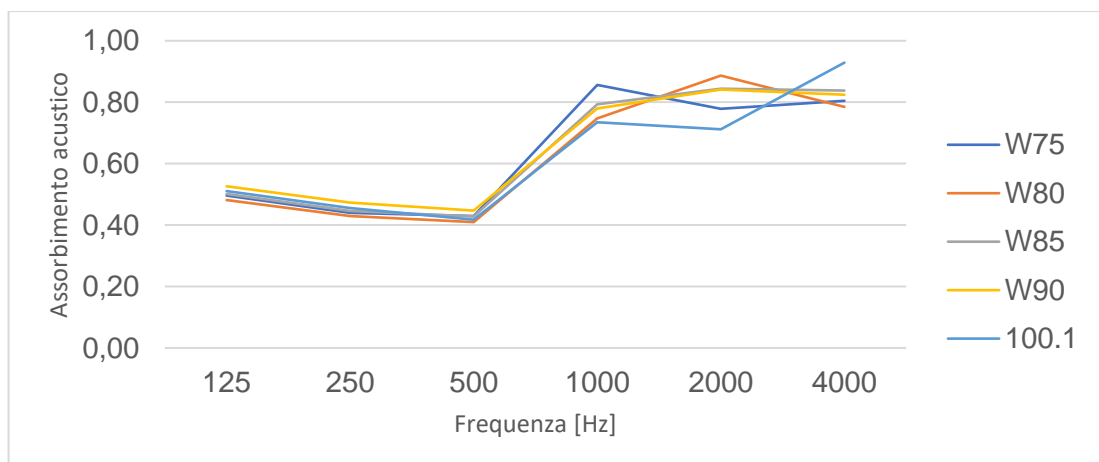


Figura 51 Assorbimento acustico dei campioni dai sottoprodotti degli agrumi ottenuti dalla pressatura contemporanea all'essiccazione

Nel campo delle costruzioni, la gamma di frequenza utilizzata è da 100 a 4000 Hz. Dall'analisi dei risultati si osserva che nei campioni W75, il coefficiente di assorbimento sulle frequenze 500-1200 è superiore rispetto agli altri provini. Inoltre, i valori del coefficiente di assorbimento acustico di questo materiale sono superiori su quasi tutta la gamma di frequenze. Questi valori sono elevati rispetto ad altri prodotti come ad esempio i mattoni, le cui proprietà assorbenti sono praticamente inesistenti. Allo stesso modo, sono migliori del polistirene espanso che ha proprietà di basso assorbimento acustico a causa della sua struttura a cellule chiuse ($\alpha < 0,4$). I valori sono prossimi a quelli di un poliuretano espanso, con coefficiente acustico compreso tra 0,32 e 0,85 ed a quelli della lana di roccia, con $\alpha < 0,95$ ed una densità di 70 kg/m^3 . Altri materiali da costruzione da sottoprodotti agricoli presentano proprietà simili o inferiori (Tabella 14). Il coefficiente di assorbimento del pannello dai sottoprodotti del girasole (150-200 kg/m^3) è $\approx 0,2$ alla frequenza 2500-4000 Hz [145]. Il pannello dalle fibre di canna da zucchero ha un coefficiente di assorbimento $0,12 < \alpha < 0,85$ [149] e i campioni dai sottoprodotti del lino hanno un $\alpha \approx 0,8$ a 3000 Hz [198].

<i>Sottoprodotto agricolo</i>	<i>Densità [kg/m³]</i>	<i>α</i>	<i>Riferimenti</i>
Orange peel panel	500	0,4 – 0,92	
Auto linked flax-tows	215	0,5 – 0,85	[198]
Sugarcane fibers	275	0,12 – 0,73	[149]
Olive purning	218,9	0,1 – 0,95	[199]

Tabella 14 Valori di assorbimento acustico di materiali da sottoprodotti agricoli

<i>Frequency</i>	<i>75.1</i>	<i>75.2</i>	<i>W75</i>	<i>80.1</i>	<i>80.2</i>	<i>W80</i>
31,5	0,301	0,336	0,318	0,343	0,286	0,315
63	0,163	0,159	0,161	0,121	0,162	0,141
125	0,494	0,499	0,496	0,454	0,508	0,481
250	0,439	0,439	0,439	0,405	0,454	0,429
500	0,436	0,423	0,429	0,404	0,415	0,410
1000	0,925	0,787	0,856	0,930	0,566	0,748
2000	0,721	0,836	0,778	0,788	0,985	0,887
4000	0,797	0,812	0,804	0,664	0,906	0,785

Tabella 15 Risultati test assorbimento acustico campioni W75 e W80

Frequency	85.1	85.2	W85	90.1	90.2	W90
31,5	0,117	0,197	0,157	0,382	0,253	0,318
63	0,107	0,092	0,099	0,156	0,154	0,155
125	0,495	0,509	0,502	0,519	0,533	0,526
250	0,438	0,454	0,446	0,464	0,482	0,473
500	0,423	0,434	0,428	0,432	0,463	0,447
1000	0,791	0,795	0,793	0,646	0,913	0,779
2000	0,844	0,844	0,844	0,927	0,755	0,841
4000	0,799	0,877	0,838	0,890	0,758	0,824

Tabella 16 Risultati test assorbimento acustico campioni W85 e W90

Frequency	100.1.2	100.1	100.1.3	100.0	100.0.2
31,5	0,421	0,233	0,294	0,260	0,399
63	0,150	0,148	0,153	0,173	0,166
125	0,521	0,510	0,512	0,482	0,488
250	0,461	0,455	0,455	0,426	0,437
500	0,417	0,418	0,418	0,424	0,461
1000	0,645	0,735	0,736	0,743	0,640
2000	0,731	0,712	0,727	0,365	-0,800
4000	0,834	0,929	0,775	0,759	0,596

Tabella 17 Risultati test assorbimento acustico campioni W100

	75.1	75.2	80.1	80.2	85.1	85.2	90.1	90.2	100.1
25	0,46	0,31	-0,27	0,06	0,67	0,47	0,50	0,53	0,32
31,5	0,40	0,47	0,38	0,27	0,41	0,38	0,48	0,13	0,22
40	0,24	0,27	0,21	0,26	0,05	0,12	0,27	0,18	0,19
50	0,09	0,08	0,06	0,09	0,03	0,03	0,08	0,08	0,07
63	0,11	0,10	0,09	0,10	0,09	0,08	0,11	0,11	0,10
80	0,37	0,37	0,35	0,36	0,37	0,36	0,39	0,40	0,36
100	0,51	0,50	0,46	0,51	0,50	0,52	0,52	0,54	0,52
125	0,50	0,50	0,45	0,51	0,50	0,51	0,52	0,54	0,51
160	0,48	0,50	0,45	0,51	0,49	0,50	0,51	0,53	0,50
200	0,44	0,44	0,41	0,46	0,44	0,46	0,47	0,49	0,46
250	0,40	0,40	0,37	0,42	0,41	0,42	0,43	0,45	0,42
315	0,40	0,40	0,36	0,41	0,40	0,41	0,42	0,44	0,42
400	0,36	0,36	0,33	0,36	0,36	0,37	0,38	0,40	0,37
500	0,45	0,44	0,42	0,43	0,43	0,45	0,44	0,47	0,43
630	0,50	0,47	0,47	0,44	0,46	0,47	0,46	0,50	0,43
800	0,64	0,58	0,62	0,51	0,58	0,58	0,55	0,61	0,52
1000	0,84	0,72	0,82	0,54	0,71	0,71	0,62	0,78	0,66
1250	0,99	0,93	1,00	0,60	0,94	0,94	0,71	0,99	0,91
1600	0,71	0,89	0,73	0,85	0,92	0,91	0,95	0,75	0,90

Tabella 18 Risultati test assorbimento acustico campioni in bande d'ottava

6.7 Assorbimento acqua

A seguito dell'immersione sono stati misurati peso del campione, rigonfiamento ed altezza di rigonfiamento dopo 5, 10, 20, 30, 90 min e dopo 6, 24 h. Su 15 campioni analizzati (W75 – W80 – W85 – W90 – W100), solo 9 hanno terminato il test, poiché i restati si sono sgretolati durante l'immersione.

I risultati mostrano che il miglior comportamento è dato dal campione W100, e che i dati peggiorano all'aumentare della parte secca contenuta nel materiale. Il più basso assorbimento per capillarità è stato riscontrato nei provini W100 mentre il più alto è stato mostrato nei campioni W80 (Figura 52). La giustificazione di questi risultati è da ricercare nella differenza di porosità e nella dimensione dei pori. I provini W80, come mostrato dalle analisi microscopiche, presentano infatti una porosità più aperta rispetto i campioni W100. La correlazione tra porosità ed assorbimento potrebbe quindi essere confermata da osservazioni microstrutturali, dove una porosità più elevata nel caso di W75, rispetto a W100, peggiora il comportamento in presenza d'acqua. Il maggiore assorbimento del campione W80 rispetto al W75 può essere giustificato da una maggiore presenza di pori e quindi da un rilascio dell'acqua nella fase di gocciolamento prima della misurazione.

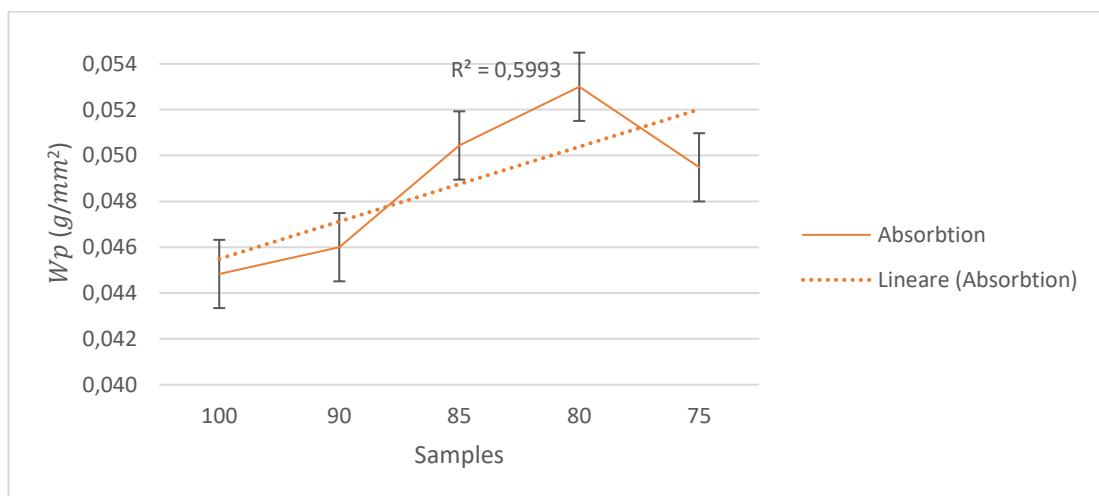


Figura 52 Assorbimento d'acqua dei campioni dopo 24h

Inoltre, quando i campioni con bucce essiccate sono sottoposti ad assorbimento d'acqua mostrano la perdita di coesione. Infatti, maggiore è la quantità di bucce essiccate, maggiori sono le particelle sbriciolate e perse durante le prove. Questa prestazione è correlata al ritiro dei pannelli a contatto con l'acqua, ed è stato osservato un aumento lineare esponenziale fino al 40% del rigonfiamento in provini con parte secca (Figura 53). L'omogeneità nella struttura nel caso di W100 ha portato tutte le particelle ad essere assorbite dall'acqua nello stesso modo; al contrario, il W75, con particelle con procedimento diverso, assorbe diversamente e provoca un aumento del rigonfiamento insieme all'eterogeneità della struttura e alla maggiore porosità aperta rilevata.

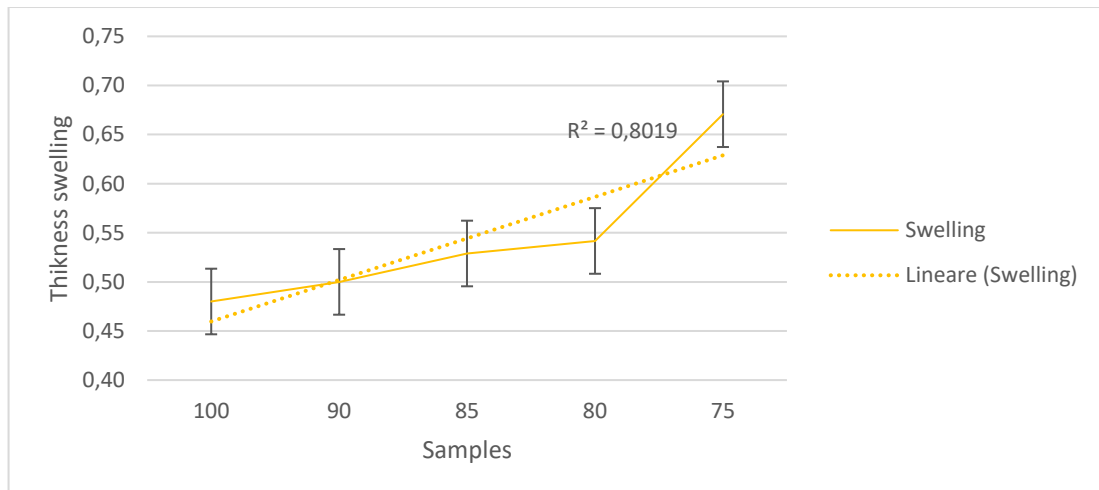


Figura 53 Rigonfiamento dei campioni dopo 24h

Un ulteriore test è stato effettuato per valutare l'assorbimento d'acqua in ambiente umido. I campioni sono stati posti in un contenitore e posti ad una temperatura costante di $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ e umidità costante pari al $90\% \pm 5\%$.

I dati analizzati sono il peso ed il rigonfiamento dopo 1, 5 e 7 giorni. Il quantitativo d'acqua assorbito è stato calcolato come differenza di due pesi, sottraendo al peso P_1 , P_5 e P_7 , il peso iniziale P_0 . Anche in questo caso, i migliori risultati sono ottenuti dal pannello W100.

Di seguito vengono riportate le tabelle di misurazione per i provini analizzati:

Sample name	l (mm)	s ₀ (mm)	M ₀ (g)	s ₂ (mm)	h (mm)	0,31		
90.1.1.1	140	26,56	147,26					
12:30	12:31	12:35	12:40	12:50	13:00	14:00	18:30	12:30
t (m)	00:01:00	00:05	00:10	00:20	00:30	01:30	06:00	00:00
M _t (g)	184,82	211,11	225	235,79	244,9	266,72		286,88
ΔM _t (g)	37,56	63,85	77,74	88,53	97,64	119,46	-147,26	139,62
m (kg/m ²)	10,101	17,171	20,907	23,809	26,259	32,127		37,548
t (s)	60	300	600	1200	1800	5400	21600	86400
√t (s)	7,75	17,32	24,49	34,64	42,43	73,48	146,97	293,94
%	-	12,45%	6,17%	4,58%	3,72%	8,18%		100,00%

Sample name	l (mm)	s ₀ (mm)	M ₀ (g)	s ₂ (mm)	h (mm)	0,51		
80.1.1.1	135	30	201,75	46,25	49,3			
12:30	12:31	12:35	12:40	12:50	13:00	14:00	18:30	12:30
t (m)	00:01:00	00:05	00:10	00:20	00:30	01:30	06:00	00:00
M _t (g)	253,71	292,26	311,91	320,37	330			
ΔM _t (g)	51,96	90,51	110,16	118,62	128,25	-201,75	-201,75	-201,75
m (kg/m ²)	12,830	22,348	27,200	29,289	31,667			
t (s)	60	300	600	1200	1800	5400	21600	86400
√t (s)	7,75	17,32	24,49	34,64	42,43	73,48	146,97	293,94
%	-	13,19%	6,30%	2,64%	2,92%			

Sample name	l (mm)	s ₀ (mm)	M ₀ (g)	s ₂ (mm)	h (mm)	0,21		
100.2.2.2	107	15	99,12	22	33,7			
12:30	12:31	12:35	12:40	12:50	13:00	14:00	18:30	12:30
t (m)	00:01:00	00:05	00:10	00:20	00:30	01:30	06:00	00:00
M _t (g)	106,95	109,32	112,9	116,64	117,87	128,45	145,7	161,59
ΔM _t (g)	7,83	10,2	13,78	17,52	18,75	29,33	46,58	62,47
m (kg/m ²)	4,879	6,355	8,586	10,916	11,682	18,274	29,022	38,922
t (s)	60	300	600	1200	1800	5400	21600	86400
√t (s)	7,75	17,32	24,49	34,64	42,43	73,48	146,97	293,94
%	-	2,17%	3,17%	3,21%	1,04%	8,24%	#RIF!	9,83%

Sample name	l (mm)	s ₀ (mm)	M ₀ (g)	s ₂ (mm)	h (mm)			
80.2.2.1	116	27,6	181,07					
12:30	12:31	12:35	12:40	12:50	13:00	14:00	18:30	12:30
t (m)	00:01:00	00:05	00:10	00:20	00:30	01:30	06:00	00:00
M _t (g)	220,88							
ΔM _t (g)	39,81	-181,07	-181,07	-181,07	-181,07	-181,07	-181,07	-181,07
m (kg/m ²)	12,434							
t (s)	60	300	600	1200	1800	5400	21600	86400
√t (s)	7,75	17,32	24,49	34,64	42,43	73,48	146,97	293,94
%	-							

Sample name	l (mm)	s ₀ (mm)	M ₀ (g)	s ₂ (mm)	h (mm)	0,33		
75.2.1.2	134	28,7	208,04	47,95	48,80			
12:30	12:31	12:35	12:40	12:50	13:00	14:00	18:30	12:30
t (m)	00:01:00	00:05	00:10	00:20	00:30	01:30	06:00	00:00
M _t (g)	266,54	298,37	310,64	325,37	331,8	357,8	375,15	388,67
ΔM _t (g)	58,5	90,33	102,6	117,33	123,76	149,76	167,11	180,63
m (kg/m ²)	15,211	23,488	26,678	30,509	32,181	38,941	43,453	46,968
t (s)	60	300	600	1200	1800	5400	21600	86400
√t (s)	7,75	17,32	24,49	34,64	42,43	73,48	146,97	293,94
%	-	10,67%	3,95%	4,53%	1,94%	#RIF!	#RIF!	#RIF!

Sample name	l (mm)	s ₀ (mm)	M ₀ (g)	s ₂ (mm)	h (mm)	0,40		
90.2.1.1	140	22,8	211,62	38,3	46,5			
12:30	12:31	12:35	12:40	12:50	13:00	14:00	18:30	12:30
t (m)	00:01:00	00:05	00:10	00:20	00:30	01:30	06:00	00:00
M _t (g)	255,75	279,27	292,9	302,6	314,55	343,8	366,56	385,42
ΔM _t (g)	44,13	67,65	81,28	90,98	102,93	132,18	154,94	173,8
m (kg/m ²)	13,825	21,194	25,464	28,503	32,246	41,410	48,540	54,449
t (s)	60	300	600	1200	1800	5400	21600	86400
√t (s)	7,75	17,32	24,49	34,64	42,43	73,48	146,97	293,94
%	-	8,42%	4,65%	3,21%	3,80%	8,51%	#RIF!	4,89%

Sample name	l (mm)	s ₀ (mm)	M ₀ (g)	s ₂ (mm)	h (mm)	0,35		
85.2.1.1	110	26,98	184,65	41,25	51,53			
12:30	12:31	12:35	12:40	12:50	13:00	14:00	18:30	12:30
t (m)	00:01:00	00:05	00:10	00:20	00:30	01:30	06:00	00:00
M _t (g)	235,23	259,8	272,04	280,51	291,13	307,62	318,23	334,34
ΔM _t (g)	50,58	75,15	87,39	95,86	106,48	122,97	133,58	149,69
m (kg/m ²)	17,043	25,322	29,446	32,300	35,878	41,435	45,010	50,438
t (s)	60	300	600	1200	1800	5400	21600	86400
√t (s)	7,75	17,32	24,49	34,64	42,43	73,48	146,97	293,94
%	-	9,46%	4,50%	3,02%	3,65%	5,36%	#RIF!	4,82%

Sample name	l (mm)	s ₀ (mm)	M ₀ (g)	s ₂ (mm)	h (mm)	0,36		
100.1.1.2	105	19,66	110,28	29,36	41,20			
12:30	12:31	12:35	12:40	12:50	13:00	14:00	18:30	12:30
t (m)	00:01:00	00:05	00:10	00:20	00:30	01:30	06:00	00:00
M _t (g)	132,57	143,86	151,65	156,55	163,39	183,71	198,32	215,02
ΔM _t (g)	22,29	33,58	41,37	46,27	53,11	73,43	88,04	104,74
m (kg/m ²)	10,798	16,267	20,041	22,414	25,728	35,571	42,649	50,739
t (s)	60	300	600	1200	1800	5400	21600	86400
√t (s)	7,75	17,32	24,49	34,64	42,43	73,48	146,97	293,94
%	-	7,85%	5,14%	3,13%	4,19%	11,06%	#RIF!	7,77%

Sample name	l (mm)	s ₀ (mm)	M ₀ (g)	s ₂ (mm)	h (mm)	0,57		
75.1.1.2	115	29,36	202,26					
12:30	12:31	12:35	12:40	12:50	13:00	14:00	18:30	12:30
t (m)	00:01:00	00:05	00:10	00:20	00:30	01:30	06:00	00:00
M _t (g)	263,44	288,81	294,99					
ΔM _t (g)	61,18	86,55	92,73	-202,26	-202,26	-202,26	-202,26	-202,26
m (kg/m ²)	18,120	25,634	27,464					
t (s)	60	300	600	1200	1800	5400	21600	86400
√t (s)	7,75	17,32	24,49	34,64	42,43	73,48	146,97	293,94
%	-	8,78%	2,09%					

Sample name	l (mm)	s ₀ (mm)	M ₀ (g)	s ₂ (mm)	h (mm)	0,43		
85.1.2.2	103	26,5	160,58					
12:30	12:31	12:35	12:40	12:50	13:00	14:00	18:30	12:30
t (m)	00:01:00	00:05	00:10	00:20	00:30	01:30	06:00	00:00
M _t (g)	199,43	210,73						
ΔM _t (g)	38,85	50,15	-160,58	-160,58	-160,58	-160,58	-160,58	-160,58
m (kg/m ²)	14,233	18,373						
t (s)	60	300	600	1200	1800	5400	21600	86400
√t (s)	7,75	17,32	24,49	34,64	42,43	73,48	146,97	293,94
%	-	5,36%						

Tabella 19 Risultati test assorbimento d'acqua sui campioni analizzati

7. Ulteriori indagini in presenza di micelio

In questo capitolo verranno illustrate le ricerche condotte presso la Vrije Universiteit Brussel riguardo la realizzazione di campioni che utilizzano come legante naturale il micelio. Come visto nel paragrafo 1.2.13, diversi autori hanno studiato la differenza tra i vari substrati per la crescita del micelio; ma nessuno di questi studi ha fino ad oggi analizzato l'utilizzo dei granuli di buccia di arancia essiccati come substrato per la crescita.

7.1 Materiali

Il primo passo per lo sviluppo del micelio è la formazione dell'habitat ospitante. Infatti, oltre le spore del fungo, è necessario formare un substrato idoneo per la sua crescita. Questo substrato deve avere un alto contenuto di cellulosa poiché, a differenza di altri organismi, i funghi possono scomporre la cellulosa in glucosio per nutrirsi. Ciò significa che in ambienti ricchi di cellulosa i funghi possono crescere rapidamente e più forti, mentre altri organismi no. Di conseguenza, è ragionevole utilizzare materiali con buoni rapporti di contenuto di cellulosa se si prevede di generare materiali resistenti ed evitare contaminazioni [189].

Il fungo utilizzato per questa ricerca è il *Granoderma lucidum*, mentre i materiali per creare il substrato sono il truciolo di faggio ed i sottoprodotti di trasformazione degli agrumi, in particolare il prodotto secco G2. Quest'ultimi, come descritto nei capitoli precedenti, derivano dall'essiccazione delle bucce, setacciatura e successiva selezione. In particolare, i granuli selezionati hanno un diametro compreso tra 1,2 mm e 4 mm. Il substrato ospitante deve essere selezionato e sterilizzato per evitare che altri organismi contaminino i campioni ed inibiscano la crescita del micelio. Questo può essere ottenuto facendo bollire il substrato con vapore caldo.

7.2 Metodi

La procedura utilizzata per creare i provini a base di micelio prevede dei passaggi necessari per coltivare e far crescere il micelio nel substrato.

La prima fase prevede la sterilizzazione con vapore del substrato composto dalle fibre. Il substrato di ogni campione è stato posto in un contenitore sigillato che ne consente l'aumento di temperatura senza il contatto diretto con il vapore. Il processo di sterilizzazione è stato effettuato alla temperatura di 180 °C per un tempo di 8 min. In particolare, sono stati realizzati 3 tipologie di provini utilizzando differenti substrati, come:

- M1, parte secca sottoprodotti agrumi (100%);
- M2, parte secca sottoprodotti agrumi (50%) e truciolato di faggio (50%);
- M3, truciolato di faggio (100%).

Il fungo utilizzato per i tre campioni è lo stesso e per ogni substrato è stato fornito un contenuto d'acqua come mostrato in tabella 20.

<i>Nome</i>	<i>N. Campioni</i>	<i>Peso granuli arancia [g]</i>	<i>Peso truciolato di faggio [g]</i>	<i>Percentuale acqua</i>
M1	3	50	0	100 %
M2	3	25	25	150 %
M3	3	0	50	200 %

Tabella 20. Campioni realizzati

Successivamente, il substrato viene inoculato del fungo semplicemente distribuendo i semi omogeneamente e mescolando il substrato. Per ciascun campione sono stati inoculati i semi del fungo *Granoderma lucidum* per un peso pari al 10% del substrato; per ogni campione sono quindi stati inoculati 12 g di semi. Durante tutto il processo le attrezzature utilizzate sono costantemente state sterilizzate con etanolo e lasciate asciugare per qualche minuto.

Dopo l'inoculazione, il composto è stato lasciato in un contenitore per un periodo di 5 giorni per far avviare la crescita e favorire lo sviluppo del micelio. Dopo questo periodo ciascun campione è stato posto in uno stampo circolare in plastica di un diametro 10 cm ed altezza 2 cm, sigillato con un filtro che ne consente il passaggio dell'aria ma non di microparticelle potenzialmente contaminanti. Riempito negli stampi desiderati, il micelio colonizza tutto intorno alle fibre e cresce nei vuoti tra le particelle. Dopo 7 giorni di incubazione i campioni sono stati rimossi dagli stampi e posti dentro un contenitore filtrato per altri 7 giorni. Durante questo periodo di incubazione i provini sono stati posti nelle condizioni di crescita necessaria quali: temperatura costante di 26°C, luce ridotta (condizioni di oscurità) e flusso di ossigeno sufficiente [104]. Inoltre, il contenuto di umidità relativa dell'aria deve essere compreso tra l'80 e il 100% durante tutto il processo di crescita. Questo può essere fatto fornendo una buona quantità di acqua al substrato e conservando i campioni in scatole ermetiche che consentano il ricambio d'aria ma prevengano l'evaporazione dell'acqua [94]. Al fine di bloccare la crescita del micelio, al termine del periodo di incubazione, ciascun campione è stato posto in un forno ventilato per 24h a 100 °C.



Figura 54 Immagine raffigurante la fase di preparazione del substrato ed inoculazione del fungo.

7.3 Risultati

La figura 55 mostra la differente crescita del micelio nei diversi substrati. Il campione M2 dopo il primo giorno dalla inoculazione mostra la prima formazione di micelio (Fig. 55 M2.1) a differenza del campione M1 che non mostra ancora formazioni di micelio. Dopo 5 giorni il micelio nel campione M2 ha rivestito il 40% della superficie (Fig. 55 M2.5) mentre nel campione M1 inizia a comparire (Fig. 55 M1.5). Dopo 10 giorni il campione M1, con solo granuli di arancia non ha visto una significativa crescita del micelio (Fig. 55 M1.10), mentre il campione M2, con il 50% di fibre di legno, mostra più del 90% della superficie rivestita dal micelio (Fig. M2.10). La differente rapidità di crescita tra i due campioni mostra che le fibre di legno costituiscono un substrato più idoneo per lo sviluppo del micelio. Tuttavia, la crescita, seppur di modeste dimensioni, del micelio nel substrato costituito solo da bucce di arancia dimostra la presenza di sostanze digeribili dal fungo e quindi potenzialmente utilizzabile.

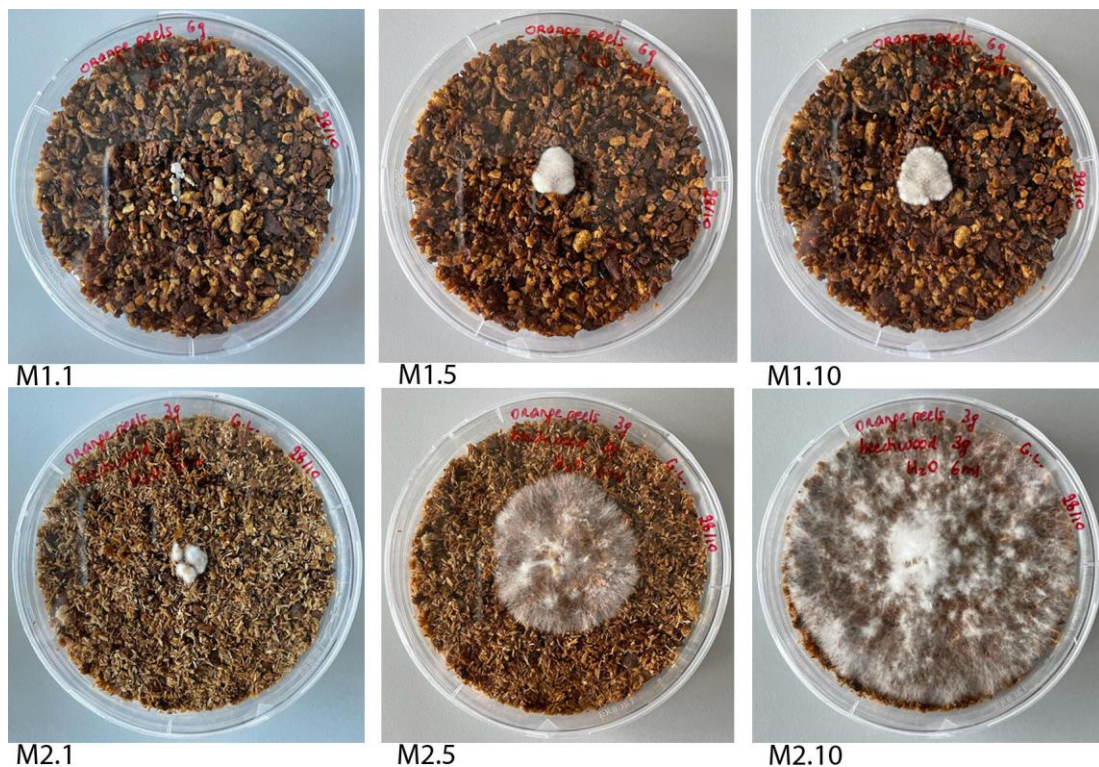


Figura 55 Campioni M1 e M2 costituiti rispettivamente dal 100% di bucce di arancia e 50% di bucce e 50% di truciolo di legno. Dopo 1 giorno (x.1), 5 giorni (x.5) e dopo 10 giorni (x.10) dalla inoculazione del fungo.

La differente rapidità di crescita può essere ricondotta alla formazione di un ambiente sfavorevole al suo sviluppo. Una possibile motivazione è riscontrabile dal ph del substrato. Il fungo *Granoherma lucidum* necessita, infatti, di un ph compreso tra 5 e 5,5. La misura sui granuli di arancia essiccati ha mostrato un ph di 3,54, al di sotto del limite utile per la crescita dei microorganismi (Fig. 56).



Figura 56 Analisi ph della miscela ricavata dal campione M1

Il ph più elevato del campione M2 ha mostrato una crescita molto più rapida del micelio. In particolare, dopo 7 giorni di incubazione il campione M2, composto dal 50% di granuli di arancia e 50% di fibre di legno, ha mostrato una crescita del micelio maggiore rispetto al campione M3, composto al 100% da fibre di legno (Fig. 57). Una possibile motivazione è riconducibile alla maggiore dimensione dei granuli di buccia di arancia e quindi una maggiore presenza d'aria all'interno del pannello; la presenza di ossigeno favorisce la crescita del micelio e quindi ne aumenta la rapidità.

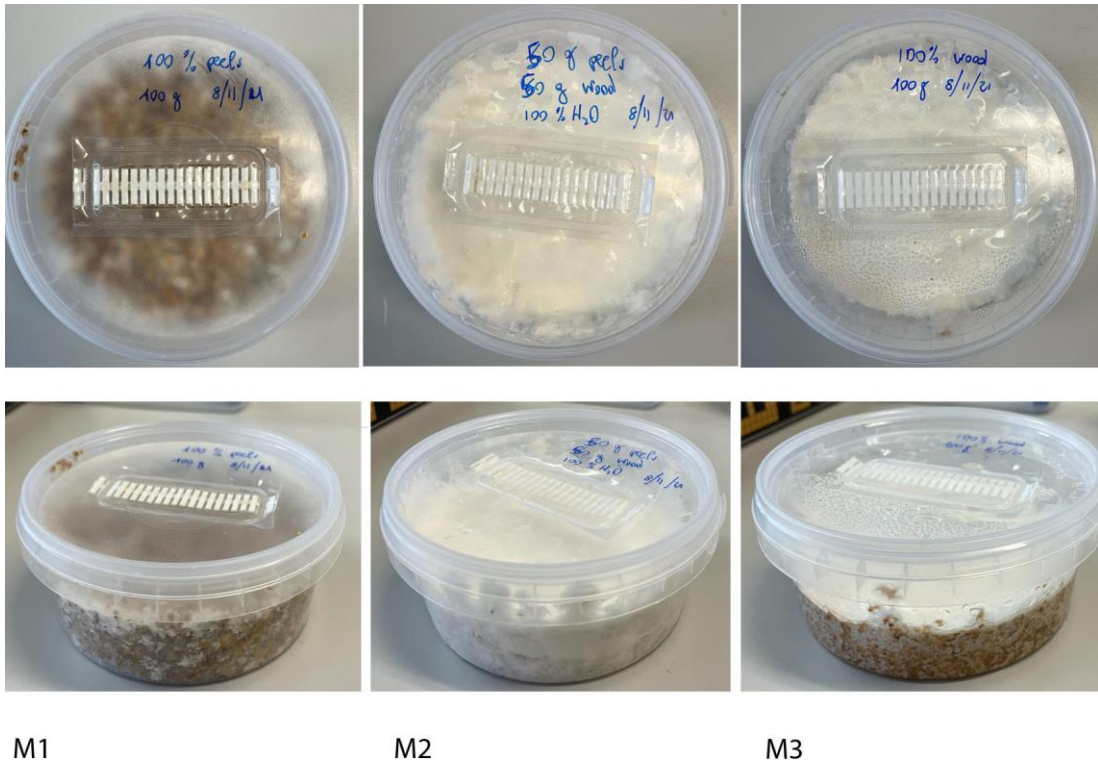


Figura 57 Immagini campioni M1 (a sinistra), M2 (centro) ed M3 (a destra)

In conclusione è possibile affermare che la migliore composizione per la realizzazione di pannelli legati mediante micelio vedono l'utilizzo come substrato del 50% di bucce di arancia essiccate e 50% fibre di legno (Fig. 58); futuri avanzamenti della ricerca prevedono lo sviluppo di un piano di prove per analizzarne le proprietà termiche, meccaniche, acustiche e di assorbimento d'acqua.

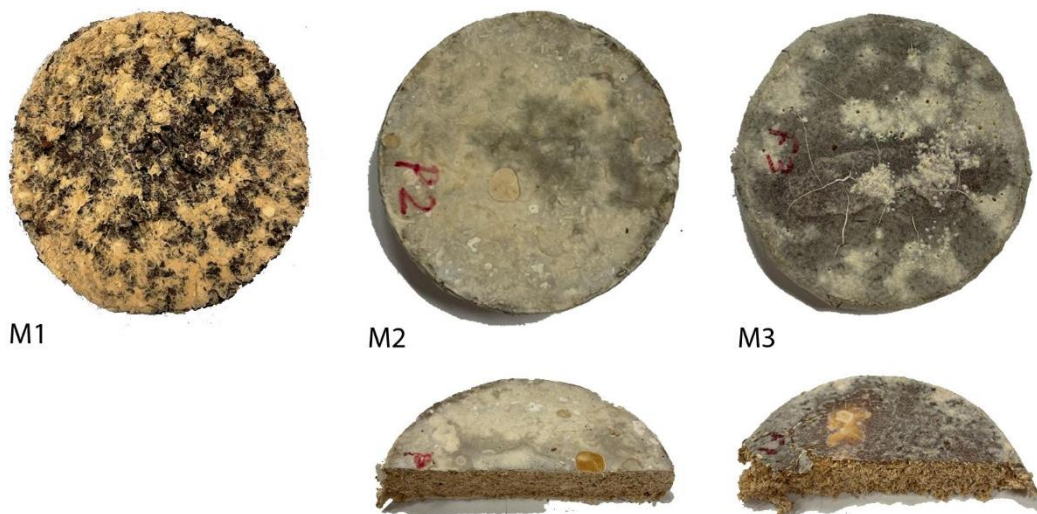


Figura 58 Immagini dei provini M1, M2 e M3 dopo l'essiccazione in forno.

8. Analisi economica

8.1 Scenario industriale

L'obiettivo di questo capitolo è analizzare la convenienza economica nella produzione di un materiale per edilizia basato sui sottoprodotti degli agrumi. Riguardo i rifiuti di origine naturale oggi, dei 43,4 milioni di tonnellate prodotti in Europa, solo il 2,5% viene conferito a discarica, il 5% è destinata all'incenerimento, mentre il restante 90% è smaltito mediante il compostaggio e altri processi di trasformazione biologica [129]. È opportuno domandarsi se una tipologia differente di riutilizzo possa, in termini economici, garantire uno sfruttamento più appetibile di questi materiali. Quando usati per costruire componenti per l'edilizia, i rifiuti organici, vengono sottoposti ad un processo di "aggiornamento funzionale" che ne aumenta sicuramente il valore economico. In riferimento ad un edificio residenziale, il costo dei materiali rappresenta infatti il 42% dei costi totali di costruzione, intervenire quindi sul prezzo di tali componenti ridurrebbe considerevolmente i costi di costruzione.

Uno studio condotto presso il Dipartimento di Economia dell'Università di Catania [200], ha confrontato il costo di produzione dei materiali isolanti più diffusi in commercio con il possibile costo produttivo di un pannello realizzato utilizzando i sottoprodotti degli agrumi. Tra i materiali più utilizzati in edilizia vi sono la lana di legno e la lana di roccia. Il pannello in fibra di legno, con una conducibilità termica di 0,040 - 0,060 W/mK ha un costo di circa 11,5 €/m². La lana di roccia, con una conducibilità termica di 0.037 - 0.040 ha costo di circa 10-20 €/m². Dal punto di vista ambientale è importante sottolineare che il sottoprodotto degli agrumi rappresenta un problema gravoso per l'intera industria, un rifiuto ingombrante e difficile da smaltire, che spesso rappresenta una causa di reati ambientali. Come già evidenziato, le iniziative riguardanti l'uso del sottoprodotto sono molte, ma purtroppo non sono sufficienti per

smaltire le enormi quantità prodotte, che in Italia si aggira sulle 700.000 tonnellate all'anno, 340.000 delle quali prodotte solo in Sicilia, con un costo per lo smaltimento di circa 10.000.000 di euro.

La proposta di utilizzare i sottoprodotti dell'arancia come materiale isolante avrebbe due principali vantaggi: economico e ambientale. Per quanto riguarda quello economico, è fondamentale sottolineare che lo smaltimento del pastazzo rappresenta un costo per le aziende del settore agricolo. Il costo di smaltimento è di circa 25-30 euro a tonnellata. Di conseguenza, utilizzare questo materiale come materia prima seconda per la produzione dei pannelli sarebbe gratuita, a meno dei costi di trasporto, e consentirebbe di abbattere i costi di dismissione. La fase di essiccazione è importante perché, l'evaporazione dell'acqua e la diminuzione dell'umidità, consentono una riduzione del volume e quindi una diminuzione dei costi di trasporto. Il costo di essiccazione, di € 25-30 per tonnellata, può essere ridotto acquistando un impianto di essiccazione e pressatura. Questo investimento avrebbe un costo di circa € 40.000 - 50.000 ma sarebbe ammortizzato durante l'utilizzo. Il costo del trasporto, nel caso di vicinanza agli impianti di lavorazione degli agrumi, si stima intorno ai 500 euro a tratta, con una quantità di pastazzo di 20-25 tonnellate per tratta. Da questa analisi il costo di produzione dei pannelli sarebbe di circa 7-8 €/m².

8.2 Analisi del processo produttivo

L'applicazione della metodologia descritta consente di ottenere un pannello autoportante dalle caratteristiche estetiche simili al sughero. Il settore commerciale in cui viene inserito è quello dell'architettura sostenibile e dei materiali naturali. Le buone proprietà termiche del materiale ne consentono l'utilizzo in edilizia, come pannello di isolamento termico delle pareti di tamponatura esterna degli edifici. Altre applicazioni del prodotto potrebbero essere un utilizzo come rivestimento di pareti o come pannello per controsoffitti, nonché nel settore dell'arredamento e del design. La

diffusione commerciale del pannello dagli agrumi può essere garantita, oltre che dalle buone prestazioni termiche ed acustiche, dalle ottime qualità estetiche ed ambientali (Fig. 59). Il prodotto può essere utilizzato per la decorazione di ambienti interni mediante rivestimenti e con la realizzazione di arredi ed oggetti di alto valore ambientale.

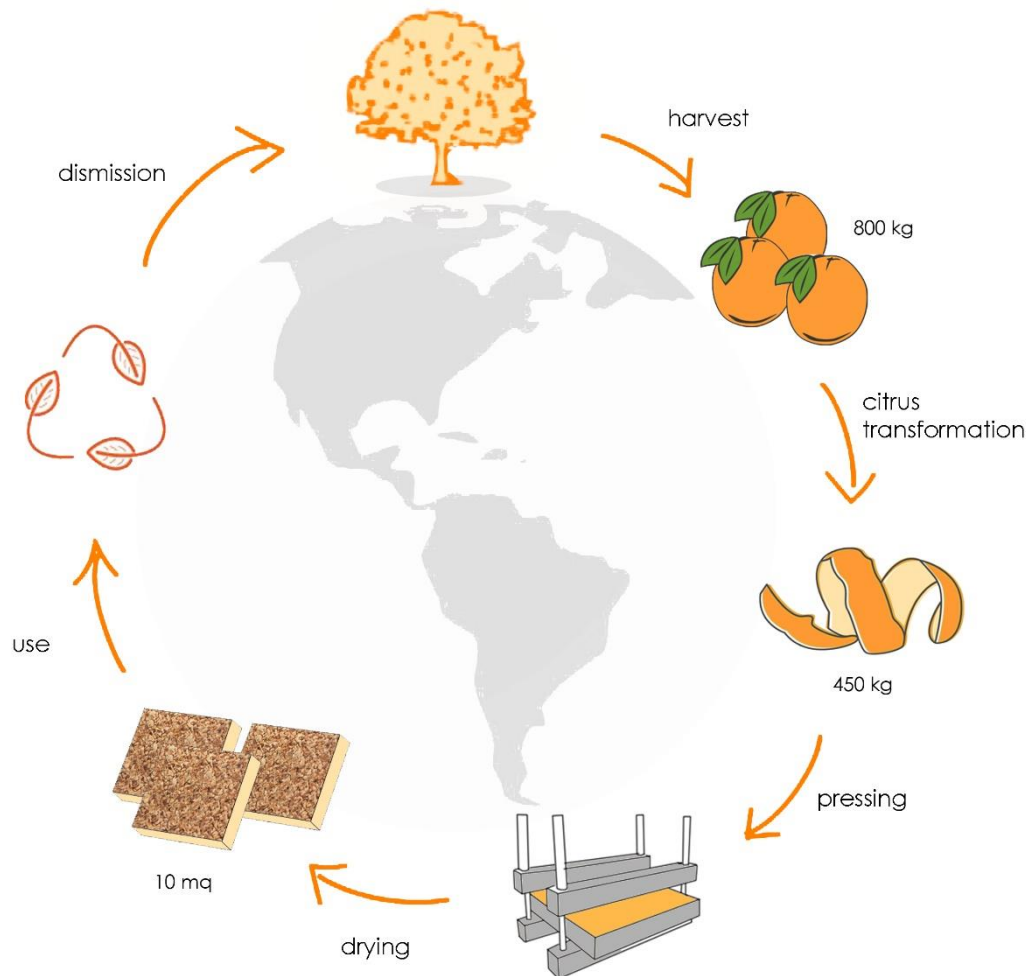


Figura 59 Abstract grafico del progetto

Il risultato potrebbe essere la commercializzazione nelle molteplici aree del mondo in cui è diffusa la produzione e trasformazione degli agrumi, al fine di ottenere un prodotto a km0. Costruire con materiali locali consente di ridurre drasticamente l'impatto ambientale delle costruzioni [201]. L'ottima conducibilità termica e

l'assorbimento acustico sono le caratteristiche che rendono questo materiale paragonabile ai prodotti attualmente in commercio; può essere utilizzato come pannello di controsoffitto o rivestimento, può essere inserito dentro le murature come coibente o può essere utilizzato come pannello sospeso. Una prima applicazione potrebbe essere nel settore dell'arredamento, in particolare nella realizzazione di oggetti o componenti dall'alto valore ambientale.

L'analisi SWOT (Fig. 60) mostra i punti di forza ed i punti di debolezza nell'utilizzo di questo materiale a livello industriale. Tra i punti di forza troviamo la sostenibilità e riciclabilità della materia prima, oltre il basso costo di reperimento dei materiali e di produzione. I punti di debolezza sono prevalentemente legati ad ulteriori sviluppi di cui la ricerca necessita. Il Technology Readiness Level si trova nello stadio in cui, tramite le indagini e test sui prototipi, si è convalidata l'applicazione in ambito di laboratorio. Sviluppi futuri vedono la convalida del processo in ambito industriale, con l'ausilio di partner industriali che possano valutarne l'applicazione del settore commerciale più indicato. La validazione e la produzione del pannello per edilizia richiederanno ulteriori investimenti. In particolare, l'analisi del processo e della produzione industriale rappresenta un importante step per l'industrializzazione del prodotto. Inoltre, le certificazioni ed etichettature ambientali saranno necessarie per la sua commercializzazione. Lo sviluppo del progetto mediante un partner industriale consentirebbe di adeguare la produzione del materiale alle tradizionali attrezzature in possesso e di ridurre gli investimenti necessari. Gli studi futuri della ricerca necessitano di contributi attivi da parte di aziende e partner industriali per lo sviluppo in una filiera produttiva e commerciale. Oggi, le imprese di trasformazione agricola conferiscono gli scarti in punti di raccolta distribuiti nel territorio, una potenziale impresa interessata alla ricerca potrebbe reperire gli scarti a basso costo ed implementare un processo produttivo per la realizzazione di questi pannelli.

	PUNTI DI FORZA	PUNTI DI DEBOLEZZA
INTERNI	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizzo di sottoprodotti agricoli inutilizzati; - Facile reperimento della materia prima; - Facilità di produzione; - Basso costo di produzione; - Riduzione delle emissioni di CO₂; - Materiale ecosostenibile; - Buone prestazioni termiche; - Miglioramento delle prestazioni energetiche ed ambientali dell'edificio; - Riciclabilità. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessità di pianificare un processo produttivo; - Implementazione di caratteristiche tecniche; - Vulnerabilità agli agenti esterni; - Assenza di etichettature.
ESTERNI	<ul style="list-style-type: none"> - Valorizzazione dei prodotti del territorio; - Sviluppo di edilizia ecosostenibile; - Risposta alla crescente richiesta di materiali termoisolanti; - Buon rendimento economico; - Sviluppo economia circolare. 	<ul style="list-style-type: none"> - Basso interesse al tema della sostenibilità; - Concorrenza di materiali sintetici più performanti; - Interesse delle industrie a mantenere prodotti e tecniche tradizionali.
	OPPORTUNITÀ	MINACCE

Figura 60 Analisi Swot

Le potenziali aziende coinvolte in questa ricerca producono materiali da costruzione per la bioedilizia. Ad esempio imprese che producono pannelli in sughero o che sviluppano la ricerca su nuovi materiali sostenibili potrebbero essere interessate.

La figura 61 mostra l'esempio di una azienda siciliana che trasforma ogni anno 78.000.000 Kg di arance ogni anno. Da questa trasformazione il 50% rappresenta un sottoprodotto. Il seguente studio ipotizza di destinare il 50% di questo sottoprodotto alla creazione di materiali per l'edilizia. Il restante 50%, infatti, può essere destinato ai processi tradizionalmente applicati, come l'estrazione di oli o il biogas.

L'indice di trasformazione ottenuto dalle prove di laboratorio è di 105 kg per ogni m² di pannello ipotizzando uno spessore del pannello medio di 4 cm. In via cautelativa, il ricavo al mq dalle vendite del pannello è stato considerato di 4 euro. Riguardo i costi

di gestione sono stati considerati un investimento di 2.500.000 euro, da ammortizzare in 7 anni, e l'assunzione di 6 nuovi dipendenti oltre le spese di stabilimento e gli oneri fiscali. I calcoli mostrano come i costi per la gestione e manutenzione dell'impianto sono inferiori ai ricavi derivanti dalla vendita dei pannelli e che un utile netto annuo di 85.741 euro si avrebbero nei primi 7 anni di esercizio dell'impianto.

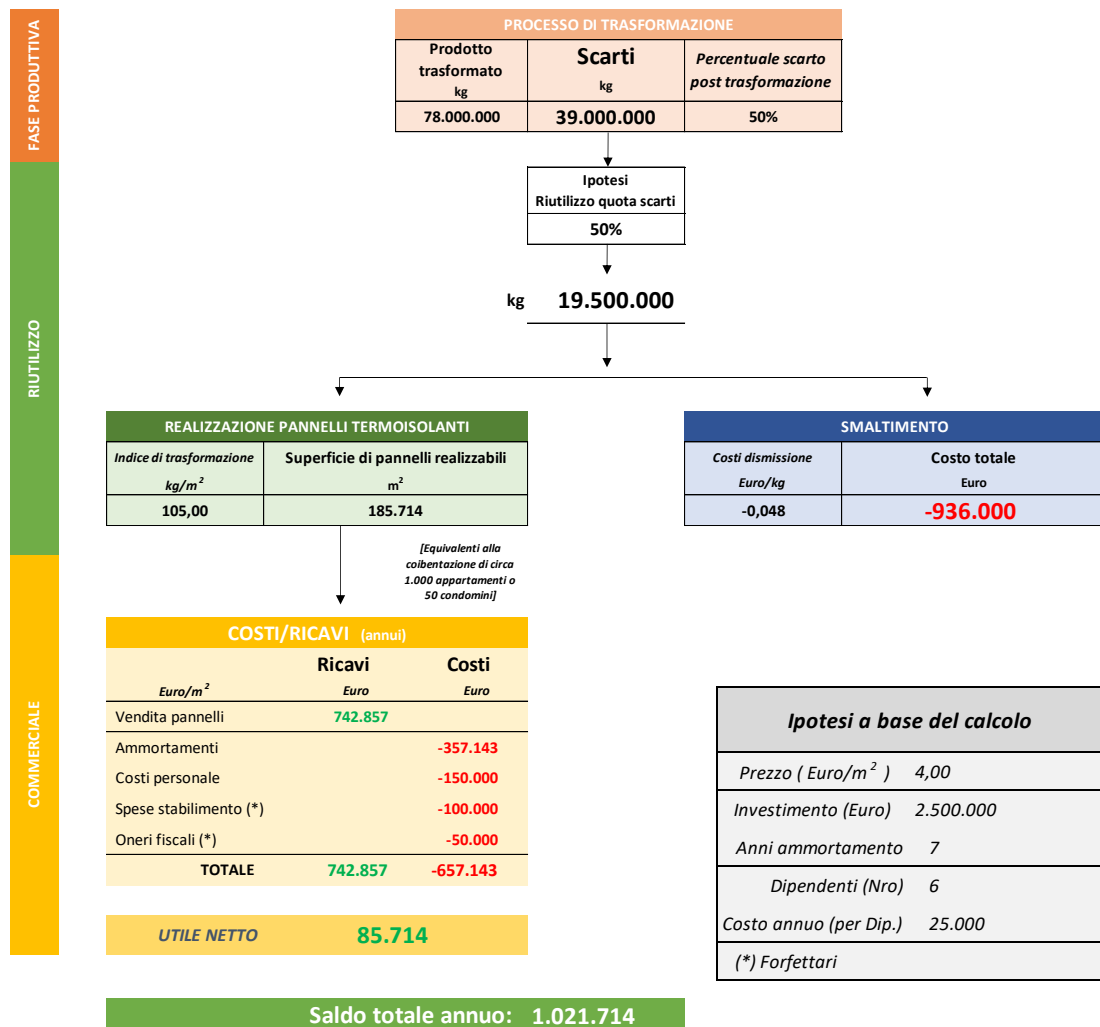


Figura 61 Schema di business plan formulato sulla base di una produzione annua di una azienda siciliana

Il restante 50% dei sottoprodotti è stato ipotizzato come conferimento in discarica, con un conseguente costo di smaltimento di 936.000 euro. Questo dato, se confrontato con il ricavo ottenuto dalla vendita dei pannelli, mostra una ottima opportunità per una azienda agricola che vuole investire in questo settore produttivo. Il seguente modello, come prevedibile, funziona solo se inserito in un settore

commerciale capace di assorbire i quantitativi di materiale prodotto. Lo sviluppo di questa ricerca segue la tendenza globale verso un progresso sostenibile dei materiali da costruzione. La sensibilizzazione della popolazione verso le tematiche ambientali è in aumento ed una politica ambientalista da parte delle aziende sicuramente facilita questo passaggio. Il presupposto di impegnare annualmente i quantitativi sopra mostrati viene considerato valido in un'ottica di transizione verso l'utilizzo di materiali naturali in edilizia.



Figura 62 Schema funzionale del progetto



Figura 63 Immagine raffigurante pannelli dai sottoprodotti degli agrumi

9. Prospettive future

La prospettiva futura di questo studio, a partire dalla realtà territoriale siciliana, è quella di arricchire i sistemi costruttivi esistenti mediante l'individuazione di un processo produttivo innovativo che vede l'applicazione di un materiale fino ad oggi mai ipotizzato in edilizia. Come accennato nel paragrafo precedente, uno degli aspetti che dovranno successivamente essere analizzati in maniera approfondita sono proprio quelli legati alla valutazione dell'intero ciclo di vita del prodotto, con particolare riferimento al suo smaltimento, oltre che all'analisi di alcune proprietà fisico-chimiche sul prototipo sviluppato nell'ambito della ricerca. Tra le varie evoluzioni della ricerca, una potrebbe essere l'individuazione e lo studio del processo produttivo, dall'approvvigionamento del sottoprodotto fino alla messa in opera. La cosiddetta "industrializzazione del prodotto" sarà sicuramente il passo necessario per trasformare il prototipo fin qui sviluppato in un prodotto vero e proprio, in grado di essere anche commercializzato. Il processo, che viene avviato con la definizione di tutte le caratteristiche del prototipo e sottoponendo l'elemento alle prove necessarie, porterà al perfezionamento di tutta la filiera produttiva.

Prima di tutto dovranno essere individuate le prestazioni attese del prodotto, alla luce delle indicazioni fornite e delle valutazioni richieste dall'Unione Europea. Stabilite le prestazioni del sistema è possibile valutare il prodotto sottoponendolo ad una serie di prove che verifichino se le prestazioni richieste siano soddisfatte, se il comportamento funzionale e prestazionale lo renda idoneo ad essere impiegato per lo scopo previsto e per attestarne la conformità alla normativa europea. La valutazione del prodotto segue, quindi, le procedure e la tempistica stabilite da un "programma di prove", definito in funzione delle prestazioni richieste, della complessità del sistema e di apposite indicazioni normative. Il programma di prove così definito deve contemplare

tutte le procedure, le tecniche o i metodi adottati e gli obiettivi da raggiungere. In sintesi tutte le valutazioni o le certificazioni rientrano in due categorie principali che distinguono le certificazioni o valutazioni obbligatorie da quelle volontarie. Gli esiti dell'esecuzione di questo programma devono essere, poi, valutati in relazione alla competitività (tecnologica e commerciale) del prodotto rispetto a quelli dei competitors presenti sul mercato. Infine, completate le valutazioni, il prodotto può essere certificato dall'istituto specializzato e avviato verso l'ultima fase che prevede la progettazione della filiera di produzione. Tutti i dati e le valutazioni raccolte potranno essere organizzati in una scheda tecnica che accompagna il sistema nel suo ingresso sul mercato delle costruzioni. Nelle norme UNI 8690/3 e UNI 9038 la scheda è definita come "insieme coordinato di informazioni tecniche redatte in un ordine prestabilito secondo certe modalità e per determinati scopi". Tale documento deve contenere: le caratteristiche tecniche, le istruzioni per il montaggio e la manutenzione, le prescrizioni normative rispettate e le "eventuali" certificazioni.

In sintesi, nel breve termine, dal potenziale di questi materiali naturali ne deriverebbe una intensificazione dello studio e sviluppo in laboratorio. Introdurre nuovi materiali nel processo costruttivo deve necessariamente superare diversi ostacoli, oltre che a livello tecnico, anche di carattere normativo. Un approccio a nuove possibili tradizioni deve, quindi, essere supportata da diversi studi in merito. Nel lungo termine, le prospettive vedono la produzione industriale e l'utilizzo di questi nuovi materiali brevettati.

Un altro sviluppo della ricerca può essere finalizzato all'analisi delle prestazioni del materiale ottenuto dalla crescita del micelio nel substrato degli agrumi. Oltre il miglioramento del processo produttivo, possono essere valutate le prestazioni termiche, meccaniche, acustiche e di durabilità. Una conoscenza completa delle proprietà consentirà il confronto di questi due nuovi materiali, nonché il possibile deposito di altri brevetti.

10. Conclusioni

La ricerca oggetto di questa tesi si inserisce tra le soluzioni volte ad integrare nuovi materiali nel processo edilizio, con riferimento ai sottoprodotti della filiera alimentare odierna. Dallo studio dello stato dell'arte emerge che il legame tra risorse naturali, rifiuti e materiali da costruzione è molto stretto. Negli ultimi anni gli studi condotti sul riutilizzo dei sottoprodotti agricoli in edilizia sono incrementati, dimostrando un interesse crescente in questo settore. Nonostante le numerose ricerche su questi nuovi bio-materiali, nessuna di queste fino ad oggi ha analizzato l'utilizzo dei sottoprodotti degli agrumi. La Sicilia rappresenta il principale produttore di agrumi in Italia, con una grande concentrazione di aziende di trasformazione. I risultati della trasformazione degli agrumi non sono uno scarto, bensì un sottoprodotto da poter essere valorizzato. Tuttavia, a causa delle grandi quantità prodotte al sud Italia e dei costi elevati di smaltimento, questi sottoprodotti rappresentano un problema ambientale. Tra le varie alternative di riutilizzo, questa ricerca ne ha ipotizzato l'impiego come materiale per l'isolamento termico degli edifici. In tal senso, questi sottoprodotti potrebbero diventare un nuovo materiale da costruzione, completamente naturale, riciclabile, disponibile in grandi quantità ed a costi contenuti. Da indagini preliminari sul materiale, risulta che la conducibilità dei granuli di agrumi essiccati è comparabile con quella di altri materiali isolanti per l'edilizia derivanti da sottoprodotti dell'agricoltura. Infatti, la conducibilità termica pari a 0,06 W/mK renderebbe il prodotto utilizzabile come isolante termico per gli edifici. Inoltre, sono state condotte delle analisi con microscopio elettronico per osservare la composizione del materiale. A differenza dei comuni materiali da costruzione per l'isolamento termico, il sottoprodotto dell'agrume è eterogeneo. I risultati delle indagini SEM mostrano due strati differenti in termini di forma e consistenza. Uno strato esterno compatto, che assolve alla funzione resistente, ed uno interno spugnoso, che assolve

alla funzione di isolamento termico. Le analisi al microscopio mostrano anche interessanti somiglianze tra i granuli di arance essiccati ed i materiali commerciali come il polistirene estruso (XPS) e la perlite espansa. Queste somiglianze sono legate al tipo di microstruttura cellulare chiusa, che conferisce la proprietà coibente ai materiali. Il sottoprodotto degli agrumi in forma granulare potrebbe essere utilizzato nella formulazione di miscele, di pannelli o come riempimento di intercapedini. Riguardo la realizzazione dei campioni in forma di pannelli, i risultati hanno mostrato che è possibile produrre pannelli di particelle a buccia d'arancia senza aggiunta di sostanze chimiche e leganti, quindi completamente naturali. Sono state testate diverse tecniche realizzative dei pannelli come la pressatura a freddo, pressatura a caldo e pressatura durante il processo di essiccazione. Quest'ultima è risultata la migliore per i risultati ottenuti dai test di laboratorio. Per questo processo sono stati realizzati diversi provini dalla miscelazione di bucce umide e bucce essiccate. In base ai rapporti, sono state ottenute combinazioni di diverse percentuali che vanno da 100:0 (umido:secco), chiamato W100, a 75:25, chiamato W75. L'uso di particelle umide o secche ha notevolmente influenzato le prestazioni dei pannelli. La più alta conducibilità termica è stata raggiunta dal W75, dove la resistenza a flessione è del 63% inferiore al W100. Tuttavia, la composizione ottimale per questa applicazione si trova nel campione W100 (100% di bucce umide) dove la conducibilità termica è di 0,065 W/mK. Nonostante le interessanti proprietà del materiale, il principale svantaggio è rappresentato dalla durabilità, a causa della perdita dei legami tra le particelle in presenza d'acqua. A tal fine un possibile miglioramento del processo potrebbe essere ottenuto mediante l'integrazione del micelio. La ricerca ha infatti dimostrato che è possibile ottenere dei pannelli auto-legati mediante la crescita del micelio in un substrato formato da granuli di buccia di arancia essiccati e fibre di legno. Le proprietà idrofobiche del micelio possono migliorare il comportamento delle bucce di arancia in presenza d'acqua, pur mantenendo la composizione naturale della miscela e le caratteristiche prestazionali dei granuli.

In conclusione i risultati raggiunti con questa ricerca hanno visto la definizione di un processo innovativo oggetto di un brevetto sul prodotto e sul processo. L'utilizzo degli agrumi in edilizia non era stato fino ad oggi ipotizzato, ma conoscerne le proprietà auto-leganti e di buon isolamento termico potrebbe condurre ad un minore dispendio energetico, nonché una maggiore sensibilità ambientale nel settore delle costruzioni. Il principio di un'architettura green viene spesso interpretato in senso prettamente esteriore ed estetico. In questo caso la natura entra dentro l'edificio, nei componenti che lo costituiscono, diventando così parte integrante del costruito e rispettando pienamente i valori etici di sostenibilità ambientale. Seppur con prestazioni lievemente inferiori, l'uso di materiale a base di bucce di arance nel settore edile è auspicabile al fine di ridurre le emissioni di CO₂ ed il consumo energetico. Questo consentirebbe, oltre a consentire un passaggio reale da un modello di produzione lineare ad uno circolare, di aumentarne il valore economico rispetto alla normale dismissione. L'ipotesi di una produzione industriale, infatti, ha evidenziato una convenienza economica nella produzione dei pannelli termoisolanti, rispetto alla tradizionale dismissione basata sul trasporto in altri stabilimenti.

11. Bibliografia

- [1] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, "A review on buildings energy consumption information," *Energy Build.*, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- [2] M. Grove, "Climatic change and climatic variability: An objective decomposition," *Quat. Sci. Rev.*, vol. 271, p. 107196, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.QUASCIREV.2021.107196.
- [3] F. Yao, H. Zhu, and M. Wang, "The Impact of Multiple Dimensions of Urbanization on CO2 Emissions: A Spatial and Threshold Analysis of Panel Data on China's Prefecture-Level Cities," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 73, p. 103113, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.SCS.2021.103113.
- [4] EURIMA, "Cost-effective Climate Protection in the Building Stock of the New EU Member States. Beyond the EU Energy Performance of Buildings Directive," 2005.
- [5] M. Ibrahim, "Estimating the sustainability returns of recycling construction waste from building projects," *Sustain. Cities Soc.*, 2016, doi: 10.1016/j.scs.2016.03.005.
- [6] L. H. M. C. Vefago and J. Avellaneda, "Recycling concepts and the index of recyclability for building materials," *Resour. Conserv. Recycl.*, 2013, doi: 10.1016/j.resconrec.2012.12.015.
- [7] S. Lechtenböhmer and A. Schüring, "The potential for large-scale savings from insulating residential buildings in the EU," *Energy Effic.*, 2011, doi: 10.1007/s12053-010-9090-6.
- [8] A. Tallini and L. Cedola, "A review of the properties of recycled and waste

- materials for energy refurbishment of existing buildings towards the requirements of NZEB,” *Energy Procedia*, vol. 148, pp. 868–875, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2018.08.108.
- [9] A. Kyriakidis, A. Michael, R. Illampas, D. C. Charmpis, and I. Ioannou, “Thermal performance and embodied energy of standard and retrofitted wall systems encountered in Southern Europe,” *Energy*, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.07.124.
- [10] B. Reddy, “Sustainable materials for low carbon buildings,” *Int. J. Low-carbon Technol.*, vol. 4, pp. 175–181, 2009, doi: 10.1093/ijlct/ctp025.
- [11] C. A. Balaras, K. Droutsas, A. A. Argiriou, and D. N. Asimakopoulos, “Potential for energy conservation in apartment buildings,” *Energy Build.*, 2000, doi: 10.1016/S0378-7788(99)00028-6.
- [12] L. Aguglia, F. Carillo, F. A. Madau, and M. A. Perito, *La commercializzazione degli agrumi freschi e trasformati*. 2008.
- [13] Istituto nazionale di statistica, “6° Censimento Generale dell’Agricoltura.” Roma, 2013.
- [14] G. W. Cha *et al.*, “Evaluating recycling potential of demolition waste considering building structure types: A study in South Korea,” *J. Clean. Prod.*, vol. 256, p. 120385, May 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.120385.
- [15] M. Norouzi, M. Châfer, L. F. Cabeza, L. Jiménez, and D. Boer, “Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis,” *J. Build. Eng.*, vol. 44, p. 102704, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.102704.
- [16] M. A. Gardetti, “Introduction and the concept of circular economy,” in *Circular Economy in Textiles and Apparel*, 2019.
- [17] Arup, *The Circular Economy in the Built Environment*. London, 2016.

- [18] Legambiente, "Rapporto dell'Osservatorio Recycle. 100 Materiali per una nuova edilizia," 2016.
- [19] S. Nasier, "Utilization of recycled form of concrete, E-wastes, glass, quarry rock dust and waste marble powder as reliable construction materials," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, pp. 3231–3234, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.12.381.
- [20] L. A. Tercero Espinoza, "Critical appraisal of recycling indicators used in European criticality exercises and circularity monitoring," *Resour. Policy*, vol. 73, p. 102208, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.RESOURPOL.2021.102208.
- [21] D.M. 11 Ottobre 2017, "Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici." .
- [22] T. Cellura, *L'applicazione dei criteri ambientali minimi negli appalti pubblici*. Santarcangelo di Romagna, 2018.
- [23] G. P. Hammond and C. I. Jones, "Embodied energy and carbon in construction materials," *Proc. Inst. Civ. Eng. - Energy*, 2008, doi: 10.1680/ener.2008.161.2.87.
- [24] Legambiente, "L'economia circolare nel settore delle costruzioni, Rapporto dell'Osservatorio Recycle," 2017.
- [25] C. Zhang *et al.*, "Recycling potential in building energy renovation: A prospective study of the Dutch residential building stock up to 2050," *J. Clean. Prod.*, vol. 301, p. 126835, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.126835.
- [26] Quotidiano sulla sostenibilità Ambientale, "<https://www.rinnovabili.it/featured/citta-sostenibili-futuro-rifiuti-333/>," 2015. .
- [27] J. Kim, "Properties of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume mix design," *Constr. Build. Mater.*, vol. 301, p. 124091, Sep.

- 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124091.
- [28] B. Wang, L. Yan, Q. Fu, and B. Kasal, "A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 171, p. 105565, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2021.105565.
- [29] L. D. D. Harvey, "Iron and steel recycling: Review, conceptual model, irreducible mining requirements, and energy implications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 138, p. 110553, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2020.110553.
- [30] P. W. Griffin and G. P. Hammond, "The prospects for 'green steel' making in a net-zero economy: A UK perspective," *Glob. Transitions*, vol. 3, pp. 72–86, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.GLT.2021.03.001.
- [31] W. Ferdous *et al.*, "Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction – A review on global waste generation, performance, application and future opportunities," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 173, p. 105745, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2021.105745.
- [32] M. I. Shahidul, M. L. Malcolm, M. S. J. Hashmi, and M. H. Alhaji, "Waste Resources Recycling in Achieving Economic and Environmental Sustainability: Review on Wood Waste Industry," *Encycl. Renew. Sustain. Mater.*, pp. 965–974, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11275-5.
- [33] L. R. Caldas, A. B. Saraiva, A. F. P. Lucena, M. Y. Da Gloria, A. S. Santos, and R. D. T. Filho, "Building materials in a circular economy: The case of wood waste as CO₂-sink in bio concrete," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 166, p. 105346, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2020.105346.
- [34] V. Uemura Silva *et al.*, "Circular vs. linear economy of building materials: A case study for particleboards made of recycled wood and biopolymer vs. conventional particleboards," *Constr. Build. Mater.*, vol. 285, p. 122906, May

- 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122906.
- [35] F. Berger, F. Gauvin, and H. J. H. Brouwers, "The recycling potential of wood waste into wood-wool/cement composite," *Constr. Build. Mater.*, vol. 260, p. 119786, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119786.
- [36] W. Kaminsky, "Chemical recycling of plastics by fluidized bed pyrolysis," *Fuel Commun.*, vol. 8, p. 100023, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.JFUECO.2021.100023.
- [37] M. Kazemi, S. Faisal Kabir, and E. H. Fini, "State of the art in recycling waste thermoplastics and thermosets and their applications in construction," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 174, p. 105776, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2021.105776.
- [38] S. Schiavoni, F. D'Alessandro, F. Bianchi, and F. Asdrubali, "Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.045.
- [39] S. Panyakaew and S. Fotios, "Agricultural waste materials as thermal insulation for dwellings in Thailand: Preliminary results," 2008.
- [40] F. Hernández-Olivares, M. R. Bollati, M. Del Rio, and B. Parga-Landa, "Development of cork-gypsum composites for building applications," *Constr. Build. Mater.*, 1999, doi: 10.1016/S0950-0618(99)00021-5.
- [41] L. Gil, "Cork composites: A review," *Materials*. 2009, doi: 10.3390/ma2030776.
- [42] F. Barreca and C. R. Fichera, "Thermal insulation performance assessment of agglomerated cork boards," *Wood Fiber Sci.*, 2016.
- [43] T. M. Tiza, S. K. Singh, L. Kumar, M. P. Shettar, and S. P. Singh, "Assessing the potentials of Bamboo and sheep wool fiber as sustainable construction materials: A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 47, pp. 4484–4489, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.05.322.

- [44] K. W. Corscadden, J. N. Biggs, and D. K. Stiles, "Sheep's wool insulation: A sustainable alternative use for a renewable resource?," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 86, pp. 9–15, May 2014, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2014.01.004.
- [45] D. Bosia *et al.*, "Sheep Wool for Sustainable Architecture," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 315–320, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.11.650.
- [46] T. Cardinale, G. Arleo, F. Bernardo, A. Feo, and P. De Fazio, "Thermal and mechanical characterization of panels made by cement mortar and sheep's wool fibres," *Energy Procedia*, vol. 140, pp. 159–169, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2017.11.132.
- [47] R. Alyousef *et al.*, "Utilization of sheep wool as potential fibrous materials in the production of concrete composites," *J. Build. Eng.*, vol. 30, p. 101216, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.JOBE.2020.101216.
- [48] O. Dénes, I. Florea, and D. L. Manea, "Utilization of Sheep Wool as a Building Material," *Procedia Manuf.*, vol. 32, pp. 236–241, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.02.208.
- [49] M. Mehravar, A. Veshkini, S. Veisheh, and R. Fayaz, "Physical properties of straw bale and its effect on building energy conservation and carbon emissions in different climatic regions of Iran," *Energy Build.*, vol. 254, p. 111559, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2021.111559.
- [50] S. Liuzzi, C. Rubino, F. Martellotta, P. Stefanizzi, C. Casavola, and G. Pappalettera, "Characterization of biomass-based materials for building applications: The case of straw and olive tree waste," *Ind. Crops Prod.*, vol. 147, p. 112229, May 2020, doi: 10.1016/J.INDCROP.2020.112229.
- [51] A. K. Mohanty, S. Vivekanandhan, J.-M. Pin, and M. Misra, "Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations," *Science*

- (80-), vol. 362, no. 6414, pp. 536–542, 2018.
- [52] H. Ye *et al.*, “Bio-based composites fabricated from wood fibers through self-bonding technology,” *Chemosphere*, vol. 287, p. 132436, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132436.
- [53] P. Glé *et al.*, “Densities of hemp shiv for building: From multiscale characterisation to application,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 164, p. 113390, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.INDCROP.2021.113390.
- [54] P. Aversa *et al.*, “Hemp-lime buildings: thermo-hygrometric behaviour of two case studies in North and South Italy,” *Energy Build.*, vol. 247, p. 111147, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2021.111147.
- [55] A. Arrigoni, R. Pelosato, P. Melià, G. Ruggieri, S. Sabbadini, and G. Dotelli, “Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks,” *J. Clean. Prod.*, vol. 149, pp. 1051–1061, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.02.161.
- [56] T. Jami, S. R. Karade, and L. P. Singh, “A review of the properties of hemp concrete for green building applications,” *J. Clean. Prod.*, vol. 239, p. 117852, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.117852.
- [57] F. Iucolano, B. Liguori, P. Aprea, and D. Caputo, “Thermo-mechanical behaviour of hemp fibers-reinforced gypsum plasters,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 185, pp. 256–263, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.07.036.
- [58] M. J. Taufiq, M. R. Mansor, and Z. Mustafa, “Characterisation of wood plastic composite manufactured from kenaf fibre reinforced recycled-unused plastic blend,” *Compos. Struct.*, vol. 189, pp. 510–515, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.01.090.

- [59] S. E. Samaei, U. Berardi, P. Soltani, and E. Taban, "Experimental and modeling investigation of the acoustic behavior of sustainable kenaf/yucca composites," *Appl. Acoust.*, vol. 183, p. 108332, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.APACOUST.2021.108332.
- [60] H. Park, J. Byun, and J. Han, "Economically feasible thermochemical process for methanol production from kenaf," *Energy*, vol. 230, p. 120729, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.120729.
- [61] P. Lopez Hurtado, A. Rouilly, V. Vandebossche, and C. Raynaud, "A review on the properties of cellulose fibre insulation," *Build. Environ.*, vol. 96, pp. 170–177, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2015.09.031.
- [62] S. A. Siddiqui, *A handbook on cellulose insulation*. Krieger Publishing Company, 1989.
- [63] R. K. Pal, P. Goyal, and S. Sehgal, "Effect of cellulose fibre based insulation on thermal performance of buildings," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, pp. 5778–5781, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.02.749.
- [64] C. Arslan, O. Gencel, I. Borazan, M. Sutcu, and E. Erdogmus, "Effect of waste-based micro cellulose fiber as pore maker on characteristics of fired clay bricks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 300, p. 124298, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124298.
- [65] F. Year, "World survey on textiles & nonwovens," *Fiber Year Consult.*, 2018.
- [66] J. M. Hawley, "Textile recycling: A systems perspective," in *Recycling in textiles*, Woodhead Publishing Limited, UK, 2006.
- [67] K. W. Lee, J. H. Wong, and J. H. Zhang, "J. of Materials Processing Technology," 2000.
- [68] C. Rubino, S. Liuzzi, P. Stefanizzi, and F. Martellotta, "Textile wastes in building sector: A review. Model," *Meas. Control B*, vol. 87, pp. 172–179, 2018.

- [69] C. A. Echeverria, W. Handoko, F. Pahlevani, and V. Sahajwalla, "Cascading use of textile waste for the advancement of fibre reinforced composites for building applications," *J. Clean. Prod.*, vol. 208, pp. 1524–1536, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.227.
- [70] Y. Lee and C. Joo, "Sound absorption properties of recycled polyester fibrous assembly absorbers," *AUTEX Res. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 78–84, 2003.
- [71] P. Sadrolodabae, J. Claramunt, M. Ardanuy, and A. de la Fuente, "Characterization of a textile waste nonwoven fabric reinforced cement composite for non-structural building components," *Constr. Build. Mater.*, vol. 276, p. 122179, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.122179.
- [72] R. Atiénzar-Navarro, M. Bonet-Aracil, J. Gisbert-Payá, R. del Rey, and R. Picó, "Sound absorption of textile fabrics doped with microcapsules," *Appl. Acoust.*, vol. 164, p. 107285, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.APACOUST.2020.107285.
- [73] E. Witczak, I. Jasińska, M. Lao, I. Krawczyńska, and I. Kamińska, "The influence of structural parameters of acoustic panels textile fronts on their sound absorption properties," *Appl. Acoust.*, vol. 178, p. 107964, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.APACOUST.2021.107964.
- [74] D. Rajput, S. S. Bhagade, S. P. Raut, R. V. Ralegaonkar, and S. A. Mandavgane, "Reuse of cotton and recycle paper mill waste as building material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 34, pp. 470–475, 2012.
- [75] Z. Kamble and B. K. Behera, "Sustainable hybrid composites reinforced with textile waste for construction and building applications," *Constr. Build. Mater.*, vol. 284, p. 122800, May 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122800.
- [76] M. Basili, F. Vestroni, and G. Marcari, "Brick masonry panels strengthened with textile reinforced mortar: experimentation and numerical analysis," *Constr. Build. Mater.*, vol. 227, p. 117061, Dec. 2019, doi:

- 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117061.
- [77] M. S. Hossain, S. C. Das, J. M. M. Islam, M. A. Al Mamun, and M. A. Khan, "Reuse of textile mill ETP sludge in environmental friendly bricks – effect of gamma radiation," *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 151, pp. 77–83, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.RADPHYSHEM.2018.05.020.
- [78] P. Sadrolodabae, J. Claramunt, M. Ardanuy, and A. de la Fuente, "Mechanical and durability characterization of a new textile waste micro-fiber reinforced cement composite for building applications," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 14, p. e00492, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.CSCM.2021.E00492.
- [79] A. Gounni *et al.*, "Thermal and economic evaluation of new insulation materials for building envelope based on textile waste," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 149, pp. 475–483, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.12.057.
- [80] H. Singh, J. I. P. Singh, S. Singh, V. Dhawan, and S. K. Tiwari, "A Brief Review of Jute Fibre and Its Composites," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 14, pp. 28427–28437, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.MATPR.2018.10.129.
- [81] A. Chatterjee, S. Kumar, and H. Singh, "Tensile strength and thermal behavior of jute fibre reinforced polypropylene laminate composite," *Compos. Commun.*, vol. 22, p. 100483, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.COCO.2020.100483.
- [82] N. M. Aly, H. S. Seddeq, K. Elnagar, and T. Hamouda, "Acoustic and thermal performance of sustainable fiber reinforced thermoplastic composite panels for insulation in buildings," *J. Build. Eng.*, vol. 40, p. 102747, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.102747.
- [83] M. Raj, S. Fatima, and N. Tandon, "Recycled materials as a potential replacement to synthetic sound absorbers: A study on denim shoddy and waste jute fibers," *Appl. Acoust.*, vol. 159, p. 107070, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.APACoust.2019.107070.

- [84] E. A. Nurdiah, "The Potential of Bamboo as Building Material in Organic Shaped Buildings," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 216, pp. 30–38, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.SBSPRO.2015.12.004.
- [85] Z. Huang, Y. Sun, and F. Musso, "Assessment of bamboo application in building envelope by comparison with reference timber," *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 844–860, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.09.026.
- [86] S. Ge *et al.*, "Processed Bamboo as a Novel Formaldehyde-Free High-Performance Furniture Biocomposite," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, no. 27, pp. 30824–30832, Jul. 2020, doi: 10.1021/acsami.0c07448.
- [87] F. Yang, B. Fei, Z. Wu, L. Peng, and Y. Yu, "Selected properties of corrugated particleboards made from bamboo waste (*Phyllostachys edulis*) laminated with medium-density fiberboard panels," *BioResources*. 2014, doi: 10.15376/biores.9.1.1085-1096.
- [88] D. M. Nguyen, A. C. Grillet, T. M. H. Diep, C. N. Ha Thuc, and M. Woloszyn, "Hygrothermal properties of bio-insulation building materials based on bamboo fibers and bio-glues," *Constr. Build. Mater.*, vol. 155, pp. 852–866, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.08.075.
- [89] J. S. Wang, C. Demartino, Y. Xiao, and Y. Y. Li, "Thermal insulation performance of bamboo- and wood-based shear walls in light-frame buildings," *Energy Build.*, vol. 168, pp. 167–179, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2018.03.017.
- [90] N. Reddy and Y. Yang, "Structure and Properties of Chicken Feather Barbs as Natural Protein Fibers," *J. Polym. Environ.*, vol. 15, no. 2, pp. 81–87, 2007, doi: 10.1007/s10924-007-0054-7.
- [91] A. Bourguiba, K. Touati, N. Sebaibi, M. Boutouil, and F. Khadraoui, "Recycled

- duvets for building thermal insulation,” *J. Build. Eng.*, vol. 31, p. 101378, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.JOBE.2020.101378.
- [92] J. Bessa *et al.*, “Characterization of thermal and acoustic insulation of chicken feather reinforced composites,” *Procedia Eng.*, vol. 200, pp. 472–479, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.PROENG.2017.07.066.
- [93] M. L. Smith, J. N. Bruhn, and J. B. Anderson, “The fungus *Armillaria bulbosa* is among the largest and oldest living organisms,” *Nature*, vol. 356, no. 6368, pp. 428–431, 1992, doi: 10.1038/356428a0.
- [94] R. R. Lelivelt, G. G. Lindner, P. P. Teuffel, and H. H. Lamers, “The production process and compressive strength of Mycelium-based materials,” 2015.
- [95] M. R. Islam, G. Tudryn, R. Bucinell, L. Schadler, and R. C. Picu, “Morphology and mechanics of fungal mycelium,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 13070, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-13295-2.
- [96] L. Jiang, D. Walczyk, L. Mooney, and S. Putney, *Manufacturing of mycelium-based biocomposites*. 2013.
- [97] L. Jiang, D. Walczyk, and G. McIntyre, *Vacuum Infusion of Mycelium-bound Biocomposite Preforms with Natural Resins*. 2014.
- [98] E. Elsacker, S. Vandeloock, J. Brancart, E. Peeters, and L. De Laet, “Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates,” *PLoS One*, vol. 14, no. 7, pp. 1–20, 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0213954.
- [99] J. He, C. Cheng, D. Su, and M. Zhong, “Study on the Mechanical Properties of the Latex-Mycelium Composite,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 507, pp. 415–420, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.507.415.
- [100] P. P. Dias, L. B. Jayasinghe, and D. Waldmann, “Investigation of Mycelium-Miscanthus composites as building insulation material,” *Results Mater.*, vol. 10,

- p. 100189, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.RINMA.2021.100189.
- [101] R. Abhijith, A. Ashok, and C. R. Rejeesh, "Sustainable packaging applications from mycelium to substitute polystyrene: a review," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 2139–2145, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.MATPR.2017.09.211.
- [102] L. Jiang, D. Walczyk, G. McIntyre, and W. K. Chan, "Cost modeling and optimization of a manufacturing system for mycelium-based biocomposite parts," *J. Manuf. Syst.*, vol. 41, pp. 8–20, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.JMSY.2016.07.004.
- [103] Z. Yang, F. Zhang, B. Still, M. White, and P. Amstislavski, "Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based biofoam," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 7, p. 4017030, 2017.
- [104] R. Mazur, "Mechanical properties of sheets comprised of mycelium: A paper engineering perspective," 2015.
- [105] S. Travaglini, J. Noble, P. G. Ross, and H. Dharan, "Mycology matrix composites," *28th Annu. Tech. Conf. Am. Soc. Compos. 2013, ASC 2013*, vol. 1, pp. 517–535, 2013.
- [106] P. Ricciardi, G. Cillari, M. Carnevale Miino, and M. Collivignarelli, "Valorization of agro-industry residues in the building and environmental sector: A review," *Waste Manag. Res.*, vol. 38, pp. 1–27, Feb. 2020, doi: 10.1177/0734242X20904426.
- [107] H. I. Abdel-Shafy and M. S. M. Mansour, "Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization," *Egypt. J. Pet.*, vol. 27, no. 4, pp. 1275–1290, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>.
- [108] F. Pietrapertosa *et al.*, "Urban climate change mitigation and adaptation planning: Are Italian cities ready?," *Cities*, vol. 91, pp. 93–105, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.CITIES.2018.11.009.

- [109] L. Ruggieri *et al.*, "Recovery of organic wastes in the Spanish wine industry. Technical, economic and environmental analyses of the composting process," *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 9, pp. 830–838, Jun. 2009, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2008.12.005.
- [110] R. Taurino, D. Ferretti, L. Cattani, F. Bozzoli, and F. Bondioli, "Lightweight clay bricks manufactured by using locally available wine industry waste," *J. Build. Eng.*, vol. 26, p. 100892, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.JOBE.2019.100892.
- [111] S. M. Cascone, S. Cascone, and M. Vitale, "Building insulating materials from agricultural by-products: A review," 2020, doi: 10.1007/978-981-32-9868-2_26.
- [112] A. Paiva, S. Pereira, A. Sá, D. Cruz, H. Varum, and J. Pinto, "A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards," *Energy Build.*, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.11.019.
- [113] J. Pinto *et al.*, "Corn's cob as a potential ecological thermal insulation material," *Energy Build.*, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.04.004.
- [114] J. Pinto, A. Paiva, S. Pereira, I. Bentes, and A. B. Sá, "Possible Applications of Corncob as a Raw Insulation Material," in *Insulation Materials in Context of Sustainability*, 2016.
- [115] A. B. Akinyemi, J. O. Afolayan, and E. Ogunji Oluwatobi, "Some properties of composite corn cob and sawdust particle boards," *Constr. Build. Mater.*, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.040.
- [116] J. Faustino *et al.*, "Impact sound insulation technique using corn cob particleboard," *Constr. Build. Mater.*, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.064.
- [117] A. Sampathrajan, N. C. Vijayaraghavan, and K. R. Swaminathan, "Mechanical and thermal properties of particle boards made from farm residues," *Bioresour. Technol.*, 1992, doi: 10.1016/0960-8524(92)90151-M.

- [118] M. Gáspár, G. Kálmán, and K. Réczey, "Corn fiber as a raw material for hemicellulose and ethanol production," *Process Biochem.*, vol. 42, no. 7, pp. 1135–1139, Jul. 2007, doi: 10.1016/J.PROCBIO.2007.04.003.
- [119] Z. Luo *et al.*, "Comparison of performances of corn fiber plastic composites made from different parts of corn stalk," *Ind. Crops Prod.*, vol. 95, pp. 521–527, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.INDCROP.2016.11.005.
- [120] J. Khedari, S. Charoenvai, and J. Hirunlabh, "New insulating particleboards from durian peel and coconut coir," *Build. Environ.*, 2003, doi: 10.1016/S0360-1323(02)00030-6.
- [121] INEA, "Calculation on FAO data." 2007.
- [122] "Food and Agriculture Organization," 2018.
- [123] J. E. G. Van Dam, M. J. A. Van Den Oever, and E. R. P. Keijsers, "Production process for high density high performance binderless boards from whole coconut husk," 2004, doi: 10.1016/j.indcrop.2003.12.017.
- [124] J. Fiorelli, D. D. Curtolo, N. G. Barrero, H. Savastano, E. M. de Jesus Agnolon Pallone, and R. Johnson, "Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: An eco-efficient product," *Ind. Crops Prod.*, 2012, doi: 10.1016/j.indcrop.2012.02.033.
- [125] C. F. da Silva *et al.*, "Improvement of indoor air quality by MDF panels containing walnut shells," *Build. Environ.*, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.07.015.
- [126] S.-B. SUN *et al.*, "Process and Properties Study of Porous Thermal Insulation Building Materials Based on Walnut Shell," 2016, doi: 10.2991/icmea-16.2016.43.
- [127] M. Lamrani, N. Laaroussi, A. Khabbazi, M. Khalfaoui, M. Garoum, and A. Feiz, "Experimental study of thermal properties of a new ecological building material

- based on peanut shells and plaster,” *Case Stud. Constr. Mater.*, 2017, doi: 10.1016/j.cscm.2017.09.006.
- [128] G. Pelozo and A. A. Ibert. Cristóbal, “Use of wastes from the peanut industry in the manufacture of building materials,” *Int. J. Sustain. Dev. Plan.*, pp. 662–671, 2018.
- [129] Arup, “The urban bio-loop,” Milan, 2017.
- [130] Kokoboard, “Kokoboard Thermal Resistant,” 2011. <http://www.kokoboard.com/th/test-analysis/kokoboard-thermal-resistant/>.
- [131] F. Asdrubali, F. D’Alessandro, and S. Schiavoni, “A review of unconventional sustainable building insulation materials,” *Sustain. Mater. Technol.*, 2015, doi: 10.1016/j.susmat.2015.05.002.
- [132] C. A. M. Moraes *et al.*, “Review of the rice production cycle: by-products and the main applications focusing on rice husk combustion and ash recycling.,” *Waste Manag. Res. J. Int. Solid Wastes Public Clean. Assoc. ISWA*, vol. 32, no. 11, pp. 1034–1048, Nov. 2014, doi: 10.1177/0734242X14557379.
- [133] D. W. Yarbrough, K. E. Wilkes, P. A. Olivier, R. S. Graves, and A. Vohra, “Apparent Thermal Conductivity Data and Related Information for Rice Hull and Crushed Pecan Shells,” *Therm. Conduct.*, 2005.
- [134] K. Wei, C. Lv, M. Chen, X. Zhou, Z. Dai, and D. Shen, “Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing,” *Energy Build.*, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.11.026.
- [135] P. Evon, J. Vinet, L. Labonne, and L. Rigal, “Influence of thermo-pressing conditions on the mechanical properties of biodegradable fiberboards made from a deoiled sunflower cake,” *Ind. Crops Prod.*, 2015, doi: 10.1016/j.indcrop.2014.11.036.

- [136] RiceHouse, "<https://www.ricehouse.it/prodotti>," 2021. .
- [137] M. Chabannes, E. Garcia-Diaz, L. Clerc, and J. C. Bénézet, "Studying the hardening and mechanical performances of rice husk and hemp-based building materials cured under natural and accelerated carbonation," *Constr. Build. Mater.*, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.032.
- [138] V. Barbieri, M. Lassinantti Gualtieri, and C. Siligardi, "Wheat husk: A renewable resource for bio-based building materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 251, p. 118909, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118909.
- [139] Tangjuank, "Thermal insulation and physical properties of particleboards from pineapple leaves," *Int. J. Phys. Sci.*, 2011, doi: 10.5897/IJPS11.1057.
- [140] M. Idicula, A. Boudenne, L. Umadevi, L. Ibos, Y. Candau, and S. Thomas, "Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites," *Compos. Sci. Technol.*, 2006, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.03.007.
- [141] A. De Vecchi and S. Colajanni, "Isolamento termico: dal riciclo all'innovazione," 2016.
- [142] D. A. Z. Vincenzo Tamburino, "I sottoprodotti dell'industria di trasformazione il pastazzo di agrumi," 2009.
- [143] V. Virginie, R. Luc, S. Redouan, and P. Bernard, "New agro-materials with thermal insulation properties," 2012, pp. 949–954.
- [144] P. Evon, V. Vandenbossche, P. Y. Pontalier, and L. Rigal, "New thermal insulation fiberboards from cake generated during biorefinery of sunflower whole plant in a twin-screw extruder," *Ind. Crops Prod.*, 2014, doi: 10.1016/j.indcrop.2013.10.049.
- [145] N. Mati-Baouche *et al.*, "Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan," *Ind. Crops Prod.*, 2014, doi: 10.1016/j.indcrop.2014.04.022.

- [146] N. Mati-Baouche, H. De Baynast, P. Michaud, T. Dupont, and P. Leclaire, "Sound absorption properties of a sunflower composite made from crushed stem particles and from chitosan bio-binder," *Appl. Acoust.*, vol. 111, pp. 179–187, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.APACOUST.2016.04.021.
- [147] P. Ricciardi, F. Torchia, E. Belloni, E. Lascaro, and C. Buratti, "Environmental characterisation of coffee chaff, a new recycled material for building applications," *Constr. Build. Mater.*, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.114.
- [148] A. Lachheb *et al.*, "Thermal insulation improvement in construction materials by adding spent coffee grounds: An experimental and simulation study," *J. Clean. Prod.*, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.140.
- [149] A. Putra, Y. Abdullah, H. Efendy, W. M. Farid, M. R. Ayob, and M. S. Py, "Utilizing sugarcane wasted fibers as a sustainable acoustic absorber," 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.081.
- [150] K. Manohar, "Experimental Investigation of Building Thermal Insulation from Agricultural By-products," *Br. J. Appl. Sci. Technol.*, 2014, doi: 10.9734/bjast/2012/1528.
- [151] R. Widyorini, J. Xu, K. Umemura, and S. Kawai, "Manufacture and properties of binderless particleboard from bagasse I: Effects of raw material type, storage methods, and manufacturing process," *J. Wood Sci.*, 2005, doi: 10.1007/s10086-005-0713-z.
- [152] J. P. Correa, J. M. Montalvo-Navarrete, and M. A. Hidalgo-Salazar, "Carbon footprint considerations for biocomposite materials for sustainable products: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 208, pp. 785–794, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.099.
- [153] R. Caponetto, "Sostenibilità dei materiali naturali," in *Sustainability of natural*

- materials*, 2019, pp. 992–998.
- [154] FAO, *Citrus Fruit Fresh and Processed Statistical Bulletin 2016*. 2017.
- [155] F. S. Division, “World production of Maize.” FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2005.
- [156] “Ministry of Agricultural.”
- [157] D. A. Zema, P. S. Calabrò, A. Folino, V. Tamburino, G. Zappia, and S. M. Zimbone, “Valorisation of citrus processing waste: A review,” *Waste Management*. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.09.024.
- [158] O. O. Olubajo, O. A. Odey, and B. Abdullahi, “Potential of Orange Peel Ash as a Cement Replacement Material,” *Path Sci.*, 2019, doi: 10.22178/pos.48-3.
- [159] V. A. Bampidis and P. H. Robinson, “Citrus by-products as ruminant feeds: A review,” *Animal Feed Science and Technology*. 2006, doi: 10.1016/j.anifeedsci.2005.12.002.
- [160] D. R. Llano and D. M. López, “Ensiling potential of orange fruit wastes (*Citrus sinensis*) Potencial del ensilaje de desechos de naranja (*Citrus sinensis*),” *Rev. Ciencias Tec. Agropecu.*, 2008.
- [161] B. Satari and K. Karimi, “Citrus processing wastes: Environmental impacts, recent advances, and future perspectives in total valorization,” *Resources, Conservation and Recycling*. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.10.032.
- [162] N. Mahato, K. Sharma, M. Sinha, and M. H. Cho, “Citrus waste derived nutra-/pharmaceuticals for health benefits: Current trends and future perspectives,” *Journal of Functional Foods*. 2018, doi: 10.1016/j.jff.2017.11.015.
- [163] R. C. Fierascu, E. Sieniawska, A. Ortan, I. Fierascu, and J. Xiao, “Fruits By-Products - A Source of Valuable Active Principles. A Short Review.,” *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 8, p. 319, 2020, doi: 10.3389/fbioe.2020.00319.

- [164] R. B. Johnston, "Confidential report on existing pectin plant. Report on pectin peel," *FMC, Aust.*, 2002.
- [165] AOAC, "Official Analytical Chemists," 2000.
- [166] L. Cho, S., DeVries, J., and Prosky, "Dietary Fiber Analysis and Applications," *Gaithersburg, MD AOAC Int.*, 1997.
- [167] A. Borroto, B., Larrauri, J.A., and Cribeiro, "Influencia del tamaño de partículas sobre la capacidad de retención de agua de la fibra obtenida a partir de cítricos y piña," *Aliment.* 3, pp. 89–90, 1995.
- [168] M. J. Gibney, "Nutrition and diet for healthy lifestyles in Europe," *B. V. McCleary, L. Prosky*, vol. Advanced D, no. Oxford, pp. 3–11, 2000.
- [169] D. Mamma and P. Christakopoulos, "Citrus peels : an excellent raw material for the bioconversion into value-added products," *Tree For. Sci. Biotechnol.*, 2008.
- [170] R. Perlack, L. Wright, A. Turhollow, R. Graham, B. Stokes, and D. Erbach, "Biomass as Feedstock for A Bioenergy and Bioproducts Industry: The Technical Feasibility of a Billion-Ton Annual Supply," *Biomass as Feed. a Bioenergy Bioprod. Ind. Tech. Feasibility a Billion-t. Annu. Supply*, p. 72, 2005, doi: 10.2172/885984.
- [171] I. S. Choi, J. H. Kim, S. G. Wi, K. H. Kim, and H. J. Bae, "Bioethanol production from mandarin (Citrus unshiu) peel waste using popping pretreatment," *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 204–210, Feb. 2013, doi: 10.1016/J.APENERGY.2012.03.066.
- [172] H. Bouallagui, Y. Touhami, R. Ben Cheikh, and M. Hamdi, "Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes," *Process Biochem.*, vol. 40, no. 3–4, pp. 989–995, Mar. 2005, doi: 10.1016/J.PROCBIO.2004.03.007.
- [173] P. Kaparaju, J. Rintala, and A. Oikari, "Agricultural potential of anaerobically

- digested industrial orange waste with and without aerobic post-treatment,” *Environ. Technol.*, vol. 33, no. 1, pp. 85–94, 2012, doi: 10.1080/09593330.2011.551839.
- [174] J. Rintala, “Thermophilic Anaerobic Digestion of Industrial Orange Waste,” *Environ. Technol.*, vol. 27, pp. 623–633, 2006, doi: 10.1080/09593332708618676.
- [175] M. A. Martín, J. A. Siles, A. F. Chica, and A. Martín, “Biomethanization of orange peel waste,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 23, pp. 8993–8999, Dec. 2010, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2010.06.133.
- [176] R. Wikandari, H. Nguyen, M. Ria, C. Niklasson, and M. Taherzadeh, “Improvement of Biogas Production from Orange Peel Waste by Leaching of Limonene,” *Biomed Res. Int.*, vol. 2015, p. 494182, 2015, doi: 10.1155/2015/494182.
- [177] Y. Labrath and V. Gaikar, “Solid State Fermentation of Orange Peels for Production of Cellulase, Pectinase and Recovery of Orange Oil using *Aspergillus* Species NCIM 1432.” 2020, doi: 10.21203/rs.3.rs-123470/v1.
- [178] M. Dabaieh, J. Heinonen, D. El-Mahdy, and D. M. Hassan, “A comparative study of life cycle carbon emissions and embodied energy between sun-dried bricks and fired clay bricks,” *J. Clean. Prod.*, vol. 275, p. 122998, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.122998.
- [179] A. Moropoulou *et al.*, “Scanning microscopy techniques as an assessment tool of materials and interventions for the protection of built cultural heritage,” *Scanning*. 2019, doi: 10.1155/2019/5376214.
- [180] ISO 13787, “Thermal insulation products for building equipment and industrial installations - Determination of declared thermal conductivity,” 2003.
- [181] EN12667, “Thermal performance of building materials and products -

- Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Products of high and medium thermal resistance.” 2001.
- [182] European and C. for Standardization, *EN 12089 European Standard test method for thermal insulating products for building applications. Determination of bending behaviour*; Brussels, Belgium, 2013.
- [183] Anon, “TEST FOR THE DETERMINATION OF MODULUS OF RUPTURE AND LIMIT OF PROPORTIONALITY OF THIN FIBRE REINFORCED CEMENT SECTIONS.,” *Mater. Constr.*, 1984, doi: 10.1201/9781482271362-117.
- [184] A. Pedrero, M. Á. Navacerrada, D. de la Prida, L. Iglesias, and A. Díaz-Chyla, “On the accuracy of the sound absorption measurement with an impedance gun,” *Appl. Acoust.*, vol. 158, p. 107039, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.APACOUST.2019.107039.
- [185] R. del Rey, A. Uris, J. Alba, and P. Candelas, “Characterization of sheep wool as a sustainable material for acoustic applications,” *Materials (Basel)*., 2017, doi: 10.3390/ma10111277.
- [186] EN 1602, “European Standard test method for thermal insulating products for building applications. Determination of the apparent density; European Committee for Standardization.” Brussels, Belgium, 2013.
- [187] EN ISO 29767:2020, “Thermal insulating products for building applications - Determination of short-term water absorption by partial immersion.”
- [188] W. D. Powrie, H. Chiu Wu, and V. P. Molund, “Browning reaction systems as sources of mutagens and antimutagens,” *Environ. Health Perspect.*, 1986, doi: 10.1289/ehp.866747.
- [189] F. V. W. Appels *et al.*, “Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites,” *Mater. Des.*,

- 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2018.11.027.
- [190] A. National and C. P. A. Standard –Particleboard, “American National Standard Institute, ANSI A208.1.” 1999.
- [191] X. yan Zhou, F. Zheng, H. guan Li, and C. long Lu, “An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers,” *Energy Build.*, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.01.020.
- [192] G. Iannace, L. Maffei, and P. Trematerra, “On the use of ‘green materials’ for the acoustic correction of classrooms,” 2012.
- [193] S. P. Gelu COMAN, Krisztina UZUNEANU, “THE INFLUENCE OF MOISTURE ON THERMAL CONDUCTIVITY FOR BUILDING MATERIALS,” 2017, doi: ISSN 1453-083X.
- [194] F. Ochs, W. Heidemann, and H. Müller-Steinhagen, “Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2008, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.05.005.
- [195] O. Sengul, S. Azizi, F. Karaosmanoglu, and M. A. Tasdemir, “Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete,” *Energy Build.*, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.11.008.
- [196] F. Iucolano, B. Liguori, D. Caputo, F. Colangelo, and R. Cioffi, “Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties,” *Mater. Des.*, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.06.025.
- [197] V. A. Yaylayan, “Classification of the Maillard reaction: A conceptual approach,” *Trends in Food Science and Technology*. 1997, doi: 10.1016/S0924-2244(96)20013-5.
- [198] N. El Hajj, B. Mboumba-Mamboundou, R. M. Dheilly, Z. Aboura, M. Benzeggagh, and M. Queneudec, “Development of thermal insulating and sound absorbing agro-sourced materials from auto linked flax-tows,” *Ind. Crops*

Prod., 2011, doi: 10.1016/j.indcrop.2011.02.012.

- [199] F. Martellotta, A. Cannavale, V. De Matteis, and U. Ayr, “Sustainable sound absorbers obtained from olive pruning wastes and chitosan binder,” *Appl. Acoust.*, 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.06.022.
- [200] C. Raciti, Alfio; Dugo, Giuseppe; Piccione, Paolo; Zappalà, SImone; Martelli, “A new sustainable product in the green building sector: the use of sicilian orange peel waste as high performance insulation,” in *Procedia Environmental Science, Engineering and Management* 6, 2019, pp. 229–235.
- [201] J. C. Morel, A. Mesbah, M. Oggero, and P. Walker, “Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction,” *Build. Environ.*, vol. 36, no. 10, pp. 1119–1126, Dec. 2001, doi: 10.1016/S0360-1323(00)00054-8.

12. Allegati

Di seguito vengono allegati i documenti relativi al deposito di un brevetto con inventori Matteo Vitale e Santi Maria Cascone, dal titolo “Pannello termoisolante a base di scarti di agrumi e metodo di produzione”, avente come oggetto i risultati di questa ricerca.

12.1 Riassunto

Barzanò & Zanardo

- 21 -

RIASSUNTO

Pannello termoisolante a base di scarti di agrumi e metodo di produzione.

La presente invenzione riguarda un metodo di realizzazione di un pannello autoportante per edilizia, comprendente le fasi di prevedere un volume di scarti o sottoprodotti derivanti dalla trasformazione degli agrumi; tritare gli scarti in maniera tale da ottenere un volume di scarti tritati; pressare il volume di scarti tritati per ottenere una compattazione del volume stesso; consentire una fuoriuscita, tramite evaporazione, di una componente acquosa del volume di scarti tritati, in cui la fase di evaporazione avviene in maniera contemporanea alla fase di pressare in maniera tale da garantire una planarità del pannello ottenuto.

12.2 Disegni

1/2

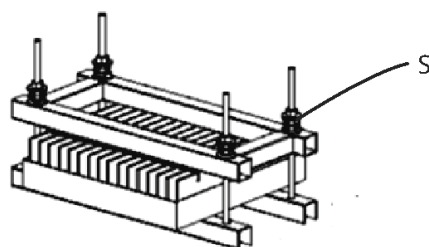


Fig. 1

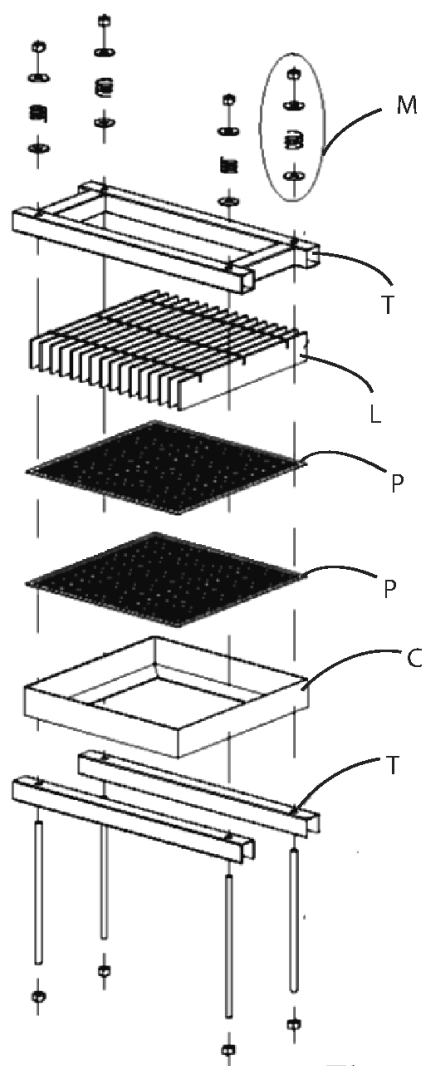


Fig. 2

- S - Stampo
- M - Molle
- L - Elemento pressore
- P - Piastra
- C - Parete laterale
- T - Telaio di supporto

2/2

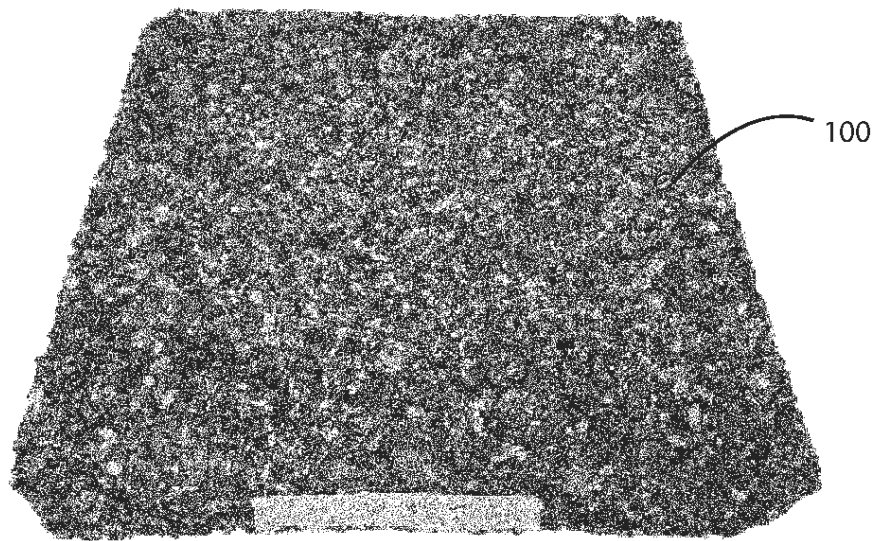


Fig. 3

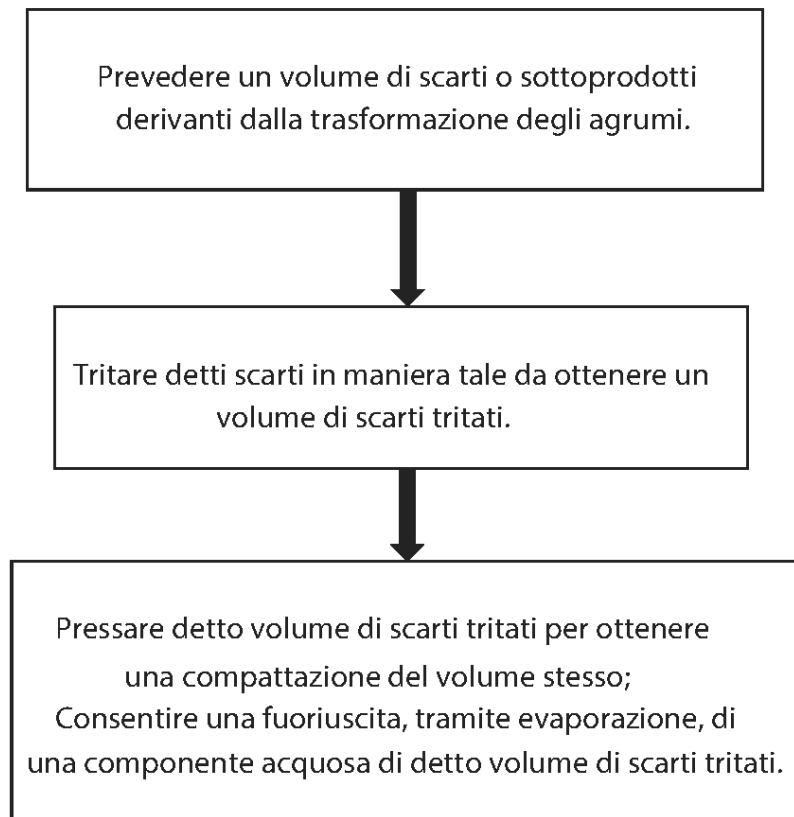


Fig. 4

12.3 Rivendicazioni

Barzanò & Zanardo

- 18 -

RIVENDICAZIONI

1. Metodo di realizzazione di un pannello (100) autoportante per edilizia, comprendente le fasi di:

- prevedere un volume di scarti o sottoprodotti derivanti dalla trasformazione degli agrumi;
- tritare detti scarti in maniera tale da ottenere un volume di scarti tritati;
- pressare detto volume di scarti tritati per ottenere una compattazione del volume stesso;
- consentire una fuoriuscita, tramite evaporazione, di una componente acquosa di detto volume di scarti tritati;

in cui detta evaporazione avviene in maniera contemporanea a detta fase di pressare in maniera tale da garantire una planarità del pannello (100) ottenuto.

2. Metodo di realizzazione di un pannello (100) secondo la rivendicazione precedente, in cui detta fase di pressare viene eseguita tramite uno stampo a piastre forate per consentire la fuoriuscita detta componente acquosa.

3. Metodo di realizzazione di un pannello (100) secondo la rivendicazione precedente, in cui detta fase di consentire una fuoriuscita, tramite evaporazione, viene eseguita ponendo detto stampo in un essiccatore, opzionalmente per un tempo compreso tra 24 e 48 ore.

4. Metodo di realizzazione di un pannello (100)

- 19 -

secondo la rivendicazione precedente, in cui detto essiccatore presenta una temperatura compresa tra 40°C e 60°C, opzionalmente 50°C.

5. Metodo di realizzazione di un pannello (100) secondo la rivendicazione 1, in cui detta fase di pressare viene eseguita a caldo, tramite uno stampo a piastre riscaldanti, con temperature comprese tra 40°C e 80°C.

6. Metodo di realizzazione di un pannello (100) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui prima di detta fase di pressare è prevista una fase di aggiunta di un collante ad un volume di scarti o sottoprodotti derivanti dalla trasformazione degli agrumi.

7. Metodo di realizzazione di un pannello (100) secondo la rivendicazione precedente, in cui detto collante comprende una soluzione acquosa contenente una percentuale di pectina.

8. Metodo di realizzazione di un pannello (100) secondo una delle rivendicazioni 6 o 7, in cui detto collante comprende un adesivo a base polimerica.

9. Metodo di realizzazione di un pannello (100) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui prima di detta fase di pressare è prevista una fase di aggiunta di un additivo antimuffa e/o di un

- 20 -

additivo per migliorare la resistenza al fuoco del pannello (100).

10. Metodo di realizzazione di un pannello (100) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni dalla 5 alla 9, in cui detta fase di pressare prevede l'applicazione di una pressione compresa tra 1-10 N/mm², opzionalmente per un tempo compreso tra 5 e 60 secondi.

11. Metodo di realizzazione di un pannello (100) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni dalla 5 alla 10, in cui detta fase di pressare comprende una fuoriuscita da detto stampo a piastre riscaldanti di una componente acquosa di detto volume di scarti tritati.

12. Pannello (100) autoportante per edilizia ottenuto con il metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni dalla 1 alla 11.

Barzanò & Zanardo Roma S.p.A.

12.4 Descrizione

Barzanò & Zanardo

- 1 -

Pannello termoisolante a base di scarti di agrumi e metodo di produzione.

Campo tecnico dell'invenzione

La presente invenzione riguarda un pannello termoisolante a base di scarti agricoli, in particolare un pannello per uso edilizio comprendente un materiale di scarto derivante dalla lavorazione degli agrumi, utilizzabile per l'arredamento, il rivestimento e l'isolamento termico e/o acustico di edifici civili e/o industriali.

Stato della tecnica

Attualmente il materiale naturale più utilizzato in edilizia per la produzione di pannelli isolanti è il sughero.

Le prestazioni termiche del sughero si associano alla possibilità di creare un pannello "auto-legato", ovvero capace di mantenere una configurazione assemblata senza l'aggiunta di prodotti chimici esterni. I pannelli realizzati in sughero sono interamente riciclabili e presentano una conducibilità termica pari a 0,047 W/mK ed una densità pari a 108,70 Kg/m³.

Prestazioni simili sono state ottenute, a livello sperimentale, con pannelli prodotti dagli scarti di lavorazione dei girasoli. Dalle lavorazioni di estrazione dell'olio di girasole, derivano sottoprodotti come fusti, foglie ed altri elementi

- 2 -

organici di scarto.

Il prodotto che si ottiene dalla raccolta e triturazione di questi elementi di scarto è composto prevalentemente da fibre lignocellulosiche e proteiche che, se sottoposte ad un processo di pressatura a caldo, agiscono rispettivamente come fibra rinforzante e come legante.

I metodi di realizzazione dell'arte nota prevedono solitamente fasi di pressatura dei pannelli a caldo (da 140°C a 180°C). Le migliori prestazioni in termini di conducibilità termica (0,088 W/mK) sono ottenute con un pannello presentante una densità pari a 500 Kg/m³ e con valore di temperatura di pressatura più bassa (140°C). Le prestazioni in termini di conducibilità termica non corrispondono alle prestazioni in termini di resistenza meccanica che vengono ottimizzate nei pannelli presentanti valori di densità maggiore (858 Kg/m³).

Un ulteriore materiale utilizzato come isolante e riempimento per i tamponamenti esterni sono gli scarti delle pannocchie. Per garantire la resistenza strutturale del pannello, gli scarti di pannocchia, una volta essiccati e triturati, vengono mescolati con un legante a base di formaldeide.

Le migliori prestazioni in termini di conducibilità termica (0,101 W/mK) sono ottenute con un pannello presentante una densità pari a circa 413 Kg/m³. Le prestazioni in termini di conducibilità termica non corrispondono alle prestazioni in termini di resistenza meccanica che anche in questo caso vengono ottimizzate nei pannelli presentanti valori di densità maggiore,

- 3 -

pari a 480 Kg/m³.

Ulteriori pannelli vengono realizzati con scarti agricoli come gusci di noci e di riso.

Valori di conducibilità termica pari a 0,046 W/mK sono ottenuti con un pannello ottenuto dalla compattazione di lolla di riso in granuli, triturrata e posta in un contenitore con una densità pari a 153,80 Kg/m³.

Valori di conducibilità termica pari a 0,088 W/mK sono ottenuti con un pannello ottenuto dalla compattazione di gusci di noci in granuli, con una densità pari a 599,10 Kg/m³.

Ulteriori pannelli di tipo noto prevedono la compattazione di materiali fibrosi come i residui del cocco. Il legante utilizzato per creare i pannelli è l'urea formaldeide e la conducibilità ottenuta è di 0.058 W/mK.

Sono inoltre noti pannelli ottenuti da miscele di resina e di scarti di lavorazione del durian. Il durian è un frutto diffuso nel Sud-Est Asiatico e la sua buccia, scartata dai processi industriali, può essere triturrata e utilizzata per creare un pannello con conducibilità termica pari a 0.063 W/mK.

Un altro pannello di tipo noto utilizza le foglie di ananas come fibra ed una colla a base di lattice come legante.

Il valore di conducibilità termica pari a 0.035 W/mK è ottenuto per una densità del pannello di 210 Kg/m³.

Gli scarti agricoli sono materie prime estratte

- 4 -

dalle lavorazioni del territorio e sono strettamente correlati alle colture di ciascuna area, per questo motivo ogni area geografica ha delle potenzialità differenti in funzione delle specifiche coltivazioni caratteristiche della specifica zona e della reperibilità delle materie prime.

In Sicilia sono stati effettuati studi per l'utilizzo di una pianta molto diffusa, come l'opuntia ficus indica. Tale pianta è stata adoperata come materia prima per la produzione di un materiale termoisolante, le cui prestazioni sono state valutate sia come pannello (con un valore di conducibilità termica di 0.071 W/mK) che come granuli sfusi (con un valore di conducibilità termica di 0.057 W/mK), mostrando un suo potenziale utilizzo in edilizia.

Tali materiali ben si prestano a tale scopo ma presentano alcuni svantaggi.

Uno svantaggio dei pannelli di tipo noto è la necessità di aggiungere collanti sintetici per tenere insieme gli scarti organici delle materie prime utilizzate.

Un ulteriore svantaggio dei pannelli di tipo noto è la necessità di utilizzare dei telai e/o dei pannelli di rivestimento per lo strato di riempimento.

Pertanto, oltre che perdere le caratteristiche di ecosostenibilità, i pannelli dell'arte nota richiedono manodopera specializzata e specifiche condizioni sia in fase di realizzazione, che in fase di montaggio e di manutenzione.

Inoltre, un ancora ulteriore svantaggio dei

- 5 -

pannelli di tipo noto è che l'aggiunta di matrici sintetiche, o di elementi di rivestimento, al materiale naturale utilizzato aumenta il peso di ciascun pannello, pertanto in una costruzione edilizia che impiega una pluralità di pannelli impatta notevolmente sul peso complessivo finale.

Sommario dell'invenzione

Il problema tecnico posto e risolto dalla presente invenzione è quello di fornire un pannello ed un metodo di realizzazione del pannello stesso, che consenta di ovviare agli inconvenienti sopra menzionati con riferimento alla tecnica nota.

Tale problema viene risolto da un metodo di realizzazione di un pannello autoportante, secondo la rivendicazione 1, e da un pannello autoportante secondo la rivendicazione 12.

Caratteristiche preferite della presente invenzione sono dettagliate nelle rivendicazioni dipendenti.

La presente invenzione fornisce alcuni rilevanti vantaggi.

In particolare, la caratteristica di prevedere una pressatura del materiale triturato contemporanea ad una fase di evaporazione di una componente acquosa del materiale stesso, consente di ottenere una compattazione del pannello senza la necessità di utilizzo di leganti, colle e/o adesivi.

Inoltre, prevedere una essiccazione del materiale durante la pressatura, consente di evitare la

- 6 -

formazione di tensioni interne al pannello in formazione, in maniera tale da garantire una planarità del pannello ottenuto.

Inoltre, una forma di realizzazione del metodo secondo l'invenzione prevede una fase di pressatura a caldo ad una temperatura inferiore a quella solitamente utilizzata per i processi di tipo noto, consentendo un risparmio energetico.

Vantaggiosamente, il metodo secondo l'invenzione consente di recuperare scarti di agrumi e di lavorarli sia in forma umida che in forma essiccata, garantendo, tramite lo stoccaggio del materiale di scarto eventualmente in eccesso in forma essiccata, una produzione a ciclo continuo dei pannelli.

Un ulteriore vantaggio è che il metodo secondo la presente invenzione prevede una fase di aggiunta di componenti addizionali quali ad esempio elementi antimuffa, in maniera tale da garantire la durabilità e la vita utile del pannello anche in ambienti di utilizzo con elevata percentuale di umidità.

Altri vantaggi, caratteristiche e le modalità di impiego della presente invenzione risulteranno evidenti dalla seguente descrizione dettagliata di alcune forme di realizzazione, presentate a scopo esemplificativo e non limitativo.

Descrizione breve delle figure

Verrà fatto riferimento alle figure dei disegni allegati, in cui:

la Figura 1 mostra una vista prospettica di uno

- 7 -

stampo utilizzato per eseguire fasi di una forma di realizzazione preferita del metodo secondo l'invenzione;

la Figura 2 mostra un esploso dello stampo di Figura 1 ed una legenda dei componenti dello stampo stesso;

la Figura 3 mostra un pannello realizzato con il metodo secondo la presente invenzione;

la Figura 4 mostra uno schema a blocchi delle fasi di una forma di realizzazione del metodo di realizzazione di un pannello secondo la presente invenzione.

Descrizione dettagliata di forme di realizzazione preferite

Nel seguito la descrizione sarà rivolta ad un metodo di realizzazione di un pannello autoportante per edilizia, in particolare configurato per la realizzazione di pareti e/o elementi di rivestimento, o copertura, per isolamento termico e/o acustico di un vano abitativo civile o industriale.

Con riferimento alle figure, un pannello realizzato tramite una prima forma di realizzazione preferita del metodo secondo l'invenzione è complessivamente denotato con 100.

Il metodo secondo la presente invenzione, comprende una prima fase di preparazione degli scarti da assemblare, ovvero una fase di prevedere un volume di scarti o sottoprodotti derivanti dalla trasformazione degli agrumi.

- 8 -

Vantaggiosamente, un volume di scarti o sottoprodotti derivanti dalla trasformazione degli agrumi, ad esempio della buccia di arancia, in particolare della parte esterna della scorza, detta flavedo, della parte interna bianca, detta albedo e dei residui di semi e polpa rimasti dopo la spremitura dell'agrume, può essere reperito in grandi quantità dagli scarti di trasformazione industriale agricola oppure può essere raccolto dai distributori automatici di succhi.

Gli scarti o sottoprodotti utilizzati nel metodo qui descritto comprendono preferibilmente scarti di arance sottoposte a spremitura, ed in particolare un insieme costituito da succo, olio essenziale e da residui di bucce, polpa e semi, chiamato pastazzo.

Le percentuali relative di ogni singolo componente per unità di prodotto trasformato sono circa il 35-45% di succo, 0,2-0,5% di olio essenziale, ed il 55-65% di pastazzo. I primi due sono i prodotti che sono principalmente commercializzabili, mentre il terzo è considerato un sottoprodotto di valore basso o rifiuto di lavorazione.

Vantaggiosamente, il trovato secondo la presente invenzione consente un corretto smaltimento di questi scarti, ed un correlato abbassamento dei costi per le aziende di trasformazione degli agrumi.

Il materiale reperito non necessita di processi di lavaggio preliminari poiché, trattandosi di un sottoprodotto di trasformazione, ha precedentemente subito idonei processi di pulitura.

- 9 -

Quindi, una volta raccolto il materiale, si procede a tritare gli scarti in maniera tale da ridurre le dimensioni ed agevolarne l'assemblaggio. In particolare, gli scarti vengono tritati per ridurre una porzione solida ad una dimensione media compresa tra 0,5 cm e 2 cm, preferibilmente tra 0,5 cm e 1 cm. Se la dimensione media della parte solida fosse maggiore di 2 cm, il pannello si sfalderebbe alla fine del processo. Se invece la dimensione media fosse inferiore a 0,5 cm, l'intero volume trattato sarebbe troppo liquido per essere formato in maniera ottimale.

Preferibilmente, la percentuale della componente liquida del pastazzo, che resta sostanzialmente costante anche dopo il processo di triturazione, è di circa l'80%.

Il metodo in oggetto prevede una fase di pressatura del volume di scarti tritati per ottenere una compattazione del volume stesso.

È inoltre prevista una fase di fuoriuscita, tramite evaporazione, di una componente acquosa del suddetto volume di scarti tritati.

Vantaggiosamente, la fase di evaporazione avviene in maniera contemporanea alla fase di pressatura in maniera tale da scongiurare la formazione di tensioni di deformazione interne al materiale pressato per evitare indesiderate flessioni o imbarcamenti e garantire una planarità del pannello ottenuto.

Allo stesso tempo, le sostanze disciolte in una frazione liquida del pastazzo, in particolare la pectina contenuta negli scarti degli agrumi come le

- 10 -

arance, man mano che la componente acquosa evapora, si interpongono tra frazioni solide tritate del pastazzo favorendone la coesione e la compattazione, agendo da legante naturale e consentendo la formazione di un pannello 100 solido senza la necessità di utilizzare collanti esterni.

In una prima forma di realizzazione preferita, la fase di evaporazione della componente acquosa degli scarti di tritati avviene tramite essiccazione del pannello in formazione, ad esempio ponendo lo stampo di pressatura per la formatura del pannello in un essiccatore.

In tal caso, come mostrato in particolare nelle figure 1 e 2, lo stampo S prevede una parete di contenimento laterale C, una piastra P inferiore ed una piastra P superiore. Ciascuna piastra P è provvista di una pluralità di aperture, in maniera tale da favorire la fuoriuscita della componente acquosa durante la pressatura del pannello stesso.

Lo stampo S, ad esempio realizzato con piatti o piastre P in acciaio perforato, è configurato per mantenere un valore di pressione costante sul materiale in formazione, inserito tra le due piastre, anche durante significative variazioni volumetriche del materiale dovute alla perdita della componente acquosa.

Preferibilmente, viene utilizzato uno stampo a molle M per garantire il mantenimento di un valore di pressione preimpostato anche durante la diminuzione dello spessore del pannello in fase di formatura.

In particolare, la piastra superiore viene

- 11 -

mantenuta in posizione da porzioni di telaio T tra loro distanziate per non interferire con la fuoriuscita della componente acquosa dal materiale in formazione.

Sulla piastra P superiore viene applicata la pressione esercitata dalle molle M tramite un elemento pressore L, come mostrato ad esempio nelle figure 1 e 2. In particolare, anche l'elemento pressore L prevede una pluralità di aperture passanti per non interferire con la fuoriuscita della componente acquosa dal materiale in formazione.

La fase di essiccazione del pannello avviene in essiccatore ventilato, o forno, ad una temperatura compresa tra 40°C e 60°C, preferibilmente a circa 50°C.

Per favorire una evaporazione completa della componente acquosa, non solo quella degli strati superficiali ma anche degli strati più interni, la fase di essiccazione dura un tempo compreso tra 24 ore e 48 ore, a seconda dello spessore del pannello.

Per valori di temperatura maggiori saranno richiesti tempi di essiccazione inferiori. Inoltre, più ventilazione è presente all'interno dell'essiccatore durante il processo di formatura, minori saranno i tempi necessari per completare la fase di essiccazione.

Per evitare che il pannello essiccato si incolli ai piatti in acciaio, sulla parete laterale C dello stampo, viene interposto un elemento in foglio in materiale antiaderente configurato per garantire la traspirabilità e quindi l'essiccazione del materiale, ad esempio realizzato in materiale comprendente fibra di vetro.

- 12 -

La temperatura viene selezionata in base allo specifico utilizzo del pannello, ad esempio valutando la necessità di rispondere a caratteristiche estetiche piuttosto che strutturali.

In particolare, a temperature superiori ai 50°C, le superfici a contatto con le piastre dello stampo si scuriscono a seguito di un processo di cristallizzazione delle sostanze, ad esempio zuccherine, contenute negli scarti lavorati. Tali pannelli potrebbero pertanto non rispondere alle specifiche esigenze estetiche, ma allo stesso tempo la cristallizzazione delle superfici esterne comporta un incremento della resistenza strutturale del pannello stesso.

In una seconda forma di realizzazione preferita, la fase di evaporazione della componente acquosa degli scarti di tritati avviene in tempi più rapidi, rispetto a quelli previsti per l'essiccazione, tramite pressatura a caldo.

In particolare, la pressatura a caldo viene eseguita tramite uno stampo a piastre riscaldanti, con temperature comprese tra 40°C e 80°C.

Vantaggiosamente, la pressatura a caldo consente di utilizzare scarti o sottoprodotti derivanti dalla trasformazione degli agrumi in una configurazione essiccata. Tramite la possibilità di stoccare il materiale da trattare anche in forma essiccata, si riesce a gestire una possibile disponibilità eccessiva di materiale di base ed al tempo stesso a garantire una produzione continua dei pannelli, consentendo la

- 13 -

lavorazione degli impianti di produzione anche quando il materiale di base in forma umida è disponibile in quantità inferiore alla norma.

Gli scarti in configurazione essiccata possono essere assemblati tramite una aggiunta di collante prima di applicare la pressione di formatura del pannello. Preferibilmente, il collante comprende una soluzione acquosa contenente una percentuale di pectina. La soluzione acquosa miscelata agli scarti essiccati consente una penetrazione della pectina in soluzione all'interno degli scarti e la possibilità di ottenere un legante naturale una volta evaporata la componente acquosa, come descritto sopra in relazione alla prima forma di realizzazione.

L'aggiunta di collanti di origine naturale può essere prevista anche nella prima forma realizzativa del metodo secondo l'invenzione, ad esempio dopo la fase di triturazione e prima della fase di pressatura.

In tutte le forme realizzative qui descritte, in aggiunta o in alternativa al collante di origine naturale, per consentire un miglioramento delle prestazioni meccaniche e di durabilità del materiale, è prevista l'aggiunta di un collante comprendente un adesivo a base polimerica, ad esempio colla poliuretana, colla fenolica, resine naturali, colle a base di amido naturale, colle a base di lattice naturale, colle naturali come il chitosan, e/o di leganti aerei come la calce o il gesso, e/o leganti idraulici come il cemento.

In particolare, prima della fase di pressatura, è

- 14 -

prevista una fase di aggiunta di un additivo antimuffa e/o di un additivo per migliorare la resistenza al fuoco del pannello.

Nel caso di lavorazione a caldo, la fase di pressare prevede l'applicazione di una pressione compresa tra 1-10 N/mm², opzionalmente per un tempo compreso tra 5 e 60 secondi.

Per garantire la planarità del pannello, durante la fase di pressatura è prevista una fuoriuscita, tramite mezzi di sfiato previsti sullo stampo riscaldato, di una componente acquosa del volume di scarti tritati dallo stampo a piastre riscaldanti.

Vantaggiosamente, la presente invenzione è inoltre rivolta ad un pannello 100 ottenuto o ottenibile con il metodo sopra descritto, in particolare un pannello 100 rigido autoportante, completamente naturale ed auto-legato, senza l'aggiunta di additivi chimici.

Le prestazioni ottenute con il pannello 100 secondo l'invenzione sono:

- densità pari a 558 Kg/m³, misurata sul materiale secco;
- conducibilità termica pari a circa 0,066 W/mK, misurata ad una temperatura di circa 10 °C;
- resistenza a flessione pari a 1,61 N/mm, misurata con test a rottura.

Il processo ed il pannello 100 secondo la presente invenzione comprendono numerosi vantaggi, ad esempio:

- utilizzo di sottoprodotti agricoli inutilizzati;
- facile reperimento della materia prima;
- facilità di produzione;

- 15 -

- basso costo di produzione;
- riduzione delle emissioni CO₂;
- materiale ecosostenibile;
- buone prestazioni termiche;
- miglioramento delle prestazioni energetiche ed ambientali dell'edificio;
- riciclabilità;
- valorizzazione dei prodotti del territorio;
- sviluppo di edilizia ecosostenibile;
- risposta alla crescente richiesta di materiali termoisolanti;
- buon rendimento economico;
- sviluppo economia circolare.

Le buone proprietà termiche del materiale ne consentono l'utilizzo in edilizia, come pannello di isolamento termico delle pareti di tamponatura esterna degli edifici.

Considerando il fatto che esteticamente il pannello 100 risulta simile al sughero, altre applicazioni del materiale potrebbero essere un utilizzo come rivestimento di pareti o come pannello per controsoffitti, nonché nel settore dell'arredamento e del design.

La diffusione commerciale del materiale può essere garantita, oltre che dalle buone prestazioni termiche, dalle ottime qualità ambientali.

Il prodotto viene interamente ottenuto da prodotti di scarto e può essere reperito in grandi quantità e brevi distanze, così da avere un materiale a km zero.

Inoltre, non utilizzando leganti chimici e non

- 16 -

subendo processi e trattamenti industriali che utilizzano prodotti chimici inquinanti, il materiale ottenuto è completamente biologico e sostenibile.

Il settore commerciale in cui viene inserito il prodotto è quello dell'architettura sostenibile e dei materiali naturali.

Nel caso di utilizzo come materiale di isolamento termico, il contenimento dell'impatto ambientale deve tener conto, oltre ai vantaggi relativi al consumo di materia prima in fase di produzione, quelli relativi alla riduzione del consumo di energia primaria per il riscaldamento degli edifici in fase di uso.

Il principio di una architettura verde è spesso interpretato in senso estetico ed esteriore. In questo caso un pannello totalmente naturale entra nell'edificio e nei componenti che lo compongono, diventando parte integrante dell'edificio e nel pieno rispetto dei valori etici della sostenibilità ambientale.

La sostenibilità è infatti intesa durante tutto il ciclo di vita poiché, oltre al riutilizzo di materiali riciclati, viene implementata una soluzione in grado di mitigarne la produzione in futuro.

Per quanto concerne lo smaltimento di rifiuti di origine naturale, dei 43,4 milioni di tonnellate prodotti in Europa, solo il 2,5% viene conferito in discarica, il 5% è destinato all'incenerimento, mentre il restante 90% viene smaltito tramite compostaggio ed altri processi di trasformazione biologica.

Vantaggiosamente, un riutilizzo dei rifiuti di

Barzanò & Zanardo

- 17 -

origine naturale può, in termini economici, garantirne uno sfruttamento più conveniente.

Se utilizzati per costruire componenti per l'edilizia, i rifiuti organici sono sottoposti ad un processo di "aggiornamento funzionale" che certamente ne aumenta il loro valore economico.

È infatti importante notare che l'uso di rifiuti organici, applicato nei processi di costruzione, può aumentarne il valore economico rispetto al normale smaltimento. Inoltre, il passaggio da un modello di produzione lineare ad uno circolare consentirebbe, al termine del ciclo di vita, di reinserire le risorse nel processo di produzione.

La presente invenzione è stata descritta a titolo illustrativo, ma non limitativo, secondo una sua forma preferita di realizzazione, ma è da intendersi che variazioni e/o modifiche potranno essere apportate dagli esperti del ramo senza per questo uscire dal relativo ambito di protezione, come definito dalle rivendicazioni allegate.

Barzanò & Zanardo Roma S.p.A.

12.5 Verbale di deposito



Ministero dello Sviluppo Economico

Ricevuta di presentazione

per

Brevetto per invenzione industriale



Domanda numero: 10202000024475

Data di presentazione: 16/10/2020

Ricevuta di presentazione per Brevetto per invenzione industriale

DATI IDENTIFICATIVI DEL DEPOSITO

Ruolo	Mandatario
Depositante	Andrea Tiburzi
Data di compilazione	16/10/2020
Riferimento depositante	RepBre[A18823]
Titolo	Pannello termoisolante a base di scarti di agrumi e metodo di produzione.
Carattere domanda	Ordinaria
Esenzione	NO
Accessibilità al pubblico	NO
Numero rivendicazioni	12
Autorità depositaria	

PRIVACY

Autorizzo il trattamento dei dati personali, inseriti all'interno del deposito, ai sensi del GDPR (Regolamento UE 2016/679) e del Decreto Legislativo 30 giugno 2003, n. 196 "Codice in materia di protezione dei dati personali"

RICHIEDENTE/I

Natura giuridica	Persona giuridica
Denominazione	Universita' degli Studi di Catania
P.IVA/CF	02772010878
Tipo Società	le universita'
Nazione sede legale	Italia
Comune sede legale	Catania (CT)
Indirizzo	Piazza Universita'
Civico	2
CAP	95124
Telefono	

Ricevuta di presentazione per Brevetto per invenzione industriale

Fax	
Email	
Pec	
Quota percentuale	100.0%

DOMICILIO ELETTIVO

Cognome/R.sociale	Barzanò & Zanardo Roma S.p.A.
Indirizzo	via Piemonte 26
Cap	00187
Nazione	Italia
Comune	Roma (RM)
Telefono	06 - 421771
Fax	06 - 4870273
Email\PEC	b-zroma@pec.barzano-zanardo.com

MANDATARI/RAPPRESENTANTI

Cognome	Nome
Tiburzi	Andrea
Balzano	Francesca
Banchetti	Marina
Biondini	Daniele
Burchielli	Riccardo
Cataldi	Silvia
De Filippis	Sara
Ferriero	Paolo
Gitto	Serena
Mulas	Chiara
Santi	Filippo
Zanardo	Giovanni

Ricevuta di presentazione per Brevetto per invenzione industriale

INVENTORI

Cognome	Nome	Nazione residenza
Vitale	Matteo	Italia
Cascone	Santi Maria	Italia

CLASSIFICAZIONI

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
---------	--------	-------------	--------	-------------

NUMERO DOMANDE COLLEGATE

DOCUMENTAZIONE ALLEGATA

Tipo documento	Riserva	Documento
Descrizione in italiano*	NO	DescrizioneInItaliano_A18823.pdf.p7m hash: a96a8dc74782db861babd08bb6537c30
Disegni provvisori	NO	DisegniProvvisori_A18823.pdf.p7m hash: 0aefb01354282d029741d2683613892
Riassunto	NO	RiassuntoInItaliano_A18823.pdf.p7m hash: 421e2d7074c5605cd36ced6f0ff85
Rivendicazioni	NO	RivendicazioniInItaliano_A18823.pdf.p7m hash: 3925da1a027eae49fd17e314eae2126
Disegni	SI	hash:
Lettera di Incarico	SI	hash:
Rivendicazioni in inglese	SI	hash:

PAGAMENTI

Tipo	Identificativo	Data
------	----------------	------

Ricevuta di presentazione per Brevetto per invenzione industriale

Bollo	01191096796513	09/07/2020
-------	----------------	------------

ESENZIONI INDICATE

Esenzione su diritti e tasse	DM 02/04/2007 - art. 2: esonero dal pagamento dei diritti di deposito e di trascrizione relativamente ai brevetti per invenzioni industriali, e modelli di utilita' a vantaggio di: Universita'; Amministrazioni Pubbliche aventi fra i loro scopi istituzionali finalita' di ricerca; Amministrazioni della Difesa; Amministrazioni delle Politiche Agricole, alimentari e forestali.
------------------------------	--

DOVUTO

Gli importi indicati non tengono conto delle eventuali esenzioni applicabili

Importo Tasse:	€ 140,00
Importo Imposta Bollo:	€ 20,00

NOTE