

Come sviluppare prodotti e processi circolari: un approccio metodologico basato sul ciclo di vita

Original

Come sviluppare prodotti e processi circolari: un approccio metodologico basato sul ciclo di vita / Tedesco, Silvia; Montacchini, ELENA PIERA - In: LCA IN EDILIZIA. Ambiti applicativi e orientamenti futuri della metodologia Life Cycle Assessment nel settore delle costruzioni / Lavagna, M.. - ELETTRONICO. - Santarcangelo di Romagna : Maggioli, 2022. - ISBN 978-88-916-5580-6. - pp. 104-116 [10.30448/uni.916.55806.11]

Availability:

This version is available at: 11583/2969161 since: 2023-01-25T11:32:27Z

Publisher:

Maggioli

Published

DOI:10.30448/uni.916.55806.11

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

Monica Lavagna (a cura di)

LCA IN EDILIZIA

**Ambiti applicativi e orientamenti futuri della metodologia
Life Cycle Assessment nel settore delle costruzioni**



politecnica


MAGGIOLI
EDITORE

La metodologia *Life Cycle Assessment* si sta affermando a livello internazionale come riferimento per valutare l'impatto ambientale di prodotti, processi e servizi. Il suo uso nel settore edilizio, sia alla scala dell'intero edificio sia alla scala dei materiali e prodotti, è particolarmente importante per evitare fenomeni di *greenwashing*, per dimostrare l'efficacia in termini di sostenibilità ambientale di scelte strategiche progettuali o produttive e per orientare le politiche ambientali.

L'Associazione Rete Italiana LCA, ambito in cui nasce questo libro, è stata creata con lo scopo di promuovere l'uso della metodologia LCA e di favorire scambi virtuosi di conoscenze e di esperienze tra studiosi ed esperti a livello nazionale. Questo libro raccoglie i contributi dei partecipanti al Gruppo di Lavoro Edilizia dell'Associazione e restituisce un quadro attuale e variegato di temi, ambiti applicativi e declinazioni metodologiche utili per chi opera nel settore edilizio.

Questo testo è destinato proprio agli operatori del settore edilizio: progettisti, produttori, costruttori, pubbliche amministrazioni, committenti possono trarre utile conoscenza dal quadro che viene delineato e dalle riflessioni critiche che emergono dai vari contributi, acquisendo consapevolezza sulle potenzialità della metodologia LCA. Nondimeno il libro è destinato a chi si occupa di LCA e vuole esplorare le modalità di applicazione e gli ambiti di interesse per il settore edilizio.

Il libro è articolato in quattro parti corrispondenti ad ambiti di interesse e attualità: Decarbonizzazione e stoccaggio di carbonio, Economia circolare, Progettazione *Life Cycle* e Strumenti di valutazione e certificazione ambientale *LCA-based*.

Autori: Francesco Asdrubali, Alessandra Battisti, Corrado Carbonaro, Olga Carcassi, Tecla Caroli, Manuela Crespi, Anna Dalla Valle, Sara Ganassali, Stefania Ganz, Gioia Garavini, Roberto Giordano, Serena Giorgi, Gianluca Grazieschi, Guillaume Habert, Aldo Iacomelli, Giuliana Iannaccone, Monica Lavagna, Adriano Magliocco, Cristina Mazzola, Alessia Medici, Elena Montacchini, Carol Monticelli, Elisabetta Palumbo, Sandra Persiani, Chiara Piccardo, Francesco Pittau, Francesca Reale, Silvia Tedesco, Francesca Thiebat, Salvatore Viscuso, Alessandra Zanelli, Alessandra Zamagni

Serie **Tecnologia, sostenibilità e Life Cycle Assessment**

La Serie raccoglie studi inerenti al rapporto tra architettura e sostenibilità, con attenzione agli aspetti costruttivi, alle scelte tecniche e all'organizzazione dei processi.

La sostenibilità viene indagata secondo l'approccio al ciclo di vita, concentrando l'interesse sugli aspetti ambientali e i relativi metodi di valutazione, con particolare riferimento al Life Cycle Assessment.

Responsabili scientifici: Andrea Campioli, Monica Lavagna

Comitato Scientifico: Ernesto Antonini, Roberto Bologna, Eliana Cangelli, Maria Cristina Forlani, Roberto Giordano, Maria Teresa Lucarelli, Adriano Magliocco, Massimo Perriccioli, Valeria Tatano, Maria Chiara Torricelli, Fabrizio Tucci

Il presente testo è stato pubblicato nella versione digitale Open Access grazie al contributo dell'Associazione Rete Italiana LCA. La pubblicazione raccoglie i saggi elaborati dai partecipanti A Gruppo di Lavoro Edilizia dell'Associazione Rete Italiana LCA.



Il testo è stato sottoposto al processo di *double blind peer review*.

© Copyright 2022 degli Autori

ISBN 978-88-916-5580-6

DOI 10.30448/UNI.916.55806

<https://doi.org/10.30448/UNI.916.55806>

Open Access Creative Commons license

CC BY-NC-ND 4.0 International Attribution - Non commercial – No Derivative



Pubblicato nel mese di Luglio 2022

Maggioli Editore è un marchio di Maggioli S.p.A.

Azienda con sistema qualità certificato ISO 9001:2015

47822 Santarcangelo di Romagna (RN) • Via del Carpino, 8

Tel. 0541/628111 • Fax 0541/622595

www.maggiolieditore.it

e-mail: clienti.editore@maggioli.it

Monica Lavagna (a cura di)

LCA IN EDILIZIA

**Ambiti applicativi e orientamenti futuri della metodologia
Life Cycle Assessment nel settore delle costruzioni**

Indice

Presentazione	7
<i>Maurizio Cellura, Bruno Notarnicola</i>	
Prefazione	9
<i>Monica Lavagna</i>	
0. Introduzione	
0.1 Percorsi di applicazione del Life Cycle Assessment nel settore edilizio	13
<i>Monica Lavagna</i>	
1. Decarbonizzazione e stoccaggio del carbonio	
1.1 Decarbonizzare il patrimonio edilizio	27
<i>Francesco Asdrubali, Gianluca Grazieschi</i>	
1.2 Embodied Carbon and Energy. Indicatori per la valutazione del ciclo di vita dell'edificio	37
<i>Roberto Giordano</i>	
1.3 Il contributo dei materiali verso la decarbonizzazione del ciclo di vita degli edifici	49
<i>Chiara Piccardo, Adriano Magliocco</i>	
1.4 Il carbon budget per l'edilizia	59
<i>Francesco Pittau, Olga Carcassi, Alessia Medici, Giuliana Iannaccone, Guillaume Habert</i>	
2. Economia circolare	
2.1 Life Cycle Assessment come strumento di supporto alle politiche di economia circolare nel settore edilizio	71
<i>Serena Giorgi</i>	
2.2 Studi LCA per la progettazione e applicazione di Tecnologie Reversibili	81
<i>Tecla Caroli</i>	
2.3 La circolarità nell'industria: Life Cycle Design per l'innovazione di prodotto e processo	91
<i>Corrado Carbonaro</i>	
2.4 Come sviluppare prodotti e processi circolari: un approccio metodologico basato sul ciclo di vita	105
<i>Silvia Tedesco, Elena Montacchini</i>	

3. Progettazione Life Cycle

- 3.1 La progettazione del ciclo di vita in architettura 121
Francesca Thiebat
- 3.2 Informazioni LCA come driver del processo decisionale nelle strutture di
progettazione: creazione di un Life Cycle Database di progetto in ambiente
BIM 131
Anna Dalla Valle
- 3.3 Modello parametrico integrato con LCA: proposta per un approccio
metodologico di valutazione di impatto ambientale di architetture reversibili
temporanee 143
Carol Monticelli, Alessandra Zanelli, Salvatore Viscuso, Cristina Mazzola
- 3.4 Approccio Life Cycle nell'ambito della progettazione e produzione delle
facciate adattive. Sfide, criticità e soluzioni nel settore edilizio italiano 157
Manuela Crespi, Alessandra Battisti, Sandra Persiani

4. Strumenti di valutazione e certificazione ambientale LCA-based

- 4.1 LCA nei Green Building Rating systems DGNB e Level(s) 173
Elisabetta Palumbo
- 4.2 L'importanza di benchmark LCA in Italia per il settore delle costruzioni 191
Sara Ganassali
- 4.3 Le dichiarazioni ambientali di prodotto nel mercato europeo. L'esperienza
dei blocchi cassero in legno cemento 203
Francesca Reale, Gioia Garavini, Alessandra Zamagni
- 4.4 Strumenti LCA e LCC per una edilizia sostenibile misurata 213
Aldo Iacomelli, Stefania Ganz

Presentazione

La Rete Italiana LCA nasce nel 2006 su iniziativa di ENEA al fine di individuare e mettere in relazioni gli studiosi della metodologia *Life Cycle Assessment* presenti in Italia, all'epoca ancora in esiguo numero. L'idea, nata in occasione di una giornata di studi sul metodo LCA, ha portato alla creazione di un *network* per lo scambio di informazioni, metodologie e buone pratiche e per il monitoraggio dello stato dell'arte e delle prospettive di applicazione in Italia. Da allora la Rete Italiana LCA ha ogni anno organizzato un convegno, quale importante momento di confronto dell'evolversi della metodologia e dell'ampliarsi degli ambiti applicativi. Da tali occasioni si è creata una comunità di appassionati specialisti di LCA che hanno dato vita alla rete di relazioni che ancora oggi è viva e in espansione.

Tra le varie iniziative della Rete, sono stati creati dei Gruppi di Lavoro, attivi ancora oggi, rappresentativi dei vari ambiti tematici a cui la valutazione LCA viene applicata: Alimentare e Agroindustriale, Energia e Tecnologie sostenibili, Edilizia, Gestione e Trattamento dei Rifiuti, Prodotti e Processi Chimici, Servizi Turistici, DIRE (*Development and Improvement of LCA methodology: Research and Exchange of experiences*), Social LCA.

Un momento di importante evoluzione della Rete è avvenuto nel 2012, quando si è costituita l'Associazione Rete Italiana LCA, grazie alla crescita della Rete per il costante impegno di quelli che poi sono diventati i soci fondatori, appartenenti a enti di ricerca (ENEA) e Università (Università degli studi di Bari, Politecnico di Milano, Università degli studi di Palermo, Università degli studi di Padova, Università di Chieti e Pescara, Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Reattività Chimica e la Catalisi). Da attività basate sull'entusiastico contributo spontaneo di un gruppo di persone, si è passati a una struttura organizzata, con un Consiglio Direttivo, dei delegati alle principali attività della Rete, un impegno costante nella gestione delle attività.

I partecipanti alla Associazione sono negli anni cresciuti, anche per la continua espansione e sviluppo della metodologia in tutti i settori. L'Associazione si pone come punto di riferimento scientifico a livello nazionale, operando con rigore metodologico e favorendo la crescita della conoscenza, anche tramite le attività di formazione che annualmente vengono organizzate.

Tra i compiti di informazione e divulgazione, i Gruppi di Lavoro si sono impegnati nel corso degli anni nella produzione di pubblicazioni che raccogliessero il contributo dei partecipanti, a testimonianza delle qualificate iniziative presenti a livello nazionale.

Anche il Gruppo di Lavoro Edilizia presenta in questo testo un'articolata raccolta di studi, ricerche, riflessioni metodologiche, frutto delle esperienze che i vari gruppi di ricerca hanno sviluppato nel corso degli anni. Un contributo prezioso a supporto di quel percorso di raccolta e condivisione delle esperienze che fa crescere la comunità scientifica e che è nello spirito dell'Associazione.

L'Associazione Rete Italiana LCA garantisce un continuo aggiornamento delle sue attività e iniziative tramite il sito e i propri canali *social* su LinkedIn e Facebook, strumenti attraverso i quali chi è interessato a unirsi alla rete può trovare informazioni e partecipare attivamente.

Maurizio Cellura

Presidente della Associazione Rete Italiana LCA negli anni 2015-2019 e membro del Consiglio Direttivo dal 2012. Professore ordinario di Fisica tecnica ambientale, presso l'Università degli studi di Palermo.

Email: maurizio.cellura@unipa.dream.it

Bruno Notarnicola

Presidente della Associazione Rete Italiana LCA negli anni 2019-2023 e membro del Consiglio Direttivo dal 2012. Professore ordinario di Scienze merceologiche, presso l'Università degli studi di Bari Aldo Moro.

Email: bruno.notarnicola@uniba.it

Prefazione

Il presente libro raccoglie i contributi di alcuni tra i partecipanti più attivi al Gruppo di Lavoro Edilizia della Associazione Rete Italiana LCA. I Gruppi di Lavoro hanno l'obiettivo di creare un *network* nazionale di studiosi che applicano la metodologia LCA in uno specifico ambito o settore. Questo porta a relazioni particolari interdisciplinari e transdisciplinari e a percorsi differenziati di specializzazione: molti ricercatori che operano nel settore edilizio si sono interessati alla metodologia LCA per applicare una procedura di valutazione rigorosa della sostenibilità a sostegno delle scelte progettuali (questo è stato anche il percorso mio e della maggior parte delle persone che partecipano al gruppo di lavoro e hanno contribuito al presente libro); molti ricercatori esperti di LCA (con formazione nelle scienze ambientali, ingegneria ambientale, ecc.) hanno dedicato attenzione alle applicazioni in particolare nel settore edilizio. Questo differente modo di affrontare gli studi LCA in edilizia porta anche a una ricchezza di approcci e punti di vista.

Il fatto che la maggior parte dei contributi presentati in questo testo sia di studiosi che dal settore edilizio si sono dedicati a specializzarsi nella metodologia LCA rivela la forte esigenza di esplorare procedure scientifiche per affrontare i temi della sostenibilità in edilizia, e permette anche di testimoniare la varietà di applicazioni possibili che la metodologia LCA può avere. Infatti ogni ricercatore, a partire da una profonda conoscenza del settore edilizio e applicando la metodologia nello specifico ambito di interesse e studio, ha esplorato modalità peculiari, portando grazie alla sua esperienza un contributo originale all'avanzamento delle conoscenze e all'ampliamento delle potenzialità applicative della metodologia LCA.

Il libro restituisce dunque questa ricchezza di punti di vista, di percorsi metodologici, di esplorazioni applicative. Ne deriva un quadro articolato e complesso, rappresentativo di alcuni dei principali temi trainanti oggi, proprio perché i singoli contributi restituiscono percorsi di ricerca avanzata. Ne emerge anche una varietà di scale applicative, dall'edificio, al sistema costruttivo, al singolo prodotto/materiale.

Per cercare di dare un ordine ai contributi sono stati individuati 4 capitoli: i primi due raccolgono i contributi che si concentrano attorno a due temi fortemente trainati dalle attuali politiche europee, ossia la decarbonizzazione e l'economia circolare; il terzo capitolo raccoglie i contributi relativi all'applicazione della metodologia LCA nel progetto di architettura; il quarto capitolo approfondisce alcuni strumenti di valutazione e di certificazione basati sulla metodologia LCA e applicati in specifico nel settore edilizio.

Va sottolineato che la ricchezza del libro consiste anche nella varietà dei punti di vista e dunque anche nel possibile diverso contributo critico inerente il medesimo tema che può trasparire dai diversi saggi qui raccolti. Anche il tipo di contributi si presenta alquanto variegato, da contributi di carattere più teorico, che tratteggiano lo stato dell'arte, a contributi più specifici di carattere applicativo, che illustrano esempi e casi studio con lo scopo comunque di desumerne considerazioni di carattere generale. Anche questo costituisce la ricchezza del testo, creando un quadro ben documentato e completo, ricco di spunti di riflessione.

Monica Lavagna

Coordinatore del GdL Edilizia della Associazione Rete Italiana LCA dal 2008 e curatore del presente libro. VicePresidente della Associazione Rete Italiana LCA negli anni 2019-2023 e membro del Consiglio Direttivo dal 2012. Professore associato di Tecnologia dell'architettura presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ambiente costruito e Ingegneria delle costruzioni (ABC), Unità di ricerca Life Cycle Team. Email: monica.lavagna@polimi.it



2.4 Come sviluppare prodotti e processi circolari: un approccio metodologico basato sul ciclo di vita

Il passaggio a un'economia circolare rappresenta una delle azioni chiave dell'Unione Europea, che considera prioritario investire in un modello alternativo a quello attuale, di tipo lineare, legato a "produzione-consumo-smaltimento". La transizione verso un'economia circolare sposta l'attenzione sul riutilizzare, rinnovare, riciclare i materiali e i prodotti esistenti in una logica di rifiuto come risorsa (European Commission, 2015).

Sostenuta dalle politiche internazionali, l'economia circolare può essere un motore di innovazione e un'opportunità per molti settori, compreso quello dell'edilizia. I dati riportati nel documento *Verso un modello di economia circolare per l'Italia* del Ministero dell'Ambiente italiano evidenziano infatti l'importanza strategica dell'industria delle costruzioni nello sviluppo di un'economia in cui l'uso sostenibile delle risorse e l'utilizzo dei rifiuti diventano le chiavi per un nuovo modello di sviluppo (Ministero dell'Ambiente italiano, 2017). In questa direzione, l'Italia ha introdotto i Criteri Ambientali Minimi (CAM), strumenti di politica pubblica in grado di promuovere l'impiego di prodotti con contenuto riciclato e di materiali a basso impatto ambientale nel ciclo di vita (Decreto 259/2017 del Ministero dell'Ambiente). Il sostegno legislativo e l'incentivo allo sviluppo e all'uso di prodotti ottenuti dal riciclaggio di materie prime seconde stanno portando alla diffusione di progetti e "buone pratiche" di cooperazione tra imprese, organizzazioni di ricerca e start-up specializzate nel riutilizzo e nel riciclaggio di rifiuti e materie prime secondarie (Pauli, 2015; Zamboni, 2011).

Rifiuti e scarti, anche di settori apparentemente lontani da quello dell'edilizia, possono infatti rappresentare un'opportunità strategica per lo sviluppo non solo di nuovi prodotti, ma anche di nuove filiere "circolari" e di processi di simbiosi industriale.

In questo contesto, l'approccio al ciclo di vita rappresenta uno dei principali strumenti per la valutazione di prodotti e la pianificazione di processi, utile per lo sviluppo di soluzioni e strategie di economia circolare.

Sulla base di queste premesse, il capitolo è finalizzato a illustrare le potenzialità dell'approccio al ciclo di vita per lo sviluppo di nuovi prodotti per l'edilizia a partire da scarti di altre lavorazioni, in particolare derivanti dalla valorizzazione di scarti del settore agroalimentare e tessile, che hanno portato alla definizione di nuovi scenari industriali di tipo intersettoriale. Attraverso la descrizione di alcuni progetti condotti dal Gruppo TeAM del Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, in collaborazione con piccole e medie imprese, il contributo evidenzia l'approccio metodologico adottato, in una logica dalla "tomba alla culla", in cui i rifiuti di un processo diventano nuova risorsa per un altro.

2.4.1 Come sviluppare prodotti e processi circolari

L'approccio metodologico generalmente utilizzato dal gruppo di ricerca per lo sviluppo di nuovi prodotti e di scenari circolari è caratterizzato da logiche legate all'*upcycling* e si basa

Silvia Tedesco

Ricercatore RTDB di Tecnologia dell'architettura presso il Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design.
E-mail: silvia.tedesco@polito.it

Elena Montacchini

Professore Associato di Tecnologia dell'architettura presso il Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design.
E-mail: elena.montacchini@polito.it

sulle seguenti macro-fasi:

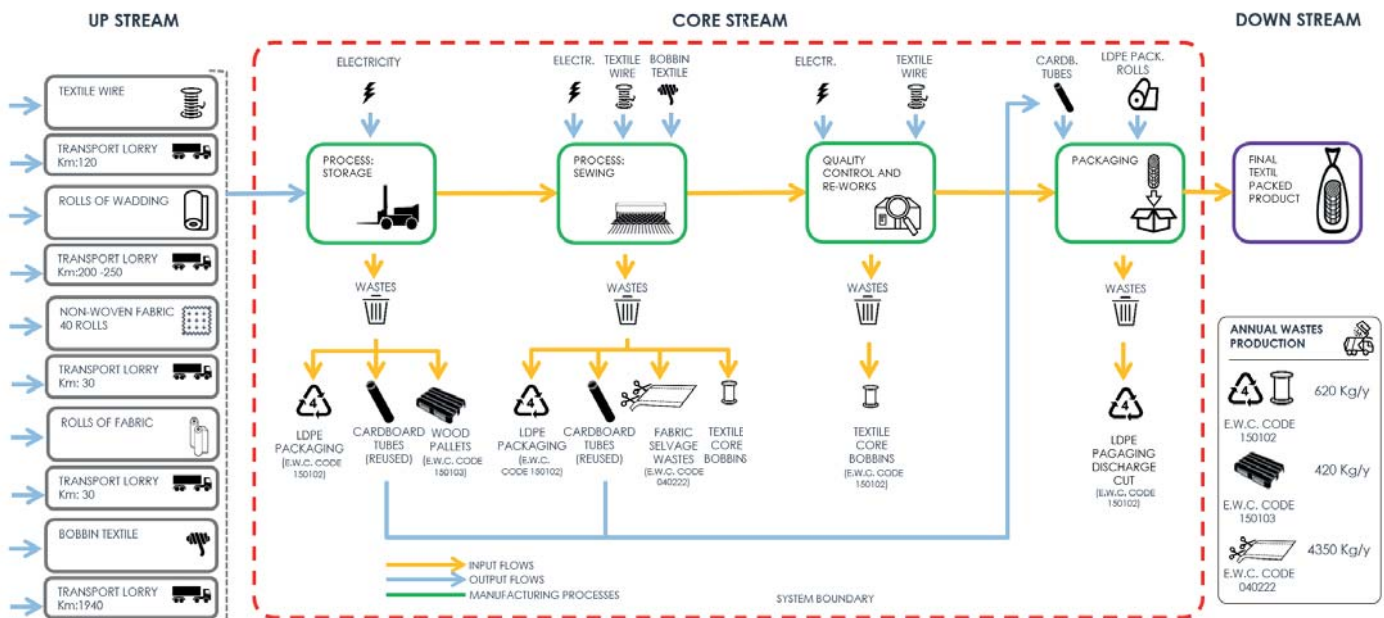
- sviluppo di audit ambientali presso le aziende, per identificare tipologia e quantitativi di rifiuti di produzione;
- studio di dati derivanti da letteratura scientifica internazionale e database, finalizzati a identificare potenziali applicazioni di riciclaggio per la realizzazione di prodotti per l'edilizia;
- mix design, sperimentazione e prototipazione;
- verifica dei risultati dal punto di vista delle prestazioni tecnologiche e ambientali;
- identificazione degli attori e degli stakeholder della filiera (pubblici e privati) e ipotesi di nuovi modelli di economia circolare.

Audit ambientali

La fase di audit ambientale presso le aziende consente lo studio e la conoscenza del sistema di produzione, l'identificazione dei processi a maggior impatto e la valutazione delle azioni di miglioramento che possono essere messe in atto.

Per una prima acquisizione di dati, il gruppo TeAM ha sviluppato un questionario, come strumento di approccio e conoscenza delle aziende coinvolte nei progetti, con l'obiettivo di caratterizzare il tipo di produzione, gli scarti prodotti e il loro riuso o smaltimento. Il questionario è suddiviso in tre macro argomenti, una prima parte dedicata principalmente ai dati aziendali, seguita da una seconda sezione dedicata alla tipologia di produzione industriale e ai volumi di produzione. La parte finale si focalizza sulla produzione degli scarti definendo la tipologia, i quantitativi, la frequenza di produzione e il costo di smaltimento. Lo studio del processo di produzione e gestione dei rifiuti, la definizione del sistema input-output del sistema di produzione e la delimitazione del corrispondente diagramma di flusso viene effettuato attraverso sopralluoghi e interviste all'interno dell'azienda, come esemplificato in Figura 2.4.1 (Carbonaro et al., 2018).

Figura 2.4.1 Esempio di *flow chart* di analisi del processo produttivo di un'azienda tessile. Fonte: immagine di C. Carbonaro.



Studio di dati derivanti da letteratura scientifica e database

Per valutare le potenzialità di riuso e di riciclo dei materiali di scarto e identificare potenziali applicazioni per la realizzazione di prodotti per l'edilizia, parallelamente alla fase di audit, vengono condotte analisi sullo stato dell'arte utilizzando le principali piattaforme della ricerca scientifica internazionale, quali Scopus, ResearchGate e Science-Direct. Definito un ambito temporale di ricerca, selezionate le principali *keywords*, la documentazione scientifica estratta viene catalogata su un database, suddivisa per tematiche, per tipologia di articolo (review, sperimentale o argomentativo); una successiva schedatura viene effettuata per gli articoli che documentano informazioni ritenute rilevanti per le successive fasi di sperimentazione (Figura 2.4.2).

Un'ulteriore ricerca viene effettuata sulle materiotecche virtuali dedicate ai materiali sostenibili, riciclati e riciclabili, come MATERIAL RECYCLING, Material Connexion e MATto, e un'analisi di anteriorità su brevetti e modelli di utilità, attraverso Orbit. Questo insieme di dati costituisce la premessa per le fasi di mix design, sperimentazione e prototipazione, in quanto consente di comprendere le tecniche, i processi e le potenzialità di eventuali esperienze già condotte.


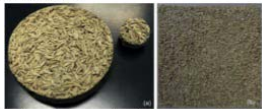
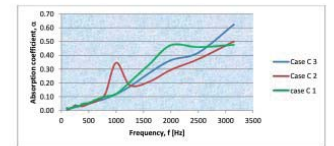
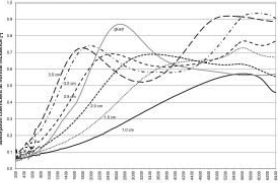
<p>TITOLO: THE ANALYSIS OF SOUND ABSORBING PERFORMANCES FOR COMPOSITE PLATES CONTAINING RECYCLED TEXTILE WASTES</p> <p>OBIETTIVO: Riutilizzo di scarti di fibre tessili, reintrodondole in un processo produttivo al fine di comporre un isolante acustico multistrato.</p> <p>MATERIE PRIME: <ul style="list-style-type: none"> - Scarti di fibre tessili (con fibre corte) comprendente 85% di PNA (poliacrilonitrile) più 15% PE (poliesterere) + Placca in sughero con spessore del materiale di 3 mm + Lastra di polistirolo estruso dello spessore di 7 mm + Piastra di polietilene espanso con struttura spaziale a celle chiuse, coperta su un lato con foglio di alluminio, spessore del materiale essendo 10 mm </p> <p>ASSEMBLAGGIO: Le piastre sono state composte attraverso un incollaggio a freddo utilizzando colla poliolioprenica, a base di solventi organici. I tre provini sono stati composti affiancando gli scarti tessili a ognuno delle placche elencate secondo il seguente schema.</p>	<p>TITOLO: Investigation of the acoustic properties of needle punched nonwoven produced of blend with sustainable fibers</p> <p>OBIETTIVO: La novità di questo articolo consiste nel presentare i risultati di una caratterizzazione termica, acustica e analisi del ciclo di vita di un materiale innovativo, ottenuto dagli scarti della lavorazione del riso. Il riso infatti risulta essere la terza merce più prodotta al mondo dopo la canna da zucchero e il mais.</p> <p>MATERIE PRIME: Buccia di riso</p> <p>ASSEMBLAGGIO: Per la realizzazione del campione, è stata utilizzata come collante per la buccia di riso, una percentuale di colla poliuretamica, con una densità di 1.000 kg /m³, del 2,5% del peso totale. Il poliuretano utilizzato è un adesivo poliuretano in dispersione acquosa applicato con tecnica a spruzzo. Sono stati quindi composti dei campioni di forma circolare da 2,9 x 10 cm di diametro, per misure acustiche, e pannelli quadrati di 300 x 300 mm per quelli termici.</p>
	
<p>TEST ACUSTICI: Coefficiente di assorbimento acustico calcolato tramite tubo di impedenza secondo SR EN ISO 10534-2: 2005 con frequenza da 100 a 3200 Hz (dal quale è possibile calcolare la riduzione complessiva del rumore).</p>	<p>TEST ACUSTICI: Coefficiente di assorbimento acustico calcolato attraverso tubo di impedenza. Sono state considerate due configurazioni: la misurazione nell'intervallo di frequenza 100-1600 Hz, con campioni di diametro pari a 29 e nell'intervallo 500-6400 Hz campioni di diametro pari a 100 mm.</p>
<p>RISULTATI ACUSTICI:</p>  <p>Si può notare come tutti i materiali non sviluppano proprietà fonoassorbenti fino a 800 Hz. Dal grafico emerge come il coefficiente di assorbimento sia direttamente proporzionale all'aumentare della frequenza con un picco massimo alla massima frequenza calcolata, 3200 Hz. In particolare per il campione C1 abbiamo un coefficiente massimo di 0,54, per il campione C2 di 0,51 e per il campione C3 di 0,63. I coefficienti medi corrispondono invece per ogni relativo campione a 0,37, 0,30, 0,36.</p>	<p>RISULTATI ACUSTICI:</p>  <p>Come previsto il materiale sciolto presenta valori di coefficiente di assorbimento più bassi rispetto a quello incollato; inoltre sono stati valutati i coefficienti per diversi spessori. I valori massimi sono circa 0,74 e 0,91 misurati rispettivamente a 1700 e 5300 Hz per lo spessore massimo di 3,5 cm.</p> <p>ALTRO: <ul style="list-style-type: none"> - Test termico_ small hot box - Resistenza al flusso e porosità (ISO 9053) - Analisi LCA (ISO 14040) </p>

Figura 2.4.2 Esempio di sistema di schedatura di articoli da letteratura scientifica internazionale. Fonte: immagine di G. Targa.

Mix design, sperimentazione, prototipazione

L'attività di mix design e sperimentazione prevede una prima fase di selezione dei materiali, di caratterizzazione, dal punto di vista fisico e chimico, e di verifiche preliminari di lavorabilità, funzionali alla realizzazione di provini.

Sulla base dei risultati ottenuti vengono poi realizzati prototipi su cui testare le performance e valutare l'eco-compatibilità dei processi produttivi.

Il gruppo di ricerca si avvale del supporto dei Laboratori del Politecnico di Torino e in particolare delle attività del Laboratorio Sistemi Tecnologici Innovativi (LaSTIn). Il Laboratorio è dotato di attrezzature per realizzare test e prove su materiali, componenti e sistemi,

connesse sia a progetti di ricerca avanzati, sia ad attività di certificazione prestazionale in ambito energetico e ambientale (Figura 2.4.3).



Figura 2.4.3 Attività di sperimentazione al laboratorio LaSTIn.

Valutazioni tecnologiche e ambientali

Sui provini e/o sui prototipi realizzati vengono verificati i requisiti di resistenza meccanica e valutate le prestazioni termiche e acustiche come previsto dalle normative tecniche in materia, in base all'obiettivo specifico del progetto (Figura 2.4.4). Per valutare gli impatti ambientali vengono effettuati studi *Life Cycle Assessment* (LCA), attraverso specifici software (Sima Pro, eTOOL, Open LCA, Cambridge Engineering Selector) e database (Ecolnvent, ELCD).



Figura 2.4.4 Attrezzature e strumenti di prova.

Scenari di filiera

L'ultima fase prevede la progettazione di un modello di filiera circolare *ad hoc* per le aziende coinvolte. In generale vengono identificate le figure della rete (*stakeholders* o portatori di interesse) e le fasi del nuovo processo. Nello specifico vengono individuate le attrezzature necessarie a svolgere le operazioni di raccolta ed eventuale imballaggio dei rifiuti, i luoghi adibiti allo stoccaggio del materiale, i processi industriali per la trasformazione della materia e un'ipotesi di costi e i ricavi per la realizzazione del complesso circolare (Figura 2.4.5).

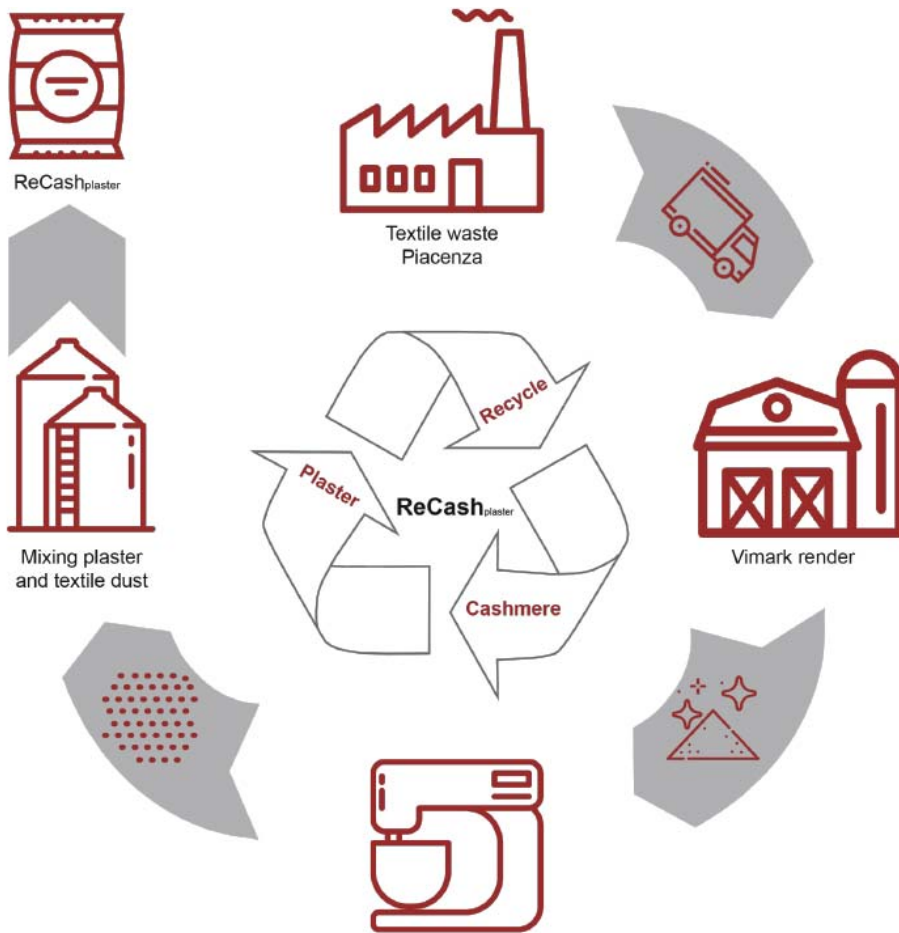


Figura 2.4.5 Ipotesi di scenario di economia circolare. Lo scenario si riferisce alla ricerca ReCache Plaster descritta nel paragrafo successivo. Fonte: immagine di S. Fiorina.

2.4.2 Esperienze di ricerca e sperimentazione

Questo paragrafo illustra alcune esperienze condotte dal Gruppo TeAM del Dipartimento di Architettura e Design – Politecnico di Torino, finalizzate allo sviluppo di eco-prodotti edilizi basati su rifiuti riutilizzati e riciclati, derivanti da processi di lavorazioni industriali e caratterizzati, nella maggior parte dei casi, da studi *Life Cycle Assessment* (LCA).

In particolare si descrivono i seguenti progetti: 1) ECOFFI, incentrato sul riciclaggio delle pannocchie di mais e della paglia di riso per la produzione di blocchi di cemento; 2) ReCache Plaster, finalizzato alla valorizzazione di scarti tessili pre-consumo all'interno di malte per intonaci; 3) GRE_EN_S, il cui obiettivo è lo sviluppo di un innovativo sistema di parete vegetata modulare, a basso impatto ambientale.

ECOFFI

L'obiettivo della ricerca "Ecological CONcrete Filled Fibers" (ECOFFI) è sviluppare un nuovo prodotto in calcestruzzo, attraverso il riciclaggio dei sottoprodotti agricoli, tramite la progettazione di una filiera a km 0. La ricerca è stata sviluppata nell'ambito di un programma

di cooperazione interregionale tra Politecnico di Torino e Piccole e Medie Imprese italiane e francesi (Sarotto Group sas, Narzole, CN e Vicat Group, L'Isle D'Abeau).

A seguito di una mappatura e quantificazione dei residui agricoli disponibili in un contesto locale, con rilevamento per ciascun sottoprodotto delle diverse caratteristiche (tipologia di materiale, dimensioni, quantità, frequenza di produzione, prezzo, ecc.), di un'analisi dell'attuale scenario di utilizzo degli scarti nel settore dell'edilizia, è stato possibile selezionare i sottoprodotti della filiera del mais e del riso, in particolare il tutolo di mais e la paglia di riso. Sono state poi condotte una serie di sperimentazioni attraverso la realizzazione di provini ottenuti dalla miscela di: cemento naturale, acqua, acido citrico (ritardante di presa), paglia di riso e tutolo di mais (Giordano et al., 2019).



Figura 2.4.6 Componenti del mix design e prototipo del nuovo blocco.

All'interno dei laboratori del Politecnico di Torino sono stati verificati i requisiti di lavorabilità, resistenza meccanica e resistenza termica, come previsto dalla normativa tecnica.

La metodologia *Life Cycle Assessment* riferita alla fase *cradle to gate*, ovvero dall'estrazione delle materie prime al cancello di uscita dell'azienda produttrice del prototipo (Sarotto Group sas), è stata utile per confrontare i processi produttivi in termini di consumi energetici ed impatti (EE *Embodied Energy*+ EC *Embodied Carbon*) rispetto a quelli di blocchi in calcestruzzo leggero disponibili sul mercato.

La tabella che segue (Tabella 2.4.1) riporta i dati di EE e EC del blocco ECOFFI fino al cancello di entrata dell'azienda Sarotto Group sas.

Materiale	F.U. (kg)	EE (MJ/kg)	EC (kgCO ₂ /kg)
Cemento Prompt, acqua, additivi	0,76	2,27	0,28
Tutolo di mais	0,19	0,33	-0,58
Paglia di riso	0,05	0,074	-0,02

Tabella 2.4.1 EE e EC del blocco ECOFFI fino al cancello di entrata dell'azienda Sarotto Group sas. I dati del cemento Prompt non possono essere pubblicati separatamente, vengono quindi forniti in forma aggregata.

Includendo nella valutazione il processo produttivo è stato calcolato un valore di EE pari a 3,03 MJ/kg e di EC pari a -0,16 kgCO₂/kg: il valore di EE è allineato a quello medio di calcestruzzi leggeri in blocchi, compreso fra 2,53 e 3,5 MJ/kg (Andreotti et al., 2019); il valore di EC evidenzia il credito ambientale legato ai componenti vegetali.

La ricerca è tutt'ora in corso e sono in fase di implementazione i test sul prodotto (come ad esempio la resistenza al fuoco) e lo studio della filiera produttiva.

ReCache Plaster

ReCash Plaster (Recycled Cashmere for Plaster) è uno studio di prefattibilità finalizzato alla valorizzazione di scarti tessili pre-consumo all'interno di malte per intonaci. Lo studio è stato condotto assumendo come riferimento il distretto tessile del biellese e ha visto il coinvolgimento di un'azienda leader nella produzione di intonaci (Vimark srl, Peveragno, CN). In particolare sono state mappate venti delle aziende tessili del distretto, sono stati indagati i processi produttivi e sviluppati *flow chart* per evidenziare le quantità di scarti generati nelle diverse fasi e la loro tipologia.

L'analisi aziendale ha consentito di identificare tre tipologie di scarto prevalente: le polveri e microfibre, le cimose e i sottocarda (Figura 2.4.7). L'interesse è ricaduto sulle polveri e microfibre, scarti che da un lato costituiscono un costo di smaltimento per le aziende, non avendo la possibilità di essere riprocessati (cioè di essere reimessi nel ciclo produttivo e tornare ad essere filato), dall'altro risultano i più idonei alle finalità della sperimentazione. La letteratura scientifica infatti riporta alcune interessanti sperimentazioni sull'impiego di scarti tessili sotto forma di polveri e microfibre per il miglioramento delle prestazioni fisiche delle malte e di le fibre di lana per il rinforzo di cementi.

Tra gli scarti selezionati, il più interessante dal punto di vista di quantità, composizione e dimensione è stato quello delle polveri di lavorazione del Lanificio Fratelli Piacenza di Pollone (BI) in lana e cashmere. Tali scarti si presentano sotto forma di microfibre pressate in balle rettangolari o cilindri e sono attualmente destinati a discarica.

In fase sperimentale, a partire da un intonaco fibrato premiscelato (a base di cemento e calce aerea) prodotto dall'azienda Vimark sono state sostituite le fibre di vetro contenute nella miscela con diverse concentrazioni di scarto tessile.

Su differenti mix design sono state effettuate le prove di laboratorio (secondo la UNI EN 998-1 e UNI EN 1015) necessarie per verificare il contributo della fibra tessile: prove sulla malta fresca, come la consistenza o la percentuale di acqua nell'impasto, e prove a 28 giorni, come l'aderenza al supporto, la resistenza a flessione e a compressione.



Figura 2.4.7 Tipologie di scarti tessili: polveri e microfibre (a sinistra), cimose (al centro) e sottocarda (a destra).

Confrontando i risultati finali con gli intonaci fibrati attualmente prodotti nello stabilimento, i test eseguiti con 5 g/kg di scarto tessile hanno evidenziato un significativo miglioramento delle prestazioni: l'adesione al supporto raddoppia e le resistenze meccaniche sia a flessione sia a compressione sono notevolmente maggiori. È in corso uno studio LCA di tipo comparativo per valutare le performance ambientali della nuova miscela. Da analisi microscopiche del campione, effettuate dal Consiglio Nazionale delle Ricerche di Biella (CNR-ISMAL), le fibre tessili non tendono a degradarsi nel tempo, garantendo il mantenimento delle prestazioni.

Figura 2.4.8 I campioni di intonaco realizzati con microfibre di lana e cachemere.



Sulla base dei risultati dell'attività di ricerca e sperimentazione (Figura 2.4.8) sono stati ipotizzati due possibili scenari di filiera per mettere in rete l'azienda che produce lo scarto e l'azienda che lo riceve. Tali scenari ruotano attorno al problema dello stoccaggio, lavorazione e trasporto degli scarti. Il primo scenario (Figura 2.4.5) vede come protagonista l'azienda produttrice di intonaci che dovrebbe investire in un macchinario per la dispersione industrializzata delle fibre nella miscela, eseguita manualmente in fase sperimentale. Il secondo scenario prevede l'aggiunta di un tassello alla filiera, tra l'azienda fornitrice dello scarto e l'azienda di produzione degli intonaci: una terza azienda in grado di occuparsi del prelievo degli scarti e del loro trattamento per la successiva valorizzazione economica come nuova risorsa. Ognuno di questi scenari presenta punti di forza e di debolezza che meritano di essere discussi in fase di sviluppo industriale, ma è formulato per prevedere dei vantaggi economici per le parti coinvolte. In una logica di *upcycling*, alcuni scarti tessili pre-consumo possono dunque trasformarsi da rifiuto a risorsa ed essere inseriti in una nuova "catena del valore" (Montacchini et al., 2019).

GRE_EN_S

GRE_EN_S, acronimo di "GREen ENvelope System", costituisce un esempio fattivo di *closed loop* nella realizzazione di pareti vegetate. GRE_EN_S è un progetto di ricerca tra università e aziende, finanziato sui fondi POR_FESR della Regione Piemonte, che ha avuto come obiettivo lo sviluppo e la sperimentazione di un innovativo sistema di parete vegetata modulare, a basso impatto ambientale, risultato di un approccio sistemico alla progettazione e produzione, legato all'intero ciclo di vita. GRE_EN_S infatti è un sistema vegetato che utilizza elementi di scarto da lavorazioni industriali (Figura 2.4.9), riduce la quantità complessiva di materiali e semilavorati della stratigrafia, ottimizza le fasi di assemblaggio, garantisce elevate prestazioni in fase di esercizio, riduce le operazioni di manutenzione e limita gli impatti a fine vita.

Per lo sviluppo della ricerca sono stati assunti come riferimento i dati di letteratura e i prodotti già disponibili sul mercato (Giordano et al., 2013).

La progettazione della stratigrafia del sistema GRE_EN_S (Figura 2.4.10) è stata effettuata nell'ottica di individuare materie prime seconde a basso impatto ambientale e a costo contenuto, in grado di sostituirsi alle materie prime generalmente utilizzate nella



Figura 2.4.9 Substrato realizzato con scarti di feltrini sottosedie sminuzzati.

realizzazione di una parete vegetata. In particolare è stata condotta un'attività di valutazione e di caratterizzazione ambientale delle materie prime e delle materie prime seconde che costituiscono lo strato di accrescimento delle piante (substrato realizzato con una miscela a base di scarti di produzione di feltrini sottosedie sminuzzati, utilizzati in sostituzione dei polimeri idroretentori normalmente impiegati in queste soluzioni), lo strato di rivestimento (realizzato con un feltro in polipropilene riciclato), l'elemento strutturale (in alluminio riciclato).

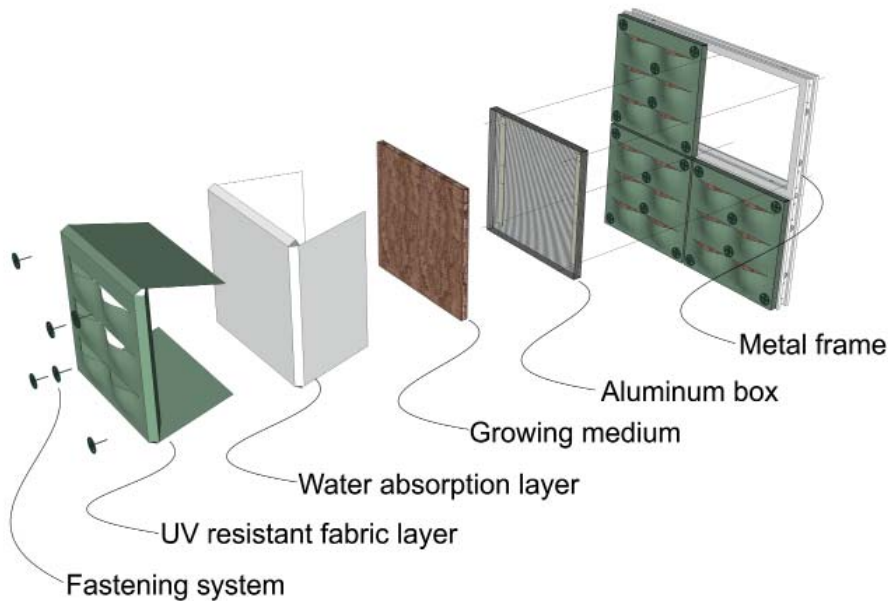


Figura 2.4.10 Stratigrafia del modulo vegetato.

Attraverso uno studio LCA sono stati confrontati due scenari (Figura 2.4.11): il primo, relativo all'ipotesi di realizzazione del pannello vegetato esclusivamente con materie prime vergini, il secondo con contenuto di riciclato (Giordano et al., 2014). Se si considera l'impatto ambientale legato al surriscaldamento globale (GWP, *Global Warming Potential*), dovuto alle emissioni inquinanti in atmosfera, il secondo scenario, con un GWP pari a 20.45 kg CO₂eq/m², risulta avere un impatto più che dimezzato rispetto al primo, con un GWP di 55.98 kg CO₂eq/m² (Serra et al., 2017).

Il sistema parete è stato inoltre progettato per essere disassemblabile a fine vita, grazie a connessioni meccaniche reversibili e alla separabilità e riciclabilità della maggior parte degli elementi che compongono la sua stratigrafia.

LWS Layer	Material	F.U. [kg/m ²]	Initial EE _{NR} [Mj/m ²]	E.S.L.	EE _{NR} [Mj/m ²]
Vegetation	Honeysuckle	-	5,00	10	25,00
External cladding	PP fibre	5,88	476,34	10	2381,69
Filter and water retention fabric	VI fabric	0,392	34,28	10	171,42
Dry growing medium	Potting soil	1,68	28,51	10	142,55
Roots holder layer	PP geomat	1,3	105,31	20	263,28
LWS Framework	Al alloy	5	1017,15	50	1017,15
		14,25	1666,59		4001,09

GRE_EN_S Reference scenario (E.S.L. = Expected Service Life).

LWS Layer	Material	F.U. [kg/m ²]	Initial EE _{NR} [Mj/m ²]	E.S.L.	EE _{NR} [Mj/m ²]
Vegetation	Honeysuckle	-	5,00	10	25,00
External cladding	30% REC PP fiber	5,88	338,81	10	1694,03
Filter and water retention fabric	VI fabric	0,392	34,28	10	171,42
Dry growing medium	Potting soil - REC felts	1,68	14,38	10	71,90
Roots holder layer	30% REC PP geomat	1,3	74,91	20	187,27
LWS Framework	30% REC Al alloy	5	459,70	50	459,70
		14,25	927,08		2609,32

GRE_EN_S Recycling scenario (E.S.L. = Expected Service Life).

Figura 2.4.11 Scenario di riferimento (pannello GRE_EN_S con materie prime vergini) e scenario con materiali riciclati (F.U.: unità funzionale, EE_{NR}: Embodied Energy da fonti non rinnovabili, GWP: Global Warming Potential). Fonte: Giordano et al., 2014.

Oltre alla valutazione di aspetti legati alla selezione dei materiali, al sistema di produzione e assemblaggio e alle modalità di dismissione e riciclo, il progetto ha posto particolare attenzione anche alla valutazione delle prestazioni in fase di esercizio. I prototipi realizzati sono stati testati sia in laboratorio sia in situ (Figura 2.4.12) per verificare prestazioni tecnologiche, agronomiche, termiche, acustiche in esercizio. I risultati dei monitoraggi hanno dimostrato un significativo miglioramento di tutte le prestazioni rispetto alla media delle soluzioni in commercio (Serra et al., 2017).

Sulla base dei risultati raggiunti e di successive attività di implementazione e ottimizzazione dei prototipi, che hanno portato allo sviluppo di un brevetto per invenzione industriale, il



Figura 2.4.12 Edificio campione realizzato a Environment Park (TO) per i monitoraggi in situ.

progetto di ricerca è diventato una vera e propria attività di impresa, una start up operante nel settore della ricerca, della produzione e della commercializzazione di prodotti e servizi innovativi ad alto valore tecnologico, con particolare riferimento alle pareti vegetate. La start up, che ha ottenuto il riconoscimento di Spin Off del Politecnico di Torino, è la dimostrazione della possibilità di mettere in atto un nuovo modo di fare innovazione secondo logiche circolari (Larcher et al., 2018).

2.4.3 Conclusioni

Il contributo dimostra come, utilizzando l'approccio *Life Cycle* come strumento di progetto, possano essere "disegnati" non solo nuovi prodotti ma anche nuovi processi di economia circolare. Al di là dei risultati specifici ottenuti nelle singole ricerche o del loro livello di maturità e approfondimento, la metodologia adottata è stata utilizzata in modo trasversale, in diversi momenti del processo progettuale (dall'ideazione delle soluzioni alla verifica delle performance ambientali), con il fine ultimo di individuare modalità per ridare valore a prodotti di scarto secondo logiche di *upcycling* e di immaginare nuove prospettive di simbiosi industriale basate sui principi dell'economia circolare.

Le attività di ricerca e sperimentazione, condotte in collaborazione con Piccole e Medie Imprese, documentano inoltre il crescente interesse su questi temi non solo da parte del mondo accademico ma anche di quello produttivo. Nel complesso i risultati evidenziano che nuovi processi virtuosi sono attuabili secondo un approccio sistemico che unisce settori solo apparentemente lontani tra loro, come quello delle produzioni agroalimentare e tessile e quello dell'edilizia.

Contributo degli autori

L'articolo è stato scritto in parti uguali dagli autori.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare tutti i soggetti che, a vario titolo, hanno partecipato alle ricerche e fornito il proprio supporto in fase di sviluppo e sperimentazione.

Per ECOFFI: Jacopo Andreotti e Denis Faruku, Roberto Giordano (DAD, Politecnico di Torino) Corrado Carbonaro (Laboratorio LaSTIn, Politecnico di Torino), Marco Cappellari (Vicat), Mauro Sarotto (Sarotto Group). Un ringraziamento particolare all'arch. Stefano Fantucci e alla prof.ssa Valentina Serra (DENERG, Politecnico di Torino) per la collaborazione alla verifica delle prestazioni termiche.

Per ReCash Plaster: Simone Fiorina, Marco Dutto e Cinzia Ferrua (Vimark srl), Lanificio Fratelli Piacenza, Tecnomeccanica Biellese e CNR Biella.

Per GRE_EN_S: Valentina Serra e il Dipartimento Energia (DENERG) del Politecnico di Torino, Federica Larcher e il Dipartimento di Agraria dell'Università degli Studi di Torino (AGRO.SEL.VITER) nonché tutti i partner industriali (CEIT, REVIPLANT, 13 RICREA, SAFI-TECH). Un ringraziamento all'arch. Gabriele Druetta per il supporto in tutte le fasi della ricerca e a Environment Park per la disponibilità ad ospitare nel proprio sito l'edificio campione. Infine uno speciale ringraziamento all'ing. Giulia Tancredi e all'ing. Enrico Ghia (Incubatore Imprese Innovative I3P, Politecnico di Torino) per il supporto nelle attività di trasferimento tecnologico.

Bibliografia

- Andreotti J., Faruku D., Giordano R., 2019. "“Coltivare” la filiera del riciclo di sottoprodotti agricoli nella produzione del calcestruzzo", *International Conference 5R - Refuse, Reduce, Repair, Reuse, Recycle. “Recycling of wastes and drosses in buildings: from downcycling to upcycling towards the objectives of circular economy”*, Roma, 24 maggio.
- Carbonaro C., Giordano R., Montacchini E., Muñoz Veloza A.M., Tedesco S., 2018. "EDILTEX: new building materials from textile wastes. An experience of industrial symbiosis practices", *International Sustainable Development Research Society Conference*, Messina, 13-15 giugno, pp. 739-744
- Decreto 259/2017 del Ministero dell'Ambiente, 2017. *Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*.
- European Commission, 2015. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the Regions. *Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy*.
- Giordano R., Montacchini E., Tedesco S., 2019. "All you can't eat: research and experiences from agri-food waste to new building products in a circular economy perspective", in Cecchin A., Cutaia L., Deutz P., Raggi A., Salomone R. (eds), *Industrial symbiosis for the circular economy: operational experiences, best practices and obstacles to a collaborative business approach*, Springer.
- Giordano R., Montacchini E., Tedesco S., 2013. "Life Cycle Approach to design, manufacturing and assessing a Living Wall System/L'approccio al ciclo di vita nella progettazione, produzione e monitoraggio di una facciata verde", *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 5, pp. 184-190.
- Giordano R., Montacchini E., Tedesco S., 2014. "Eco-innovation based on Life Cycle Assessment and Green-Design. Strategies in manufacturing a Living Wall System", *World Sustainable Building WSB14*, Barcelona, 28-30 ottobre.
- Larcher F., Giordano R., Montacchini E., Tedesco S., 2018. "A spin-off as an effective result of transfer of knowledge and skills in the field of living wall systems", *Acta Horticulturae*, vol. 1215, pp. 341-344.
- Ministero dell'Ambiente, 2017. *Verso un modello di economia circolare per l'Italia*. Documento di inquadramento e di posizionamento strategico. http://consultazione-economiacircolare.minambiente.it/sites/default/files/verso-un-nuovo-modello-di-economia-circolare_HR.pdf
- Montacchini E., Tedesco S., Fiorina S., Giusto L., 2019. "Da scarti tessili a ecoprodotti per l'edilizia: nuovi scenari di economia circolare", *International Conference 5R - Refuse, Reduce, Repair, Reuse, Recycle. “Recycling of wastes and drosses in buildings: from downcycling to upcycling towards the objectives of circular economy”*, Roma, 24 maggio.
- Pauli G., 2015. *The Blue Economy version 2.0: 200 Projects implemented, US \$4 Billion in-vested, 3 Million jobs created*, Academic Foundation.
- Serra V., Bianco L., Candelari E., Giordano R., Montacchini E., Tedesco S., Schiavi A., 2017. "A novel vertical greenery module system for building envelopes: The results and outcomes of a multidisciplinary research project", *Energy and Buildings*, vol. 146, pp. 333-352.
- Zamboni, S., 2011. *L'Italia della Green Economy. Idee, aziende, prodotti nei nuovi scenari globali*, Edizioni Ambiente, Milano.

