



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE



N. 2/2021



Nel trattamento delle acque il massimo rispetto per l'ambiente

Da anni ci dedichiamo con passione
allo sviluppo ed alla messa a punto
di sistemi per la depurazione delle acque
senza inquinare l'aria.

Ozono per ridurre i microinquinanti,
ossigeno per eliminare gli aerosol per soluzioni
a scala reale e sperimentazioni a cura del nostro
laboratorio di biologia e chimica ambientale.

Gruppo SIAD.
Technical gases, Engineering,
Healthcare, LPG and Natural Gas.

thesiadgroup.com

 **SIAD**



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

INDICE



VOL. 8
NUM. 2
2021

Ingegneria
dell'Ambiente
per il 2021 è
sostenuta da:



EDITORIALE

Novità e sfide dell'approccio Life Cycle Thinking applicato al settore della gestione dei rifiuti.....	87
<i>Lucia Rigamonti, Andrea Fedele</i>	

ARTICOLI

Analisi delle prestazioni di un impianto di trattamento meccanico-biologico di rifiuti urbani indifferenziati	91
<i>Giovanni Gadaleta, Francesco Todaro, Sabino De Gisi, Vincenzo Gadaleta, Michele Notarnicola</i>	
Rifiuti plastici come materia prima per pavimentazioni stradali innovative: una valutazione del ciclo di vita	103
<i>Lucia Capuano, Giacomo Magatti, Paride Mantecca</i>	
Rifiuti: riciclarli o evitarli? risposte dagli studi di analisi del ciclo di vita	114
<i>Anna Mazzi</i>	
Valutazione LCA di un edificio realizzato con container per trasporti marittimi riusati	124
<i>Serena Giorgi, Monica Lavagna, Elisabetta Ginelli</i>	

COMUNICAZIONI TECNICO-SCIENTIFICHE

Il Life Cycle Thinking come strumento per la valutazione critica delle politiche di economia circolare.....	137
<i>Daniela Camana, Alessandro Manzardo, Andrea Fedele</i>	
CHOMgenius come esempio di smart shipping container building, tra economia circolare e innovazione	147
<i>Elisabetta Ginelli, Gianluca Pozzi, Giulia Vignati</i>	

PUBBLIREDAZIONALI

L'impianto di depurazione delle acque reflue di Milano Nosedo ottiene un risparmio annuo di 630.000 euro grazie a HUBGRADE Performance.....	168
<i>Veolia Water Technologies Italia S.p.A.</i>	
La diversificazione contributiva: una delle leve per orientare le aziende verso imballaggi sempre più riciclabili.....	171
<i>Federica Brumen – Comieco</i>	

RUBRICHE

Informazioni dalle Aziende.....	174
---------------------------------	-----



DIRETTORE RESPONSABILE*Stefano Caserini* (Politecnico di Milano)**DIREZIONE SCIENTIFICA***Stefano Caserini* (Politecnico di Milano)*Roberto Canziani* (Politecnico di Milano)**COMITATO SCIENTIFICO***Manuela Antonelli* (Politecnico di Milano)*Arianna Azzellino* (Politecnico di Milano)*Vincenzo Belgiorno* (Università di Salerno)*Giorgio Bertanza* (Università di Brescia)*Alessio Boldrin* (DTU, Copenhagen, Danimarca)*Gianluigi Buttiglieri* (Catalan Institute for Water Research, Girona, Spagna)*Andrea Capodaglio* (Università di Pavia)*Alessandra Carucci* (Università di Cagliari)*Stefano Cernuschi* (Politecnico di Milano)*Raffaello Cossu* (Università di Padova)*Paola Crippa* (Università di Notre Dame, USA)*Giovanni De Feo* (Università di Salerno)*Massimiliano Fabbicino* (Università di Napoli Federico II)*Francesco Fatone* (Università Politecnica delle Marche)*Elena Ficara* (Politecnico di Milano)*Paola Foladori* (Università di Trento)*Mario A. Gandini* (Univ. Aut. de Occidente, Cali, Colombia)*Grazia Ghermandi* (Università di Modena e Reggio Emilia)*Daniele Goi* (Università di Udine)*Mario Grosso* (Politecnico di Milano)*Giovanni Lonati* (Politecnico di Milano)*Claudio Lubello* (Università di Firenze)*Francesca Malpei* (Politecnico di Milano)*Salvatore Masi* (Università della Basilicata)*Giulio Munz* (Università di Firenze)*Salvatore Nicosia* (Università di Palermo)*Senem Ozgen* (Laboratorio Energia e Ambiente, Piacenza)*Eleonora Perotto* (Politecnico di Milano)*Francesco Pirozzi* (Università di Napoli Federico II)*Alessandra Poletti* (Università di Roma La Sapienza)*Raffaella Pomi* (Università La Sapienza, Roma)*Marco Ragazzi* (Università di Trento)*Ezio Ranieri* (Politecnico di Bari)*Enrico Remigi* (DHI, Merelbeke, Belgio)*Lucia Rigamonti* (Politecnico di Milano)*Paolo Roccaro* (Università di Catania)*Francesco Romagnoli* (Riga Technical Univ., Riga, Lituania)*Diego Rosso* (University of California, Irvine, USA)*Sabrina Saponaro* (Politecnico di Milano)*Elena Sezenna* (Politecnico di Milano)*Fabio Tatano* (Università di Urbino)*Sergio Teggi* (Università di Modena e Reggio Emilia)*Davide Tonini* (JRC Siviglia)*Vincenzo Torretta* (Università dell'Insubria)*Mentore Vaccari* (Università di Brescia)*Paola Verlicchi* (Università di Ferrara)*Gaspare Viviani* (Università di Palermo)*Maria Chiara Zanetti* (Politecnico di Torino)**COMITATO DI REDAZIONE***Arianna Azzellino, Mario Grosso, Giovanni Lonati, Lucia Rigamonti, Elena Sezenna***SEGRETERIA DI REDAZIONE***Loredana Alaimo***INGEGNERIA
DELL'AMBIENTE****N. 2/2021****COPYRIGHT**

I testi sono pubblicati da Ingegneria dell'Ambiente con la licenza CREATIVE COMMONS Attribuzione – Non commerciale – Condividi allo stesso modo 3.0 Italia (CC BY-NC-SA 3.0 IT)

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/it/deed.it>

Chiunque è libero di:

- *Condividere* – riprodurre, distribuire, comunicare al pubblico, esporre in pubblico, rappresentare, eseguire e recitare questo materiale con qualsiasi mezzo e formato;
- *Modificare* – remixare, trasformare il materiale e basarsi su di esso per le sue opere;

alle seguenti condizioni:

- *Attribuzione* – Deve essere attribuita adeguatamente la paternità del materiale, fornendo un link alla licenza e indicando se sono state effettuate modifiche. È possibile realizzare queste condizioni in qualsiasi maniera ragionevole, ma senza suggerire che il licenziante avalli il modo in cui il materiale è usato.
- *Non Commerciale* – Non è possibile usare il materiale per scopi commerciali.
- *Stessa Licenza* – Se si trasforma il materiale o ci si basa su di esso, è fatto obbligo di distribuire il contributo così prodotto con la stessa licenza del materiale originario.

Il licenziante non può revocare questi diritti fintanto che i termini della licenza sono rispettati.

EDITORE

COLORSHADE di Cabrini Matteo M., Via Cristoforo Colombo, 7, 20068 Peschiera Borromeo (MI), Italia.

REDAZIONE E PUBBLICITÀ: Loredana Alaimo, Tel. 329.3126157, e-mail: redazione@ingegneriadellambiente.net

Registrata presso il Tribunale di Milano (n.108 del 21/3/2014)

PER ABBONAMENTI: Tel. 02.2847518, Fax 02.45482383, e-mail: amministrazione@ingegneriadellambiente.net

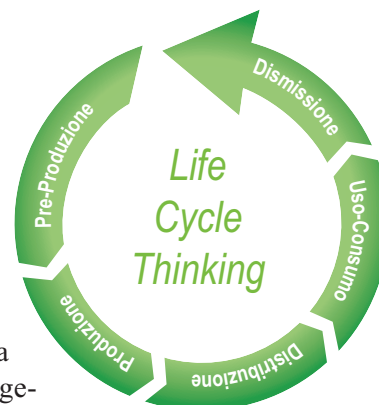
PER INFORMAZIONI: Ing. Stefano Caserini, Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA), Sezione Ambientale, Via Golgi 39, 20133 Milano. Tel. 02.23996430, e-mail: info@ingegneriadellambiente.net

Publicato on-line il 20 luglio 2021.

Finito di stampare in luglio 2021, presso Colorshade di Cabrini Matteo M., Via Cristoforo Colombo, 7, 20068 Peschiera Borromeo (MI).

NOVITÀ E SFIDE DELL'APPROCCIO LIFE CYCLE THINKING APPLICATO AL SETTORE DELLA GESTIONE DEI RIFIUTI

Lucia Rigamonti¹, Andrea Fedele²



Il Life Cycle Thinking (LCT) indica il concetto di espandere il focus dell'analisi che tradizionalmente riguarda il sito di produzione e il processo di fabbricazione, per incorporare le attività di tutto l'intero ciclo di vita di un prodotto, ossia tutto quello che avviene prima della sua fabbricazione (ad esempio l'estrazione delle materie prime, il loro trasporto e pre-trattamento) e tutto quello che avviene dopo (ossia la distribuzione, l'uso e il fine vita). Il LCT è quindi un approccio che permette di avere una visione d'insieme sulla produzione e il consumo di un prodotto o di un servizio, e di valutare gli impatti lungo tutto il suo ciclo di vita. Obiettivo principale del LCT è di evitare lo spostamento degli impatti da una parte ad un'altra del sistema, così come da una tipologia di impatto ad un altro, ossia è quello di evitare il cosiddetto fenomeno del *burden shifting*. Le metodologie disponibili per mettere in pratica il concetto del LCT sono l'LCA (*Life Cycle Assessment*), che permette la quantificazione dei potenziali impatti ambientali, l'LCC (*Life Cycle Costing*), per la valutazione dei costi economici, e la S-LCA (*Social LCA*), per l'analisi degli aspetti e degli impatti sociali. Applicando tali metodologie è possibile non solo avere un quadro completo delle prestazioni del processo (che siano ambientali, economiche o sociali) ma è anche possibile monitorare gli effetti di eventuali cambi o provvedimenti finalizzati all'ottimizzazione di una parte di esso, in modo da verificare che questi siano davvero delle azioni migliorative.

Il LCT e le sue metodologie sono oramai applicati ai più svariati settori, tra cui quello della gestione dei rifiuti. In tale settore è soprattutto la metodologia LCA ad essere applicata e con diverse finalità, quali la valutazione dei benefici ottenibili dal recupero (sia di materia che di energia) di varie tipologie di rifiuti, come strumento di supporto della pianificazione regionale e/o nazionale, per l'ottenimento di certificazioni ambientali, a supporto di scelte strategiche per lo sviluppo di prodotti a basso impatto ambientale e l'accesso al *Green Public Procurement* (Rigamonti et al., 2020a).

Uno dei più recenti campi di applicazione delle metodologie LCT è quello delle cosiddette tecnologie emergenti, ossia quelle tecnologie che hanno un basso grado di maturità in termini di loro stesso sviluppo tecnico e/o del mercato in cui vengono inserite (Bergerson et al., 2020). Agli analisti della valutazione del ciclo di vita viene sempre più chiesto di condurre studi di LCA nelle prime fasi dello sviluppo tecnologico; ad esempio questo avviene in molti progetti H2020. L'approccio di base per condurre uno studio di LCA di tecnologie emergenti (solitamente indicato nella letteratura scientifica con la terminologia di *prospective LCA* o *ex-ante LCA*) è simile a quello di una LCA delle tecnologie già esistenti, ma le tecnologie emergenti pongono ulteriori sfide. Infatti, seppur tali valutazioni forniscano la più grande opportunità per influenzare la progettazione della tecnologia e, in ultima analisi, le sue prestazioni ambientali, nello stesso tempo tale fase è proprio quella con il minor numero di dati disponibili e la maggiore incertezza.

¹ Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale.

² Università degli Studi di Padova, CESQA Centro Studi Qualità e Ambiente.

Simile problematica è presente nel momento in cui si vogliono applicare le metodologie del LCT in Paesi in via di sviluppo, sempre più di interesse in quanto sta aumentando il numero di LCA a supporto di progetti di gestione rifiuti e cooperazione allo sviluppo. La metodologia LCA in questi ultimi anni viene inoltre sempre più applicata a supporto di azioni per lo sviluppo dell'economia circolare. Come è noto, il concetto di economia circolare non è univoco (Kirchherr et al., 2017) e molte sono le iniziative internazionali, europee e nazionali finalizzate all'individuazione di indicatori per la misurazione dell'economia circolare (ICESP, 2020). Vale però la pena sottolineare che vari studi hanno evidenziato come la circolarità non sempre conduca al miglioramento della sostenibilità ambientale. Gli indicatori di circolarità forniscono infatti solo una visione parziale sui molteplici potenziali impatti ambientali di un sistema. Di conseguenza la scelta tra diverse soluzioni alternative non può basarsi solo sulla circolarità dei sistemi analizzati e uno studio basato su indicatori di circolarità deve essere completato da uno studio LCA per verificare che la circolarità del sistema comporti anche un miglioramento delle prestazioni ambientali.

All'interno dell'economia circolare, un ruolo importante è ricoperto dalle attività di recupero e in particolare di riciclo. Nonostante le numerose applicazioni della metodologia LCA in tale contesto, risulta ancora non pienamente risolto il problema relativo all'inclusione della qualità dei materiali ottenuti dal riciclo nella modellizzazione, inclusione che risulta essere necessaria per non andare a sovrastimare i benefici del riciclo. In tal senso un passo avanti è stato realizzato nello studio di Rigamonti et al. (2020b).

Dal punto di vista più prettamente metodologico, sono in corso molti progetti per rendere ancora più completa la valutazione degli impatti ambientali. Nel Plastic Leak Project (Peano, 2020) è stata sviluppata una metodologia per valutare le perdite di plastica lungo il ciclo di vita di un prodotto, consentendo quindi alle aziende di individuare e valutare le perdite di plastica lungo le loro catene del



valore. A seconda del settore, infatti, le perdite di plastica possono verificarsi durante la fase di utilizzo, durante il processo di produzione o anche più indietro lungo la catena di approvvigionamento. Per agire in modo efficace sulle perdite di plastica, le parti interessate devono essere in grado di rilevare le perdite all'interno del proprio settore e della propria catena di approvvigionamento. Il progetto MarILCA (2019-2025) sta invece modellizzando le catene causa-effetto per integrare i potenziali impatti ambientali dei rifiuti marini, in particolare la plastica, nei risultati della LCA. Ciò porterà a un quadro più completo dei potenziali impatti ambientali al fine di identificare i compromessi associati all'uso di plastica e altri materiali in un sistema di prodotto. Molta attività di ricerca è poi rivolta ad includere gli impatti sulla biodiversità e sul consumo di risorse. Nel primo caso, infatti, già da qualche anno è stato messo in luce che sono necessarie ulteriori ricerche per definire dei modelli di caratterizzazione per integrare la biodiversità nell'LCA (Winter et al., 2017). Nel secondo caso si sta facendo strada un nuovo concetto da utilizzarsi nella definizione dei modelli di caratterizzazione per la categoria di impatto relativa al consumo di risorse: è il concetto di dissipazione (Beylot et al., 2020). I flussi dissipati sono quei flussi di risorse che finiscono in depositi o accumuli e che non saranno accessibili a futuri utenti a causa di diversi vincoli: è a questi flussi che viene associato un fattore di caratterizzazione.

Infine, un altro campo di ricerca di sviluppo metodologico è relativo al calcolo della sostenibilità assoluta. In pratica, per passare dagli impatti relativi (che sono quelli solitamente calcolati in una LCA) agli impatti assoluti, gli impatti relativi vanno normalizzati utilizzando come fattore di normalizzazione la capacità portante della componente ambientale interessata dalla tipologia di impatto (Björn et al., 2015): gli impatti assoluti permetterebbero davvero di capire se un sistema è sostenibile oppure no in quanto è sostenibile solo se non eccede la capacità portante che gli è stata autorizzata.

Una volta effettuato lo studio di LCA, è importante anche comunicare i risultati in modo comprensibile. In tal senso normalizzare gli indicatori di impatto e pesarli, fornendo un unico punteggio indice dell'impatto ambientale complessivo del sistema, aiuterebbe il decisore per il quale l'interpretazione delle molteplici informazioni ambientali può risultare complessa. Negli standard di riferimento ISO 14040 e 14044 queste due fasi sono opzionali e addirittura la pesatura è vietata per studi comparativi i cui risultati siano resi pubblici, mentre nelle linee guida sviluppate dalla Commissione Europea per studi di *Product Environmental Footprint* (PEF) (Zampori e Pant, 2019) queste due fasi sono obbligatorie. È per questo motivo che recentemente la Commissione Europea tramite il JRC (*Join Research Center*) ha pubblicato diversi documenti per spiegare la metodologia di calcolo dei fattori di normalizzazione e dei pesi ed elencare gli stessi fattori e pesi da utilizzarsi in uno studio PEF.

Come si ricordava all'inizio, non solo la metodologia LCA è basata sul principio del LCT, ma anche le sorelle LCC e S-LCA. A proposito di quest'ultima, si vuole ricordare qua la recente pubblicazione delle nuove linee guida (LCI, 2020).

Alcune delle tematiche trattate in questo editoriale sono riprese negli articoli di questo numero di IDA e derivano dalla quinta edizione della giornata di studio "Rifiuti e Life Cycle Thinking", evento organizzato e coordinato dal gruppo di ricerca AWARE (*Assessment on Waste and Resources*) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano in collaborazione con il Gruppo di Lavoro "Gestione e Trattamento dei Rifiuti" dell'Associazione Rete Italiana LCA, e patrocinato dall'Associazione Rete Italiana LCA.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bergerson J.A., Brandt A., Cresko J., Carbajales-Dale M., MacLean H.L., Matthews H.S., McCoy S., McManus M., Miller S.A., Morrow III W.R., Posen I.D., Seager T., Skone T., Sleep S., 2020. Life cycle assessment of emerging technologies – Evaluation techniques at different stages of market and technical maturity. *Journal of Industrial Ecology*, 24, 11-25.
- Beylot A., Ardente F., Penedo De Sousa Marques A., Mathieux F., Pant R., Sala S., Zampori L., 2020. Abiotic and biotic resources impact categories in LCA: development of new approaches, EUR 30126 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-17227-7, doi:10.2760/232839, JRC120170.
- Björn A., Diamond M., Owsianiak M., Verzat B., Hauschild M.Z., 2015. Strengthening the link between Life Cycle Assessment and indicators for absolute sustainability to support development within planetary boundaries. *Environmental Science & Technology*, 49, 6370-6371.
- ICESP (Italian Circular Economy Stakeholder Platform), 2020. Gruppo di lavoro 3 – Strumenti per la misurazione dell'economia circolare. Report 2020. <https://www.icesp.it/GdL/3>
- Kirchherr J., Reike D., Hekkert M., 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232.
- LCI (Life Cycle Initiative), 2020. Guidelines for social life cycle assessment of products and organizations 2020. <https://www.lifecycleinitiative.org/library/guidelines-for-social-life-cycle-assessment-of-products-and-organizations-2020/>
- Peano L., Kounina A., Magaud V., Chalumeau S., Zgola M., Boucher J., 2020. Plastic Leakage Project – methodological guidelines. <https://quantis-intl.com/report/the-plastic-leak-project-guidelines/>
- Rigamonti L., Chirone R., Ciacci L., Degli Esposti A., Ferrari A.M., Magrini C., Passarini F., Paulillo A., Pini M., Toniolo S., Fedele A., 2020a. Applicazioni della metodologia LCA nel campo della gestione e del trattamento dei rifiuti. *Ingegneria dell'Ambiente* Vol. 7 n. 3/2020, 207-223.
- Rigamonti L., Taelman S.E., Huysveld S., Sfez S., Ragaert K., Dewulf J., 2020b. A step forward in quantifying the substitutability of secondary materials in waste management life cycle assessment studies. *Waste Management*, 114, 331-340.
- Winter L., Lehmann A., Finogenova N., Finkbeiner M., 2017. Including biodiversity in life cycle assessment – State of the art, gaps and research needs. *Environmental Impact Assessment Review* 67, 88-100.
- Zampori L., Pant R., 2019. Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method. EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-00654-1, doi:10.2760/424613, JRC115959.



LA RIVISTA TECNICO-SCIENTIFICA PER IL SETTORE DELL'INGEGNERIA SANITARIA AMBIENTALE

Ingegneria dell'Ambiente (IDA) è una rivista scientifica ad accesso aperto (open access) nata nel 2014 da un'iniziativa della Sezione Ambientale del *Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale del Politecnico di Milano*. La rivista è **gratuita** per autori e lettori (open access) ed è dotata di un sistema di revisione paritaria (peer-review).

Ingegneria dell'Ambiente pubblica articoli riguardanti la ricerca tecnico-scientifica nei campi di interesse dell'Ingegneria Sanitaria-Ambientale e si propone come strumento in lingua italiana per raggiungere e dialogare con tecnici ambientali, liberi professionisti, funzionari della pubblica amministrazione, formatori ed Enti di controllo.

La rivista ospita contributi in lingua italiana; ma sono richiesti anche un titolo e un abstract in inglese.

I temi di interesse della rivista sono: *Tecnologie per acque di approvvigionamento e di rifiuto; Riutilizzo e recupero di energia e materia; Inquinamento dell'aria e depurazione delle emissioni in atmosfera; Inquinamento delle acque; Bonifiche dei suoli contaminati; Trattamento e gestione dei rifiuti; Valutazione di impatto ambientale; Cambiamenti climatici; Analisi del ciclo di vita; Energia e ambiente; Sistemi di gestione ambientale; Caratterizzazione, monitoraggio e modellistica dei fenomeni di inquinamento ambientale.*

Ingegneria dell'Ambiente pubblica Articoli di ricerca, che illustrano risultati di ricerche tecnico-scientifiche; Articoli di review, che illustrano lo stato dell'arte; Comunicazioni tecnico-scientifiche, che illustrano risultati di progetti dimostrativi o soluzioni applicative innovative; Brevi resoconti di convegni o mostre; Recensioni di volumi, italiani e stranieri, di interesse per i campi dell'Ingegneria Sanitaria Ambientale; Editoriali o testi generali di inquadramento di temi di particolare rilevanza dell'Ingegneria Sanitaria Ambientale, scritti con un linguaggio divulgativo (su invito della Direzione Scientifica o del Comitato Scientifico).

Per l'invio di proposte utilizzare la piattaforma all'indirizzo: www.ingegneriadellambiente.net

Ingegneria dell'Ambiente ha il patrocinio di
GITISA (Gruppo Italiano di Ingegneria Sanitaria, www.gitisa.it);
AIAT (Ass. Ingegneri per l'Ambiente e il Territorio, www.ingegneriambientali.it).
Ingegneria dell'ambiente è la rivista di riferimento per **AIAT**.

Ingegneria dell'Ambiente è riconosciuta da **ANVUR** come rivista scientifica dell'Area 08, i suoi articoli sono riconosciuti ai fini dell'ottenimento di crediti per la formazione informale prevista degli Ordini Professionali.

ANALISI DELLE PRESTAZIONI DI UN IMPIANTO DI TRATTAMENTO MECCANICO-BIOLOGICO DI RIFIUTI URBANI INDIFERENZIATI

Giovanni Gadaleta^{1,*}, Francesco Todaro¹, Sabino De Gisi¹,
Vincenzo Gadaleta², Michele Notarnicola¹

¹Politecnico di Bari, Dip. di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica (DICATECh).

²AMIU Puglia S.p.A.

Sommario – Il presente lavoro analizza le prestazioni di un impianto di Trattamento Meccanico-Biologico (TMB) al variare dello schema di processo e con riferimento al caso studio dell'impianto gestito da AMIU Puglia Spa in Bari. L'impianto è in grado di trattare 700 t d⁻¹ di rifiuti indifferenziati/residuali da raccolta differenziata prodotti a Bari e nei comuni limitrofi. Attraverso un processo di biostabilizzazione e vagliatura, il rifiuto è trasformato in Frazione Secca Combustibile (FSC), da avviare a recupero energetico, e Rifiuto Biostabilizzato da Discarica (RBD). Il trattamento ha come ulteriori output i rifiuti metallici avviabili al recupero di materia e le acque di processo destinate a idonei trattamenti esterni all'impianto. L'analisi, condotta nel periodo 2015-2019, si è focalizzata sui seguenti aspetti: (i) merceologia del rifiuto in ingresso e dei flussi FSC e RBD; (ii) bilancio di massa; (iii) monitoraggio dell'Indice Respirimetrico Dinamico potenziale (IRD_p) per gli FSC e RBD. I risultati hanno evidenziato un ingresso composto prevalentemente da plastica e cartone, sebbene con presenza di una quantità significativa di sostanza organica biodegradabile. La FSC è risultata composta per oltre il 90% da sostanza secca (adatta quindi a termovalorizzazione), mentre il RBD da quasi il 50% di sostanza organica con dimensione <20mm. I bilanci di massa hanno confermato la graduale riduzione nel tempo dei rifiuti in ingresso dovuti al potenziamento della raccolta differenziata, con conseguenti minori quantità di FSC e RBD. L'adozione di diversi schemi di processo e tempi di biostabilizzazione ha inciso maggiormente sul flusso RBD. Il monitoraggio dell'IRD_p ha restituito valori stabili e decrescenti per la FSC, mentre più variabili a seconda della configurazione adottata per il RBD. Nel complesso, l'impianto si pone come una *best practice* nel contesto regionale per quanto riguarda la gestione del rifiuto indifferenziato.

Parole chiave: biostabilizzazione, indice respirometrico, rifiuto indifferenziato, TMB.

EVALUATING THE PERFORMANCE OF A MUNICIPAL SOLID WASTE MECHANICAL-BIOLOGICAL TREATMENT PLANT

Abstract – This study analyses the performance of the mechanical-biological treatment plant (TMB) of AMIU Puglia s.p.a., located in Bari and able to treat

approximately 700 tons of undifferentiated waste per day, mainly produced by the city of Bari and neighbouring municipalities. The AMIU MBT plant performed an aerobic biostabilization of the input waste and a consequent screening process. An MBT treatment reduces the volume and the amount of putrescible fraction of the waste to be landfilled. In addition, it reduces the moisture and the amount of low energy fractions in order to have a waste suitable for energy recovery in waste-to-energy (WTE) plants. The input mixed waste is converted into a Combustible Dry Fraction (CDF) and a Stabilized Disposable Waste (SDW). The first is mechanically refined for the production of Solid Recovered Fuels (SRFs), delivered to dedicated WTE plants; the latter is disposed in landfill. The MBT generates two further output streams: metal waste, selected through a magnetic separation and then sent for new raw material recovery, and process water destined for in-plant or off-plant treatment prior to disposal. Generally, there are two main categories of MBT plants: single stream MBT or separated streams MBT. In single stream MBT, the municipal residual waste is subject to a bio-drying process and then to mechanical refining. In separated streams, the input is first preliminarily divided into a wet and a dry fraction by sieving and then biodegraded through biostabilization. The baseline period for evaluating the performance of the MBT facility under investigation was 2015-2019. The following topics have been addressed: (i) composition (or product fraction) of the inlet waste and of the two main output streams (CDF and SDW); (ii) mass balance; (iii) monitoring of the potential Dynamic Respirimetric Index (DRI_p) for CDF and SDW streams. The obtained results showed that the input waste was mainly composed of plastic and paper waste; anyway, a more or less significant presence of organic fraction was evident. The CDF stream was composed of dry waste – suitable for the WTE treatment – by over 90%. Instead, the SDW stream achieved about 50% of organic waste, which had a dimension of less than 20 mm. Mass balance analysis was carried out through STAN software, a freeware in line with “Austrian standard ÖNorm S 2096”. On average, the principal output streams of the plant were CDF and SDW, with about 35% and 42% of the input waste, respectively. These fractions were followed by mass loss (about 20%) instead metals and process water achieved lower values than the ones of other streams (both less than 1%). Mass balance showed that input waste strongly reduces its amount over time. As a consequence, CDF and SDW streams reduce their quantity. If a “single stream” configuration was adopted, the CDF and SDW streams differ

* Per contatti: Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica (DICATECh), Politecnico di Bari, Via E. Orabona n. 4, 70125 Bari. E-mail: giovanni.gadaleta@poliba.it

from each other with the amount of SDW greater than CDF. Instead, if a “separated stream” configuration was performed, CDF and SDW amounts are equal. The monitoring of DRI_p showed stable and decreasing values for CDF. The DRI_p values of SDW was more variable than the CDF ones and they depended by the configuration performed by the plant (single or separated stream). Therefore, SDW had to be monitored more frequently than CDF, especially while the plant was operating with a separated stream process. As a conclusion, the AMIU MBT plant can be considered an example of best practice for similar areas of Southern Italy and the technologies adopted, well consolidated, allow to achieve excellent performance.

Keywords: biostabilization, mechanical-biological treatment, mixed waste, performance assessment, respirometric index.

Ricevuto il 25-4-2021; Correzioni richieste il 21-6-2021; Accettazione finale il 22-6-2021.

1. INTRODUZIONE

La crescente produzione di rifiuti negli anni ha reso necessario lo sviluppo di adeguate tecniche di gestione finalizzate alla riduzione delle pressioni sociali, economiche ed ambientali generate. Le strategie di recupero di materia ed energia imposte dal legislatore europeo e nazionale (D.Lgs 152/06) non sono facilmente applicabili e ad oggi si osserva un'Europa a doppia velocità, con paesi avanzati ed altri con un sistema di gestione basato su discarica. In quest'ultimi casi, gli impianti di Trattamento Meccanico-Biologico (TMB) possono essere strategici. Il loro compito principale è quello di stabilizzare la frazione organica del rifiuto indifferenziato/residuale e consentire la valorizzazione della frazione secca ad elevato potere calorifico, con conseguente produzione di Combustibile Solido Secondario (CSS). Diversi studi hanno dimostrato come i TMB costituiscono una valida alternativa allo smaltimento diretto in discarica dei rifiuti solidi urbani non preventivamente trattati, con conseguenti minori impatti dal punto di vista economico ed ambientale (Abeliotis et al., 2012; Grosso et al., 2016). I TMB si basano sulla separazione della frazione secca da quella umida mediante un trattamento meccanico (es. vagliatura) e sulla riduzione della componente putrescibile (degradabile) attraverso un trattamento biologico di stabilizzazione aerobica (Rigamonti et al., 2019). È possibile avere due configurazioni impiantistiche definite a “flusso unico”, dove la fase di biostabilizzazione è seguita dalla vagliatura e a “flusso separato” dove, dapprima è effettuata la vagliatura e poi, sulla componente umida, la biostabilizzazione (Rigamonti et al., 2012). In entrambi i casi, i flussi in uscita sono un Rifiuto Biostabilizzato da Discarica (RBD) e una Frazione Sec-

ca Combustibile (FSC) che, ulteriormente trattata, è destinata a diventare CSS (Montejo et al., 2013). Inoltre, possono essere presenti anche ulteriori fasi di selezione finalizzate, ad esempio, al recupero dei metalli ferrosi. I TMB consentono pertanto di ridurre il volume del rifiuto da destinare a smaltimento (Siddiqui et al., 2013) e, da un punto di vista energetico, di poter ottenere un prodotto utilizzabile in termovalorizzazione del CSS (De Gisi et al., 2018a). La qualità del CSS dipenderà principalmente dal contenuto di sostanza organica presente (Materazzi et al., 2016; Haaf et al., 2020). L'elevate temperature in biostabilizzazione consentono di avere una stabilizzazione della frazione organica putrescibile (al fine di allocare in discarica un materiale stabile e inerte), una riduzione del tenore di umidità del rifiuto (con seguente produzione di percolati o acque di processo) e l'igienizzazione dei patogeni, impedendo che il prodotto finale ne diventi vettore. Trattandosi di un processo biologico, la biostabilizzazione richiede una serie di interventi come il controllo della temperatura, della portata d'aria o tenore d'ossigeno in biocella (De Gisi et al., 2018b). È possibile valutare l'efficienza del processo mediante l'Indice Respirometrico Dinamico potenziale (IRD_p), il quale misura il consumo orario di ossigeno da parte dei microrganismi aerobici necessario per l'ossidazione biochimica dei composti biodegradabili.

Sebbene il funzionamento di un TMB sia ben consolidato, esso riveste un ruolo importante nelle regioni del Sud Italia, contraddistinte da performance non ottimali in termini di raccolta differenziata (Trulli et al., 2018). Ne consegue che il presente lavoro mira ad analizzare sistematicamente le performance di un TMB rappresentativo della Regione Puglia con particolare riferimento all'analisi merceologica dei flussi in ingresso ed in uscita, ai bilanci di massa e all' IRD_p . Per questo scopo, si è considerato il caso studio del TMB dell'Azienda Municipale Igiene Urbana Puglia (abbreviato AMIU Puglia), atto al trattamento dei rifiuti urbani indifferenziati/residuali da raccolta differenziata prodotti dalla città di Bari e da comuni limitrofi. L'impianto AMIU ha adottato negli anni diverse configurazioni impiantistiche che hanno conseguentemente influenzato le prestazioni del processo. Ai fini dell'analisi, sono stati acquisiti ed elaborati i dati nel periodo gennaio 2015 – dicembre 2019. In primis si è analizzata la composizione merceologica del rifiuto in ingresso e dei flussi principali in uscita (FCS e RBD); successivamente sono stati condotti accurati bilanci di massa avendo considerato il confine dell'impianto quale volume

di controllo. Tali operazioni sono state svolte per ciascun anno del periodo di analisi. Infine, è stata analizzata l'efficienza del processo di biostabilizzazione attraverso la valutazione dell'IRD_p per i flussi di RBD e FSC al variare delle configurazioni impiantistiche. L'IRD_p è stato confrontato con i valori limite imposti dalla normativa regionale, anche loro variabili nel periodo di osservazione 2015-2019.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Impianto AMIU di Bari

Il rifiuto indifferenziato conferito presso il TMB AMIU è pesato e scaricato in un capannone chiuso in costante aspirazione. A seguito di ispezione visiva, finalizzata alla rimozione dei materiali ingombranti o non processabili, il rifiuto è soggetto a riduzione dimensionale. Così tritato, esso è caricato in una delle 24 biocelle realizzate in cemento armato e destinato a biostabilizzazione. Il controllo del processo avviene mediante la misura in continuo della temperatura nella massa del rifiuto, dell'ossigeno e della portata d'aria in ingresso. L'aria di processo è prelevata, attraverso ventilatori automatizzati, dall'interno dei fabbricati e insufflata direttamente nelle biocelle tramite idoneo sistema di fondo. L'aria

esausta viene estratta dalla parte superiore della biocella e dopo deumidificazione destinata alla rimozione degli odori in biofiltrazione. Le acque di processo sono invece drenate verso specifiche vasche e destinate alla miscelazione con le acque di condensa o lavaggio, prima di essere smaltite all'esterno dell'impianto. Al termine della biostabilizzazione, il rifiuto è dapprima inviato a separazione magnetica per il recupero dei ferrosi e poi a separazione dimensionale su vaglio a tamburo rotante di maglia 80 mm. Il rifiuto viene così suddiviso in RBD (sottovaglio, da smaltire in discarica) e FSC (sopravaglio, composto prevalentemente da materiali combustibili, da destinare ad impianti per la produzione del CSS). Ai fini dello smaltimento in discarica, ogni flusso deve garantire una corretta stabilità biologica, identificata con i valori limite dell'IRD_p.

A seguito di diverse ordinanze della Regione Puglia le configurazioni dell'impianto, nel periodo di tempo considerato, hanno subito diverse modifiche. In tutto il 2015 e in parte del 2016, l'impianto ha funzionato a flusso unico, come sopra descritto. Da gennaio 2016 a novembre 2016, l'impianto ha funzionato invece a flusso separato, per poi ritornare alla configurazione a flusso unico per il restante periodo di osservazione (dicembre 2019). I due schemi di trattamento sono mostrati in Figura 1.



Figura 1 – Schema dell'impianto AMIU Bari con configurazione: a) flusso separato; b) flusso unico

2.2. Analisi merceologica

Le analisi merceologiche hanno riguardato i flussi in ingresso (CER 200301) ed in uscita quali la FSC (CER 191212) e il RBD (CER 190501). Ciascun campione, una volta prelevato, è stato caratterizzato secondo il procedimento ADEME (Achour et al., 2005). La quartatura (UNI, 10802), svolta manualmente da operatori specializzati, ha consentito di determinare il campione rappresentativo del rifiuto, a sua volta suddiviso in 9 frazioni merceologiche: (i) Organico: scarti alimentari e agricoli; (ii) Carta e cartone: materiali cartacei con diverso spessore e poliaccoppiati (es. tetra pak); (iii) Plastica: rifiuti in plastica o gomma, senza distinguere natura e tipologia di polimero; (iv) Inerti: vetro, ceramiche o materiali lapidei; (v) Tessili: di tipo domestici o sanitario; (vi) Legno: proveniente da operazioni di potatura, dai settori edili e dell'imballaggio; (vii) Metalli: ferrosi e non ferrosi; (viii) Sottovaglio: materiali fini con dimensione <20 mm; (ix) Altro: tutti gli altri rifiuti non classificabili nelle precedenti categorie.

2.3. Bilancio di massa

I bilanci di massa sono stati svolti con l'ausilio di

STAN 2.6.801 (subSTance flow Analysis), che implementa le norme "Austrian standard ÖNorm S 2096". STAN consente di schematizzare ogni impianto in una sequenza di unità di processo connesse fra loro (Cencic et al., 2008). Ogni flusso può essere mostrato in "Stankey Style", con lo spessore proporzionale alla portata massica del flusso. Gli output di STAN possono essere in ripartizione percentuale o quantità annue ($t\ y^{-1}$). Infine, STAN permette soltanto un'analisi quantitativa; i valori ottenuti non tengono in conto della qualità dei flussi.

In questo studio si sono considerate le quantità annue in ingresso al TMB e per ciascun anno del periodo di riferimento.

Come già accennato, il TMB ha lavorato secondo configurazioni differenti. Fra gennaio e novembre 2016, ha adottato una configurazione a "flusso separato", con tempo di biostabilizzazione di 7 giorni. Nei restanti periodi temporali, il TMB ha lavorato secondo una configurazione a "flusso unico", con un tempo di biostabilizzazione di 10 giorni.

La Figura 2 mostra lo schema del TMB AMIU quale punto di partenza per la conduzione dei bilanci di massa.

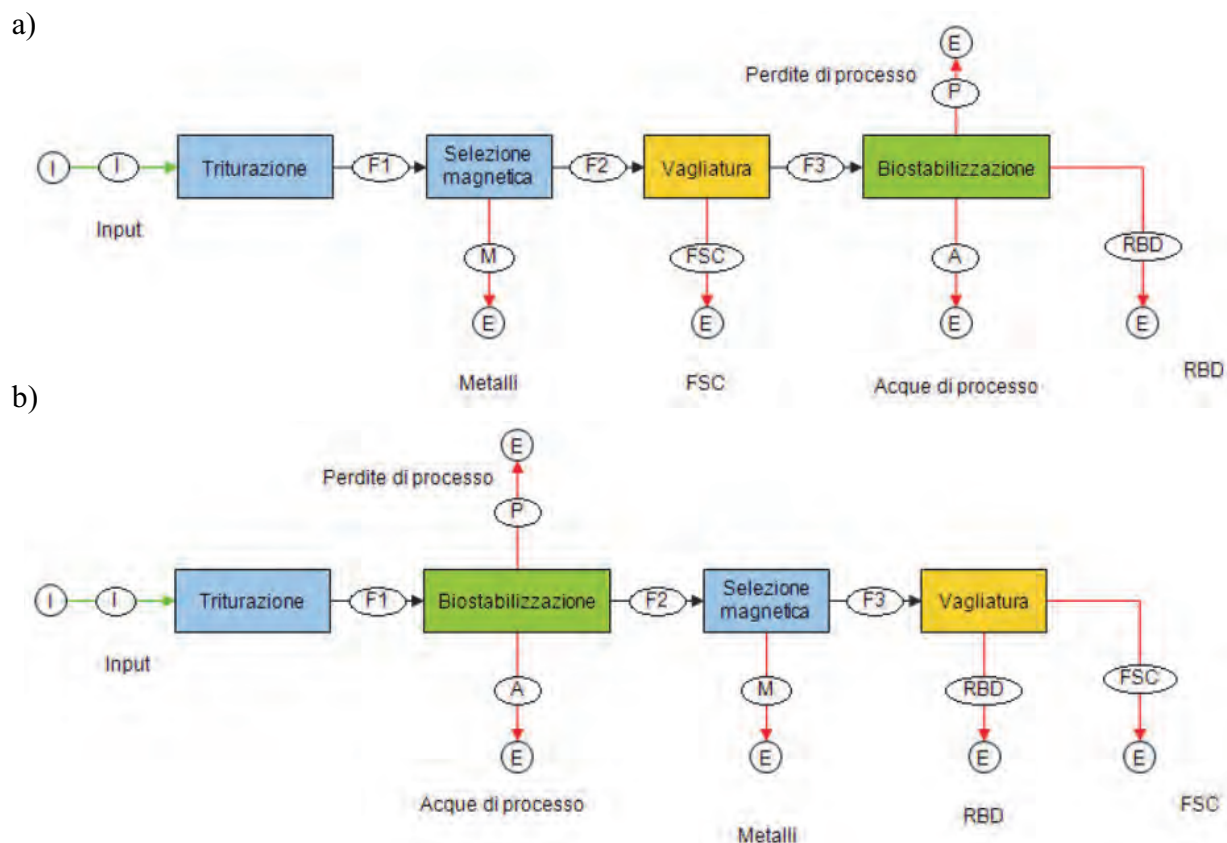


Figura 2 – Schema dell'impianto AMIU Bari adottato nel bilancio di massa con configurazione: a) flusso separato; b) flusso unico

2.4. Indice Respirometrico Dinamico Potenziale

L'IRD_p misura il consumo orario di ossigeno utilizzato dai microrganismi aerobici per l'ossidazione biochimica dei composti facilmente biodegradabili contenuti in una matrice organica in condizione di insufflazione forzata di aria. Tale valore è il risultato della prova respirometrica dinamica svolta in un respirometro aerobico a flusso continuo secondo la norma tecnica UNI 11184:2016. A differenza dell'Indice Respirometrico Dinamico reale, l'IRD_p, è misurato su un campione con i principali parametri chimico-fisici normalizzati. In questo modo la massa è posta nelle condizioni ottimali per la crescita batterica, così da misurare la massima attività respiratoria, valutare gli effetti dovuti alla biodegradazione (es. produzione di odori) e in generale misurare l'attività potenziale di degradazione della sostanza organica da parte degli stessi microrganismi. Uniformando le caratteristiche delle diverse matrici, è possibile inoltre confrontare la stabilità biologica di rifiuti organici aventi differenti caratteristiche chimico-fisiche iniziali.

L'IRD_p è stato identificato come parametro di controllo dell'efficienza del processo di biostabilizzazione del flusso RBD. Il valore limite dell'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA) (D.D. n 45 del 13/08/2013) era pari a 800 mgO₂ kgSV⁻¹ h⁻¹. Negli anni, diverse ordinanze regionali hanno disposto un aumento del quantitativo massimo di rifiuto da conferire nell'impianto (da 550 a 650 t d⁻¹) ed una riduzione dei tempi del processo di biostabilizzazione, da 14 a 7 giorni. Il conseguente sovraccarico dell'impianto ha causato una riduzione delle prestazioni complessive della biostabilizzazione, con conseguente incremento dell'IRD_p. Tuttavia l'IRD_p è risultato sempre conforme alle norme: per gli anni 2015 e 2016, in cui il tempo di biostabilizzazione era di 7 giorni l'IRD_p dei rifiuti in uscita dall'impianto risultava inferiore a 1000 mgO₂ kgSV⁻¹ h⁻¹; per gli anni 2017, 2018 e 2019 (in cui l'impianto ha trattato le quantità di rifiuti per le quali era autorizzato) il tempo di biostabilizzazione era pari a 10 giorni e l'IRD_p risultava inferiore a 800 mgO₂ kgSV⁻¹ h⁻¹.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1. Analisi merceologica

La composizione merceologica media del rifiuto in ingresso al TMB è visibile in Figura 3.

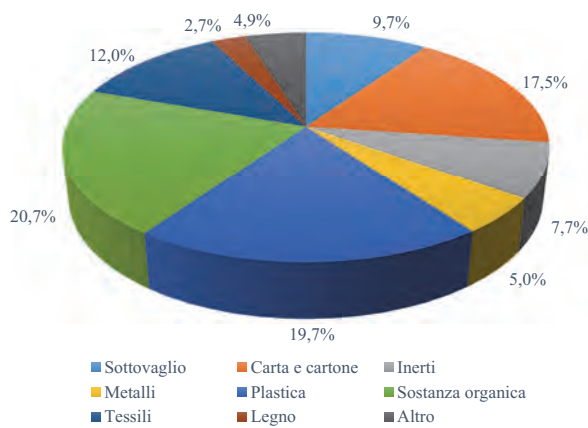


Figura 3 – Composizione merceologica media del rifiuto in ingresso all'impianto AMIU dal 2015 al 2019

Si tratta di una composizione tendenzialmente simile a quella del rifiuto prodotto giornalmente da un utente medio in Italia (ISPRA, 2018). La sostanza organica è risultata essere la frazione maggiormente presente (20,7%); la frazione secca era composta da plastica, carta e cartone e tessili. Per quanto riguarda la plastica, non è stato possibile capire se tali materiali fossero potenzialmente destinabili al recupero di materia in quanto non era presente una distinzione delle tipologie di polimero. Più della metà del rifiuto è risultato composto da plastica, carta e cartone e tessili e come tale potenzialmente destinabile a produzione di CSS.

I risultati delle analisi merceologiche svolte annualmente sul rifiuto in ingresso al TMB sono mostrati in Tabella 1 (a pagina seguente).

Si osserva come il rifiuto in ingresso ha presentato alte percentuali di plastica e carta e cartone, rispettivamente variabili dal 16,0% al 23,4% e dal 13,7% al 20,6%. D'altra parte, la sostanza organica presentava valori inferiori al 15% negli anni 2015 e 2018 (rispettivamente 14,3% e 12,9%), mentre negli anni centrali (2016 e 2017) e nel 2019 una percentuale superiore al 20%. Il sottovaglio è risultato il più variabile: lo scarto fra il valore massimo (17,9%) e il minimo (2,6%) è stato di oltre il 15%. Ad eccezione del 2018, si è osservato un valore grosso modo costante (circa il 30%) della somma di sostanza organica e sottovaglio. I risultati evidenziavano la complementarità di queste frazioni che quindi restituivano un valore caratteristico della frazione biodegradabile di rifiuto.

Nel 2016 e nel 2019 l'elevata presenza di sostanza organica (rispettivamente 27,9% e 25,6%) ha portato ad una riduzione di tutte le altre frazioni altrimenti maggiori, quali carta, cartone e plastica.

Tabella 1 – Composizione merceologica (w%) del rifiuto in ingresso all'impianto AMIU dal 2015 al 2019

Frazione	2015	2016	2017	2018	2019	Media
Sottovaglio	17,9%	9,6%	11,8%	2,6%	6,8%	9,7%
Carta e cartone	18,6%	13,7%	19,9%	20,6%	14,6%	17,5%
Inerti	3,3%	11,1%	5,2%	6,9%	11,9%	7,7%
Metalli	5,1%	4,9%	2,5%	3,3%	9,5%	5,0%
Plastica	22,7%	16,0%	20,3%	23,4%	16,3%	19,7%
Sostanza organica	14,3%	27,9%	22,8%	12,9%	25,6%	20,7%
Tessili	10,2%	10,0%	9,7%	22,1%	8,2%	12,0%
Legno	3,7%	2,7%	1,7%	3,6%	1,9%	2,7%
Altro	4,2%	4,2%	6,2%	4,6%	5,2%	4,9%

Contestualmente si osservava un'elevata presenza di inerti pari rispettivamente a 11,1% e 11,9%, a differenza degli altri anni in cui si attestavano intorno al 3-5%.

I metalli, il legno e le altre frazioni (Altro) invece hanno mantenuto una presenza costante, raggiungendo valori inferiori al 5%. Il solo 2019 ha mostrato un contenuto di metalli del 9,5%, valore probabilmente additabile a delle situazioni estemporanee. Per quanto riguarda i tessili, fra il 2015 e il 2017 si è osservato un valore intorno al 10%, raddoppiato nel 2018 probabilmente a causa di analisi riferenti a specifici ingressi (risultando la frazione prevalente di quell'anno). Difatti nel 2019, tale frazione assumeva nuovamente un valore paragonabile agli anni precedenti (12,0%).

Si fa osservare come le variazioni di composizione negli anni potevano essere correlate alla diversa provenienza, natura stessa del rifiuto indifferenziato, ma anche ad un numero limitato di analisi presenti. Di conseguenza, una caratterizzazione più frequente del rifiuto in ingresso avrebbe permesso al gestore di ottenere composizioni merceologiche più attendibili. Inoltre, la valutazione di un valore medio di composizione del rifiuto in ingresso all'impianto in aggiunta all'evoluzione nei diversi anni è stata possibile in quanto il sistema di raccolta del rifiuto indifferenziato nella città di Bari non ha subito sostanziali modifiche. Tale valore è stato utile per poter svolgere delle considerazioni generali e confrontare i risultati annuali.

Per quanto riguarda i rifiuti in uscita, sebbene con alcune limitazioni (le analisi merceologiche del 2015 non erano disponibili), è stato possibile osservare (Figura 4a) come il flusso di FSC dal 2017 al 2019 era composto per quasi il 90% da sostanza secca quale plastica, carta e cartone e tessili, con valori rispettivamente pari a 39,5%, 25,0% e 20,1%.

Tale composizione ha giustificato l'invio del flusso FSC ad impianti di produzione di CSS e conseguentemente a recupero di energia. La presenza di rifiuto biodegradabile (espressa come sostanza organica o sottovaglio) è stata trascurabile (inferiore al 4%). L'assenza di elevati valori di sottovaglio (elementi con dimensioni inferiori a 20 mm) confermava che il flusso di FSC possedeva una composizione granulometrica medio-grande (elementi con dimensione > 80 mm). La presenza non trascurabile di metalli, pari a circa il 5%, suggeriva che gli stessi fossero tutti costituiti da i metalli ferrosi non trattenuti dal separatore magnetico, precedente la fase di vagliatura, e dai metalli non ferrosi quali alluminio e banda stagnata. Si rendeva pertanto necessario il ricorso ad analisi più dettagliate ed eventualmente disporre un ulteriore setto per la loro rimozione dei non ferrosi mediante eddy currents.

L'RDB ha mostrato una quantità non trascurabile di tutte le frazioni merceologiche (Figura 4b). La sostanza organica è risultata essere ben evidente (5,1%), sebbene non è stata la frazione prevalente, ascrivibile invece al sottovaglio. Quest'ultima è risultata composta da materiali con dimensione <20mm e, vista la maglia di 80mm del vaglio successivo alla biostabilizzazione, la maggior parte dei materiali di piccole dimensioni è finita in questo flusso. Anche in questo caso, la componente biodegradabile del rifiuto avrebbe dovuto essere espressa considerando sia la sostanza organica che il sottovaglio. Secondo questa interpretazione, la quasi metà di RDB (47,6%) sarebbe risultata composta da rifiuto biodegradabile. Si riscontrava inoltre la presenza di carta, cartone, plastica, inerti e tessili, i quali nel complesso erano la metà complementare del flusso. La presenza di inerti non era da considerarsi un problema dal momento che l'RDB era destinato

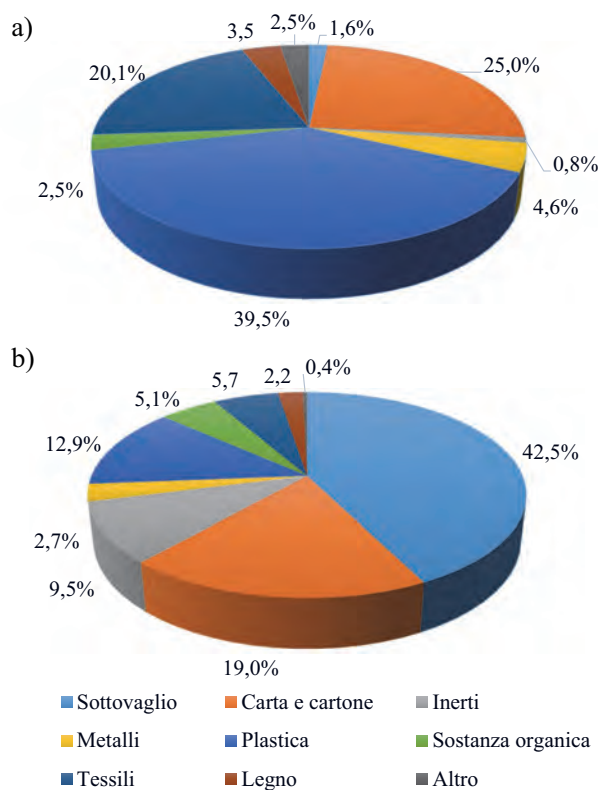


Figura 4 – Composizione merceologica media dei flussi in uscita dall'impianto AMIU rispettivamente di a) FSC dal 2017 al 2019 e b) RBD dal 2016 al 2019

allo smaltimento in discarica. La presenza non trascurabile di metalli ha mostrato anche in questo caso la necessità di un'indagine ulteriore sulla composizione di tale frazione, al fine di valutare l'adozione di selettori aggiuntivi. In merito a carta, cartone e plastica, si sono osservate elevate quantità, oltre il 10%. Le dimensioni sono risultate comprese nel range 20-80mm. La capaci-

tà "assorbente" della carta ha reso il materiale molto probabilmente pesante e conseguentemente difficilmente vagliabile.

I risultati delle analisi merceologiche annuali di RBD e FSC sono mostrati in Tabella 2.

Nel 2016 (periodo in cui l'impianto ha adottato una configurazione a flusso separato) l'RBD ha mostrato valori elevati del sottovaglio (in linea con i valori degli anni successivi) e della sostanza organica. In questo anno la vagliatura era svolta prima della biostabilizzazione; il rifiuto in biocella si presentava già povero di sostanze secche. La ridotta presenza di plastica, carta e cartone mostrava una selezione delle frazioni combustibili più efficiente nel caso che il flusso in ingresso non venisse sottoposto precedentemente a biostabilizzazione. Nei restanti anni, caratterizzati da una configurazione a flusso unico, le diverse frazioni assumevano valori costanti per entrambi i flussi FSC e RBD. L'elevata presenza di frazione secca combustibile nel flusso FSC e di sostanza organica nel flusso RBD configuravano uno scenario di vagliatura ben performante, sebbene ulteriormente perfezionabile.

L'adozione della stessa metodologia e delle stesse frazioni merceologiche ha consentito un confronto fra il rifiuto in ingresso ed i flussi in uscita. Si è osservato come il sottovaglio in ingresso si riversava nel flusso RBD, a sua volta incrementato dalla biodegradazione durante la fase di biostabilizzazione. I metalli non recuperati nella selezione magnetica, erano distribuiti quasi equamente nei due flussi. Carta e cartone e plastica erano presenti in modo elevato nei flussi FSC e RBD della configurazione a flusso unico, sebbene scomparivano dal flusso RBD nella configurazione a flusso separato.

Tabella 2 – Composizione merceologica (w%) dei flussi di FSC e RBD in uscita dall'impianto AMIU dal 2016 al 2019

Frazione	RBD (CER 190501)					FSC (CER 191212)				
	2016	2017	2018	2019	Media	2016	2017	2018	2019	Media
Sottovaglio	44,3%	31,2%	41,2%	46,2%	42,5%	-	0,8%	2,7%	0,3%	1,6%
Carta e cartone	1,9%	22,5%	20,6%	18,3%	19,0%	-	29,0%	24,5%	23,0%	25,0%
Inerti	8,1%	8,2%	12,4%	8,4%	9,5%	-	0,2%	1,4%	0,2%	0,8%
Metalli	1,7%	5,2%	1,9%	2,5%	2,7%	-	5,7%	4,4%	4,1%	4,6%
Plastica	3,8%	17,9%	11,7%	12,8%	12,9%	-	42,5%	35,0%	45,0%	39,5%
Sostanza organica	32,4%	3,4%	4,5%	4,1%	5,1%	-	1,3%	3,2%	2,1%	2,5%
Tessili	6,3%	8,6%	5,7%	4,9%	5,7%	-	17,5%	21,4%	19,6%	20,1%
Legno	1,4%	2,9%	1,9%	2,2%	2,2%	-	3,3%	4,4%	2,2%	3,5%
Altro	0,1%	0,2%	0,1%	0,6%	0,4%	-	0,1%	2,9%	3,4%	2,5%

3.2. Bilancio di massa

Il bilancio di massa ha consentito di quantificare i flussi in uscita con riferimento al periodo 2015-2019: perdite di processo e acque di processo per la

fase di biostabilizzazione, metalli per la selezione magnetica e FSC e RBD per la vagliatura (Figura 5). Il trend decrescente del rifiuto in ingresso all'impianto era avvalorato dall'incremento costante (da circa il 25% nel 2015 a circa il 75% nel 2019) dei

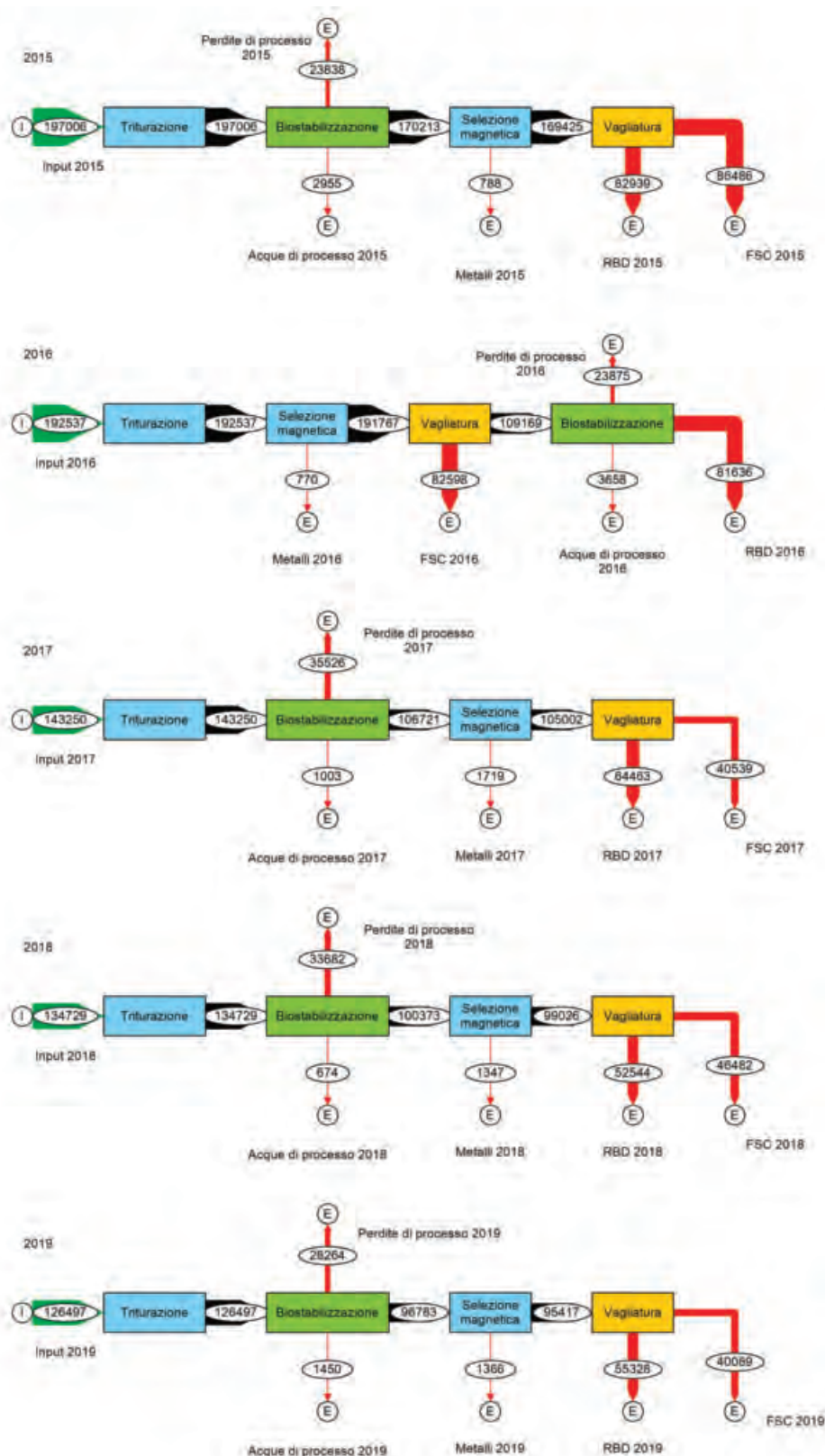


Figura 5 – Bilanci di massa dell'impianto AMIU in termini di quantità di rifiuto annue relativi a ciascun anno dell'analisi

tassi di raccolta differenziata sia per la città di Bari che per i comuni che conferivano presso l'impianto AMIU (Portale Ambientale della Regione Puglia, 2020). Difatti, negli anni i sistemi di raccolta differenziata "porta a porta" attivi nei diversi comuni si erano consolidati e l'utente iniziava a conferire con maggior correttezza le frazioni riciclabili nelle apposite raccolte.

Analizzando il 2015, caratterizzato da una configurazione a flusso unico e un tempo di biostabilizzazione di 7 giorni, RBD e FSC erano pressoché simili fra loro (circa 85.000 t y⁻¹). Anche nel 2016, caratterizzato da una configurazione a flusso separato e un periodo di biostabilizzazione di 7 giorni, i quantitativi di FSC e RBD risultavano ancora comparabili e con il primo caratterizzato da quantità superiori, seppur 2015 e 2016 possedessero input simili (circa 190.000 t y⁻¹). Una variazione significativa del 2016, non solo rispetto all'anno precedente, ma anche rispetto a quelli successivi, ha interessato le acque di processo; si osservava un incremento molto probabilmente dovuto alla maggiore umidità del rifiuto in ingresso alle biocelle. Inoltre, il tempo di trattamento limitato (7 giorni) non permetteva una favorevole evaporazione dell'acqua interna alla massa di rifiuto. Dal 2017 l'impianto ha lavorato di nuovo a flusso unico, aumentando il tempo di biostabilizzazione a 10 giorni. Così, per tutti gli anni successivi al 2016, le perdite di processo sono risultate, in termini percentuali, superiori nonostante i rifiuti in ingresso all'impianto decrescessero. L'aumento del tempo di permanenza in biocella, stante la maggiore biodegradazione conseguita, generava maggiori perdite di processo. Anche i metalli erano notevolmente in aumento dal 2017 in poi, raddoppiando il proprio valore dal 2015 al 2019. Dato che tale frazione era sempre costante nel rifiuto in ingresso, questo aumento era molto probabilmente associato alla maggiore resa della selezione magnetica su una massa maggiormente biostabilizzata (quindi con un contenuto di umidità inferiore). Dal 2017 in poi si osservava una notevole riduzione dei flussi FSC e RBD, da circa 85.000 t nel 2015 a 45.000 t nel 2019. Questa situazione poteva essere giustificata sia ad un ingresso ridotto di rifiuto che dal già citato aumento delle perdite di processo. Dal 2017 in poi il flusso RBD risultava superiore a quello di FSC, a differenza del 2015 e 2016 in cui la situazione era inversa. La differenza fra i due flussi risultava più marcata rispetto ai primi anni, in cui lo scarto era di qualche migliaio di tonnellate.

Per esaminare meglio i flussi in uscita dalle due configurazioni d'impianto, si sono considerate le

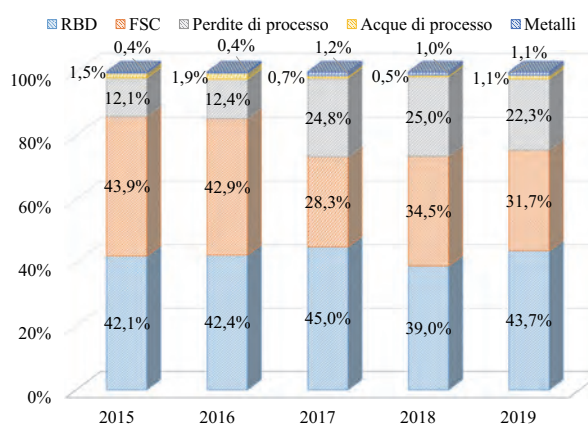


Figura 6 – Ripartizione percentuale dei flussi di output dell'impianto AMIU dal 2015 al 2019

distribuzioni percentuali degli output dal 2015 al 2019 (Figura 6).

Il RBD ha mantenuto valori costanti nel tempo, a meno del 2018. Per quanto riguarda il flusso FSC, dopo due anni di valori pressoché simili (2015 e 2016), si osservava un netto decremento nel 2017 per poi lievemente aumentare nel 2018 e 2019 (senza però raggiungere i valori degli anni precedenti). Tale situazione non sembrava trovare giustificazione con il rifiuto in ingresso in quanto, sebbene il 2017 avesse valori inferiori di sostanza organica in ingresso rispetto al 2016, la FSC del 2017 risultava minore di quella dell'anno precedente. Nel 2018 invece proprio plastica, carta e tessili risultavano le frazioni predominanti del rifiuto in ingresso, tale da giustificare la crescita della FSC in quell'anno. Anche dalla Figura 6 è possibile notare l'aumento delle perdite di processo e dei metalli recuperati nel 2017, in linea con le precedenti valutazioni.

L'adozione della configurazione a flusso unico con tempo di 10 giorni permetteva di eliminare circa il 20% del rifiuto in ingresso in biostabilizzazione. Con l'aumentare delle perdite di processo e la riduzione delle acque di processo, è stato possibile ridurre il quantitativo del flusso di RBD e conseguentemente i costi di smaltimento affrontati dalla società.

3.3. Indice Respirimetrico Dinamico

L'intervallo temporale è stato discretizzato in funzione delle diverse configurazioni del TMB. Sono state identificate tre diverse condizioni: (i) flusso unico con biostabilizzazione a 7 giorni; (ii) flusso separato con biostabilizzazione a 7 giorni; (iii) flusso unico con biostabilizzazione a 10 giorni (per tale configurazione sono disponibili dati sia per RBD

che per FSC). L'andamento nel tempo dell'IRD_p per il RBD è mostrato in Figura 7.

Il flusso unico con biostabilizzazione a 7 giorni è stato adottato da gennaio a dicembre 2015. Visto il minor tempo di biostabilizzazione, i valori dell'IRD_p sono risultati relativamente alti qualora comparati rispetto a simili condizioni di processo. Ad ogni modo tutti i dati sono stati inferiori al valore limite AIA pari a 800 mgO₂ kgSV⁻¹ h⁻¹. L'andamento nel tempo mostrava un discreto scostamento dei valori di IRD_p dal valor medio di 655 mgO₂ kgSV⁻¹ h⁻¹ (i valori erano compresi nell'intervallo 400÷800 mgO₂ kgSV⁻¹ h⁻¹).

Il flusso separato con biostabilizzazione a 7 giorni è stato adottato da gennaio a novembre 2016. In questo caso l'andamento dell'IRD_p era caratterizzato da una maggiore variabilità, con un maggior scarto dal valor medio (pari a 737 mgO₂ kgSV⁻¹ h⁻¹), senza seguire un trend definito. I valori di IRD_p erano compresi nell'intervallo 450÷950 mgO₂ kgSV⁻¹ h⁻¹. Il valore medio dell'IRD_p è stato maggiore di quello delle altre configurazioni, sebbene tutti i valori erano conformi al limite di 1000 mgO₂ kgSV⁻¹ h⁻¹ del D.M. 24/06/2015. Ciò ha trovato giustificazione considerando la configurazione dell'impianto; la vagliatura a monte della biostabilizzazione consentiva di caricare la biocella con un rifiuto prevalentemente composto da sostanza biodegradabile e con caratteristiche diverse (maggiore tenore di solidi volatili e umidità). Il tempo di biostabilizzazione di 7 giorni non era quindi idoneo per un sostanziale abbattimento dell'ossigeno richiesto per la degradazione di una quantità di rifiuto simile a quella del 2015.

Il flusso unico con biostabilizzazione a 10 giorni è stato adottato da dicembre 2016 a dicembre 2019

(Figura 8). Risultavano evidenti due diversi andamenti: da gennaio 2017 a dicembre 2018 l'IRD_p mostrava valori stabili nel tempo, a differenza di quanto osservato nei periodi precedenti, con valori di IRD_p più alti e meno uniformi. Da gennaio 2019 l'andamento risultava maggiormente discostante dal valore medio. D'altra parte, i valori di IRD_p risultavano inferiori al valore medio calcolato per il periodo in esame (656 mgO₂ kgSV⁻¹ h⁻¹), nonostante i picchi di circa 700 mgO₂ kgSV⁻¹ h⁻¹. Complessivamente, l'aumento del tempo di biostabilizzazione da 7 a 10 giorni comportava una riduzione del valore di IRD_p.

Per la FSC, si è osservato un IRD_p nell'intervallo 150÷550 mgO₂ kgSV⁻¹ h⁻¹, con un trend decrescente negli anni e valore medio di 420 mgO₂ kgSV⁻¹ h⁻¹. I valori di IRD_p del flusso FSC a disposizione iniziavano da gennaio 2017; tuttavia, da ottobre 2018 la frequenza di campionamento era stata ridotta, fino a ottenere 3 valori per il 2019, a differenza del periodo precedente in cui le analisi avevano una cadenza molto più regolare e frequente. Tale scelta era stata effettuata in quanto la FSC possedeva una elevata stabilità biologica, visibile dai bassi valori di IRD_p, che si manteneva costante nel tempo. Il flusso FSC (Figura 4a) era prevalentemente composto da plastica e carta, materiali difficilmente degradabili se paragonati ai rifiuti organici.

Un riassunto delle diverse configurazioni dell'impianto in termini di monitoraggio dell'IRD_p è mostrato in Figura 9.

L'analisi statistica ha confermato una variabilità maggiore dei dati e prestazioni inferiori dello schema a flusso separato rispetto a quello unico. Tanto di cui sopra si desume dalla maggior deviazio-

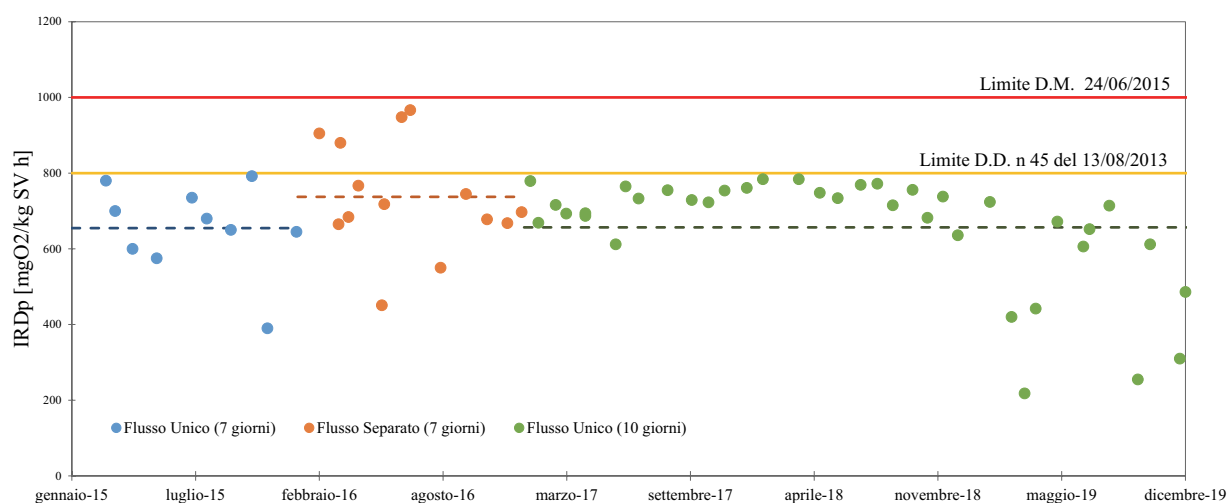


Figura 7 – Andamento dell'IRD_p del RBD

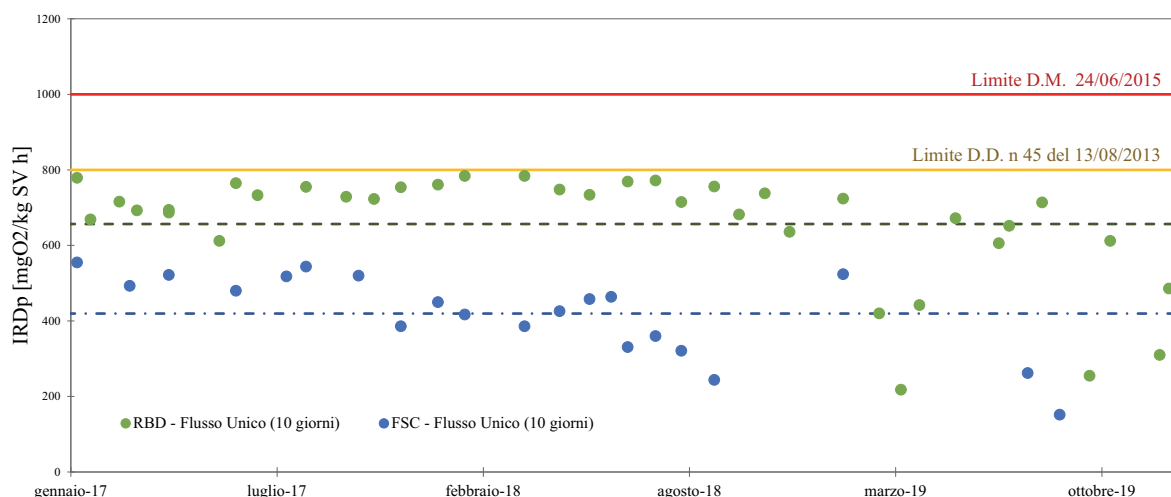


Figura 8 – Andamento dell'IRD_p per RBD e FSC relativo ad una configurazione a flusso unico con tempo di biostabilizzazione a 10 giorni

ne standard dei dati e dal più alto valore di IRD_p medio. Inoltre, nel caso di configurazione a flusso unico, il maggior tempo di biostabilizzazione ha permesso una variabilità e valori di IRD_p inferiori (confronto dei valori di RBD a 7 e 10 giorni di biostabilizzazione). Generalmente, il flusso di RBD ha mostrato valori massimi dell'indice respirometrico prossimi ai limiti normativi, a differenza di quelli di FSC che invece erano inferiori e che presentavano una variabilità ridotta.

4. CONCLUSIONI

Al termine del periodo di indagine è possibile osservare che, in termini di analisi merceologica, le frazioni prevalenti nel rifiuto in ingresso sono risultate essere carta, cartone e plastica. La somma del sottovaglio e della sostanza organica, la parte biodegradabile del rifiuto, si è attestata mediamente sul 30%, mentre le altre frazioni erano costanti e non superiori al 5%. I flussi FSC e RBD sono risultati essere composti, rispettivamente, da sostanze secche (carta, plastica e tessili) e biodegradabili (prevalentemente di dimensioni ridotte). Vista l'elevata presenza di metalli in entrambi i flussi, si è reso consigliabile il ricorso ad ulteriori analisi sulla tipologia di questi materiali (ferrosi o non ferrosi) e, nel caso, l'adozione di separatori aggiuntivi. L'adozione della configurazione a flusso separato ha permesso di incrementare l'efficienza della vagliatura, riducendo il contenuto di plastica e carta nel flusso RBD.

I risultati del bilancio di massa hanno evidenziato come la configurazione a flusso unico o separato con 7 giorni di biostabilizzazione (a parità di

input) non ha influito sul rapporto fra FSC e RBD (con il primo leggermente superiore del secondo). L'incremento del tempo da 7 a 10 giorni ha consentito una migliore selezione della componente ferrosa di rifiuto dalla massa maggiormente biostabilizzata e una riduzione dei flussi RBD e FSC, le cui quantità risultavano discostanti e a vantaggio del RBD. Al contrario, in una configurazione a flusso separato, le acque di processo risultavano in maggiori quantità. L'adozione di una configurazione a flusso unico e l'aumento del tempo della biostabilizzazione hanno permesso di incrementare le perdite di processo e ridurre le acque di processo. Lo studio dell'indice respirometrico ha evidenziato la necessità di adottare un monitoraggio più intenso dell'IRD_p del RBD in presenza di una configurazione a flusso separato. Al contrario, in una configurazione a flusso unico, i valori di IRD_p del flusso RBD erano più stabili e inferiori, ancor più in presenza di un tempo di biostabilizzazione pari a 10 giorni. In questa condizione si è osservata una riduzione complessiva del valore medio di IRD_p. La stabilità della FSC variava di poco, confermando l'idoneità per un successivo upgrade e trattamento termico. I risultati hanno suggerito anche una minor frequenza di monitoraggio dell'IRD_p nel flusso FSC.

In conclusione, l'esperienza qui descritta è quella di un impianto che pur in presenza di una variazione dello schema di processo, ha sempre rispettato i valori limite imposti dal legislatore, evidenziando una buona flessibilità. A livello metodologico lo studio si pone come un valido strumento a servizio del gestore.

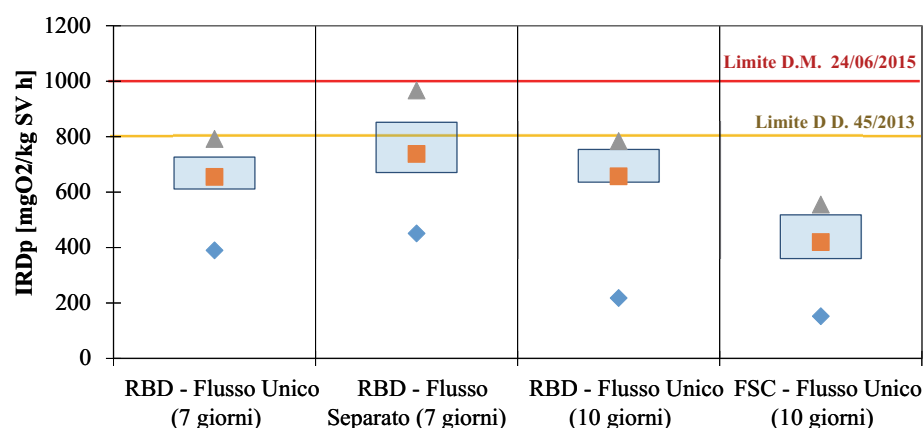


Figura 9 – Valori minimi, medi e massimi con indicazione dell'intervallo compreso tra il primo e il terzo quartile

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Abeliotis K., Kalogeropoulos A. and Lasaridi K. (2012) Life Cycle Assessment of the MBT plant in Ano Liossia, Athens, Greece, *Waste Management* 32(1): 213-219.
- Achour F., Morais J., Rouez M., et al. (2005) Characterization of organic matter in municipal solid wastes: a pertinent tool for the assessment of a mechanical-biological treatment. In: *Proceedings of International Symposium MBT 559-568*.
- Cencic O. and Rechberger H. (2008) Material Flow Analysis with Software STAN. In: *EnviroInfo 2008 – Environmental Informatics and Industrial Ecology* 440-447.
- D.D. n. 45 13 agosto 2013 (2013) “Rinnovo Autorizzazione Integrata Ambientale (IPPC) ai sensi dell’art. 29 – octies del D.Lgs. n. 152/06 e smi rilasciato a “AMIU SpA – BARI” – ubicato in via Francesco Fuzio Ingegnere (Bari) – per l’impianto con codice attività IPPC 5.3 – Allegato VIII alla parte seconda D.Lgs 152/06 e smi – Fascicolo 137”, Dirigente Ufficio Inquinamento e Grandi Impianti Regione Puglia.
- De Gisi S., Chiarelli A., Tagliente L., et al. (2018) Energy, environmental and operation aspects of a SRF-fired fluidized bed waste-to-energy plant, *Waste Management* 73, 271-286.
- De Gisi S., Todaro F., Fedele G., et al. (2018) Alternating pure oxygen and air cycles for the biostabilization of unsorted fraction of municipal solid waste, *Waste Management* 79: 404-414.
- D.Lgs n. 152 3 aprile 2006 (2006) “Norme in materia ambientale”. G.U. n. 88 del 14 aprile 2006”.
- D.M. 24 giugno 2015 (2015) “Modifica del decreto 27 settembre 2010, relativo alla definizione dei criteri di ammissibilità dei rifiuti in discarica”, Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.
- Grosso M., Dellavedova S., Rigamonti L., et al. (2016) Case study of an MBT plant producing SRF for cement kiln co-combustion, coupled with a bioreactor landfill for process residues. *Waste management* 47: 267-275.
- Haaf M., Anantharaman R., Roussanaly S., et al. (2020) CO₂ capture from waste-to-energy plants: Techno-economic assessment of novel integration concepts of calcium looping technology. *Resources, Conservation and Recycling* 162: 104973.
- ISPRA (2018) Rapporto Rifiuti Urbani 2018. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/rapporto-rifiuti-urbani-edizione-2018>
- Materazzi M., Lettieri P., Taylor R., et al. (2016) Performance analysis of RDF gasification in a two stage fluidized bed-plasma process. *Waste Management* 47: 256-266.
- Montejo C., Tonini D., del Carmen Márquez M., et al. (2013) Mechanical-biological treatment: Performance and potentials. An LCA of 8 MBT plants including waste characterization. *Journal of environmental management* 128, 661-673.
- Portale Ambientale della Regione Puglia. (2020) Osservatorio Rifiuti Regione Puglia. Disponibile su: http://www.sit.puglia.it/portal/portale_orp
- Rigamonti L., Borghi G., Martignon G., et al. (2019) Life cycle costing of energy recovery from solid recovered fuel produced in MBT plants in Italy. *Waste Management* 99, 154-162.
- Rigamonti L., Grosso M. and Biganzoli L. (2012) Environmental Assessment of Refuse-Derived Fuel Co-Combustion in a Coal-Fired Power Plant, *Journal of Industrial Ecology* 16(5): 748-760.
- Siddiqui A.A., Richards D.J. and Powrie W. (2013) Biodegradation and flushing of MBT wastes, *Waste Management* 16(5): 748-760.
- Trulli E., Ferronato N., Torretta V., et al. (2018) Sustainable mechanical biological treatment of solid waste in urbanized areas with low recycling rates. *Waste Management* 71: 556-564.
- UNI (2013) 10802. Rifiuti – Campionamento manuale, preparazione del campione ed analisi degli eluati.
- UNI (2016) 11184. Rifiuti e combustibili ricavati da rifiuti – Determinazione della stabilità biologica mediante l’Indice di Respirazione Dinamico (IRD).

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano l’azienda AMIU Puglia S.p.A. e tutto il suo personale che hanno contribuito alla raccolta dati e alla realizzazione di questo lavoro.

RIFIUTI PLASTICI COME MATERIA PRIMA PER PAVIMENTAZIONI STRADALI INNOVATIVE: UNA VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA

Lucia Capuano^{1*}, Giacomo Magatti¹, Paride Mantecca¹

¹ Università di Milano Bicocca, Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra, Centro di Ricerca POLARIS.

Sommario – In un'ottica di economia circolare e sostenibile è necessario incentivare il riciclo e il riuso, soprattutto dei materiali plastici, attraverso il consolidamento del mercato delle materie prime seconde. Un settore di riutilizzo dei materiali polimerici è quello delle pavimentazioni stradali; per migliorare le caratteristiche, come aumentare la vita utile e diminuire la frequenza di manutenzione delle strade, vengono utilizzati additivi polimerici al bitume, quali lo stirene butadiene stirene (SBS). Oggetto del presente lavoro è una valutazione comparativa, attraverso la metodologia LCA, tra asfalto convenzionale, asfalto con SBS e asfalto con un nuovo modificante. Questo modificante è sviluppato a partire da plastiche dure di natura poliolefinica, provenienti da rifiuti altrimenti inviati a termovalorizzazione, e materiali a base grafenica. I processi considerati nella seguente analisi comprendono tutte le fasi del ciclo di vita della pavimentazione: dall'estrazione delle materie prime al riuso del materiale. Inoltre, per poter effettuare un confronto completo rispetto allo scenario tradizionale, è stata fatta un'estensione del sistema per considerare il processo di incenerimento delle plastiche dure, tenendo conto così del loro fine vita tradizionale. L'unità funzionale dello studio è 1 km di strada extraurbana, larga 15 metri con orizzonte temporale di utilizzo pari a 20 anni. I risultati ottenuti da questa valutazione LCA, hanno mostrato che le pavimentazioni prodotte con il nuovo modificante risultano essere meno impattanti sia rispetto al sistema tradizionale che al sistema con SBS, grazie alle migliori prestazioni fisico-meccaniche e alla conseguente riduzione degli interventi di manutenzione.

Parole chiave: economia circolare, impatti ambientali, pavimentazioni stradali, rifiuti plastici, sostenibilità.

WASTE PLASTICS AS RAW MATERIAL FOR INNOVATIVE ROAD PAVEMENTS: A LIFE CYCLE ASSESSMENT

Abstract – The road pavement sector represents an opportunity to recycle plastic materials. In respect of circular and sustainable economy, it is necessary to encourage recycling and reuse, especially of plastic materials, through the consolidation of the market for secondary raw materials. In fact, plastic polymers are often added to bitumen in order to improve road characteristics, such as increasing service life or decreasing road maintenance frequency. The aim of this study is to carry out a comparative analysis of environmental impacts for different road pavements that contain different mixes of bituminous conglomerate. The bituminous mixture consists of

three types: traditional pavement, pavement with SBS, and pavement with a new modifier. The first one, referred as conventional pavement, is composed of bitumen and aggregates; the second type contains SBS (styrene-butadiene-styrene)-modified bitumen. SBS is the most used polymer in road pavements because it has valuable improving properties. The third type of road pavements is formed by bitumen, aggregates and a new modifier. This one is formed by hard plastics of a polyolefin nature and graphene. Life Cycle Assessment – LCA – is a modelling tool used to quantify, characterize and compare the environmental impacts. The use of LCA tools is especially valuable in the case of innovative materials containing recycled products: it may be important for applications as result of their contribution to the reduction of consumption of raw material and non-renewable resources. The study includes all the processes and activities of road pavements that encompass material production, laying operations, maintenance works during the pavement's lifetime, and end-of-life, according to a cradle to cradle approach. Moreover, in order to make a full comparison with the traditional scenario, an extension of the system has been made to consider the incineration process of hard plastics; in this way it takes into account their traditional end-of-life (as opposed to their reuse as a secondary raw material). The incineration process has been considered in conventional pavement and pavement with SBS; on the other hand, plastic recycle process has been considered in the innovative pavement (with the new modifier). The functional unit is a measure of the performance of the analyzed product system; in this work it is 1 km of road, 15 meters wide and with a service time of 20 years. The results show that recycling plastics as a polymer for bitumen modification has the potential to be environmentally advantageous compared to other two solutions: in fact, the new modifier is less impactful than the traditional system and the SBS system. The results of the analysis show that the phase of material production, including raw material extraction, is relevant to almost all the assessed impact categories. This is mainly due to the production of bitumen, which is a petroleum-based product. The investigated paving solution based on waste hard plastic recycling, produces a high-performance asphalt modifier according to a circular model. This solution shows a potential mitigation of the environmental impacts in all impact categories. This is due to the performance of the mixture of plastic and graphene modified added to the bituminous conglomerate.

Keywords: environmental impacts, circular economy, road pavements, waste plastic, sustainability.

* Per contatti: Piazza della Scienza, 1 20126 Milano (MI)
Tel. 3391427807, lucia.capuano@unimib.it

Ricevuto il 15-4-2021. Modifiche sostanziali richieste il 21-5-2021.
Correzioni richieste il 18-6-2021. Accettazione il 25-6-2021.

1. INTRODUZIONE

Il settore delle infrastrutture stradali è uno dei tre principali motori di utilizzo delle risorse nell'Unione Europea (Steger e Bleischwitz, 2011). Le costruzioni stradali contribuiscono in maniera significativa al riscaldamento globale, proprio a causa delle loro caratteristiche: l'alto consumo di energia per la loro realizzazione, l'utilizzo di materie prime, la superficie occupata, la generazione di una grande quantità di rifiuti e la grande quantità di trasporti collegati (Cass e Mukherjee, 2011). Le infrastrutture stradali giocano un ruolo importante nella sostenibilità dei sistemi urbani (FHWA, 2011). Le tipologie di pavimentazione possono influenzare direttamente il consumo di carburante e le emissioni dei veicoli a motore. Nel 2017, in Italia, i trasporti sono stati responsabili del 23,3% delle emissioni totali di gas serra (ISPRA, 2019). Nei progetti infrastrutturali, quando si valuta la sostenibilità, le emissioni di gas serra sono un indicatore chiave. Ma questo settore presenta ampie possibilità di mitigazione degli impatti, attraverso nuove formulazioni di miscele per pavimentazioni che ne migliorino le prestazioni. Queste formulazioni includono materiali alternativi come: gomma (Chiu et al., 2008), acciaio (Ferreira et al., 2016), polimeri (Araújo et al., 2014; Butt, 2014) e asfalto riciclato (RAP) (Araújo et al., 2014; Aurangzeb et al., 2014; Bloom et al., 2017).

Nel 2018 in Europa sono stati prodotti 298 milioni di tonnellate di conglomerato bituminoso (EAPA, 2020) e questa quantità è in continua crescita soprattutto nei paesi in via di sviluppo. I conglomerati bituminosi sono miscele formate da aggregati e bitume, e possono variare in base alla granulometria dell'inerte e sulla qualità e quantità di bitume. Questa varietà si traduce nella possibile rispondenza a diverse esigenze come la rugosità, l'impermeabilità, la regolarità, e la possibilità di impiego in piccoli spessori. Le infrastrutture stradali rappresentano elementi chiave per caratterizzare il livello di sviluppo (Herranz-Loncàn, 2007; Rietveld, 1994) e di benessere (Knapp e Oosterhaven, 2011) di un dato paese. La modifica di pavimentazioni stradali utilizzando materiali plastici è un modo per migliorarne le proprietà, le prestazioni, aumentarne la vita utile e quindi il loro costo complessivo (Sulyman et al., 2016; Aflaki et al., 2008). I materiali plastici utilizzati nelle pavimentazioni possono essere divisi in due classi a seconda delle modifiche subite dopo l'esposizione al calore: polimeri termoindurenti e polimeri termopla-

stici. Il primo tipo, come ad esempio resine ed elastomeri, vengono induriti durante il riscaldamento e le strutture tridimensionali dei legami di reticolazione che si formano non permettono l'ammorbidimento della matrice polimerica e la facile rilavorazione; il secondo tipo di polimeri, i termoplastici, come ad esempio il polipropilene e il polietilene tereftalato, possono essere modellati in nuove forme usando il calore, e a differenza degli altri polimeri, questo tipo di processo è reversibile (Sulyman et al., 2016).

Riciclare i rifiuti di plastica nelle pavimentazioni stradali può dare un contributo molto grande all'ambiente e all'economia per differenti aspetti. Aiuta infatti a ridurre lo sfruttamento delle risorse naturali, a diminuire il livello di inquinamento ambientale e contribuisce a modificare le proprietà fisiche e ingegneristiche dei materiali da costruzione, come l'asfalto e il calcestruzzo. L'asfalto è ampiamente utilizzato nella costruzione di pavimentazioni stradali come legante di aggregati (Akmal, 1999). Tuttavia, è ben riconosciuto che il conglomerato bituminoso mostra una diversa suscettibilità alla temperatura, come l'ormaiamento ad alta temperatura, la resistenza a fatica a media temperatura e i danni da cracking a bassa temperatura. Per questo motivo spesso i conglomerati bituminosi vengono modificati per migliorare la loro applicazione. L'aggiunta di polimeri incrementa significativamente la qualità dell'asfalto (Yuonne e Yajaira, 2001): migliora le caratteristiche reologiche (Uranga, 2008), le proprietà di adesione e coesione (Kalantar, 2010) e può migliorare con successo le prestazioni delle pavimentazioni, aumentando la resistenza a fatica, alla fessurazione termica, e all'ormaiamento (Aflaki et al., 2008). Tra i polimeri più utilizzati vi è lo stirene-butadiene-stirene (SBS) che in forma di granulato viene aggiunto al bitume. Il vantaggio dell'utilizzo di questi composti, rispetto ad altri risiede nel fatto che hanno la capacità di creare un sistema di equilibrio nel bitume attraverso interazioni molecolari con esso (Isacsson e Zeng, 1998).

L'obiettivo di questa analisi è una valutazione comparativa tra diverse tipologie di pavimentazione: una tradizionale formata solo dal conglomerato bituminoso, una pavimentazione formata con l'aggiunta del co-polimero SBS e una pavimentazione formata da un nuovo modificante creato dal riciclo di plastiche dure e da materiali a base grafenica. Il presente lavoro fa parte di un progetto di ricerca, *Ecopave*, che promuove lo sviluppo di mo-

dificanti per asfalti in grado di migliorare le caratteristiche delle pavimentazioni stradali attraverso un processo produttivo ad alta efficienza e sostenibilità mediante il riciclo di rifiuti plastici e materiali a base grafenica.

I rifiuti plastici, che non possono essere riciclati nella catena di riciclaggio standard e vengono quindi inviati a termovalorizzazione, sono raccolti in piattaforme ecologiche, separati da eventuali parti metalliche e trasferiti in un impianto di riciclaggio della plastica, dove attraverso la flottazione avviene la selezione delle plastiche per avere una specifica frazione di plastica poliolefinica. Tale frazione poliolefinica viene tritata per ottenere dei granuli di dimensione unitaria di circa 3 mm, tali da poter essere utilizzati come additivo per i conglomerati bituminosi. In seguito, questa frazione viene aggiunta al grafene. Il grafene viene prodotto a partire dalla grafite intercalata, ottenuta a sua volta dalla grafite naturale che viene intercalata con degli acidi (Pizza et al., 2014). Una volta ottenuta la frazione di plastica e di grafene si ha la formazione del nuovo modificante in granuli attraverso l'estrusione. La valutazione è stata fatta con la metodologia LCA – Life Cycle Assessment –, che viene utilizzata da oltre due decenni, per stimare gli impatti ambientali associati alle pavimentazioni stradali. Utilizzare questa tecnica è particolarmente importante nel caso dei materiali innovativi a base di prodotti riciclati, che possono essere interessanti per la riduzione del consumo di materie prime e di risorse non rinnovabili (Carpenter et al., 2007; Chiu et al., 2008; Giani et al., 2015). Vi sono diversi studi (Huang et al. 2009; Santos et al. 2019; Wang et al. 2016; Zheng et al., 2019) che mettono in relazione la durabilità del ciclo di vita di progetti di pavimentazione con la sostenibilità delle soluzioni da adottare sul campo. Lo scopo di queste valutazioni è di introdurre la pavimentazione più sostenibile.

2. MATERIALI E METODI

L'analisi degli impatti ambientali è stata fatta attraverso la metodologia LCA secondo le norme UNI EN ISO 14040 (Principi e quadro di riferimento) e 14044 (Requisiti e linee guida). La LCA si svolge in 4 fasi che generalmente sono interconnesse: definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, analisi dell'inventario, analisi degli impatti e interpretazione dei risultati (ISO, 2006 a, 2006 b).

2.1. Definizione dell'obiettivo

Questo lavoro è finalizzato a quantificare gli impatti ambientali delle pavimentazioni stradali formate da un nuovo modificante innovativo. Questa opzione innovativa è comparata con una pavimentazione tradizionale (riferita come convenzionale) e una pavimentazione contenente il co-polimero SBS. Questo è uno studio LCA comparativo.

2.1.1. Unità funzionale

Secondo la norma ISO 14040 l'unità funzionale viene definita come la "Prestazione quantificata di un sistema di prodotto da utilizzare come unità di riferimento" (ISO, 2006 a). L'unità funzionale impiegata nell'analisi e a cui fanno riferimento i risultati è 1 km di strada extraurbana, larga 15 metri con orizzonte temporale di utilizzo di 20 anni.

2.1.2. Confini del sistema

I confini del sistema sono di tipo "cradle to cradle", ovvero comprendono l'intero ciclo di vita della pavimentazione stradale, dall'estrazione delle materie prime, ai cicli di produzione e manutenzione del conglomerato bituminoso, al riutilizzo finale della porzione di fresato, il materiale rimosso dalla pavimentazione e reinserito in un nuovo ciclo produttivo. In dettaglio, i confini del sistema includono queste fasi, Figura 1:

- *estrazione e lavorazione di materie prime*: include aggregati, bitume e la produzione dell'emulsione bituminosa, una miscela che viene spruzzata tra uno strato e l'altro della pavimentazione per migliorarne l'adesione;
- *produzione del conglomerato bituminoso*: prevede l'unione di aggregati e bitume in un impianto previo riscaldamento, include il consumo di energia elettrica e i consumi associati alla pala gommata che serve per spostare i materiali all'interno dell'impianto;
- *trasporto*: include il trasporto delle materie prime all'impianto di produzione, così come il trasporto del conglomerato al sito di stesura e il trasporto del materiale rimosso nuovamente al sito di stoccaggio, dove dopo essere stato opportunamente trattato viene reinserito in un nuovo ciclo produttivo. Gli oneri ambientali associati a questa fase derivano dal consumo di carburante e dalle emissioni dei mezzi utilizzati;
- *stesura*: considera i mezzi necessari alla messa in posa del conglomerato bituminoso, sono coinvolti diversi mezzi per cui per questa fase sono

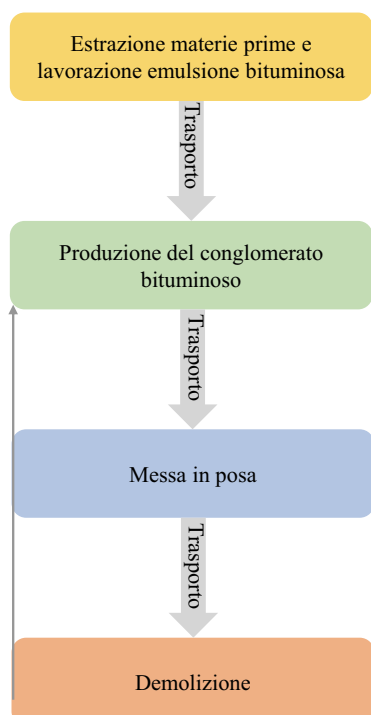


Figura 1 – Confini del sistema considerati nell'analisi

state considerate le emissioni e i consumi relativi a questi mezzi;

- *demolizione*: analogamente al processo di stesura, sono state considerate le attività di rimozione del manto stradale con i diversi mezzi associati.

Oltre a questi processi, per rendere comparabili le pavimentazioni, si è resa necessaria l'estensione del sistema al processo di incenerimento delle plastiche nel conglomerato convenzionale e con SBS. L'estensione si è resa necessaria poiché il nuovo modificante prevede il riciclo delle plastiche altrimenti inviate a termovalorizzazione, Figura 2.

2.1.3. Metodo di calcolo degli impatti

L'analisi è stata fatta con il software OpenLCA, database Ecoinvent 3.6 e il modello di caratteriz-

zazione degli impatti è CML-2001. Le categorie di impatto incluse nell'analisi sono:

- impoverimento delle risorse minerali (Abiotic depletion elements, (ADP) Kg Sb eq.);
- impoverimento delle risorse fossili (Abiotic depletion fossil fuels (ADP) MJ);
- acidificazione (Acidification Potential (AP) Kg SO₂ eq.);
- eutrofizzazione (Eutrophication Potential (EP) Kg PO₄³⁻ eq.);
- ecotossicità delle acque dolci (Freshwater aquatic ecotoxicity (FAETP) Kg 1,4-DB eq.);
- riscaldamento globale (Global Warming Potential (GWP) Kg CO₂ eq.);
- tossicità umana (Human Toxicity (HTTP) Kg 1,4-DB eq.);
- ecotossicità marina (Marine aquatic ecotoxicity (MAETP) Kg 1,4-DB eq.);
- impoverimento dello strato di ozono stratosferico (Ozone layer depletion (ODP) Kg CFC-11 eq.);
- fotossidazione (Photochemical oxidation (POPC) Kg C₂H₄ eq.);
- ecotossicità terrestre (Terrestrial ecotoxicity (TETP) Kg 1,4-DB eq.).

2.2. Analisi di inventario

I dati utilizzati nell'analisi, sono soprattutto dati primari, forniti direttamente dalle aziende coinvolte nel progetto; laddove non si è riusciti a risalire al dato puntuale ci si è riferiti a studi scientifici di settore oppure ai processi selezionati all'interno del database.

Nell'analisi sono stati considerati i 3 strati della pavimentazione stradale: usura, binder e base ognuno con uno spessore e materiale leggermente diverso. Ogni strato ha una durata di vita utile differente, data appunto dalle diverse caratteristiche chimico-fisiche. La durata è dettata dal W18, un fattore che definisce le caratteristiche strutturali del-

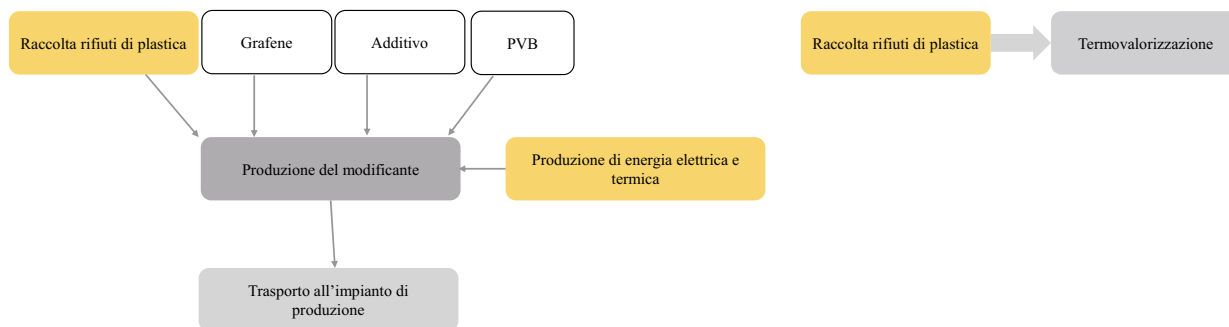


Figura 2 – Estensione del sistema per il destino delle plastiche: a sinistra riciclo delle plastiche per produrre il modificante, a destra processo di termovalorizzazione per convenzionale e SBS

la strada. Il metodo di calcolo è un metodo empirico che permette di ricavare il numero cumulato W18 di assi standard (Equivalent Single Axle Loads) da 80 kN che una pavimentazione riesce a sopportare prima di raggiungere il livello finale accettabile di funzionalità. Questo fattore è calcolato secondo le linee guida dell'AASHTO.

Le attività di manutenzione devono essere pianificate per garantire le prestazioni strutturali e funzionali di una strada. Gli strati principalmente coinvolti nelle attività di manutenzione sono quelli superficiali, poiché sono a diretto contatto con i carichi in movimento e più suscettibili a deterioramento a causa dei flussi di traffico, degli agenti atmosferici e delle azioni esterne. Le attività di manutenzione considerate consistono nella demolizione dello strato danneggiato e nella rimessa in posa di nuovo conglomerato bituminoso, sono ripercorsi quindi tutti i processi riportati in Figura 1 e 2, per un numero di volte pari agli interventi. Il materiale rimosso è in parte riciclato per essere di nuovo utilizzato nella pavimentazione. La quantità di materiale rimosso e reinserita nella pavimentazione varia a seconda dello strato considerato. In questo studio è stato preso in esame una percentuale di rinserimento del fresato del 20% nello strato di usura e del 30% nello strato di binder e di base. Durante il periodo di analisi riferito a 20 anni, vi è una diversa frequenza di manutenzione dei 3 strati delle diverse tipologie di pavimentazione, come riportato in Tabella 1. La frequenza di manutenzione, espressa in anni di vita utile, è stata stimata sulla base della valutazione della resistenza a fatica dei vari strati di conglomerato bituminoso e riferita alla tipologia di strada per la destinazione d'uso specificata (intensità utilizzo n. veicoli / anno). La stima della durata è confortata da risultati ottenuti da

prove sperimentali (resistenza a fatica e resistenza a trazione indiretta), svolte per le diverse tipologie di conglomerato bituminoso.

Nei paragrafi sottostanti vengono riportati in dettaglio i processi inclusi nell'analisi.

2.2.1. Estrazione e produzione del conglomerato bituminoso

La lista dettagliata dei materiali necessari e la relativa percentuale per la produzione delle diverse tipologie di conglomerato bituminoso degli strati è stata fornita dall'azienda promotrice del progetto. I dati per il conglomerato bituminoso convenzionale, quello con SBS e quello contenente il modificante presentano un alto grado di precisione perché riguardano prodotti già consolidati e usati quotidianamente dall'azienda. La percentuale di aggregati e bitume rispetto al conglomerato bituminoso sono riportate nella Tabella 2. L'emulsione bituminosa viene preparata nello stesso impianto di produzione del conglomerato bituminoso, ed è composta principalmente da bitume, acqua e una piccola percentuale di acido cloridrico ed etilendiammina.

Il processo di produzione del conglomerato prevede la selezione degli aggregati nelle diverse granulometrie e la loro essiccazione, durante quest'ultima fase è aggiunto anche il fresato. La temperatura per il processo di essiccazione è di 160° C per il conglomerato convenzionale, mentre per quello modificato sia con l'SBS che con il nuovo modificante è 170°. Infine, aggregati e fresato vengono messi in una torre di miscelamento, dove viene aggiunto il bitume precedentemente riscaldato. Il processo prepara 3 tonnellate di conglomerato in cicli di 45 secondi e prevede il consumo di energia elettrica e di energia termica nelle quantità indicate nella Tabella 2. All'interno del sito avvengono an-

Tabella 1 – Frequenza di manutenzione per i diversi strati per le diverse tipologie di pavimentazione

Tipologia di pavimentazione	Strato	Spessore (cm)	Anni Vita Utile	Cicli manutentivi in anni	Anni totali della pavimentazione
Convenzionale	Usura	5	5	4	20
	Binder	6	10	2	
	Base	14	20	1	
SBS	Usura	5	8	3	20
	Binder	6	16	2	
	Base	14	32	1	
Innovativo	Usura	5	15	2	20
	Binder	6	30	1	
	Base	14	90	1	

Tabella 2 – Percentuali dei materiali e consumi legati alla produzione del conglomerato bituminoso

Materiali	Quantità
% di aggregati rispetto al conglomerato bituminoso	96%
% di bitume rispetto al conglomerato bituminoso	4%
Produttività dell'impianto	240 t/h
Consumo di energia elettrica dell'impianto	27 kWh/h
Consumo di metano dell'impianto	24 m³/h
Produttività pala gommata	220 t/h

Tabella 3 – Percentuali dei materiali per produrre il bitume con SBS

Materiali	Quantità
Bitume	96,85%
Zolfo	0,15%
Stirene-Butadiene-Stirene	3%

che movimentazioni logistiche tramite pala gommata, con relativo consumo di gasolio; quest'ultimo e le emissioni associate al mezzo provengono dal database svizzero *Nonroad*.

Il co-polimero stirene-butadiene-stirene, nella sua forma granulare, viene aggiunto al bitume in una percentuale del 3%, tramite un apposito macchinario, in cui viene unito anche lo zolfo. Si ottiene quindi un bitume modificato, prodotto nello stesso impianto del conglomerato bituminoso convenzionale. In Tabella 3 si riportano le percentuali per ottenere il bitume modificato con SBS.

2.2.2. Trasporto

Sulla base delle informazioni fornite dalle aziende, la tipologia di mezzi coinvolti nel trasporto sono camion di tipo Euro 4 con capacità di cari-

co da 16 a 32 tonnellate. La Tabella 4 riporta le distanze medie per ogni materiale; nella prima colonna, "Trasporti considerati", vengono raggruppati i vari spostamenti coinvolti durante il ciclo di vita delle pavimentazioni. Il primo modulo, rappresentato in giallo in tabella, considera il trasporto delle materie prime all'impianto di produzione del conglomerato bituminoso; in particolare di seguito vengono esplicitati i vari siti di provenienza. Gli aggregati provengono dalle cave negli Appennini, ed è stata fornita una distanza media di 20 km; il bitume proviene da alcune raffinerie poste tra Mantova, Busalla e Ravenna e la distanza media da queste all'impianto è di 200 km. Il modificante, una volta prodotto viene trasportato dall'azienda situata a 175 km dall'impianto di produzione del conglomerato bituminoso. Per quanto riguarda la provenienza dell'SBS, è stato fatto riferimento alle maggiori aziende produttrici che sono cinesi e statunitensi. Il secondo trasporto, in verde, racchiude sia il trasporto del conglomerato bituminoso che dell'emulsione bituminosa al sito di stesura della pavimentazione. Tale distanza è stabilita dalla consueta pratica per il rifacimento del manto stradale, definita in funzione del vincolo di fluidità del conglomerato bituminoso al momento della posa. Il materiale deve arrivare con una temperatura non inferiore a 20°C in meno rispetto a quando è uscito dal sito di produzione; per questo il luogo di produzione è vicino al sito dove viene utilizzato (Green, 2018). Si è conteggiata così la distanza che il mezzo può percorrere senza abbassare ulteriormente la temperatura. Inoltre, viene utilizzato un camion cisterna per rifornire di carburante i mezzi d'opera direttamente al sito di posa. Il terzo trasporto, in azzurro nella tabella, riguarda il materiale rimosso. La distanza è analoga a quella ne-

Tabella 4 – Mezzi utilizzati per il trasporto dei materiali necessari alla produzione e distanza media percorsa per arrivare all'impianto di produzione

Trasporti considerati	Materiali	Mezzo di trasporto	Distanza percorsa (km)
Primo trasporto: materie prime all'impianto di produzione	Aggregati	Camion, Euro 4, capacità di carico da 16-32 t	20
	Bitume	Camion, Euro 4, capacità di carico da 16-32 t	200
	Modificante	Camion, Euro 4, capacità di carico da 16-32 t	175
	SBS	Camion, Euro 4, capacità di carico da 16-32 t	1500
Secondo trasporto: conglomerato bituminoso ed emulsione al sito di stesura	Conglomerato bituminoso	Camion, Euro 4, capacità di carico da 16-32 t	50
	Emulsione bituminosa	Camion, Euro 4, capacità di carico da 16-32 t	50
	Cisterna	Camion, Euro 4, capacità di carico da 3,5-7,5 t	50
Terzo trasporto: fresato al sito di produzione	Fresato	Camion, Euro 4, capacità di carico da 16-32 t	50

cessaria a compiere il tragitto nel senso inverso, quando il conglomerato deve essere portato al sito di stesura. Il materiale rimosso viene portato al sito di stoccaggio per essere lavorato attraverso un processo di vagliatura e frantumazione che richiede il consumo di energia elettrica: deve essere preparato per il riutilizzo in un nuovo conglomerato bituminoso per sostituire la strada demolita. La parte di materiale fresato che non viene riutilizzata, viene lasciata all'impianto di produzione dove sarà poi adibita ad altre funzioni come misti cementati o fondazioni.

2.2.3. Stesura

Il processo di stesura del conglomerato bituminoso e dell'emulsione bituminosa prevede alcuni passaggi con diversi macchinari. I mezzi coinvolti sono: la finitrice, il camion e il rullo compattatore. Tra uno strato e l'altro della pavimentazione viene messa l'emulsione bituminosa attraverso l'emulsionatrice, in modo da favorire la coesione. Sopra l'emulsione viene distribuito il conglomerato e compresso dal rullo compattatore. Quando si stende l'asfalto con il nuovo modificante è necessario distenderlo più volte, per questo motivo il rullo compattatore deve passare sulla pavimentazione più volte rispetto ad una pavimentazione convenzionale o formata con l'aggiunta di SBS e questo si traduce in una minore redditività del mezzo coinvolto.

In Tabella 5 vengono riportati i consumi e la produttività dei macchinari.

2.2.4. Demolizione

Al termine del periodo di vita utile della pavimentazione, avvengono le attività di rimozione che coinvolgono alcuni mezzi quali la fresatrice,

Tabella 5 – Potenza e produttività dei mezzi coinvolti nel processo di stesura

Mezzi	Potenza	Produttività	Consumo carburante
Finitrice	18-37 kW	140 t/h	21 l/h
Rullo compattatore per la pavimentazione convenzionale e con SBS	<18 kW	40m ³ /h	13,93 kg/h
Rullo compattatore per la pavimentazione con il modificante	<18 kW	31 m ³ /h	13,93 kg/h
Camion	< 18 kW	140 t/h	0,6 l/km
Emulsionatrice	-	0,025 km ² /h	8,5 l/h

Tabella 6 – Potenza e produttività dei mezzi coinvolti nel processo di demolizione

Mezzi	Potenza	Produttività	Consumo carburante
Fresatrice	75-130 kW	200 t/h	99,8 l/h
Camion	< 18 kW	140 t/h	0,6 l/km
Moto-spazzola	< 18 kW	0,0038 km ² /m	15 l/h

Tabella 7 – Valori per il processo di incenerimento

Energia	Quantità	Unità di misura
Potere calorifico medio dei rifiuti	10,95	MJ/kg
Potere calorifico plastica	35	MJ/kg
Energia elettrica	2,78	MJ/kg
Energia termica	4,06	MJ/kg

il camion e la moto-spazzola. Anche in questo caso l'azienda ha fornito i dati di produttività delle macchine, mentre i dati per le emissioni derivano dal database *Nonroad*. I valori di produttività e di consumo vengono riportati in Tabella 6. Il materiale fresato viene portato al sito di stoccaggio dove subisce un processo di trattamento in modo da essere pronto per l'aggiunta nel tamburo essiccatore.

2.2.5. Incenerimento

Il processo di incenerimento, presente solo nella pavimentazione convenzionale e con SBS, considera la generazione di energia elettrica e termica e le conseguenti emissioni in ambiente. I valori presi in esame derivano da dati sito-specifici per l'impianto A2A di Brescia pubblicati in un report (Fondra, 2016). È stato fatto riferimento a questo specifico impianto poiché è l'impianto convenzionato con l'azienda che raccoglie i rifiuti plastici per poi produrre il modificante. I dati per questo processo sono riportati in Tabella 7. La quantità di plastica considerata nel processo di incenerimento (14 t) è stata calcolata sulla base della quantità di materiale plastico che entra nel processo produttivo del modificante, considerando i rifacimenti dei diversi strati del manto stradale necessari in 20 anni.

2.2.6. Produzione del modificante

Il modificante, come si vede nella Figura 2, è formato da rifiuti plastici, PVB, grafene e attivante di adesione. Il processo produttivo del modificante prevede una selezione delle plastiche dure

e un trattamento del polivinilbutirale (PVB). Quest'ultimo è un rifiuto proveniente dal processo di recupero dei parabrezza e dei vetri laminati in generale, i quali sono rivestiti con un film sottile di PVB. Le plastiche dure provengono dai centri di raccolta e il loro destino è appunto l'incenerimento, ma grazie a questo nuovo modificante vengono riciclate; la loro selezione è fatta tramite flottazione, con ingresso di acqua nel ciclo produttivo. La maggior parte dell'acqua è trattata in un depuratore interno ed è riutilizzata. Le plastiche scartate durante la selezione sono inviate a recupero energetico. La grafite naturale viene lavorata con l'utilizzo dell'acido solforico e dell'acido nitrico, si forma così la grafite intercalata (questa viene prodotta da un'azienda statunitense). Per ottenere il grafene, la grafite viene sottoposta a diversi processi come l'espansione termica e l'esfoliazione in acqua assistita da ultrasuoni. Gli acidi quando vengono sottoposti ad un trattamento termico, permettono l'espansione e l'allontanamento dei diversi strati che compongono la grafite. Il grafene viene poi trasportato in un packaging di carta e plastica all'impianto di produzione del modificante. L'attivante di adesione permette di migliorare la coesione tra i componenti e in seguito tutti gli ingredienti sono uniti in modo da produrre il composto in granulato. Questi granuli vengono mes-

si in grandi borse di polipropilene (*Flexible Intermediate Bulk Container*) e trasportati all'impianto di produzione del conglomerato bituminoso, dove poi sarà inserito all'interno dello stesso. Il modificante in granuli viene inserito in una percentuale del 5% sul peso del bitume. I dati per produrre il conglomerato bituminoso con il modificante sono gli stessi della Tabella 2, dove però per il consumo di energia elettrica e di metano è stata stimata una domanda supplementare di 1100 kcal/t ogni 5°C in più, a causa della temperatura di produzione maggiore.

Per ogni materiale sono stati considerati i trasporti coinvolti. I dati per produrre il modificante sono dati riservati dell'azienda, coperti da brevetto industriale (Gipave, Ecopave 2020).

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati dei potenziali impatti ambientali riferiti all'unità funzionale vengono riportati in Figura 3. La soluzione migliore risulta essere il conglomerato con l'aggiunta del nuovo modificante, in quanto permette una durata di vita maggiore della pavimentazione e consente di ridurre gli interventi di manutenzione. Infatti, come riportato nella Tabella 1, la frequenza di manutenzione è diversa nelle tre tipologie di pavimentazione. Considerando complessivamente i 3 strati della stra-

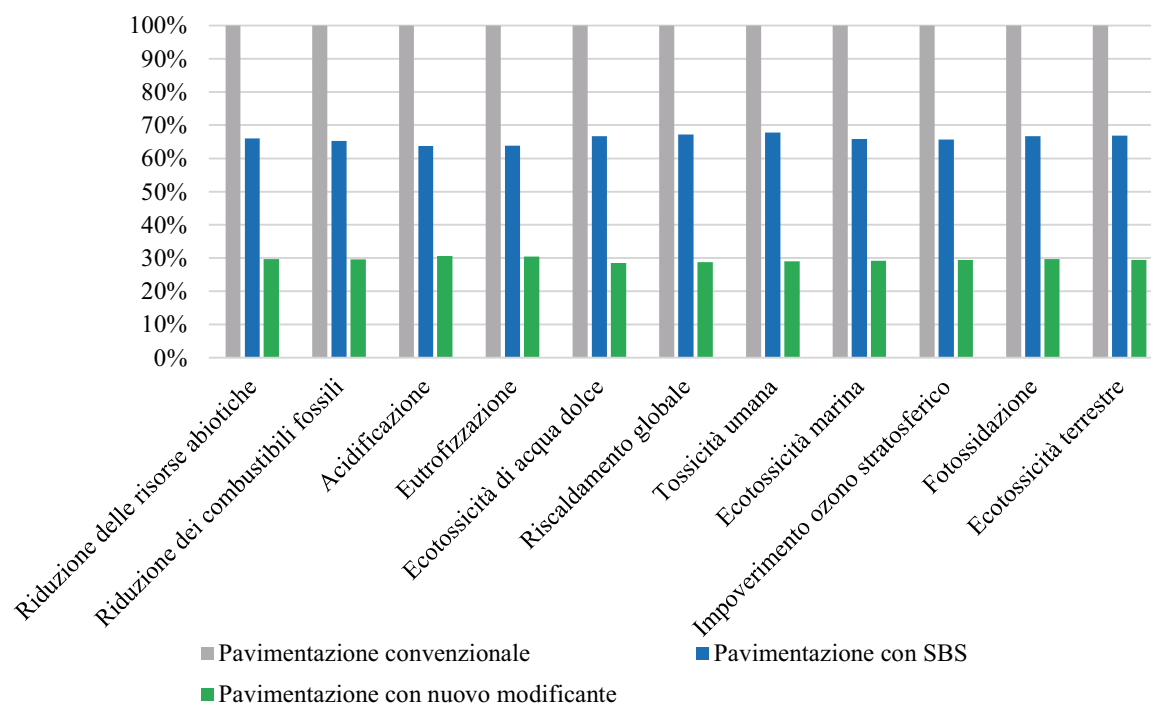


Figura 3 – Confronto dei potenziali impatti ambientali tra pavimentazione convenzionale, con SBS e con il nuovo modificante

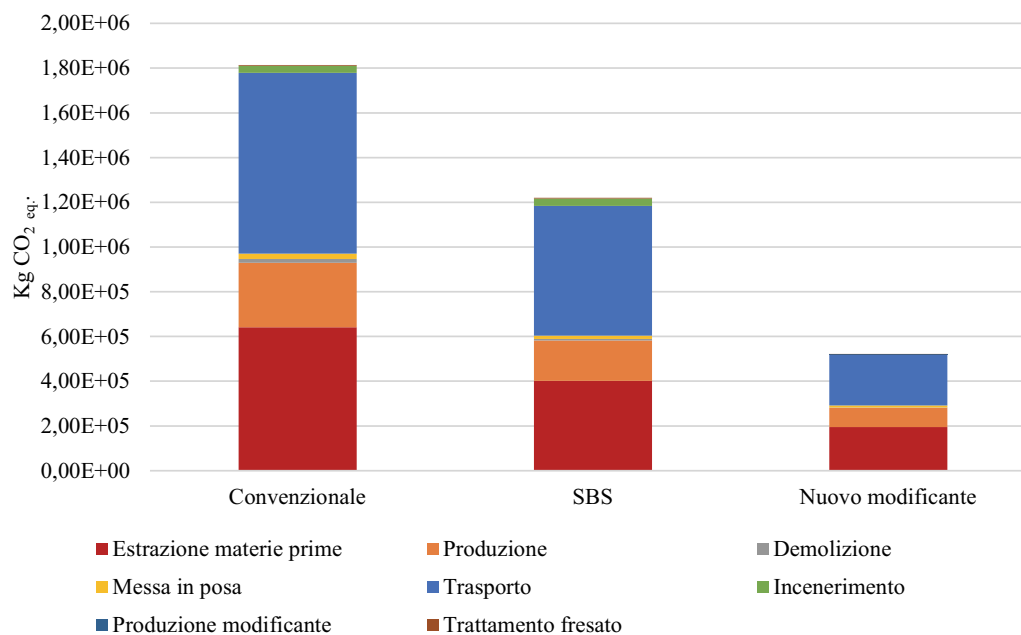


Figura 4 – Analisi dei contributi per ciascuna fase del ciclo di vita per la categoria del GWP(CML-2001)

da: usura, binder e base, il numero di interventi previsti in 20 anni per la pavimentazione convenzionale è 7, per quella con SBS è 6 e per quella con il nuovo modificante è 4. Il nuovo modificante consente alla pavimentazione di avere meno interventi manutentivi, di conseguenza si riducono tutte le attività coinvolte per la manutenzione della strada ed è necessario meno conglomerato bituminoso per la costruzione. Il modificante, infatti, permette alla pavimentazione innovativa di ridurre gli impatti ambientali del 70% in tutte le categorie considerate rispetto ad una pavimentazione convenzionale e del 40% rispetto alla pavimentazione formata dal conglomerato bituminoso con SBS.

Inoltre, al fine di identificare le fonti di impatto maggiore, la Figura 4 mostra il contributo di ogni fase del ciclo di vita delle pavimentazioni, per la categoria del riscaldamento globale. L'impatto del riscaldamento globale è espresso in chilogrammi di CO₂ equivalenti.

La fase più impattante per questa categoria di impatto risulta essere il trasporto con valori percentuali che si attestano rispettivamente del 45%, 48% e 44%. Il consumo di carburante dei mezzi di trasporto dipende dalla distanza percorsa; risulta minore nel nuovo modificante perché sono necessari meno tragitti per fornire al cantiere il materiale necessario.

Seguono poi le fasi di estrazione e di produzione del conglomerato bituminoso, le quali mostrano valori di emissioni che variano dal 15% al 37%.

Hanno un contributo molto alto, in termini di impatto ambientale, per la presenza di bitume, un derivato dal petrolio, il quale ha un elevato impatto durante la sua produzione. Le fasi che comprendono attività di manutenzione e trattamento del fresato hanno impatti non più alti del 2%. In tutte le fasi del ciclo di vita il nuovo modificante consente di ridurre le emissioni di CO₂ sia rispetto al sistema convenzionale che a quello con SBS.

L'utilizzo di materiali plastici riciclati in aggiunta a bitume e aggregati consente di avere un minor impatto ambientale perché permette di allungare la vita utile della pavimentazione e di conseguenza di ridurre la quantità di materiale necessario per la produzione del conglomerato bituminoso. Così facendo si riducono le emissioni legate alle fasi estrattive e produttive delle materie prime e questo rappresenta una strategia per promuovere un corretto uso delle risorse e dell'efficienza energetica.

4. CONCLUSIONI

Questo lavoro ha analizzato il ciclo di vita di differenti tipologie di pavimentazioni stradali in modo da valutare il diverso contributo in termini di impatti ambientali durante un periodo di analisi di 20 anni, al fine di individuare la soluzione migliore per ridurre il carico ambientale e favorire lo sviluppo di modelli di produzione innovativi nel settore stradale. Sono state considerate tutte le fasi del ciclo di vita delle pavimentazioni, dal-

l'estrazione delle materie prime fino al riutilizzo del materiale fresato. I risultati ottenuti da questa analisi LCA, mostrano che la pavimentazione contenente il nuovo modificante permette una riduzione degli impatti ambientali per tutte le categorie considerate. La formulazione di modificanti, contenenti materiali plastici riciclati (altrimenti destinati a termovalorizzazione) e materiali a base grafenica, contribuisce a ridurre gli impatti ambientali delle pavimentazioni stradali, in quanto allunga la vita utile del conglomerato bituminoso e questo consente nell'arco temporale di 20 anni (durata media di una strada) di ridurre i cicli manutentivi. Di conseguenza in questo tipo di pavimentazioni innovative sono necessarie meno materie prime per la loro realizzazione e la consueta manutenzione.

Considerando che, a livello nazionale, nel 2018 sono state prodotte 26 milioni di tonnellate di asfalto (Asphalt in figures, 2019) e che 3,6 milioni di tonnellate di rifiuti plastici sono state raccolte per essere trattate e di queste il 32,8% è destinato al recupero energetico (Plastic Europe, 2020), sarebbe interessante aumentare la percentuale di bitume additivato con questi materiali di rifiuto. In Italia la percentuale di bitume additivato rappresenta il 17% del totale: aumentare la quantità di conglomerato bituminoso contenente plastiche dure di natura poliolefinica andrebbe nella direzione di incentivare il riciclo dei materiali plastici. Destinare le plastiche poliolefiniche a questa filiera costituirebbe un forte potenziale, anche se, bisognerebbe quantificare nel dettaglio la frazione merceologica di queste plastiche disponibili.

La formulazione di modificante considerata in questo progetto consente di riciclare 14 tonnellate di rifiuti plastici; questo valore è stato ottenuto sulla base della quantità di materiale plastico che serve per produrre il modificante, considerando un arco temporale di 20 anni e i diversi rifacimenti del manto stradale. Per concludere si può affermare che la soluzione proposta dal progetto *Ecopave* risulta in linea con la promozione e l'applicazione di criteri di circolarità per le plastiche dure, per le quali l'immissione come materia prima seconda in un nuovo ciclo produttivo (additivo per conglomerati bituminosi), rappresenta un modello sostenibile di gestione del fine vita. Lo sviluppo di nuovi materiali e la loro applicazione in pavimentazioni stradali che hanno così ridotti impatti ambientali fornisce ai gestori e ai decisori uno strumento per garantire maggiore sostenibili-

tà al territorio, un esempio di efficienza nell'uso delle risorse e nella gestione dei rifiuti. Inoltre, questa applicazione permette di limitare il consumo di suolo (riduzione delle discariche) e di risorse naturali. Dall'analisi LCA effettuata, si evince che il modificante risponde positivamente ai requisiti di maggiore sostenibilità e circolarità, evidenziando una performance ambientale sensibilmente migliorativa rispetto alle tecnologie attualmente più diffuse per la realizzazione di pavimentazioni stradali.

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures (1993).
- Asphalt In Figures, 2019 EAPA – European Asphalt Pavement Association, https://096.wpcdnnode.com/eapa.org/wp-content/uploads/2020/12/Asphalt-in-figures_2019.pdf
- Aflaki S. e Tabatabaee N. (2008) Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran. *Construction and Building Materials* 23(6): 2141-2150.
- Akmal N. e Usmani A.M. (1999) Application of asphalt-containing materials *Polym News* 24,136-40.
- Araújo J.P.C., Oliveira J.R.M. e Silva H.M.R.D. (2014) The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D* 32(0): 97-110.
- Aurangzeb Q., Al-Qadi I.L., Ozer H. e Yang R. (2014) Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Resources Conservation and Recycling*. 83 (0): 77-86.
- Bloom E.F., Horstmeier G.J., Pakes Ahlman A., Edil T.B. e Whited G. (2017) Assessing the life cycle benefits of recycled material in road construction. In: *GeoChicago-Conference-Paper-I-94-and-Beltline-LCA*. Chicago.
- Butt A.A. (2014) Life Cycle Assessment of Asphalt Roads. KTH Architecture and built environment.
- Carpenter A.C., Gardner K.H., Fopiano J., Benson C.H. e Edil, T.B. (2007) Life cycle based risk assessment of recycled materials in roadway construction. *Waste Management* 27 (10):1458–1464.
- Cass D. e Mukherjee A. (2011) Calculation of greenhouse gas emissions for highway construction operations using a hybrid life cycle assessment approach: a case study for pavement operations. *Journal of Construction Engineering and Management* 137 (11), 1015-1025.
- Chiu C-T., Hsu T-H. e Yang W-F. (2008) Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. *Resources Conservation and Recycling*. 52 (3): 545-556.
- EAPA (European Asphalt Pavement Association), 2020. Asphalt In Figures. Disponibile su: *Asphalt in figures_2018.indd (eapa.org)* -
- Ecopave Procedimento per la produzione di un additivo per conglomerati bituminosi con prestazioni meccaniche ele-

- vate. Numero domanda Italia: 102019000006600. Data richiesta 07.05.2019. Stato: pendente.
- Ferreira V.J., Sáez-De-Guinoa Vilaplana A., García-Armingol T., Aranda-Usón A., Lausín-González C., López-Sabirón A.M. e Ferreira G. (2016) Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment. *Journal of Cleaner Production* 130 (1): 175-186.
- FHWA, 2011. Highway Statistics Series. Disponibile su: <http://www.fhwa.dot.gov>.
- Fondra G. (2016) Rapporto dell'osservatorio sul funzionamento del termoutilizzatore di Brescia relativo all'anno 2016. Comune di Brescia, settore sostenibilità ambientale e scienze naturali.
- Giani M.I., Dotelli G., Brandini N. e Zampori L. (2015) Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. 104, Part A, 224-238.
- Gipave, Composizione di additivo per conglomerati bituminosi con prestazioni meccaniche elevate. Numero domanda Italia: 102017000126622. Data richiesta 07.11.2017. Stato concesso. Data concessione: 24.01.2020.
- Green L. (2018) La produzione del conglomerato bituminoso. Disponibile su: <http://www.siteb.it/wp-content/uploads/2018/06/db11.pdf>
- Herranz-Loncán A. (2007) Infrastructure investment and Spanish economic growth, 1850-1935. *Explorations in Economic History* 44 (3): 452-468.
- Huang Y., Bird R. e Heidrich O. (2009). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production* 17(2): 283-296.
- Isacsson U. e Zeng H. (1998) Cracking of asphalt at low temperature as related to bitumen rheology. *Journal of Material Science* 33 (8): 2165-2170.
- ISO (2006a), ISO 14040 International Standard in: Environmental Management – Life Cycle Assessment-Principles and Framework.
- ISO (2006b), ISO 14044 International Standard, Environmental Management – Life Cycle Assessment- Requirements and Guidelines.
- ISPRA (2019) Trasporti. Disponibile su: https://www.isprambiente.gov.it/files/2020/pubblicazioni/stato-ambiente/annuario-2020/4_Trasporti_Finale_2019.pdf
- Kalantar Z.N. (2010) Properties of bituminous binder modified with waste polyethylene terephthalate presented at Malaysia Universities Transportation Research Forum and Conferences, December 21, 2010, University Tenaga Nasional.
- Knaap T. e Oosterhaven J. (2011) Measuring the welfare effects of infrastructure: A simple spatial equilibrium evaluation of Dutch railway proposals. *Research in Transportation Economics* 31 (1): 19-28.
- Nonroad database Disponibile su: Swiss Federal Office for the Environment (FOEN), 2019. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/air/state/non-road-datenbank.html>
- Pizza A., Metz R., Hassanzadeh M. e Bantignies J.-L. (2014) Life cycle assessment of nanocomposites made of thermally conductive graphite nanoplatelets. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19(6): 1226-1237.
- Plastics Europe, 2020 https://www.plasticseurope.org/download_file/force/4829/181
- Rietveld P. (1994) Spatial economic impacts of transport infrastructure supply. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 28 (4): 329-341.
- Santos J., Bressi S., Cerezo V. e Lo Presti D. (2019) A sustainability-based decision support system for road pavements. *Journal of Cleaner Production* 206(1): 524-540.
- Steger S. e Bleischwitz R. (2011) Drivers for the use of materials across countries. *Journal of Cleaner Production* 19 (8), 816-826.
- Sulyman M., Haponiuk J. e Formela K. (2016) Utilization of recycled polyethylene terephthalate pet in engineering materials: a review. *International Journal of Environmental Science and Development* 7 (2): 100-108.
- Uranga O.G. (2008) Rheological property of bitumen modified with polyethylene and polyethylene-based blends.
- Wang H., Thakkar C., Chen X. e Murrell S. (2016) Life-cycle assessment of airport pavement design alternatives for energy and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production* 133,163-171.
- Yvonne B. e Yajaira M.P.M. (2001) Polymer modified asphalt *Vision Tecnologica* 9(1):39-48.
- Zheng X., Easa S.M., Yang Z., Ji T. e Jiang Z. (2019). Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: methodology and case study. *Journal of Cleaner Production* 213, 659-672.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il progetto *Ecopave* POR-FESR 2014-2020 finanziato da Regione Lombardia sulla call accordi per la ricerca e l'innovazione, le aziende Iterchimica S.r.l., G.ECO S.r.l. e Directa Plus S.p.a. per la collaborazione nel fornire i dati necessari per lo svolgimento dello studio. Ringraziamo anche la Dott. Francesca Rosa e il Dott. Massimo Perucca per la raccolta e l'analisi dei dati.

Il lavoro descritto nell'articolo è stato presentato durante la quinta edizione della Giornata di studio "Rifiuti e Life Cycle Thinking" tenutasi online il 9 marzo 2021 e organizzata e coordinata dal gruppo di ricerca "AWARE" (Assessment on Waste and Resources) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano in collaborazione con il Gruppo di Lavoro "Gestione e Trattamento dei Rifiuti" dell'Associazione Rete Italiana LCA.

RIFIUTI: RICICLARLI O EVITARLI? RISPOSTE DAGLI STUDI DI ANALISI DEL CICLO DI VITA

Anna Mazzi

Università degli studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, SAM.lab

Sommario – Evitare che un rifiuto venga prodotto determina benefici ambientali di gran lunga superiori a qualsiasi altra opzione di gestione, ivi incluso il riciclo. Tuttavia, le iniziative volte a prevenire i rifiuti a monte sono ancora poco diffuse: tra le imprese e le comunità locali prevale la scelta di soluzioni “end-of-pipe”, che a loro volta comportano impatti ambientali non trascurabili. L’Unione Europea spinge a favore di misure preventive a monte, ma parallelamente il modello di economia circolare sembra focalizzarsi più sul recupero di beni, materiali ed energia. L’approccio di ciclo di vita ci insegna che le misure di prevenzione dei rifiuti possono essere implementate in più fasi della vita dei prodotti. Negli ultimi vent’anni, molti studi di analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA) hanno contribuito a comprendere il profilo ambientale associato ai prodotti e ai loro scenari di fine vita. La ricerca di tipo esplorativo presentata in questo articolo intende verificare se la comunità scientifica, nel recente affermarsi dell’economia circolare, ha utilizzato lo strumento LCA per quantificare i contributi di impatto ambientale associati alle diverse opzioni di riduzione dei rifiuti, e in particolare alle misure di prevenzione. I risultati confermano che è molto più frequente studiare le fasi finali della vita dei prodotti, ovvero il trattamento finale e il riciclo dei rifiuti. Sono ancora pochi i casi studio che includono nell’analisi di ciclo di vita le fasi preliminari ovvero attività di prevenzione dei rifiuti. Dalla ricerca emerge un’urgente sfida per gli esperti di LCA nella gestione dei rifiuti: va posta attenzione su tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto, senza trascurare le fasi preliminari di progettazione e produzione, in cui è maggiore il contributo di prevenzione dei rifiuti, per consegnare ai decisori politici e al mercato informazioni consistenti sulla convenienza ambientale insita nell’evitare di ideare rifiuti.

Parole chiave: economia circolare, approccio di ciclo vita, prevenzione del rifiuto, riduzione del rifiuto, riciclo dei rifiuti.

WASTE: RECYCLING OR AVOIDING? ANSWERS FROM LIFE CYCLE ASSESSMENT STUDIES

Abstract – Avoiding waste production brings far greater environmental benefits than any other management option, including recycling. However, the implementation of prevention activities is hesitant: among companies and local authorities the choice of “end-of-pipe” actions prevails, although not leading to overall environmental improvement. Giving priority to waste prevention seems a distant goal: among the critical factors to achieve the target “waste avoid”,

there is the lack of information and data related to the environmental convenience of prevention. Understanding real benefits related to waste prevention is essential to effectively support the change towards a circular economy. Coherently with the Life Cycle Thinking approach, waste reduction measures can be implemented in several steps of products’ life cycle, including design, production, distribution, use, dismission, recovery and recycling, and finally energy recovery. Along the life cycle of waste, the early stages make it possible to prevent the waste, while the latter stages give new life to waste. In the last two decades, numerous Life Cycle Assessment studies have clarified the environmental profile associated with products and their end-of-life scenarios; however, the scientific community still seems more interested in exploiting recycling options than in demonstrating the convenience of prevention. The paper addresses the dilemma between waste prevention and recycling through a life cycle approach, in order to answer the following research question: is it possible to quantify environmental preferability among recycling materials derived by waste and avoid waste production? Due to the explorative nature of the research, a focused literature review is conducted to analyse recent pieces of evidence obtained by scientists on this question. To obtain robust results, a standardized methodology is adopted, including screening, cleaning and analysis of international papers. Starting from 300 papers screened, 225 are selected by cleaning and then analysed, in terms of life cycle stages included in goal and scope of LCA study. Results demonstrate that the main solutions of waste reduction analysed by scientific papers are recycling and final treatment, that generally includes waste recovery and preparation to recycling. Other life cycle stages more properly representing prevention solutions, are rarely considered in LCA studies: for example, design and production are generally included in LCA studies focused on recycling processes and/or recycled products. Finally, the steps of distribution, use and maintenance of products are almost never considered in LCA studies. In conclusion, this explorative research underlines the necessity by the scientific community to better implement LCA methodology, not only to demonstrate the convenience of recycling or energy recovery, but especially to quantify environmental issues associated to waste prevention, like design, production and use of products. From research conclusions further research questions are delineated for future research.

Keywords: circular economy, life cycle approach, waste prevention, waste reduction, waste recycling.

* Per contatti: Via Marzolo n. 9, Padova. Tel. 0498271611. Email: anna.mazzi@unipd.it

Ricevuto il 15-3-2021. Modifiche sostanziali richieste il 21-5-2021. Accettazione il 30-6-2021.

1. INTRODUZIONE

La gestione dei rifiuti si è storicamente focalizzata sull'adozione di tecnologie e sistemi volti a eliminare i rifiuti evitando la dispersione di inquinanti nell'ambiente. La prospettiva più recente dell'economia circolare va a ridefinire i contorni di tale gestione, in virtù di un nuovo approccio che trasforma i residui in potenziale fonte di ricchezza per i cicli produttivi successivi: quello che prima era rifiuto, ora può diventare risorsa, con caratteristiche ben definite e con un vero e proprio valore di mercato (Korhonen et al., 2018).

Le direttive europee in materia di gestione dei rifiuti spingono da tempo verso l'obiettivo di riduzione e indicano come opzione preferibile la prevenzione (Parlamento e Consiglio Europeo, 2008): evitare che un rifiuto venga prodotto permette di conseguire benefici ambientali superiori rispetto a qualsiasi altra opzione di gestione, ivi incluso il riciclo (Matsuda et al., 2018). Pertanto, nelle politiche locali, i maggiori sforzi dovrebbero essere rivolti a prevenire la produzione di rifiuti, onde evitare attività di raccolta, trasporto, selezione e lavorazione che comportano consumi di energia e risorse e che producono emissioni: questo richiede una pianificazione integrata in grado di coinvolgere tutti gli attori della filiera, dalla progettazione alla produzione al consumo (Johansson e Corvellec, 2018).

Tuttavia, l'implementazione di iniziative di prevenzione sembra ancora esitante: tra le imprese e le comunità locali prevale la scelta di soluzioni "end-of-pipe" che non sempre portano ad una riduzione effettiva degli impatti ambientali complessivi. Ne è un esempio il settore del packaging, in cui ad oggi non sono ancora messe in atto misure concrete di prevenzione dei rifiuti, come invece raccomandano gli indirizzi comunitari (Steinhorst e Beyerl, 2021).

Inoltre, qualsiasi investimento a favore di una riduzione dei rifiuti fatto dalle imprese ottiene un beneficio effettivo se gli utilizzatori di quei beni rispettano le indicazioni d'uso date dal produttore: purtroppo, la discrepanza tra il potenziale di riduzione dei rifiuti e l'effettiva percezione del mercato rappresenta un ostacolo alla prevenzione (Matsuda et al., 2018). Di contro, può essere lo stesso mercato a stimolare le imprese verso scelte circolari e innovative: ad esempio, la consapevolezza delle conseguenze associate agli impatti ambientali dei rifiuti prodotti può condizionare i comportamenti dei cittadini e contribuire ad una riduzione

nella generazione dei rifiuti mediante scelte di consumo responsabili (Corsini et al., 2018).

Per realizzare concretamente interventi a favore dell'economia circolare servono indicazioni e linee guida, onde evitare di adottare iniziative che nel loro complesso risultino ambientalmente poco convenienti. Tuttavia, sono ancora pochi i casi studio che testimoniano iniziative di prevenzione dei rifiuti a livello di gestione locale integrata (Hutner et al., 2017).

Privilegiare la prevenzione nell'economia circolare appare dunque un obiettivo molto sfidante, la cui attuazione è rallentata da alcuni fattori critici, tra cui carenze normative, mancanza di dati e informazioni, assenza di cooperazione tra attori economici sul territorio (Salmenperä et al., 2021). Per sostenere in modo efficace il cambiamento insito nella visione di economia circolare, è essenziale mettere in evidenza quali sono i reali vantaggi associati alla riduzione dei rifiuti.

Emerge quindi l'importanza di disporre di dati e metodi di valutazione che, in modo sostanziale e non superficiale, quantifichino la convenienza economica e ambientale della prevenzione, rispetto alle altre alternative di riduzione quali riuso, recupero e riciclo, in modo da orientare il mercato verso alternative a minore impatto complessivo (Christensen et al., 2020). Il Life Cycle Thinking (LCT) può contribuire in modo efficace alla comprensione di questi aspetti: negli ultimi vent'anni, infatti, gli innumerevoli studi di ciclo di vita hanno chiarito le responsabilità ambientali associate ai prodotti e agli scenari di fine vita. Utilizzando la metodologia dell'analisi del ciclo di vita, o Life Cycle Assessment (LCA), prodotti e materiali sono osservati in modo dinamico, considerando le fasi di ideazione, lavorazione, utilizzo e dismissione (Mazzi, 2020): seguendo lo stesso approccio, anche le modalità di intervento per ridurre i rifiuti possono essere implementate in più fasi della vita dei prodotti, portando a vantaggi ambientali complessivi che includono sia misure di prevenzione che di riciclo (Gentil et al., 2011; Christensen et al., 2020).

L'articolo affronta il dilemma tra prevenzione e riciclo dei rifiuti, già più volte al centro del dibattito internazionale, dapprima svolgendo una riflessione sugli indirizzi europei in materia di gestione dei rifiuti, e successivamente osservando le esperienze della comunità scientifica nel quantificare gli impatti ambientali associati alla prevenzione e al riciclo. L'obiettivo è dare risposta al seguente quesito di ricerca: è possibile quantificare la pre-

ferenza ambientale tra riciclare materiali provenienti da rifiuto o evitare di produrre rifiuti?

Nella prima parte della ricerca, presentata nel capitolo 2, si riflette sui due modelli di riferimento, gerarchia dei rifiuti da una parte ed economia circolare dall'altra, allo scopo di verificarne la congruenza reciproca. Nella seconda parte, presentata nel capitolo 3, si analizza la più recente letteratura scientifica relativa agli studi di LCA nella gestione dei rifiuti, allo scopo di conoscere quali sono le fasi del ciclo di vita maggiormente indagate e le misure di riduzione dei rifiuti più frequentemente osservate. L'articolo si conclude, nel capitolo 4, con una sintesi dei risultati ottenuti rispetto al quesito di ricerca, sottolineando anche i limiti dell'indagine e individuando nuove prospettive di ricerca.

2. LE ORIGINI DEL DILEMMA

2.1. La gestione dei rifiuti tra gerarchia e circolarità

La gestione dei rifiuti si concentra convenzionalmente su prodotti che hanno raggiunto la fine del proprio ciclo vita. Tuttavia, sono le fasi a monte e a valle che rappresentano l'obiettivo prioritario se si intende realmente risolvere il problema.

La direttiva europea 98/2008/CE (Parlamento e Consiglio Europeo, 2008) ha introdotto una nuova gerarchia dei rifiuti e in essa la prevenzione è stata definita come l'alternativa migliore, pertanto dovrebbe essere adottata come prima opzione nelle politiche locali: essa include la riduzione dei rifiuti sia in termini di quantità che in termini di pericolosità, consentendo una progressiva riduzione sia del consumo delle risorse sia degli impatti dovuti al trattamento dei rifiuti.

Un elemento essenziale e strettamente interconnesso con il principio di prevenzione è il concetto stesso di rifiuto, che in un più ampio quadro legislativo europeo ha assunto oggi un significato rivoluzionario. La nozione di rifiuto comprende qualsiasi sostanza od oggetto di cui il produttore o il detentore si disfi senza che la dismissione avvenga attraverso lo smaltimento o il recupero e senza riguardo di un eventuale riutilizzo (D.Lgs 152/2006). Una più estesa interpretazione terminologica accoglie una nozione di rifiuto fondata su risultanze oggettive ed alla quale devono essere ricondotti sostanze od oggetti non più idonei a soddisfare i bisogni cui essi erano originariamente destinati, pur se non ancora privi di valore economico (Maglia, 2019).

Gli orientamenti giurisprudenziali della Corte di giustizia europea e le indicazioni della Direzione Generale Ambiente dell'Unione Europea hanno fornito precisazioni essenziali per applicare correttamente il concetto di rifiuto e perseguirne la gestione ottimale. Tra le altre, viene declinato il termine "disposal" ovvero "disfarsi" (Commissione Europea, 2012):

- il termine "disfarsi" deve intendersi riferito sia alle attività di recupero che a quelle di smaltimento;
- il "disfarsi" può implicare un valore commerciale positivo, neutrale o negativo;
- il "disfarsi" può riguardare una condotta intenzionale del produttore/detentore, ovvero un comportamento involontario o addirittura accidentale;
- il luogo fisico in cui sono collocati i materiali non influenza in alcun modo la circostanza che gli stessi assumano o meno la qualifica di rifiuti.

Secondo le indicazioni dell'Unione Europea, tutti i Paesi membri hanno il compito di indirizzare il mercato verso forme che favoriscano la prevenzione, mettendo in atto le misure previste con azioni tra loro coordinate e complementari. Le principali misure di prevenzione sono raggruppabili in 3 categorie (Bartl, 2011):

- misure che puntano ad *evitare* la produzione di rifiuti, riducendo i rifiuti in volume, peso e tipologia;
- misure volte a *migliorare* la qualità dei rifiuti riducendo il contenuto di sostanze pericolose in materiali e prodotti;
- misure atte a *ridurre* gli impatti negativi sulla salute umana generati dai rifiuti.

In questo scenario si inserisce il nuovo paradigma dell'economia circolare, che ha l'obiettivo di ridurre la quantità di rifiuti intesi come tali e di evitare il consumo di nuove risorse, regolamentando il rientro nella catena del valore economico di prodotti e materiali che hanno terminato la loro vita utile e che possono essere riutilizzati o riciclati. L'economia circolare, nello specifico, si propone di intervenire nel più generale obiettivo di riduzione dei rifiuti con azioni che, pur ripercorrendo le 3 misure di prevenzione suddette, si concentrano su recupero, riuso e riciclo (Commissione Europea, 2015):

- il *recupero* include tutte le operazioni che consentono la raccolta di materiali e prodotti a fine vita per finalizzarli a nuovi utilizzi, simili o differenti da quelli per cui sono stati concepiti per la prima volta;
- il *riuso* indica qualsiasi operazione mediante la quale prodotti o componenti già utilizzati ven-

gono riutilizzati prima di diventare rifiuti, con lo stesso scopo per cui sono stati concepiti per la prima volta;

- il *riciclo* indica le attività di trasformazione di materiali e prodotti di scarto, che già sono giunti allo stato di rifiuto al fine di dare loro una seconda vita, realizzando materiali o prodotti per applicazioni anche differenti da quelle precedenti.

Per sostenere la transizione dell'Europa verso un'economia circolare, è stato adottato un piano d'azione con numerose attività volte a "chiudere il cerchio" del ciclo di vita dei prodotti, spingendo in particolare su riciclo e mercato delle materie prime seconde (Commissione Europea, 2020).

La Figura 1 mette in evidenza la relazione tra le priorità della gerarchia dei rifiuti (a sinistra) e le opzioni dell'economia circolare (a destra). Dal confronto dei due grafici, appare chiaro dove ha origine il dilemma "riciclare o evitare i rifiuti": sebbene il punto di partenza sia la necessità di ridurre i rifiuti alla fonte, come stabilito dalla direttiva europea 98/2008/CE, nella visione dell'economia circolare l'obiettivo sembra diventare quello della massimizzazione del recupero di materiali ed energia attraverso il riciclo, con nuove opzioni tecniche e tecnologiche focalizzate sulla "chiusura del cerchio". In questa prospettiva circolare, la prevenzione sembra perdere il suo potenziale privilegio e le scelte volte ad evitare i rifiuti sembrano non essere più al centro dell'attenzione, mentre è l'opzione di riciclo ad assumere un ruolo essenziale. Questo cambio di rotta dall'approccio gerarchico

all'approccio circolare può mettere in discussione la rilevanza stessa della prevenzione, se il focus dell'economia circolare è il "ritorno in circolo" di materiali e risorse, piuttosto che una minore generazione di rifiuti.

Le iniziative a sostegno del riciclo hanno certamente lo scopo di introdurre un cambiamento nel sistema economico; tuttavia, questo *modus operandi* rischia di essere poco consistente e quindi poco efficace se utilizzato in modo esclusivo, perché non consente una riduzione effettiva nel lungo termine del consumo di risorse e della produzione dei rifiuti (Reike, Vermeulen e Witjes, 2018). Se ci si focalizza sul fine vita dei beni, si corre il rischio di vedere il rifiuto come un valore aggiunto, e conseguentemente di considerare la sua produzione come qualcosa di positivo perché alimenta il mercato del riciclo. La comunità scientifica ha un ruolo chiave nell'indirizzare correttamente le iniziative di economia circolare, mettendo in evidenza quali sono le opzioni che, più di altre, consentono una effettiva riduzione degli impatti ambientali, avendo una visione completa ed evitando di trasferire o amplificare i carichi ambientali da una fase all'altra nella gestione di prodotti, rifiuti e materie prime seconde.

Per evitare, quindi, che la chiusura del cerchio porti a risultati opposti a quelli sperati, ovvero comporti un aumento dell'impatto ambientale complessivo anziché ottenerne una riduzione, serve adottare un punto di vista diverso, esterno alle singole fasi, orientato all'intero ciclo di vita, ed esteso "dalla culla alla culla" (Rigamonti et al., 2013).

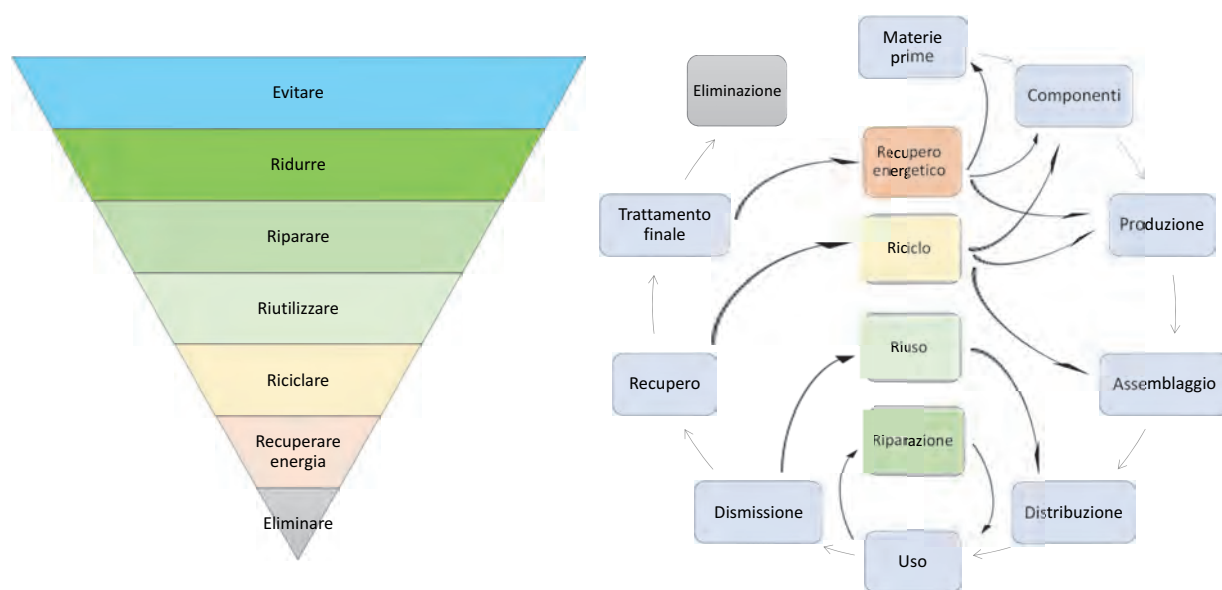


Figura 1 – Le opzioni di prevenzione e riciclo nella gerarchia dei rifiuti e nell'economia circolare

2.2. La gestione dei rifiuti tra precauzione e sostenibilità

Una delle caratteristiche distintive dei rifiuti è che essi creano problemi sia quando “nascono” che quando “muoiono”: una parte significativa dell’economia odierna ruota attorno ai rifiuti, e i prodotti attualmente consumati daranno vita a molti rifiuti nuovi per composizione e caratteristiche (Butti, 2012). Per governare questo delicato ambito, a livello europeo sono state definite regole comuni che disciplinano la materia da due prospettive: da una parte i rifiuti devono essere il più possibile indirizzati a operazioni di recupero e riciclo, e al contempo nel passaggio da rifiuti a materia prima seconda devono rispettare criteri di sicurezza e salute nel loro uso futuro (Ewijk e Stegemann, 2020).

Il quadro entro cui si muove l’economia circolare è quello dello sviluppo sostenibile, in cui la crescita economica non può essere perseguita da sola, ma va combinata con la protezione degli ecosistemi e con lo sviluppo socioculturale degli individui. Lo sviluppo sostenibile rappresenta un nuovo paradigma, rivoluzionario, sia per le conoscenze scientifiche che per le misure di politica internazionale. Per indirizzare i governi di tutto il mondo verso lo sviluppo sostenibile, le Nazioni Unite hanno formalizzato obiettivi specifici: i 17 Sustainable Development Goals (SDGs) (UN, 2015). Una gestione sostenibile dei rifiuti favorisce l’innovazione tecnologica e il miglioramento della salute di uomo e ambiente, pertanto va pienamente nella direzione degli SDGs (Hannan et al., 2020). Uno dei pilastri fondamentali dello sviluppo sostenibile e dell’economia circolare rimane quindi il principio di precauzione. Ridurre la quantità di rifiuti a favore di innovativi sistemi di riciclo ed emergenti economie della materia prima seconda deve sottostare ad attente valutazioni di convenienza nell’ottica di evitare l’insorgenza di nuovi rischi per l’ambiente e la salute umana (Commissione Europea, 2019). La comunità scientifica internazionale si sta spendendo in svariati settori e con le più diverse tecniche e tecnologie per valutare i rischi potenziali associati al riciclo di materiali e sostanze, al fine di comprendere quali nuovi rischi possono derivare dai processi di recupero, trasformazione, uso e dismissione dei materiali che vengono riciclati dando origine a nuovi materiali e prodotti (JRC, 2020). Dal punto di vista delle imprese e del mercato, questo può rappresentare un appesantimento delle procedure e un ostacolo per l’economia circolare (Fabris e Mazzi, 2018). Rimane tuttavia in-

discutibile il fatto che la precauzione debba essere prioritaria rispetto ad altri principi, laddove le conoscenze scientifiche sono in continua evoluzione e i rischi potenziali connessi in particolare alla salute umana sono per la maggior parte ancora inesplorati, non foss’altro che per la temporalità con cui si manifestano gli effetti (Espinoza et al., 2021).

3. GLI STUDI DI LCA NELLA GESTIONE DEI RIFIUTI: IL DILEMMA RIMANE

3.1 L’approccio life cycle applicato alla gestione dei rifiuti

Le valutazioni condotte per comprendere l’impatto ambientale dei rifiuti in fase di gestione sono senz’altro utili per quantificare i vantaggi dei diversi scenari, in particolare il riciclo e il recupero termico. Tuttavia, è l’ottica “comprehensive” del LCT che consente di operare un attento confronto tra le diverse opzioni e capire se e quando i vantaggi potenziali di ciascuna opzione sono realisticamente raggiungibili rispetto alle difficoltà tecniche, economiche o comportamentali da risolvere per ottenerli (Bimpizas-Pinis et al., 2021). Ogni alternativa di gestione, infatti, comporta inevitabilmente un impegno, e al contempo determina un impatto ambientale; di conseguenza, per ottenere il massimo beneficio dalla prevenzione dei rifiuti è importante conoscere quali sono gli impatti ambientali associati alle diverse alternative di prevenzione tecnicamente ed economicamente perseguibili, in una sorta di bilanciamento tra vantaggi e criticità (Laurent et al., 2014, Bisinella et al., 2017).

La concezione “classica” di gestione dei rifiuti riguarda esclusivamente la fase di fine vita dei prodotti e dei materiali, che rappresentano in senso stretto i rifiuti. Diversamente, la metodologia LCA osserva un prodotto in modo dinamico, considerando tutte le fasi che sono incluse nella sua “vita”, da quando esso viene ideato, a quando vengono realizzati i suoi componenti, a quando viene utilizzato e poi infine dismesso, diventando rifiuto (Mazzi, 2020). Pertanto, con questa metodologia, si riescono ad includere tutte le azioni strategiche ed operative dedicate alle fasi del ciclo di vita dei prodotti, anche prima di divenire rifiuti (Bartl, 2011).

Grazie alla copiosa letteratura scientifica inerente il LCT e la LCA nell’ambito della gestione dei rifiuti, è possibile tracciare gli step principali del ciclo di vita dei rifiuti, “dalla culla alla tomba”, come rappresenta la Figura 2. Riprendendo le indica-



Figura 2 – Le fasi del ciclo di vita dei rifiuti con approccio “dalla culla alla tomba”

zioni della normativa europea in merito alla gerarchia dei rifiuti e all’economia circolare (Figura 1), è possibile mettere in evidenza il ruolo di ciascuna fase del ciclo di vita dei rifiuti (Figura 2) rispetto alle possibili azioni di prevenzione: le misure di prevenzione, come evitare, ridurre e riparare, sono praticabili in particolare nella prima parte della vita dei rifiuti, mentre nella seconda parte le azioni di gestione sono più tipicamente quelle dell’economia circolare, ovvero e riutilizzare, riciclare e infine recuperare energia.

3.2. La prevenzione dei rifiuti nella letteratura scientifica più recente

Quanto delineato in Figura 2 dimostra che iniziative di prevenzione sono effettivamente possibili e praticabili se messe in atto fin dalle prime fasi della vita dei rifiuti, ovvero nella vita dei beni destinati a diventare rifiuti. Rimane da comprendere quali di queste hanno un minore impatto ambientale complessivo, e quali rischiano di trasferire carichi ambientali ad altre fasi o altre attività, o addirittura portano ad un aumento complessivo degli impatti. Una risposta a questa domanda si dovrebbe ottenere dalla letteratura scientifica che utilizza la metodologia LCA per individuare le opzioni di gestione dei rifiuti con minore impatto ambientale.

Negli ultimi vent’anni, si sono moltiplicati gli studi di LCA per la quantificazione degli impatti ambientali associati alle modalità di gestione dei rifiuti. In virtù del rigore metodologico della metodologia LCA e all’ormai navigata esperienza nell’utilizzare questo strumento in ambito di gestione

Tabella 1 – Modalità di lavoro per condurre l’analisi bibliografica “LCA-waste”

Step di ricerca	Obiettivi	Criteri e strumenti
Ricerca preliminare	Cercare articoli pubblicati recentemente inerenti studi LCA nella gestione dei rifiuti	Banca dati: Google Scholar® Parole chiave: “LCA” e “waste” Periodo di pubblicazione: 2020-2021
Selezione	Selezionare gli articoli con valore scientifico e in lingua inglese	Tipo di documento: pubblicazione scientifica in lingua inglese soggetta a peer review
Analisi approfondita	Approfondire gli articoli selezionati per verificare quali fasi del ciclo vita dei rifiuti sono state incluse nella valutazione	Fasi del ciclo vita dei rifiuti incluse nello studio LCA: tutte le fasi di Figura 2

dei rifiuti, è logico attendersi dalla letteratura scientifica risposte chiare e risolutive rispetto al dilemma fin qui delineato.

È questo il punto di partenza che ha mosso all’analisi bibliografica, con l’obiettivo di comprendere se e come la metodologia LCA può guidare nel comprendere quali sono le soluzioni preferibili di gestione dei rifiuti, ed in particolare quanto la prevenzione è preferibile rispetto al riciclo e al recupero energetico.

Data la natura esplorativa dell’indagine, si è deciso di estendere la ricerca a tutti gli articoli che utilizzano la metodologia LCA per trattare la tematica della gestione dei rifiuti e di limitare la ricerca ai papers internazionali pubblicati più recentemente. Per ottenere informazioni robuste e consistenti, l’analisi di letteratura è stata condotta seguendo 3 step: ricerca preliminare, selezione e analisi approfondita (Luederitz et al., 2016; Mazzi et al., 2016). Per ciascuno step sono stati utilizzati criteri di ricerca coerenti con l’obiettivo e l’ambito dell’indagine; per analizzare i risultati sono state considerate le fasi del ciclo di vita dei rifiuti rappresentate in Figura 2.

In Tabella 1 sono riportati gli step della ricerca e i criteri utilizzati.

La ricerca preliminare, condotta nel mese di dicembre 2020, ha portato ad individuare oltre 300 contributi scientifici. Lo step di selezione ha permesso di escludere un centinaio di documenti perché non rispondenti ai criteri stabiliti. La lista finale degli articoli di interesse per la ricerca comprende 225 articoli, che rappresentano pertanto l’insieme della letteratura scientifica su cui condurre l’analisi

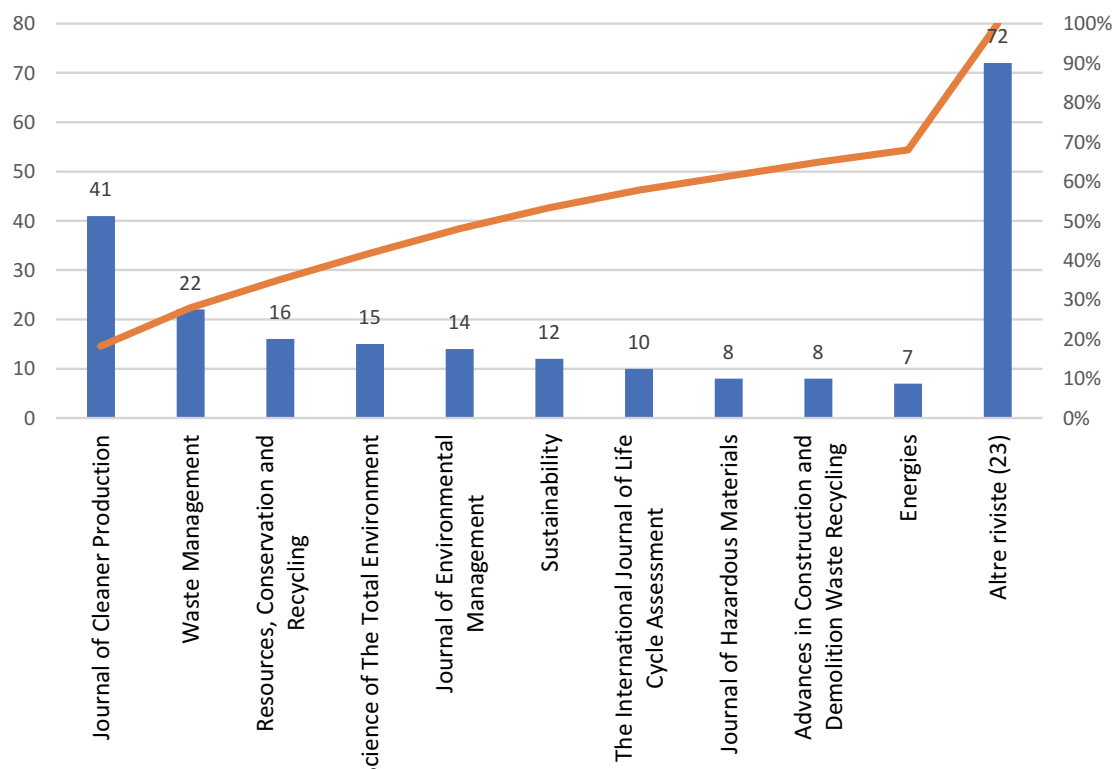


Figura 3 – Articoli scientifici pubblicati nel 2020-2021 inerenti LCA e gestione dei rifiuti: numerosità per rivista e percentuale cumulativa

si approfondita: a tale insieme si riferiscono i risultati che seguono.

In Figura 3 è riportata la distribuzione dei 225 articoli rispetto alle riviste di pubblicazione, sia come numero assoluto (colonne, con asse a sinistra) sia come percentuale cumulativa rispetto al totale degli articoli considerati nell'analisi (linea, con asse a destra). In generale, la numerosità di riviste che nell'ultimo biennio ha pubblicato articoli inerenti all'analisi di impatto ambientale nella gestione dei rifiuti (complessivamente 33 riviste) testimonia la rilevanza dell'argomento e la sua attualità.

Dal grafico di Figura 3 emerge inoltre che le prime 6 riviste hanno pubblicato più del 50% degli articoli selezionati. La tematica è di interesse sia per riviste che più propriamente si occupano di gestione dei rifiuti, come Waste Management, sia per riviste più indirizzate alla gestione sostenibile delle risorse e al riciclo, come Resources, Conservation and Recycling, sia a riviste dedicate alla gestione degli impatti ambientali in attività di processo, come Journal of Cleaner Production.

L'analisi degli articoli selezionati ha permesso di verificare quali fasi del ciclo vita dei rifiuti sono state considerate in ogni studio di LCA inerente la gestione dei rifiuti. Il conteggio finale ha portato ai risultati di Figura 4, dove sono indicati, in valore percentuale sul totale di 225, gli articoli che han-

no incluso ciascuna fase del ciclo di vita del prodotto/rifiuto. Nel grafico le fasi del ciclo di vita che consentono di evitare la produzione di rifiuto sono rappresentate in verde, mentre le fasi che comportano una gestione del rifiuto dopo che è stato generato sono rappresentate in giallo.

Osservando la distribuzione delle pubblicazioni in Figura 4, appare evidente che la letteratura più recente si è particolarmente dedicata a studiare gli impatti ambientali associati alle fasi finali del ciclo vita dei rifiuti, mentre le prime fasi del ciclo vita sono raramente considerate. Complessivamente, solamente il 29,4% degli articoli pubblicati nel 2020-2021 include le fasi preliminari nello studio di LCA, mentre il 70,4% degli articoli considera nell'ambito di indagine le fasi finali del ciclo di vita dei rifiuti.

L'interesse degli studi LCA è particolarmente elevato per il trattamento con recupero energetico e per il riciclo. Molti autori si dedicano ad analizzare gli impatti ambientali relativi ad impianti di trattamento dei rifiuti, sia termovalorizzatori che discariche (l'85% degli articoli include la fase di trattamento); numerosi studi sono di Paesi extraeuropei e testimoniano l'attenzione ancora forte degli scienziati nel ricercare soluzioni tecnologiche di trattamento finale che minimizzino gli impatti ambientali. Si moltiplicano negli ultimi anni gli studi dedicati a

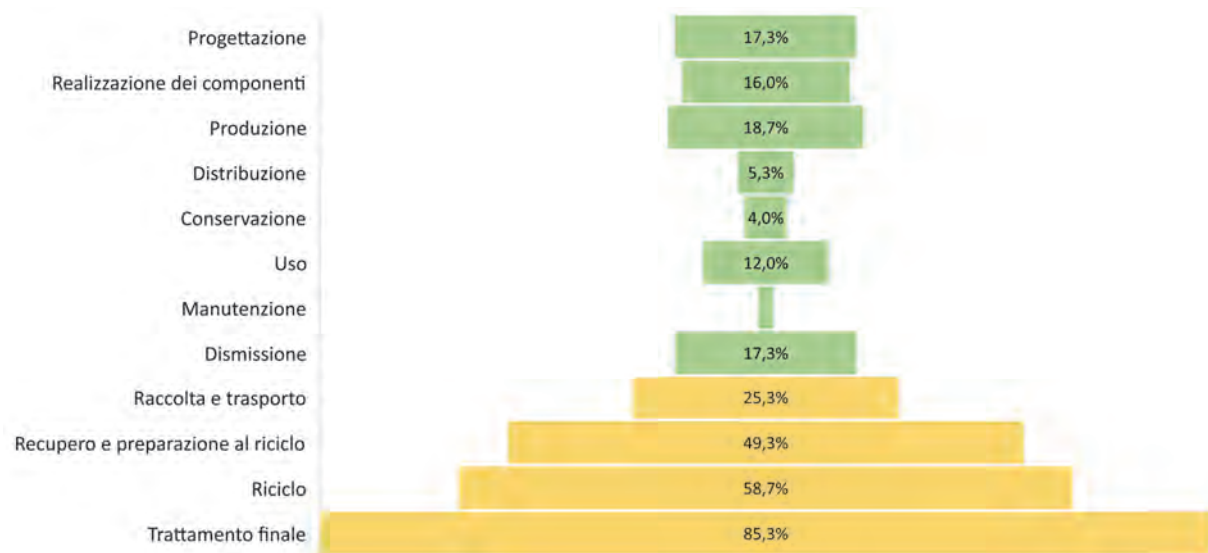


Figura 4 – *Articoli scientifici pubblicati nel 2020-2021 inerenti LCA e gestione dei rifiuti: numerosità % per fase del ciclo di vita dei rifiuti*

quantificare gli impatti ambientali del riciclo, per nuovi prodotti e innovazioni tecnologiche (il 58% degli articoli analizzati considera la fase “riciclo”); gli studi di LCA focalizzati sul riciclo riguardano in particolare alcuni settori, come il packaging, le sostanze chimiche, i residui da demolizione.

Le fasi propedeutiche al trattamento finale sono incluse in molti articoli, per motivi differenti. La maggior parte degli articoli di LCA che studiano opzioni di riciclo includono la fase di recupero e preparazione al riciclo (quasi il 50% degli articoli analizzati include la fase “recupero e preparazione al riciclo”), mettendo in evidenza la rilevanza ambientale delle operazioni preliminari al riciclo. Un numero importante di studi tratta questioni legati alla raccolta e al trasporto dei rifiuti (circa il 25% degli articoli analizzati include questa fase): ciò fa presupporre un’importanza crescente della valutazione LCA nella pianificazione territoriale di gestione integrata.

Sono ancora una minoranza gli studi che analizzano opzioni di gestione relative alle prime fasi della vita dei rifiuti (sono meno del 20% gli studi che includono “progettazione”, “componenti” o “produzione”): queste fasi sono in genere incluse negli studi LCA dedicati ad analizzare gli impatti ambientali di nuovi prodotti/processi di riciclo. Negli studi dedicati alla valutazione di impatto di prodotti riciclabili o riciclati è in genere considerata anche la fase d’uso (inclusa nel campo di applicazione del 12% degli articoli studiati).

Infine, sono pochissimi gli studi che includono nell’analisi attività relative alle fasi centrali del ciclo vita dei rifiuti, come la distribuzione dei prodotti sul mercato, la loro conservazione e la loro manu-

tenzione (meno del 6% degli articoli selezionati include nello studio LCA queste fasi).

Dall’analisi condotta emerge chiaramente che l’attenzione della comunità scientifica è tutt’oggi fortemente orientata a quantificare gli impatti ambientali associati ai rifiuti nelle fasi finali del ciclo di vita: raccolta, riciclo e recupero energetico. Le fasi iniziali del ciclo di vita sono di interesse solo nel caso in cui il prodotto studiato sia ottenuto da riciclo e/o sia riciclabile a fine vita: ciò sembra dimostrare che la crescente attenzione verso le fasi iniziali del ciclo di vita dei rifiuti sia finalizzata a promuovere innovazioni inerenti il riciclo. In generale, le opzioni di riduzione dei rifiuti più propriamente caratterizzanti la prevenzione risultano essere ancora fortemente trascurate negli studi di LCA pubblicati tra il 2020 e il 2021.

4. CONCLUSIONI: QUALCHE RISPOSTA E MOLTE SFIDE

La gestione dei rifiuti è un aspetto prioritario per le attuali politiche locali. Da un lato un tasso di riciclo del 100% è tecnicamente impossibile da raggiungere, dall’altro la produzione complessiva di rifiuti è in continua crescita sia per quantità che per complessità. D’altra parte, la crescente produzione di beni in risposta ad un continuo aumento delle esigenze del mercato determina un crescente uso di risorse, con il conseguente impoverimento degli ecosistemi. Una soluzione realistica per la gestione sostenibile dei rifiuti è quella di estendere l’attuale visione “end-on-life”, dove il rifiuto è considerato un problema da risolvere, alla più completa

visione “cradle-to-cradle”, dove il rifiuto può essere sia un’opzione da evitare sia una risorsa sostitutiva di materia prima vergine. La politica europea ha già risposto a questa sfida e ha introdotto la gerarchia dei rifiuti incentrata sulla prevenzione come attività chiave. Tuttavia, l’applicazione concreta è ancora agli esordi: l’impegno delle aziende, gli interessi del mercato e gli indirizzi delle politiche locali sono progressivamente sempre più attenti a nuove soluzioni di ricircolo; al contrario le questioni relative alla riduzione dei rifiuti nelle fasi a monte sono raramente trattate.

A livello di comunità scientifica, l’attenzione verso la prevenzione dei rifiuti, sebbene pienamente in linea con l’approccio LCT, è ancora poco diffusa nell’ambito degli studi di LCA. Osservando le pubblicazioni scientifiche nel biennio 2020-2021 inerenti alla gestione dei rifiuti e la valutazione mediante metodologia LCA, emerge un quadro complessivo chiaro: la maggior parte degli studi riguarda le fasi di trattamento finale e le opzioni di riciclo; un certo interesse è dimostrato verso alcune fasi intermedie, come raccolta, trasporto e preparazione al riciclo. Molto pochi sono invece gli studi che includono le fasi a monte della generazione del rifiuto e indagano in merito ad attività di prevenzione.

Riprendendo il quesito di ricerca posto all’inizio del lavoro, è possibile trarre alcune considerazioni ed è necessario evidenziare nuovi dubbi. Dal punto di vista teorico, come emerge dal capitolo 2, la prevenzione è da preferire sia dal punto di vista ambientale che economico e sociale: gli indirizzi dell’Unione Europea a favore della riduzione dei rifiuti e dell’economia circolare vanno in questa direzione; tuttavia, le iniziative a sostegno del riciclo appaiono più diffuse e incisive rispetto a quelle dedicate alla prevenzione. Osservando poi la questione dal punto di vista operativo, gli articoli pubblicati negli ultimi 2 anni e inerenti alla valutazione LCA mettono in chiara evidenza come l’interesse della comunità scientifica internazionale sia ancora estremamente concentrato sul quantificare impatti ambientali dei rifiuti, evitando spesso di considerare le fasi preliminari del ciclo di vita dei rifiuti. Da questi risultati non è possibile ottenere una risposta univoca al quesito di ricerca, ma piuttosto emergono una serie di nuovi dubbi, che andrebbero ulteriormente approfonditi con nuove ricerche. Ulteriori osservazioni possono essere fatte indagando più a fondo il quesito di ricerca nei settori in cui, più di altri, l’approccio della prevenzione si sta affermando, come ad esempio il settore agro-

alimentare e il settore delle costruzioni e demolizioni. Un altro aspetto che in questa ricerca non è stato considerato è la distribuzione geografica degli studi inerenti LCA, prevenzione e riciclo: superare questo limite con ulteriori indagini potrebbe essere interessante, anche combinando l’analisi con i settori merceologici, per comprendere se ci sono Paesi in cui l’attenzione alla prevenzione piuttosto che al riciclo è più avanzata rispetto ad altri. Un dubbio che va superato riguarda infine l’ambito di ricerca: il lavoro qui presentato ha assunto come presupposto che gli studi LCA fossero esempi privilegiati per confrontare le prestazioni ambientali della prevenzione rispetto al riciclo. Questo assunto può rappresentare un limite della ricerca: sarà pertanto interessante verificare se la comunità scientifica utilizza altri strumenti di analisi per quantificare impatti e benefici ambientali della prevenzione e del riciclo.

Pur con i limiti insiti nell’analisi, dalle conclusioni di questo studio emergono riflessioni utili alla comunità scientifica: per supportare le imprese ed il mercato verso misure efficaci di prevenzione dei rifiuti si rende necessario uno sforzo da parte degli esperti ad affrontare in modo davvero completo la problematica dei rifiuti. Non è sempre detto che la soluzione ambientalmente preferibile sia il riciclo o il recupero energetico: nella gerarchia dei rifiuti ci sono molte altre opzioni a monte che vanno considerate. Per sapere quali opzioni di gestione sono effettivamente a minore impatto ambientale, si rende necessario chiedere agli studi LCA inerenti ai rifiuti di adottare un orizzonte di osservazione più ampio, includendo tutte le fasi del ciclo vita e valutando anche opzioni di riduzione dei rifiuti nelle fasi di design, produzione, distribuzione, uso e manutenzione. Soltanto così sarà possibile ottenere una valutazione completa dei carichi ambientali associati ai rifiuti ed individuare le fasi del ciclo vita in cui è preferibile intervenire, evitando di trasferire carichi ambientali in altre fasi e in altre attività.

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bartl A. (2011) Barriers towards achieving a zero waste society. *Waste Management* 31, 2369-2370.
- Bimpizas-Pinis M., Bozhinovska E., Genovese A. et al., (2021) Is efficiency enough for circular economy? Resources, Conservation and Recycling 167, 105399 (in press, available online).
- Bisinella V., Götze R., Conradsen K., et al. (2017) Importance of waste composition for Life Cycle Assessment of waste management solutions. *Journal of Cleaner Production* 164 (15), 1180-1191.

- Butti L. (2012) Birth and death of waste. *Waste Management* 32, 1621-1622.
- Christensen T.H., Damgaard A., Levis J. et al (2020) Application of LCA modelling in integrated waste management. *Waste Management* 118, 313-322.
- Commissione Europea (2012) Guidance on the interpretation of key provisions of Directive 2008/98/EC on waste. Disponibile su: http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/pdf/guidance_doc.pdf (consultato il 17/06/2021).
- Commissione Europea (2015) COM/2015/0614 (2015) Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1453384154337&uri=CELEX:52015DC0614> (consultato il 17/06/2021).
- Commissione Europea (2019) COM/2019/640 (2019) The European Green Deal. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1588580774040&uri=CELEX:52019DC0640> (consultato il 17/06/2021).
- Commissione Europea (2020) COM/2020/98 (2020) A new Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0098&from=IT> (consultato il 17/06/2021).
- Corsini F., Gusmerotti N.M., Testa F. et al. (2018). Exploring waste prevention behaviour through empirical research. *Waste Management* 79, 132-141.
- Espinoza L.T., Hool A., Wäger P. et al. (2021) Reply to correspondence Circular economy practices may not always lead to lower criticality or more sustainability; analysis and guidance is needed per case. *Resources Conservation and Recycling* 165, 105223 (in stampa, disponibile online).
- Ewijk S. e Stegemann J.A. (2020) Recognising waste use potential to achieve a circular economy. *Waste Management* 105, 1-7.
- Fabris C. e Mazzi A. (2018) “End of Waste”: Dopo lo stop ai criteri regionali caso per caso, lo stato interviene in fretta. *Rivista Giuridica dell’Ambiente* 4, 689-706.
- Gentil E.C., Gallo D. e Christensen T.H. (2011). Environmental evaluation of municipal waste prevention. *Waste Management* 31 (12), 2371-2379.
- Hannan M.A., Lipu M.S.H., Akhtar M. et al. (2020) Solid waste collection optimization objectives, constraints, modeling approaches, and their challenges toward achieving sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production* 277, 123557 (in press, available online).
- Hutner P., Thorenz A. e Tuma A. (2017) Waste prevention in communities: A comprehensive survey analyzing status quo, potentials, barriers and measures. *Journal of Cleaner Production* 141, 837-851.
- Johansson N. e Corvellec H. (2018) Waste policies gone soft: An analysis of European and Swedish waste prevention plans. *Waste Management* 77, 322-332.
- JRC (2020) Waste and Circular Economy. Joint Research Center. Disponibile su: <https://ec.europa.eu/jrc/en/research-topic/waste-and-recycling> (consultato il 17/06/2021).
- Korhonen J., Honkasalo A. e Seppälä J. (2018) Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics* 143, 37-46.
- Laurent A., Bakas J., Clavreul J. et al. (2014) Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: Lessons learned and perspectives. *Waste Management* 34 (3), 573-588.
- Luederitz C., Meyer M., Abson D.J. et al. (2016) Systematic student-driven literature review in sustainability science. An effective way to merge research and teaching. *Journal of Cleaner Production* 119, 229-235.
- Maglia S. (2019) La gestione dei rifiuti dalla A alla Z, Ed. TuttoAmbiente.
- Matsuda T., Hirai Y., Asari M. et al (2018) Monitoring environmental burden reduction from household waste prevention. *Waste Management* 71, 2-9.
- Mazzi A., Toniolo S. et al. (2016) Exploring the direction on the environmental and business performance relationship at the firm level. Lessons from a literature review. *Sustainability* 8, 1200. DOI: 10.3390/su8111200.
- Mazzi A. (2020) Introduction. Life cycle thinking. In Ren J. e Toniolo S. (eds) *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making: Methodologies and Case Studies*. Elsevier, ISBN: 9780128183557, 1-19.
- Parlamento e Consiglio Europeo (2008) Direttiva 2008/98/CE (2008) Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio, del 19 novembre 2008, relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive, pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale dell’Unione Europea n. L312 del 22 novembre 2008.
- Reike D., Vermeulen W.J.V. e Witjes S. (2018) The circular economy: New or refurbished as CE 3.0? – Exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. *Resources Conservation and Recycling* 135, 246-264.
- Rigamonti L., Falbo A. e Grosso M. (2013) Improvement actions in waste management systems at the provincial scale based on a life cycle assessment evaluation. *Waste Management* 33 (11), 2568-2578.
- Salmenperä H., Pitkänen K., Kautto P. et al. (2021) Critical factors for enhancing the circular economy in waste management. *Journal of Cleaner Production* 280 (1), 124339 (in stampa, disponibile online).
- Steinhorst J. e Beyerl K. (2021) First reduce and reuse, then recycle! Enabling consumers to tackle the plastic crisis – Qualitative expert interviews in Germany. *Journal of Cleaner Production*, 127782 (in stampa, disponibile online).
- UN (2015) Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations. Disponibile su: <https://sdgs.un.org/2030agenda> (consultato il 17/06/2021).

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro descritto nell’articolo è stato presentato durante la quinta edizione della Giornata di studio “Rifiuti e Life Cycle Thinking” tenutasi online il 9 marzo 2021 e organizzata e coordinata dal gruppo di ricerca “AWARE” (Assessment on Waste and Resources) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano in collaborazione con il Gruppo di Lavoro “Gestione e Trattamento dei Rifiuti” dell’Associazione Rete Italiana LCA.

VALUTAZIONE LCA DI UN EDIFICIO REALIZZATO CON CONTAINER PER TRASPORTI MARITTIMI RIUSATI

Serena Giorgi^{1*}, Monica Lavagna¹, Elisabetta Ginelli¹

¹Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito.

Sommario – Il settore edilizio, essendo tra i settori economici con la maggiore produzione di rifiuti e consumo di risorse, è sempre di più oggetto di interesse nelle politiche di economia circolare promosse dall'Unione Europea, diventando campo di sperimentazione per pratiche di recupero di materiali che mirano alla chiusura dei flussi materici. In questo contesto di ricerca per soluzioni innovative di circolarità, è necessario dotarsi di strumenti di supporto utili alla valutazione degli effettivi benefici ambientali conseguibili lungo il ciclo di vita di un prodotto. Il contributo mostra come la valutazione *Life Cycle Assessment* (LCA) possa essere uno strumento utile al controllo e alla quantificazione degli impatti ambientali correlati all'applicazione di strategie volte alla circolarità di flussi materici. L'oggetto dello studio LCA presentato in questo articolo è il prototipo ad uso residenziale progettato e realizzato all'interno del progetto di ricerca "cHOMgenius. PrototypeSystem&Shared Project. Soluzioni straordinarie per l'abitare intelligente", finanziato dal bando SmartLiving di Regione Lombardia. Il progetto prevede il riutilizzo di container per trasporti marittimi, arrivati a fine vita utile nel settore commerciale, come struttura portante di edificio e l'applicazione di tecniche costruttive reversibili per tutte le parti d'opera. Il prototipo rappresenta quindi un esempio di applicazione di economia circolare nel settore edilizio in quanto, allungando la vita dei moduli di container e garantendo la disassemblabilità delle componenti edilizie, riduce il consumo di risorse e la generazione di rifiuti nella fase di costruzione e demolizione. Il contributo restituisce gli aspetti metodologici e gli esiti dell'analisi LCA condotta, evidenziando gli impatti e i benefici ambientali ottenuti attraverso sia il riuso di materiali e componenti sia l'impiego di tecnologie a secco per le parti di involucro e di completamento. I risultati vengono confrontati con un edificio *Baseline*, ovvero che utilizza gli stessi materiali ma con profili ambientali non ottimizzati dal punto di vista ambientale, e con un edificio *Business as Usual*, ovvero uno stesso edificio realizzato con soluzioni costruttive convenzionali, a parità di prestazione.

Parole chiave: *life cycle assessment, settore edilizio, economia circolare, riuso, disassemblaggio*

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A BUILDING BUILT WITH REUSED SHIPPING CONTAINERS

Abstract – The construction sector, one of the economic sectors with the highest production of waste and consumption of resources, is increasingly an area of interest

for European circular economy policies, becoming a field for experimenting with materials recovery practices aimed at closing the cycle of materials. In this context of research towards innovative circular solutions, it is necessary to equip with supporting tools useful for evaluating the actually achievable environmental benefits across the product life cycle. The paper shows the Life Cycle Assessment (LCA) as a useful tool to control and quantify the environmental impact related to the application of strategies aimed at the circularity of material flows. The object of the LCA study is the residential prototype designed and built within the research project "cHOMgenius. PrototypeSystem&Shared Project. Soluzioni straordinarie per l'abitare intelligente", funded by the SmartLiving call of Lombardy Region. The prototype is based on the reuse of shipping containers, which have reached the end of their useful life in the commercial sector, for the bearing structure of a building, and the application of reversible construction techniques. The prototype is an example of circular economy application in the building sector: by extending the life of containers modules and ensuring the disassembly of building components, it reduces the consumption of resources and the generation of construction and demolition waste. The paper deals with the methodological aspects and the results of the LCA study, highlighting the environmental impacts and benefits achieved by materials and components reuse and the use of dry technologies for the envelope and completion parts. The results are compared with a *Baseline* scenario, which considers the same materials but with environmental profiles not optimized from an environmental point of view, and with a *Business as Usual* scenario, which considers the same performance building built with conventional construction solutions.

Keywords: *life cycle assessment, building sector, circular economy, reuse, disassembly*

Ricevuto il 15-4-2021. Correzioni richieste il 31-5-2021. Accettazione il 5-7-2021.

1. INTRODUZIONE

1.1. Circolarità in edilizia e valutazione della sostenibilità ambientale

Il settore edilizio, a livello europeo, è responsabile del 35% della generazione di rifiuti e del 50% del consumo di materie prime (Eurostat, 2016), di conseguenza esso rappresenta un settore prioritario per l'attivazione delle politiche di economia circolare, recentemente riproposte attraverso un nuovo piano d'azione, all'interno degli obiettivi del Gre-

* Per contatti: Via Ponzio 31, 20133 Milano. Tel. 02.23995134. E-mail: serena.giorgi@polimi.it

en Deal europeo (COM 98, 2020). Tali politiche mirano a promuovere i principi di circolarità lungo l'intero ciclo di vita degli edifici: 1) incentivando il contenuto di riciclato nei prodotti da costruzione; 2) migliorando la durabilità e l'adattabilità degli edifici; 3) integrando la valutazione del ciclo di vita negli appalti pubblici utilizzando il progetto pilota di comunicazione volontaria Level(s); 4) riformulando gli obiettivi di recupero dei rifiuti da costruzione e demolizione prefissati dalla Waste Framework Directive 2008/98/CE.

Al fine di diffondere un approccio al ciclo di vita degli edifici e criteri di sostenibilità e circolarità in Italia, stanno agendo come importante leva legislativa i Criteri Ambientali Minimi (CAM), definiti dal D.M. 6/11/2017 n. 259 e applicati dal D.Lgs 50/2016, art. 34, relativo ai Green Public Procurement. Tra i molti criteri obbligatori previsti dai CAM, vengono promossi requisiti strettamente correlati ai principi di circolarità enunciati dagli strumenti di indirizzo a livello europeo, come i requisiti di disassemblaggio, di demolizione selettiva degli edifici a fine vita, di riutilizzo e riciclo di materiali e di componenti edilizi. Ad esempio, viene richiesto che almeno il 50% del peso totale dei componenti edilizi e degli elementi prefabbricati possa essere disassemblabile e quindi che possa garantire, a fine vita, la demolizione selettiva e l'avvio dei materiali ad un processo di riuso o riciclo. Inoltre, viene richiesto che l'edificio contenga almeno il 15% in peso di materia recuperata o riciclata. Particolarmente interessante sono poi i criteri di verifica previsti dai CAM, che stimolano l'utilizzo di certificazioni che rendono trasparente il profilo ambientale *Life Cycle* di un prodotto, promuovendo, ad esempio, le etichette ambientali di tipo III conformi alla norma UNI EN 15804, tra cui rientrano le *Environmental Product Declaration* (EPD) che dichiarano le prestazioni ambientali di un prodotto mediante una valutazione *Life Cycle Assessment* (LCA).

In questo contesto, dunque, nel settore edilizio è determinante investigare e sperimentare strategie di progettazione con approccio *Life Cycle Thinking* e soluzioni costruttive che rispettino i requisiti di circolarità e, quindi, siano modulari, disassemblabili, prefabbricate, che contengano materiali e componenti provenienti da un precedente ciclo di vita utile concluso e che, a loro volta, possano trovare a fine vita una rivalorizzazione attraverso pratiche di riuso e riciclo. Queste sperimentazioni introducono nuove tecniche costruttive, nuove procedure operative ed organizzative e nuove relazioni tra operatori lungo il processo edilizio.

Operare in un campo di innovazione richiede, in modo particolare, il supporto di strumenti *Life Cycle* utili al controllo e alla quantificazione dei reali benefici ambientali che dette tendenze possono traggere. Anche in letteratura viene evidenziata la necessità di valutazioni quantitative che dimostrino i benefici delle strategie di costruzione circolare, anziché concentrarsi solo su criteri qualitativi (Buyle et al. 2019).

La valutazione della sostenibilità ambientale attraverso strumenti standardizzati come il *Life Cycle Assessment* (EN 15978:2011) diventa quindi centrale per promuovere soluzioni non solo circolari ma anche sostenibili lungo il ciclo di vita, soluzioni, quindi, che non portino apparentemente benefici ambientali in una sola fase del ciclo di vita, spostando però gli impatti ambientali ad altre fasi. Ad esempio, la scelta di riutilizzare componenti giunti alla fine della prima vita utile, deve essere subordinata alla valutazione degli impatti provocati dal trasporto necessario per il loro reperimento, così come degli impatti causati da eventuali pratiche di trasformazione necessarie per permetterne il secondo impiego. Altro esempio riguarda le scelte di materiali e soluzioni tecnologiche specifiche, che devono essere motivate da valutazioni con approccio al ciclo di vita che considerino anche gli aspetti di durabilità, quindi valutando non solo l'impatto di produzione ma anche quello di manutenzione e sostituzione. Al tempo stesso soluzioni innovative vanno valutate anche rispetto gli altri ambiti di sostenibilità, ovvero nella sfera economica e sociale.

Il presente articolo vuole restituire un esempio di applicazione della valutazione LCA in un caso di sperimentazione edilizia volta al raggiungimento di particolari requisiti di circolarità, mettendo in evidenza la quantificazione dei benefici ambientali che le scelte progettuali adottate riescono a traggere rispetto a scenari alternativi.

1.2. Applicazione della valutazione LCA: il caso studio

Al fine di applicare la valutazione LCA su un caso di edilizia circolare e reversibile, lo studio prende come oggetto un prototipo ad uso residenziale realizzato con container riusati, sviluppato all'interno del Progetto "cHOMgenius. Prototype System&Shared Project. Soluzioni straordinarie per l'abitare intelligente", finanziato dal Bando Smart Living di Regione Lombardia, con Partner BFC Sistemi, Whiteam, DABC Politecnico di Milano (team coordinato dalla Prof.ssa Elisabetta Ginelli, in quali-

tà di responsabile scientifico), e supportato da 20 aziende nazionali ed internazionali¹, assieme a UNI. Il prototipo ad uso residenziale cHOMgenius è particolarmente interessante in quanto si basa sul riutilizzo di container marittimi come struttura portante di edificio, e prevede soluzioni tecnologiche a secco completamente disassemblabili (per ulteriori approfondimenti si rimanda all'articolo "CHOMGENIUS come esempio di smart shipping container building, tra economia circolare e innovazione", autori: E. Ginelli, G. Pozzi, G. Vignati, riportato nel presente volume della rivista "Ingegneria dell'Ambiente"). Il riutilizzo in edilizia di container giunti a fine vita utile nel settore dei trasporti marittimi è possibile in quanto un certo numero degli stessi non viene dismesso perché usurato o danneggiato ma viene abbandonato nei centri intermodali ancora in ottimo stato, in quanto risulta economicamente svantaggioso far rientrare container vuoti nel paese di origine, dal quale erano giunti carichi di merce.

In particolare, la struttura portante del prototipo è realizzata mediante il riuso di quattro container (denominati rispettivamente HC1, HC2, HC3, HC4) raggruppati in due moduli costituiti da due container sovrapposti ciascuno, connessi tra loro mediante un blocco centrale di nuova costruzione (denominato SA1, SA0), adibito a locale tecnico ed ingresso principale, con vano scale per il collegamento verticale. I container, che formano una struttura senza richiedere strutture portanti aggiunte, poggiano su una fondazione in acciaio realizzata a secco; il blocco di nuova costruzione è costituito da una struttura portante a telaio in acciaio (Figura 1). La maggior parte dei materiali utilizzati per la realizzazione del prototipo hanno contenuto di riciclato e le connessioni delle parti sono standardiz-

zate e basate su giunti meccanici che assicurano tempi di assemblaggio controllati. Le tecniche realizzative, completamente a secco, la modularità dei sistemi dimensionali, strutturali e impiantistici, garantiscono flessibilità costruttiva e spaziale e un facile disassemblaggio a fine vita, che offre la possibilità di riutilizzo e riciclo delle singole parti.

Esistono molti vantaggi nell'uso di container nel settore edilizio, legati in particolare alle elevate prestazioni meccaniche dei container stessi, alla loro resistenza agli agenti atmosferici, alla modularità e alla semplicità di assemblaggio e disassemblaggio. La durabilità dell'acciaio corten, di cui è costituito il container, garantisce inoltre una riduzione di ulteriori impatti di manutenzione durante la fase d'uso dell'edificio, consentendone l'allungamento della vita utile. Essendo una tecnologia costruttiva basata sulla prefabbricazione, va considerato inoltre il beneficio della riduzione dei rifiuti da costruzione (Jaillon et al., 2014) e dei tempi stessi di costruzione.

Il presente studio LCA riporta una valutazione sull'impiego dei container riutilizzati in ambito edilizio, attraverso l'applicazione del metodo *Life Cycle Assessment*, dimostrando i potenziali benefici del riutilizzo rispetto al riciclo, allineandosi per approccio metodologico ad alcuni studi già presenti a letteratura (Dara et al., 2019; Islam et al., 2016; Santola et al., 2020; Tavares et al., 2019) e costituendo un contributo originale, data la localizzazione geografica dell'analisi (focalizzata su un caso studio italiano, a differenza degli altri studi a letteratura riguardanti casi extra-europei) e le analisi comparative effettuate tra la scelta di riuso abbinato a scelte costruttive disassemblabili e tecniche edilizie convenzionalmente utilizzate sul territorio nazionale italiano.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Obiettivo dello studio LCA e unità funzionale

L'obiettivo dello studio LCA è quello di valutare l'impatto ambientale del prototipo cHOMgenius al fine di evidenziare gli impatti evitati dalle scelte di progetto in merito al riuso di container e alla scelta di acciaio riciclato anziché vergine, per la struttura portante del prototipo, e per quantificare gli impatti di soluzioni costruttive reversibili associate al riuso dei container a confronto di soluzioni convenzionali. L'unità funzionale assunta per la valutazione LCA è l'intero prototipo, la reference service life è considerata pari a 50 anni.

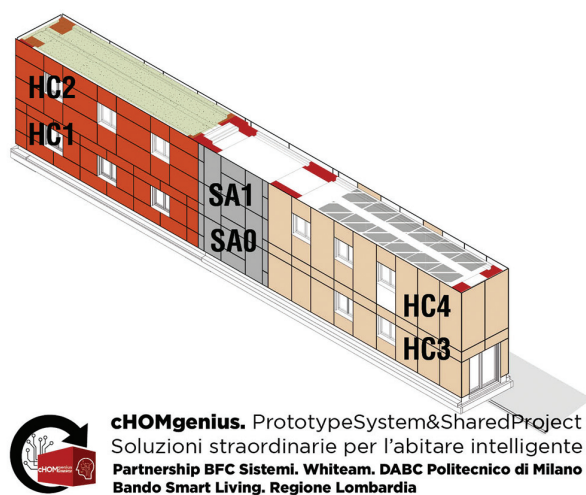


Figura 1 – Prototipo cHOMgenius

Lo studio LCA si pone, inoltre, l'obiettivo di evidenziare la riduzione degli impatti determinati dall'uso di acciaio riusato o riciclato nel progetto, in particolare utilizzato per la struttura portante (inclusendo i container, i relativi giunti di collegamento e la parte strutturale aggiuntiva centrale SA0 SA1 di connessione ai moduli). Vengono, quindi, definiti diversi scenari, al fine di poter comparare la scelta di progetto (container riusati e acciaio da riciclo) con una situazione *Baseline* (container di nuova produzione e acciaio vergine) e scenari intermedi tra i due. In particolare, gli scenari analizzano l'utilizzo di container di nuova produzione (prodotti da acciaio vergine) oppure il riuso di container dismessi nel settore dei trasporti marittimi, e diverse opzioni di produzione di acciaio: acciaio vergine, acciaio con una percentuale di riciclato pari al 59% (pari alla media europea dichiarata dagli studi LCA dell'International Iron & Steel Institute e riportata nel database Inventory of Carbon & Energy) e acciaio riciclato al 100%. In particolare, la combinazione dei diversi scenari è la seguente:

- Scenario di progetto (prototipo cHOMgenius): container riusati e acciaio 100% riciclato;
- Scenario 1: container nuovi e acciaio 100% riciclato;
- Scenario 2: container riusati e acciaio 59% riciclato;
- Scenario 3: container nuovi e acciaio 59% riciclato;
- Scenario 4: container riusati e acciaio vergine;
- Scenario 5 (*Baseline*): container nuovi e acciaio vergine.

Un ulteriore obiettivo è quello di quantificare effettivamente la riduzione degli impatti ottenuta dalle soluzioni di progetto (prototipo cHOMgenius), realizzate con tecnologie costruttive prefabbricate, a secco, disassemblabili, rispetto a quelle di un edificio *Business as Usual* realizzato con tecnologie convenzionali. A tal fine è compiuta una valutazione LCA comparativa tra le soluzioni di progetto e soluzioni BAU dei seguenti subsistemi tecnologici: chiusura orizzontale inferiore, suddividendo l'incidenza della fondazione e del solaio contro terra; chiusura orizzontale superiore; chiusura verticale opaca.

2.2. Confini di sistema e indicatori di impatto considerati

La metodologia LCA (EN 15978:2011) articola il ciclo della vita di un edificio in varie fasi: produzione dei materiali (A1-A3), costruzione (A4-A5), uso (B1-B7) e fine vita (C1-C4). Il presente studio LCA

considera un confine di sistema from cradle to site, considerando quindi gli impatti ambientali relativi all'estrazione delle materie prime (A1), al trasporto dal sito di estrazione al sito di produzione (A2), al processo produttivo (A3) e il trasporto del prodotto dal luogo di produzione al sito di costruzione (A4). Questo studio LCA non considera gli impatti di fine vita, in quanto, applicando il metodo di allocazione degli impatti *cut-off secondo le norme EN 15978 e EN15804*, si ipotizza che gli stessi siano vicino allo zero, poiché il prototipo oggetto di valutazione è interamente disassemblabile (requisito fondamentale di progetto) e, di conseguenza, è previsto che a fine vita tutti i componenti e i materiali saranno riusati, oppure eventualmente riciclati, evitando totalmente il conferimento in discarica (eventuali impatti di riciclo non andrebbero comunque conteggiati nella prima vita, secondo il metodo *cut-off*, perché allocati al prodotto ottenuto dal riciclaggio).

La fase d'uso non è stata considerata, perché si è voluta concentrare l'attenzione sul ruolo delle scelte costruttive finalizzate alla circolarità dei materiali da costruzione; si sottolinea che comunque la progettazione è stata finalizzata alla realizzazione di uno Zero Energy Building *off grid*, quindi autosufficiente dal punto di vista energetico. Va sottolineato che questo comporta una significativa incidenza degli impianti nella valutazione LCA dell'edificio nelle fasi A1-A3 per la rilevante presenza di pannelli fotovoltaici, che però determinano poi un impatto pressoché nullo della fase d'uso B6 (*operational energy*).

Gli indicatori d'impatto considerati per la valutazione from cradle to site del prototipo sono il *Global Warming Potential* (GWP), espresso in kgCO₂eq (*Embodied Carbon*), e il *Total Primary Energy*, dato dalla somma di *Total use of Renewable Primary Energy resources* (PERT) e di *Total use of Non Renewable Primary Energy resources* (PENRT), espresso in MJ (*Embodied Energy*). Sono stati scelti questi due indicatori in quanto risultano maggiormente richiamati nelle attuali norme e direttive europee (European Green Deal, decarbonizzazione, Zero Energy Buildings).

2.3. Inventario dei materiali e fonte dati ambientali

L'inventario dei materiali edilizi (*foreground data*) di cui è composto il prototipo contiene i dati relativi alle voci di capitolato di progetto ed esplicita le quantità, espresse in chilogrammi, di ogni materiale/componente. Raggruppando per tipologia di ma-

teriale, si può evidenziare che il 50% del peso totale dell'edificio è rappresentato dall'uso dell'acciaio (comprendente i container), il 25% è costituito dagli isolanti, e a seguire, il 12% da materiali compositi, il 4% da alluminio, il 4% da materiali in legno e il 5% da altro, ovvero da materiali vari di minori quantità (Tab. 1). Al fine di restituire una lettura critica dei risultati LCA, l'inventario dei materiali edilizi è stato articolato per subsistema di edificio: struttura portante, chiusura verticale, chiusura orizzontale inferiore, chiusura superiore, partizioni interne verticali, partizione interna orizzontale e impianto di fornitura servizi. L'inventario comprende inoltre l'informazione relativa alla distanza dal luogo di produzione all'area di progetto, espressa in chilometri. I dati sulle quantità di ogni materiale e sulle distanze tra l'azienda produttrice e il cantiere sono stati comunicati direttamente dal responsabile del team di ricerca progettuale.

I valori dei profili ambientali di ogni materiale sono stati tratti da fonti primarie, attraverso certificazioni ambientali EPD dei prodotti utilizzati per la realizzazione del prototipo cHOMgenius, oppure da fonti secondarie, quali EPD di prodotti simili a quelli realmente utilizzati o banca dati Inventory of Carbon & Energy (ICE), Ökobaudat, Ecoinvent, che restituiscono dati medi di impatto. Per i materiali non dotati di EPD specifica, è stata effettuata una raccolta di tutti i dati ambientali disponibili provenienti da EPD di prodotti analoghi, dal database ICE, Ökobaudat e Ecoinvent, al fine di confrontare i dati rilevati e, una volta convertiti ed eguagliati ad un'unica unità funzionale, assumere quello più rappresentativo e corrispondente al materiale di progetto.

In particolare, per gli acciai sono stati utilizzati i profili ambientali della banca dati ICE, utilizzando le diverse percentuali di contenuto di riciclato, così da poter comparare i diversi scenari progettuali. Anche per i valori di impatto dei container nuovi (scenari 1, 3 e 5) è stato considerato il *dataset* dell'acciaio vergine di ICE, verificato che l'EPD di un acciaio corten ha valori molto simili a detto acciaio vergine di ICE. I valori di impatto dei container riusati (scenari di Progetto, 2 e 4), trattandosi di riuso senza la necessità di riadattamento dimensionale, sono stati considerati nulli, adottando le assunzioni già presenti in letteratura (Islam et al., 2016; Tavares et al., 2019); è importante sottolineare, però, che sono stati considerati gli impatti relativi al trasporto (A4) dei container riusati, in quanto provenienti da una distanza di 155 km dall'area di progetto.

Tabella 1 – Inventario dei materiali e relative quantità

	Materiale	Quantità [kg]
Acciaio	Acciaio Strutturale S355	10.740,01
	Struttura in acciaio 345 corten	16.528,00
	Acciaio verniciato	375,00
	Acciaio inox	10,15
	Acciaio zincato	194,77
	TOTALE ACCIAIO	27.847,92
Alluminio	Alluminio strutturale	805,25
	Lamiera piegata in alluminio	1.375,95
	TOTALE ALLUMINIO	2.181,20
Compositi	Fibrocemento	2.972,82
	Laminato	1.843,33
	Membrana per barriera al vapore	32,79
	Tenda in fibra di vetro e PVC	22,21
	Geotessili e sostanze organiche	1.195,85
	Membrana impermeabilizzante	800,49
	Materassino fonoassorbente	5,58
	TOTALE COMPOSITI	6.873,07
Isolante	Stuoia in gomma riciclata	114,73
	Vetro cellulare	13.335,00
	lana di roccia	23,09
	EPS	167,10
	XPS	18,19
	TOTALE ISOLANTE	13.658,11
Legno	Compensato marino	788,75
	OSB	837,78
	Legno tamburato	12,60
	Legno multilaminare verniciato	675,28
	TOTALE LEGNO	2.314,41
Altro	TOTALE ALTRO	2.895,71

Nella valutazione LCA per i materiali a base di legno non è stato conteggiato il beneficio dato dallo stoccaggio di CO₂, che avviene durante la crescita dell'albero dal quale proviene la materia prima legno, che se considerato generalmente compensa e supera gli impatti di produzione, portando il valore di impatto in negativo. Se incluso lo stoccaggio di CO₂ occorrerebbe, però, mettere nel bilancio l'eventuale incenerimento a fine vita del legno, che determinerebbe il rilascio della CO₂ stoccata inizialmente. Per questa ragione, si è ritenuta più ragionevole assumere i dati di ICE, che non considerano l'assorbimento della CO₂ dell'albero.

Per i profili ambientali di isolanti, materiali compositi, componenti in alluminio, vetri e altri elementi aggiuntivi non dotati di EPD specifica di prodotto, sono stati assunti i valori di Ökobaudat,

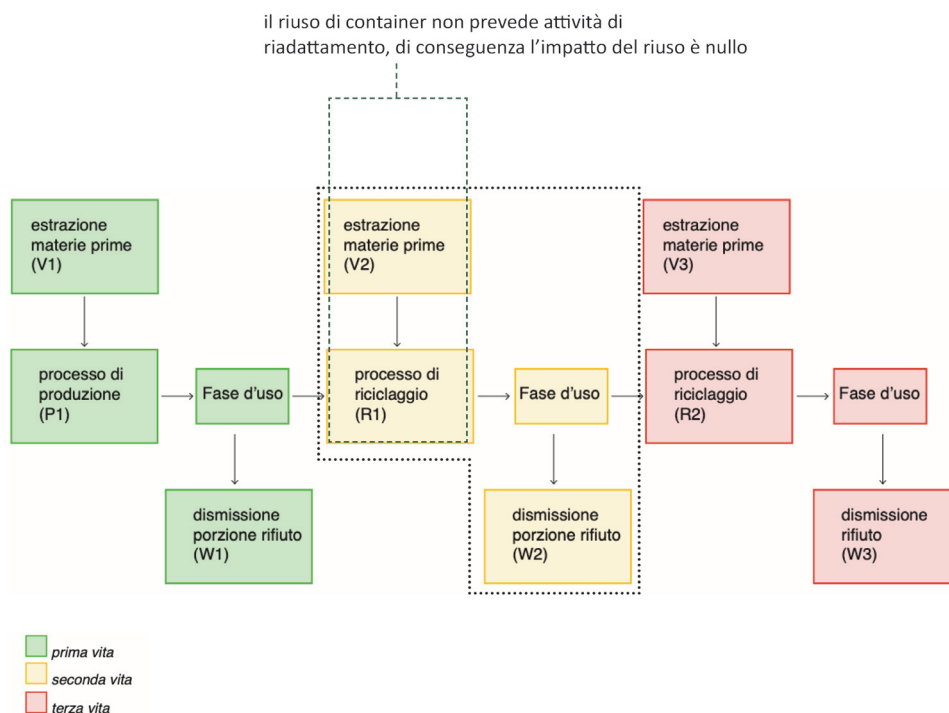


Figura 2 – Schematizzazione del metodo di allocazione cut-off adottato dallo studio LCA

poiché tale database fornisce descrizioni specifiche delle caratteristiche tecniche dei prodotti e dei relativi processi produttivi analizzati; pertanto, è stato possibile scegliere il *dataset* appartenente al materiale più assimilabile a quello utilizzato nel progetto.

Per quantificare l'impatto del trasporto è stato utilizzato il *dataset* da banca dati Ecoinvent associato ad un camion con capienza pari a 16 tonnellate di materiale.

2.4. Metodo di allocazione degli impatti tra prima e seconda vita

Per determinare l'allocazione degli impatti tra la prima e la seconda vita dei prodotti, è stato adottato il metodo di allocazione *cut-off*, identificato anche come metodo 100-0, che appartiene al *partitioning approach* (Giorgi et al., 2017). Il *cut-off* è un metodo *input oriented*, ovvero che privilegia la valutazione degli impatti che si sono verificati all'interno dei confini di sistema modellato, assegnando gli impatti direttamente al prodotto che li genera. Nel metodo *cut-off* (Fig. 2), quindi, sono totalmente assegnati alla prima vita del prodotto i carichi ambientali dovuti a: estrazione di materia prima vergine (V1), processo di produzione (P1), prima fase d'uso e dismissione della porzione dei rifiuti (W1); alla seconda vita invece vengono attribuiti gli impatti causati da processo di riciclag-

gio/riuso (V3+R2), seconda fase d'uso e dismissione (W3). Di conseguenza nella valutazione LCA la premialità del ridotto impatto ambientale dovuta al riuso e al riciclo di materiali viene attribuita alla seconda vita, per cui i materiali riutilizzati o riciclati presentano generalmente minori impatti rispetto alla produzione da materie prime vergini perché vengono considerati gli impatti del solo trasporto e delle rilavorazioni.

Tale metodo *cut-off* è condiviso dal settore delle costruzioni, adottato dalla norma EN 15804:2014, riguardante le dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD), e dalla norma EN 15978:2011, riguardante la valutazione della prestazione ambientale degli edifici. Infatti, nel contesto edilizio, in cui la lunga durata di vita di un edificio rende difficoltosa la quantificazione di un impatto evitato dalla riciclabilità futura del materiale, che avverrebbe dopo i molti anni di vita utile dell'edificio, è preferibile premiare il presente contenuto di riciclato, che risulta essere un dato oggettivamente misurabile. Nel presente studio, in coerenza, non sono stati considerati i benefici derivanti dal potenziale riuso e riciclo dei materiali a fine vita (che cadrebbero nel modulo D, al di fuori dei confini di sistema), ma si sono comunque considerati nulli gli impatti di fine vita in quanto non vi è un conferimento in discarica, ma a un centro di riciclo/riuso. Gli unici impatti saranno quelli di disassemblaggio e trasporto, considerati trascurabili.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1. Impatti LCA della fase di produzione (A1-A2-A3)

I primi risultati dello studio LCA hanno restituito gli impatti ambientali analizzati relativi alla fase di produzione (A1-A3) dello Scenario di Progetto. Esso mostra un impatto complessivo del prototipo per la fase di produzione pari a $6,91+04 \text{ kg/CO}_2\text{eq}$ di *Embodied Carbon* e a $1,47\text{E}+06 \text{ MJ}$ di *Embodied Energy*. Da detta analisi LCA si evince inoltre l'incidenza di ogni subsistema tecnologico sull'impatto complessivo del prototipo. Dalla lettura del grafico (Fig. 3), espresso in termini percentuali, emerge come nello Scenario di Progetto il subsistema della chiusura verticale opaca impatti in maniera considerevole sul totale, in particolare per il 38% dell'*Embodied Carbon* e il 44% dell'*Embodied Energy* del prototipo. Dall'analisi LCA è possibile notare che l'elevata incidenza, in termini percentuali sul totale, della chiusura verticale opaca è dovuta dal fatto che la struttura portante (il subsistema che generalmente incide per più del 50% in un edificio *Business as Usual*) ha un basso impatto ambientale grazie alla scelta progettuale di riutilizzare container (a impatto nullo) e di utilizzare acciaio 100% riciclato per gli elementi integrativi. Ciò porta ad un'incidenza della struttura portante pari al 7% sull'impatto totale del prototipo sia per l'*Embodied Energy* sia per l'*Embodied Carbon*. Il valore del 7% è da attribuirsi ai componenti integrativi, come i pali di fondazione, gli elementi di connessione tra i container riusati e la struttura portante a telaio in acciaio riciclato della parte SA0-SA1 di nuova costruzione. In particolare, le fondazioni incidono circa per il 3% sull'*Embodied Carbon* totale del prototipo e per il 2% sull'*Embodied Energy* totale del prototipo; la struttura di elevazione SA0 e SA1 incide per il 2% dell'impatto totale del prototipo, in entrambi gli im-

patti. Va inoltre sottolineato che gli impatti della struttura portante del prototipo analizzato sono bassi perché non è presente alcun vano interrato.

Riguardo il subsistema "impianto di fornitura servizi", che comporta il 13% dell'*Embodied Carbon* e l'11% dell'*Embodied Energy* totale del prototipo, la quota parte maggiore è rappresentata dai pannelli fotovoltaici che da soli costituiscono il 91% dell'*Embodied Carbon* e l'86% dell'*Embodied Energy* del subsistema "impianto di fornitura servizi". Soffermendosi sui subsistemi più incidenti dello scenario di progetto, dall'analisi emerge che gli impatti totali della sola chiusura verticale opaca risultano $2,65\text{E}+04 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ per l'*Embodied Carbon* e $6,42\text{E}+05 \text{ MJ}$ per l'*Embodied Energy* (si rimanda al paragrafo 3.5 il paragone della scelta di progetto con una soluzione tradizionale); mentre gli impatti della chiusura verticale trasparente ammontano a $1,77\text{E}+04$ di *Embodied Carbon* e $3,04\text{E}+05$ di *Embodied Energy*. È utile quindi approfondire quali siano i materiali utilizzati che influiscono sul risultato. La maggiore incidenza in termini quantitativi nella chiusura verticale opaca è particolarmente rappresentata dagli isolanti (circa 8,5 ton), costituiti maggiormente dal vetro cellulare ad elevata densità, e dai materiali compositi (circa 4,8 ton) nei quali incidono i rivestimenti di facciata in fibrocemento e laminato. In minore quantità vi è l'alluminio (circa 0,3 ton) che costituisce la sottostruttura dei pannelli di rivestimento di facciata e l'acciaio (circa 1,1 ton) utilizzato come mensole di supporto. Nella chiusura verticale trasparente si nota l'incidenza quantitativa dell'alluminio (1,3 ton) che costituisce il telaio delle finestre e parte dei sistemi oscuranti, e il vetro delle finestre (circa 1,83 ton). Dallo studio LCA emerge che gran parte dell'impatto *Embodied Carbon* è dato dall'isolante della chiusura verticale opaca e dall'alluminio della chiusura verticale trasparente. Gli stessi materiali incidono maggiormente anche sull'*Embodied Energy*.

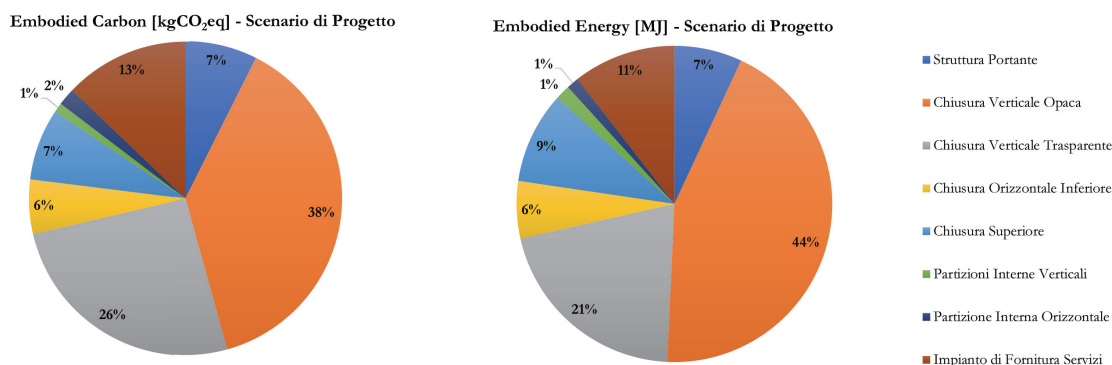


Figura 3 – Incidenza di ogni subsistema sull'*Embodied Carbon* e sull'*Embodied Energy* del prototipo

In secondo luogo, particolarmente incidenti sia per *Embodied Carbon* sia per *Embodied Energy* sono i pannelli di rivestimento della facciata e la relativa sottostruttura in alluminio. La scelta di tali materiali è stata però dettata dalla volontà di garantire una ridotta manutenzione dell'edificio nel tempo e dunque di adottare materiali particolarmente durevoli che evitino processi di sostituzione, annullando gli impatti della fase d'uso B4 (*replacement*).

3.2. Impatti LCA della fase di trasporto dallo stabilimento produttivo al cantiere (A4)

La fase di trasporto (A4) è stata calcolata considerando la massima ottimizzazione dei trasporti per materiali provenienti dallo stesso stabilimento produttivo, attraverso tipologia di trasporto su gomma. Rispetto all'impatto totale del prototipo (*Embodied Carbon* pari a $6,91+04 \text{ kg/CO}_2\text{eq}$ ed *Embodied Energy* pari a $1,47\text{E}+06 \text{ MJ}$), il trasporto non è molto incidente: $5,29\text{E}+03 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ e $8,78\text{E}+04 \text{ MJ}$ rispettivamente determinando un aumento degli impatti del 7% su *Embodied Carbon* e del 6% su *Embodied Energy*.

I grafici (Fig. 4 e Fig. 5) mettono in risalto come l'impatto di trasporto degli isolanti sia elevato rispetto agli altri materiali. Per questa ragione, vengono di seguito analizzati i valori che possano esplicitare quali siano i motivi che causano un aumento così importante degli impatti di trasporto degli isolanti. La valutazione LCA mostra che l'elevato impatto è provocato dal trasporto del vetro cellulare, che è anche l'isolante quantitativamente più utilizzato, per un totale di 13,34 ton (si pensi che l'intera struttura portante di acciaio pesa 27 ton) ed è il materiale con maggiore distanza di approvvigionamento, pari a 864 km (la distanza massima di reperimento dei container della struttura portante è invece pari a 155 km).

Ancora una volta, occorre sottolineare che la scelta dell'isolante in vetro cellulare è stata adottata principalmente in relazione alla durabilità del materiale stesso e alla impermeabilità che porta ad escludere l'utilizzo di eventuali guaine di protezione aggiuntive; al momento vi è un unico stabilimento produttivo di tale materiale in Europa, collocato in Belgio. In fase di sviluppo del prototipo, inoltre, è stata considerata la prospettiva avanzata dal produttore di apertura di un nuovo stabilimento di produzione di vetro cellulare in Emilia-Romagna, che porterebbe a non influire in maniera così evidente sull'impatto di trasporto. Simulando quindi l'opzione migliorativa di approvvigionamento del vetro cellulare dal nuovo stabilimento, gli impatti totali di

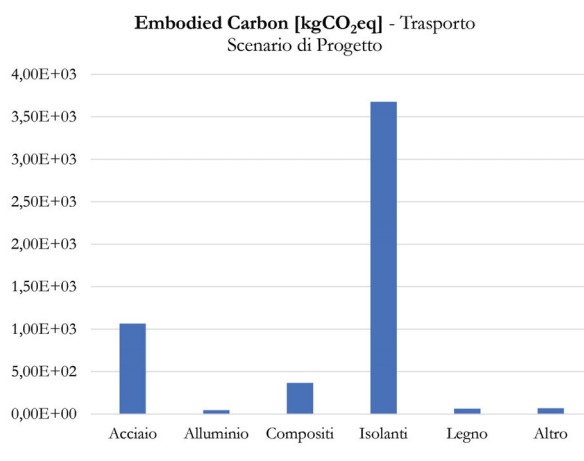


Figura 4 – *Embodied Carbon per il trasporto dei materiali di progetto*

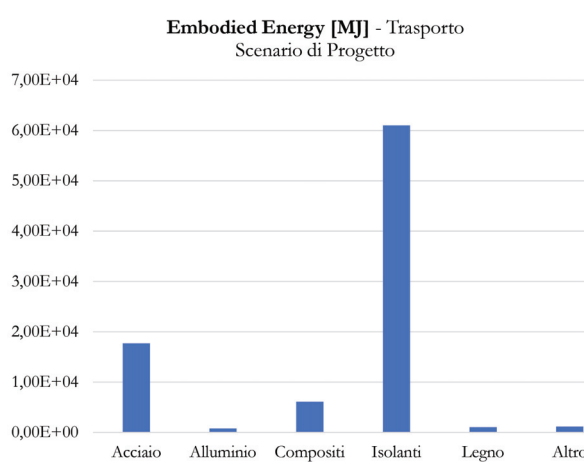


Figura 5 – *Embodied Energy per il trasporto dei materiali di progetto*

trasporto si abbasserebbero a più della metà: $2,40\text{E}+03 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ e $3,98\text{E}+04 \text{ MJ}$, riducendo quindi l'incidenza sugli impatti del prototipo.

3.3. Confronto tra impatti LCA di Produzione, Trasporto e Fase d'uso

Per quanto riguarda la fase d'uso, il prototipo è dotato di un sistema *off-grid* che copre il totale fabbisogno energetico mediante la produzione di energia con pannelli fotovoltaici. Il prototipo risulta quindi indipendente dalla rete di fornitura nazionale. Detto sistema copre un fabbisogno energetico pari a circa $73 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ per il riscaldamento, circa $50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ per il raffrescamento e circa $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ per acqua calda sanitaria, per un totale di $138 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.

Risulta interessante confrontare l'energia consumata durante le fasi di produzione e trasporto, con il fabbisogno durante la fase d'uso: si precisa che non ci si riferisce agli impatti dei consumi della fase d'uso, in quanto, si considera il solo fabbisogno energetico, che viene coperto dalla produzione di

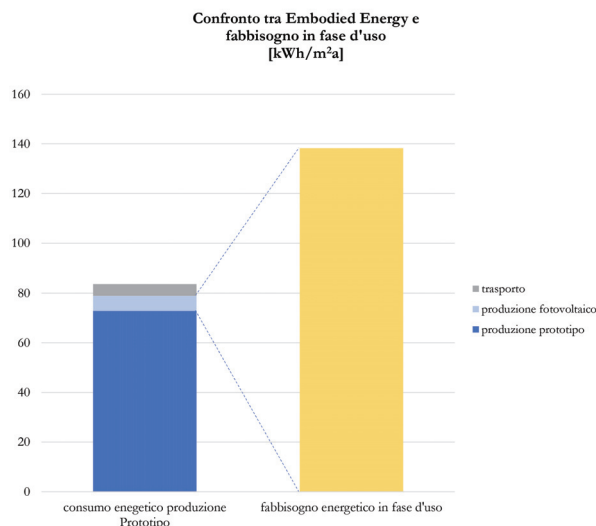


Figura 6 – Confronti tra consumo energetico in fase di produzione e trasporto (Embodied Energy) e fabbisogno energetico in fase d'uso soddisfatto dalla produzione di energia elettrica dei pannelli fotovoltaici (impatto zero in fase d'uso)

energia rinnovabile tramite i pannelli fotovoltaici per cui non determina degli impatti e dei consumi durante la fase d'uso (B6).

Per poter compiere la comparazione con i dati disponibili riguardanti la fase d'uso, il valore complessivo di *Embodied Energy* del prototipo è stato diviso per i metri quadrati di superficie utile interna e per gli anni di vita utile, assunti pari a 50 anni, al fine di esprimere il risultato di impatto in MJ/m²a, poi trasformato in kWh/m²a. Tale valore è stato utile al fine di paragonare l'energia incorporata del prototipo con l'energia richiesta in fase d'uso.

Dal confronto tra l'*Embodied Energy* del prototipo e il fabbisogno di energia in fase d'uso, come si evin-

ce da Figura 6, si riscontra che il consumo della fase di produzione e trasporto risulta inferiore (circa poco più della metà) al fabbisogno in fase d'uso, che viene soddisfatto dalla produzione di energia elettrica dei pannelli fotovoltaici. L'impatto provocato dalla produzione dei pannelli fotovoltaici va quindi a coprire un fabbisogno energetico che sarà soddisfatto ad impatto zero in fase d'uso; sicuramente la scelta di autoproduzione di energia rinnovabile è vantaggiosa rispetto al soddisfacimento dei fabbisogni energetici tramite fornitura da rete elettrica nazionale, che, considerando il mix medio nazionale attuale, avrebbe sicuramente impatti superiori.

Il ridotto impatto ambientale della fase di produzione è stato assicurato dall'uso di container da riuso che ha drasticamente ridotto l'impatto relativo alla struttura portante dell'edificio, che in genere incide per il 50% sull'impatto complessivo di edificio.

3.4. Confronto LCA tra scenari alternativi di uso dell'acciaio nel Progetto: acciaio vergine versus acciaio riciclato e container di nuova produzione versus riuso dei container

Al fine di evidenziare i benefici ambientali che le scelte progettuali quali il riuso di container e l'uso di acciaio 100% riciclato determinano, attraverso l'analisi LCA viene comparato lo Scenario di Progetto con altri cinque ipotetici scenari di progettazione (cfr. paragrafo 1.3).

Dalle analisi effettuate emerge che in termini ambientali il vantaggio maggiore è determinato dal riuso di container, mentre l'utilizzo di acciaio riciclato nelle altre parti strutturali risulta meno influente. Per questa ragione, nei grafici (Fig. 7 e 8), si è deciso di riassumere i risultati finali raggrup-

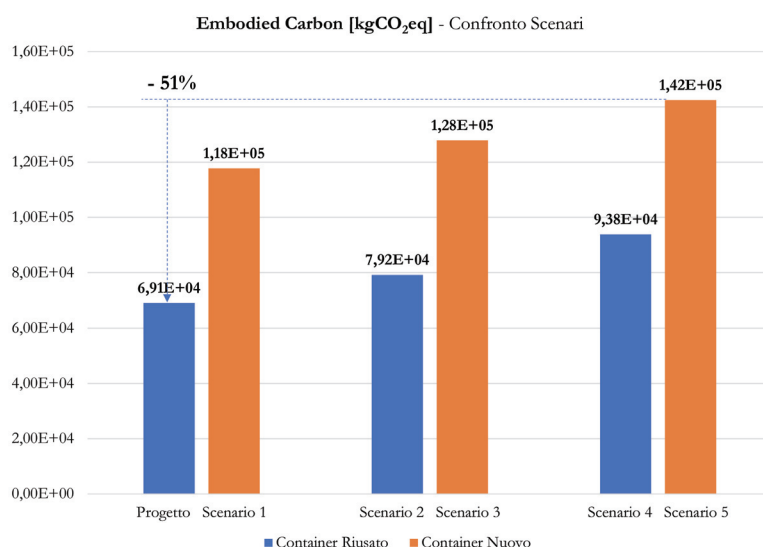


Figura 7 – Embodied Carbon – Confronto tra i diversi Scenari

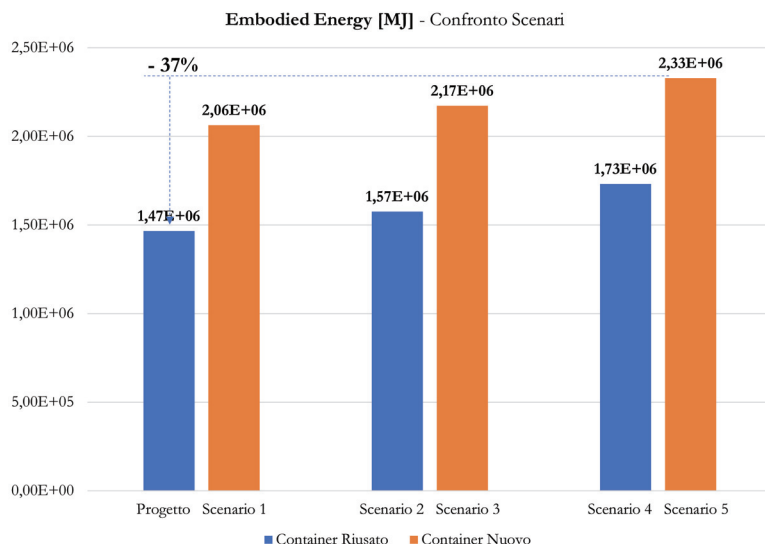


Figura 8 – Embodied Energy – Confronto tra i diversi Scenari

pati in base alle percentuali di riciclaggio dell'acciaio, così da rendere ancora più evidente la riduzione degli impatti grazie all'impiego di container riusati piuttosto che nuovi. È possibile notare che con le scelte di progetto (container riusati e acciaio riciclato al 100%) si riesce ad evitare più della metà (-51%) delle emissioni di CO₂ rispetto allo Scenario 5, e più di un terzo (-37%) dell'energia incorporata. Si tratta di una notevole riduzione degli impatti ambientali, che rende l'opzione del riuso particolarmente vantaggiosa e da perseguire.

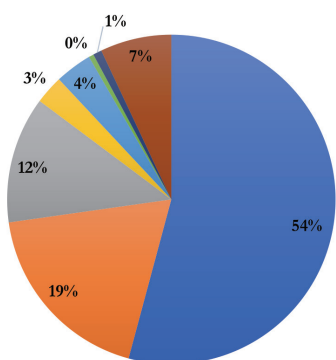
Analizzando in particolare lo Scenario 5 (*Baseline*) è possibile evidenziare che la struttura portante (in acciaio vergine e utilizzo di container nuovi) incide del 54% sull'*Embodied Carbon* e del 41% sull'*Embodied Energy*, a confronto dello Scenario di Progetto del prototipo CHOMgenius, nel quale ha un'incidenza solo del 7% per entrambi gli impatti (Fig. 9). La variazione dei diversi scenari influenza in particolare gli impatti del subsistema della struttura

portante, in cui viene conteggiato interamente l'uso dei container. Va però sottolineato che i container costituiscono anche parte delle chiusure verticali di involucro e delle partizioni interne, come avviene per i sistemi strutturali portanti continui, evitando l'uso di *layer* aggiuntivi per la realizzazione dello strato resistente delle pareti, e questo, quindi, contribuisce indirettamente alla riduzione degli impatti anche degli altri subsistemi.

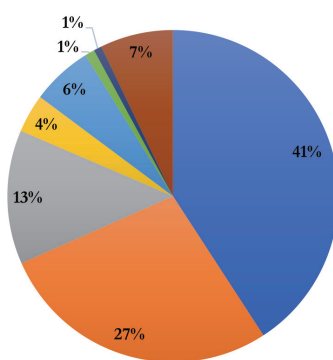
3.5. Confronto LCA tra soluzioni costruttive di Progetto e soluzioni costruttive Business as Usual

Un ulteriore ambito di approfondimento dello studio LCA riguarda il paragone tra le soluzioni costruttive del prototipo di progetto e soluzioni *Business as Usual*, ovvero realizzate con tecnologie costruttive convenzionalmente utilizzate nella pratica corrente, a parità di prestazione termica. Lo studio si concentra sulle scelte costruttive dell'involucro, ovvero della chiusura verticale opaca, della

Embodied Carbon [kgCO₂eq] - Scenario 5



Embodied Energy [MJ] - Scenario 5



- Struttura Portante
- Chiusura Verticale Opaca
- Chiusura Verticale Trasparente
- Chiusura Orizzontale Inferiore
- Chiusura Superiore
- Partizioni Interne Verticali
- Partizione Interna Orizzontale
- Impianto di Fornitura Servizi

Figura 9 – Incidenza di ogni subsistema sull'Embodied Carbon e sull'Embodied Energy del prototipo – Scenario 5 – Acciaio vergine e Containers nuovi

chiusura orizzontale superiore e della chiusura orizzontale inferiore.

3.5.1. Chiusura verticale opaca

Come già dichiarato nel paragrafo 2.1, gli impatti totali della chiusura verticale opaca risultano $2,65E+04$ kgCO₂eq per l'*Embodied Carbon* e $6,42E+05$ MJ per l'*Embodied Energy*. Tale subsistema di progetto è costituito dallo strato resistente verticale del container, isolamento in vetro cellulare e il sistema di rivestimento misto in parte in laminato, in parte in fibrocemento e in parte in alluminio con sottostruttura in alluminio, optando quindi per una soluzione completamente a secco e reversibile. In alternativa si ipotizza una soluzione convenzionale, a parità di trasmittanza termica, composta da blocchi forati in laterizio doppio UNI, isolamento in EPS da 20 cm, finitura interna in intonaco e finitura esterna in pannelli di rivestimento in fibrocemento agganciati tramite sottostruttura in alluminio. Come si evince dalle figure 10 e 11, la soluzione di progetto evita il 35% delle emissioni di CO₂, e il 1,3% del consumo di energia, rispetto alla soluzione convenzionale.

Nei risultati della comparazione influiscono molto nella soluzione di progetto, ovvero del prototipo CHOMgenius, il vetro cellulare e la parte di rivestimento in alluminio, e nella soluzione BAU il blocco in laterizio accoppiato allo strato di EPS, insieme, in entrambi i casi, alla sottostruttura in alluminio della facciata ventilata. Per quanto riguarda l'*Embodied Carbon*, la grande quantità di laterizio fa aumentare la CO₂ incorporata rispetto della soluzione di progetto. Mentre riguardo l'*Embodied*

Energy, il vetro cellulare, anche se quantitativamente inferiore, e il sistema di rivestimento misto va quasi a equiparare la soluzione *Business as Usual*, in quanto i materiali stessi hanno un valore di energia incorporata molto alto. La scelta dell'isolante in vetro cellulare è però stata determinata dalla notevole durabilità e dunque dal fatto che si tratta di un isolante che non richiede cicli di sostituzione durante la vita utile dell'edificio. Per il medesimo motivo, nel progetto, è stata scelta la sottostruttura del rivestimento di facciata in alluminio che, in confronto ad altre sottostrutture (es. in legno), risulta avere una lunga durata e una ridotta manutenzione. Occorre sottolineare inoltre che la soluzione di progetto è avvantaggiata dal fatto che lo strato resistente della chiusura verticale opaca è costituito dalla parete laterale del container riusato, quindi ad impatto zero.

3.5.2. Chiusura orizzontale superiore

Il confronto tra progetto e BAU prende in considerazione l'intero pacchetto di chiusura orizzontale superiore, ovvero la struttura portante di solaio e le parti di completamento, fino allo strato di impermeabilizzazione. Nella soluzione di progetto la chiusura considera la struttura di solaio, costituita dalla parte superiore del container, lo strato di isolamento e lo strato impermeabilizzante, anche questa volta posato a secco. La soluzione BAU ipotizzata è composta da una struttura di solaio in latero cemento (16+4) e cordolo in c.a., uno strato di isolamento di 20 cm di XPS, massetto di pendenza e finitura interna in intonaco. Le figure 12 e 13 mostrano che il progetto garantisce un impatto evitato pari a -87% di *Embodied*

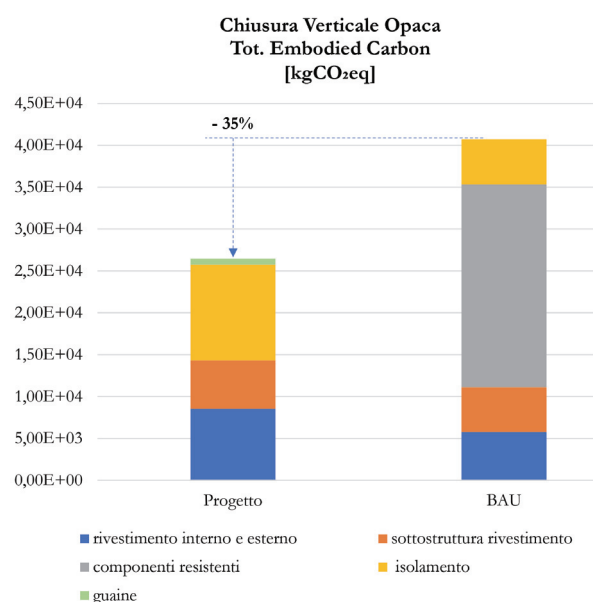


Figura 10 – Embodied Carbon progetto/BAU per chiusura opaca verticale

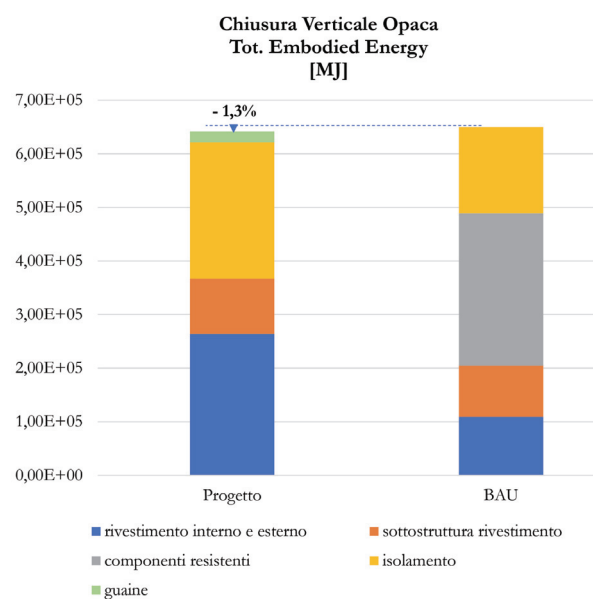


Figura 11 – Embodied Energy progetto/BAU per chiusura opaca verticale

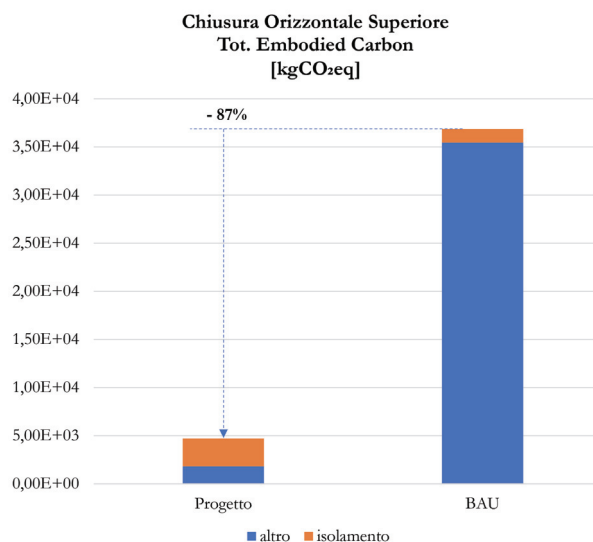


Figura 12 – Embodied Carbon progetto/BAU per copertura

Carbon e a -68% di Embodied Energy. In questa comparazione, l'incidenza dello strato isolante di progetto risulta più impattante in una soluzione convenzionale, ma il grande vantaggio ambientale che il progetto ha rispetto ad una soluzione *Business as Usual* è dato dalla mancanza di impatto della struttura portante di copertura, soddisfatta, anche questa volta, dal modulo container riusato.

3.5.3. Chiusura orizzontale inferiore

Nella comparazione della soluzione di chiusura orizzontale inferiore sono state considerate le fondazioni e il solaio contro terra. Il progetto utilizza una tecnica di fondazione a secco e disassemblabile, costituita da pali in acciaio connessi attraverso piatti in acciaio alla struttura del container. Inol-

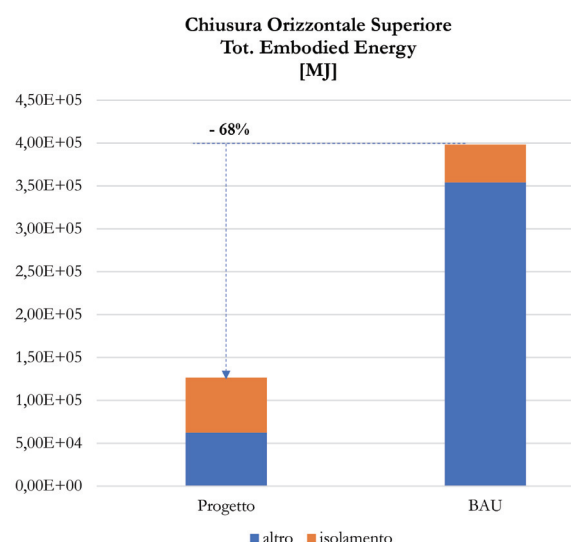


Figura 13 – Embodied Energy progetto/BAU per copertura

tre, utilizza il vetro cellulare come layer tra la terra e la struttura di container, in quanto lo stesso garantisce isolamento termico, impermeabilizzazione all'acqua e barriera anti radon, andando quindi ad evitare la posa di ulteriori strati.

La soluzione BAU, invece, ipotizza una soluzione convenzionale, con fondazioni a travi rovesce in calcestruzzo armato, magrone, guaina impermeabilizzante, cassero a perdere per vespaio aerato, isolamento XPS da 20 cm, e massetto strutturale in calcestruzzo armato.

Dalle figure 14 e 15 si evince che la soluzione di progetto, nella quale vengono coinvolti minori quantità di materiale e nella quale la struttura resistente di solaio è costituita dal container riusato e dunque a impatto nullo, risulta più vantaggiosa ri-

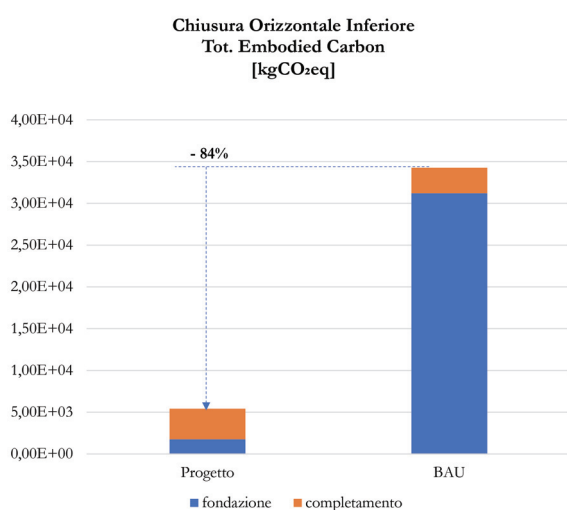


Figura 14 – Embodied Carbon progetto/BAU per chiusura inferiore

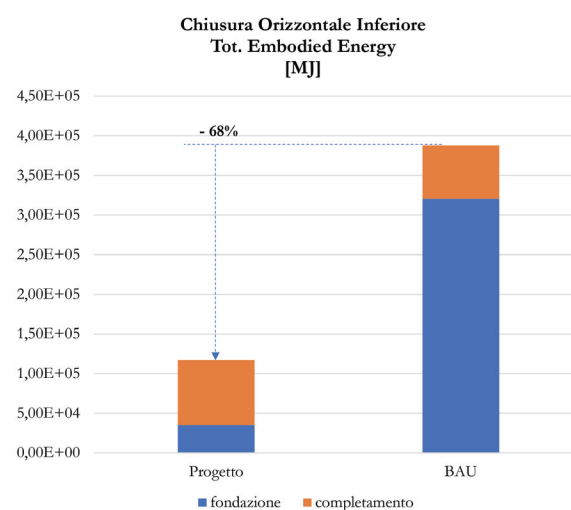


Figura 15 – Embodied Energy progetto/BAU per chiusura inferiore

spetto ad una soluzione BAU. In particolare, la chiusura orizzontale inferiore di progetto evita l'84% di CO₂ incorporata e il 68% di energia incorporata, rispetto ad una soluzione BAU.

4. CONCLUSIONI

Il presente contributo ha mostrato, attraverso la valutazione LCA, la quantificazione degli impatti e dei benefici ambientali derivati da strategie di circolarità, come il riuso di elementi costruttivi e l'utilizzo di materiali a elevato contenuto di riciclato in edilizia. In particolare, questo studio LCA ha sottolineato i benefici del riuso di container come elemento strutturale in edilizia (vero e proprio esempio di *upcycling*). Il riuso di container, infatti, evita il consumo di ulteriori materie prime per la costruzione della struttura portante di edificio, e non necessitando di modifiche dimensionali, non comporta impatti di trasformazione. Costituendo quindi, in accordo con l'approccio della metodologia LCA, una struttura portante ad impatto zero in fase di produzione, i container riutilizzati riducono drasticamente l'impatto ambientale complessivo dell'edificio.

Inoltre, il riutilizzo di container porta vantaggi ambientali non solo al subsistema della struttura portante ma anche ad altri sottosistemi di edificio, in quanto il container stesso costituisce anche parte delle pareti verticali di involucro orizzontale inferiore, superiore, verticale e di partizione interna, sostituendo parti resistenti tradizionali.

Inoltre, lo studio LCA compiuto, ha analizzato le scelte costruttive reversibili e a secco messe in atto nel prototipo oggetto di valutazione, comparate rispetto a soluzioni convenzionali. Lo studio LCA ha dimostrato che le scelte di soluzioni innovative smontabili e riutilizzabili abbinate al riuso di container hanno un impatto ambientale inferiore rispetto a soluzioni convenzionali. Inoltre, la possibilità di disassemblaggio permette scenari di fine vita di riuso e riciclo dei componenti che non comportano impatti ambientali legati al conferimento in discarica.

Tuttavia, è da considerare che la valutazione del ciclo di vita condotta nell'ambito di questo studio ha diversi limiti e suggerisce occasioni per la ricerca futura. Ulteriori scenari potrebbero essere successivamente valutati, attraverso analisi di sensibilità e analisi probabilistiche dell'incertezza. È inoltre importante estendere la valutazione a tutti gli altri indicatori di impatto ambientale, al fine di verificare che non accada uno spostamento di carico ambientale tra i diversi impatti ambientali.

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Buyle M., Galle W., Debacker W. e Audenaert A. (2019) Sustainability assessment of circular building alternatives: Consequential LCA and LCC for internal wall assemblies as a case study in a Belgian context. *Journal of Cleaner Production*, vol (218): 141-156.
- Commissione europea (2020) COM 98, Un nuovo piano d'azione per l'economia circolare Per un'Europa più pulita e più competitiva, Bruxelles.
- Dara C., Hachem-Vermette C. e Assefa G. (2019) Life Cycle Assessment and life cycle costing of container based single-family housing in Canada: A case study. *Building and Environment*, vol. (163): 106332.
- Eurostat, 2016. Key figures on Europe, Belgium, pp. 161-164.
- Giorgi S., Lavagna M. e Campioli A. (2017) Procedure di allocazione nella metodologia LCA e tendenze settoriali verso un'economia circolare. Conference proceeding Rete Italiana LCA conference "Resource efficiency e Sustainable Development Goals: il ruolo del Life Cycle Thinking".
- Islam H., Zhang G., Setunge S. e Bhuiyan M.A. (2016) Life Cycle Assessment of shipping container home: A sustainable construction. *Energy and Buildings*, vol. (128): pp. 673-685.
- Jaillon L. e Poon C.S. (2014) Life cycle design and prefabrication in buildings: A review and case studies in Hong Kong. *Automation in Construction*, vol. (39): 195-202.
- Satola D., Kristiansen A.B., Houlihan-Wiberg A., Gustavsen A., Ma T. e Wang R.Z. (2020) Comparative Life Cycle Assessment of various energy efficiency designs of a container-based housing unit in China: A case study. *Building and Environment*, vol (186): 107358.
- Tavares V., Lacerda N. e Freire F. (2019) Embodied energy and greenhouse gas emissions analysis of a prefabricated modular house: The "Moby" case study. *Journal of Cleaner Production*, vol. (212):1044-1053.

NOTA

Questo contributo fa parte della ricerca "cHOMgenius project. PrototypeSystem&SharedProject. Extraordinary solutions for smart living", partnership BFC Sistemi. Whiteam. Dipartimento di Architettura, Ambiente costruito e Ingegneria delle costruzioni, Politecnico di Milano. Coordinatore scientifico Prof.ssa Elisabetta Ginelli, cofinanziato dal fondo Smart Living della Regione Lombardia. Gruppo di lavoro: Claudio Chesi, Laura Daglio, Giuliano Dall'O', Emilio Faroldi, Monica Lavagna, Giuditta Lazzati, Davide Pirillo, Gianluca Pozzi, Leopoldo Sdino, Andrea Tartaglia, Marco Lorenzo Agostino Trani, Gianni Utica, Giulia Vignati. Il prototipo è stato realizzato grazie a: Abet Laminati Spa, Alpac Srl, Boldarino Spa, Comoli Ferrari & c. Spa, Daku Italia Srl, Eterno Ivica Srl, Foamglas Italia Srl, Fontanot Scale Spa, G.S.E. - Krinner Italia, Index Spa, Livith Spa, Metra Spa, Pantecnic Spa, Restende Srl, Sandrini Metalli, Sanika GmbH, Si.Cop Etanco Italia Srl, Sil Società Italiana Lastre Spa, Tabu Spa, Tecnoelettrica Bragoni Srl, UNI (Ente Nazionale Normazione). Il lavoro descritto nell'articolo è stato presentato durante la quinta edizione della Giornata di studio "Rifiuti e Life Cycle Thinking" tenutasi online il 9 marzo 2021 e organizzata e coordinata dal gruppo di ricerca "AWARE" (Assessment on Waste and Resources) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano in collaborazione con il Gruppo di Lavoro "Gestione e Trattamento dei Rifiuti" dell'Associazione Rete Italiana LCA.

IL LIFE CYCLE THINKING COME STRUMENTO PER LA VALUTAZIONE CRITICA DELLE POLITICHE DI ECONOMIA CIRCOLARE

Daniela Camana^{1*}, Alessandro Manzardo¹, Andrea Fedele¹

¹ Università di Padova, CESQA, Dipartimento di Ingegneria Industriale.

Sommario – La definizione di indicatori condivisi per la misurazione delle prestazioni di sostenibilità ambientale e dei miglioramenti ottenibili con l'economia circolare è oggetto di dibattito internazionale. Tra gli strumenti tecnici di analisi delle strategie ambientali, la valutazione del ciclo di vita risulta tra le più promettenti in quanto consente di stimare gli impatti ambientali ma anche gli aspetti sociali ed economici, indagando la sostenibilità nel suo complesso. Il primo obiettivo di questo lavoro è illustrare la recente letteratura su questi tre temi interconnessi – sostenibilità ambientale, economia circolare e valutazione del ciclo di vita – indagando se la circolarità sia sempre positiva dal punto di vista ambientale e se il life cycle thinking possa essere utile per valutare la sostenibilità ambientale e complessiva delle politiche di economia circolare, tramite un breve caso studio relativo al piano nazionale di ripresa e resilienza italiano. Il secondo obiettivo è illustrare come le tecniche di comunicazione possano influenzare sensibilmente le scelte strategiche di interlocutori non esperti. I risultati dello studio evidenziano che riflettere su questi aspetti è rilevante per analizzare criticamente le politiche ambientali. Alcuni studi di life cycle thinking suggeriscono infatti che, se determinate condizioni non vengono garantite, lo spostamento degli impatti, gli effetti boomerang in campo ambientale e sociale e alcune azioni trasversali possono annullare i vantaggi delle strategie circolari in termini di sostenibilità complessiva. In questo contesto, l'uso di un unico indicatore di circolarità potrebbe non essere appropriato per mostrare la complessità degli aspetti coinvolti in differenti scenari di gestione. Alcuni sviluppi futuri per la ricerca teorica e applicata per diversi stakeholders sono dunque proposti.

Parole chiave: economia circolare, analisi del ciclo di vita, sviluppo sostenibile, effetti boomerang, cruscotti di sostenibilità.

THE USE OF LIFE CYCLE THINKING TO ASSESS THE SUSTAINABILITY OF CIRCULAR ECONOMY POLICIES

Abstract – Sustainable development pursues economic growth, social equity, and environmental care for present and future generations. However, several indicators have been proposed in the last decades to measure sustainability improvements and a shared consensus on them is not yet reached by international research. At the same time, measurements of advantages of circular economy policies are not doubtless in all scenarios. Life cycle assessment is a tool,

defined in the ISO standards of the 14040 series, that permits to investigate the environmental impacts from cradle to grave in processes, products, organisations, and territories. In the last years, many studies have also investigated life cycle sustainability, including social and economic issues, in a more comprehensive analysis. The first aim of this work is to illustrate the recent literature on these three interrelated themes – environmental sustainability, circular economy, and life cycle assessment – investigating whether circularity is always positive from an environmental point of view. For this purpose, the environmental and overall sustainability of circular economy policies is investigated by using life cycle thinking in a short case study in the recent national recovery plan. The second aim of this work is to illustrate how different communication strategies can lead to different preferability conclusions for non-expert stakeholders. The results of the study show that reflecting critically on these aspects is particularly relevant to analyse policies that are proposed as more sustainable than others and that influence large investments. In the last years, some life cycle thinking studies have suggested that the presence of environmental and social rebound effects may nullify the advantages of circular strategies. In fact, even if a scenario allows a diminution of the use of raw material at the recycling stage, the same scenario often shows an increment of another impact in the whole supply chain. In this context, the use of a single circularity indicator might be not appropriate to show the complexity of impacts involved. The life cycle thinking approach is useful to assess the sustainability of circular economy policies. In fact, waste technologies, territorial management, and treatment scenarios can be critically investigated in a life cycle perspective. Social and economic aspects can be included as well by using life cycle costing, social life cycle and life cycle sustainability tools. The monitoring process and the strategic direction can be assessed, and the true sustainability of policies can be discussed. This is particularly triggering for national and international choices that influence investments of people and states. Since policies of sustainability might be defined by politicians and evaluated by citizens, the scientific results of complex studies need to be communicated in an easy way. The dashboards of sustainability permit summarising data using a range of colours that change according to environmental performances of compared scenarios. Dashboards have been used for sustainable development goals, but also for life cycle sustainability data. In this work we suggest the use of dashboard – or similar methods – to illustrate results of comparative scenarios in order to highlight the pros and cons of different choices, to maintain all impacts, and to have a picture

* Per contatti: Via Marzolo 9, 35131, Padova, Italy. Tel. 049 8275539. E-mail: daniela.camana@phd.unipd.it

of rebound effects from an impact to another one. This analysis suggests continuing to enhance the theoretical research activities launched at the international level to define indicators that monitor the effects of policies by contemplating all aspects of sustainability from a life cycle perspective. At the same time, it emerges the importance to increase the awareness of all stakeholders on the complexity of environmental choices, promoting the development of transparent and comprehensive communication tools.

Keywords: *circular economy, life cycle thinking, sustainable development, rebound effects, sustainability dashboards.*

Ricevuto il 2-4-2021. Modifiche sostanziali richieste il 21-5-2021. Correzioni richieste il 1-7-2021. Accettazione il 2-7-2021.

1. INTRODUZIONE

La promozione sinergica di crescita economica, tutela dell'ambiente e coesione sociale per le generazioni presenti e future è la base concettuale dello sviluppo sostenibile (WCED, 1987; Mensah, 2019). A livello internazionale, nazionale, e locale, i 17 obiettivi di sviluppo sostenibile, comunemente noti come Sustainable Development Goals (SDGs), con annessi traguardi specifici multifattoriali (Wulf *et al.*, 2018) sono capillarmente diffusi e condivisi (UN, 2015). Per la quantificazione delle prestazioni di sostenibilità, molti e diversi indicatori sono stati predisposti (Mori and Christodoulou, 2012; Huertas-Valdivia *et al.*, 2020). Tuttavia, proprio a causa della sua interdisciplinarietà – ambiente, economia, società – e complessità, la misurazione dei progressi nello sviluppo sostenibile non è univoca e racchiude sempre dentro sé margini di soggettività e di discrezionalità. La definizione inoltre non è statica e prevede la costante inclusione di nuovi aspetti, quali la resilienza e l'adattamento ai cambiamenti climatici (Roostaie, Nawari and Kibert, 2019), o il progressivo perfezionamento degli obiettivi sociali, difficilmente quantificabili e misurabili (Ramos Huarachi *et al.*, 2020). Tra le politiche europee ed italiane per lo sviluppo sostenibile, l'economia circolare (EC) è considerata uno strumento cardine (EU, 2020; IT, 2021). Infatti, in un contesto di presenza di limiti planetari e di risorse scarse per gli esseri viventi (Li *et al.*, 2021), l'importanza della riduzione nell'uso massivo di materie prime e risorse naturali appare cruciale (Nuss and Blengini, 2018; Calisto Friant, Vermeulen and Salomone, 2021). Il recente piano europeo per la EC (EU, 2020) si innesta all'interno del progetto politico "Green new Deal" e prevede, a causa della limitatezza delle risorse a disposizione, la minimizzazione degli scarti in tutta la filiera produttiva; ciò può essere ottenuto trasformando i processi lineari di produzione e consumo in processi il

più possibile circolari (Ellen MacArthur Foundation, 2015). Differenti strategie di EC potrebbero però essere considerate (Merli, Preziosi and Acampora, 2018), con diversi territori di riferimento per la chiusura del ciclo (locale, regionale, nazionale o europeo ad esempio), diverse scale applicative di riferimento (dalla filiera industriale macroscopica al singolo componente di prodotto microscopico), diverso coinvolgimento degli stakeholders locali (industriali, politici, sociali), o diversa attenzione alle fasi del ciclo di vita (estrazione risorse e approvvigionamento materie prime, produzione, distribuzione, uso/riuso e manutenzione, fine vita) e quindi con diversi indicatori di monitoraggio (de Oliveira, Dantas and Soares, 2021; Harris, Martin and Diener, 2021). Ad oggi la definizione di indicatori di circolarità è fortemente dibattuta sia a livello pratico e legislativo (Comm EU 2018; ICESP, 2020; Alleanza Economia Circolare 2021), sia a livello di normazione (con l'istituzione del comitato internazionale ISO TC 323 e della Commissione tecnica italiana UNI 057), sia a livello scientifico internazionale (Moraga *et al.*, 2019; Saidani *et al.*, 2019) e diversi framework sono proposti e sviluppati.

Tra gli strumenti per la misurazione della sostenibilità e della circolarità, il life cycle assessment (LCA) appare tra i più promettenti (Sala *et al.*, 2016; Bonoli, Zanni and Serrano-Bernardo, 2021; Camana *et al.*, 2021a; Peña *et al.*, 2021). Il life cycle assessment (LCA) è una metodologia di valutazione normata negli standard internazionali (ISO, 2006; ISO, 2018a) che permette la valutazione degli aspetti e degli impatti ambientali dalla culla alla tomba di prodotti, processi, servizi. Tale metodo nel tempo si è evoluto (Guinée *et al.*, 2011; Mazzi, 2020) espandendosi verso l'analisi delle ricadute economiche (tramite il life cycle costing) o sociali (per mezzo del social life cycle) nell'intera filiera oggetto di analisi (Toniolo *et al.*, 2020). Diverse metodologie sono state sviluppate, dalle impronte ecologiche (ISO, 2018b), alle analisi di organizzazioni complesse (ISO, 2014) o territoriali (Loiseau *et al.*, 2018) fino alla valutazione della life cycle sustainability (Zamagni, Pesonen and Swarr, 2013; Visentin *et al.*, 2020). L'approccio concettuale complessivo prende il nome di life cycle thinking (LCT).

Il LCT può contribuire a valutare e misurare l'efficacia delle singole azioni previste dal recente piano europeo di EC (Camana *et al.*, 2021a), analizzare l'intera catena di prodotto, i diversi modelli di trattamento del rifiuto, gli scenari di gestione territoriale, le valutazioni strategiche di efficienza e monitoraggio della EC, intercettando le significa-

tive e positive modifiche comportamentali nella filiera produttiva (El Wali, Golroudbary and Krawslawski, 2021; Walker *et al.*, 2021).

Lo stesso LCT, pur essendo tra gli strumenti alla base delle politiche ambientali dell'Unione Europea, presenta comunque delle criticità metodologiche ed applicative, anche nel contesto della valutazione della sostenibilità delle politiche di gestione circolare (ICESP, 2021; Camana *et al.*, 2021b). Nella valutazione degli scenari, infatti, si richiede di definire in modo chiaro e trasparente i confini del sistema (Ekvall *et al.*, 2016) e le assunzioni (Weidema *et al.*, 2018), per evitare spostamenti volontari o involontari di impatti ambientali all'esterno del campo di applicazione dello studio. Risulta a tal proposito fondamentale, nelle valutazioni in ottica di ciclo di vita, avere un approccio organico, complessivo, consequenziale e inclusivo dei diversi aspetti (Camana *et al.*, 2021b; Troullaki, Rozakis and Kostakis, 2021).

2. OBIETTIVI, MATERIALI E METODI

La presente analisi ha inizialmente l'obiettivo di illustrare alcuni possibili rapporti tra sviluppo sostenibile ed economia circolare in ottica di life cycle thinking. Lo scopo è in particolare investigare se il guadagno ambientale delle strategie di economia circolare sia sempre consistente e rilevante, al punto da impegnare risorse economiche e tecnologiche per la "transizione ecologica", oppure a determinate condizioni rischi di essere, consapevolmente o inconsapevolmente, "green-washing" istituzionale o aziendale. Rispetto allo scenario lineare di partenza, lo scenario che aumenta la circolarità nell'uso delle risorse, garantisce davvero un effettivo miglioramento degli impatti ambientali? Affrontare questo dubbio è essenziale, soprattutto per quelle decisioni e strategie che non impattano solo su una singola azienda o prodotto, ma su un intero comparto o territorio. A tale scopo vengono presentati alcuni risultati di ricerche nazionali ed estere sulla sostenibilità ambientale delle politiche di EC, evidenziando alcuni possibili punti di forza e debolezza. Gli aspetti individuati in ottica di ciclo di vita vengono successivamente applicati, con un breve caso studio, al Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) italiano, nella sua sezione specificatamente dedicata all'economia circolare. Vengono per questo associati, ad ogni investimento proposto nel PNRR, alcuni studi internazionali che evidenziano aspetti critici da monitorare e viene proposto un approccio complessivo alla EC.

Poiché gli impatti ambientali degli scenari di EC sono molteplici e la gestione che minimizza la maggior parte degli aspetti è difficilmente ottenibile, una scelta per certi versi discrezionale di valore da parte del decisore e dei cittadini va comunque spesso effettuata. Il presente lavoro intende dunque, in secondo luogo, presentare alcuni metodi di trasmissione e diffusione dei dati nonché una forma semplificata della dashboard of sustainability (cruscotto di sostenibilità) come mezzo per comunicare con gli stakeholders. Verranno per questo scopo brevemente illustrati diversi modi per informare il pubblico sui risultati raggiunti in uno studio comparativo sulla gestione locale dei rifiuti.

3. IL POSSIBILE CONTRIBUTO DEL LCT PER L'ECONOMIA CIRCOLARE

3.1 Il rapporto tra sostenibilità, economia circolare e life cycle thinking

Per comprendere la relazione tra sostenibilità ed economia circolare in ottica di ciclo di vita è innanzitutto utile chiedersi quali concetti essi stessi sottintendano, e perché.

Se infatti si dà per presupposto che le politiche di economia circolare siano sostenibili in quanto garantiscono per definizione un consumo minore di materia prima, ovviamente l'economia circolare sarà un sottoinsieme della sostenibilità (Figura 1, a). Se d'altro canto invece si evidenzia che l'EC possa migliorare la sostenibilità – ambientale, economica e sociale – solo a determinate condizioni, allora i due concetti avranno un'area di intersezione, e delle aree in cui sono disgiunti (Figura 1, b). In tal caso vi saranno alcune gestioni circolari che non producono ad esempio vantaggi in termini ambientali, sociali ed economici oppure strategie di sostenibilità che non contemplano per forza l'aumento della circolarità. Qualora i due concetti – EC e sostenibilità – siano disgiunti, e portino a risultati differenti, quale dei due dovrà avere la priorità nelle scelte decisionali (Figura 1, c)?

La presente discussione si focalizza principalmente sulla dimensione ambientale della sostenibilità e sul ruolo che il LCT possa avere nel valutare la sostenibilità nella gestione circolare locale. Recenti studi di LCT evidenziano infatti come la circolarità non sempre conduca al miglioramento della sostenibilità ambientale (Niero and Rivera, 2018; Harris, Martin and Diener, 2021). Almeno tre aspetti, tra i molti possibili, devono essere considerati: spostamento degli impatti ambientali nelle diverse fasi ciclo di

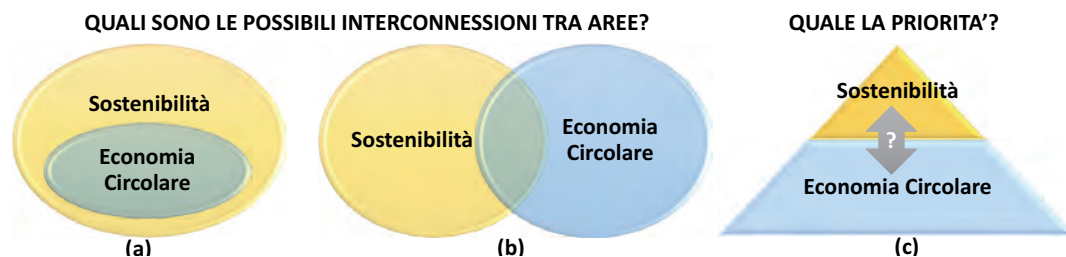


Figura 1 – Il rapporto tra sostenibilità ed economia circolare: una questione aperta

vita (estrazione risorse e approvvigionamento materie prime, produzione, distribuzione, uso/riuso e manutenzione, fine vita) e nelle matrici ambientali (risorse materiali ed energetiche, aria, acqua, suolo, rifiuti), effetti boomerang (Vivanco, Sala and McDowall, 2018; van Loon, Diener and Harris, 2021), e motivazioni trasversali (Camana *et al.*, 2021a).

Spesso, a fronte della mitigazione di un impatto ambientale in uno scenario (ad esempio il consumo di risorse o il riscaldamento globale) si assiste al concomitante incremento di un altro impatto a monte o a valle del processo considerato (ad esempio l'ecotossicità, o la perdita di biodiversità); questo fenomeno è comune negli studi di LCA e prende il nome di *burden shifting*, *trade-off*, spostamento degli impatti. Tale spostamento degli impatti può avvenire all'interno della filiera del prodotto o del rifiuto a diverso livello. Esempi noti di queste problematiche sono il consumo di suolo dovuto alle colture per i bio-carburanti (Kargbo, Harris and Phan, 2021) e le criticità gestionali ed ambientali nel fine vita dei pannelli fotovoltaici (Mahmoudi *et al.*, 2019). Valutare ad esempio la positività delle azioni di riciclo prevede anche la necessità di verificare l'entità e le emissioni dei trasporti necessari per garantire la raccolta del rifiuto differenziato e la nuova consegna del bene riciclato (De Feo *et al.*, 2016), nonché le caratteristiche di efficienza ed efficacia delle attività di riciclo stesso (Castellani, Sala and Mirabella, 2015; Grosso, Niero and Rigamonti, 2017; Cottafava *et al.*, 2021). Questo serve a garantire che non vi sia una propagazione degli impatti a livello temporale o spaziale.

In secondo luogo, per garantire che le politiche di EC siano ambientalmente sostenibili, è indispensabile monitorare e ridurre i cosiddetti effetti *boomerang*, o *rebound effects*, siano essi ambientali o sociali (Vivanco, Sala and McDowall, 2018). Non è infatti scontato ad esempio che le buone pratiche di riciclo portino il cittadino a consumare di meno (Sala *et al.*, 2016); paradossalmente alcune strategie potrebbero addirittura spingere il consumatore a considerare meno impattanti le sue scelte d'ac-

quisto, e quindi ad aumentare il consumo complessivo di materia e prodotti (Hofmann, 2019).

La valutazione della sostenibilità ambientale dei processi circolari dovrebbe infine considerare anche alcune motivazioni trasversali. L'eccessiva focalizzazione sulla promozione del riuso e del riciclo può infatti avere come effetto la diminuzione da parte dei decisori e dell'opinione pubblica dell'attenzione alla gerarchia delle pratiche di trattamento dei rifiuti (Traven, 2019) e alle attività di prevenzione (Nessi, Rigamonti and Grosso, 2015; Ghisellini *et al.*, 2019). Inoltre, quando l'approccio adottato per la EC non è sufficientemente sistemico o a lungo termine e non contempla elementi di equità e giustizia, può fallire nel suo intento di migliorare la sostenibilità complessiva, che include anche le dimensioni economica e sociale (Calisto Friant, Vermeulen and Salomone, 2021). Per garantire quindi un miglioramento della sostenibilità ambientale complessiva nella filiera, le politiche di EC dovrebbero sempre verificare, in ottica LCT, l'assenza di eventuali spostamenti degli impatti ambientali a monte o a valle del processo considerato, l'assenza di effetti boomerang significativi, l'effetto di azioni comportamentali e trasversali dovuti al cittadino, alle istituzioni o alla gestione complessiva. Una possibile proposta di integrazione tra EC e sostenibilità ambientale, in ottica LCT, è dunque riassunta nella Figura 2.

Senza la valutazione di questi tre aspetti il rischio potrebbe essere quello di promuovere delle politiche che diminuiscono il consumo di materia, ma aumentano altri impatti ambientali, non consentendo così un approccio integrato che consideri nel loro complesso tutti i limiti planetari e le istanze di prevenzione e decrescita dei consumi di risorse (Evrard *et al.*, 2021; Hoehn *et al.*, 2021). In questo contesto assume particolare rilevanza anche la valutazione degli aspetti sociali per evitare effetti boomerang. Il ruolo delle ricadute sociali, del cambiamento dei comportamenti e degli stili di vita è tuttora oggetto di approfondimento (Niero *et al.*, 2021) e appare critico per migliorare la sostenibi-

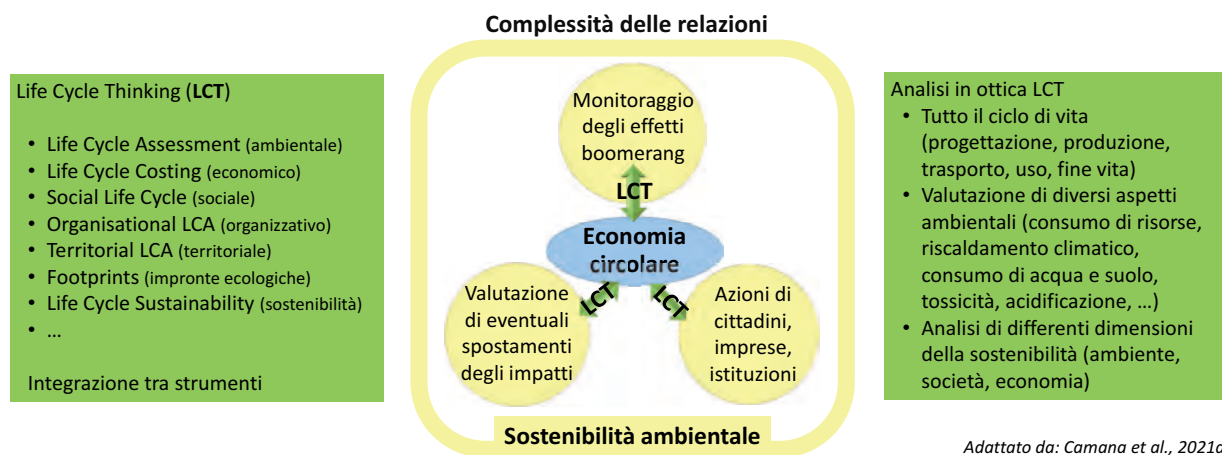


Figura 2 – Il LCT come strumento per la valutazione critica delle strategie di EC

lità sociale ed ambientale della EC (Leipold, Wel-dner and Hohl, 2021; Walker *et al.*, 2021).

3.2. Il possibile contributo del LCT per l'economia circolare nel PNRR

Il recente piano nazionale di ripresa e resilienza (PNRR), all'interno della Missione 2, "Rivoluzione verde e transizione ecologica", contempla una

sezione dedicata all'"Economia circolare e agricoltura sostenibile" (IT, 2021). Accanto alle tre riforme proposte – strategia nazionale per l'EC, piano nazionale di gestione rifiuti e supporto tecnico alle autorità locali – vengono individuate otto linee di investimento. In Tabella 1, per ciascun investimento, vengono segnalati a titolo esemplificativo alcuni studi condotti a livello nazionale, europeo ed internazionale sulle tematiche, in ottica LCT.

Tabella 1 – Esempio di uso del LCT per valutare alcuni possibili spostamenti di impatti per gli investimenti di EC previsti dal PNRR italiano

Investimento EC nel PNRR	Selezione di alcuni studi nazionali ed internazionali in ottica LCT	Esempi di uso del LCT
1.1 Realizzazione e ammodernamento degli impianti di gestione rifiuti	Verifica, insieme ad altri strumenti (Zhou <i>et al.</i> , 2011), degli impatti degli scenari di gestione dei rifiuti (Feo and Malvano, 2009), delle modifiche impiantistiche (Gehrmann, Hiebel and Simon, 2017), dei vantaggi della raccolta differenziata (De Feo <i>et al.</i> , 2021).	LCA per impianti e sistemi di gestione
1.2 Progetti "faro" di economia circolare	Valutazione degli impatti del riuso e riciclo di tessili (Sandin and Peters, 2018), apparecchiature elettriche ed elettroniche (Rinaldi, Barbanera and Lascaro, 2014), plastiche (Cossu <i>et al.</i> , 2017), carta e cartone (Vukoje and Rožić, 2018).	LCA per filiera di prodotto e rifiuto
2.1 Sviluppo logistica	Valutazione degli impatti nella pesca (Thrane, Nielsen and Christensen, 2009), o nel settore agroalimentare (Rinaldi, <i>et al.</i> , 2014; Notarnicola <i>et al.</i> , 2017).	LCA per settori produttivi
2.2 Parco Agrisolare	Applicabilità dei sistemi agrivoltaici (Leon and Ishihara, 2018) e dei sistemi di irrigazione ibridi (Todde <i>et al.</i> , 2019).	LCA per nuove tecnologie
2.3 Innovazione nel settore agricolo ed alimentare	Promozione di progetti di decrescita in tutta la filiera agroalimentare (Hoehn <i>et al.</i> , 2021) e definizione di politiche territoriali (Borghino <i>et al.</i> , 2021).	LCA per il territorio
3.1 Isole verdi	Valutazione degli impatti tramite LCA della gestione idrica locale, degli impianti di desalinizzazione, delle fonti rinnovabili (Amores <i>et al.</i> , 2013; Shahabi <i>et al.</i> , 2014).	LCA per processi e fonti rinnovabili
3.2 Green communities	Necessità di identificare indicatori robusti per valutare oggettivamente i miglioramenti e le prestazioni di sostenibilità, anche integrandoli con i sistemi di gestione territoriali (Zhou <i>et al.</i> , 2011; Mazzi <i>et al.</i> , 2017). Possibilità di utilizzare l'Organisational LCA per valutare gli impatti di un territorio (Cremer <i>et al.</i> , 2021).	LCA organizzativo e integrato con EMAS
3.3 Cultura e consapevolezza su temi e sfide ambientali	Promozione della modifica dei comportamenti personali che hanno maggior impatto ambientale (Kalbar <i>et al.</i> , 2016; Clark and Tilman, 2017). Verifica dei comportamenti del consumatore nelle diverse fasi del ciclo di vita (Polizzi di Sorrentino, Woelbert and Sala, 2016).	Social LCA, valutazione della sostenibilità complessiva (life cycle sustainability)

Tabella 2 – Una proposta per il passaggio dall'Economia Circolare alla Sostenibilità tramite l'approccio LCT

Riferimento	Domanda relativa allo scenario di Economia Circolare proposto
EC	Lo scenario di EC prevede la riduzione dell'uso di risorse materiali per il prodotto/servizio oggetto dell'analisi? Lo scenario di EC prevede la riduzione dell'uso di risorse materiali anche per i prodotti/servizi ausiliari e connessi?
LCA	Lo scenario di EC genera un aumento degli impatti ambientali (consumi di energia per impianti e trasporti, tossicità di sostanze o rifiuti, consumo d'acqua o di suolo, acidificazione, eutrofizzazione, assottigliamento dello strato di ozono, rilascio di microplastiche o sostanze persistenti, odore, smog fotochimico, etc.) a monte o a valle del processo considerato? Tali impatti sono rilevanti?
LCT	Lo scenario di EC presenta effetti boomerang in campo sociale (ad esempio comportamento dei consumatori poco orientato alla prevenzione dei consumi) o economico (ad esempio necessità di incentivi troppo consistenti)?
Sostenibilità	Lo scenario di EC diminuisce complessivamente l'uso massiccio di risorse ed energia, l'impronta dell'uomo sull'ambiente nelle diverse matrici ambientali e nei diversi impatti, orienta una crescita sostenibile economicamente e socialmente all'interno dei molteplici confini planetari? Le migliori complessive ottenibili giustificano lo sforzo profuso o altre strategie potrebbero essere più efficaci? Quali integrazioni alle strategie di EC sono necessarie per aumentare la sostenibilità?

La Tabella 1 non ha pretese di esaustività, ma costituisce solo una sintesi dei contenuti di alcuni studi e può essere approfondita ed integrata in future analisi, per ciascun investimento. L'obiettivo del presente studio è infatti definire un quadro all'interno del quale utilizzare l'approccio LCT. La valutazione del ciclo di vita sarebbe dunque in grado di suggerire punti di debolezza ed opportunità nei diversi investimenti per evitare spostamenti di impatti, rebound effect, o criticità trasversali, così come la stessa Unione Europea suggerisce per il raggiungimento degli obiettivi ambientali finanziabili (artt. 16 e 17 del Regolamento UE 852/2020). Tale area di ricerca può dunque essere particolarmente promettente dal punto di vista teorico e pratico. In Tabella 2 vengono riportate alcune domande progressive che possono esemplificare il metodo proposto.

Tale approccio è generalizzabile a diversa scala: lo scenario di EC può infatti comprendere politiche territoriali complesse, ma anche strategie di filiera, scelte industriali, o modifiche impiantistiche, di processo, di prodotto o di rifiuto. Verificare le reali aree di intersezione tra EC e sostenibilità, con questo approccio e senza preconcetti, è quindi proponibile ed auspicabile per tutti i livelli di azione.

4. LA COMUNICAZIONE TRASPARENTE DEI RISULTATI NEGLI STUDI COMPARATIVI

Per poter integrare efficacemente le rigorose e complesse valutazioni di LCT all'interno delle politiche di EC è essenziale, inoltre, trovare delle forme di semplificazione sia degli studi di LCT sia della comunicazione dei risultati, senza perdere al contempo l'affidabilità scientifica del metodo. La comuni-

cazione scientifica chiara dei risultati tecnici riveste ad oggi sempre più importanza al fine di avvicinare la percezione soggettiva del cittadino o del decisore ai dati scientifici oggettivi (Otto *et al.*, 2021).

Ciò può essere ottenuto semplificando i risultati in uno, due o tre aspetti rilevanti – ad esempio circolarità, riscaldamento globale, ecotossicità. A livello di immediatezza comunicativa la cernita di alcuni impatti significativi è sicuramente vincente – e forse risiede anche qui la fortuna degli indicatori di circolarità e della carbon footprint (Prieto-Sandoval, Jaca and Ormazabal, 2018; Wu *et al.*, 2021) –, ma non consente di visualizzare in modo complessivo gli effetti sull'intero ecosistema, e quindi rischia di essere fuorviante se l'obiettivo è individuare con senso critico lo scenario più sostenibile, lo spostamento degli impatti, gli effetti boomerang e gli effetti trasversali.

La visualizzazione dei risultati tramite dashboard (Scipioni *et al.*, 2009; Traverso *et al.*, 2012) o strumenti analoghi potrebbe essere maggiormente incisiva per visualizzare la complessità degli aspetti coinvolti nelle decisioni strategiche ambientali.

Le Figura 3 presenta diversi metodi di comunicazione degli stessi risultati di uno studio di LCA. Il caso studio oggetto dell'analisi (Camana, 2004) compara tre scenari di gestione dell'indifferenziato dei rifiuti urbani, tramite discarica, termovalorizzazione o combustibile da rifiuto (CDR), senza computare il vantaggio ambientale del recupero energetico. Analoghe rappresentazioni potrebbero essere sviluppate per la comparazione di prodotti, processi, tecnologie e territori in ottica LCT.

Solitamente negli studi di LCA i risultati vengono restituiti con grafici a colonne che visualizzano tutti gli impatti ambientali nei diversi scenari considerati (Figura 3a).

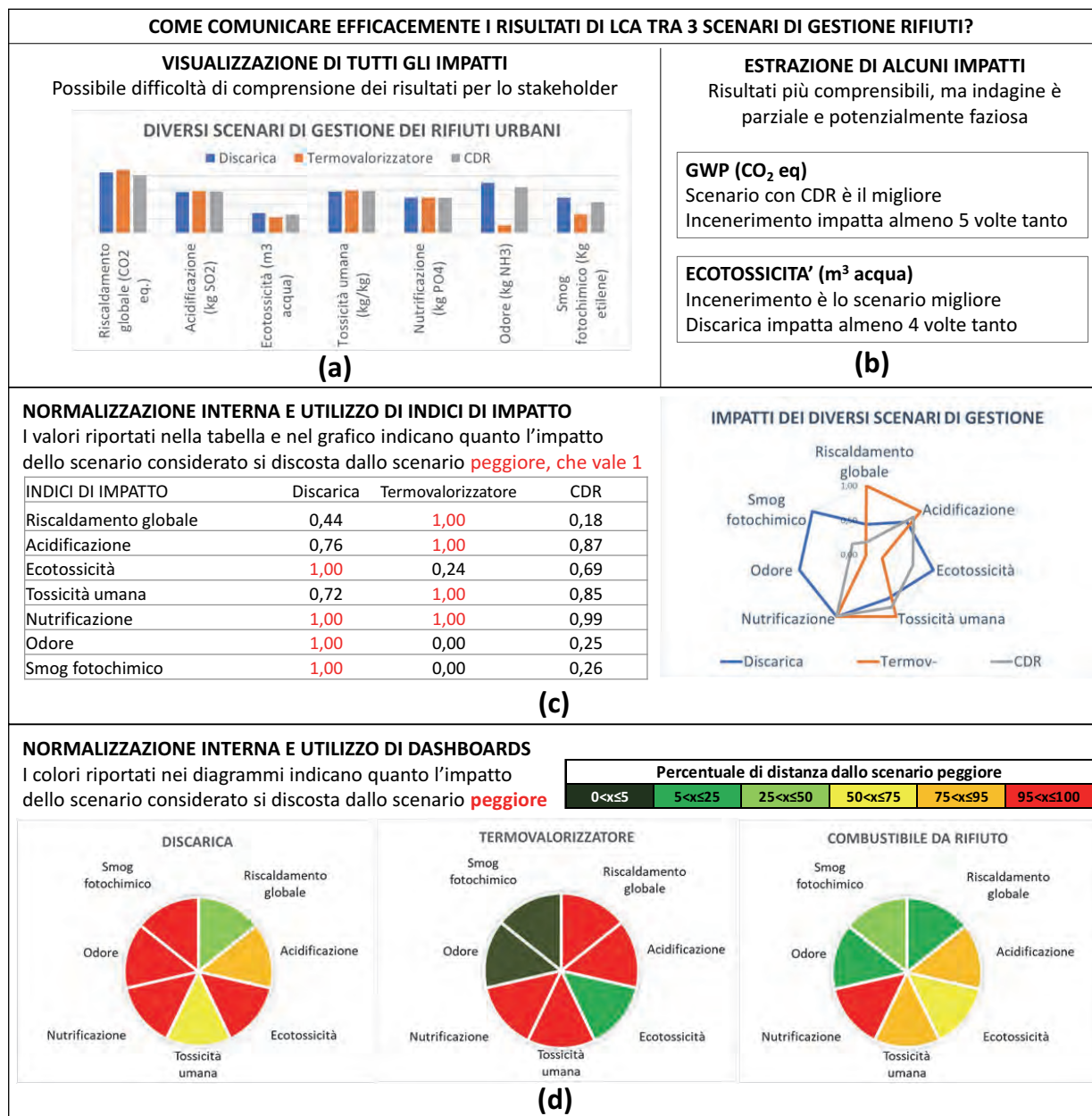


Figura 3 – Possibili strategie alternative per la comunicazione dei risultati degli studi di LCA

È altresì possibile estrarre solo alcuni impatti ambientali (Figura 3b); questa soluzione è di immediata comprensibilità e consente di focalizzarsi sugli aspetti ritenuti più rilevanti (ad esempio il cambiamento climatico, istanza particolarmente urgente) ma non fotografa la complessità dell'analisi. Un'altra opzione può essere quella di normalizzare i risultati in funzione dello scenario peggiore (Figura 3c); per ogni impatto, allo scenario peggiore si attribuisce il valore 1, e gli altri vengono proporzionalmente scalati, dividendo il valore dell'impatto per l'impatto nello scenario peggiore. I dati ottenuti possono essere restituiti in tabelle o grafici. Un ulteriore metodo di comunicazione prevede l'uso delle dashboards (Figura 3d). Anche in questo caso

i valori sono normalizzati allo scenario peggiore (valutato 100%), mentre gli altri sono scalati in percentuale. Viene successivamente costruito un cruscotto, in forma di cerchio, nel quale negli spicchi sono riportati gli impatti colorati (verde, giallo, arancione, in diverse sfumature) in funzione del loro rapporto (impatto considerato/impatto peggiore) con lo scenario peggiore (evidenziato in rosso). Queste rappresentazioni (Figura 3 a, c, d) che contemplano diversi impatti ambientali consentono di monitorare visivamente gli eventuali spostamenti di aspetti critici da uno scenario all'altro. L'indicatore di circolarità o di linearità (Rufi-Salís *et al.*, 2021), e altri indicatori economici, sociali, o di sostenibilità possono essere analogamente integrati

nei grafici, consentendo una visione più completa (e non solo ambientale) in ottica LCT.

Il modo di comunicare i risultati scientifici, anche in materia di EC, non è pertanto neutro. È molto diffusa la scelta di selezionare solo alcuni aspetti per comunicarli al pubblico, ad esempio la circolarità dei processi o il riscaldamento climatico; questa selezione di aspetti è spesso dettata dalla volontà di semplificazione o dall'esigenza di illustrare le istanze più urgenti o maggiormente percepite dagli stakeholders. Tale scelta tuttavia può essere, consapevolmente o inconsapevolmente, parziale e fuorviante in quanto non considera la multifattorialità degli aspetti ambientali e di sostenibilità coinvolti nel ciclo di vita. Di conseguenza, le diverse tecniche di comunicazione possono indirizzare in modo differente le decisioni strategiche di interlocutori non esperti.

5. CONCLUSIONI

La sostenibilità ambientale e complessiva delle strategie circolari necessita di essere obiettivamente monitorata tramite indicatori affidabili. Il presente lavoro illustra come un approccio di life cycle thinking possa contribuire a valutare i possibili spostamenti di impatti tra diverse fasi del ciclo di vita, monitorare gli effetti boomerang e intercettare le ricadute sociali, organizzative, territoriali, e di filiera. Ciò può essere valido sia per i progetti locali, sia per gli investimenti contenuti nel recente piano nazionale di ripresa e resilienza italiano. Lo studio evidenzia inoltre come gli strumenti di comunicazione dei risultati basati su un'osservazione complessiva degli aspetti di sostenibilità consentano un approccio più trasparente ed onnicomprensivo, rispetto alla riduzione a un numero limitato di aspetti. Per aumentarne l'efficacia dei progetti di economia circolare, l'analisi delle possibili debolezze andrebbe approfondita, sia a livello teorico sia applicativo. A questo scopo, ulteriori metodologie di analisi, che contemplino anche le ricadute comportamentali del singolo e delle reti, potrebbero essere integrate. Strategie di comunicazione chiare e multi-settoriali andrebbero inoltre promosse e approfondite. Tali progressi sono auspicabili non solo per la comunità scientifica, ma anche per i decisori, le aziende, le parti sociali e i singoli cittadini. In un contesto di limiti planetari e di risorse scarse per gli esseri viventi il ruolo di una valutazione scientifica in ottica di ciclo di vita, indipendente da interessi pubblici o privati, nonché di una comunicazione efficace e trasparente, sono infatti tecnicamente ed eticamente fondamentali per una crescita – o decrescita – davvero sostenibili.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Alleanza economia circolare, 2021. Quaderno.1 Misurare la circolarità: coniugare approcci globali, nazionali e aziendali. Disponibile su: <https://www.alleanzaeconomiacircolare.it/#documenti>
- Amores M.J. et al. (2013) 'Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 43, pp. 84-92.
- Avesani M. (2020) *Sustainability, sustainable development, and business sustainability, Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making*. Elsevier Inc
- Bonoli A., Zanni S. and Serrano-Bernardo F. (2021) 'Sustainability in building and construction within the framework of circular cities and european new green deal. The contribution of concrete recycling', *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), pp. 1-16.
- Borghino N. et al. (2021) 'Contribution of LCA to decision making: A scenario analysis in territorial agricultural production systems', *Journal of Environmental Management*, 287(February).
- Calisto Friant M., Vermeulen W.J.V. and Salomone R. (2021) 'Analysing European Union circular economy policies: words versus actions', *Sustainable Production and Consumption*. Elsevier B.V., 27, pp. 337-353.
- Camana D. (2004). 'Assessing the environmental sustainability of thermal treatment options in integrated municipal solid waste management: the case of Treviso Province'. Università degli Studi di Padova. Anno accademico 2002/2003. Tesi di laurea in Ingegneria Chimica.
- Camana D. et al. (2021a) 'Assessing environmental sustainability of local waste management policies in Italy from a circular economy perspective: an overview of existing tools', *Sustainable Production and Consumption*. Elsevier B.V., 27, pp. 613-629.
- Camana D. et al. (2021b) 'Life cycle assessment applied to waste management in Italy: A mini-review of characteristics and methodological perspectives for local assessment', *Waste Management and Research*.
- Castellani V., Sala S. and Mirabella N. (2015) 'Beyond the Throwing Society: A Life Cycle-Based Assessment of the Environmental Benefit of Reuse', *Integrated Environmental Assessment and Management*. [Castellani, Valentina Mirabella, Nadia] Univ Milano Bicocca, Res Unit Sustainable Dev GRIS, Dept Earth & Environm Sci, Milan, Italy. [Sala, Serenella] Commiss European Communities, Joint Res Ctr, I-21020 Ispra, Italy. Castellani, V (reprint author), Uni, 11(3), pp. 373-382.
- Clark M. and Tilman D. (2017) 'Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice', *Environmental Research Letters*, 12(6).
- COMM EU, 2018. Comunicazione della commissione al parlamento europeo, al consiglio, al comitato economico e sociale europeo e al comitato delle regioni relativa al quadro di monitoraggio per l'economia circolare. Strasburgo, 16.1.2018 COM (2018) 29.
- Cossu R. Garbo F. Giroto F. Simion F. Pivato A. (2017) 'PLA-SMIX management: LCA of six possible scenarios', *Waste Management*. 69, pp. 567-576.
- Cottafava D. et al. (2021) 'Assessment of the environmental break-even point for deposit return systems through an LCA analysis of single-use and reusable cups', *Sustainable Production and Consumption*. Elsevier B.V., 27, pp. 228-241.
- Cremer A. et al. (2021) 'The first city organizational LCA case study: Feasibility and lessons learned from vienna', *Sustainability (Switzerland)*, 13(9), pp. 1-15.
- Ekvall T. et al. (2016) 'Attributional and consequential LCA in the ILCD handbook', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(3), pp. 293-296.

- Evrard D. *et al.* (2021) 'Designing immortal products: A lifecycle scenario-based approach', *Sustainability (Switzerland)*, 13(6).
- De Feo G. *et al.* (2016) 'LCA of the collection, transportation, treatment and disposal of source separated municipal waste: A Southern Italy case study', *Sustainability (Switzerland)*. Department of Industrial Engineering (DIIN), University of Salerno, Via Giovanni Paolo II 132, Fisciano (Sa), 84084, Italy: MDPI AG, 8(11).
- De Feo G. *et al.* (2021) 'A procedure to assess the environmental, social and economic benefits wasted in the paper and cardboard fraction of the unsorted residual waste', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 296, p. 126566.
- Ellen MacArthur Foundation (2015). Growth within: a Circular Economy Vision for a Competitive Europe. Ellen MacArthur Found. Disponibile su: <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/2016-11-28-assessment-prof-guenther-schulze-of-report-growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe.pdf>
- El Wali M., Golroudbary S.R. and Kraslawski A. (2021) 'Circular economy for phosphorus supply chain and its impact on social sustainable development goals', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 777, p. 146060.
- European Union (2020). Circular Economy Action Plan. For a cleaner and a more competitive Europe. Disponibile su: https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm
- Feo G. De and Malvano C. (2009) 'The use of LCA in selecting the best MSW management system', *Waste Management*. Elsevier Ltd, 29(6), pp. 1901-1915.
- Gehrmann H.J., Hiebel M. and Simon F.G. (2017) 'Methods for the Evaluation of Waste Treatment Processes', *Journal of Engineering (United Kingdom)*, 2017.
- Ghisellini P. *et al.* (2019) 'Circular patterns of waste prevention and recovery', in Tartaglia A.C.M. (ed.) *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences.
- Grosso M., Niero M. and Rigamonti L. (2017) 'Circular economy, permanent materials and limitations to recycling: Where do we stand and what is the way forward?', *Waste Management and Research*. AWARE (Assessment on WASTE and REsources) Research Group, Politecnico di Milano, Milan, Italy: SAGE Publications Ltd, 35(8), pp. 793-794.
- Guinée J. B. *et al.* (2011) 'Life cycle assessment: Past, present, and future', *Environmental Science and Technology*, 45(1), pp. 90-96.
- Harris S., Martin M. and Diener D. (2021) 'Circularity for circularity's sake? Scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy.', *Sustainable Production and Consumption*. Elsevier B.V., 26, pp. 172-186.
- Hoehn D. *et al.* (2021) 'Introducing a degrowth approach to the circular economy policies of food production, and food loss and waste management: Towards a circular bioeconomy', *Sustainability (Switzerland)*, 13(6).
- Hofmann F. (2019) 'Circular business models: Business approach as driver or obstructer of sustainability transitions?', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 224, pp. 361-374.
- Huertas-Valdivia I. *et al.* (2020) 'Social life-cycle assessment: A review by bibliometric analysis', *Sustainability (Switzerland)*, 12(15), pp. 1-25.
- ICESP, 2020. Strumenti per la misurazione dell'economia circolare. Report 2020. Disponibile su: <https://www.icesp.it/GdL/3>
- ISO 14040 (2006) Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principle and guidelines. International Organization for Standardization ISO, Geneva, p2006.
- ISO 14044 (2018a) Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization ISO, Geneva, p2018.
- ISO 14067 (2018b) Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification. International Organization for Standardization ISO, Geneva, p2018.
- ISO/TS 14072 (2014) Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines for organizational life cycle assessment International Organization for Standardization ISO, Geneva, p2014.
- IT, 2021. Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza “ Next Generation Italia ”. Italia. Testo presentato al Senato della Repubblica Italiana (IT) il 25.04.2021. Disponibile su: <https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNRR.pdf>
- Kalbar P.P. *et al.* (2016) 'Personal Metabolism (PM) coupled with Life Cycle Assessment (LCA) model: Danish Case Study', *Environment International*. Elsevier Ltd, 91, pp. 168-179.
- Kargbo H., Harris J.S. and Phan A.N. (2021) ““Drop-in” fuel production from biomass: Critical review on techno-economic feasibility and sustainability”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135.
- Leipold S., Weldner K. and Hohl M. (2021) 'Do we need a “circular society”? Competing narratives of the circular economy in the French food sector', *Ecological Economics*. Elsevier B.V., 187, p. 107086.
- Leon A. and Ishihara K.N. (2018) 'Assessment of new functional units for agrivoltaic systems', *Journal of Environmental Management*. Elsevier, 226(August), pp. 493-498.
- Li M. *et al.* (2021) 'The role of planetary boundaries in assessing absolute environmental sustainability across scales', *Environment International*, 152.
- Loiseau, Eleonore Roux, Philippe (2018) 'Territorial Life Cycle Assessment (LCA): What exactly is it about? A proposal towards using a common terminology and a research agenda', *Journal of Cleaner Production*. 176, pp. 474-485.
- van Loon P., Diener D. and Harris S. (2021) 'Circular products and business models and environmental impact reductions: Current knowledge and knowledge gaps', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 288, p. 125627.
- Mahmoudi S. *et al.* (2019) 'End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review', *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier, 146(October 2018), pp. 1-16.
- Mazzi A. *et al.* (2017) 'The combination of an Environmental Management System and Life Cycle Assessment at the territorial level', *Environmental Impact Assessment Review*, 63, pp. 59-71.
- Mazzi A. (2020) 'Introduction. Life cycle thinking', *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making*, pp. 1-19.
- Mensah J. (2019) 'Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review', *Cogent Social Sciences*. Cogent, 5(1).
- Merli R., Preziosi M. and Acampora A. (2018) 'How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 178, pp. 703-722.
- Moraga G. *et al.* (2019) 'Circular economy indicators: What do they measure?', *Resources, Conservation and Recycling*, 146, pp. 452-461.
- Mori K. and Christodoulou A. (2012) 'Review of sustainability indices and indicators: Towards a new City Sustainability Index (CSI)', *Environmental Impact Assessment Review*. Elsevier Inc., 32(1), pp. 94-106.
- Nessi S., Rigamonti L. and Grosso M. (2015) 'Packaging waste prevention activities: A life cycle assessment of the effects on a regional waste management system', *Waste Management and Research*. Department of Civil and Environmental Engineering, Environmental Section, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, Milano, 20133, Italy: SAGE Publications Ltd, 33(9), pp. 833-849.
- Niero M. *et al.* (2021) 'Is life cycle assessment enough to address unintended side effects from Circular Economy initiatives?', *Journal of Industrial Ecology*.
- Niero M. and Rivera X.C.S. (2018) 'The Role of Life Cycle Sustainability Assessment in the Implementation of Circular

- Economy Principles in Organizations', *Procedia CIRP*. The Author(s), 69(May), pp. 793-798.
- Notarnicola B. *et al.* (2017) 'The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges', *Journal of Cleaner Production*, 140, pp. 399-409.
- Nuss P. and Blengini G.A. (2018) 'Towards better monitoring of technology critical elements in Europe: Coupling of natural and anthropogenic cycles', *Science of the Total Environment*. European Commission, Joint Research Centre (JRC), Directorate D – Sustainable Resources, Ispra, 21027, Italy: Elsevier B.V., 613–614, pp. 569-578
- de Oliveira C.T., Dantas T.E.T. and Soares S.R. (2021) 'Nano and micro level circular economy indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments', *Sustainable Production and Consumption*. Elsevier B.V., 26, pp. 455-468.
- Otto S. *et al.* (2021) 'Food packaging and sustainability – Consumer perception vs. correlated scientific facts: A review', *Journal of Cleaner Production*, 298.
- Peña C. *et al.* (2021) 'Using life cycle assessment to achieve a circular economy', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(2), pp. 215-220.
- Polizzi di Sorrentino E., Woelbert E. and Sala S. (2016) 'Consumers and their behavior: state of the art in behavioral science supporting use phase modeling in LCA and ecodesign', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(2), pp. 237-251.
- Prieto-Sandoval V., Jaca C. and Ormazabal M. (2018) 'Towards a consensus on the circular economy', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 179, pp. 605-615.
- Ramos Huarachi D.A. *et al.* (2020) 'Past and future of Social Life Cycle Assessment: Historical evolution and research trends', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 264, p. 121506.
- Rinaldi S., Barbanera M. and Lascaro E. (2014) 'Assessment of carbon footprint and energy performance of the extra virgin olive oil chain in Umbria, Italy', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 482-483(1), pp. 71-79.
- Roostaie S., Nawari N. and Kibert C.J. (2019) 'Sustainability and resilience: A review of definitions, relationships, and their integration into a combined building assessment framework', *Building and Environment*. Elsevier, 154(November 2018), pp. 132-144.
- Rufi-Salis M. *et al.* (2021) 'Combining LCA and circularity assessments in complex production systems: the case of urban agriculture', *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier B.V., 166(December 2020), p. 105359.
- Saidani M. *et al.* (2019) 'A taxonomy of circular economy indicators', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 207, pp. 542-559.
- Sala S. *et al.* (2016) *Life cycle assessment for the impact assessment of policies. Life thinking and assessment in the European policies and for evaluating policy options*, Joint Research Centre.
- Sandin G. and Peters G.M. (2018) 'Environmental impact of textile reuse and recycling – A review', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 184, pp. 353-365.
- Shahabi M.P. *et al.* (2014) 'Environmental life cycle assessment of seawater reverse osmosis desalination plant powered by renewable energy', *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 67, pp. 53-58.
- Thrane M., Nielsen E.H. and Christensen P. (2009) 'Cleaner production in Danish fish processing – experiences, status and possible future strategies', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 17(3), pp. 380-390.
- Todde G. *et al.* (2019) 'Energy and environmental performances of hybrid photovoltaic irrigation systems in Mediterranean intensive and super-intensive olive orchards', *Science of the Total Environment*. The Authors, 651, pp. 2514-2523.
- Toniolo S. *et al.* (2020) *Life cycle thinking tools: Life cycle assessment, life cycle costing and social life cycle assessment*, *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making*. Elsevier Inc.
- Traven L. (2019) 'Circular economy and the waste management hierarchy: Friends or foes of sustainable economic growth? A critical appraisal illustrated by the case of the Republic of Croatia', *Waste Management and Research*, 37(1), pp. 1-2.
- Troullaki K., Rozakis S. and Kostakis V. (2021) 'Bridging barriers in sustainability research: A review from sustainability science to life cycle sustainability assessment', *Ecological Economics*. Elsevier B.V., 184(December 2020), p. 107007.
- UE, 2020. Regolamento (UE) 2020/852 del Parlamento europeo e del Consiglio del 18 giugno 2020 relativo all'istituzione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili e recante modifica del regolamento (UE) 2019/2088
- UN General Assembly. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015: Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: United Nations, 2015
- Visentin C. *et al.* (2020) 'Life cycle sustainability assessment: A systematic literature review through the application perspective, indicators, and methodologies', *Journal of Cleaner Production*, 270.
- Vivanco D.F., Sala S. and McDowall W. (2018) 'Roadmap to rebound: How to address rebound effects from resource efficiency policy', *Sustainability (Switzerland)*. MDPI AG, 10(6).
- Vukoje M. and Rožić M. (2018) 'Various valorisation routes of paper intended for recycling – A review', *Cellulose Chemistry and Technology*, 52(7-8), pp. 515-541.
- Walker A.M. *et al.* (2021) 'Assessing the social sustainability of circular economy practices: Industry perspectives from Italy and the Netherlands', *Sustainable Production and Consumption*, 27, pp. 831-844.
- WCED (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Our Common Future. Oxford University Press, Oxford. Disponibile su: <https://sustainabledevelopment.un.org/milestones/wced>
- Weidema B.P. *et al.* (2018) 'Attributional or consequential Life Cycle Assessment: A matter of social responsibility', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 174, pp. 305-314.
- Wu L. *et al.* (2021) 'A planetary boundary-based environmental footprint family: From impacts to boundaries', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 785, p. 147383.
- Wulf C. *et al.* (2018) 'Sustainable Development Goals as a Guideline for Indicator Selection in Life Cycle Sustainability Assessment', *Procedia CIRP*. The Author(s), 69(May), pp. 59-65.
- Yang Z. *et al.* (2020) 'Greenwashing behaviours: Causes, taxonomy and consequences based on a systematic literature review', *Journal of Business Economics and Management*, 21(5), pp. 1486-1507.
- Zamagni A., Pesonen H.L. and Swarr T. (2013) 'From LCA to Life Cycle Sustainability Assessment: Concept, practice and future directions', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(9), pp. 1637-1641.
- Zhou C. *et al.* (2011) 'Indicators for evaluating sustainable communities: A review', *Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica*, 31(16), pp. 4750-4759.

NOTE

Il lavoro descritto nell'articolo è stato presentato durante la quinta edizione della Giornata di studio "Rifiuti e Life Cycle Thinking" tenutasi online il 9 marzo 2021 e organizzata e coordinata dal gruppo di ricerca "AWARE" (Assessment on Waste and Resources) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano in collaborazione con il Gruppo di Lavoro "Gestione e Trattamento dei Rifiuti" dell'Associazione Rete Italiana LCA.

CHOMGENIUS COME ESEMPIO DI SMART SHIPPING CONTAINER BUILDING, TRA ECONOMIA CIRCOLARE E INNOVAZIONE

Elisabetta Ginelli¹, Gianluca Pozzi¹, Giulia Vignati^{1*}

¹ Politecnico di Milano, Dip. ABC, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito.

Sommario – Il progetto “cHOMgenius. Prototype-System and SharedProject. Soluzioni straordinarie per l'abitare intelligente” propone un sistema costruttivo modulare. Esso sperimenta soluzioni progettuali, tecniche costruttive, strutturali ed impiantistiche per abitazioni OFFGRID a controllo domotizzato, gestite da tools digitali informatizzati con relativi strumenti di verifica e monitoraggio, in una logica di completa smontabilità, riuso e riciclo secondo le più recenti direttive europee. Il progetto, che vede come Partner insieme al dipartimento ABC del Politecnico di Milano e due aziende lombarde, si avvale del sostegno di venti aziende nazionali ed internazionali e dell'UNI – Ente Italiano di Normazione. La risultante di cHOMgenius è un prototipo realizzato a fine 2020. Il sistema è costituito da soluzioni tecnico-costruttive interamente “a ser-raggio”, da soluzioni gestionali/energetiche in uso di tipo digitale, da innovative soluzioni di avanzata manutenibilità per la sicurezza antisismica e la sostenibilità economica, in rapporto alle elevate prestazioni energetiche offerte e alle soluzioni tecniche adottate. cHOMgenius si inserisce all'interno degli Shipping Container Building: questo lo colloca a pieno nell'ambito dell'economia circolare, con il riuso di container HC 20' e 40' costruiti in acciaio corten, utilizzati come struttura portante del sistema abitativo. Il prototipo è oggetto di una valutazione LCA, i cui esiti ed illustrazione della metodologia sono stati trattati in modo dettagliato nell'articolo dedicato parallelo al presente e presentato in questa rivista (S. Giorgi, M. Lavagna, E. Ginelli, “Valutazione LCA di un edificio realizzato con container per trasporti marittimi riusati”). L'obiettivo di questo contributo è di fornire un inquadramento sullo stato dell'arte dello Shipping Container Building e presentare soluzioni non convenzionali testate con la realizzazione del prototipo per illustrare possibili direzioni per il settore delle costruzioni in relazione al tema dell'economia circolare. In particolare nella progettazione e realizzazione del prototipo l'applicazione del concetto delle 3R ha permesso di verificare (analizzando anche le criticità emerse durante la costruzione) e rendere tangibile il raggiungimento di: i) una riduzione di materiale in termini di quantità, energia grigia, tempo, con un miglior utilizzo dei prodotti, imprimendo loro un carattere di multifunzionalità; ii) il riciclo di prodotti e materiali, attraverso l'utilizzo della tecnologia a secco, con la scelta di materiali disaccoppiabili per evitare non solo costi di separazione, spesso antieconomici, ma

per evitare cicli industriali inquinanti per il loro riciclo; iii) il riutilizzo/riuso, qui inteso come il più evidente plus della filiera circolare, perché considerato sinonimo di moltiplicazione della vita dei prodotti.

Parole chiave: progetto per la residenza, disassemblaggio, eco-efficienza, riduzione, riuso.

CHOMGENIUS AS AN EXAMPLE OF SMART SHIPPING CONTAINER BUILDING, BETWEEN CIRCULAR ECONOMY AND INNOVATION

Abstract – The project “cHOMgenius. Prototype-System and SharedProject. Soluzioni straordinarie per l'abitare intelligente” proposes a modular constructional system and experiments design solutions, construction techniques, structural and plant engineering for OFFGRID dwellings with home automation control, managed by digital tools with relevant verification and monitoring instruments, in a logic of complete disassembly, reuse and recycling according to the most recent European directives. The project, which includes as partners two Lombard companies with ABC Department of Politecnico di Milano, avails itself of the support of twenty national and international companies and UNI – Ente Italiano di Normazione and the resultant is the a prototype of a system of solutions for OFFGRID dwelling, with the realized of a living space at the end of 2020, in which to experiment the reuse of the container HC 40 'as a structural element of transfer, with implementation of structural and anti-seismic checks, characterized by maximum flexibility and customization in typological solutions, in housing cuts and in facade and finishing solutions, also thanks to a design for industrialization (reduction of design costs and guarantee of the result) based on technologies and recycling of primary / secondary resources (maintainability, disassembly, selective disposal ...) with a high degree of customization (response to multiple user targets), for a reduction in construction times (installation in situ with predefined rules of the game) and management control in use. cHOMgenius fits into the Shipping Container Buildings: placing itself fully within the circular economy, with the reuse of HC containers 20 'and 40' in corten steel, used as the supporting structure of the dwelling system. The prototype was evaluated with an LCA analysis, whose results and methodology were discussed in detail in a specific article, presented in this journal. The objective of this paper is to provide a framework about the Shipping Container Building, showing unconventional solutions that have been an experiment in the con-

* Per contatti: Via Ponzio 31, 20133 Milano. Tel. 349.1272867; e-mail: giulia.vignati@polimi.it

struction of the prototype, to illustrate possible directions for the construction sector in relation to the theme circular. In particular, the application of the 3R principles in the design and construction of the prototype allowed to verify (with an analysis of the critical issues that emerged during the construction) and demonstrate the achievement of: i) reduction of material in terms of quantity, embodied energy and time, with better use of products, giving them a multifunctional character; ii) recycling of products and materials, through the use of dry technologies, with the choice of using decoupling materials to avoid not only disassembly costs, often uneconomical, but to avoid polluting industrial cycles for their recycling; iii) reuse/reuse, here understood as the most evident plus of the circular supply chain, because it is considered synonymous for the in-crase of products' life.

Keywords: *design for living, disassembly, eco-efficiency, reduce, reuse.*

Ricevuto il 15-4-2021. Modifiche sostanziali richieste il 24-5-2021. Accettazione il 5-7-2021.

1. LO SHIPPING CONTAINER BUILDING COME SISTEMA COSTRUTTIVO EMERGENTE

Il contributo offre un inquadramento dell'impiego dello shipping container in edilizia a partire da un'analisi della letteratura scientifica, da interventi realizzati a scala internazionale e da un caso pilota realizzato dal gruppo di ricerca che dimostra la validità dei principi generatori del progetto. L'obiettivo è illustrare possibili orientamenti del settore delle costruzioni nel quadro della sostenibilità che passa attraverso l'innovazione, l'industrializzazione e il pre-assemblaggio.

Lo Shipping Container Building (SCB) è un sistema costruttivo emergente, sviluppatosi soprattutto negli ultimi due decenni (Ginelli & Pozzi, 2017) che prevede l'impiego di container da spedizione come struttura portante. Il loro ri-utilizzo in architettura costituisce una strategia vantaggiosa in termini di impronta ambientale, abbattendo l'impatto complessivo dell'edificio, dimostrato da specifiche analisi LCA (Atmaca & Atmaca, 2016; Giriunas, K., Sezen, & Dupaix, 2012; Islam, Zhang, Setunge, & Bhuiyan, 2016), che considerano il riuso di questi elementi come moduli strutturali a impatto zero (ad esclusione dell'incidenza delle operazioni di trasporto e trasformazione dello stesso). Queste tematiche sono approfonditamente trattate all'interno di un articolo presentato in parallelo in questa rivista (Giorgi et al., 2021).

Lo Shipping Container Building riconverte oggetti modulari caratterizzati da semplicità di assem-

blaggio che, associati ad una tecnica costruttiva basata sulla prefabbricazione e industrializzazione, permette facili operazioni di disassemblaggio, aumentando la vita utile di un edificio, con positivi risvolti in termini di contenimento dei rifiuti durante tutto l'arco di vita.

Questo sistema costruttivo è stato oggetto di uno studio preliminare per indagarne l'utilizzo e le potenzialità nel settore delle costruzioni, all'interno del Bando Smart Living, finanziato da Regione Lombardia, di un progetto di ricerca "cHOMgenius. PrototypeSystem e SharedProject. Soluzioni straordinarie per l'abitare intelligente" con Partner BFC SISTEMI srl, WHITEAM srl, Dipartimento ABC del Politecnico di Milano (team coordinato da Elisabetta Ginelli, in qualità di responsabile scientifico), e supportato da 20 aziende nazionali ed internazionali (Abet Laminati Spa, ALPAC Srl, BOLDARINO Spa, Comoli Ferrari & c. Spa, Daku Italia Srl, ETERNO IVICA Srl, FOAMGLAS Italia Srl, Fontanot Scale Spa, GSE – Krinner Italia, Index Spa, LIVITH Spa, Metra Spa, Pantecnica Spa, Resstende Srl, SANDRINI METALLI spa, Sanika GmbH, Si.Cop Etanco Italia Srl, Sil Società Italiana Lastre Spa, Tabu Spa, TECNOE-LETTRICA BRAGONI Srl, UNI – ENTE ITALIANO DI NORMAZIONE), che, a partire dal riutilizzo di container da spedizione, sviluppa un sistema costruttivo modulare e sperimentale, con l'utilizzo di elementi prefabbricati ad uso abitativo permanente, in una logica di industrializzazione personalizzata.

In questa proposta, la locuzione Abitare Smart declina il suo significato verso abitazioni ad elevate prestazioni (energetiche, ambientali, di fruibilità,



cHOMgenius. PrototypeSystem&SharedProject
Soluzioni straordinarie per l'abitare intelligente
Partnership BFC Sistemi. Whiteam. DABC Politecnico di Milano
Bando Smart Living. Regione Lombardia

Figura 1 – Il prototipo cHOMgenius realizzato

sicurezza, ecoefficienza, gestione d'uso...), grazie ad una concezione di progetto fortemente indirizzato verso l'economia circolare, e quindi la riduzione, il riutilizzo e l'eco-efficienza. Le soluzioni attuate sono caratterizzate da industrializzazione del processo con controllo della qualità, dei tempi di realizzazione e dei costi, anziché centrare lo Smart Building solo sull'IoT (Internet of Things), anche se i sistemi software sono comunque presenti e utilizzati.

Questo sistema, concretizzato in un prototipo realizzato con HC40', è l'oggetto di questo contributo che si concentrerà sui metodi di costruzione e sulle possibilità di riutilizzo dei container di spedizione, sui vantaggi e le opportunità offerte in particolare per l'edilizia residenziale.

1.1. Container e il loro riutilizzo

1.1.1. Il container come materiale da costruzione per praticare il ri-uso

L'uso del container da spedizione (shipping container) in architettura appare oggi come un sistema tra i più interessanti, sia come oggetto "visibile" che come struttura "nascosta". Esso costituisce un valido sistema strutturale per gli edifici, permettendo diverse possibilità di riutilizzo e personalizzazione, pur mantenendo un costo contenuto. Gli innumerevoli casi di riutilizzo di shipping container in tutto il mondo, realizzati, testati e abitati, confermano la sua affidabilità d'uso (Abrasheva, Senk, & Häußling, 2012; Bernardo, Oliveira, Nepomuceno, & Andrade, 2013; Bofo, Kim, & Kim, 2016; Oh, Cho, & Kim, 2017; Olivas & Aragonéz, 2013).

L'interesse è giustificato anche dal fatto che il container può essere considerato sia come una risorsa prima (nuova), che come risorsa seconda (riutilizzo o riciclo). La sostenibilità in quanto esigenza imprescindibile da soddisfare concretamente con

azioni mirate, sistemiche e senza riduzionismi, viene qui declinata a partire dall'introduzione del 7° requisito per i prodotti da costruzione (Regolamento UE n. 305/2011 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 9 marzo 2011 che stabilisce condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e abroga la direttiva 89/106/CEE del Consiglio), che esige un'attenzione sui valori ambientali dei sistemi costruttivi, sulla durata, manutenibilità, riciclabilità, dismissione e disassemblabilità delle opere e delle loro parti, sull'organizzazione e gestione del cantiere nella fase di realizzazione e di smantellamento. L'assunzione di responsabilità verso queste condizioni motivano la rilevanza del sistema da costruzione illustrato in questa sede, che qui viene utilizzato in un modo del tutto innovativo rispetto alla consueta prassi.

Alcuni esempi di edifici realizzati mediante l'utilizzo dei container risultano essere significativi per il differente utilizzo, la disposizione e lo sfruttamento del modulo (le cui dimensioni sono assimilabili a quelle di una piccola stanza) come elemento base per lo sviluppo dell'edificio. Esso può essere impiegato con risultati più "tradizionali" o del tutto straordinari, senza o con porzioni strutturali aggiunte.

In sintesi, il container viene utilizzato principalmente come modulo tecnologico, strutturale, spaziale, tipologico, funzionale, che presenta notevoli vantaggi in termini di stabilità, distribuzione del carico e semplificazione dello schema strutturale. L'utilizzo di questi oggetti può rappresentare una strategia costruttiva valida e competitiva. Tra i vantaggi dell'utilizzo del sistema container c'è sicuramente l'elevata disponibilità di questi elementi: quasi 2.000.000 container vengono scaricati e giacciono inutilizzati nei nodi di interscambio (<https://www.eni.com/it-IT/economia-circolare/container-pieni-di-sorprese.html>) e so-



Casi studio raffigurati:

- Crossbox, CGArchitectes, Pont Péan, France, 2009
<https://cdn.homedsgn.com/wp-content/uploads/2011/01/Cross-Box-21-750x562.jpg>;
- Barneveld Noord Railway station, NL Architects, Barneveld, Paesi Bassi, 2013
<https://www.archdaily.com/442757/barneveld-noord-nl-architects>;
- 12 Container House, Adam Kalkin, Maine, USA 2003
<https://www.designboom.com/architecture/adam-kalkin-kalkin-house>

Figura 2 – Sintesi dei possibili utilizzi e dei principali vantaggi sul ri-utilizzo dei container in architettura

no quindi disponibili in tutto il pianeta, sia nuovi che usati, ad un costo relativamente contenuto con una gamma di 1.500€-3.500€ (GLS, 2021), in base allo stato d'uso ed alle capacità residue di trasporto.

Il motivo dell'elevata disponibilità in tutto il mondo di questi oggetti risiede nel fatto che la loro produzione avviene in Cina e, una volta terminato il primo viaggio carichi di merci in uscita da quel Paese, non risulta conveniente in relazione ai costi di trasporto rispetto alla produzione di un container nuovo, effettuare il viaggio di ritorno in assenza di carico. Per questo motivo un numero elevato di container viene depositato nei centri intermodali. Inoltre, l'elevato costo di smaltimento fa sì che questi oggetti stazionino negli hub intermodali per periodi di tempo estremamente lunghi generando enormi volumi di materiale in abbandono (in questo processo, i container devono spesso tornare vuoti nelle loro fabbriche e quindi rimanere nei depositi nei porti e nelle aree terminali fino alla vendita o allo smaltimento. Shanghai, secondo le classifiche stilate nel 2015, è il porto più trafficato (36,5 milioni di TEU – twenty-foot equivalent unit – unità di misura standard di volume nel trasporto dei container ISO, corrispondente a circa 38 metri cubi d'ingombro totale), Singapore seconda a 30,9 milioni, Shenzhen 24,2 milioni, quarta Ningbo-Zhoushan con 20,6 milioni e infine Hong Kong.).

Rispetto al loro uso primario i container, seppur abbandonati e dismessi, mantengono elevate prestazioni di resistenza e durabilità per l'uso edilizio e l'aumento della polarità negli ultimi anni del loro impiego in architettura è giustificato da una serie di vantaggi. Primo fra tutti la standardizzazione in conformità agli standard dimensionali e prestazionali dettate dalla spedizione. Nello specifico i container hanno un'agevole maneggevolezza, durabilità e resistenza, in quanto progettati per resistere ad ambienti difficili, come sulle navi oceaniche o durante il trasporto su strada impilati in colonne, trasportando carichi pesanti quasi sei volte il loro peso.

Nel progetto per il riutilizzo, il container si configura come una soluzione flessibile e attrezzabile: è possibile modificarlo facilmente attraverso operazioni di carpenteria (taglio, rimozione, bullonatura e/o saldatura in acciaio) e può essere combinato in strutture più grandi, superando il concetto di costruzione in serie. Infine, è adatto a qualsiasi cluster climatico, a seconda del tipo di isolamento

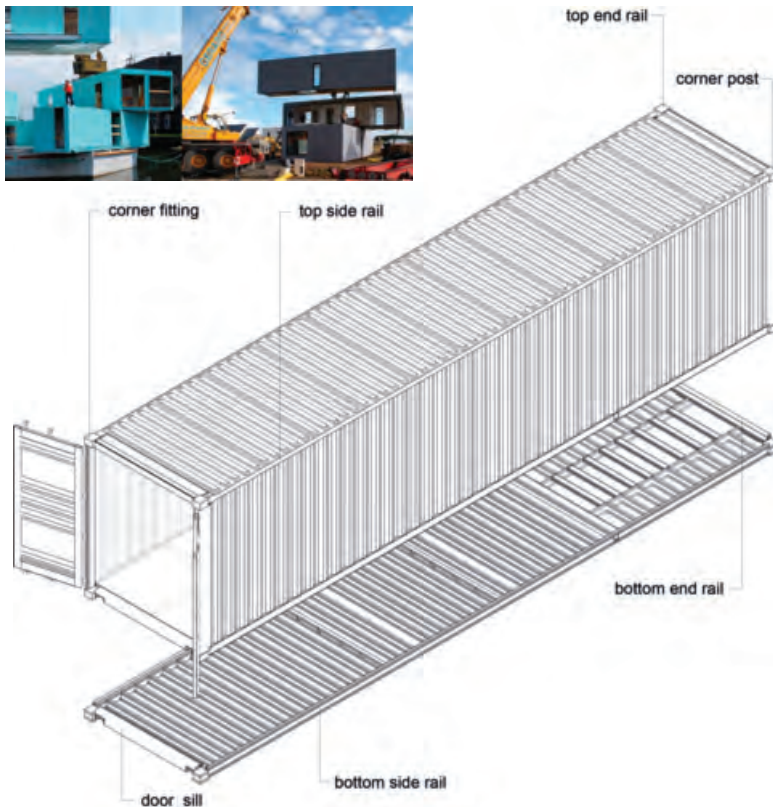
termico e sistema impiantistico con cui viene "attrezzato".

Il modulo ha una funzione tecnologica e ordinatoria, fungendo da griglia che costituisce un riferimento geometrico del progetto con una funzione di scansione ritmica a intervalli costanti, su cui innestare l'intero progetto, con notevoli vantaggi progettuali e costruttivi. Il container ha un ruolo spaziale e formale in quanto gli ambienti ottenuti hanno una superficie mai vincolata ma definita da un numero finito di moduli, in modo che gli edifici nascano come aggiunta di moduli spaziali preordinati, beneficiando sia della progettazione che della realizzazione, sia dell'equilibrio formale. Un'ulteriore riflessione collega l'utilizzo del container alle strategie costruttive sviluppate sulla produzione in officina di singoli componenti standardizzati, caratterizzando la fase di costruzione mediante il semplice assemblaggio di elementi già realizzati e finiti altrove.

La scelta di utilizzare il container come sistema di costruzione può essere incardinata su una serie di motivi brevemente elencati e riassunti di seguito:

- 1) il container è oggi configurato come un sistema "emergente", come dimostrano i numerosi interventi che si trovano nel mondo; su scala internazionale viene utilizzato sia per case unifamiliari che per edifici plurifamiliari; per la vita temporanea e permanente; per funzioni diversificate come il commercio, la sanità, il settore dei servizi, ecc...; ne è un esempio il progetto di student housing Urban Rigger di BIG realizzato a Copenaghen per fornire alloggi a costi accessibili (vedi Tabella 1);
- 2) il suo utilizzo fa parte dello scenario di sostenibilità ambientale in quanto può essere considerato una risorsa prima/seconda catalizzata dai principi 3R (Riduzione, Riutilizzo, Riciclo) abbinati al concetto di gestione sostenibile di prodotti e materiali;
- 3) nonostante la persistente crisi finanziaria, emergono ormai da tempo (approfondito nel paragrafo 2.1 di questo contributo) nuove tendenze nel settore immobiliare in termini di performance, costi e fatturato, in particolare nel contesto delle case prefabbricate, che si sono create una nicchia di mercato caratterizzate da un trend positivo in crescita, nonostante le recenti crisi;
- 4) la scelta di adottarlo in combinazione con soluzioni progettuali basate sulla modularità e standardizzazione di soluzioni di assemblaggio di componenti, semicomponenti e di prodotti as-

Tabella 1 – Principali componenti e caratteristiche shipping container ISO HC 40'



CONTAINER ISO HC 40'	
Lunghezze dim. esterne.....	12
dim. interne	12
Larghezze dim. esterne.....	2
dim. interne	2
Altezza dim. esterne	2
dim. interne	2
Capacità cubica interna	76
Peso lordo max	32.450 Kg
Tara.....	3.800 Kg
Carico utile Massimo	28.700 Kg
Carico di accatastamento.....	97.200 Kg
Resistenza pavimento.....	7.260 Kg

Casi studio raffigurati:

- Urban Rigger, BIG, Copenhagen, Denmark, 2016
<https://www.dezeen.com/2016/09/22/big-bjarke-ingels-shipping-containers-floating-student-housing-urban-rigger-copenhagen/>
- Crossbox, CGArchitectes, Pont Péan, France, 2009
<https://cdn.homedsgn.com/wp-content/uploads/2011/01/Cross-Box-21-750x562.jpg>

sicurano tempi di esecuzione, di posizionamento in situ, di finitura controllati rispetto alle criticità dell'edilizia "tradizionale";

- 5) il sistema di costruzione configurato dal riutilizzo del container rivela potenzialità significative ma, indubbiamente, anche alcune criticità poiché va oltre la normale pratica procedurale, progettuale, processuale ideativa e realizzativa, a cui si impone un'attenzione particolare di regole e norme vigenti in quanto sistema fuori dai canoni stereotipati, quindi suscettibile di pregiudizio e scarsa comprensione.

1.1.2. Il container e le sue caratteristiche

Il container di spedizione (Abrasheva et al., 2012; Boafó et al., 2016; Otilia-Alexandra & Daniel Mihai, 2013) è un parallelepipedo in acciaio corten costituito da una struttura del telaio e un riempimento a tre lati in lamiera ondulata, che contribuisce alla rigidità e alle prestazioni strutturali. Il quarto lato è costituito da un portellone a due ante che, una volta chiuso, garantisce un ulteriore irrigidimento dell'intera struttura (con il portellone chiuso un container ISO 40'HC pesa tra i 3800 e i 4150 kg e può contenere al suo interno tra 26.000 e 36.600 kg di merci). Esso è progettato come oggetto mobile ed estremamente resistente, dotato di

quattro dadi angolari in acciaio, che scaricano i carichi e vengono utilizzati per collegare diversi container tra loro, verticalmente e orizzontalmente. La base è irrigidita da una struttura di travetti metallici rivestiti da pannelli di legno che compongono il pavimento.

Tra i tipi di container il più diffuso al mondo è il contenitore ISO, acronimo di International Organization for Standardization, le cui misure sono state stabilite a livello internazionale nel 1967, determinate principalmente dalle condizioni di trasporto via nave e dalle norme sulla circolazione stradale. Tra i vari tipi di dimensioni, quelli più comunemente adottate oggi per il trasporto via mare e via terra sono quelli di 20 piedi (6 metri di lunghezza) e 40 piedi (12 metri). Hanno una larghezza comune di circa 2,4 metri e un'altezza esterna di 2,6 metri (contenitore standard) o 2,9 metri (cubo alto) (vedi Tabella 1). Questo tipo è quindi presente in grandi quantità sul mercato internazionale, oltre a numerose varianti che rispettano le stesse dimensioni ma con la caratteristica di essere ventilati, refrigerati, aperti nella parte superiore o laterale, nonché contenitori e serbatoi per il trasporto di liquidi.

I container ISO sono resistenti all'acqua, agli uragani, ai terremoti e ad altri tipi di disastri naturali

e sono prodotti con uno speciale strato esterno che garantisce anche resistenza al fuoco. Sia per il trasporto che per lo stoccaggio sono agganciati al rimorchio o impilati uno sopra l'altro attraverso un aggancio metallico chiamato twistlock, un elemento di connessione rotante standardizzato che viene inserito nei fori dei blocchi angolari e fissato ruotando un lembo di 90°.

I sistemi utilizzati per il trasporto possono influenzare alcune scelte progettuali per la costruzione di edifici basati sul riutilizzo di container: in molti casi realizzati a livello internazionale i dadi angolari sono stati utilizzati per collegare più elementi tra loro e creare edifici a più piani, limitando i costi e l'inserimento di elementi strutturali.

Il sistema di posa e connessione deve essere in grado di garantire il miglior utilizzo (meccanico, economico, spaziale, ...) del container in base alle caratteristiche intrinseche, impiegano per i collegamenti componenti standard presenti sul mercato e ricorrendo a soluzioni realizzate ad hoc solo se strettamente necessario.

In questo modo, si ottiene un'intensità di utilizzo dei componenti e dei materiali che offrono le migliori prestazioni a costi inferiori. L'uso del container garantisce anche una realizzazione facile e sostenibile, in quanto è facilmente accessibile, può essere facilmente spostato e la sua appartenenza al mondo della meccanica lo pone facilmente nel settore dell'edilizia industriale, sia come oggetto (produzione e assemblaggio), sia come processo di gestione (anche attraverso sistemi BIM) sia per renderlo quindi un materiale da costruzione trasferibile tra i più interessanti oggi sul mercato.

1.1.3. Potenzialità del sistema container

L'ampia disponibilità e l'assunzione a "status cult", insieme alla facile trasformabilità, ha consentito un uso parallelo a quello dei trasporti per anni.

Alcuni esempi di edifici costruiti riutilizzando i container sono estremamente significativi per il diverso utilizzo, disposizione e sfruttamento del modulo come elemento di base per lo sviluppo dell'edificio. I casi mostrano i possibili riutilizzi con diversi approcci, dando risultati più "tradizionali" o del tutto straordinari, senza o con porzioni strutturali aggiunte.

A scala internazionale ci sono molte testimonianze di residenze permanenti realizzate con riutilizzo di container, mentre in Italia si ha un loro impiego sporadico per funzioni temporanee (quali info point, villaggi turistici, uffici mobili). Diver-

sa è la situazione per altre funzioni (commerciale, espositiva, teatrale/di intrattenimento, ecc.) dove sono stati effettuati alcuni interventi permanenti.

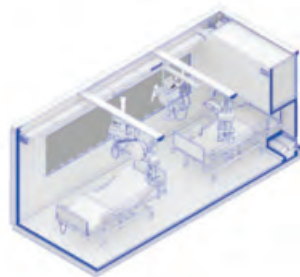
Di seguito è riportata una collezione di casi studio a livello internazionale che sfruttano il riutilizzo dei container, evidenziando le principali funzioni suddivise in: ludico-ricreativo; commerciale; turistico; infrastrutturale; sanitario; terziario; residenziale.

I casi testimoniano i principali approcci alla progettazione e realizzazione all'interno dello Shipping Container Building (vedi Tabella 2 a pagina seguente): da soluzioni ordinarie, in cui la maggior parte delle lavorazioni viene svolta in loco (come la trasformazione e assemblaggio dei moduli come nel caso "Village underground" a Lisbona o l'allestimento di servizi commerciali temporanei come "LCF street food"); alla progettazione di "oggetti unici" (il container e i suoi componenti con specifici allestimenti, come l'unità mobile "The Citizen Care Pod" per effettuare test sanitari e screening, oppure in abbinamento ad una struttura portante per ottenere sbalzi e doppie altezze come nel "Container Stack Pavilion") in cui l'impiego del container è volutamente esplicitato per svolgere specifiche funzioni; al progetto di soluzioni che sfruttino le potenzialità dell'oggetto modulare riducendo le operazioni in loco con diversi risultati progettuali e livelli che vanno dal catalogo definito di soluzioni, a seconda di una configurazione prestabilita dell'edificio (come nel caso del prototipo residenziale "WFH House" che prevede un catalogo di tre possibili configurazioni, o l'abbinamento del modulo con diversi elementi quali tettoia e gradonate per la struttura sportiva "Safmarine Container Sports Centre"); al progetto di un catalogo aperto di soluzioni e componenti personalizzati. Infine, all'attitudine più ricorrente dei casi di SCB, il progetto in cui convergono componenti sia tradizionali che "evoluti" che possono essere assemblati in fabbrica, ma che richiedono molte operazioni in loco (disponendo i container in modo non "convenzionale" come nel trasporto intermodale, ma in posizione verticale o inclinata, in modo da poter ospitare connettivi verticali o diventare coni visuali verso il paesaggio come nel "Shipping Container Terminal" e nel "Devil's Corner"). Degno di nota è l'utilizzo di container per il progetto CURA (Connected Units for respiratory Aliments) ideato durante l'emergenza sanitaria COVID-19 per la realizzazione di unità di terapia intensiva modulare i cui ideatori, tra gli altri, sono CRA-Carlo Ratti Associati e Italo Rota.

Tabella 2 – Casi internazionali sul riutilizzo dei container in architettura



SOLUZIONI ORDINARIE	“OGGETTI UNICI”	CATALOGO DI CONFIGURAZIONI	SOLUZIONI TRADIZIONALI ED EVOLUTE
Ludico-ricreativo VILLAGE UNDER-GROUND Colectivo Warehouse Lisbona, Portugal, 2015 https://divisare.com/projects/310901-colectivo-warehouse-village-yard-2015	Sanitario THE CITIZEN CARE POD WZMH Architects Designs Toronto, Canada, 2020 https://www.pcl.com/Services-that-Deliver/Pages/Citizen-Care-Pod-Smart-Screening-at-Work-and-Play-US.aspx	Residenziale WFH HOUSE Arcgency Wuxi, China, 2012 http://arcgency.com/wfh-house	Turistico DEVIL'S CORNER Cumulus Studio Tasmania, Australia, 2015 https://divisare.com/projects/318532-cumulus-studio-tanja-milbourne-devil-s-corner
Servizi LCF STREET FOOD Whitecrate, London, UK, 2014 http://whitecrate.co/#title	Terziario CONTAINER STACK PAVILION Pao People's Architecture Office Shanxi, China 2015 https://divisare.com/projects/322359-pao-people-s-architecture-office-container-stack-pavilion	Sportivo SAFMARINE CONTAINER SPORTS CENTRE Tsai Design Studio Piketberg, Cape Town, South Africa, 2010 http://zaarchitecture.blogspot.com/2011/07/safmarine-container-sports-centre.html	Infrastrutturale SHIPPING CONTAINER TERMINAL Tel Aviv studio Potash Architects Tel Aviv, Israel, 2015 http://www.dezeen.com/2015/07/16/angled-shipping-container-staircase-israeli-port-ashdod-office-potash-architects/

**Modulo sanitario emergenziale**

Riconversione di container in stanze di biocontenimento

CURA Connected Units fo respiratory Aliments
 CRA-Carlo Ratti Associati, Italo Rota
 Milano, Italia, 2020
<https://buildingcue.it/progetto-cura-container-emergenza-sanitaria/18718/>

2. TENDENZE DEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI: INDUSTRIALIZZAZIONE E PREFABBRICAZIONE

Il settore delle costruzioni in Europa è in forte evoluzione e sta configurando nuove tendenze nel mercato delle abitazioni sia in termini di richieste prestazionali e forme d'uso dello spazio abitativo, sia di costi, giro d'affari, tecnologie e tecniche costruttive, prodotti, componenti e sistemi, che comportano un ripensamento della prassi costruttiva, soprattutto in relazione alla sostenibilità.

Di seguito viene riportato una sintesi del dibattito culturale sul tema dell'industrializzazione e della prefabbricazione, illustrando le possibili applicazioni del sistema SCB con diversi livelli di funzionalità e flessibilità, al fine di mostrare le potenzialità del sistema in relazione alle tendenze del settore.

Da alcuni anni, infatti, in Europa è obbligatorio pensare l'edificio in termini di vita globale: questo ha comportato la necessità di considerare, nella progettazione, non solo la durabilità intrinseca dei materiali, ma anche il fine vita degli edifici per una duplice valenza: ridurre il carico ambien-

tale generato dalla dismissione degli edifici e, come conseguenza, ridurre i costi per la collettività. Per la prima volta, la normativa impone che qualunque progetto abbia una forte attenzione per le fasi di demolizione dell'edificio, comportando quindi una serie di scelte progettuali che, fin dalle prime fasi di concezione dell'edificio stesso, siano orientate al principio delle 3R: Riduzione, Riutilizzo, Riciclo.

La sostenibilità nel settore edile passa dunque anche per l'implementazione di materiali edili e impianti di nuova concezione (analizzando l'intero ciclo di vita del prodotto e dell'intervento). Questo indirizzo ha avuto una conseguenza attiva sul modo di progettare e sulle modalità realizzative degli edifici, sintetizzabile nella necessità di ridurre i materiali da costruzione, con un possibile affiancamento alle tecniche tradizionali che utilizzano materiali massivi e tecniche a umido; nell'incentivare l'impiego e riutilizzo di prodotti di uso secondo (non nuovi, contenendo le trasformazioni e lavorazioni pesanti di questi ultimi) ed infine l'adozione di prodotti e tecniche di assemblaggio che, alla fine della vita utile dell'edificio, diano origine a prodotti che possano facilmente essere disassemblati e quindi ri-utilizzati o avviati al nuovo ciclo di rigenerazione e riciclo.

Questo nuovo approccio che l'Europa si è voluta dare costringerà nei prossimi anni ad un nuovo modo di progettare e gestire l'intero ciclo produttivo degli edifici, a cominciare dal cantiere (che sarà asciutto e pulito), alla gestione (facilitata ed intelligente in quanto l'edificio sarà facilmente ispezionabile ed i suoi componenti agevolmente sostituibili), alla dismissione (in cui l'edificio potrà essere smontato e disassemblato, diventando una fonte di materie seconde da riutilizzare).

2.1. Industrializzazione edilizia con il sistema container

Ci sono molte evidenze che ormai da alcuni decenni il mercato della residenza chiede innovazione (Losasso, 2010): come ormai testimoniato da numerose fonti (CRESME, 2019; CRESME, 2020; Department for Communities and Local Government UK, 2017; FLA, 2019), l'industrializzazione nelle costruzioni è obbligatorio e inevitabile per soddisfare le esigenze contemporanee.

Il Cresme afferma (confermando la tendenza dei precedenti rapporti) che l'Italia è entrata in un nuovo ciclo edilizio in cui la richiesta di qualità per le

costruzioni è in crescita e in cui il 15% dei nuovi edifici privati residenziali usano tecniche o componenti non tradizionali, come pannelli, telai pre-assemblati, elementi prefabbricati. Molte residenze sono pre-finite, con bagni completi e spesso con l'inserimento dei mobili della cucina: la tendenza è quella di incrementare la qualità generale, di facilitare il movimento dei fruitori, di mantenere alti livelli prestazionali, anche grazie ad una ben progettata manutenibilità.

Il 4° rapporto sulle case in legno (FLA, 2019) conferma questa tendenza, fissando a +10% (2016-2018) l'incremento dell'ammontare economico del mercato delle case in legno (vedi Figura 3), con una prospettiva in crescita nei prossimi anni (+5% nel 2024). Non è un grandissimo mercato per l'Italia (360 ml €/anno), ma esso è cresciuto nonostante le varie crisi e può quindi essere considerato una eccellente cartina al tornasole per testare le tendenze future del mercato. Questo mercato produce case finite, il più delle volte con elementi pre-assemblati, in cui vengono garantite le esigenze dei committenti, quali la qualità, la sostenibilità certificata e tempi certi e brevi di realizzazione.

Uno sguardo alla situazione internazionale conferma questa tendenza, ma mostra anche come molti Paesi stanno supportando e incentivando l'innovazione e l'industrializzazione nel mercato residenziale.

La Gran Bretagna, ad esempio, supporta energeticamente i Modern Method of Construction, MMC

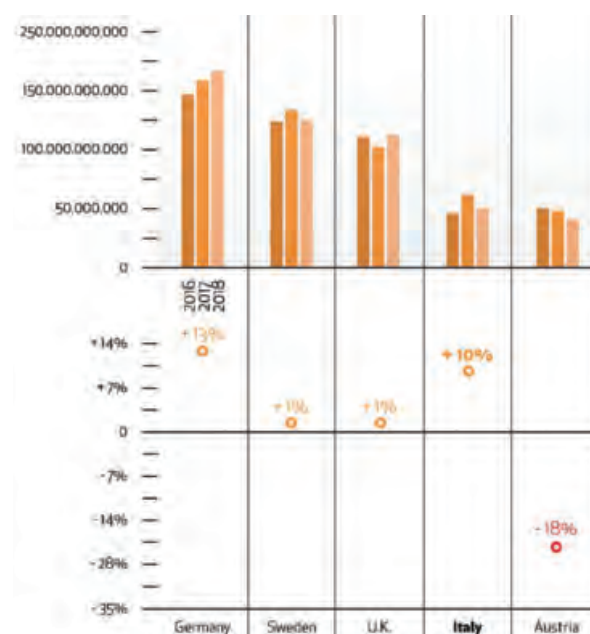


Figura 3 – La produzione di case in legno (€, var. % 2018/2016) da (FLA, 2019)

(CITB, 2019) come una risposta alla mancanza di qualità delle residenze (Department for Communities and Local Government UK, 2017). Alcune linee guida sono significative:

- Step 2: Costruire edifici più velocemente.
- Step 3: Diversificare il mercato, anche grazie a “Boosting productivity and innovation by encouraging modern methods of construction (MMC) in house building” (I report suggeriscono che le case costruite offsite sede possono essere realizzate fino al 30% più rapidamente rispetto ai metodi tradizionali e con una potenziale riduzione dei costi del 25%, Department for Communities and Local Government UK, 2017, p.54) e incrementare (1.49) “Building good quality homes”.

Dalla figura seguente appare chiaro il divario tra le differenti tendenze dell'intera economia e del settore delle costruzioni: anche in un Paese come la Gran Bretagna, considerata “industrializzata”, il mercato delle costruzioni ha avuto un incremento poco significativo negli ultimi 25 anni, confermando la necessità di un cambio di rotta (Figura 4).

La maggior parte dei report (si vedano i riferimenti riportati in bibliografia nella sezione “Report online sul mercato delle costruzioni”) sul mercato delle costruzioni confermano che i processi di Industrializzazione per il mercato residenziale sono in espansione, specialmente perché “planning security and comfort level to be a key driver in the purchasing decision for prefabricated houses” (Berger, 2018).

La Figura 5 a pagina seguente mostra chiaramente la consistenza e le tendenze in atto nel mercato europeo.

Una ulteriore e recentissima conferma può essere rintracciata in Francia, dove un nuovo report (febbraio 2021, *Batiactu, 2021*), commissionato dal Governo Francese a Real Estech, conferma che le costruzioni off-site sono l'unica possibile soluzione per innovare un settore poco propenso all'investimento e ai cambiamenti come quello edile.

Il mercato sta crescendo in consistenza e dimensioni in tutti gli stati europei considerati, confermando che questo genere di innovazione è conveniente e competitivo.

Lo SCB si colloca a pieno in questo scenario, come un sistema costruttivo innovativo e che presenta molti aspetti peculiari che lo rendono particolarmente interessante, ovvero la costruzione di edifici utilizzando i container da trasporto marittimi.

2.2. Casi significativi per l'utilizzo del sistema container

Di seguito vengono presentati i principali atteggiamenti alla progettazione degli Shipping Container Building che testimoniano l'elevata funzionalità del sistema e la flessibilità delle soluzioni, esplorando le caratteristiche costruttive degli interventi, riassumendone le principali fasi realizzative. I casi sono stati catalogati in una tabella suddivisa in: dati identificativi; aspetti strutturali (indicando l'esplicitazione figurativa dell'oggetto

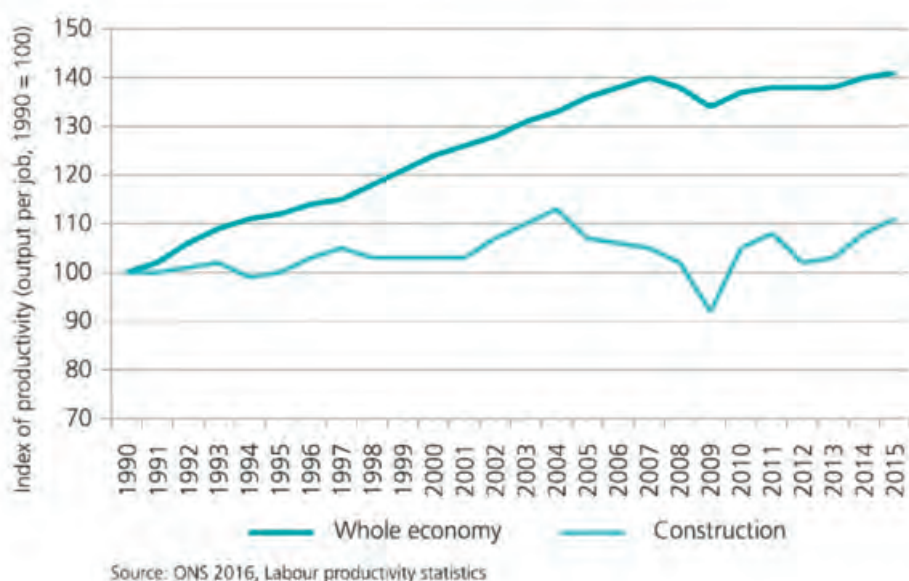


Figura 4 – Indici di produttività (1990=100): intera economia vs. costruzioni. Da (Department for Communities and Local Government UK, 2017)

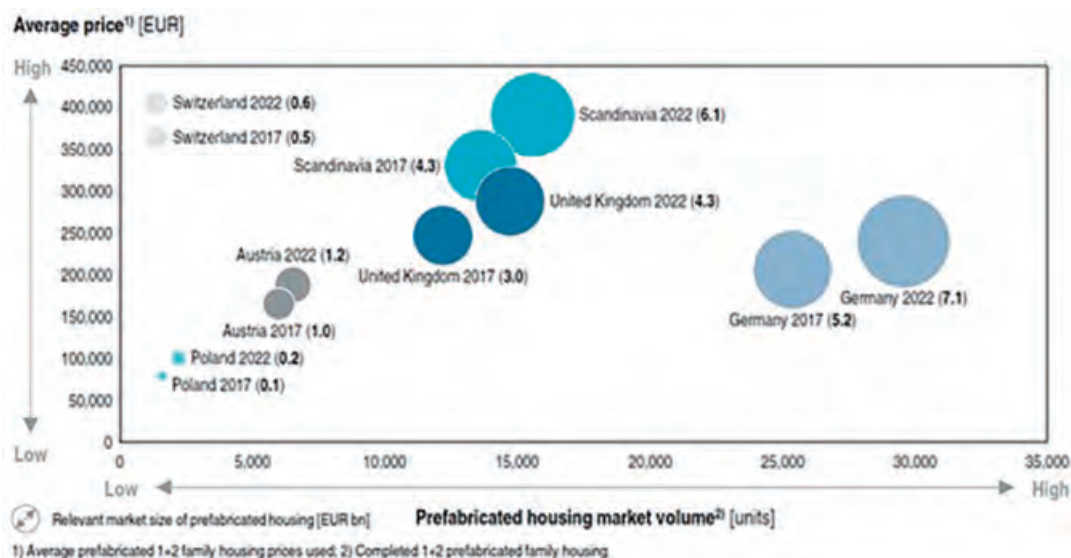


Figura 5 – Il valore di mercato delle residenze mono e bi-familiari tra il 2017 and 2022. Da https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_prefabricated_housing_market_3.pdf p23

container, il tipo e il numero di elementi utilizzati, le modalità di aggregazione dei moduli); aspetti tecnologici (indicando i componenti principali relativi alla chiusura orizzontale, all'involucro esterno, alla struttura di connessione, alle partizioni interne e alle finiture interne).

Le 4 Tabelle che seguono ne dimostrano la multifunzionalità, esemplificando quattro principali macrocategorie:

- Utilizzo del container come “modulo invisibile” (Paragrafo 2.2.1).
- Il container per la progettazione di “oggetti unici” (Paragrafo 2.2.2).
- Il modulo come elemento ordinatorio nel progetto di un catalogo aperto di soluzioni e componenti personalizzati (Paragrafo 2.2.3).
- Il container per le residenze “tipizzate” (in relazione ad elevati volumi di produzione) (Paragrafo 2.2.4).

2.2.1. Utilizzo del container come “modulo invisibile”: *WFH House, Arcgency, Wuxi, Cina (2012)*

Si tratta di un'abitazione realizzata mediante tre container da 40' (2 dei quali sovrapposti) con al centro uno spazio a doppia altezza, realizzato in struttura metallica e pannelli sandwich. In questo caso la struttura dei container viene completamente nascosta all'esterno e all'interno ed il suo utilizzo è puramente strutturale. La presenza di uno “spazio altro” oltre ai container garantisce la possibilità di avere un uso maggiormente flessibile dello spazio abitativo centrale. Il caso studio è un prototipo di un sistema a catalogo con tre possibili con-

figurazioni tipologiche (edificio a più piani, case a schiera, ville singole). Sono previste soluzioni predefinite per interni, facciate, aree climatiche e aree sismiche, con la costruzione dei componenti, la loro spedizione e l'assemblaggio in loco.

Principali fasi di realizzazione:

- officina: lavorazione dei container (taglio lamiera e inserimento rinforzi);
- trasporto;
- sito: assemblaggio container e aggiunta struttura di inserimento, inserimento della scocca, dei serramenti e delle finiture interne.

2.2.2. Il container per la progettazione di “oggetti unici”: *Casa Oruga, Sebastian Irarrazaval Delplano, Santiago de Chile, Chile (2012)*

Si tratta di un'abitazione con un forte impatto visivo e simbolico, che utilizza i container più come icona che come prodotto potenzialmente sostenibile; gli ambienti dell'abitazione sono realizzati mediante l'accostamento di uno o più moduli la cui presenza non viene celata esternamente ma, al contrario, è resa iconicamente esplicita. L'utilizzo di grandi aggetti, la presenza di ampi ambienti e la posa dei container inclinati comporta la realizzazione di un ulteriore sistema strutturale, eseguendo la maggior parte delle operazioni in loco.

Principali fasi di realizzazione:

- trasporto;
- sito: realizzazione piano terra in struttura telaio in calcestruzzo e acciaio; lavorazione dei container (taglio lamiera, inserimento rinfor-

Tabella 3 – Caso studio 1

Immagini di riferimento



WFH HOUSE – prototipo	
Dati Identificativi	
Progettista	Arcgency http://arcgency.com
Anno di Realizzazione	2012
Luogo di Inserimento	Wuxi, China
Fascia climatica	Umida subtropicale
Temperatura media	Estiva 29°C, invernale 6°C
Oggetto	Residenza unifamiliare
Tempi d'uso	Permanente
Superficie Interna	120 mq
Numero livelli	Num. 2
Aspetti Strutturali	
Esplicitazione del container	Container nascosto internamente ed esternamente
Impiego del container	Num. 3 container HC 40'
Aggregazione del container	Num. 2 container impilati con struttura metallica nello spazio centrale (pannello sandwich in metallo e legno)
Sistema tecnologico	
Chiusura orizzontale. FONDAZIONI	Platea di fondazione in cls
Involucro verticale. FACCIATA	Isolamento esterno, rivestimento in pannelli di bambù con sottostruttura metallica
Involucro verticale. TRASPARENTE	Ampie vetrate
Chiusura orizzontale. COPERTURA	Copertura inclinata
Connettivo verticale. SCALE	Struttura metallica e gradini in legno
Partizioni interne. SOPPALCO	Soppalco con struttura portante in legno
Finiture interne. PARETI E PAVIMENTO	Finitura pareti interne in cartongesso pavimento in legno
Strategie energetiche	
	Pannelli fotovoltaici in copertura (circa 20 mq a seconda della localizzazione); possibilità di inserire un tetto verde con raccolta acqua piovana. Num. 1 container dedicato a Modulo tecnico (locale tecnico + cucina) con pompa di calore, serbatoio acqua, sistema di gestione dell'energia.
Vista esterna	http://arcgency.com/wfh-house
Planimetrie	
Vista interna	
Fasi realizzative	

zi e parte del rivestimento esterno); montaggio; inserimento dell'addizione della struttura; inserimento dei serramenti e finiture interne/esterne.

2.2.3. *Il modulo come elemento ordinatorio nel progetto di un catalogo aperto di soluzioni e componenti personalizzati: Les Chromatiques – Bigbox, 2A Design – CG Architectes, Saint Giles, France (2009)*

Sistema a catalogo di residenze uni familiari basate su differenti configurazioni tipologiche con container da 40' e 20' su uno e due livelli (in questo sito sono state realizzate tre tipologie: PATIOBOX su un unico livello con patio centrale, BIGBOX in blocco su due livelli, SQUAREBOX su due livelli

li disposti in una L). Il container rappresenta una sorta di griglia strutturale, costituendo l'elemento spaziale e strutturale degli ambienti che articola interamente lo spazio abitativo. È previsto un catalogo di soluzioni predefinite per interni e facciate (a scelta di legno, metallo, pannelli compositi) rispetto alla fascia climatica che interessa la Francia. Il progetto è realizzato in collaborazione con un'azienda automobilistica riconvertita nell'allestimento dei container (PSA Peugeot Citroen Group).

Principali fasi di realizzazione:

- officina: lavorazione container (taglio lamiera e inserimento rinforzi);
- trasporto;

- sito: montaggio container; inserimento della scocca, dei serramenti e delle finiture interne.

2.2.4. *Il container per le residenze “tipizzate”: FRANKIE & JOHNNY Dormitory, Holzer Kobler Architekturen, Berlino, Germania (20014)*

Nelle residenze tipizzate seriali, in cui la cellula residenziale corrisponde al container stesso, sono evidenti le economie di scala, la facilità realizzativa, la modularità funzionale/costruttiva/gestionale. Questa è certamente la massima espressione delle potenzialità intrinseche dei container.

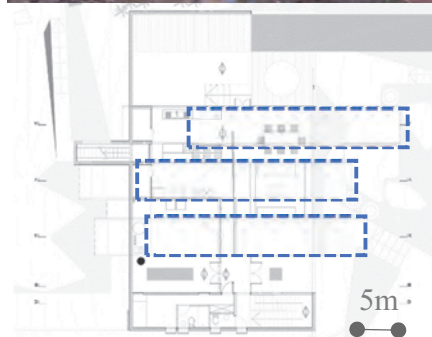
Questo intervento costituisce il primo di tre interventi all'interno di un complesso di residenze uni-

versitarie (superficie totale dei tre lotti 12.187 mq) costituite da container affiancati e impilati. I collegamenti verticali e la distribuzione a ballatoio tra gli alloggi sono inseriti in una struttura metallica esterna. Sono previste tre possibili configurazioni tipologiche (principalmente monolocale composto da un container, bilocale con due container, trilocale con tre container) con finiture interne standard e una dotazione minima di attrezzatura per tutti gli alloggi (blocco cucina e contenitori). Il progetto prevede un sistema standardizzato pre-assemblato in officina. Principali fasi di realizzazione:

- officina: lavorazione container (taglio lamiera, inserimento rinforzi e finiture interne);
- trasporto;

Tabella 4 – Caso studio 2

Immagini di riferimento



CASA ORUGA	
Dati Identificativi	
Progettista	Sebastian Irarrazaval Delplano https://www.sebastianirarrazaval.net
Anno di Realizzazione	2012
Luogo di Inserimento	Lo Barnechea, Santiago de Chile
Fascia climatica	Temperato
Temperatura media	Estiva 20,8°C, invernale 8,6°C
Oggetto	Residenza unifamiliare
Tempi d'uso	Permanente
Superficie Interna	350 mq
Numero livelli	Num. 2
Aspetti Strutturali	
Esplicitazione del container	Container e sistema strutturale a vista
Impiego del container	Num. 5 container HC40' + 6 container HC20' + 1 open-top (per la piscina)
Aggregazione del container	Container affiancati distanziati, a sbalzo su struttura in acciaio e muri di contenimento in cls
Sistema tecnologico	
Chiusura orizzontale. FONDAZIONI	Platea di fondazione in cls
Involucro verticale. FACCIAIA	Isolamento esterno in poliuretano espanso con rivestimento esterno con lastre in acciaio corten
Involucro verticale. TRASPARENTE	Vetrare scorrevoli
Chiusura orizzontale. COPERTURA	Copertura inclinata con pendenze variabili
Connettivo verticale. SCALE	Struttura metallica
Finiture interne. PARETI E PAVIMENTO	Finitura pareti interne in cartongesso e lamiera a vista pavimento in cemento lucidato
Strategie energetiche	
Apertura di vani finestra e lucernari per facilitare la circolazione dell'aria all'interno per massimizzare la ventilazione naturale. Impianto di riscaldamento "tradizionale" con stufa e radiatore	
Vista esterna	https://vimeo.com/37827924
Planimetrie	https://www.archdaily.com/394846/caterpillar-house-sebastian-irarrazaval-delplano
Vista interna	
Fasi realizzative	

- sito: montaggio container; inserimento dell'addizione della struttura; inserimento dei serramenti.

2.3. La progettazione di un sistema tecnologico aperto: i container come sistema di trasferimento

Il dibattito su processi/progetto e su sistemi aperti/chiusi parte in Italia negli anni '60: per molto tempo si è cercato di definire quale fosse la strada per arrivare ad una strategia che potesse realmente innovare il settore delle costruzioni. La conclusione, un po' amara, di questi lunghi e fecondi anni di dibattiti può essere letta nell'opera di Fratei-

li, quando ammette (Frateili, 1987) la difficoltà a conciliare le diverse istanze di innovazione con il mercato reale.

Con le premesse dei paragrafi precedenti, si afferma qui che probabilmente oggi i tempi sono maturi per la definizione di una "terza via" che possa superare il duplice semi-fallimento dell'industrializzazione edilizia ammesso da Frateilli, a cavallo tra aperto e chiuso, produzione di massa e personalizzazione. Questo proposta nasce anche dalla concezione sul progetto di Ceragioli: «[...] non è affrontato dal punto di vista della produzione o dei singoli elementi. Non si propone una tecnica, ma un modo di affrontare il progetto che possa utilizzare la tecnica più appropriate nelle diverse condizioni

Tabella 5 – Caso studio 3

Immagini di riferimento



LES CHROMATIQUES – BIGBOX

Dati Identificativi

Progettista	2A Design – CG Architectes https://www.b3-ecodesign.com
Anno di Realizzazione	2009
Luogo di Inserimento	Zac La Forge, Saint Giles, France
Fascia climatica	Oceanico
Temperatura media	Estiva 29°C, invernale 6°C
Oggetto	Residenza unifamiliare
Tempi d'uso	Permanente
Superficie Interna	110 mq
Numero livelli	Num. 2

Aspetti Strutturali

Esplicitazione del container	Container nascosto esternamente e internamente
Impiego del container	Num. 4 container HC 40'
Aggregazione del container	Num. 2 container affiancati e impilati su num. 2 livelli

Sistema tecnologico

Chiusura orizzontale. FONDAZIONI	Platea di fondazione in cls
Involucro verticale. FACCIAIA	Isolamento esteriorivestimento esterno in pannelli compositi
Involucro verticale. TRASPARENTE	Vetrate scorrevoli
Chiusura orizzontale. COPERTURA	Copertura piana con pannelli fotovoltaici o tetto verde
Connettivo verticale. SCALE	Struttura metallica e gradini in legno
Partizioni interne. SOPPALCO	Soppalco con struttura portante in legno
Finiture interne. PARETI E PAVIMENTO	Finitura pareti interne in cartongesso pavimento in legno

Strategie energetiche

Pannelli fotovoltaici in copertura; possibilità di inserire tetto verde. Possibilità di utilizzare batterie di accumulo di energia e sistema di gestione dell'energia	
Vista esterna Planimetrie Vista interna Fasi realizzative	https://www.b3-ecodesign.com/bigbox

Tabella 6 – Caso studio 4

Immagini di riferimento



FRANKIE & JOHNNY DORMITORY – Lot 1	
Dati Identificativi	
Progettista	Holzer Kobler Architektren https://holzerkobler.com
Anno di Realizzazione	2014
Luogo di Inserimento	Berlino, Germania
Fascia climatica	Temperato
Temperatura media	Estiva 18°C, invernale -0,5°C
Oggetto	Student housing
Tempi d'uso	Temporaneo
Superficie Interna	600 mq
Numero livelli	Num. 4
Aspetti Strutturali	
Esplicitazione del container	Container visibile esternamente
Impiego del container	Num. 5 container HC 40' + num. 15 container HC 40'
Aggregazione del container	Num. 5 container affiancati al piano terra + num. 5 container sfalsati, affiancati e impilati su 3 livelli
Sistema tecnologico	
Chiusura orizzontale. FONDAZIONI	Plinti in cls
Involucro verticale. FACCIAIA	Isolamento internorivestimento esterno in lamiera a vista
Involucro verticale. TRASPARENTE	Ampie vetrate
Chiusura orizzontale. COPERTURA	Copertura piana non praticabile
Connettivo verticale. SCALE	Connettivo esterno e sistema di distribuzione a ballatoio in carpenteria metallica e pannelli in cemento
Finiture interne. PARETI E PAVIMENTO	Pareti interne in cartongessopavimenti vinilici in PVC
Strategie energetiche	
Energia termica ed elettrica ottenuta con un sistema di recupero del calore	
Vista esterna	http://www.uncubemagazine.com/blog/15970711
Planimetrie	https://miesarch.com/work/1630
Vista interna	https://holzerkobler.com/project/frankie-johnny
Vista esterna	
Fasi realizzative	

[...] non tanto un sistema, ma una visione sul progetto» (Ceragioli, 1977).

Questo approccio al progetto viene chiamato dagli autori di questo contributo On-demand. Esso è un sistema aperto, in cui la fase decisionale/progettuale del processo ha due momenti distinti: il primo è il progetto delle soluzioni tecno-tipologiche e la seconda è il progetto dell'edificio. Queste due fasi sono connesse, ma la prima è disgiunta ed a priori rispetto all'edificio futuro. La prima fase pone solo alcune generiche ipotesi riguardo al progetto finale, ma non è vincolata ad esso. La prima non progetta elementi definiti, ma individua gli standard, gli strumenti operativi per le tecniche realizzative flessibili che daranno ori-

gine ai componenti e ai giunti tra di essi. La fase di progetto dell'edificio usa le soluzioni tecno-tipologiche per "comporre" il progetto del nuovo edificio, insieme ai componenti e agli strumenti della produzione corrente: la fase progettuale dell'edificio non ha perciò i vincoli di natura formale o volumetrica tipica dei sistemi chiusi, in quanto non vi è un catalogo di componenti limitati tra cui scegliere elementi o piante. Un buon esempio di sistemi On-demand possono essere i sistemi chiavi in mano pre-assemblati di case in legno (ad esempio a differenza dell'XLAM, i sistemi Rubner sono "su misura" realizzati con il know-how aziendale e gli standard produttivi delle soluzioni tecno-tipologiche accumulate nel tempo, spe-

cificamente progettate e prodotte per ogni singolo edificio. Gli edifici che usano XLAM, invece, usano un componente ligneo come un elemento strutturale, come potrebbe essere qualunque altro sistema tradizionale realizzato in opera (Rubner, 2021), i sistemi di 3D printing on-site, i sistemi di re-fabrication (Kasperzyk, Kim, & Brilakis, 2017). All'interno di questo scenario si colloca a pieno il progetto cHOMgenius che, a partire dai sistemi di Shipping Container Building, evolve e innova alcuni processi, rendendolo a pieno un sistema On-demand (questa classificazione è stata tratta dalla tesi di Dottorato di G. Pozzi, *The design at the core of housing project. Overcoming preclusion to industrialisation between resilience and sustainability. Criteria and categories*. Dipartimento ABC Politecnico di Milano).

cHOMgenius, di seguito illustrato, può inoltre essere definito un sistema di trasferimento in quanto attua un triplice trasferimento. Da un lato prende un "contenitore scatolare metallico" nato per il trasporto intermodale e lo trasferisce nel settore delle costruzioni, come modulo strutturale e ordinatore, conferendo ad esso una vita nuova e diversa. In seconda battuta trasferisce tecniche, processi e tolleranze tipiche di un'officina meccanica al settore delle costruzioni, contribuendo ad aumentarne la qualità, la sicurezza e a ridurre i tempi di realizzazione. In terzo luogo, trasferisce un processo partecipativo e coordinato tipico dei grandi e articolati progetti e dei sistemi chiusi ad un sistema aperto e che può essere adattato anche a piccoli interventi, come il paragrafo seguente evidenzia.

3. CHOMGENIUS: IL PROGETTO PER UNA NUOVA FILIERA PRODUTTIVA

Il progetto "cHOMgenius. PrototypeSystem e SharedProject. Soluzioni straordinarie per l'abitare intelligente" studia un sistema costruttivo modulare, abbinando tecniche costruttive, strutturali e impiantistiche per abitazioni OFFGRID dotate di controllo domotico e gestite da tool digitali con strumenti di verifica e monitoraggio, in una logica di completo smontaggio (attraverso soluzioni tecnico-costruttive interamente a serraggio), riutilizzo e riciclo secondo la più recente direttiva europea. Questo progetto, che comprende come partner due aziende lombarde insieme al Dipartimento ABC del Politecnico di Milano, è sostenuto da 20 aziende nazionali e internazionali e dall'UNI – ENTE ITALIANO DI NORMAZIONE. cHOMgenius è uno Shipping Container Building che si colloca totalmente all'interno dell'economia circolare, attraverso il riutilizzo di container HC 40' in acciaio corten come struttura di supporto dell'abitazione. L'approccio al tema dell'economia circolare perseguito è intrinsecamente legato al concetto di 3R, inteso come: i) riduzione del materiale in termini di quantità, energia e tempo incorporati, con conseguente migliore utilizzazione dei prodotti e conferire loro un carattere multifunzionale; ii) riciclo di prodotti e materiali attraverso l'uso di tecnologie a secco, offrendo la possibilità di utilizzare materiali al fine di evitare non solo costi di smantellamento, spesso antieconomici, ma anche per evitare cicli

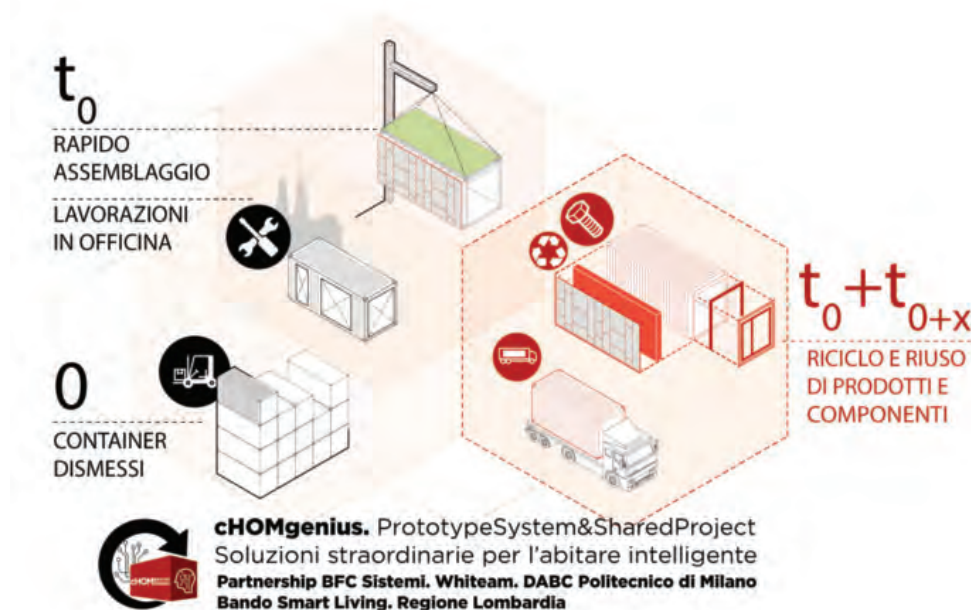


Figura 6 – Schema concettuale del progetto

industriali inquinanti dovuti al riciclo; iii) ri-applicazione/ri-uso, considerata il vantaggio più evidente della catena circolare.

3.1. Il Progetto e la sua realizzazione

Il progetto di ricerca è la progettazione e prototipazione di un sistema di soluzioni per la residenza, concretizzato attraverso la realizzazione di uno spazio abitativo campione in cui sperimentare l'utilizzo del container HC 40' come elemento strutturale di trasferimento, con l'attuazione di verifiche strutturali e antisismiche. Il sistema costruttivo sperimentato è caratterizzato dalla massima flessibilità e personalizzazione nelle soluzioni tipologiche, nei tagli abitativi e nelle soluzioni di facciata e finitura. Questo risultato è stato ottenuto attraverso una progettazione per l'industrializzazione (riduzione dei costi di progettazione e garanzia del risultato) basata su tecnologie a secco e riciclo delle risorse primarie/secondarie (manutenibilità, smontaggio, smaltimento selettivo ...) con un alto grado di personalizzazione (risposta a molteplici target di utenti), per una riduzione dei tempi di costruzione (installazione in situ con regole predefinite del gioco) e controllo di gestione in uso.

Il sistema cHOMgenius si compone di tre parti: un Lotto Sud costituito da due HC 40' denominati HC3 e HC4; uno spazio "Spazio altro" progettato ad hoc in elementi lineari di acciaio; un Lotto Nord costituito da due HC 40', denominati HC1 e HC2,

con dispositivi di dissipazione sismica appositamente progettati.

Le tre parti di cHOMgenius prevedono alternative e flessibili soluzioni costruttive e prestazionali, al fine di applicare quelle soluzioni nella maggior parte delle condizioni prevedibili in un contesto reale. L'orientamento con asse N/S, condizionato dalla morfologia del lotto di inserimento del prototipo, non è il preferenziale per l'autogenerazione energetica ma di questo si è tenuto conto nella valutazione dei risultati, che sono stati ripresi rispetto ad un orientamento ottimale quale quello con asse E/O. Tutte le condizioni al contorno, dalla sfavorevole conformazione del sito, dal tipo di lavorazioni, dalla concomitanza delle lavorazioni di cHOMgenius con l'attività produttiva dell'azienda BFC SISTEMI srl, dalle dimensioni spaziali dell'officina, del situ a disposizione, ecc., se da un lato hanno reso più complessa la realizzazione, dall'altro hanno portato ad applicare in condizioni più critiche (che si potrebbero anche trovare in un cantiere reale) soluzioni di lavorazione più agevoli ed essenziali.

La progettazione di ogni parte di cHOMgenius ha seguito criteri progettuali e requisiti che hanno caratterizzato l'intero progetto, quali: l'utilizzo della tecnologia a secco con tecnica costruttiva totalmente a serraggio; utilizzo di materiali riciclati e riciclabili; facile montabilità, manutenibilità, accessibilità, smontaggio, sostituibilità e rimontabilità di ogni sua parte, compreso l'attacco a terra che, in una parte, monta sistemi di dissipazione sismica



Figura 7 – Fasi di assemblaggio in officina e di installazione in situ

sostituibili, le cui prestazioni sono state verificate tramite prove condotte in laboratori specializzati. Il prototipo, stante le esigenze dell'azienda BFC SISTEMI srl in cui è stato predisposto e lavorato, che ha eseguito la totalità delle lavorazioni, con ruolo di project manager in coordinamento con il gruppo del dipartimento ABC del Politecnico di Milano, è stato realizzato in due lotti. Il monitoraggio costante quotidiano delle lavorazioni e della posa in opera del primo lotto (Lotto Sud) ha condotto ad un affinamento e perfezionamento, ove necessario, delle lavorazioni successivamente applicate al secondo lotto (Lotto Nord), con successivo monitoraggio, inteso come controllo assiduo e analitico delle fasi di lavorazione, assemblaggio e posa in opera.

La doppia fase di realizzazione è stata dettata dalle seguenti plurime condizioni:

- 1) di progetto, legata alla volontà di sperimentare, attuare, validare e/o correggere lavorazioni del primo Lotto rispetto a quelle applicate nel secondo Lotto, al fine di ottimizzare ulteriormente tempi e risorse;
- 2) dalla volontà di sperimentare in situ il trasferimento di moduli finiti costituenti cHOMgenius, attraverso mezzi mobili da cantiere presenti sul mercato, sperimentando anche soluzioni tecnologicamente avanzate;
- 3) dalle condizioni produttive dell'azienda BFC SISTEMI srl e dalla morfologia del lotto, che sono state considerate come opportunità anziché vincolo, facendo mettere a punto soluzioni sempre più coerenti con gli obiettivi progettuali e in linea con le condizioni di contesto;
- 4) dalla necessità di sperimentare in situ le soluzioni costruttive di giunti, strutturali e non, per la finitura di cHOMgenius;
- 5) da una ricerca di affinamento e miglioramento delle soluzioni di pianificazione e programmazione, delle fasi di lavorazione, montaggio e posa con conseguente diminuzione del numero di lavorazioni, dei tempi e dei materiali utilizzati, sempre in raccordo con le aziende coerentemente, con il principio di progettazione in team.

3.2. I parametri guida per il Disassemblaggio e il Riuso

La soluzione progettuale non prevede alcuna demolizione a fine vita, in quanto l'edificio può essere interamente "smontato" e ai suoi componenti

può essere assegnata una nuova funzione e quindi una nuova vita.

Il progetto, pertanto, rientra due volte nella categoria del riuso: in primis ri-utilizza container marittimi dismessi; in secondo luogo, la soluzione di realizzazione a secco, in particolare a serraggio, permette uno smontaggio diretto per singolo componente/materiale, con conseguente riciclo, riuso e riutilizzo delle parti componenti l'organismo edilizio che non vengono volutamente definiti rifiuti come da CAM (CAM Criteri ambientali minimi per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici singoli o in gruppi | CPV (common procurement vocabulary – vocabolario comune per gli appalti pubblici https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/GPP/allegato_tec_CAMedilizia.pdf), ma materie terze, seconde, prime come da obiettivi cogenti di progetto.

3.2.1. Analisi del ciclo di vita

Le analisi del ciclo di vita effettuate sul prototipo (Giorgi et al., 2021) hanno evidenziato come il riuso di container comporti una riduzione di circa il 50% dell'emissione di CO₂ e di circa un terzo di energia incorporata per la struttura portante rispetto a soluzioni tradizionali di analoghe prestazioni, senza considerare che il container riveste anche funzioni di chiusura e partizione.

Nelle analisi LCA condotte su cHOMgenius le fasi C1-C4 del fine vita non sono state considerate per mancanza di letteratura scientifica e database attendibili per delle valutazioni standard delle soluzioni extra-ordinario costruttive adottate. Da questo studio non si è quindi potuto valutare il potenziale vantaggio in termini ambientali legato alla smontabilità del sistema costruttivo adottato nei confronti del fine vita.

Per ovviare a questa mancanza sono in fase di sviluppo, a partire dalla valutazione LCA, delle linee guida che possano dare indicazioni sulla reversibilità alle varie scale e ai vari sistemi, valorizzando il basso impatto ambientale del progetto e dei plus che questo tipo di sistema industrializzato possa avere. Esse sono sintetizzate dalla Tabella 7.

4. CONCLUSIONI

Il prototipo realizzato ha dimostrato la validità dell'approccio progettuale e dei criteri realizzativi. La sperimentazione sul campo della progettazione in team ha consentito di costruire un edificio che è servito per testare ed affinare soluzioni tecno/tipo-

Tabella 7 – Parametri di reversibilità

Parametro	Definizione	Aspetti progettuali
Reversibilità dello spazio	Declinazione per l'analisi LCA della flessibilità d'uso e dell'adattabilità senza opere e si riferisce allo spazio vuoto contenuto all'interno dell'edificio	– Dimensione del volume: risponde alla esigenza di avere un volume circoscritto compatibile con le configurazioni spaziali desiderate in base alla funzione richiesta- Posizione degli elementi fondamentali stabili (strutture, involucro, chiusure, impianti ...) che non limita il numero di opzioni di utilizzo e le possibilità di utilizzare in modo flessibile lo spazio – Capacità strutturale degli elementi resistenti a soddisfare diverse funzioni – Accorpamento impiantistico: gli impianti principali sono concentrati in un volume dedicato, che può anche essere "remoto" rispetto all'edificio. Tutte le canalizzazioni sono concentrate in pochi punti, ma con la possibilità di avere diramazioni secondarie in qualunque punto dell'edificio – Flessibilità impiantistica: gli impianti modulari, a vista e flessibili consentono una facile trasformabilità e "decomposizione" dello spazio senza demolizioni e con interventi rapidi e a bassissima intensità di lavoro
Reversibilità delle strutture/partizioni	Si declina nel requisito di "riconfigurabilità" e si specifica nella capacità delle componenti "solide" e statiche ad essere modificate e/o sostituite facilmente e con bassa intensità di lavoro ed energia	– Indipendenza funzionale: fornita attraverso la separazione delle funzioni a livello di edificio, sistema e componenti – Indipendenza tecnica: fornita dalla minimizzazione delle relazioni tra i diversi moduli funzionali e dalla creazione di gerarchie strutturate e aperte che poggiano su elementi di base ben definiti della struttura. Questo parametro viene declinato anche dalla indipendenza fisica degli impianti rispetto alle strutture e alle partizioni: gli impianti sono accostati, con pochissimi punti di fissaggio puntuali
Reversibilità dei materiali	Si declina in due requisiti base: la separabilità e la riparabilità	– La separabilità è garantita dall'uso di materiali non accoppiati e fissati tra loro solo da sistemi a secco a serraggio: i componenti utilizzati sono pertanto facilmente riconducibili allo stato iniziale prima del montaggio – La riparabilità garantisce la possibilità di allungare il fine vita dei componenti e dell'edificio e consta di alcuni sotto-parametri: • Scambiabilità fisica: fornita dalla progettazione di connessioni smontabili che prevengono il danneggiamento degli elementi considerando la geometria, la morfologia, le sequenze di smontaggio, il tipo di connessione • Ispezionabilità: tutti i componenti sono facilmente raggiungibili ed ispezionabili. Inoltre il controllo in remoto delle prestazioni consente di individuare in tempo reale eventuali anomalie e/o guasti • Smontabilità: l'intero sistema è facilmente smontabile e ciascun componente è indipendente dagli altri • Sostituibilità: nel progetto sono stati usati componenti della produzione standard facilmente reperibili sul mercato e quindi facilmente sostituibili

logiche e costruttive e che ora mette a disposizione del dipartimento ABC del Politecnico di Milano e dei vari partner una struttura/laboratorio in scala 1:1 in cui testare nel tempo i prodotti e le tecniche impiegate, provare alternative e sperimentare nuove idee, anche grazie ai monitoraggi in continuo che vengono effettuati.

cHOMgenius è costituito da diversi livelli di soluzioni, alcune immateriali (come l'approccio e il coinvolgimento di aziende e stakeholder in una logica compartecipativa), alcuni materiali (attrezzature, interfacce e oggetti), che generano soluzioni edilizie e di processo che danno risultati tecnici e tipologici innovativi.

La proposta progettuale, così come sopra descritta, flessibile e personalizzabile, basata su principi di ibridazione e contaminazione tra i diversi settori produttivi, si colloca a pieno nell'ambito dell'economia circolare. Il perseguimento di questi principi si traduce nell'intento di contribuire al rinnovamento tecnico-costruttivo del settore delle costruzioni, secon-

do un'interpretazione proattiva e concreta delle regole di sostenibilità (ambientale, sociale, economica e istituzionale). Tali regole sono messe a sistema secondo connessioni multi-obiettivo, in grado di produrre proposte tecnologiche avanzate di progettazione, costruzione e gestione per l'opera e volte a rinnovare le caratteristiche prevalenti dell'offerta nell'attuale mercato immobiliare.

Rispetto a questo obiettivo, sono stati definiti una serie di principi progettuali in relazione al tema della sostenibilità e dell'industrializzazione. I principi prioritari che generano cHOMgenius sono il riutilizzo, sinonimo di moltiplicare la vita dei prodotti, lo smontaggio dei componenti alla fine della loro prima / ennesima vita e la loro riutilizzabilità per altre vite anche prima della loro riciclabilità.

Questi principi hanno influenzato il modo in cui il prototipo è stato creato e sono sintetizzabili nel montaggio a secco, la rapidità di attuazione, l'industrializzazione del processo produttivo, l'impiego di componenti leggeri e facilmente trasportabili

li, il facile smontaggio, l'elevata riciclabilità e l'elevata sostenibilità ambientale.

L'aggregazione dei moduli è "diretta", cioè ogni modulo è collegato all'altro senza la necessità di ulteriori spazi "intermedi", evitando l'utilizzo di ulteriori tecnologie costruttive per l'inserimento di lastre di tetto e pavimenti intermedi. Il montaggio degli isolanti termici, delle chiusure e dei rivestimenti esterni viene effettuato in officina stringendo, prima di posizionarsi in situ.

In quest'ottica, vengono riassunte le "invarianti" del progetto che determinano le prestazioni stabilite per il progetto risultante, che possono essere riassunte come:

- gestione della variabile di tempo: tempi di realizzazione rapidi, tempi di risposta rapidi agli stimoli esterni (3) del sistema, rapidi tempi di smontaggio e riutilizzo o riciclo ("tempo dinamico");
- trasferibilità: le soluzioni (tecno-tipologiche, morfologiche, strutturali, impiantistica) sono trasferibili ad altri contesti e requisiti geografici;
- innovazione progettuale e produttiva: trasferimento e/o adattamento da settori di componenti dell'attuale produzione di prodotti, tecniche e conoscenze, sia nel settore delle costruzioni che in un altro settore (innovazione ricombinante);
- multifunzionalità qualitativa del sistema di costruzione, intesa come possibilità di utilizzare sia l'intero sistema che i singoli componenti (sistema adattivo) per molteplici funzioni;
- sistema di costruzione re-attivo: sia dal punto di vista strutturale (sistemi antisismici attivi), dal punto di vista energetico (gestione integrata edificio/impianto) sia dal punto di vista tecnico, inteso come relativo all'intero ciclo di vita dell'edificio e delle sue componenti.

Il prodotto proposto possiede un positivo impatto potenziale perché anzitutto si colloca nell'andamento in crescita del mercato e della quantità del volume di affari delle case prefabbricate, che ha tenuto, rispetto la crisi sulle abitazioni ad alte prestazioni; risponde ad un assetto regolamentare e normativo che richiede un miglioramento continuo di prestazioni certificate e certificabili. Si tratta di un sistema che risponde al soddisfacimento esigenziale di categorie di utenza diversificate e si colloca nell'ambito della ricerca sulla smart city, dove le strutture componenti la città dovranno essere in gran parte ricavati da materiali di recupero, scarto o ad elevato contenuto tecnologico, che ne facciano un reale esempio della possibilità di ricostruire un ambiente urbano, in cui l'abitare si avvale di massimi sistemi di sostenibilità. Rap-

presenta inoltre un prodotto che propone una gestione energetica dell'immobile con attenzione alla qualità ed alla capacità di rigenerazione delle risorse naturali del contesto ed un controllo dell'impatto ecologico.

Nei prossimi anni il mercato dell'edilizia, sostenuto e guidato anche da importanti investimenti come Horizon Europe con il 5° cluster o il Recovery and Resilience Facility (Clima, energia e mobilità – <https://op.europa.eu/en/web/eu-law-and-publications/publication-detail/-/publication/3c6ffd74-8ac3-11eb-b85c-01aa75ed71a1> e NextGenerationEU (https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_en), avrà una trasformazione in crescita positiva (Santilli, 2021) verso la sostenibilità e la resilienza.

Analizzando i processi realizzativi/costruttivi e il ruolo del progetto sono state formulate delle linee guida, intese come possibili sviluppi propositivi, in grado di superare gli ostacoli all'innovazione per l'edilizia abitativa e perseguire i requisiti oggi cogenti per gli edifici.

Tali linee guida sono dei suggerimenti, sperimentati dal progetto cHOMgenius, che mirano a definire possibili prospettive di sviluppo futuro sul tema della sostenibilità nel settore delle costruzioni verso tre possibili percorsi principali: Plus, Fine Vita e Casi pilota.

"Plus" riguarda la non completa riconoscibilità che hanno gli strumenti normativi nel valorizzare le prestazioni che ha un sistema innovativo, come lo stesso cHOMgenius, rispetto ad edifici *Business as Usual*, ovvero realizzati con soluzioni costruttive convenzionali.

Potrebbe essere utile analizzare il costo globale di costruzione in relazione alle performance. Questo ramo della ricerca ha assunto il concetto di "prezzo edonico" (Herath & Maier, 2011) come un modo possibile per far emergere queste caratteristiche importanti ma non apparenti. Parallelamente, stiamo lavorando con UNI – Ente Italiano di Normazione a una Roadmap per diffondere questo "plus performances" per l'aggiornamento di prassi o standard all'accettazione di questi fattori.

Il "Fine Vita" all'interno del processo di costruzione costituisce una delle sfide fondamentali per la sostenibilità, nonostante sia la fase del processo di costruzione meno studiata e considerata. Un sistema preassemblato con montaggio a secco è sicuramente uno dei migliori prerequisiti per garantire una facile smontabilità dell'edificio per garantire il riutilizzo e il riciclo di componenti ed elementi. Insieme alla ricerca "Plus", la valutazione

“Fine Vita” (non solo dal punto di vista LCA) è una linea di indagine obbligatoria dal punto di vista proattivo e progettuale, che ha poche letterature e dati, che abbiamo esplorato con cHOMgenius e che necessitano di un’analisi approfondita per ottenere uno strumento operativo e un relativo protocollo per aiutare la fase decisionale del processo di progettazione.

I “Casi pilota” appartengono agli strumenti pratici e sperimentali, obbligatori nell’attuale scenario di costruzione: il mercato e le parti interessate hanno bisogno di buoni esempi e casi pilota per mostrare come l’innovazione sia conveniente e fattibile. Un buon esempio di questo approccio potrebbe essere il francese “Permis d’Expérimenter” in cui i progetti molto innovativi possono derogare ad alcune regole e avere un processo più veloce, a condizione che il progetto utilizzi tecniche sperimentali e soluzioni di nuova concezione (MCT, 2019).

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Abrasheva G., Senk D., & Häußling R. (2012). Shipping containers for a sustainable habitat perspective. *Revue De Metallurgie. Cahiers D’Informations Techniques*, 109(5), 381-389. doi:10.1051/metal/2012025.
- Atmaca A., & Atmaca N. (2016). Comparative life cycle energy and cost analysis of post-disaster temporary housings. *Applied Energy*, 171, 429-443. doi:10.1016/j.apenergy.2016.03.058.
- Batiactu (2021) www.batiactu.com/edito/constructionhors-sit-solution-un-secteur-qui-investit61316.php
- Bernardo L.F.A., Oliveira L.A.P., Nepomuceno M.C.S., & Andrade J.M.A. (2013). Use of refurbished shipping containers for the construction of housing buildings: Details for the structural project. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(5), 628-646. doi:10.3846/13923730.2013.795185.
- Berger R. (2018) Prefabricated housing market in Central and Northern Europe – Overview of market trends and development https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_prefabricated_housing_market_3.pdf p16
- Boafo F.E., Kim J., & Kim J. (2016). Performance of modular prefabricated architecture: Case study-based review and future pathways. *Sustainability (Switzerland)*, 8(6) doi:10.3390/su8060558.
- Ceragioli G. (1977). Note di ricerca su problemi della prefabbricazione fra il 1971 ed il 1975. Torino: Libreria Universitaria Levrotto & Bella.
- CITB (2019) Written evidence submitted by CITB. <http://data.parliament.uk/writtenevidence/committeeevidence.svc/evidencedocument/housing-communities-and-local-government-committee/modern-methods-of-construction/written/101503.pdf>
- CRESME (2019). Il mercato delle costruzioni 2020. XXVII rapporto congiunturale e previsionale. Roma: Cresme.
- CRESME (2020). XXIX rapporto congiunturale e previsionale CRESME. scenari e previsioni per il mercato 2020-2025. Roma: Cresme.
- Department for Communities and Local Government UK. (2017). Fixing our broken housing market. UK: Williams Lea Group on behalf of the Controller of Her Majesty’s Stationery Office.
- FLA (2019). 4° rapporto case ed edifici in legno. Milano: Federlegnoarredo.
- Frateili E. (1987). Il rapporto progetto/industria e la terza rivoluzione tecnologica. In V. Gangemi, & P. Ranzo (Eds.), *Il governo del progetto* (pp. 105-110) Edizioni Parma.
- Ginelli E., & Pozzi G. (2017). Safety and energy controlled prefabricated building system. Paper presented at the Sgem Vienna Green 2017, doi:10.5593/sgem2017H/63/S26.064.
- Giorgi S., Lavagna M., Ginelli E. (2021) Valutazione LCA di un edificio realizzato con container per trasporti marittimi riusati. *Ingegneria dell’ambiente*, vol. 8, num. 2.
- Giriunas K., Sezen H., & Dupaix R.B. (2012). Evaluation, modeling, and analysis of shipping container building structures. *Engineering Structures*, 43, 48-57. doi:10.1016/j.engstruct.2012.05.001.
- GLS (2021) Container usati in vendita. Genoa Logistic Services. www.genoalogisticservices.com/it/containers/containeri-usati.html
- Islam H., Zhang G., Setunge S., & Bhuiyan M.A. (2016). Life cycle assessment of shipping container home: A sustainable construction. *Energy and Buildings*, 128, 673-685. doi:10.1016/j.enbuild.2016.07.002.
- Kasperzyk C., Kim M.K., & Brilakis I. (2017). Automated prefabrication system for buildings using robotics. *Automation in Construction*, 83, 184-195. doi:10.1016/j.autcon.2017.08.002.
- Losasso M. (2010). Percorsi dell’innovazione. Industria edilizia, tecnologie, progetto. Napoli: CLEAN.
- MCT (2019) Permis d’expérimenter : faciliter la réalisation des projets de construction et favoriser l’innovation. Ministère de la Cohésion des Territoires <https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/permisdexpérimenter-faciliter-la-realisation-des-projets-deconstruction-et-favoriser-0> visitato il 07/06/2021
- Oh S., Cho B., & Kim D. (2017). Development of an exportable modular building system by integrating quality function deployment and TRIZ method. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 16(3), 535-542. doi:10.3130/jaabe.16.535.
- Olivas F., & Aragonés O. (2013). Plug and play modular building solutions to reduce lead time, cost and increase flexibility. Paper presented at the IEEE Cement Industry Technical Conference (Paper); 2013 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference, CIC 2013, Orlando, FL. doi:10.1109/CITCON.2013.6525277.
- Otilia-Alexandra T., & Daniel Mihai G. (2013). Structural solutions for emergency architecture. Paper presented at the Structures and Architecture: Concepts, Applications and Challenges – Proceedings of the 2nd International Conference on Structures and Architecture, ICSA 2013; 2nd International Conference on Structures and Architecture, IC-SA 2013, Guimarães. 1581-1588.
- Rubner (2021) <https://www.rubner.com/en/haus/your-rubner-house>
- Santilli G. (Ed.). (2021). Il futuro dell’edilizia. Milano: Il Sole 24 ore.

Hubgrade, gestione intelligente delle risorse

Hubgrade Performance è una **soluzione digitale** completa composta da una serie di soluzioni software intelligenti per l'**ottimizzazione in tempo reale** delle prestazioni del processo degli impianti di trattamento delle acque reflue. Consente una gestione automatizzata grazie a sistemi all'avanguardia, compreso l'utilizzo di **tecnologie di intelligenza digitale**, che sfruttano al meglio le strutture e i processi dell'intero sistema, dall'impianto stesso alla rete fognaria. In questo modo le performance sono notevolmente migliorate, consentendo **risparmi sui costi energetici e sui prodotti chimici**, migliorando nel contempo **la capacità di trattamento biologico dell'impianto**.

RISULTATI OTTENUTI

- Aumento del **40% della capacità biologica**
- Aumento del **100% della capacità idraulica**
- Riduzione del **25% del consumo energetico** per l'aerazione
- Riduzione del **75% del consumo energetico** per l'aerazione in dissabbiatura
- Riduzione del **75% del consumo energetico** per il ricircolo interno dei nitrati
- Riduzione del **100% dei prodotti chimici** per la denitrificazione e per la precipitazione del fosforo
- Risparmio del **20-30% sui costi operativi complessivi**



Hubgrade

PERFORMANCE



Veolia Water Technologies Italia S.p.A.

L'IMPIANTO DI DEPURAZIONE DELLE ACQUE REFLUE DI MILANO NOSEDO OTTIENE UN RISPARMIO ANNUO DI 630.000 EURO GRAZIE A HUBGRADE PERFORMANCE

L'implementazione di tecnologie digitali avanzate per la gestione del processo raggiunge risultati sempre più consolidati e competitivi nel settore del trattamento delle acque reflue. Un buon esempio di questa spettacolare evoluzione è l'impianto di trattamento delle acque reflue (WWTP) di Nosedo, il principale impianto di depurazione della città di Milano, che è riuscito, in un solo anno, a ridurre i propri costi di esercizio di 630.000 euro all'anno, grazie all'utilizzo della tecnologia digitale HUBGRADE Performance, implementata da Veolia Water Technologies.

HUBGRADE Performance è una soluzione digitale completa lanciata da Veolia Water Technologies, composta da una serie di soluzioni software intelligenti per l'ottimizzazione in tempo reale delle prestazioni del

processo. Consente una gestione automatizzata grazie a sistemi all'avanguardia, compreso l'utilizzo di tecnologie di intelligenza digitale, che sfruttano al meglio le strutture e i processi dell'intero sistema, dall'impianto stesso alla rete fognaria. In questo modo le performance sono notevolmente migliorate, consentendo risparmi sui costi energetici e sui prodotti chimici, migliorando nel contempo la capacità di trattamento biologico dell'impianto.

Il WWTP di Nosedo, gestito dalla società pubblica MM SpA, è, per le sue caratteristiche e dimensioni, un'ottima vetrina dei vantaggi offerti dall'utilizzo di HUBGRADE Performance. Non a caso si tratta del principale impianto di depurazione di Milano, con una capacità di 1.250.000 A.E. con un processo di rimozione del fosforo e nitrificazione/denitrificazione completa,





essendo, inoltre, il più grande impianto in Europa a riutilizzare quasi il 70% del suo effluente finale per scopi agricoli.

In questo contesto i responsabili dell'impianto hanno voluto un sistema in grado di ottimizzare le prestazioni dell'impianto in ogni condizione di carico, anche in caso di pioggia, riducendo il consumo di prodotti chimici, risparmiando sulla bolletta energetica e garantendo in ogni momento, la qualità dell'effluente finale per poter continuare a riutilizzare fino al 70% della portata per scopi irrigui. La sfida era raggiungere tutto questo senza intraprendere grandi modifiche impiantistiche che richiedono investimenti significativi – e la soluzione è arrivata grazie a Veolia Water Technologies che, nel 2019, ha implementato la soluzione HUBGRADE Performance, un software di controllo olistico e intelligente per gli impianti di trattamento acque.

RISPARMIO SUI COSTI DI ESERCIZIO, RIDUZIONE NELL'UTILIZZO DI PRODOTTI CHIMICI E NELLA PRODUZIONE DI FANGHI CHIMICI

Una decisione saggia, visto che i risultati raggiunti tra luglio 2020 e marzo 2021 sono stati ottimi. Oltre al risparmio sui costi di esercizio di 630.000 euro all'anno, si è registrata anche una riduzione nell'utilizzo di prodotti chimici e nella produzione dei fanghi chimici. E particolarmente rilevante è stata la riduzione dei consumi energetici nella fase biologica, che ha raggiunto il 25%, importo molto rilevante se si tiene conto che l'impianto di depurazione tratta 5 metri cubi al secondo in tempo asciutto e 15 in caso di pioggia. A queste prestazioni si aggiungono altri traguardi altrettanto

significativi, come la garanzia del rispetto della qualità di scarico e la riduzione degli interventi manuali, che significa per MM SpA avere la tranquillità di sapere che le cose vengono fatte correttamente liberando risorse per altre attività, generando un valore aggiunto per il cliente.

Tra i fattori determinanti che hanno consentito questi miglioramenti operativi nell'impianto di depurazione di Nosedo vi sono, tra gli altri, un sistema in grado di integrare il funzionamento della rete fognaria e del WWTP, elemento chiave in un impianto delle caratteristiche e delle dimensioni da Nosedo. Allo stesso modo, oltre al risparmio medio di consumi energetici, prodotti chimici e produzione di fanghi chimici, è possibile ottenere una migliore gestione delle grandi variazioni di carico biologico, nonché una migliore visione d'insieme del processo. E i piani futuri prevedono la possibilità di ampliare la soluzione per coprire anche l'intero sistema fognario della città di Milano.

UNA SOLUZIONE DIGITALE OLISTICA

In generale, la tecnologia HUBGRADE Performance Plant consente agli operatori di disporre di uno strumento per prendere decisioni in tempo reale sull'intero processo. Più specificamente, il pacchetto di soluzioni HUBGRADE che ha reso possibili tutti questi vantaggi per il WWTP di Nosedo include:

- Ottimizzazione del set-point dell'ossigeno disciolto e rimozione dell'azoto per garantire la conformità all'uscita di azoto, oltre a ridurre i costi operativi e di investimento.
- Controllo dell'agitazione nel comparto di denitrificazione, per ridurre i costi energetici operativi.



- Controllo dell'alimentazione d'aria in base alla pressione dei compressori per risparmiare sui costi energetici operativi.
- Ricircolo dei fanghi attivi, migliorando la capacità idraulica dell'impianto – ad esempio in caso di pioggia, riducendo i costi operativi nel pompaggio e aumentando la biomassa disponibile nel trattamento biologico.
- Miglioramento del tempo di ritenzione dei solidi (età dei fanghi), per ridurre il consumo di energia e migliorare la capacità idraulica.
- Standby delle linee biologiche, per abbattere i costi energetici e garantire la capacità biologica del WWTP.
- Controllo della precipitazione del fosforo, evitando sovradosaggio di reattivi chimici e riducendo la produzione di fanghi chimici.
- Ottimizzazione dell'aerazione della dissabbiatura/disoleatura, al fine di garantire una performance stabile di questa fase di trattamento e migliorare la rimozione delle particelle solide grossolane.
- Ricircolo dei nitrati (NO_3) in tempo reale, per soddisfare la rimozione dell'azoto richiesta al minor costo operativo possibile.

Inoltre nel WWTP di Nosedo è stata prevista anche la funzione *stormwater*, al fine di aumentarne la capacità idraulica in caso di pioggia abbinando un'operazione di decantazione della vasca di aerazione, basata su pluviometri e misuratori nella fognatura, con funzionalità in grado di massimizzare l'afflusso al trattamento biologico.

Insomma, la tecnologia HUBGRADE, già installata in centinaia di impianti di trattamento acque, è un vantaggio prezioso per il WWTP Nosedo sia per il presente che per il futuro, poiché ha collocato questo impianto tra i più

avanzati d'Europa, anticipando la crescente domanda generata dalla popolazione milanese. Tutto questo, con investimenti e un costo contenuto e un uso più efficiente e sostenibile delle risorse, che consente un maggiore impegno per l'economia circolare.

DATI CHIAVE

NOSEDO WWTP

- 432.000 m³ portata media giornaliera
- 5 m³/s portata media in tempo asciutto
- 15 m³/s portata di punta in caso di pioggia
- Dal 60 al 70% dell'acqua trattata è destinata all'agricoltura

RISPARMI OTTENUTI CON HUBGRADE PERFORMANCE

- Risparmio sui costi di esercizio (circa € 630.000/anno):
- Risparmio energetico: 25% (biologico)
- Riduzione dei reattivi chimici di defosfatazione (precipitazione di P, FeCl_3): 77%
- Riduzione dei fanghi chimici: -126 tSS / anno
- Aumento della capacità idraulica in caso di pioggia: 20-30%.

MIGLIORAMENTO MEDIO DELLA QUALITÀ DELL'EFFLUENTE:

- N-tot: 7,1 → 5,5 mg / l
- P-tot: 0,9 → 0,7 mg / l

LA DIVERSIFICAZIONE CONTRIBUTIVA: UNA DELLE LEVE PER ORIENTARE LE AZIENDE VERSO IMBALLAGGI SEMPRE PIÙ RICICLABILI

A cura di Federica Brumen – Ricerca & Sviluppo Comieco

Sono trascorsi quasi 25 anni da quando il D.Lgs 22/97 o Decreto Ronchi ha attribuito al sistema consortile il compito di assicurare il raggiungimento degli obiettivi globali di riciclo e recupero degli imballaggi sull'intero territorio nazionale e, al contempo, garantire l'attuazione di mirate politiche di gestione, comprese quelle di prevenzione, attraverso l'eco-innovazione.

L'intuizione politica del provvedimento, che è risultata vincente, è la delega al sistema delle imprese di organizzare la gestione secondo una logica consortile per adempiere alla responsabilità del produttore, mantenendo in capo all'autorità pubblica la funzione di controllo.

Da qui la nascita del sistema CONAI basato sulle imprese di produttori e utilizzatori di imballaggi, articolato su 7 consorzi di materiale e fondato sul finanziamento del Contributo ambientale versato in rapporto ai costi di gestione dei diversi materiali dall'utilizzatore degli imballaggi.

Da allora il Contributo ambientale CONAI (CAC) della carta ha subito diverse oscillazioni, seguendo l'andamento dei valori del mercato della materia prima seconda e considerando di volta in volta le risorse necessarie al funzionamento ottimale della filiera del recupero e del riciclo degli imballaggi a base cellulosica. Così a partire dal 1° luglio 2021 il CAC è passato da 55 EUR/tonnellata a 25 EUR/tonnellata per tutti gli imballaggi in carta e cartone. Il risparmio previsto per gli utilizzatori di questo tipo di packaging è di oltre 135 milioni di euro, su un immesso al consumo pari a 4,5 milioni di tonnellate.

La variazione del contributo è dovuta principalmente all'aumento dei valori di mercato della materia prima seconda. Con l'inizio del 2021 le quotazioni della carta ottenuta con il macero sono aumentate significativa-

mente con l'aumento conseguente dei ricavi consortili da vendita dei maceri.

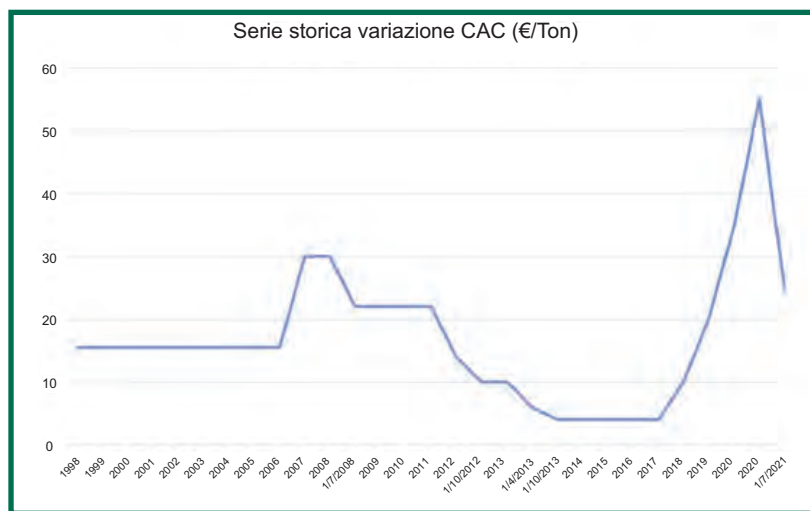
Un riequilibrio sui consumi interni di carta da macero per circa un milione di tonnellate, grazie all'apertura di tre nuove cartiere ha inoltre contribuito a rendere ancora più appetibile la carta da riciclo, allontanando l'ipotesi di una flessione nei suoi valori di mercato.

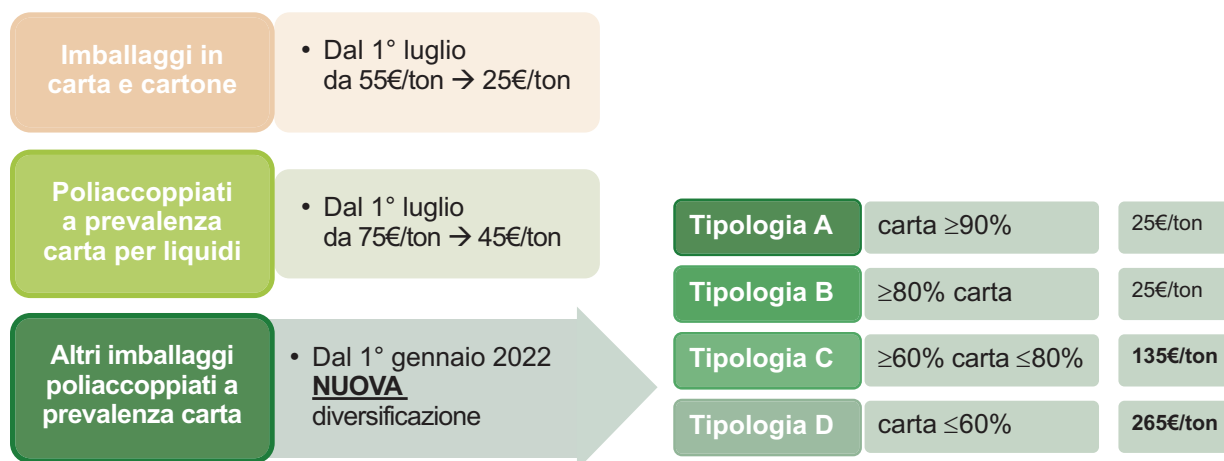
Una situazione economica positiva che ha messo Comieco nella condizione di continuare a garantire le attività di raccolta e gestione dei rifiuti di imballaggio in carta e cartone anche con un contributo ambientale più che dimezzato.

Sussidiarietà al mercato

Il contesto favorevole ha reso meno necessario – in questo caso per gli imballaggi in carta e cartone – l'intervento del sistema CONAI. Gli alti valori hanno indotto alcuni operatori ad affidare al libero mercato gli imballaggi da raccolta differenziata in carta e cartone, riducendo le quantità conferite tramite le convenzioni ANCI-CONAI.

È in casi come questo che il sistema CONAI si ritrae lasciando spazio al mercato. Ed è invece quando il mercato soffre, come avvenuto lo scorso anno con l'inizio dell'emergenza sanitaria e il lockdown, che torna ad avere margini di intervento più ampi, garantendo la continuità del ritiro dei materiali da raccolta differenziata a qualsiasi condizione economico-finanziaria.





Il Consorzio conferma anche in questo caso il suo ruolo di sussidiarietà al mercato.

I risultati della filiera e gli imballaggi poliaccoppiati a prevalenza carta

Nel 2020 la filiera della carta ha raggiunto buoni risultati dal punto di vista operativo (il tasso di riciclo degli imballaggi in carta e cartone ha superato l'87%, anticipando di 10 anni e superando gli obiettivi UE fissati al 2030) in un contesto legislativo che promuove l'economia circolare ed è sempre più orientato a incentivare il riciclo e il riutilizzo dei materiali a partire dal decreto legislativo 116 del settembre 2020 che recepisce le direttive UE del 2018.

Una delle sfide future riguarda la separazione e il riciclo dei materiali compositi, che comporta dei costi aggiuntivi non indifferenti. A questo proposito CONAI ha recentemente deliberato l'estensione del contributo ambientale diversificato a nuove categorie di materiali, contributo che verrà applicato dal 1° gennaio 2022.

Nuovo contributo ambientale diversificato

Il progetto di diversificazione è orientato allo sviluppo della raccolta e alla remunerazione di attività e investimenti per le operazioni di selezione e riciclo, attraverso l'applicazione di un contributo aggiuntivo (extra CAC) sulla specifica tipologia di imballaggio identificata.

In questa prima fase di introduzione della diversificazione del contributo, il criterio adottato è quello del peso della componente carta. A tendere sarà invece il metodo di valutazione Aticelca sulla base della norma UNI 11743:2019 a determinare il contributo diversificato in relazione alla effettiva riciclabilità degli imballaggi stessi. Sono state individuate 4 tipologie di contributo ambientale, che entreranno in vigore a partire dal 1° gennaio 2022, in base alla quantità di fibra cellulosica presente negli imballaggi poliaccoppiati.

Agli imballaggi con presenza di fibra superiore all'80% (tipologia A o B) non verrà applicato alcun extra CAC e il contributo che dovrà essere versato sarà pari a 25€/tonnellata.

Gli imballaggi con una quantità di fibra inferiore all'80%, ma superiore al 60% ricadranno nella tipologia C e per questi si dovrà versare un extra CAC pari a 110 € per un ammontare totale di 135 €/tonnellata.

Le aziende che utilizzeranno imballaggi con una percentuale di fibra inferiore al 60% dovranno versare un extra CAC di 240 € per un ammontare totale di 265 €/tonnellata. La diversificazione contributiva è una delle leve impiegate dal Consorzio per orientare le aziende verso imballaggi sempre più riciclabili.

L'approccio all'ecodesign degli imballaggi svolge un ruolo cruciale nel raggiungimento dei diversi obiettivi di sostenibilità. Si stima, infatti, che le fasi di progettazione incidano su circa l'80% degli sprechi di energia, materiali, ecc. connessi al packaging per cui è proprio in questa fase che le aziende possono intervenire efficacemente.

Comieco affianca le aziende in questo percorso di eco-design (chiamato anche "Life Cycle Design"), supportandole con una costante attività di ricerca sulle soluzioni migliori da adottare per raggiungere gli obiettivi attesi in termini di risparmio di risorse e di risultati di raccolta e riciclabilità dei materiali in carta e cartone.

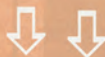
I principali benefici dell'eco-design sono riconducibili a tre diverse dimensioni:

- **AMBIENTALE** – less is more, un minore impatto nello sviluppo dei prodotti e una maggiore e migliore attuazione della legislazione ambientale;
- **ECONOMICA** – l'ottimizzazione nell'uso delle risorse genera minor impatto e comporta un risparmio anche per l'impresa produttrice;
- **SOCIALE** – la capacità di risposta alla crescente sensibilità dei consumatori migliora l'immagine dell'azienda e aumenta la competitività.

Comieco – Cons. Naz. Recupero e Riciclo degli imballaggi a base Cellulosica

www.comieco.org





A

LEGGERE
C'È SEMPRE DA

IMPARARE.



PER

ESEMPIO,

DAL



RETRO

DELLE
CONFEZIONI.

Si chiama etichettatura ambientale. Ti informa su come conferire correttamente i contenitori o gli imballaggi dei prodotti. Basta cercarla sul retro delle confezioni di carta e cartone.

Sempre più aziende, infatti, sono attente nel fornire al pubblico informazioni utili, così che tutti possano dare il proprio contributo al corretto riciclo di carta e cartone.

Perché ogni piccolo gesto quotidiano diventi un gesto di senso civico.

La carta si ricicla e rinasce.
Garantisce Comieco.

comieco.org



comieco
Consorzio Nazionale Recupero e Riciclo
degli Imballaggi a base Cellulosica

INFORMAZIONI DALLE AZIENDE

ECOTYRE: IN 10 ANNI DI ATTIVITÀ RECUPERATI OLTRE 405 MILIONI DI KG DI PFU (55 MILIONI DI PEZZI)

Risultati di raccolta

La raccolta annua è passata dai 9 milioni di kg di PFU del 2011 a una media di circa 40 milioni di kg nell'ultimo triennio. Complessivamente sono stati oltre 405 milioni i kg di PFU avviati correttamente a recupero (oltre 55 milioni di pezzi). Per ottenere questi risultati sono state necessarie circa 180 mila missioni di ritiro presso gommisti, officine meccaniche, autodemolitori e depositi di PFU abbandonati in natura. Interventi coordinati da EcoTyre ed effettuati da partner territoriali affidabili che nel complesso si stima abbiano generato un valore economico pari a circa 100 milioni di euro in 10 anni.

Servizi ai soci

La partecipazione al Consorzio è andata sempre crescendo, stabilizzando EcoTyre come la realtà di settore con il maggior numero di Soci (776 Associati a dicembre 2020), un primato che può vantare ancora oggi. Grazie al giusto mix tra qualità e costi del servizio, EcoTyre è riuscito a ridurre il contributo ambientale pagato dai consumatori di quasi il 28%.

Attenzione ai gommisti

I gommisti, che si rivolgono ad EcoTyre per il ritiro, sono cresciuti da circa 3.000 nel 2011 ai quasi 14.000 nel 2020. Dai più remoti comuni alpini alle isole minori, il Consorzio svolge il proprio servizio in modo capillare, con un indice medio di puntualità pari all'80%, assumendosi anche gli oneri logistici per la raccolta in aree difficilmente raggiungibili.

EcoTyre ha scelto di privilegiare le esigenze dei piccoli gommisti che hanno minore spazio per stoccare i PFU in attesa del ritiro. Sebbene il ritiro di un quantitativo di meno di 300 PFU sia più oneroso da un punto di vista logistico ed economico, EcoTyre dedica a questo tipo di missioni oltre il 65% del totale dei ritiri.

Collaborazione con i partner

La solidità di EcoTyre è merito anche della capacità di aver costruito, nei suoi dieci anni di storia, un network affidabile di partner e fornitori: una struttura che conta dieci persone tra dipendenti e collaboratori fissi, interagisce quotidianamente con 109 Logistics Partner e 17 Recycling Partner. EcoTyre, inoltre, si affida ad aziende rispettose dell'ambiente: il 93% dei mezzi su cui viaggiano i PFU sono marchiati Euro 5 o Euro 6 (+ 28% nel 2020 rispetto al 2019).

Raggiungimento degli obiettivi

EcoTyre adotta un Piano Nazionale di Raccolta (PNR), frutto di un attento studio dei fattori e delle serie storiche di stagionalità che incidono sulla produzione e gestione dei PFU. Il risultato di questo lavoro è che in die-

ci anni EcoTyre è sempre riuscito a superare il target di raccolta fissato dalla normativa, raccogliendo un quantitativo di PFU che è stato tra il 2% e il 10% maggiore di quello richiesto.

EcoTyre live

EcoTyre ha investito e investe in un sistema di rendicontazione puntuale, tempestivo e trasparente per comunicare in modo semplice e immediato i risultati raggiunti. Sul sito è disponibile EcoTyre Live, un cruscotto per visualizzare i dati di raccolta mese per mese, per area geografica e in base al tipo di PFU raccolti e gommisti serviti.

Responsabilità sociale

Nel 2013 EcoTyre ha lanciato PFU Zero, il progetto di raccolta straordinaria che ha permesso di avviare al recupero quasi 2,5 milioni di gomme, in oltre 200 iniziative: l'85% dei PFU gestiti è stato raccolto rimuovendo grandi depositi di gomme abbandonate, cosiddetti stock storici, un problema annoso per i Comuni che li ospitavano e il restante 15%, pari a oltre 300 mila gomme, attraverso iniziative di sensibilizzazione con importanti partner a livello nazionale, come Legambiente e Marevivo.

EcoTyre

www.ecotyre.it



PRESENTATO IL 7° RAPPORTO ANNUALE DEL CDCNPA SULL'ANDAMENTO DELLA RACCOLTA DI PILE E ACCUMULATORI IN ITALIA

Pile e accumulatori portatili: gestiti 11.109.662 kg nel 2020

La raccolta di pile e accumulatori portatili effettuata nel 2020 dal CDCNPA registra una crescita dell'1,29% rispetto all'anno precedente. Il resoconto dei quantitativi considera due fonti di ingresso: la prima è la raccolta effettuata dai Consorziati presso le strutture e i soggetti abilitati e iscritti al CDCNPA, la seconda, cosiddetta "volontaria", riguarda i servizi di raccolta professionali che gli stessi Consorziati erogano in modo autonomo ad altri soggetti detentori di rifiuti.

Il 2020 ha visto aumentare sensibilmente la quantità di batterie portatili immesse sul mercato (+9%), prevalentemente conseguenza del maggior acquisto e utilizzo di dispositivi elettronici portatili per le attività in lavoro agile e didattica a distanza: tale incremento repentino ha causato una leggera flessione del tasso di raccolta. Inoltre serve ricordare il cambiamento qualitativo in atto circa le tipologie merceologiche delle pile e degli accumulatori portatili con un aumento di immesso sul mercato di quelli ricaricabili a scapito delle pile "usa e getta". Questo significa che le batterie presenti nelle apparecchiature hanno mediamente cicli di vita sempre più lunghi e quindi gli accumulatori immessi in un dato momento sul mercato diverranno rifiuti dopo un tempo più lungo, riducendo i quantitativi disponibili per la raccolta.

La raccolta per Regione

Il Nord Italia, nonostante un leggero calo rispetto all'anno precedente, mantiene un ruolo di traino per la raccolta nazionale dato che genera oltre la metà dei rifiuti raccolti. Il Centro cresce leggermente e raggiun-



ge livelli soddisfacenti, soprattutto se intesi in chiave pro-capite. Nel 2020 il Sud è riuscito a fare un ampio balzo in avanti, soprattutto grazie agli sforzi della Sicilia (+20%), ma in termini assoluti ha ancora da guadagnare terreno rispetto alle altre aree.

Gestito il 42,65% dell'immesso al consumo, a un passo dall'obiettivo europeo

In base alle pile e agli accumulatori portatili contabilizzati dai Sistemi Collettivi e Individuali aderenti al CDCNPA e seguendo i criteri europei fissati dalla Direttiva 2006/66/CE, il tasso di raccolta su base triennale è pari 42,65% dell'immesso. L'Italia, quindi, è a un passo dall'obiettivo di raccolta attualmente in vigore in Europa, pari al 45%. Su base annuale invece il tasso di raccolta si attesta al 39,4%, il cui calo rispetto all'anno passato si spiega con l'incremento dell'immesso nel corso del 2020.

10.952 Centri di Raccolta: aumentano in modo omogeneo in tutta Italia (+6,34%)

Circa 650 nuovi luoghi di raccolta si sono iscritti al CDCNPA nel corso del 2020 facendo passare il totale da 10.300 a quasi 11.000 e confermando il trend di crescita registrato fin dalla nascita del CDCNPA.

Gli esercizi commerciali hanno sicuramente avuto un ruolo decisivo in questo aumento, considerato anche il

progetto pilota avviato dal CDCNPA per la distribuzione ai negozi di contenitori di raccolta per le pile e gli accumulatori portatili.

Accumulatori industriali e per veicoli: la raccolta nel 2020 è stata di oltre 155 milioni di kg.

I Sistemi Individuali e Collettivi aderenti al CDCNPA hanno raccolto, nel corso del 2020, 155.678 tonnellate di accumulatori industriali e per veicoli, con un leggero calo rispetto all'anno precedente. Il calo ha però riguardato anche il quantitativo di batterie nuove immesse sul mercato tanto che il tasso di raccolta è rimasto sostanzialmente invariato.

Raccogliamo più pile

Nel 2020 il CDCNPA ha rinnovato la collaborazione con Casa Surace per la seconda edizione della campagna di comunicazione "Raccogliamo più pile". Il team comico ha spiegato attraverso una campagna radiofonica, web e social i segreti per una corretta raccolta differenziata di pile e accumulatori portatili nascosti nelle nostre case. La campagna radiofonica del 2020 si è classificata in cima al podio nella categoria No Profit alla 25ª edizione del Premio Mediasars, guadagnandosi anche la Special Star per la Direzione Creativa.

Garantiti tutti i servizi durante la pandemia da Covid-19

L'anno appena trascorso, e purtroppo anche la prima metà del 2021, ha portato con sé una fase di grande incertezza legata all'emergenza Covid-19 ma l'intera filiera coordinata dal CDCNPA è riuscita a garantire, in condizioni di assoluta sicurezza, tutti i servizi anche durante la fase di lockdown.

CDCNPA

<https://cdcnpa.it/>



BITUME E CONGLOMERATI BITUMINOSI: UNA RISPOSTA SOSTENIBILE AL RIFACIMENTO DEGLI OLTRE 600MILA KM DI STRADE E AUTOSTRADE

Il bitume rappresenta un prodotto dai contenuti tecnologici molto elevati, sia come componente fondamentale per la produzione di conglomerati bituminosi nel settore delle costruzioni stradali ed aeroportuali sia nel settore industriale, come componente essenziale delle guaine impermeabilizzanti. Oggi, grazie alle tecnologie di riciclaggio dei manti stradali e le tecniche di produzione dei conglomerati a bassa temperatura o a freddo, si riesce ad abbattere gran parte dell'impatto ambientale legato alle costruzioni stradali con una considerevole diminuzione delle emissioni inquinanti. Va anche ricordato che è sempre più diffuso il riutilizzo di materie prime secondarie o prodotti di scarto (plastiche e polverino di gomma) realizzando una concreta economia circolare nella costruzione e manutenzione delle strade.

I numeri del settore

Il comparto produttivo di bitume e asfalti per rifacimenti stradali conta oggi, in Italia, 3.000 imprese che occupano, direttamente e tramite indotto, circa 400 mila addetti. La produzione di conglomerati bituminosi raggiunge in Italia i 30 milioni di tonnellate annue, mentre per quanto riguarda il fresato la produzione ammonta a circa 10 milioni di tonnellate all'anno. Nel 2020 sono state utilizzate circa 1.605.000 tonnellate di bitume per operazioni di rifacimento del manto stradale in Italia, un valore oggi nuovamente in crescita dopo una sostanziale contrazione che si è verificata a partire dal primo decennio degli anni 2000 fino al minimo storico del 2017 (1,4 milioni di tonnellate).

“La produzione di bitumi – ha spiegato Spinaci – trova nel nostro Paese una filiera che coinvolge dall'industria della raffinazione a quella delle

costruzioni. Un settore vitale che ha già delle soluzioni da offrire. Oggi il bitume è una specialità e non più una semplice commodities. È fondamentale una seria programmazione che permetta alle imprese di mettere a disposizione le loro competenze e professionalità. Gli impianti sono già pronti a rifornire i grandi cantieri che in prospettiva dovranno essere avviati nel Paese, garantendo non solo una risposta ecosostenibile alla prospettiva di una economia decarbonizzata, ma anche migliaia di posti di lavoro che ancora oggi sono a rischio”.

SITEB, l'Associazione Strade Italiane e Bitumi, ha calcolato che il riutilizzo del 25% del fresato d'asfalto comporta ogni anno il minor impiego di 300.000 tonnellate di bitume vergine (con riduzione del fabbisogno di petrolio) e il recupero di 7.500.000 tonnellate di inerti, equivalenti in termini economici ad un risparmio di circa 300-320 milioni di euro di sole materie prime.

“Riciclando il 100% delle pavimentazioni rimosse – ha evidenziato Michele Turrini Presidente del SITEB – il risparmio economico salirebbe fino a 1.200 milioni di euro/anno di sole materie prime, senza considerare tutti i vantaggi ambientali dovuti a minori importazioni di petrolio, al minor ricorso alle cave, ai minori trasporti di materie, ai minori costi di lavorazione e alle minori emissioni in atmosfera. Come, del resto, già avviene in gran parte d'Europa dove i tassi di riciclo di questo materiale sono decisamente più alti. Grazie ai fondi in arrivo con il Piano Next Generation EU, l'Italia ha davanti a sé un'occasione unica per avviare un piano straordinario di manutenzione green del proprio patrimonio stradale”.

Il futuro

Per potenziare ulteriormente la sostenibilità nelle applicazioni del bitume sono in atto numerose ricerche e sperimentazioni dirette alla produzione ed utilizzo di “bio binders”. Si tratta di leganti in cui il bitume è parzial-

mente sostituito da un “bio-olio” di origine rinnovabile. L'innovazione per una sempre più ambiziosa sostenibilità ambientale riguarda anche gli impianti di produzione del conglomerato bituminoso e le macchine operatrici dedicate alle operazioni di riciclaggio, stesa e compattazione dei conglomerati. In particolare, l'attenzione è rivolta soprattutto ad abbattere le emissioni inquinanti e climalteranti, a ridurre il consumo di energia e di materie prime e a massimizzare il recupero di rifiuti e sottoprodotti.

“In una prospettiva di progressiva razionalizzazione delle raffinerie nazionali nell'ambito della decarbonizzazione – ha concluso Spinaci – occorrerà tenere in adeguata considerazione che l'eventuale ricorso al supply di bitume dall'estero, se potrà assicurare la copertura della domanda in termini quantitativi, potrebbe però non essere la soluzione ottimale per quanto concerne la qualità del bitume con conseguenze sulla filiera produttiva. Il bitume, infatti, è un prodotto che presenta svariate specifiche in funzione dei diversi utilizzi”.

“Nel frattempo – ha proseguito Turrini – anche la logistica del settore ovvero le macchine che producono l'asfalto e lo mettono in opera si sono evolute adattandosi a standard ambientali inimmaginabili in passato; gli impianti sono sicuri dal punto di vista ambientale, con bassi consumi energetici ed emissioni assai ridotte, i motori diesel delle macchine operatrici di ultima generazione abbattano il particolato del 97% ma comunque l'industria di settore si sta orientando anche sui motori elettrici a zero emissioni e assolutamente silenziosi. Su tutti, la digitalizzazione che consente il controllo istantaneo di tutti i parametri di lavoro ma anche in prospettiva il controllo remoto dei mezzi d'opera”.

Unem – www.unem.it
Siteb – www.siteb.it

ROAD TO
ECOMONDO
2021

f in t y
ecomondo.com

ECOMONDO

Leading
the ecological
transition.

26-29 OCTOBER 2021
RIMINI EXPO CENTRE - ITALY

Ecomondo as a driver for a healthy,
efficient and productive sustainable
industry.

organized by
**ITALIAN
EXHIBITION
GROUP**
Providing the future

in collaboration with



ITCA
ITALIAN TRADE AGENCY

simultaneously with

KEY ENERGY
THE RENEWABLE ENERGY EXPO

an event by



VERSO NUOVI SCENARI SOSTENIBILI



H₂O

ACCADUEO

BOLOGNA

6-8

OTTOBRE

2021

**MOSTRA INTERNAZIONALE
DELL'ACQUA**
TECNOLOGIE, TRATTAMENTI,
DISTRIBUZIONE, SOSTENIBILITÀ

CH₄

**IL SALONE DEDICATO ALLE TECNOLOGIE,
AI SISTEMI PER IL TRASPORTO
E ALLA DISTRIBUZIONE DEL GAS**

www.accadueo.com

PER INFORMAZIONI SULLA MANIFESTAZIONE:
ACCADUEO@BOLOGNAFIERE.IT - TEL. 051/282868

IN CONTEMPORANEA CON



SARDINIA2021

HYBRID EVENT / 11-15 OCTOBER 2021 / CAGLIARI / ITALY

18TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WASTE MANAGEMENT AND SUSTAINABLE LANDFILLING



SARDINIA SYMPOSIUM IS BACK!

La prossima edizione del **Sardinia - 18° Simposio Internazionale sulla Gestione dei rifiuti e sulla discarica sostenibile** - si terrà dall'11 al 15 Ottobre 2021 in una meravigliosa location sulla costa sud della Sardegna. Dopo un anno difficile e impegnativo come quello appena passato, non vediamo l'ora di incontrarvi di nuovo di persona per un'entusiasmante edizione piena di novità! Come da tradizione, il Sardinia 2021 includerà sessioni orali parallele, workshop pratici, presentazioni poster, business meetings e un'esposizione commerciale. Per questa edizione abbiamo in serbo nuovi format, nuove tipologie di sessioni e numerosi contenuti multimediali che si aggiungeranno alle tradizionali sessioni per creare un programma innovativo e coinvolgente: una delle grandi novità saranno le visite tecniche virtuali all'interno degli impianti più importanti del mondo! E un entusiasmante programma serale! **INVIA SUBITO UN ABSTRACT E PARTECIPA COME AUTORE!** WWW.SARDINIASYMPOSIUM.IT

ULTIME NEWS! E' nata l'Academy del Sardinia, un programma di aggiornamento promosso dall'IWWG - International Waste Working Group. Da ora fino a tutto Giugno, esperti di livello internazionale terranno (tutti i Giovedì, in inglese) un Webinar di 3 ore su diversi aspetti della gestione dei rifiuti.

LEGGI IL PROGRAMMA E REGISTRATI: <https://www.sardiniasymposium.it/it/training-programme>

CALENDARIO DEI CORSI

Landfilling Thermal treatment Minimization and recycling Various Biological treatment



SARDINIA ACADEMY OF WASTE MANAGEMENT

Promoted by **iwwg**

February	THURSDAY 25/02/2021 Basics of sanitary landfilling Lecturers: Raffaello Cossu (IT), Rainer Stegmann (DE)				
March	THURSDAY 04/03/2021 Drainage systems in landfills Lecturer: Hans-Günter Ramke (DE)	THURSDAY 11/03/2021 Basics of landfill aeration Lecturer: Marco Ritzkowski (DE)	THURSDAY 18/03/2021 Leachate recirculation: objectives, design, operation and control Lecturer: Keith Knox (UK)	THURSDAY 25/03/2021 Waste management and contaminated land regime(s) in European law Lecturer: Luciano Butti (IT)	
April	THURSDAY 01/04/2021 Landfill gas: modelling and management Lecturer: Marco Ritzkowski (DE)	THURSDAY 08/04/2021 Industrial waste management - New opportunities Lecturer: Evangelos Gidararakos (GR)	WEDNESDAY 14/04/2021 Process and technological aspects of solid waste thermal treatments Lecturer: Umberto Arena (IT)	THURSDAY 22/04/2021 Basics of waste recycling Lecturer: Ian Williams (UK)	WEDNESDAY 28/04/2021 Classification and management of contaminated masses in soil remediation projects Lecturer: Jurate Kumpiene (SE)
May	THURSDAY 06/05/2021 Hydrogen production from waste Lecturers: Luca Alibardi (UK), Aldo Muntoni (IT)	THURSDAY 13/05/2021 Sustainable landfilling: concepts and design Lecturers: Raffaello Cossu (IT), Rainer Stegmann (DE)	THURSDAY 20/05/2021 (TO BE CONFIRMED) Landfill leachate Lecturer: Howard Robinson (UK)	FRIDAY 21/05/2021 Methane oxidation Lecturers: Marion Huber-Humer (AT), Julia Gebert (NL)	THURSDAY 27/05/2021 Anaerobic waste treatment in the Circular Economy - Basics and technical implementation Lecturer: Michael Nelles (DE)
June	THURSDAY 03/06/2021 Low temperature waste conversion processes Lecturer: Nicole Berge (US)	THURSDAY 10/06/2021 Prediction of leaching contaminants from landfilling - Part 1 Lecturers: Hans van der Sloot (NL), David Kosson (US)	FRIDAY 11/06/2021 Prediction of leaching contaminants from landfilling - Part 2 Lecturers: Hans van der Sloot (NL), David Kosson (US)	THURSDAY 17/06/2021 Landfill remediation Lecturers: Raffaello Cossu (IT), Rainer Stegmann (DE)	THURSDAY 24/06/2021 Chemicals of concern in waste recycling Lecturer: Kostyantyn Pivnenko (UA)



REMTECH EXPO

International event on Remediation, Coasts, Floods, Climate, Seismic risk, Regeneration, Industry

20-24 SEPTEMBER 2021

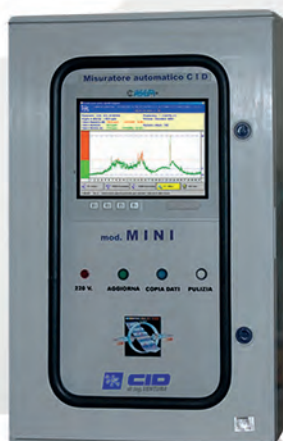
blended edition



Sondiamo la sicurezza e la qualità dell'acqua

SONDA TENSIOATTIVI

SONDA COD OUT



Rilevazione automatica in continuo dei parametri:

- TENSIOATTIVI
- SOLIDI SOSPESI
- BOD
- COD
- TORBIDITÀ

dal 1979



CID ING VENTURA Srl

Via Denari 22 - 25127 BRESCIA Tel. 030 3730699 www.venturacid.it info@venturacid.it

INDEX



VOL. 8
NUM. 2
2021

EDITORIAL

News and challenges of the Life Cycle Thinking approach applied to the waste management sector – *Lucia Rigamonti, Andrea Fedele*

ARTICLES

Evaluating the performance of a Municipal Solid Waste mechanical-biological treatment plant – *Giovanni Gadaleta, Francesco Todaro, Sabino De Gisi, Vincenzo Gadaleta, Michele Notarnicola*

Waste plastics as raw material for innovative road pavements: a Life Cycle Assessment – *Lucia Capuano, Giacomo Magatti, Paride Mantecca*

Waste: recycling or avoiding? Answers from Life Cycle Assessment studies – *Anna Mazzi*

Life Cycle Assessment of a building built with reused shipping containers – *Serena Giorgi, Monica Lavagna, Elisabetta Ginelli*

TECHNICAL-SCIENTIFIC COMMUNICATIONS

The use of Life Cycle Thinking to assess the sustainability of circular economy policies – *Daniela Camana, Alessandro Manzardo, Andrea Fedele*

CHOMgenius as an example of smart shipping container building, between circular economy and innovation – *Elisabetta Ginelli, Gianluca Pozzi, Giulia Vignati*

Foto in copertina
di Stefano Stellini

ISSN e e-ISSN 2420-8256

Ingegneria dell'Ambiente per il 2021 è sostenuta da:

