



Università degli Studi di Camerino

School of Advanced Studies

Doctoral course in

Architecture, Design, Planning

Curriculum

INNOVATION DESIGN

CYCLE XXXVII

Circular Design for school furniture: from product to product-service

*Linee guida per la progettazione e la produzione di arredi scolastici circolari,
manutenibili, riparabili e aggiornabili*

PhD Candidate

Alessandro Di Stefano

Supervisor

Prof. Lucia Pietroni

Coordinator of the PhD Programme

Prof. Gerardo Doti

Date of award 23/06/2025

Abstract (EN)

The research falls within the scientific discipline of Industrial and Circular Design and addresses the issue of environmental sustainability through the application of circular economy principles to the school furniture sector. Specifically, the research explores innovative design strategies that facilitate the transition from a linear to a circular economic model, focusing on issues such as modularity, reparability, upgradability and durability of products. In particular, the research explores how the transition from the traditional model of selling a physical product to the concept of Product-as-a-Service (PaaS) can revolutionize the business model of companies, promote a more efficient use of resources and reduce environmental impact. The main objective of the research is to develop design guidelines and circular business models that promote a more efficient use of resources, minimize waste and ensure greater sustainability in the product life cycle. The chosen application context is the wood furniture industry, with a focus on the school sector, which is characterized by high consumption volumes and critical issues related to waste management and limited product life. The project is divided into three macro-phases. The first phase analyses the paradigms of Circular Design and Circular Economy, highlighting their application potential in the Made in Italy sector. The second phase focuses on the assessment of the regulatory and production context of school furniture, with an in-depth study of the Minimum Environmental Criteria (CAM). Finally, the third experimental phase proposes design solutions for circular school furniture, supported by the application of analytical tools such as Life Cycle Analysis (LCA). The research aims to make a theoretical and practical contribution to design for sustainability by proposing a replicable model that integrates circular economy, design innovation and economic competitiveness. Key outcomes include the establishment of new guidelines for circular design and the development of school furniture systems that meet the need for modularity, reparability and upgradeability while reducing the overall environmental impact.

Keywords (EN)

Circular design; Product as a service; Modular design; Repairability; Remanufacturability; Durability.

Scientific field of the dissertation (SSD):

CEAR-08/D

School the Ph.D. Student belongs to at UNICAM:

International School of Advanced Studies

Circular Design for school furniture: from product to product-service

Linee guida per la progettazione e la produzione di arredi scolastici circolari, manutenibili, riparabili e aggiornabili



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAMERINO
ISAS - INTERNATIONAL SCHOOL OF ADVANCED STUDIES
Scuola di Ateneo di Architettura e Design "Eduardo Vittoria"
sede di Ascoli Piceno

Dottorato di ricerca in Architecture, Design, Planning
Curriculum in Innovation Design
Ciclo XXXVII°



UNIONE EUROPEA
Fondo sociale europeo



REACT EU

Tesi redatta con il sostegno finanziario del Programma Operativo Nazionale
Ricerca e Innovazione 2014-2020 (CCI 2014IT16M2OP005), risorse FSE REACT-EU
FSE-REACT-EU, PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 (D.M. 1061/2021)
Azione IV.5 "Dottorati su tematiche Green"

Coordinatore del dottorato
Prof. Gerardo Doti

Coordinatore del curriculum
Prof. Lucia Pietroni

Supervisor: Prof. Lucia Pietroni
PhD Candidate: Alessandro Di Stefano

Circular Design for school furniture: from product to product-service

Linee guida per la progettazione e la produzione di arredi scolastici circolari, manutenibili, riparabili e aggiornabili



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAMERINO
ISAS - INTERNATIONAL SCHOOL OF ADVANCED STUDIES
Scuola di Ateneo di Architettura e Design "Eduardo Vittoria"
sede di Ascoli Piceno

Dottorato di ricerca in Architecture, Design, Planning
Curriculum in Innovation Design
Ciclo XXXVII°



Tesi redatta con il sostegno finanziario del Programma Operativo Nazionale Ricerca e Innovazione 2014-2020 (CCI 2014IT16M2OP005), risorse FSE REACT-EU FSE-REACT-EU, PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 (D.M. 1061/2021) Azione IV.5 "Dottorati su tematiche Green"

Coordinatore del dottorato
Prof. Gerardo Doti

Coordinatore del curriculum
Prof. Lucia Pietroni

Supervisor: Prof. Lucia Pietroni
PhD Candidate: Alessandro Di Stefano

Alessandro Di Stefano
alessandro.distefano@unicam.it



Università di Camerino
Scuola di Ateneo di Architettura e Design "Eduardo Vittoria"
sede di Ascoli Piceno
Viale della Rimembranza, 3
63100 Ascoli Piceno
Tel. 0737/404200 - Fax 0737/404242
www.unicam.it

Copyright School of Advanced Studies, Università di Camerino

Tutti i diritti sono riservati: nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcun modo (comprese fotocopie e microfilm) senza il permesso scritto del Dottorato di ricerca in Architecture, Design, Planning.

Abstract

La ricerca si colloca nell'ambito scientifico-disciplinare del Design Industriale e del Circular Design, affrontando il tema della sostenibilità ambientale attraverso l'applicazione dei principi dell'economia circolare al settore dell'arredo scolastico. In particolare, la ricerca esplora strategie progettuali innovative che favoriscono la transizione da un modello economico lineare a uno circolare, ponendo al centro tematiche come modularità, riparabilità, aggiornabilità e durabilità dei prodotti. In particolare, la ricerca esplora come il passaggio dal modello tradizionale di vendita del prodotto fisico al concetto di Prodotto come Servizio (Product-as-a-Service, PaaS) possa rivoluzionare il modello di business delle aziende, favorendo un utilizzo più efficiente delle risorse e riducendo l'impatto ambientale. L'obiettivo principale della ricerca è lo sviluppo di linee guida progettuali e modelli di business circolari che promuovano un utilizzo più efficiente delle risorse, riducendo al minimo gli sprechi e garantendo una maggiore sostenibilità nel ciclo di vita dei prodotti. Il contesto applicativo scelto è quello del legno-arredo, con particolare attenzione al comparto scolastico, caratterizzato da elevati volumi di consumo e criticità legate alla gestione dei rifiuti e alla durata limitata dei prodotti. Il progetto si articola in tre macrofasi. La prima fase analizza i paradigmi del Circular Design e dell'economia circolare, evidenziandone il potenziale applicativo nel settore del Made in Italy. La seconda fase si concentra sulla valutazione del contesto normativo e produttivo dell'arredo scolastico, con uno studio approfondito dei Criteri Ambientali Minimi (CAM). Infine, la terza fase sperimentale propone soluzioni progettuali per un arredo scolastico circolare, supportate dall'applicazione di strumenti analitici come l'analisi del ciclo di vita (LCA). La ricerca mira a fornire un contributo teorico e pratico al design per la sostenibilità, proponendo un modello replicabile che integri economia circolare, innovazione progettuale e competitività economica. I principali risultati includono la definizione di nuove linee guida per il design circolare e lo sviluppo di sistemi di arredo scolastico in grado di rispondere alle esigenze di modularità, riparabilità e aggiornabilità, riducendo al contempo l'impatto ambientale complessivo.

Keywords

Design circolare, Prodotto come servizio, Design modulare, Riparabilità, Rifabbricabilità, Durabilità.

Indice

The research falls within the scientific discipline of Industrial and Circular Design and addresses the issue of environmental sustainability through the application of circular economy principles to the school furniture sector. Specifically, the research explores innovative design strategies that facilitate the transition from a linear to a circular economic model, focusing on issues such as modularity, reparability, upgradability and durability of products. In particular, the research explores how the transition from the traditional model of selling a physical product to the concept of Product-as-a-Service (PaaS) can revolutionize the business model of companies, promote a more efficient use of resources and reduce environmental impact. The main objective of the research is to develop design guidelines and circular business models that promote a more efficient use of resources, minimize waste and ensure greater sustainability in the product life cycle. The chosen application context is the wood furniture industry, with a focus on the school sector, which is characterized by high consumption volumes and critical issues related to waste management and limited product life. The project is divided into three macro-phases. The first phase analyzes the paradigms of Circular Design and Circular Economy, highlighting their application potential in the Made in Italy sector. The second phase focuses on the assessment of the regulatory and production context of school furniture, with an in-depth study of the Minimum Environmental Criteria (CAM). Finally, the third experimental phase proposes design solutions for circular school furniture, supported by the application of analytical tools such as Life Cycle Analysis (LCA). The research aims to make a theoretical and practical contribution to design for sustainability by proposing a replicable model that integrates circular economy, design innovation and economic competitiveness. Key outcomes include the establishment of new guidelines for circular design and the development of school furniture systems that meet the need for modularity, reparability and upgradability while reducing the overall environmental impact.

Keywords.

Circular design, Product as a service, Modular design, Repairability, Remanufacturability, Durability.

Introduzione	13
Parte prima — Verso il Design circolare: dalla progettazione del ciclo di vita alla progettazione per il servizio	
Capitolo 1 — Design per la Sostenibilità ambientale e Economia circolare	
1.1. Principi, strumenti e metodi del Design per la sostenibilità ambientale	31
1.2. Dal modello economico lineare al modello economico circolare	49
1.3. Economia circolare e sostenibilità ambientale: una relazione complessa	66
Bibliografia capitolo 1	73
Capitolo 2 — Il Design circolare come strumento di attuazione dell' economia circolare	
2.1. Definizione e caratteristiche del Design circolare	77
2.2. Approcci e strategie di circolarità nel ciclo di vita dei prodotti	90
2.3. Modelli e strumenti di misurazione della circolarità	96
Bibliografia capitolo 2	108
Capitolo 3 — Dal prodotto al prodotto come servizio: strategie e modelli di business per un approccio circolare	
3.1. Concetto di prodotto come servizio (PaaS)	113
3.2. Impatto del modello PaaS nel design sulla sostenibilità e circolarità	121
3.3. Prospettive di sviluppo del circular design nei settori del Made in Italy	127
Bibliografia capitolo 3	129

Parte seconda — Strategie, strumenti e metodi per l'ideazione e lo sviluppo di arredi circolari nel comparto Legno-Arredo		6.3. Definizione di un nuovo modello di business circolare per le aziende partner	209
Capitolo 4 — Analisi del settore Legno-Arredo: quadro normativo dell'arredo scolastico e casi studio di arredi sostenibili e circolari		6.4. Linee guida per lo sviluppo di un arredo scolastico: caso studio e sintesi delle strategie di riprogettazione circolare	212
4.1.	Il settore legno-arredo	Parte terza — Sviluppo progettuale di un arredo-scuola circolare, manutenibile, riparabile e aggiornabile per il settore dell'arredo scolastico	
4.2.	Quadro normativo per la produzione e distribuzione dell'arredo scolastico	Capitolo 7 — Studio ambientale del ciclo di vita (LCA) applicato a un banco-scuola tradizionale	
4.2.1.	Criteri Ambientali Minimi (CAM) per il settore arredo	7.1. Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema	223
4.2.2.	Normative per il settore dell'arredo scolastico	7.2. Fase Life Cycle Inventory (LCI)	234
4.3.	Casi studio di arredi sostenibili e circolari	7.3. Risultati e opzioni di miglioramento ambientale	239
	"Costume" di Stefan Diez per Magis	Capitolo 8 — riprogettazione di un banco-scuola circolare	
	"Ascent" Seating Series di Green furniture concept	8.1. Progettazione del prodotto in chiave circolare: banco KJ01	249
	"Comma" di Vitra: un sistema flessibile per gli spazi di lavoro	8.1.1. Sistema di connessione reversibile per il piano e i piedi antiscivolo	254
		8.1.2. Telaio disassemblabile e aggiornabile in base alle classi dimensionali	258
		8.1.3. Flessibilità e diversificazione delle configurazioni dei banchi scuola	262
		8.2. Valutazione ambientale: LCA per il prodotto-servizio del banco KJ01	269
		8.2.1. Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema	272
		8.2.2. Fase Life Cycle Inventory (LCI)	278
		8.2.3. Interpretazione dei risultati	282
		8.3. Analisi ambientale comparata: i benefici della riprogettazione circolare	291
		8.3.1. Confronto tra i risultati oggettivi dell'analisi del ciclo di vita (LCA)	293
		8.3.2. I benefici di carattere qualitativo del banco KJ01	296
		Capitolo 9 — Conclusioni	
		9.1. Sintesi dei risultati	301
		9.2. Linee guida progettuali	304
		9.3. Possibili sviluppi futuri della ricerca	309
		Bibliografia generale	
			311
	Bibliografia capitolo 4		160
Capitolo 5 — Strategie di progettazione per l'estensione della vita utile e la durabilità del prodotto			
5.1.	Concetto di Modularità nel design		163
5.2.	Approccio modulare nella progettazione		168
5.3.	Casi studio di prodotti modulari		174
	Roetz Life: una bicicletta progettata per riparazione e upgrading		174
	Framework Laptop 16: modularità e riparabilità nel mercato tecnologico		178
	Bugaboo Butterfly: la mobilità Infantile con un approccio circolare		182
5.4.	Manutenibilità, aggiornabilità e rifabbricabilità nel prodotto circolare		186
	Bibliografia capitolo 5		189
Capitolo 6 — Aziende partner del progetto e requisiti per lo sviluppo di un modello di business circolare nell'arredo scolastico			
6.1.	Le aziende partner del progetto di ricerca		193
6.1.1.	Vastarredo Industrie: profilo aziendale e processo produttivo		196
6.1.2.	Camillo Sirianni: profilo aziendale e processo produttivo		201
6.2.	Analisi e criticità della filiera produttiva nel settore dell'arredo scolastico		206

Ambito tematico della tesi

La ricerca si inserisce nell'ambito del design circolare, un campo che si caratterizza per l'approccio sistemico e integrato volto a promuovere la sostenibilità ambientale. Questo obiettivo si raggiunge attraverso l'applicazione di principi, strumenti e metodi innovativi che sfidano i modelli economici tradizionali. In particolare, il lavoro si concentra sull'analisi del passaggio da un modello economico lineare, basato su produzione, utilizzo e smaltimento, a un paradigma di economia circolare. Quest'ultimo attribuisce un ruolo centrale al riutilizzo, alla riparazione, all'aggiornamento, alla rifabbricazione e, solo in ultima istanza, al riciclo dei materiali, ridefinendo le logiche progettuali e produttive.

Un elemento chiave della tesi è il design circolare, analizzato non solo come uno strumento per implementare l'economia circolare, ma anche come un approccio progettuale capace di integrare strategie di modularità, durabilità e aggiornabilità^[1]. L'obiettivo è favorire la creazione di prodotti più sostenibili e adattabili ai cambiamenti, ampliandone il ciclo di vita e riducendo l'impatto ambientale. Questo approccio si lega strettamente al concetto di Product-as-a-Service (PaaS), che sposta l'attenzione dalla vendita del prodotto fisico alla fornitura di soluzioni e funzionalità. Tale prospettiva non solo risponde alle esigenze di sostenibilità, ma si dimostra capace di generare benefici anche sul piano economico. Il focus applicativo della ricerca è il settore del legno-arredo, con una particolare attenzione al segmento degli arredi scolastici. Questo comparto viene analizzato in relazione alle normative europee e nazionali, come i Criteri Ambientali Minimi (CAM), che promuovono l'uso di materiali sostenibili e strategie progettuali orientate all'estensione della vita utile dei prodotti^[2]. In questo contesto, la tesi esplora come il design circolare possa rappresentare una risposta concreta e innovativa alle sfide della sostenibilità ambientale, contribuendo al contempo a ripensare i modelli di consumo e produzione tradizionali. La ricerca, inoltre, si concentra sull'individua-

[1] Yang, D., & Vezzoli, C. (2024). Designing Environmentally Sustainable Furniture Products: Furniture-Specific Life Cycle Design Guidelines and a Toolkit to Promote Environmental Performance. *Sustainability*, pp. 7-28.

[2] Sonogo, M., Echeveste, M., & Debarba, H. (2018). The Role of Modularity in Sustainable Design: A Systematic Review. *Journal of Cleaner Production*, 176, pp. 196-209.

zione di criticità e opportunità nell'ambito dei modelli di business circolari. Attraverso l'analisi approfondita di casi studio e filiere produttive, l'obiettivo è delineare percorsi che rendano concretamente applicabile questa transizione verso la circolarità. Un aspetto centrale della tesi riguarda la fase sperimentale, in cui viene sviluppato un modello innovativo per il settore dell'arredo scolastico. Questo modello non si limita a proporre soluzioni tradizionali di produzione e consumo, ma introduce un approccio basato sul concetto di "prodotto come servizio" (Product as a Service, PaaS). In questa visione, l'arredo scolastico viene progettato non solo per essere manutenibile, riparabile e aggiornabile, ma anche per essere offerto come servizio continuo, garantendo maggiore efficienza nell'utilizzo delle risorse e riducendo gli sprechi. Questo approccio è particolarmente rilevante nel contesto della pubblica amministrazione, che attualmente acquista beni attraverso piattaforme come il Mercato Elettronico della Pubblica Amministrazione (MePA). In questo sistema tradizionale, gli arredi scolastici, una volta divenuti inutilizzabili, rappresentano una sfida complessa per le istituzioni, che incontrano difficoltà nella loro gestione a fine vita. Il modello proposto mira a superare queste problematiche offrendo alle istituzioni scolastiche la possibilità di usufruire della funzione del bene – ovvero del sistema di arredi – senza preoccuparsi della loro manutenzione, riparazione o smaltimento. Attraverso il modello PaaS, le scuole avrebbero accesso a un sistema di arredi sempre nuovo e aggiornato, grazie a un contratto di servizio che include la gestione del ciclo di vita del prodotto. Questo approccio non solo elimina il problema della gestione dei beni obsoleti, ma garantisce anche una maggiore efficienza nell'uso delle risorse, riducendo gli sprechi e promuovendo la sostenibilità. La validazione di questo modello viene supportata da strumenti analitici come l'analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA), che permette di quantificare i benefici ambientali derivanti dalla transizione verso un sistema circolare. In questo modo, la ricerca offre non solo un contributo teorico, ma anche una soluzione pratica e replicabile, capace di accelerare la transizione verso un'economia più sostenibile e resiliente. Questo sistema innovativo, applicabile al settore dell'arredo scolastico, rappresenta un esempio concreto di come le istituzioni pubbliche possano beneficiare di modelli circolari per migliorare l'efficienza e la sostenibilità delle proprie attività.

Quadro scientifico disciplinare di riferimento

Il quadro scientifico-disciplinare su cui si basa questa ricerca si inserisce pienamente nell'ambito del design industriale, con un focus specifico sui temi della sostenibilità ambientale e dell'economia circolare. In questo contesto, il design diventa uno strumento chiave per guidare la transizione da un modello economico lineare, basato su produzione, utilizzo e smaltimento, a un modello circolare, in cui il ciclo di vita dei prodotti è ripensato per favorire il riutilizzo, la riparazione e il riciclo dei materiali^[3]. L'approccio disciplinare della ricerca si fonda sui principi dell'eco-design e del life cycle design, metodologie avanzate che mirano a valutare e ridurre gli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita del prodotto^[4]. Grazie a strumenti come il Life Cycle Assessment (LCA), è possibile analizzare ogni fase del processo produttivo, dall'approvvigionamento delle materie prime alla gestione del fine vita, identificando strategie per migliorare la sostenibilità e ottimizzare l'uso delle risorse^[5]. Questo approccio riflette la capacità del design di integrare considerazioni estetiche, funzionali e ambientali, trasformando la progettazione in un elemento strategico per affrontare le sfide globali legate alla sostenibilità. In particolare, il design circolare rappresenta un paradigma innovativo che amplia il ruolo tradizionale del designer. Oggi, il designer non si limita a creare prodotti esteticamente gradevoli o funzionalmente efficaci, ma contribuisce in maniera significativa alla ridefinizione dei modelli di produzione e consumo^[6]. Approcci come il Product-as-a-Service (PaaS), che spostano l'attenzione dalla proprietà del prodotto alla fornitura di soluzioni e risultati, dimostrano come il design possa essere centrale nello sviluppo di nuovi modelli di business più sostenibili e resilienti^[7].

[3] Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, pp. 221-232.

[4] Wimmer, W., Züst, R., & Lee, K. M. (2004). *Ecodesign Implementation: A Systematic Guidance on Integrating Environmental Considerations into Product Development*. Springer.

[5] ISO (2006). *Environmental Management: Life Cycle Assessment: Principles and Framework (ISO 14040:2006)*. Geneva: International Organization for Standardization.

[6] Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature News*, 531, pp. 435-438.

[7] Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), pp. 308-320.

Parallelamente, questa ricerca pone l'accento sull'importanza di strategie progettuali che promuovano modularità, riparabilità e durabilità, principi che estendono la vita utile dei prodotti e riducono gli sprechi^[8]. Tali idee trovano applicazione in contesti specifici come quello dell'arredo scolastico, un settore in cui il design industriale non solo soddisfa le esigenze funzionali degli utenti, ma contribuisce anche a generare impatti positivi sull'ambiente e sulla società^[9].

Macrofasi e metodologia della ricerca

La ricerca si articola in un percorso strutturato in tre macrofasi principali, che integrano analisi teoriche, valutazioni contestuali e sperimentazioni progettuali con l'obiettivo di esplorare nuove prospettive per l'applicazione del design circolare nel settore dell'arredo scolastico. Questo approccio si inserisce nell'ambito del design sostenibile, ponendo al centro l'idea di una transizione verso modelli produttivi più rispettosi dell'ambiente e basati sui principi dell'economia circolare.

La prima fase, di carattere prevalentemente teorico e analitico, pone le fondamenta del lavoro attraverso un approfondimento dei paradigmi del design sostenibile e dell'economia circolare. Si indaga il passaggio da un modello economico lineare, basato sulla produzione, il consumo e lo smaltimento, a un modello circolare incentrato sul riutilizzo, la riparabilità e il riciclo. In questa prospettiva, il design circolare viene introdotto come un'evoluzione del green design, evidenziando strategie innovative come modularità, allungamento della vita utile dei prodotti e il modello del Product-as-a-Service (PaaS).

Particolare attenzione è riservata al contesto del Made in Italy, analizzando le opportunità offerte dall'integrazione della circolarità nei processi produttivi tradizionali, con un focus su come il design possa diventare motore di trasformazione sostenibile. La seconda fase si concentra sull'analisi del comparto Legno-Arredo, con un'attenzione particolare sull'arredo scolastico.

[8] Vezzoli, C., & Manzini, E. (2008). *Design for Environmental Sustainability*. Springer Science & Business Media.

[9] Papanek, V. (1973). *Design for the real world: Human ecology and social change*. Pantheon Books.

Attraverso l'esame dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) e delle normative europee e nazionali, viene delineato il quadro regolatorio che guida la produzione sostenibile di arredi.

Inoltre, l'analisi di casi studio significativi, scelti per la loro capacità di integrare modularità, durabilità e circolarità, permette di individuare soluzioni innovative nel settore. Questa fase si arricchisce della collaborazione con due aziende italiane partner del progetto di ricerca dottorale, la Vastarredo Industrie Srl e la Camillo Sirianni Sas, che offrono una prospettiva concreta sulle criticità e le opportunità della filiera produttiva.

Questa sinergia contribuisce alla possibilità di definire un nuovo modello di business circolare, proponendo linee guida per l'implementazione di soluzioni progettuali più sostenibili attraverso l'ipotesi di un modello di business basato sul prodotto-servizio.

La terza fase rappresenta l'aspetto sperimentale della ricerca in cui l'attività si concretizza nello sviluppo progettuale di un arredo scolastico circolare. Partendo da un'analisi ambientale basata sull'applicazione del Life Cycle Assessment (LCA) a un banco-scuola tradizionale, vengono individuate le principali criticità ambientali. Queste criticità vengono affrontate attraverso la riprogettazione del banco in ottica circolare, integrando principi di modularità, manutenibilità e disassemblabilità. Il nuovo modello, denominato banco KJ01, viene sottoposto a una valutazione comparativa che ne evidenzia i benefici ambientali ed economici.

Tale fase si sviluppa mediante attività di raccolta e analisi dati, progettazione sperimentale e confronto critico tra soluzioni tradizionali e innovative, dimostrando l'efficacia del design circolare nel contesto educativo. Nel complesso, la metodologia adottata si distingue per la sua capacità di integrare analisi teoriche, studio normativo, collaborazione con partner industriali e sperimentazione pratica. Questo approccio sistemico, che combina sostenibilità ambientale, innovazione progettuale e competitività economica, si avvale di strumenti quali l'LCA, i modelli di misurazione della circolarità e le strategie di design modulare.

Il risultato è un contributo significativo non solo per affrontare le sfide ambientali del settore, ma anche per ridefinire il ruolo del design come catalizzatore di una transizione verso un'economia resiliente, sostenibile e circolare.

Struttura e articolazione della tesi

La tesi è costituita da tre parti, articolate in nove capitoli.

Nella prima parte, intitolata “Verso il Design circolare: dalla progettazione del ciclo di vita alla progettazione per il servizio” e formata da tre capitoli, si definisce il quadro scientifico di riferimento e le aree disciplinari per lo sviluppo della ricerca.

Il primo capitolo esplora il ruolo cruciale del design nel promuovere la sostenibilità ambientale e nell’attuare il paradigma dell’economia circolare. Si analizzano principi, strumenti e metodi che supportano la transizione da un modello economico lineare, basato su produzione, utilizzo e smaltimento, a un modello circolare in cui il riutilizzo, la riparazione e il riciclo dei materiali rappresentano elementi fondanti. Partendo da un’analisi storica e concettuale, viene evidenziato come gli approcci tradizionali, focalizzati sulla mitigazione degli impatti a valle, siano stati progressivamente sostituiti da strategie preventive e sistemiche, orientate a una progettazione integrata del ciclo di vita dei prodotti.

Si approfondiscono inoltre le connessioni tra economia circolare e sostenibilità, dimostrando come queste dimensioni siano strettamente correlate e possano contribuire a ridurre significativamente l’impatto ambientale complessivo. Il capitolo discute anche l’evoluzione dell’ecodesign e del Life Cycle Design, che, tramite metodologie avanzate come il Life Cycle Assessment (LCA), offrono strumenti pratici per ridurre gli impatti ambientali e promuovere l’efficienza delle risorse. Particolare attenzione è rivolta alle strategie progettuali innovative, tra cui il design per la modularità, la riparabilità e il riciclo, che favoriscono la creazione di sistemi economici più resilienti e sostenibili. Infine, vengono analizzate le sfide operative e culturali che ostacolano la piena adozione dell’economia circolare, sottolineando il ruolo centrale del design come leva strategica per promuovere una trasformazione sistemica. Il capitolo conclude evidenziando come il design non si limiti più a risolvere problemi estetici o funzionali, ma si configuri come un motore di innovazione capace di rispondere alle emergenze ambientali e di definire nuove prospettive per uno sviluppo sostenibile.

Il secondo capitolo esplora il design circolare come strumento essenziale per l’attuazione dell’economia circolare, evidenziando concetti, approcci strategici e strumenti di misurazione innovativi. Viene introdotto il design circolare come evoluzione del green design e del design per la sostenibilità, proponendo una visione sistemica che integra sostenibilità ambientale, efficienza delle risorse e circolarità dei materiali. Particolare attenzione è dedicata al concetto delle “8R”, che amplia il tradizionale modello delle “3R” (Ridurre, Riutilizzare, Riciclare) per rispondere alla crescente complessità delle problematiche ambientali. Si analizzano strumenti chiave, tra cui il Life Cycle Assessment (LCA), e strategie progettuali come il design modulare, il Design for Longevity e il Product-as-a-Service (PaaS), che favoriscono la riduzione dei rifiuti e l’ottimizzazione delle risorse. Il capitolo approfondisce anche i modelli di misurazione della circolarità, come il Material Circularity Indicator (MCI) e il tool Circulytics®, evidenziando il loro ruolo nel guidare le imprese verso pratiche più sostenibili e misurabili. Viene sottolineata l’importanza di un approccio integrato e collaborativo tra tutti gli attori della filiera produttiva per promuovere una vera transizione circolare. Il design circolare, pertanto, emerge come un paradigma progettuale e culturale che, oltre a minimizzare gli impatti ambientali, si propone di trasformare radicalmente i processi produttivi e le dinamiche economiche. Attraverso una combinazione di strategie innovative e strumenti pratici, il capitolo offre una visione olistica per affrontare le sfide della sostenibilità e definire nuovi modelli di produzione e consumo.

Il terzo capitolo analizza la transizione dal modello di prodotto tradizionale al concetto di “prodotto come servizio” (Product-as-a-Service, PaaS), con particolare attenzione alle sue implicazioni sulla sostenibilità, sulla circolarità e sul design nei settori produttivi del Made in Italy. Viene esplorato come il PaaS, all’interno dei Sistemi Prodotto-Servizio (PSS), rappresenti un approccio innovativo per rispondere alle sfide ambientali e promuovere un’economia circolare. Si introduce il PaaS come strategia per spostare il focus dalla proprietà del prodotto alla fornitura di soluzioni e risultati, evidenziando come questa prospettiva generi valore attraverso modelli di business basati sull’uso e sulla funzionalità. Il capitolo discute le classificazioni dei PSS, approfondendo i modelli

orientati al prodotto, all'uso e al risultato, con un'analisi critica delle opportunità e delle sfide operative associate a ciascun approccio. Viene poi affrontato l'impatto del modello PaaS sul design circolare, sottolineando l'importanza di integrare la progettazione modulare, la riparabilità e il recupero dei materiali per massimizzare la durata di vita dei prodotti. In particolare, il capitolo analizza il ruolo del Made in Italy, con esempi applicativi nei settori del legno-arredo e della moda, mostrando come l'adozione del PaaS favorisca la sostenibilità senza compromettere la qualità e l'eccellenza tradizionali. Infine, il capitolo propone una visione sistemica per il futuro del design circolare, enfatizzando la necessità di politiche di supporto, strumenti di misurazione avanzati e una maggiore collaborazione tra progettisti e attori della filiera. Il PaaS viene così presentato come un pilastro strategico per accelerare la transizione verso modelli di produzione e consumo più sostenibili, offrendo al contempo nuove opportunità economiche per le imprese.

La seconda parte della tesi, intitolata "Strategie, strumenti e metodi per l'ideazione e lo sviluppo di arredi circolari nel comparto Legno-Arredo" è costituita da tre capitoli.

Il quarto capitolo analizza il settore del legno-arredo, con un focus particolare sul comparto scolastico, esplorando il quadro normativo e i casi studio di arredi sostenibili e circolari. Si evidenziano i principali trend di sostenibilità e le strategie di economia circolare adottate nel settore Made in Italy, con particolare attenzione alle normative europee e nazionali che regolano la produzione e distribuzione degli arredi scolastici. Vengono descritti i Criteri Ambientali Minimi (CAM) come strumento normativo fondamentale per promuovere l'uso di materiali sostenibili, la durabilità e la gestione responsabile del ciclo di vita dei prodotti. Tali criteri, obbligatori negli appalti pubblici, incentivano pratiche come il design modulare, la disassemblabilità e il riciclo. Inoltre, si analizzano i requisiti di sicurezza, ergonomia e sostenibilità che regolano gli arredi scolastici, con particolare riferimento alle norme UNI EN 1729 e agli standard di gestione ambientale ISO 14001. Attraverso l'esame di casi studio, come "Costume" di Magis, la serie "Ascent" di Green Furniture Concept e il sistema "Comma" di Vitra, si dimostra come il design possa integrare modularità, durabilità e sostenibilità. Questi

esempi rappresentano modelli innovativi che combinano approcci di circular design e modelli di business come il Product-as-a-Service (PaaS), sottolineando l'importanza della flessibilità e dell'adattabilità nel design contemporaneo. Il capitolo conclude evidenziando le sfide e le opportunità del settore, suggerendo un approccio integrato che unisce innovazione, rispetto delle normative e promozione della sostenibilità per affrontare le crescenti esigenze del mercato globale. La transizione verso modelli produttivi circolari è identificata come chiave per garantire competitività e sostenibilità a lungo termine.

Il quinto capitolo approfondisce le strategie di design per estendere la vita utile e migliorare la durabilità dei prodotti, con un focus sulla modularità come approccio chiave per promuovere la sostenibilità e l'economia circolare. Si introduce il concetto di modularità nel design, evidenziando come la suddivisione dei prodotti in moduli indipendenti consenta maggiore flessibilità nella progettazione, nell'uso e nello smaltimento. Questo approccio facilita la riparabilità, l'aggiornabilità e il riciclo, riducendo l'obsolescenza programmata e supportando cicli produttivi chiusi. Il capitolo presenta tre casi studio, tra cui la bicicletta elettrica "Roetz Life", il laptop modulare "Framework Laptop 16" e la carrozzina "Bugaboo Butterfly". Questi esempi dimostrano come il design modulare consenta di ridurre i rifiuti, migliorare la sostenibilità e creare valore per i consumatori attraverso prodotti più personalizzabili e duraturi. In particolare, si analizzano strategie innovative quali la sostituibilità dei moduli, il riutilizzo delle componenti e il supporto post-vendita per la manutenzione e il ricondizionamento. Un altro tema centrale è il passaggio dal "design for disassembly" al "design for remanufacturing", che sposta l'attenzione dalla semplice separazione dei materiali alla progettazione di componenti rigenerabili. Si sottolinea come questa evoluzione richieda connessioni reversibili, standardizzazione dei moduli e una visione sistemica che integri i principi di circolarità nel ciclo di vita del prodotto. Il capitolo conclude evidenziando il ruolo delle normative europee e degli standard di ecodesign nel promuovere pratiche progettuali sostenibili, ponendo il design modulare come strumento essenziale per ridurre gli impatti ambientali e facilitare la transizione verso modelli economici rigenerativi. Attraverso un'analisi teorica e applicativa, viene

delineata una roadmap per il futuro del design sostenibile, enfatizzando il suo potenziale per innovare processi produttivi e modelli di business.

Il **sesto capitolo** esamina il contributo di due aziende italiane, Vastarredo Industrie e Camillo Sirianni, al progetto di ricerca sull'implementazione di modelli di business circolari nel settore dell'arredo scolastico. Dopo un'analisi dei profili aziendali e delle loro pratiche produttive, vengono evidenziate le sinergie tra tradizione artigianale e innovazione tecnologica. L'analisi della filiera produttiva rivela criticità e opportunità nel contesto delle attuali dinamiche di mercato, enfatizzando la necessità di approcci sistemici per superare le barriere alla sostenibilità. Il capitolo propone un nuovo modello di business circolare che integra la progettazione modulare, la riparabilità e l'uso responsabile delle risorse, rendendo il design uno strumento strategico per massimizzare il valore e minimizzare gli impatti ambientali. Attraverso la scelta di un caso studio, vengono definite linee guida e le strategie per la riprogettazione circolare degli arredi scolastici. L'approccio modulare emerge come una soluzione chiave per garantire flessibilità e adattabilità, rispondendo alle esigenze di ambienti educativi moderni e multifunzionali. Il capitolo conclude sottolineando il potenziale del design circolare nel ridefinire le logiche produttive del Made in Italy, ponendo le basi per una transizione verso un'economia più sostenibile e resiliente.

La **terza parte** della tesi, intitolata "Sviluppo progettuale di un arredo-scuola circolare, manutenibile, riparabile e aggiornabile per il settore dell'arredo scolastico" e costituita da tre capitoli, rappresenta la fase sperimentale della tesi di dottorato.

Il **settimo capitolo** della tesi, dedicato allo studio ambientale del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA) applicato a un banco-scuola tradizionale, rappresenta una fase cruciale del lavoro di ricerca, in quanto fornisce una base scientifica per identificare criticità e opportunità di miglioramento ambientale nel contesto dell'arredo scolastico. Questo capitolo si configura come il ponte tra l'analisi teorica e le successive attività di riprogettazione, dimostrando il valore dell'LCA come strumento decisionale e progettuale.

Lo studio si apre con la definizione degli obiettivi e dei confini del sistema, stabilendo i parametri fondamentali per l'analisi. L'obiettivo principale consiste nell'individuare gli impatti ambientali associati al ciclo di vita di un banco-scuola tradizionale, coprendo tutte le fasi, dalla produzione delle materie prime fino al fine vita del prodotto. I confini del sistema sono definiti in modo da includere i principali processi produttivi, l'uso del prodotto e le modalità di smaltimento, offrendo così una visione completa degli impatti ambientali. La fase di inventario del ciclo di vita (Life Cycle Inventory, LCI) rappresenta il cuore dello studio. Qui vengono raccolti ed elaborati dati relativi ai materiali utilizzati, ai consumi energetici, alle emissioni e ai rifiuti generati durante ciascuna fase del ciclo di vita del banco-scuola. L'analisi si concentra su elementi critici come il consumo di risorse, le emissioni di gas serra e i rifiuti derivanti dai processi di produzione e smaltimento. Questa fase consente di individuare i materiali e le lavorazioni che generano i maggiori impatti ambientali, ponendo così le basi per interventi di miglioramento.

I risultati ottenuti dall'LCA evidenziano come il modello tradizionale di produzione e uso dei banchi-scuola presenti diverse criticità in termini di sostenibilità. Tra i principali punti critici emergono l'uso di materiali non riciclabili, l'elevata intensità energetica dei processi produttivi e la mancanza di opzioni per il riutilizzo o il recupero delle componenti a fine vita. Questi aspetti sottolineano l'urgenza di un ripensamento del design del prodotto, orientato a ridurre gli impatti negativi e a promuovere strategie di economia circolare. Il capitolo si conclude con la proposta di opzioni di miglioramento ambientale, basate sui risultati dell'analisi. Tra le strategie suggerite vi sono l'introduzione di materiali riciclati o riciclabili, l'ottimizzazione dei processi produttivi per ridurre i consumi energetici, e l'implementazione di un design modulare che favorisca la riparabilità e la disassemblabilità del prodotto. Queste proposte non solo mirano a ridurre gli impatti ambientali, ma preparano il terreno per la successiva fase di riprogettazione, illustrata nell'ottavo capitolo.

L'**ottavo capitolo** della tesi, dedicato alla riprogettazione di un banco-scuola circolare, rappresenta il momento più concreto e applicativo del percorso di ricerca, in cui i principi teorici e metodologici precedentemente discussi vengono tradotti in un progetto innovativo, denominato KJ01. Tale capitolo si configura come un

esempio emblematico di come il design circolare possa essere applicato al settore dell'arredo scolastico, affrontando questioni di modularità, disassemblabilità, aggiornabilità e sostenibilità ambientale. La riprogettazione del banco-scuola KJ01 parte dall'identificazione delle principali criticità del modello tradizionale, evidenziate attraverso uno studio preliminare basato sull'analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA). Questa fase consente di individuare le componenti maggiormente impattanti in termini ambientali e di proporre soluzioni che riducano tali impatti attraverso l'integrazione di strategie progettuali innovative. Il progetto KJ01 si fonda su principi di economia circolare, con l'obiettivo di estendere la vita utile del prodotto e facilitarne il riuso, la riparazione e il riciclo. Una delle caratteristiche chiave del banco KJ01 è la modularità, che si traduce nella possibilità di sostituire o aggiornare singoli componenti senza dover dismettere l'intero prodotto. Questa soluzione, ottenuta attraverso la progettazione di un sistema di connessione reversibile, garantisce non solo una maggiore flessibilità nelle configurazioni, ma anche una significativa riduzione degli sprechi. Ad esempio, il piano del banco e i piedi antiscivolo sono progettati per essere facilmente rimossi e sostituiti, adattandosi così a esigenze scolastiche variabili e a differenti classi dimensionali. Il telaio del banco, disassemblabile e aggiornabile, rappresenta un ulteriore elemento distintivo del progetto. Questa caratteristica consente di prolungare la vita del prodotto attraverso la manutenzione, il riutilizzo di parti e l'aggiornamento delle funzionalità, riducendo al minimo la necessità di nuovi materiali. Inoltre, la possibilità di diversificare le configurazioni del banco, in funzione delle esigenze didattiche e degli spazi scolastici, sottolinea l'approccio flessibile e user-centered del progetto. Dal punto di vista ambientale, l'ottavo capitolo introduce una valutazione comparata basata sull'LCA tra il banco tradizionale e il banco KJ01. Questa analisi dimostra come il nuovo progetto consenta di ridurre significativamente l'impatto ambientale grazie alla diminuzione dei materiali utilizzati, all'ottimizzazione dei processi produttivi e alla possibilità di recupero e riciclo dei componenti. I risultati evidenziano non solo i benefici ambientali del design circolare, ma anche il suo potenziale economico, riducendo i costi a lungo termine per gli istituti scolastici e le aziende produttrici. Infine, il capitolo sottolinea l'importanza della sperimentazione come strumento per validare e affinare i principi

del design circolare. La riprogettazione del banco KJ01 dimostra come un approccio sistemico e integrato possa tradursi in soluzioni concrete e sostenibili, che rispondano alle esigenze di un settore strategico come quello dell'arredo scolastico, contribuendo al contempo a una transizione verso modelli produttivi più resilienti. Il nono capitolo, infine rappresenta la sintesi e la conclusione del percorso di ricerca intrapreso. Inizialmente, viene fornita una panoramica dei risultati ottenuti, evidenziando come l'adozione del design circolare nel settore dell'arredo scolastico possa portare a significativi benefici ambientali, economici e sociali. I principali contributi teorici e pratici del lavoro sono riassunti, mostrando come le strategie di progettazione circolare, la modularità, la manutenibilità e l'approccio del prodotto come servizio (PaaS) possano essere integrate efficacemente nel ciclo di vita dei prodotti per estenderne la durata e ridurre l'impatto ambientale. Successivamente, si riflette sulle implicazioni pratiche dei risultati della ricerca per le aziende del settore legno-arredo, con particolare attenzione alle aziende partner del progetto. Vengono discusse le opportunità di implementazione delle strategie di design circolare e i potenziali benefici per la competitività e sostenibilità delle aziende.

Principali risultati conseguiti

La tesi ha conseguito risultati significativi, evidenziando il ruolo centrale del design circolare nel promuovere sia la sostenibilità ambientale sia l'economia circolare, con particolare riferimento al settore dell'arredo scolastico. Tra i principali risultati si distingue la definizione di linee guida progettuali per l'arredo scolastico circolare, che integrano strategie di modularità, manutenibilità e aggiornabilità, offrendo un approccio sistemico volto a favorire la sostenibilità. Tali linee guida, sviluppate in conformità con i principi dell'economia circolare e con le normative di settore, rappresentano un supporto concreto per il comparto legno-arredo, accompagnandolo nel percorso verso modelli produttivi più sostenibili. Un elemento fondamentale per la definizione di queste linee guida è stata l'analisi approfondita di casi studio, che ha permesso di esaminare soluzioni progettuali basate su strategie di circolarità e modularità. Questa analisi ha dimostrato come tali strategie possano contribuire significativamente sia all'allungamento della vita utile

Parte prima

Verso il Design circolare: dalla progettazione del ciclo di vita al prodotto-servizio

dei prodotti sia alla riduzione del loro impatto ambientale, fornendo indicazioni pratiche e replicabili per la progettazione di arredi circolari. I casi studio, in questo contesto, si sono rivelati strumenti indispensabili per individuare le migliori pratiche e tradurle in principi operativi concretamente applicabili al settore. È stato inoltre elaborato un modello di business circolare basato su un sistema prodotto-servizio (PSS), che sposta il focus dalla vendita del prodotto alla fornitura di un servizio, massimizzando il valore economico e riducendo gli impatti ambientali. Tra i risultati principali si colloca lo sviluppo del banco monoposto KJ01, progettato con un sistema di connessione reversibile e un telaio disassemblabile, che ne garantiscono flessibilità e durabilità. L'analisi del ciclo di vita (LCA) ha evidenziato benefici ambientali significativi rispetto ai banchi tradizionali, confermando l'efficacia del design circolare nel ridurre l'impatto ambientale.

Capitolo 1

Design per la Sostenibilità ambientale e Economia circolare

- 1.1. Principi, strumenti e metodi del Design per la sostenibilità ambientale
- 1.2. Dal modello economico lineare al modello economico circolare
- 1.3. Il legame tra Economia circolare e Sostenibilità ambientale

A partire dalla seconda metà del XX secolo, si è verificato un cambiamento significativo negli approcci adottati per affrontare le problematiche ambientali. Questo passaggio ha segnato l'abbandono delle strategie tradizionali basate sulla regolamentazione e sulla riparazione a valle, conosciute come approcci "end-of-pipe"^[1], per spostarsi verso interventi preventivi e innovativi, incentrati sulla riduzione delle cause alla radice dei problemi ambientali.

Il nuovo approccio, riflettendo un cambiamento strategico nella gestione ambientale, si concentra sulla prevenzione dell'inquinamento attraverso l'innovazione nei processi produttivi, incoraggiando l'adozione di tecnologie pulite capaci di trasformare radicalmente i modelli produttivi in ottica sostenibile. Contestualmente, l'attenzione si è progressivamente estesa dai processi industriali ai prodotti stessi, promuovendo la nascita dei cosiddetti "prodotti verdi", progettati per minimizzare l'impatto ambientale lungo tutto il ciclo di vita grazie a materiali sostenibili e a strategie che favoriscono riciclo e riuso. Parallelamente, si è assistito a un'evoluzione dell'innovazione, che da semplici miglioramenti incrementali è passata a soluzioni di progettazione radicale, capaci di rispondere a nuove sfide ambientali e sociali attraverso una riprogettazione integrale dei prodotti e delle modalità di produzione. Recentemente, l'attenzione si è spostata dalla progettazione di singoli prodotti alla creazione di sistemi integrati, in cui prodotti e servizi sono combinati per ottimizzare l'efficienza e ridurre l'impatto ambientale, tenendo conto dell'intera rete di flussi materiali, energetici e informativi. Questa evoluzione si accompagna allo sviluppo di modelli di consumo più sostenibili, che non si limitano alla riduzione degli sprechi, ma promuovono un cambiamento culturale nelle abitudini di consumo e favoriscono l'adozione di economie circolari. Il passaggio verso strategie preventive e innovative rappresenta una svolta significativa nella gestione ambientale, segnando un passo decisivo nella transizione verso una maggiore sostenibilità.

Tecnologie pulite, prodotti verdi e innovazioni sistemiche rappresentano il cuore di una trasformazione profonda che abbraccia l'intero sistema socioeconomico, richiedendo un impegno con-

[1] Il termine "end-of-pipe" si riferisce a tecnologie o approcci implementati per controllare e ridurre l'inquinamento dopo che è stato generato, agendo quindi a valle dei processi produttivi. Questo approccio si contrappone a strategie preventive, mirando a trattare e smaltire gli inquinanti prima che vengano rilasciati nell'ambiente.

Il primo capitolo introduce il tema del design per la sostenibilità ambientale e l'economia circolare. Si discutono i principi, gli strumenti e i metodi utilizzati nel design per promuovere ed attuare la sostenibilità ambientale, evidenziando la necessità di passare da un modello economico lineare, basato sul paradigma produzione-uso-smaltimento, a un modello circolare in cui i prodotti sono progettati per essere riutilizzati, mantenuti in uso il più a lungo possibile, rifabbricati, e in ultima istanza riciclati per il recupero di parti, componenti e materiali. Si approfondisce, inoltre, il legame tra economia circolare e sostenibilità ambientale, mostrando come queste due dimensioni siano strettamente interconnesse.

giunto tra imprese, governi e consumatori. Queste soluzioni non si limitano a offrire risposte alle sfide ambientali, ma ridefiniscono i paradigmi di produzione e consumo, integrando la sostenibilità come elemento centrale di sviluppo e progresso^[2]. Negli anni '70, Victor Papanek e Gui Bonsiepe, sollevando quesiti fondamentali sul ruolo del design nel contesto ecologico, hanno contribuito in modo significativo a plasmare il dibattito sulla sostenibilità, influenzando profondamente l'evoluzione del design orientato all'ambiente; in particolare, Papanek ha sostenuto che un buon design debba essere "rivoluzionario e radicale" rispetto alle questioni ambientali, introducendo il principio di "minimo mezzo, massimo effetto", secondo cui l'uso efficiente delle risorse dovrebbe massimizzare l'impatto positivo sulla natura, richiedendo un approccio critico che, riducendo al minimo gli sprechi, consideri l'impatto ambientale in ogni fase del processo progettuale^[3].

Gui Bonsiepe, proponendo l'idea di un design sistemico, ha invitato i designer a concepire ogni oggetto come parte di una "rete intensa di relazioni," sottolineando che un prodotto non può essere progettato isolatamente, ma deve essere integrato in un ecosistema che comprenda utenti, materiali, processi produttivi e contesti sociali; attraverso questo approccio, Bonsiepe ha messo in evidenza l'importanza di considerare l'interdipendenza tra i diversi elementi che costituiscono un sistema di design sostenibile, ponendo le basi per una progettazione più consapevole e interconnessa^[4]. I contributi di Papanek e Bonsiepe hanno introdotto una visione del design che supera la dimensione estetica e funzionale, abbracciando una responsabilità ecologica e sistemica che ha influenzato profondamente l'evoluzione della disciplina.

Successivamente, Vezzoli e Manzini hanno sistematizzato queste idee, definendo il design per la sostenibilità come un metodo progettuale basato su criteri ecologici, in grado di integrare aspetti ambientali, sociali ed economici^[5].

[2] Vezzoli C. (2005), Design per la Sostenibilità. Una disciplina (sempre più) articolata, in Vezzoli C., Tambarrini P. (a cura di), Atti di del convegno: Formazione, sviluppo sostenibile e design: strategie e strumenti per la Decade, CLUP Milano, 140, pp. 1-2.

[3] Papanek, V. (1973). Design for the real world: Human ecology and social change. Pantheon Books, p. 323.

[4] Bonsiepe, G. (1993). Teoria e pratica del disegno industriale (I ed. 1975, p. 62). Edizioni Laterza.

[5] Vezzoli, C., & Manzini, E. (2007). Design for environmental sustainability. Springer, p. 1.

Questo approccio non si limita al miglioramento dei prodotti, ma adotta una prospettiva sistemica che considera l'intero ciclo di vita del prodotto e il suo contesto d'uso, sottolineando l'importanza delle relazioni complesse tra i diversi elementi del sistema.

A partire dalla seconda metà degli anni '90, il design, affrontando una profonda trasformazione orientata alla riduzione dell'impatto ambientale, ha segnato un cambio di paradigma nella progettazione dei prodotti, introducendo nuovi strumenti e concetti che hanno ridefinito il suo ruolo nel contesto della sostenibilità; tra questi, il concetto di ciclo di vita del prodotto, che permette di analizzare ogni fase del suo arco vitale, dalla produzione allo smaltimento, ha assunto un ruolo centrale, consentendo di valutare in modo integrato gli impatti ambientali.

Parallelamente, l'introduzione dell'idea di "unità funzionale"^[6], che rielabora i criteri progettuali sulla base di parametri ambientali specifici, ha reso possibile una valutazione più sistemica degli effetti ambientali, facilitando lo sviluppo di soluzioni più sostenibili; con l'evolversi del dibattito sulla sostenibilità, sempre più articolato nei media e nella ricerca, si è accentuata l'urgenza di una trasformazione radicale nei modelli di produzione e consumo. In questo contesto, l'attenzione si è spostata dal miglioramento dei singoli prodotti verso l'innovazione di sistema, che, considerata una strategia olistica, punta a trasformare interi ecosistemi produttivi e consumistici, superando la semplice ottimizzazione di un prodotto e promuovendo un ripensamento complessivo per migliorare la sostenibilità dell'intero sistema economico e sociale.

Parallelamente, il design, ampliando il proprio campo d'azione per includere la dimensione socio-etica della sostenibilità, ha iniziato a esplorare questioni di giustizia legate alla distribuzione delle risorse, con l'obiettivo di integrare principi di equità sociale nei processi progettuali e di riconoscere che la sostenibilità non può essere limitata alla sola dimensione ambientale, ma deve includere anche quella sociale; in questo modo, il ruolo del design si è evoluto, abbracciando obiettivi che mirano a ridurre le disuguaglianze e a promuovere un accesso equo alle risorse.

[6] L'unità funzionale, è la prestazione del prodotto rispetto alla quale sono fatte le valutazioni. In altri termini non è tanto il prodotto fisico che deve essere oggetto di studio, quanto la sua funzione e, cioè, il servizio o il risultato che esso fornisce. Vezzoli, C. (2004) in design multiverso, p. 106.

Con il consolidarsi di questi paradigmi, il design orientato alla sostenibilità, specializzandosi progressivamente in settori e contesti produttivi specifici, ha sviluppato strategie progettuali adattabili alle caratteristiche e alle esigenze dei diversi ambiti produttivi, garantendo così un impatto più significativo e un'implementazione più efficace dei principi di sostenibilità^[7]. L'ecodesign si configura come un tema fondamentale che stimola una riflessione critica sugli impatti ambientali dei processi di progettazione, rivelando una trasformazione nella concezione stessa del design.

Secondo Badalucco e Chiapponi^[8], l'ecodesign invita a ripensare le tradizionali pratiche progettuali, in cui gli aspetti ambientali venivano considerati marginali e relegati a un ruolo secondario rispetto ai processi funzionali e produttivi. Questo approccio solleva un dibattito terminologico sull'uso di espressioni come "green design" o "eco-design", evidenziando la necessità di integrare la sostenibilità non come un'opzione accessoria, ma come elemento centrale e imprescindibile del design contemporaneo^[9].

Bertola e Manzini rafforzano questa prospettiva sottolineando come la sostenibilità debba essere considerata una componente strategica e intrinseca del design, piuttosto che un'aggiunta eventuale. Tale impostazione segna un vero e proprio cambiamento di paradigma, poiché suggerisce che l'ecodesign non si configuri come un approccio specifico, bensì come una visione globale capace di caratterizzare l'intera disciplina^[10].

Ne consegue che ogni decisione progettuale debba essere valutata attraverso il prisma della sostenibilità, eliminando la tradizionale distinzione tra design "tradizionale" e design "eco". In questa prospettiva, il design si trasforma in uno strumento strategico per affrontare le sfide ambientali e sociali globali, ridefinendo il ruolo del progettista come promotore di cambiamenti orientati verso un futuro sostenibile. L'ecodesign, dunque, non deve essere considerato come una pratica isolata o qualificata da etichette come "gre-

[7] Pietroni, L., & Vezzoli, C. (2004). Il percorso italiano. In C. Vezzoli (Ed.), *eco.DISCO. Il design per la sostenibilità ambientale* (pp. xx). Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente e Servizi Tecnici, DIS-INDACO Politecnico di Milano, Poli.design.

[8] Badalucco, L., & Chiapponi, M. (2009). *Energia e design. Innovazioni di prodotto per la sostenibilità energetica*. Franco Angeli, pp. 61-62.

[9] Ivi, p. 25.

[10] Bertola, P., & Manzini, E. (2004). *Design multiverso. Appunti di fenomenologia del design*. Edizioni Poli.design, p. 75.

en" o "eco", bensì come un principio fondamentale che caratterizza il design nella sua essenza. Superando una visione gerarchica e marginalizzante degli aspetti ambientali, la sostenibilità diventa parte integrante del processo progettuale, consolidando il design come una disciplina intrinsecamente orientata alla responsabilità ambientale e sociale^[11]. Secondo Brezet e Van Hemel^[12], l'ecodesign rappresenta un approccio progettuale che bilancia i requisiti ecologici con quelli tradizionali del design.

Questo implica che, diversamente dal design tradizionale, l'ecodesign non si limita a considerare criteri tecnici, economici ed estetici, ma integra in modo sistemico parametri ambientali lungo l'intero ciclo di vita del prodotto. L'obiettivo principale di tale approccio è minimizzare l'impatto ambientale associato alla produzione e al consumo, senza sacrificare la qualità, le prestazioni o l'estetica del prodotto. Per raggiungere questo scopo, l'ecodesign pone particolare attenzione all'integrazione delle considerazioni ambientali fin dalle prime fasi del processo progettuale, includendo aspetti come la selezione di materiali sostenibili, l'efficienza energetica, la possibilità di riciclo e la gestione del fine vita del prodotto.

Questo equilibrio tra requisiti ecologici e tradizionali non solo contribuisce a migliorare la sostenibilità dei prodotti, ma offre anche vantaggi significativi, generando valore aggiunto per le aziende, i consumatori e la società nel suo complesso. Keoleian e Menerey, nel loro studio del 1994, evidenziano l'importanza di integrare criteri ecologici nella progettazione e valutazione dei prodotti, considerando l'intero ciclo di vita, dalla produzione allo smaltimento, per ridurre l'impatto ambientale e promuovere scelte sostenibili. Essi sottolineano come l'uso efficiente delle risorse, attraverso la riduzione del consumo di materiali ed energia in ogni fase, rappresenti un aspetto fondamentale, accompagnato dalla necessità di limitare emissioni inquinanti e rifiuti lungo l'intero processo.

Un altro elemento centrale del loro approccio è il design orientato alla durabilità e alla riparabilità, che, estendendo la vita utile dei prodotti, consente di ridurre il ricorso a sostituzioni frequenti e, di conseguenza, la pressione sulle risorse naturali.

[11] Badalucco L., Chiapponi M. (2009), *Op. cit.*, pp. 61-62.

[12] Brezet, H., & Van Hemel, C. (1997). *Ecodesign: A promising approach to sustainable production and consumption*. Delft University of Technology & UNEP, Paris, France, p. 4.

L'adozione di materiali riciclabili e di tecnologie capaci di reintegrare le risorse nell'ambiente dimostra una visione sistemica, in cui il ciclo di vita del prodotto viene progettato in modo circolare, riducendo gli sprechi e favorendo la sostenibilità. Gli autori evidenziano, inoltre, come sia essenziale valutare l'impatto complessivo dei prodotti sugli ecosistemi, proponendo un design che, minimizzando sia il prelievo di risorse sia il rilascio di sostanze nocive, riesca a bilanciare efficienza economica e sostenibilità ambientale e sociale. Tale approccio, fondato su una visione integrata e consapevole, mira a trasformare il design in uno strumento strategico per affrontare le sfide ambientali globali^[13]. Ezio Manzini e Carlo Vezzoli (2007) propongono un approccio alla progettazione che integra i principi della sostenibilità ambientale considerando l'intero ciclo di vita di un prodotto, dalla produzione fino allo smaltimento, per ridurre al minimo l'impatto ambientale in ogni fase e promuovendo una gestione responsabile delle risorse. Tra le strategie chiave da loro individuate, emerge la necessità di minimizzare il consumo di materiali ed energia, un obiettivo che richiede l'ottimizzazione dei processi produttivi per eliminare gli sprechi e migliorare l'efficienza privilegiando risorse rinnovabili e tecnologie pulite, così da garantire una produzione più sostenibile. Un altro elemento centrale è la progettazione di prodotti durevoli e affidabili, poiché allungare la vita utile degli oggetti non solo contribuisce a ridurre i rifiuti, ma limita anche la domanda di nuove risorse. In questa prospettiva, diventa fondamentale promuovere il riutilizzo e il riciclo dei materiali, attraverso soluzioni progettuali che facilitino il disassemblaggio dei componenti, semplificandoci la riparazione e il recupero di materiali preziosi. Gli autori identificano inoltre quattro attività principali per una progettazione sostenibile: la riprogettazione di prodotti esistenti, la creazione di nuovi prodotti o servizi, lo sviluppo di sistemi innovativi di prodotti o servizi e, infine, l'elaborazione di scenari capaci di incentivare stili di vita più sostenibili. Questo approccio integrato punta non solo a ridurre l'impatto ambientale, ma a ridefinire il ruolo del design come leva strategica per favorire un futuro più responsabile e consapevole^[14].

[13] Keoleian, G. A. and Menerey, D. (1994). Sustainable Development by Design – Review of Life Cycle Design and Related Approaches, in *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 44, issue 5, pp. 645-668.

[14] Vezzoli, C., & Manzini, E. (2007), *Op.cit.*, p. 3.



Carlo Vezzoli (2005)^[15] e Lanzavecchia (2011)^[16] offrono due prospettive complementari sull'Ecodesign e il Life Cycle Design, contribuendo a una visione integrata del ruolo della progettazione nella sostenibilità. Vezzoli sottolinea l'importanza di integrare il concetto di design del ciclo di vita come elemento centrale sia della pratica progettuale che dell'educazione al design, evidenziando come l'approccio debba considerare l'intero ciclo di vita di un prodotto – dalla scelta dei materiali fino allo smaltimento – per minimizzarne l'impatto ambientale. Lanzavecchia, ampliando questa visione, definisce l'Ecodesign come un approccio sistemico fondato sull'analisi del ciclo di vita Life Cycle Assessment (LCA) (Fig. 1), che consente di identificare e ottimizzare gli impatti ambientali lungo tutte le fasi del prodotto, servizio o processo. Vezzoli interpreta l'Ecodesign come una metodologia trasformativa che, anziché limitarsi ad aggiungere considerazioni ambientali al design tradizionale, rivoluziona l'intero processo progettuale integrando i principi della sostenibilità in modo sistemico. Lanzavecchia approfondisce questa prospettiva analitica, evidenziando come la me-

[15] Vezzoli C. (2005), *Op.cit.*, pp. 4-5.

[16] Lanzavecchia, C. (2000), Tamborrini, P., & Barbero, S. (2010, edizione aggiornata). *Il fare ecologico: Il prodotto industriale ed i suoi requisiti ambientali* (versione ebook). Edizioni Ambiente, Milano, p. 31.

Fig. 1: Life Cycle Assessment. Fonte: Swiss Federal Office for the Environment (BAFU) (2022), rielaborato dall'autore.

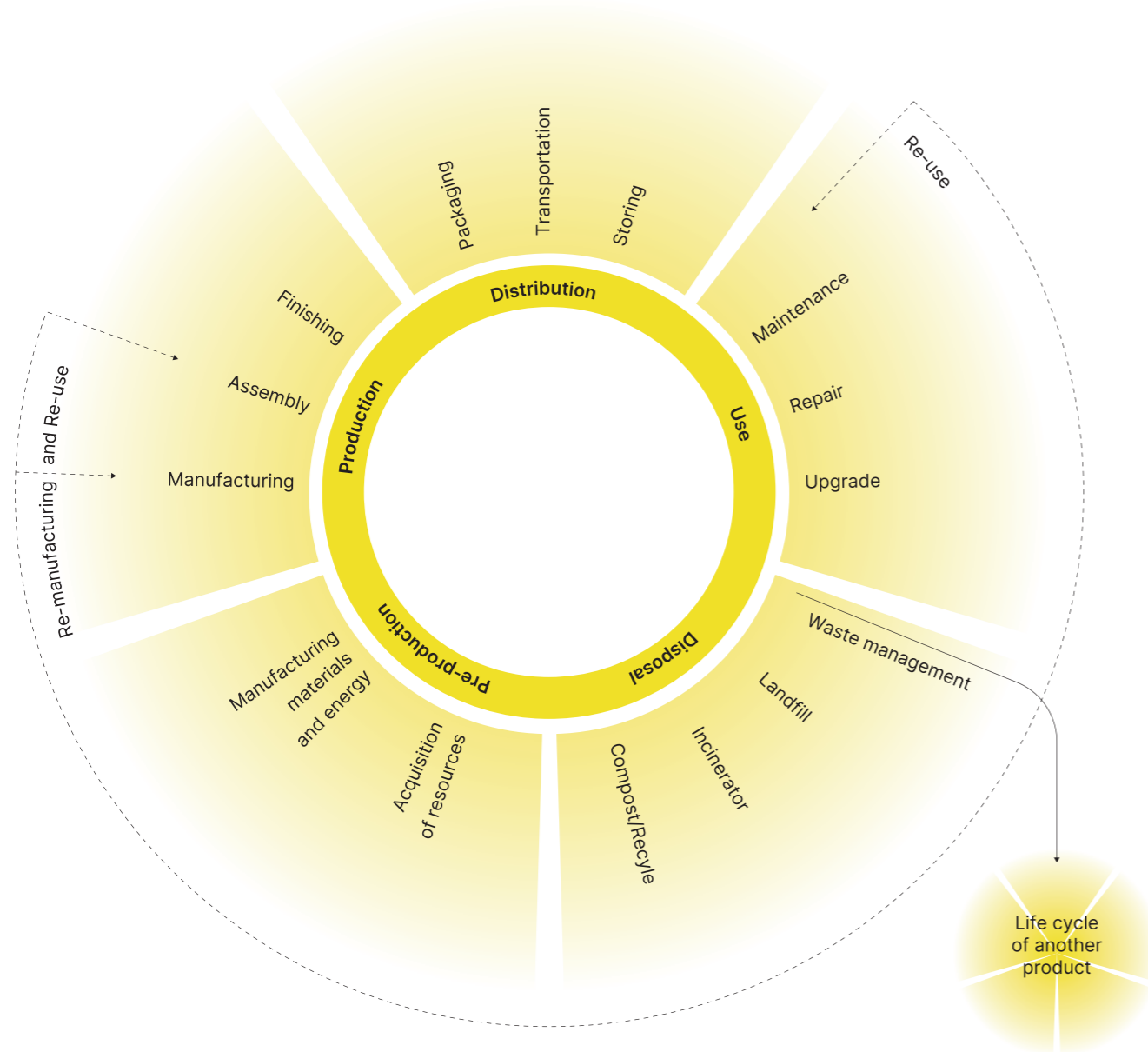


Fig. 2: Product Life Cycle System.
Fonte: Vezzoli et al., (2008).

La metodologia del Life Cycle Assessment non solo consenta di valutare gli impatti ambientali, ma si configuri anche come uno strumento strategico per orientare scelte progettuali consapevoli e sostenibili. Sia Vezzoli che Lanzavecchia sottolineano la necessità di formare i designer affinché acquisiscano la capacità di gestire le complesse interazioni tra materiali, processi produttivi e impatti ambientali. Mentre Vezzoli enfatizza l'importanza di includere il Life Cycle Design e il Product Life Cycle System (Fig. 2) nei percorsi formativi per fornire agli studenti competenze che li rendano capaci di progettare prodotti più durabili, riparabili e riciclabili, con una visione sistemica, Lanzavecchia evidenzia come l'integrazione del Life Cycle Assessment (LCA) nei processi educativi e progettuali contribuisca a migliorare la capacità di analizzare e ottimizzare sistemi complessi, favorendo cicli di vita circolari e riducendo gli sprechi. Entrambi concordano sulla necessità che il design per la sostenibilità non si limiti a ridurre gli impatti negativi, ma miri anche a creare valore attraverso un equilibrio tra dimensioni ambientali, economiche e sociali. Se Vezzoli interpreta il Life Cycle Design come una filosofia progettuale capace di trasformare l'approccio alla creazione di prodotti e sistemi, Lanzavecchia rafforza questa visione,

mettendo in luce il ruolo centrale dell'approccio sistemico e analitico per rendere il design uno strumento efficace nella transizione verso un futuro più sostenibile.

Gian Luca Baldo, nel suo lavoro del 2008, sottolinea come la metodologia LCA rappresenti uno strumento operativo indispensabile per l'Ecodesign, poiché consente di valutare e ridurre gli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita dei prodotti, evidenziando al contempo la necessità di integrare queste analisi già nelle prime fasi della progettazione, così da realizzare soluzioni ecocompatibili che tengano conto di ogni fase produttiva, dall'approvvigionamento delle materie prime fino alla gestione del fine vita^[17].

Questa prospettiva si ricollega al pensiero di Carla Lanzavecchia (2000) in "Il fare ecologico", dove evidenzia l'urgenza di adottare modelli di sviluppo sostenibile nelle società industriali avanzate, sottolineando come sia imprescindibile ripensare l'uso delle risorse attraverso approcci sistemici e innovativi, in grado di trasformare i processi produttivi per ridurre l'impatto ambientale e proporre soluzioni ecologicamente ed economicamente sostenibili, tali da rispondere in modo concreto alle problematiche legate alla sostenibilità. In continuità con queste riflessioni, Vezzoli e Manzini, nel loro testo del 2007, approfondiscono il concetto di Life Cycle Design, proponendolo come pilastro di un approccio progettuale responsabile che, attraverso l'adozione di strategie e metodologie orientate all'analisi e alla riduzione degli impatti ambientali, consenta di considerare ogni fase del ciclo di vita del prodotto, dall'estrazione delle risorse fino allo smaltimento, integrando al tempo stesso le dimensioni economiche, sociali e ambientali per garantire una progettazione olistica^[18].

Silvia Barbero (2009) analizza l'importanza di adottare un approccio sistemico al design, riconoscendo la sostenibilità ambientale come elemento centrale di ogni processo progettuale. Secondo l'autrice, l'Ecodesign e il Life Cycle Design richiedono una prospettiva che vada oltre la semplice ottimizzazione dei materiali e dei processi produttivi, puntando invece a una visione complessa e integrata che consideri ogni fase del ciclo di vita del prodotto.

[17] Baldo, G. L., Marino, M., & Rossi, S. (2008). Analisi del Ciclo di Vita LCA. Gli strumenti per la progettazione sostenibile di materiali, prodotti e processi. Milano: Edizioni Ambiente.

[18] Vezzoli, C., & Manzini, E. (2007), Op.cit., pp. 208-209.

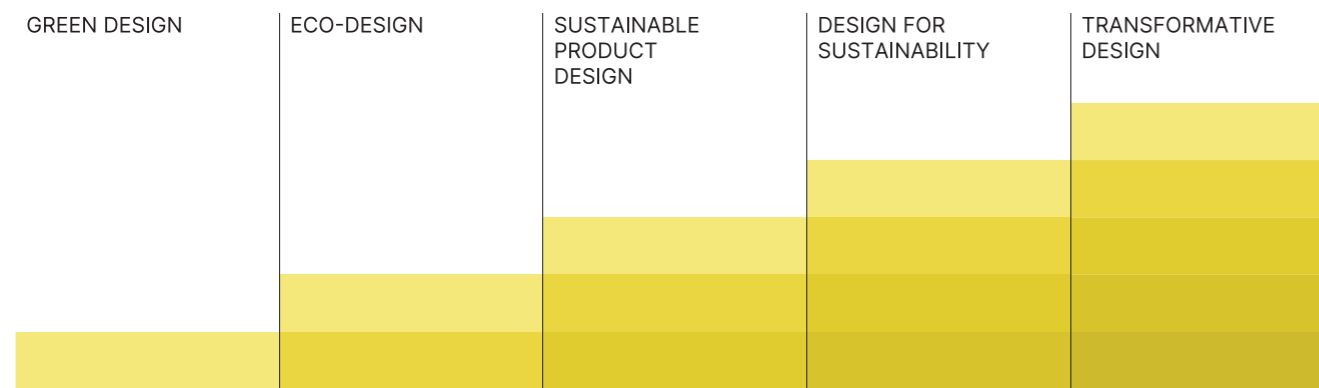


Fig. 3: Defining sustainable design. Fonte: Institute for Manufacturing, University of Cambridge (2012).

In questo quadro, la progettazione sostenibile viene descritta come un'attività che deve necessariamente includere criteri fondamentali, quali la durabilità dei prodotti, la possibilità di smontarli per facilitare il trattamento del fine vita, e la promozione di pratiche che incentivino il riciclo e il riutilizzo dei materiali.

Barbero sottolinea come un'applicazione consapevole di strategie progettuali basate su questi principi sia in grado non solo di ridurre significativamente l'impatto ambientale, ma anche di contribuire alla costruzione di un modello di sviluppo compatibile con le esigenze della sostenibilità, offrendo soluzioni concrete per affrontare le sfide ambientali contemporanee^[19]. Nel 2016, Fabrizio Ceschin e İdil Gaziulusoy hanno analizzato l'evoluzione del design per la sostenibilità, evidenziando come il green design rappresenti una delle prime fasi di questo percorso (Fig. 3). Il green design si concentra principalmente sulla riduzione degli impatti ambientali attraverso miglioramenti incrementali nei prodotti esistenti, come l'uso di materiali ecologici o l'aumento dell'efficienza energetica. Tuttavia, questo approccio tende a limitarsi a modifiche superficiali, senza affrontare le cause profonde dei problemi ambientali^[20].

Han Brezet e Carolien van Hemel (1997) hanno sviluppato una visione avanzata dell'ecodesign, inteso come un approccio che supera i limiti del green design integrando in modo sistemico le considerazioni ambientali in tutte le fasi del processo di sviluppo del prodotto. Questo approccio prevede una valutazione approfondita del ciclo di vita, che comprende la selezione dei materiali, le modalità di produzione, l'uso e lo smaltimento finale, con l'obiettivo di ridurre al minimo l'impatto ambientale complessivo.

A differenza del green design, che si limita a introdurre miglioramenti specifici e incrementali in determinate aree, l'ecodesign si distingue per una prospettiva più ampia e integrata, capace di abbracciare l'intero ciclo di vita del prodotto.

McDonough e Braungart (2002), propongono un modello radicalmente innovativo di progettazione e produzione basato sul concetto di eco-efficacia. L'approccio "cradle to cradle" (dalla culla alla culla) si allontana dall'idea tradizionale di "riduzione del danno"

[19] Barbero, S. (2009). In Bertola, P., & Maffei, S. (Eds.), *Design Research Maps. Prospettive della ricerca universitaria in design in Italia*. Bologna: Maggioli, pp. 204-207

[20] Ceschin, F., & Gaziulusoy, I. (2016). Evolution of design for sustainability: From product design to design for system innovation and transition. *Design Studies*, 47, pp. 118-163.

(eco-efficienza) e promuove un sistema in cui la nozione di spreco viene completamente eliminata. La filosofia centrale è che ogni prodotto sia progettato per integrarsi armoniosamente nei cicli biologici o tecnici, consentendo ai materiali di tornare al sistema senza perdite o impatti negativi. McDonough e Braungart identificano due flussi principali: Cicli biologici, in cui i materiali biodegradabili possono essere reintegrati negli ecosistemi naturali senza causare danni; Cicli tecnici, in cui i materiali sintetici o non biodegradabili vengono progettati per essere riutilizzati continuamente, senza degrado della qualità, in un ciclo chiuso di recupero e riprogettazione. L'idea fondamentale è creare un sistema in cui i prodotti non solo siano privi di impatti negativi, ma contribuiscano positivamente al contesto ambientale, economico e sociale. Ciò comporta una riprogettazione completa di processi e materiali, ponendo l'accento su fonti rinnovabili, sicurezza per l'ambiente e salute umana^[21].

Janine Benyus (1997), nel suo libro *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, esplora un approccio complementare basato sull'imitazione dei modelli naturali per risolvere problemi progettuali complessi. La biomimesi (biomimicry) promuove l'idea che i processi e i sistemi naturali, affinati da milioni di anni di evoluzione, possano offrire soluzioni sostenibili per la progettazione e l'ingegneria. Benyus identifica tre livelli di applicazione della biomimesi: Imitare le forme naturali, come le ali degli uccelli per sviluppare design aerodinamici; Replicare i processi naturali, come la fotosintesi per creare energia rinnovabile; Seguire i principi ecologici, creando sistemi produttivi che operano in equilibrio con l'ambiente circostante. L'approccio biomimetico non si limita al prodotto, ma si estende ai processi produttivi e al funzionamento sistemico, con l'obiettivo di creare progetti che siano efficaci, sostenibili e integrati con i cicli naturali^[22]. Questi due approcci, il cradle to cradle e la biomimesi, condividono una visione comune: quella di un design radicalmente sostenibile. Mentre McDonough e Braungart offrono un framework pratico per eliminare gli sprechi e chiudere i cicli dei materiali, Benyus ci invita a guardare alla natura come fonte di ispirazione per soluzioni innovative e rispettose dell'ambiente.

[21] McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. North Point Press, pp. 92-117.

[22] Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York: William Morrow, pp. 1-20.

Lucia Pietroni (2015) esplora il potenziale della biomimesi come approccio innovativo nel campo del design sostenibile. La biomimesi, o biomimetica, è definita come la scienza che studia i sistemi biologici naturali emulandone forme, processi, meccanismi d'azione e strategie, al fine di risolvere le sfide progettuali e tecnologiche dell'uomo in modo sostenibile. Pietroni sottolinea come la natura, attraverso miliardi di anni di evoluzione, abbia sviluppato soluzioni efficienti e sostenibili che possono essere fonte di ispirazione per il design. L'autrice evidenzia l'importanza di integrare i principi della biomimesi nel processo progettuale, promuovendo un approccio interdisciplinare che coinvolga biologi, ingegneri e designer. Questo metodo consente di sviluppare prodotti e sistemi che non solo soddisfano le esigenze funzionali ed estetiche, ma che sono anche rispettosi dell'ambiente e delle risorse naturali^[23].

I lavori di Bhamra, Lilley e Tang (2011)^[24], insieme a quello di Lilley (2009)^[25], approfondiscono il concetto di Design for Sustainable Behavior (DfSB), ovvero un approccio progettuale che mira a promuovere comportamenti sostenibili, riconoscendo il ruolo centrale del design nel ridurre gli impatti ambientali e sociali.

Secondo questi autori, il design può influenzare in modo significativo il comportamento degli utenti durante l'utilizzo dei prodotti, intervenendo attraverso strategie che rendano la sostenibilità più accessibile e integrata nella quotidianità. Bhamra et al. (2011) sottolineano come l'impiego di approcci persuasivi o informativi sia in grado di colmare il divario tra il comportamento effettivo degli utenti e gli obiettivi di sostenibilità, facilitando l'adozione di pratiche più consapevoli e responsabili.

Parallelamente, Lilley (2009) si concentra sull'analisi di strategie specifiche volte a modificare il comportamento degli utenti attraverso il design, studiandone l'efficacia e l'accettabilità. Attraverso l'uso di casi studio, Lilley dimostra come interventi progettuali mirati possano incentivare comportamenti sostenibili, offrendo

[23] Pietroni, L. (2015). Bio-Inspired Design. La Biomimesi come promettente prospettiva di ricerca per un design sostenibile. *Scienze e Ricerche*, 4, pp. 18-20.

[24] Bhamra, T., Lilley, D., & Tang, T. (2011). Design for Sustainable Behavior: Using Design to Influence Consumer Behavior to Encourage Sustainability in the Home. *Design Studies*, 32(3), pp. 216-235.

[25] Lilley, D. (2009). Design for Sustainable Behavior: Strategies and Perceptions. *Design Studies*, 30(6), pp. 704-720.

indicazioni preziose sui limiti e le opportunità delle diverse strategie applicabili. In una prospettiva complementare, il lavoro di Van Krieken, Desmet, Aliakseyeu e Mason (2012) introduce il concetto di Emotionally Sustainable Design, un approccio che si concentra sul legame emotivo tra gli utenti e i prodotti. Secondo gli autori, progettare prodotti che soddisfino i bisogni emotivi degli utenti può favorire un utilizzo prolungato, riducendo così la necessità di sostituzioni e, di conseguenza, il consumo di risorse. Questo approccio evidenzia come la progettazione, soddisfacendo le esigenze emotive delle persone, possa contribuire a pratiche più sostenibili, rafforzando il ruolo del design nel promuovere un consumo più consapevole e rispettoso dell'ambiente^[26]. Jonathan Chapman insieme a Nick Gant (2007), riflette sul ruolo del design come strumento di trasformazione capace di ridefinire il rapporto tra persone, oggetti e impatto ambientale. Egli sottolinea come il design non debba limitarsi a soddisfare bisogni materiali, ma debba agire come catalizzatore di esperienze significative e ricordi, trasformando i prodotti in oggetti che trascendano la loro natura materiale^[27]. Chapman (2014) affronta la necessità di promuovere relazioni più profonde e durature tra le persone e i beni di consumo, evidenziando come l'attuale ciclo insostenibile di produzione, consumo e scarto sia legato non solo a problemi di energia e materiali, ma anche a comportamenti umani e alla mancanza di valore emotivo attribuito agli oggetti. Chapman invita i progettisti a considerare i materiali non solo come involucri funzionali, ma come elementi capaci di evocare connessioni profonde con il sé, la cultura e la società^[28]. Il concetto di "materiali significativi" proposto da Chapman esplora come la relazione con il mondo costruito possa essere arricchita da esperienze emotive, trasformando il design in un mezzo per contrastare l'obsolescenza programmata e per promuovere una maggiore consapevolezza nell'uso degli oggetti^[29].

Ezio Manzini e Carlo Vezzoli (2003) hanno sottolineato come le

[26] Van Krieken, M., Desmet, P., Aliakseyeu, D., & Mason, J. (2012). Emotionally Sustainable Design: Products That Last Through Emotional Durability. In *Design and Emotion Conference Proceedings*, pp. 1-9.

[27] Chapman, J., & Gant, N. (2007). Designers, Visionaries and Other Stories: A Collection of Sustainable Design Essays. London: Earthscan, pp. 45-58.

[28] Chapman, J. (2014). *Meaningful Stuff: Towards Longer Lasting Products*. London: Routledge, pp. 89-105.

[29] Chapman, J. (2014), *Op.cit.*, pp. 25-47.

strategie progettuali si siano evolute verso un approccio sistemico, identificando il Product-Service System (PSS) come un paradigma chiave per affrontare le sfide della sostenibilità^[30].

Questo modello amplia il ruolo del progettista, spostando il focus dal prodotto fisico al sistema integrato di prodotto e servizio, e considerando le interazioni tra produzione, consumo, ambiente, persone e oggetti. Gli autori evidenziano come il PSS rappresenti un cambio di prospettiva cruciale: la progettazione non si limita al ciclo di vita del prodotto, ma abbraccia tutte le implicazioni sistemiche, puntando a ridurre gli impatti ambientali e a migliorare l'efficienza complessiva^[31]. Uno degli aspetti centrali di questo approccio è il trasferimento della proprietà del prodotto dal consumatore al fornitore del servizio, il che modifica radicalmente i modelli di business tradizionali basati sulla vendita. Il fatto che il fornitore mantenga la proprietà del bene fisico crea incentivi per prolungarne la durata, ottimizzarne l'uso e gestirne al meglio la fine del ciclo di vita. Ciò favorisce l'adozione di pratiche più sostenibili, come il riuso, la riparazione e il riciclo, minimizzando i rifiuti e valorizzando i materiali. In questo contesto, il successo non si misura più solo in termini di vendita, ma in funzione del valore generato dalle funzioni e dai benefici offerti al consumatore attraverso il sistema prodotto-servizio. Questo approccio, quindi, non solo promuove una maggiore sostenibilità ambientale, ma apre anche nuove opportunità per modelli di business innovativi e relazioni più dinamiche tra produttori e consumatori.

Fabrizio Ceschin (2012) descrive il Product-Service System (PSS) come un sistema integrato di prodotti e servizi progettato per rispondere a esigenze specifiche dei clienti, grazie alla collaborazione tra diversi attori socio-economici^[32]. Questo approccio sistemico non si limita a migliorare singoli prodotti, ma punta a trasformare l'intero ciclo di produzione e consumo, promuovendo efficienza, riduzione degli sprechi e cicli chiusi che imitano i processi naturali. Ceschin individua tre modelli principali di PSS. Nel primo, orientato al prodotto, il fornitore non si limita a vendere

[30] Manzini, E., & Vezzoli, C. (2003). Lo sviluppo di prodotti sostenibili: I requisiti ambientali dei prodotti industriali. Milano: Edizioni Ambiente, pp. 55-78.

[31] Ivi, pp. 150-168.

[32] Ceschin, F. (2012). Sustainable Product-Service Systems: Between Strategic Design and Transition Studies. Springer, pp. 23-35.

un bene, ma offre anche servizi aggiuntivi come la manutenzione, la riparazione o l'aggiornamento, prolungando così la vita utile del prodotto. Nel secondo, orientato all'uso, il cliente utilizza il prodotto senza diventarne proprietario, come nei casi di noleggio o leasing. Infine, nell'approccio orientato al risultato, non si vende il prodotto fisico, ma il beneficio o il risultato finale, come nel caso di un servizio di stampa invece dell'acquisto di una stampante^[33].

Questi modelli rappresentano un cambio di prospettiva significativo, richiedendo la collaborazione tra tutti gli attori della catena del valore, dai fornitori ai consumatori. L'obiettivo è massimizzare l'efficienza, minimizzare gli sprechi e creare sistemi che favoriscano la condivisione di beni e servizi, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale. Non basta progettare prodotti ecologici: è necessario ripensare l'intero sistema in modo che funzioni come un ciclo naturale, dove ogni elemento è ottimizzato e integrato. Un ruolo chiave in questa trasformazione è quello del progettista, che deve essere in grado di tradurre i principi della sostenibilità in soluzioni concrete e praticabili. Tuttavia, Ceschin evidenzia che non esiste ancora una strategia progettuale definitiva e universalmente applicabile per garantire uno sviluppo pienamente sostenibile lungo tutto il ciclo di vita di un prodotto o sistema, dalla progettazione iniziale fino alla sua dismissione. Nonostante ciò, è possibile intervenire in modo mirato per migliorare specifiche fasi del ciclo di vita, ottimizzandole in termini di impatti ambientali, sociali ed economici. Questo richiede un approccio flessibile e strategico, capace di adattarsi ai diversi contesti e di supportare la transizione verso modelli di produzione e consumo più sostenibili^[34].

Negli ultimi anni, è diventato sempre più evidente quanto le filosofie ambientali abbiano influenzato il mondo del design, aprendo la strada a un'evoluzione significativa nei metodi progettuali e negli approcci innovativi, come il Design for Excellence (DfX). Per alcuni autori il DfX è definito come "una combinazione di strategie di ecodesign, tra cui il Design per l'ambiente e il Design per la rigenerazione, che porta ad altre strategie di design come il Design per l'aggiornamento, il Design per il disassemblaggio, il Design per la modularità, il Design per la manutenibilità e il Design per l'affida-

[33] Ivi, pp. 66-80.

[34] Ivi, pp. 150-165.

bilità”^[35]. Becker e Wits (2013) hanno evidenziato come il DfX possa standardizzare i flussi informativi e le attività progettuali, aiutando le aziende a implementare processi di design più snelli e coerenti. La loro proposta di un template per i metodi DfX offre un importante contributo, permettendo di ridurre la complessità organizzativa e di garantire un’applicazione più uniforme di queste metodologie^[36]. Jovičić et al. (2014) sottolineano come tecniche specifiche, quali il Design for Manufacturing (DfM) e il Design for Assembly (DfA), rivestano un ruolo cruciale nell’ambito del DfX. Questi approcci, che semplificano la realizzazione e l’assemblaggio dei prodotti, non solo riducono i costi complessivi, ma migliorano la competitività dei prodotti sul mercato, evitando errori progettuali nelle fasi iniziali dello sviluppo. Inoltre, il DfX si dimostra particolarmente efficace nell’ambito del Product-Service System (PSS), integrando strategie di progettazione che promuovono cicli chiusi, facilitando il riutilizzo e la manutenzione dei prodotti^[37]. Tukker (2015) propone una strategia che integra il prodotto con i servizi correlati, promuovendo modelli di business basati sull’uso e il riuso dei beni. I sistemi prodotto-servizio (PSS), secondo l’autore, rappresentano strumenti chiave per guidare le aziende verso un’economia circolare, ottimizzando la gestione delle risorse, allungando la vita dei prodotti e migliorando l’efficienza complessiva dei processi produttivi. Tuttavia, Tukker evidenzia le sfide legate allo sviluppo e all’adozione dei PSS, che richiedono profonde trasformazioni organizzative e culturali, oltre a ottenere il consenso dei consumatori^[38]. La transizione dal Design for Excellence (DfX) al Life Cycle Design (LCD) può essere considerata un passo evolutivo naturale per i progettisti impegnati nel coniugare efficienza e sostenibilità. Mentre il DfX si concentra sull’ottimizzazione mirata di una o più fasi specifiche del ciclo di vita del prodotto, il LCD si distingue per la

[35] Go, T. F., Wahab, D. A., & Rahman, M. N. A. (2015). Design for excellence (DfX): A review and future trends. *Procedia Manufacturing*, 2, pp. 267-280.

[36] Becker, R., & Wits, W. W. (2013). Template-based design for excellence (DfX) methods: Reducing complexity and improving consistency in product development processes. *Procedia CIRP*, 11, pp. 188-191.

[37] Jovičić, M., Bošnjak, S., Stojadinović, S., & Marjanović, N. (2014). Design for manufacturing and assembly as a tool for achieving product competitiveness. *Procedia Engineering*, 69, pp. 838-846.

[38] Tukker, A. (2015). Product services for a resource-efficient and circular economy – a review. *Journal of Cleaner Production*, 97, pp. 76-91.

sua visione complessiva, che prende in considerazione tutte le fasi del ciclo di vita, dalla pre-produzione fino alla dismissione finale. In questa prospettiva, il DfX non è altro che uno strumento operativo integrato all’interno del più ampio framework del LCD, offrendo un supporto funzionale per affrontare in modo strategico le sfide progettuali con un approccio integrato^[39].

Il Life Cycle Design (LCD) si configura come un sistema di progettazione che integra le problematiche ambientali in tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto, dalla pre-produzione alla dismissione finale^[40]. Attraverso metodologie diversificate, l’LCD consente di adottare strumenti avanzati come il Life Cycle Assessment (LCA), che fornisce dati quantitativi essenziali per valutare e mitigare gli impatti ambientali complessivi. Questo approccio permette ai progettisti di prendere decisioni strategiche basate su analisi approfondite, garantendo benefici ambientali ed economici nel lungo termine. Il Life cycle Assessment (LCA) si rivela cruciale per sviluppare metodologie progettuali orientate alla sostenibilità, poiché analizza ogni fase del ciclo di vita di un prodotto per migliorarne l’efficienza complessiva. Tra le principali strategie progettuali emergono la riduzione delle risorse, mirata a minimizzare l’uso di materiali ed energia, e la selezione di processi e materiali a basso impatto ambientale^[41]. Altrettanto rilevante è l’ottimizzazione della durata dei prodotti, che prevede la progettazione di beni durevoli e facili da riparare, nonché il recupero e il riutilizzo dei materiali dismessi. Inoltre, l’attenzione al disassemblaggio facilita la separazione e il recupero delle componenti, favorendo il riciclo e la manutenzione, e contribuendo così a una progettazione più efficiente e sostenibile. Tra le discipline specializzate legate alle fasi di dismissione si distinguono il Design for Disassembly (DfD), che ottimizza lo smontaggio di prodotti per migliorarne la riciclabilità e la manutenzione, e il Design for Recycling (DfR), che si concentra sulla selezione e sulla separabilità dei materiali per facilitarne il riuso. Il Design for Remanufacturing (DfRem) promuove invece la reintro-

[39] Pahl, G., & Beitz, W. (1996). *Engineering Design: A Systematic Approach*. Springer, pp. 175-190.

[40] Vezzoli, C., & Manzini, E. (2007), *Op.cit.*, pp. 45-67.

[41] Ivi, pp. 120-145.

duzione di componenti usati nella catena produttiva, migliorando sia il montaggio che la manutenzione. Questi approcci non solo riducono i tempi e i costi operativi, ma anche il consumo energetico, semplificando l'automazione dei processi^[42].

Rosen e Kishawy (2012), approfondiscono l'interazione tra progettazione, produzione e sostenibilità. Essi sottolineano che la sostenibilità deve essere considerata in termini ampi, includendo aspetti ambientali, economici e sociali. In quest'ottica, il design sostenibile richiede una visione completa del ciclo di vita del prodotto, dall'estrazione delle materie prime fino alla dismissione, con l'obiettivo di minimizzare gli impatti ambientali e massimizzare l'efficienza delle risorse. Gli autori evidenziano come il LCA sia uno strumento fondamentale per identificare aree di miglioramento e orientare decisioni progettuali consapevoli. Tra le strategie proposte da Rosen e Kishawy spiccano l'ottimizzazione del design per ridurre il consumo di energia e materiali, la progettazione per durabilità e riparabilità, e approcci come il Design for Disassembly e il Design for Recycling, che semplificano lo smontaggio e il recupero dei materiali. Gli autori enfatizzano inoltre la necessità di adottare una visione complessiva del sistema, analizzando le interazioni tra produzione, distribuzione, uso e fine vita per ridurre compromessi e massimizzare l'efficienza. L'uso di tecnologie innovative, come software di eco-design che combinano dati in tempo reale con analisi del ciclo di vita, rappresenta un elemento chiave per ottimizzare le scelte progettuali^[43].

[42] Per un approfondimento sulle metodologie di progettazione per il disassemblaggio e la sostenibilità, si veda "Application of Design for Disassembly from Remanufacturing Perspective", di Soh, Ong e Nee, pubblicato su *Procedia CIRP* (2015).

[43] Rosen, M. A., & Kishawy, H. A. (2012). Sustainable Manufacturing and Design: Concepts, Practices and Needs. *Sustainability*, 4(2), pp. 154-174.

L'economia lineare, affermata tra il Settecento e i primi decenni dell'Ottocento durante la rivoluzione industriale, rappresenta un modello di produzione e consumo basato su un processo apparentemente semplice, articolato in tre fasi principali: l'estrazione delle risorse naturali dall'ambiente (prendere), la loro trasformazione in beni di consumo attraverso processi industriali (fare) e, infine, lo smaltimento come rifiuti una volta esaurito il ciclo di vita dei prodotti (smaltire). Questo modello, inizialmente percepito come ideale grazie all'apparente abbondanza e infinitezza delle risorse naturali, rispondeva alla necessità di soddisfare i bisogni di una popolazione in rapida crescita, che richiedeva un sempre maggiore accesso a beni e servizi. L'efficienza industriale, potenziata dall'innovazione tecnologica e dalla crescita vertiginosa dei consumi, consolidò tale paradigma. Tuttavia, con il progredire del XX secolo, emersero chiaramente le criticità e le inefficienze di questo modello, accompagnate da costi ambientali sempre più elevati^[44].

In particolare, il modello lineare ha contribuito significativamente a sfide globali oggi cruciali, come l'esaurimento delle risorse naturali, la gestione insostenibile dei rifiuti e il degrado ambientale. Già nel 1972, il rapporto *The Limits to Growth* delineava una critica fondamentale a tale modello economico, sottolineandone l'intrinseca insostenibilità^[45]. Gli autori evidenziarono come un sistema economico basato sull'estrazione, la produzione e lo smaltimento non solo conduca al rapido esaurimento delle risorse naturali, ma favorisca anche un accumulo incontrollato di rifiuti, con implicazioni ecologiche e sociali gravi. Questo modello, fortemente dipendente da risorse finite, alimenta infatti una crescita economica che ignora i limiti ecologici del pianeta, aumentando il rischio di collassi sistemici. Successivamente, nel 1987, il rapporto *Our Common Future*, noto anche come *Rapporto Brundtland* e redatto dalla Commissione Mondiale su Ambiente e Sviluppo delle Nazioni Unite, introdusse una definizione inclusiva e innovativa di sviluppo sostenibile. Lo sviluppo veniva descritto come "lo sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle future

[44] Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The Limits to Growth*, pp. 1-21.

[45] Ivi, pp. 29-34.

generazioni di soddisfare i propri bisogni^[46]. Questa prospettiva integrava le dimensioni ambientale, economica e sociale, sottolineando la necessità di ripensare i modelli di crescita in un'ottica intergenerazionale. Tale visione gettò le basi per importanti sviluppi successivi, tra cui il Summit della Terra di Rio de Janeiro del 1992, ufficialmente denominato Conferenza delle Nazioni Unite su Ambiente e Sviluppo, che vide la partecipazione di oltre 178 Paesi e di più di 100 capi di Stato, configurandosi come il più grande evento intergovernativo della storia fino ad allora^[47].

Nonostante i significativi sforzi promossi da rapporti come *The Limits to Growth*, *Our Common Future* e dalle iniziative scaturite dal Summit di Rio, è evidente che non si siano ancora adottate misure adeguate o sufficienti a ridurre l'impatto ambientale negativo delle attività umane^[48]. Anzi, negli ultimi decenni, la domanda globale di risorse materiali è aumentata in modo continuo e si prevede che possa addirittura raddoppiare entro il 2050^[49].

In questo scenario emerge il concetto di economia circolare, proposto come risposta alle sfide appena descritte. Le numerose definizioni e sfumature attribuite a questo modello economico ne sottolineano la complessità e la multidimensionalità. L'evoluzione del concetto, radicato in discipline come l'ecologia industriale e l'economia ecologica, riflette l'influenza di teorie innovative e la crescente consapevolezza della necessità di integrare sostenibilità ambientale, economica e sociale. Grazie a queste solide basi teoriche, l'economia circolare ha acquisito un ruolo centrale nelle agende globali, configurandosi come un paradigma di riferimento per ripensare i modelli di produzione e consumo e affrontare le principali sfide ambientali e sociali contemporanee. Tuttavia, questa diversità di approcci e definizioni invita a un'analisi approfondita delle sue implicazioni pratiche, al fine di individuare strumenti, strategie e modelli applicativi in grado di sostenere una transizione efficace verso un sistema economico realmente circolare e sostenibile.

[46] World Commission on Environment and Development (WCED). (1987). *Our Common Future*, pp. 43-66.

[47] Lanchberry, J. (1996). *Rio Summit Analysis*, pp. 101-115.

[48] Sneddon, C., Howarth, R. B., & Norgaard, R. B. (2006). *Sustainable Development and the Problem of Growth*, pp. 1123-1140.

[49] Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W., & Wiedenhofer, D. (2018). *Global Resource Use Trends and Projections*, pp. 812-827.

Il concetto di economia circolare non può essere associato a un'unica data o a un singolo autore, configurandosi invece come il risultato di un'evoluzione teorica sviluppata nell'ambito di diverse scuole di pensiero. Questo paradigma economico si fonda sull'idea di ridurre al minimo gli sprechi e valorizzare le risorse attraverso pratiche come il riutilizzo, il riciclo e la rigenerazione, ponendosi in aperta contrapposizione al modello economico lineare tradizionale, che si basa su un sistema di produzione, consumo e smaltimento. Tra i principali contributi teorici, molti studiosi riconoscono agli economisti Pearce e Turner (1990) il merito di aver formalizzato il concetto di economia circolare, sia in termini teorici sia operativi, nel loro approfondito lavoro che esplora l'integrazione delle dinamiche economiche con i limiti ambientali^[50]. Il contributo di Pearce e Turner si basa tuttavia su una precedente eredità intellettuale risalente agli anni Sessanta, quando Kenneth Boulding, nel suo saggio *The Economics of the Coming Spaceship Earth*, propose una visione sistemica dell'economia, concepita come un ciclo chiuso, analogo agli ecosistemi naturali^[51]. Boulding sottolineò l'urgenza di superare l'approccio della cosiddetta "economia cowboy", basata sull'illusione di risorse illimitate, per abbracciare una prospettiva più sostenibile, definita "navetta spaziale Terra", che tenesse conto della finitezza delle risorse naturali^[52]. Le riflessioni di Pearce e Turner (1990), così come quelle di Boulding (1966), hanno ispirato una vasta letteratura successiva. Andersen (2007), in particolare, ha evidenziato come il modello dell'economia circolare possa fungere da ponte tra le dinamiche economiche e quelle ecologiche^[53]. L'autore ha messo in risalto il ruolo critico dell'ambiente nel sistema economico e ha sottolineato l'importanza di integrare nei processi decisionali i costi ambientali, spesso trascurati.

[50] Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1990). *Economics of Natural Resources and the Environment*, pp. 35-67. London: Harvester Wheatsheaf.

[51] Boulding, K. E. (1966). *The Economics of the Coming Spaceship Earth*, pp. 3-14. In H. Jarrett (Ed.), *Environmental Quality in a Growing Economy*. Baltimore: Johns Hopkins University Press. L'autore introduce la distinzione tra l'"economia cowboy" e la "navetta spaziale Terra". La prima rappresenta un sistema economico privo di limiti apparenti, in cui le risorse sono considerate infinite e le conseguenze ambientali ignorate. La seconda, invece, enfatizza la limitatezza delle risorse terrestri, spingendo verso un approccio sostenibile e ciclico, analogo al funzionamento di un ecosistema chiuso.

[52] Ivi, p. 7.

[53] Andersen, M. S. (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular economy (pp. 133-135). *Sustainability Science*, 2(2), pp. 133-140

Ghisellini, Cialani e Ulgiati (2016) ampliano la prospettiva sul tema della sostenibilità, sottolineando come l'economia circolare rappresenti una strategia fondamentale per favorire la transizione verso modelli economici più sostenibili.

Gli autori analizzano approfonditamente il potenziale di questo paradigma, evidenziando come esso possa trasformare le modalità di gestione delle risorse attraverso un passaggio cruciale: dalla tradizionale economia lineare, caratterizzata da una sequenza di produzione, consumo e smaltimento, a un'economia circolare, in cui il riutilizzo e la rigenerazione delle risorse diventano principi guida. Tale trasformazione, secondo la loro analisi, non si limita a generare vantaggi ambientali, ma comporta significative ricadute anche in ambito sociale ed economico, promuovendo una gestione più efficiente e responsabile delle risorse stesse^[54].

Parallelamente, Murray, Skene e Haynes (2017) si focalizzano sull'aspetto dell'innovazione sostenibile, sottolineando come il modello dell'economia circolare possa rappresentare un potente stimolo per l'elaborazione di nuovi processi produttivi e modelli di business. Il loro studio mette in evidenza il potenziale trasformativo di questo approccio, che non solo contribuisce alla riduzione degli impatti ambientali negativi, ma crea anche nuove opportunità economiche. In tale ottica, il paradigma dell'economia circolare emerge come un motore di cambiamento tanto nelle pratiche industriali quanto nei comportamenti dei consumatori, promuovendo soluzioni innovative e sostenibili^[55]. Infine, Su, Heshmati, Geng e Yu (2013) offrono una prospettiva internazionale, evidenziando come l'economia circolare si riveli una strategia indispensabile sia per i paesi emergenti sia per quelli industrializzati. Gli autori sottolineano che questo modello costituisce uno strumento cruciale per affrontare le sfide comuni legate alla sostenibilità globale, adattandosi al contempo alle diverse esigenze economiche e ambientali delle varie realtà nazionali. Nei paesi industrializzati, il paradigma circolare risulta particolarmente utile per aumentare l'efficienza nell'uso delle risorse e per ridurre la produzione di rifiuti; nei contesti emergenti,

[54] Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A Review on Circular Economy: The Expected Transition to a Balanced Interplay of Environmental and Economic Systems. *Journal of Cleaner Production*, pp. 11-14.

[55] Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The Circular Economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context, pp. 35-39.

invece, offre una base per uno sviluppo sostenibile che consenta di evitare gli errori associati al tradizionale modello lineare.^[56] Tuttavia, nonostante i numerosi piani ambiziosi promossi, ad esempio, a livello europeo, la piena realizzazione di un'economia circolare appare ancora in una fase iniziale, segnata da sfide rilevanti sia sul piano operativo sia su quello culturale^[57]. Questo progresso limitato, che caratterizza l'attuazione dell'economia circolare, è spesso attribuibile a barriere di natura tecnica, in quanto i prodotti non sono progettati in modo adeguato per garantire caratteristiche come la longevità, la manutenzione, lo smontaggio e il riutilizzo.^[58] Tuttavia, altri studi evidenziano come le difficoltà principali non siano strettamente tecniche, bensì legate a fattori culturali, tra cui la scarsa collaborazione tra gli attori delle catene del valore, l'inerzia delle culture aziendali e la limitata consapevolezza e interesse da parte dei consumatori^[59]. Un ulteriore ostacolo significativo all'implementazione dell'economia circolare deriva dal fatto che il concetto stesso è interpretato in modi differenti da vari attori, generando discordanze e dibattiti di natura concettuale e terminologica^[60]. Questa ambivalenza apre la strada a rischi di applicazioni errate, utilizzi impropri e fenomeni di greenwashing, sollevando interrogativi riguardo alla direzione che l'economia circolare prenderà in futuro^[61]. Ci si chiede se essa sarà in grado di mantenere la promessa di affrontare in modo sistemico le questioni ambientali e di trasformare il nostro approccio alle risorse e ai loro cicli di vita, o se si limiterà a determinare cambiamenti incrementali, diventando al massimo un'altra "parola d'ordine della sostenibilità"^[62].

[56] Su, B., Heshmati, A., Geng, Y., & Yu, X. (2013). A review of the circular economy in China: Moving from rhetoric to implementation, pp. 59-62.

[57] McDowall, W., et al. (2017). An assessment of European policies for the Circular Economy, pp. 71-74.

[58] Hollander, M., Bakker, C., & Hultink, E. (2017). Product Design in a Circular Economy: Development of a Typology of Key Concepts and Terms. *Journal of Industrial Ecology*, pp. 214-216.

[59] Blomsma, F., & Brennan, G. (2017). The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. *Journal of Industrial Ecology*, pp. 45-48.

[60] Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 126-129.

[61] Sauvé, S., Bernard, S., & Sloan, P. (2016). Environmental Sciences, Sustainable Development and Circular Economy: Alternative Concepts for Trans-disciplinary Research. *Environmental Development*, pp. 89-92.

[62] Hollander, M., Bakker, C., & Hultink, E. (2017), Op.cit, pp. 214-216.

Questi interrogativi si estendono anche al ruolo cruciale che il design potrebbe svolgere nella transizione verso la sostenibilità. Resta aperto il dibattito su come i designer possano contribuire all'attuazione olistica dei principi dell'economia circolare, affrontando le barriere attualmente esistenti e promuovendo soluzioni innovative^[63]. Nonostante le ambiguità che circondano l'economia circolare, vi è un consenso diffuso sia a livello accademico che politico sull'importanza del design come strumento fondamentale per favorire questa transizione^[64]. Il design, inteso come il processo mediante il quale vengono creati ambienti materiali, spaziali, visivi ed esperienziali, esercita un'influenza diretta sull'impatto ambientale degli artefatti^[65]. Le origini dell'economia circolare affondano le radici nell'economia ecologica e ambientale e nell'ecologia industriale, come evidenziato da un'ampia revisione della letteratura condotta da Ghisellini et al. (2016) e Murray et al. (2017)^[66]. Queste discipline hanno contribuito a sviluppare una prospettiva sistemica in cui economia ed ecologia non sono più considerate ambiti separati, ma interconnessi in un modello volto a garantire l'equilibrio tra utilizzo delle risorse, produzione economica e sostenibilità ambientale. Questo approccio ha portato all'evoluzione del concetto di economia sostenibile, strettamente legato al principio dello sviluppo sostenibile. Secondo Silvestri (2015), l'economia sostenibile è definita come "quella economia che fornisce la massima quantità di benessere generale con il minor uso di risorse e danni ambientali"^[67]. Inoltre, affinché sia realmente sostenibile, questa economia deve rispettare un limite fondamentale: la domanda complessiva di risorse naturali – rappresentata dal concetto di impronta ecologica – non deve superare la capacità della natura di rigenerare tali risorse, definita come bio-capacità^[68]. In termini pratici, affinché un'economia possa essere davvero sostenibile, è necessario che rispetti un principio fondamentale: la domanda complessiva di

[63] De los Rios, I. C., Charnley, F., Sundin, E., Lindahl, M., & Ijomah, W. (2017). Design for Circular Economy: Understanding the Challenges in Implementation, pp. 59-62.

[64] Commissione Europea (2020). European Circular Economy Action Plan, pp. 20-24.

[65] Ghisellini, P., et al. (2016), Op.cit., pp. 27-30.

[66] Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017), Op.cit., pp. 11-14; pp. 35-37.

[67] Silvestri, F. (2015). Sustainable Economy and Ecological Footprint: A Critical Perspective. Environmental Economics Journal, p. 22.

[68] Ivi pp. 24-26.

risorse naturali, espressa attraverso il concetto di impronta ecologica, non deve eccedere la capacità della natura di rigenerarle, concetto noto come bio-capacità^[69].

Questo modello teorico fornisce una chiave di lettura chiara per comprendere il rapporto tra economia ed ecologia, mettendo in evidenza come l'economia circolare non rappresenti solo un'alternativa all'economia lineare tradizionale, ma si configuri come una condizione indispensabile per garantire la sopravvivenza del pianeta. Integrare i concetti di impronta ecologica e bio-capacità all'interno del paradigma dell'economia circolare non significa soltanto perseguire obiettivi di efficienza e innovazione, ma implica anche il rispetto dei limiti ambientali entro cui deve muoversi l'attività economica affinché sia sostenibile nel lungo periodo.

Questo legame tra principi teorici e applicazioni pratiche rende l'economia circolare una componente centrale nella transizione verso modelli di sviluppo compatibili sia con le esigenze ambientali sia con quelle della società. Un contributo significativo all'evoluzione del concetto di economia circolare deriva da quattro approcci chiave individuati dalla Ellen MacArthur Foundation (2012): la performance economy, il cradle to cradle, la biomimetica e la blue economy. Questi approcci hanno arricchito il concetto, rendendolo più strutturato e applicabile. La performance economy, sviluppata da Walter Stahel, ha rivoluzionato il tradizionale modello di consumo concentrandosi non sul possesso dei beni, ma sulla loro funzionalità. Questo approccio incentiva la longevità dei prodotti attraverso attività come manutenzione, ricondizionamento e riutilizzo, riducendo così la necessità di nuove risorse e limitando la produzione di rifiuti. Inoltre, promuovendo servizi piuttosto che beni, le imprese possono mantenere il controllo sui prodotti, favorendo una gestione efficiente e sostenibile degli stessi^[70]. Il modello cradle to cradle, elaborato da Michael Braungart e William McDonough, propone un paradigma progettuale ispirato ai cicli naturali. In questo modello, ogni prodotto è concepito per inserirsi in un flusso continuo di riutilizzo, dividendo i materiali in cicli biologici, destinati

[69] L'impronta ecologica misura il consumo umano di risorse naturali rispetto alla capacità della Terra di rigenerarle, mentre la bio-capacità rappresenta il limite massimo di rigenerazione che gli ecosistemi naturali possono sostenere in un determinato periodo (Global Footprint Network, 2022).

[70] Stahel, W. (2010). The Performance Economy. Palgrave Macmillan, pp. 85-87.

alla decomposizione naturale, e cicli tecnici, riciclabili senza perdita di qualità. Tale approccio contribuisce a chiudere i cicli produttivi, riducendo drasticamente la generazione di rifiuti e l'impatto ambientale^[71]. La biomimetica, invece, trae ispirazione dai processi biologici per progettare soluzioni sostenibili. Gli ecosistemi naturali, che operano con estrema efficienza riutilizzando risorse e minimizzando gli scarti, offrono un modello ideale per sviluppare strategie industriali resilienti. Seguendo i meccanismi della natura, è possibile ottimizzare l'uso delle risorse e ridurre gli impatti ambientali^[72]. Questi modelli, ciascuno con le proprie specificità, contribuiscono a delineare un quadro integrato per l'applicazione dell'economia circolare, un pilastro essenziale per affrontare le sfide globali legate alla sostenibilità. Infine, Gunter Pauli (2010), amplia il concetto di economia circolare valorizzando risorse sottoutilizzate e promuovendo l'integrazione tra diversi settori produttivi proponendo il concetto di "blue economy". L'autore definisce la "blue economy" come un modello economico che si basa sull'uso efficiente delle risorse locali, trasformando scarti e problemi ambientali in opportunità economiche attraverso soluzioni innovative e sostenibili. Questo approccio, che si ispira al funzionamento degli ecosistemi naturali, nei quali nulla va sprecato, e promuove l'integrazione tra settori produttivi diversi per generare valore economico con un impatto ambientale minimo, viene ulteriormente sviluppato da Pauli, il quale enfatizza l'importanza di adottare strategie a basso costo e altamente adattabili ai contesti locali, ponendo particolare attenzione alle necessità delle comunità e alla creazione di posti di lavoro. Il principio cardine è creare circoli virtuosi che incentivino la sostenibilità senza compromettere le risorse naturali, puntando su innovazioni tecnologiche ispirate alla natura e alla biomimetica^[73]. L'economia circolare, pur essendo un concetto centrale nel dibattito contemporaneo sulla sostenibilità, non dispone di una definizione comune e condivisa. Kirchherr, Reike e Hekkert (2017), attraverso un'analisi sistematica di 114 definizioni proposte in letteratura, hanno evidenziato la mancanza di un consenso univoco su cosa rappresenti realmente l'economia circolare.

[71] Braungart, M., & McDonough, W. (2002), Op.cit., pp. 42-44.

[72] Benyus, J. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. HarperCollins, pp. 98-102.

[73] Pauli, G. (2010). *The Blue Economy: 10 Years, 100 Innovations, 100 Million Jobs*. Paradigm Publications, pp. 25-29.

Questa pluralità di interpretazioni riflette non solo la complessità del concetto stesso, ma anche le diverse prospettive disciplinari e culturali da cui viene affrontato.

Secondo i ricercatori, alcune definizioni tendono a privilegiare gli aspetti economici, concentrandosi sull'efficienza nell'uso delle risorse e sulla riduzione dei costi attraverso pratiche come il riciclo e il riutilizzo^[74]. Altre, invece, enfatizzano la dimensione ecologica, ponendo l'accento sulla rigenerazione degli ecosistemi e sulla necessità di rispettare i limiti planetari^[75]. Esistono anche definizioni che includono una visione più ampia, integrando aspetti sociali, etici e politici, come l'inclusione di modelli di business equi e il coinvolgimento delle comunità locali^[76]. Questa diversità interpretativa, se da un lato arricchisce il dibattito e offre una prospettiva multidimensionale, dall'altro crea ambiguità e difficoltà nell'applicazione pratica del concetto. La mancanza di una definizione condivisa rischia di compromettere l'efficacia delle politiche e delle strategie ispirate all'economia circolare, poiché attori diversi potrebbero adottare approcci discordanti o non compatibili tra loro.

La definizione di economia circolare proposta dalla Ellen MacArthur Foundation è spesso considerata una delle più autorevoli e influenti nel dibattito contemporaneo. Essa descrive l'economia circolare come "un sistema industriale che è riparativo o rigenerativo nelle intenzioni e nella progettazione. Sostituisce il concetto di fine vita con quello di ripristino, si orienta verso l'uso di energie rinnovabili, elimina l'uso di sostanze chimiche tossiche, che impediscono il riutilizzo, e punta all'eliminazione dei rifiuti attraverso una progettazione di qualità superiore di materiali, prodotti, sistemi e, all'interno di questi, modelli di business"^[77].

Questa definizione si concentra sulla creazione di un sistema in cui il valore dei materiali e dei prodotti viene preservato il più a lungo possibile, attraverso un approccio che riduce la produzione di rifiuti e promuove il riutilizzo e il riciclo delle risorse^[78].

[74] Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 223-224.

[75] Ivi, p. 225.

[76] Ivi, pp. 226-227.

[77] Ellen MacArthur Foundation. (2012). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*, p. 14.

[78] Ivi, pp. 14-15.

Tuttavia, pur evidenziando aspetti fondamentali come la progettazione rigenerativa e l'adozione di energie rinnovabili, questa visione presenta alcune lacune significative. In particolare, non pone sufficiente enfasi sulla necessità di ridurre i livelli complessivi di consumo, un elemento essenziale per affrontare i limiti ambientali globali. Inoltre, non integra esplicitamente gli aspetti sociali della sostenibilità, come l'inclusione delle comunità e la promozione di equità sociale, che rappresentano componenti cruciali per un approccio realmente sostenibile^[79].

Questa omissione è rilevante, poiché la sostenibilità non si limita alla sola dimensione ambientale, ma include anche aspetti sociali ed economici, indispensabili per garantire un approccio realmente sistemico. In questa direzione, Geissdoerfer et al. (2017) propongono una definizione più articolata e operativa dell'economia circolare, descrivendola come "un sistema rigenerativo in cui l'input di risorse e i rifiuti, le emissioni e le perdite di energia sono ridotti al minimo rallentando, chiudendo e restringendo i loop di materiali ed energia". Secondo questa visione, "il rallentamento dei cicli delle risorse può essere raggiunto attraverso una progettazione mirata a prolungare la vita utile dei prodotti, promuovendo interventi quali la manutenzione, la riparazione e la rigenerazione"^[80].

Questo approccio permette di estendere l'utilizzo dei beni, riducendo così il consumo di risorse. Contestualmente, gli autori sottolineano l'importanza di chiudere i cicli delle risorse, integrando i materiali post-utilizzo nei processi produttivi mediante pratiche di riciclo. Tale integrazione contribuisce non solo a ridurre l'impatto ambientale, ma anche a minimizzare la dispersione delle risorse. Infine, la definizione mette in evidenza la necessità di restringere i cicli delle risorse, obiettivo che può essere raggiunto diminuendo la quantità di materiali richiesti per ogni prodotto, grazie a un design più efficiente e innovativo^[81].

Le strategie per la transizione verso un'economia circolare sono ulteriormente approfondite da Bocken et al. (2016), i quali attribuiscono al design un ruolo centrale nella fase iniziale del ciclo di vita dei prodotti. Secondo questi autori, una progettazione accurata

[79] Ivi, pp. 16-17.

[80] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm?. *Journal of Cleaner Production*, pp. 766-767.

[81] Ivi, pp. 768-769.

non solo può affrontare il problema dei rifiuti, ma addirittura prevenirlo, favorendo così una significativa riduzione del consumo complessivo^[82]. Sebbene questo tema rappresenti una delle sfide più ambiziose per realizzare una reale economia circolare, esso risulta tra i meno sviluppati nel quadro delineato dalla Ellen MacArthur Foundation. Confrontando le diverse prospettive, emerge come la visione proposta da Geissdoerfer et al. sia più sistemica e olistica, superando la mera circolarità materiale.

Essa si collega implicitamente a obiettivi di più ampio respiro, quali l'aumento della produttività energetica, la riduzione dei rifiuti e una gestione globale e integrata delle risorse. Inoltre, l'introduzione di strategie operative come il rallentamento, la chiusura e il restringimento dei cicli produttivi conferisce maggiore specificità e concretezza a questa definizione, rendendola più facilmente applicabile nel contesto aziendale^[83].

Al contrario, l'approccio delineato dalla Ellen MacArthur Foundation, pur fornendo indicazioni preziose sulle azioni da intraprendere, rimane prevalentemente a livello concettuale, senza affrontare in maniera diretta la dimensione pratica. Parallelamente, Alan Murray, Keith Skene e Kathryn Haynes propongono un'altra definizione di economia circolare, sottolineando l'importanza di integrare il benessere umano all'interno del concetto.

Secondo questi autori, un modello economico in grado di guidare la pianificazione, l'approvvigionamento, la produzione e il riciclaggio di prodotti e materiali dovrebbe mirare a massimizzare il funzionamento degli ecosistemi e il benessere umano. Questa definizione non solo fonde la sostenibilità ambientale con il benessere umano, ma amplia la concezione di economia circolare oltre la semplice gestione delle risorse, proponendo una visione che combina risultati economici con un'integrazione ecologica e sociale^[84].

Mentre questa prospettiva arricchisce il concetto di economia circolare con aspetti cruciali come la giustizia sociale, la diversità e le considerazioni etiche, altre visioni tendono a trascurare tali dimensioni, limitandosi a un'analisi più tecnica e circoscritta.

[82] Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, p. 312.

[83] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017), Op.cit., pp. 766-769.

[84] Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017), Op.cit., pp. 369-370.

Nel contesto del progetto “KATCH_e”, Rocha, Camocho, Sampaio e Alexandre (2020) descrivono l’economia circolare come un sistema economico progettato per essere sia riparativo che rigenerativo, capace di preservare il funzionamento degli ecosistemi e il benessere umano, con l’obiettivo di promuovere uno sviluppo sostenibile. Questo approccio si distingue per la capacità di mantenere il valore economico di materiali, attrezzature e prodotti il più a lungo possibile, operando in cicli alimentati da fonti energetiche rinnovabili e guidati dai principi di chiusura, rallentamento e restringimento del flusso di materiali ed energia nei sistemi produttivi. Tali dinamiche sono rese possibili grazie all’impiego di ecodesign, eco-innovazione e nuovi modelli aziendali orientati verso consumi responsabili^[85]. Un elemento cruciale di questa visione è la stretta connessione tra sostenibilità ambientale e benessere individuale, che sottolinea l’importanza dei cicli chiusi e delle risorse rinnovabili. Il design e l’innovazione assumono così un ruolo strategico, costituendo strumenti fondamentali per una responsabilità aziendale che vada oltre la gestione delle risorse per includere tutti i cicli di vita dei beni, dalla produzione al consumo, fino alla loro rigenerazione. Questo approccio non mira soltanto alla massimizzazione dell’utilità dei materiali, ma propone una trasformazione dei modelli aziendali e di consumo, accompagnata da un’etica della sostenibilità capace di abbracciare sia le pratiche industriali che le strutture sociali^[86]. La transizione verso un’economia circolare si configura come una risposta necessaria alle crisi ambientali, economiche e sociali del nostro tempo. Il modello economico lineare tradizionale, basato su “prendi-produci-smaltisci”, ha dimostrato la propria insostenibilità, generando l’esaurimento delle risorse naturali, accentuando le disuguaglianze globali e aggravando gli impatti ambientali. È in questo scenario che Lucia Pietroni, insieme ai suoi coautori, sottolinea la necessità di trasformare il modello economico tradizionale, che segue una struttura lineare basata sull’estrazione, produzione, consumo e smaltimento, verso un modello circolare. Questo cambiamento mira a ridurre gli impatti ambientali, economici e sociali negativi, favorendo il riutilizzo e il riciclo delle risorse in un ciclo

[85] Rocha, C., Camocho, S., Sampaio, A., & Alexandre, A. (2020). Economia circolare e sostenibilità, pp. 34-35.

[86] Ivi, pp. 36-37.

continuo, e garantendo un approccio più sostenibile e inclusivo per affrontare la crisi ambientale e le disuguaglianze globali. La transizione richiede nuovi paradigmi nei sistemi produttivi, nei modelli di consumo e nella progettazione industriale per mantenere le risorse in uso il più a lungo possibile e minimizzare gli sprechi^[87]. Il passaggio del modello economico da lineare a circolare costituisce un cambiamento sistemico di straordinaria complessità, poiché implica una revisione radicale non soltanto dei metodi di produzione e consumo, ma anche del concetto stesso di benessere, sia individuale che sociale. Il concetto di benessere, infatti, non può più essere concepito esclusivamente in termini di possesso di beni materiali, ma deve evolversi verso una prospettiva più ampia, capace di integrare criteri di sostenibilità e responsabilità condivisa, richiedendo, nell’ambito della transizione verso un’economia circolare, una rivoluzione che investa simultaneamente gli aspetti socio-culturali e tecnico-produttivi. Non è infatti sufficiente migliorare l’efficienza dei processi di riciclaggio, limitandosi a recuperare materiali dai prodotti a fine vita per reinserirli nei cicli produttivi, una pratica che ormai rappresenta uno standard consolidato. È necessario, invece, riorganizzare il modello economico ispirandosi al funzionamento dei sistemi biologici, intesi come ecosistemi capaci di operare senza generare rifiuti. L’idea di assimilare i processi economici ai modelli biologici, replicando nei cicli tecnici i principi che regolano i cicli naturali, non è nuova; tuttavia, essa si afferma sempre più come una strategia essenziale per promuovere uno sviluppo sostenibile, in particolare nelle società industriali mature. Questo approccio non si limita a migliorare l’efficienza, ma si propone di superare tali logiche per abbracciare un paradigma rigenerativo e resiliente, capace di affrontare le sfide ambientali e sociali con una visione a lungo termine^[88]. Il concetto di un’economia ispirata alla natura trova una delle sue prime e più influenti formulazioni in “Capitalismo Naturale” di Hawken, Lovins e Lovins

[87] Pietroni, L., Mascitti, J., Paciotti, D., & Di Stefano, A. (2024). New Scenarios for Sustainable Design Toward an Integrated Approach Between Bio-Inspired Design, Biomimetic Materials, Generative Parametric Modelling, Additive Manufacturing. In: Gambardella C. (a cura di), For Nature/With Nature: New Sustainable Design Scenarios. Springer Series in Design and Innovation, vol. 38, pp. 618-624.

[88] Pietroni, L., Mascitti, J., Paciotti, D., & Di Stefano, A. (2024), Op.cit., pp. 620-628.

(1999)^[89], dove gli autori propongono un modello economico capace di conciliare profitto e sostenibilità ambientale. Questo approccio, fondato sull'efficienza delle risorse e sull'imitazione dei cicli naturali, mira a trasformare i processi produttivi eliminando gli sprechi e valorizzando ogni sottoprodotto come potenziale risorsa. Tra i principi cardine vi è l'incremento della produttività delle risorse, ottenuto attraverso tecnologie innovative e modelli produttivi che rispettano i limiti ecologici del pianeta. Gli autori enfatizzano inoltre la necessità di una transizione da un'economia centrata sul possesso dei beni a una basata sull'accesso ai servizi, sottolineando l'importanza di reinvestire nel capitale naturale, inteso come il patrimonio ecologico da ripristinare e preservare^[90].

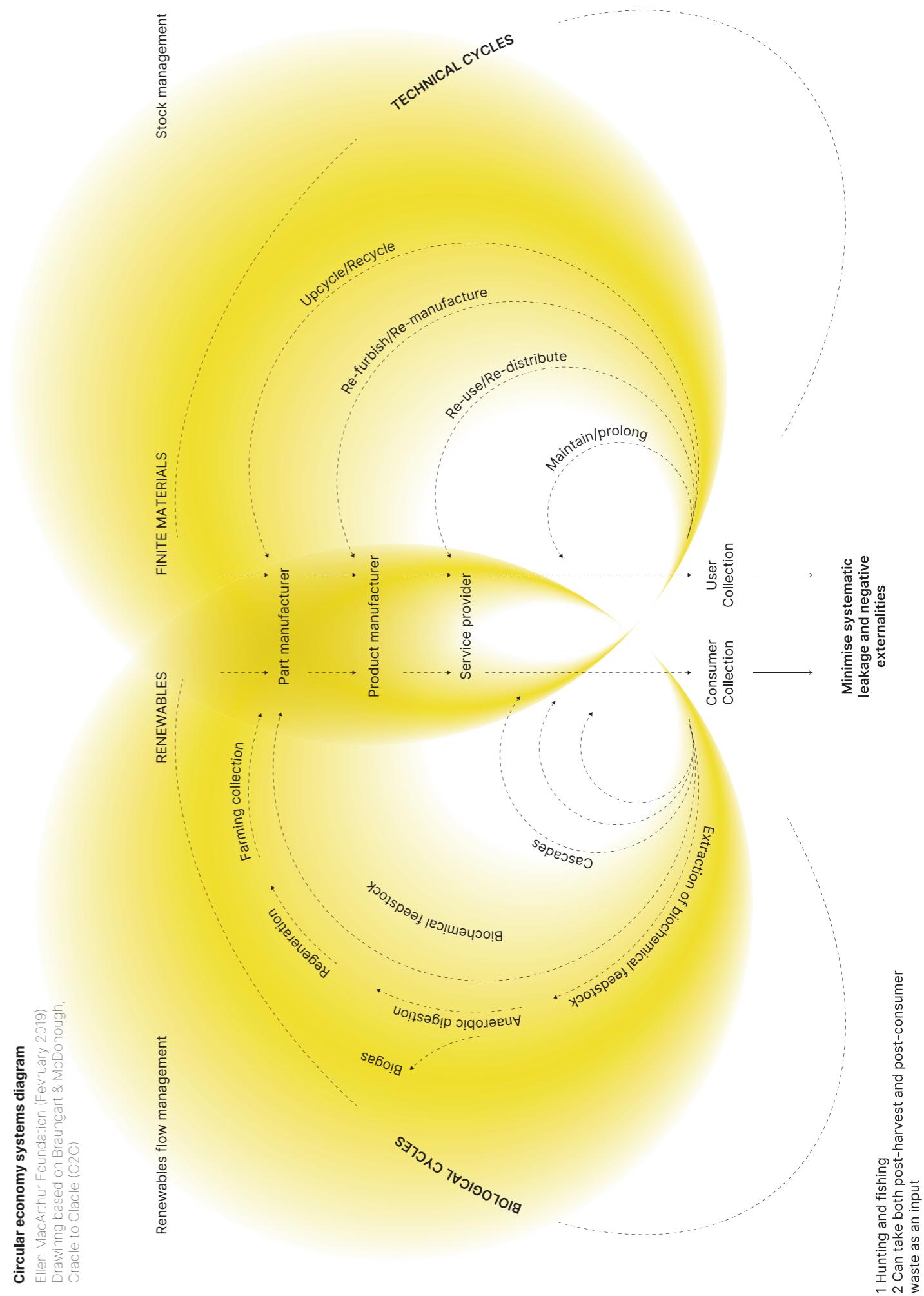
Da qui evolve il concetto di "Economia circolare", nell'accezione attuale, ovvero un sistema con capacità di auto-rigenerarsi, in cui tutte le attività, a partire dall'estrazione e dalla produzione, sono organizzate in modo che i rifiuti diventino nuove risorse, un modello che disaccoppia lo sviluppo socio-economico e l'incremento del benessere dal consumo di risorse. Per trasformare l'attuale modello economico lineare, che si basa su "prendi-produci-smaltisci", in un sistema circolare, bisogna che ogni prodotto non diventi rifiuto ma si trasformi in nuova risorsa, sia per i cicli tecnici che per i cicli biologici, e questo dipende ovviamente da come è stato concepito e realizzato. Per questo, nella stessa definizione di economia circolare, la fase di design assume un ruolo centrale e strategico per attivare il cambiamento radicale da apportare al modello economico lineare e per ridisegnare anche le logiche industriali sulla base di un modello biologico^[91]. A supporto della transizione verso un modello economico circolare, la Ellen MacArthur Foundation ha introdotto il concetto di Butterfly Diagram (Fig. 4), una rappresentazione visiva che riassume i principi fondamentali di questo paradigma. Il diagramma evidenzia come i materiali possano essere reintegrati nei processi produttivi o naturali attraverso due cicli principali. Da un lato, il ciclo biologico riguarda i materiali organici e biodegradabili, che possono essere reintrodotti nella biosfera mediante processi come il compostaggio e la rigenerazione.

[89] Hawken, P., Lovins, A., & Lovins, H. (1999). *Natural Capitalism: Creating the Next Industrial Revolution*, pp. 10–25.

[90] Ivi., pp. 30–45.

[91] Pietroni, L., Mascitti, J., Paciotti, D., & Di Stefano, A. (2024), *Op.cit.*, pp. 620-628.

Fig. 4: The Butterfly Diagram for Circular Economy by Ellen MacArthur Foundation.



Dall'altro, il ciclo tecnico si concentra su materiali non biodegradabili, quali metalli e polimeri, che possono essere riutilizzati, riparati, rigenerati o riciclati senza perdita di valore. Questa visione sistemica e olistica mette in evidenza l'importanza di mantenere separati i flussi biologici e tecnici per ottimizzare l'efficienza e ridurre l'impatto ambientale. Inoltre, il Butterfly Diagram sottolinea il ruolo cruciale delle strategie progettuali nella promozione della circolarità, includendo pratiche come il riuso, la manutenzione, la riparazione e la rigenerazione. Grazie a questo approccio, il concetto di rifiuto viene progressivamente eliminato, favorendo una gestione più sostenibile delle risorse e una prospettiva di sviluppo rigenerativo. Oggi è ampiamente riconosciuto che "l'impatto ambientale dei prodotti, dei servizi e delle infrastrutture che ci circondano si determina, fino all'ottanta per cento, in fase di progetto", come già evidenziava J. Thackara nel 2006 nel suo libro *In The Bubble*^[92]. Questo avviene perché è proprio durante la fase di progettazione che si definiscono gli elementi fondamentali del ciclo di vita di un prodotto o di un servizio, determinando non solo il grado di circolarità del prodotto stesso, ma anche quello del modello di business e delle filiere produttive a esso collegate. Secondo diversi autori, tra cui Ellen MacArthur Foundation (2013)^[93], Lacy e Rutqvist (2015)^[94] e Bompan e Brambilla (2016)^[95], per realizzare in modo efficace ed efficiente i principi dell'Economia Circolare, è necessario ripensare profondamente i processi tradizionali di progettazione, produzione, consumo e dismissione. L'obiettivo principale consiste nel ridurre drasticamente sia l'uso di materie prime sia la produzione di rifiuti, massimizzando al contempo la durata e l'intensità d'uso dei prodotti. Questo può essere ottenuto, tra le altre strategie, attraverso lo sviluppo di servizi che promuovano la condivisione e l'utilizzo di prodotti durevoli e aggiornabili. L'Economia Circolare, descritta da Lacy e Rutqvist (2015) come "un nuovo modo di gestire la creazione di valore, in linea con le esigenze di sostenibilità e tramite la rottura del tradizionale concetto di economia lineare caratterizzata da logiche di approvvigionamento-produzione-consumo-scarto"^[96],

[92] Thackara, J. (2006). *In The Bubble: Designing in a Complex World*, p. 45.

[93] Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the Circular Economy*.

[94] Lacy, P., & Rutqvist, J. (2015). *Waste to Wealth*, p. 22.

[95] Bompan, E., & Brambilla, M. (2016). *Che cos'è l'economia circolare*, p. 10.

[96] Lacy, P., & Rutqvist, J. (2015), *Op.cit.*, p. 30.

punta a un riutilizzo virtuoso di tutte le risorse. Queste ultime, una volta reintegrate nel ciclo produzione-consumo, generano impatti positivi non solo dal punto di vista ambientale, ma anche sociale ed economico. Tali benefici derivano dall'adozione di pratiche che spaziano dal recupero, riuso e riciclo, alla condivisione e collaborazione, con l'obiettivo di ridurre il consumo di materie prime lungo l'intera catena del valore.

Questo approccio parte dall'innovazione in fase di progettazione e concept design, fino ad arrivare alla logistica inversa e ai processi di gestione del fine vita dei prodotti^[97]. In questo contesto, "riciclare i materiali" rappresenta solo una delle strategie possibili, e non necessariamente la più significativa. Più rilevanti sono infatti le strategie di "ridurre" e "riusare", che consentono di affrontare le problematiche ambientali in modo più efficace. Il design, in particolare, può offrire un contributo strategico nel migliorare la circolarità dei prodotti, adottando criteri e metodi di progettazione orientati alla sostenibilità ambientale. Tra questi si possono citare il design for material reduction, for disassembling, for durability, for upgrading, for reuse, for refurbishing e, infine, for recycling. Grazie a questi approcci, il design non solo favorisce la trasformazione dei processi produttivi in pratiche di rifabbricazione, ma consente anche di trasformare il consumo in utilizzo e riutilizzo dei prodotti. Inoltre, promuove la loro riparabilità e manutenibilità, o ancora l'uso condiviso attraverso modelli di prodotto-servizio, estendendo così la vita utile dei beni e riducendo significativamente i rifiuti e gli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita^[98].

[97] Charter, M. (2018). *Designing for the Circular Economy*, p. 50.

[98] Ivi, p. 70.

Lo sviluppo sostenibile è definito molto spesso come “sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri”^[99]. Sulla base di questa dichiarazione, sono emersi due modi diversi di affrontare la sostenibilità. Mentre la sostenibilità forte suggerisce che il capitale naturale non può essere sostituito dal capitale umano, la sostenibilità debole sostiene la possibilità di sostituire il capitale naturale con quello umano^[100]. Tuttavia, entrambi gli approcci sollevano l’esistenza di limiti ecologici ultimi, come espresso anche nel rapporto della Commissione Brundtland: “I limiti ultimi ci sono [...] Come minimo, lo sviluppo sostenibile non deve mettere in pericolo i sistemi naturali che sostengono la vita sulla Terra: l’atmosfera, le acque, i suoli e gli esseri viventi”^[101]. In effetti, la maggior parte degli studiosi accetta la stretta relazione che esiste tra i due concetti^[102]. Come visto nel paragrafo precedente, in letteratura esiste una vasta gamma di interpretazioni concettuali dell’economia circolare e della sostenibilità ambientale^[103]. In effetti, il posizionamento dell’economia circolare in relazione al concetto più consolidato di sostenibilità è diventato un tema centrale di dibattito. Due posizioni chiaramente diverse sono state identificate da Sauvé et al. (2016). Da un lato, alcuni esperti “percepiscono lo sviluppo sostenibile come un insieme di iniziative che sono state implementate all’interno di un pensiero lineare”, mentre l’economia circolare “offre una soluzione laddove lo sviluppo sostenibile [...] è percepito come un fallimento”. Dall’altro, la maggior parte degli autori ha presentato lo sviluppo sostenibile e l’economia circolare come discipline coerenti e persino interdipendenti, vale a dire che “l’economia circolare diventa uno strumento per lo sviluppo sostenibile”. Gli autori contrappongono l’economia circolare alle scienze ambientali e allo sviluppo sostenibile, notando che l’economia circolare fornisce un approccio iniziale relativamente chiaro per risolvere i problemi

[99] WCED (1987). *Our Common Future*, p. 43.

[100] Andersen, M. S. (2007). *An Introductory Note on the Environmental Economics of the Circular Economy*, p. 18.

[101] WCED (1987). *Op.cit.*, p. 45.

[102] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., & Hultink, E. (2017), *Op.cit.*, pp. 762–763.

[103] Connelly, S. (2007). *Mapping Sustainable Development as a Contested Concept*, p. 259; Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017), *Op.cit.*, p. 223.

ambientali^[104]. Anche Geissdoerfer et al. (2017) affrontano la molteplicità delle relazioni, individuando tre gruppi generali di relazioni: una relazione “condizionale” (l’economia circolare è una condizione necessaria per lo sviluppo sostenibile), “benefica” (l’economia circolare beneficia lo sviluppo sostenibile) o di “compromesso” (l’economia circolare ha impatti positivi e negativi sulla sostenibilità)^[105]. Blum et al. (2019) e Schöggel et al. (2020) concordano sull’importanza di esaminare con attenzione gli effetti di rimbalzo nell’ambito dell’economia circolare, sottolineando come tali effetti possano ridurre o persino annullare i benefici ambientali derivanti dalle strategie di circolarità^[106]. In particolare, i due studi mettono in evidenza che, sebbene l’economia circolare miri a ottimizzare l’uso delle risorse attraverso pratiche come il riciclaggio, il riuso e la progettazione sostenibile, queste stesse iniziative possono scatenare dinamiche economiche controproducenti. Schöggel et al. (2020) si focalizzano sugli effetti di rimbalzo tradizionali, spiegando che l’incremento dell’efficienza e la conseguente riduzione dei costi associati alle strategie circolari possono portare a un aumento della produzione complessiva e, di conseguenza, dei consumi^[107]. Questo fenomeno, secondo gli autori, è spesso sottovalutato nelle valutazioni delle iniziative di economia circolare, generando un divario significativo tra i benefici ambientali teorici e i risultati reali. Blum et al. (2019) approfondiscono ulteriormente l’argomento introducendo il concetto di “symbiotic rebound effect”. Questo effetto, specifico dell’economia circolare, non dipende soltanto dall’aumento della domanda ma è influenzato anche dai costi-opportunità. Di conseguenza, il fenomeno può compromettere gli obiettivi di sostenibilità, poiché l’incremento complessivo dell’uso delle risorse tende a superare i benefici iniziali ottenuti attraverso le strategie di circolarità^[108]. Entrambi gli studi convergono sulla necessità di adottare strategie sistemiche per mitigare questi effetti. Schöggel et al. propongono di considerare gli effetti di

[104] Sauvé, S., Bernard, S., & Sloan, P. (2016), *Op.cit.*, pp. 50-54.

[105] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., & Hultink, E. (2017), *Op.cit.*, p. 765.

[106] Blum, N. U., Haupt, M., & Hellweg, S. (2019). *The Symbiotic Rebound Effect in Circular Economy: Analyzing Impacts on Sustainability*, p. 10.

[107] Schöggel, J.-P., Stumpf, L., & Baumgartner, R. J. (2020). *Economic and Environmental Effects of Circular Economy: Assessing the Rebound Effects*, pp. 45–46.

[108] Blum, N. U., Haupt, M., & Hellweg, S. (2019), *Op.cit.*, pp. 12–14.

rimbalzo già nella fase di progettazione delle politiche di economia circolare, integrando valutazioni preventive e strumenti capaci di anticipare tali dinamiche^[109].

Blum et al., invece, suggeriscono di adottare un approccio sistemico che tenga conto non solo dei costi-opportunità, ma anche delle relazioni economiche più complesse. Inoltre, propongono di andare oltre la semplice ottimizzazione economica, promuovendo una riformulazione più ampia dei modelli economici per garantire il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità^[110].

Calisto Friant et al. (2020) propongono una distinzione concettuale tra il discorso dell'economia circolare, che si concentra prevalentemente su una prospettiva tecnica volta a migliorare l'efficienza materiale, legandosi in maniera più ampia allo sviluppo sostenibile, pone l'accento sulla necessità di redistribuire ricchezza, conoscenza, tecnologia e potere all'interno della società^[111]. Sebbene il dibattito accademico sulla relazione tra economia circolare e sostenibilità sia particolarmente acceso, la prospettiva delle aziende che operano in questo ambito risulta, tuttavia, poco approfondita nella letteratura esistente. Gusmerotti et al. (2019) e Mura et al. (2020) analizzano i fattori che facilitano e ostacolano l'implementazione delle pratiche di economia circolare a livello aziendale, evidenziando punti di convergenza e differenze nei rispettivi approcci. Gusmerotti et al. identificano come principali driver il miglioramento dell'efficienza delle risorse, la riduzione dei costi operativi e l'opportunità di accedere a nuovi mercati.

Tuttavia, gli autori sottolineano anche le barriere più rilevanti, tra cui la mancanza di competenze tecniche, la complessità delle filiere e gli elevati costi iniziali necessari per implementare processi circolari. Nonostante ciò, essi considerano l'economia circolare un'opportunità per promuovere modelli aziendali più sostenibili, pur evidenziando che il disallineamento tra obiettivi economici e ambientali rimane un ostacolo significativo^[112]. Mura et al. (2020), invece, approfondiscono ulteriormente i fattori di ostacolo, distin-

[109] Schöggli, J.-P., Stumpf, L., & Baumgartner, R. J. (2020), Op.cit. p. 48.

[110] Blum, N. U., Haupt, M., & Hellweg, S. (2019), Op.cit, pp. 15–16.

[111] Calisto Friant, M., Vermeulen, W. J. V., & Salomone, R. (2020). A Typology of Circular Economy Discourses: Navigating the Diverse Visions of a Contested Paradigm, p. 15

[112] Gusmerotti, N. M., Testa, F., Corsini, F., Pretner, G., & Iraldo, F. (2019). Drivers and approaches to the circular economy in manufacturing firms. *Journal of Cleaner Production*, pp. 706-709.

guendo tra barriere interne, come la resistenza culturale e la mancanza di consapevolezza da parte dei manager, e barriere esterne, quali regolamentazioni poco chiare e incentivi economici insufficienti. Gli autori sottolineano che l'adozione dell'economia circolare richiede un cambiamento culturale profondo, oltre a una maggiore collaborazione tra le imprese e i diversi stakeholder^[113]. Brown et al. (2019) analizzano, infine, le motivazioni che spingono le aziende a collaborare nell'ambito dell'economia circolare, rilevando che tali motivazioni si radicano spesso nei valori normativi della sostenibilità^[114]. Questi principi rappresentano un elemento cruciale per stimolare l'adozione di pratiche circolari e per orientare le imprese verso obiettivi più coerenti con la sostenibilità ambientale e sociale. Ritzén e Sandström (2017) analizzano i principali ostacoli che le aziende manifatturiere incontrano nell'adozione di pratiche di economia circolare, evidenziando sfide economiche, tecniche e operative che limitano il progresso verso modelli produttivi più sostenibili. Un primo ostacolo significativo è rappresentato dagli elevati costi iniziali, necessari per implementare le infrastrutture e le tecnologie richieste per la chiusura dei cicli produttivi. La complessità delle filiere, in particolare in contesti internazionali, rappresenta un'ulteriore barriera, rendendo difficile l'integrazione di processi circolari. Inoltre, i materiali riciclati possono non soddisfare gli standard qualitativi delle materie prime vergini, limitandone l'utilizzo nei processi produttivi.

La progettazione di prodotti concepiti per il riuso, la riparazione o il riciclo rappresenta una sfida significativa, poiché richiede innovazione e un ripensamento completo del ciclo di vita dei prodotti, mentre il disassemblaggio di quelli più complessi, necessario per il recupero dei materiali, risulta spesso costoso e richiede un notevole impegno in termini di tempo. Nonostante una crescente consapevolezza sull'importanza della sostenibilità tra i produttori, Ritzén e Sandström sottolineano che tali barriere richiedono approcci integrati per essere superate.

Formazione specializzata, innovazioni tecnologiche e una maggiore cooperazione lungo la filiera rappresentano alcune delle strategie

[113] Mura, M., Longo, M., & Zanni, S. (2020). Circular Economy in Business Practice: Barriers and Enablers to Sustainable Transition, pp. 21-23.

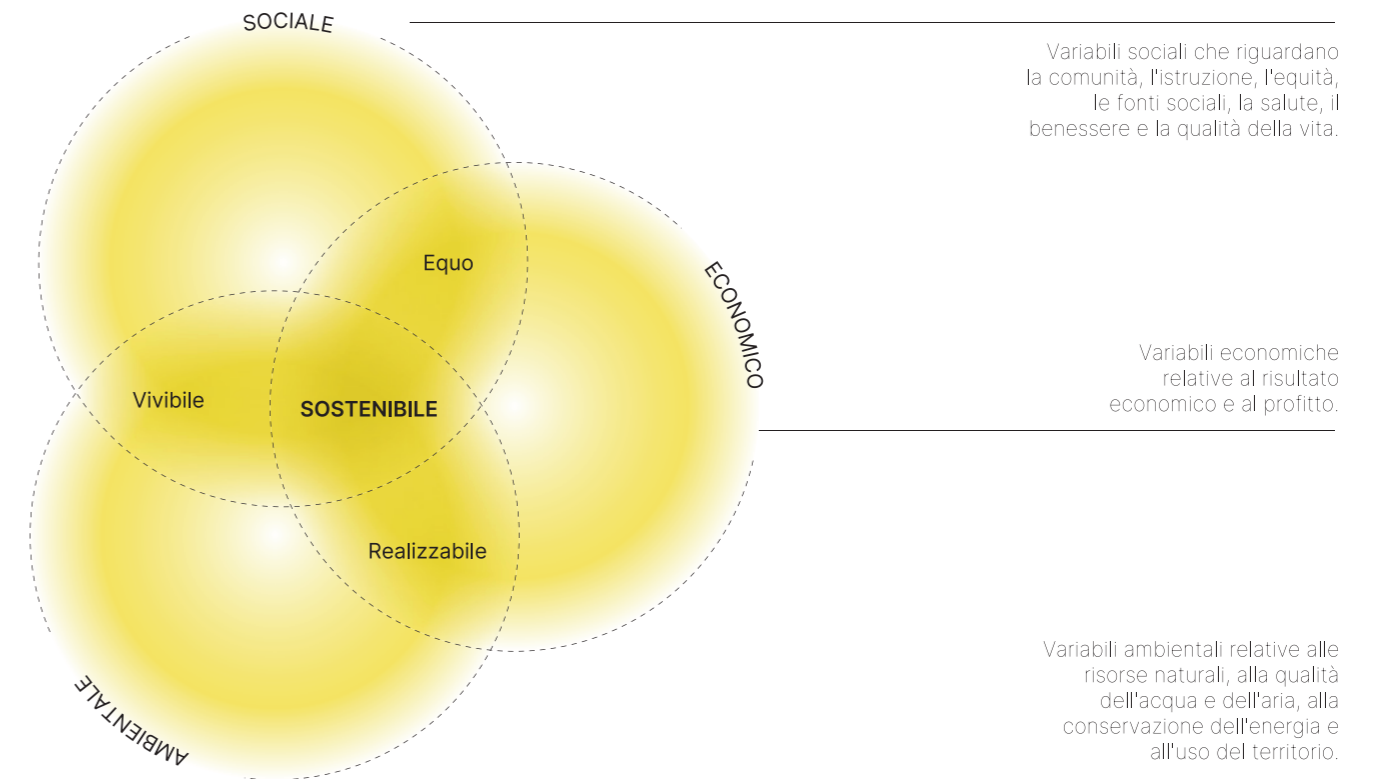
[114] Brown, P., Bocken, N. M. P., & Balkenende, A. R. (2019). Why Do Companies Pursue Circular Economy Strategies? Proactive Normative Motivations and Other Factors, pp. 12–13.

chiave per accelerare la transizione verso un'economia circolare più efficace^[115]. Gli autori Deutz et al. (2015) hanno dimostrato che la comprensione e l'applicazione degli approcci all'ecologia industriale, come la simbiosi industriale, possono variare notevolmente sia all'interno dei singoli Paesi che tra di essi, analizzando al contempo due percorsi distintivi che possono essere applicati in modo complementare: il sistema di prodotto e l'approccio geografico. Il primo si concentra sull'intero ciclo di vita dei prodotti, esaminando i flussi di materiali ed energia dall'estrazione delle risorse alla produzione, al consumo e alla gestione dei rifiuti. Questo approccio consente di individuare opportunità per migliorare l'efficienza delle risorse e ridurre l'impatto ambientale lungo l'intera catena del valore. L'approccio geografico, invece, pone l'accento sulla creazione di ecosistemi industriali locali, promuovendo la collaborazione tra imprese all'interno di una specifica area geografica. Attraverso concetti come la simbiosi industriale, i sottoprodotti generati da un'industria possono essere utilizzati come risorse per altre attività produttive, contribuendo a chiudere i cicli materiali ed energetici. Sebbene entrambi gli approcci condividano l'obiettivo comune di aumentare la sostenibilità riducendo l'uso di risorse vergini e minimizzando i rifiuti, gli autori sottolineano che essi possono essere applicati sia in modo integrato che separato, a seconda del contesto^[116]. Alcuni studi hanno proposto un ulteriore cambiamento di paradigma verso un'economia circolare basata sulla sufficienza. Introdotta da Stahel (2016) come caratteristica dell'economia circolare, la sufficienza è anche descritta come un nuovo paradigma nell'ambito della sostenibilità industriale^[117]. Essa si concentra sulla riduzione dei consumi a livello sociale, evolvendo dalla produzione snella, dalla produzione più pulita e dall'economia circolare. Rispetto alla concezione di Stahel (2016), che si basava principalmente sulla riduzione degli sprechi attraverso la conservazione del valore, Bocken e Short (2020) sottolineano che la sufficienza previene gli effetti di rimbalzo e comporta

[115] Ritzén, S., & Sandström, G. O. (2017). Barriers to the Circular Economy—Integration of Perspectives and Domains, pp. 264-266.

[116] Deutz, P., Baxter, H., Gibbs, D., Mayes, W. M., & Roelich, K. (2015). Industrial Ecology and Regional Development: Eco-Industrial Development as a Tool for Regional Development, pp. 103-108.

[117] Stahel, W. R. (2016). The Circular Economy: A User's Guide, pp. 50-51.



quindi una diminuzione assoluta dei consumi. Inoltre, i consumatori e i responsabili politici hanno un ruolo più importante da svolgere nella sufficienza rispetto ai paradigmi precedenti, in cui il mercato e la tecnologia erano considerati le principali leve^[118]. Allwood (2014) evidenzia che il riciclaggio, sebbene centrale nell'economia circolare, non è sufficiente per affrontare le sfide ambientali. Molti materiali non possono essere riciclati indefinitamente o subiscono una degradazione che ne limita il riutilizzo. Pertanto, il riciclaggio deve essere visto come parte di una gerarchia di strategie di gestione dei materiali, in cui la sufficienza gioca un ruolo cruciale. La sufficienza implica ridurre la domanda complessiva di materiali attraverso il rallentamento dei cicli di consumo, la progettazione di prodotti più duraturi e la promozione di un consumo più consapevole. Secondo Allwood, un'effettiva transizione verso l'economia circolare richiede di affrontare il problema alla radice, riducendo non solo gli sprechi, ma anche la produzione e il consumo eccessivi^[119]. La promozione dell'economia circolare rappresenta uno strumento efficace per influenzare positivamente tutte e tre le dimensioni della sostenibilità di un'organizzazione. Questo approccio è stato introdotto da John Elkington nel suo libro "Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business", in cui viene presentato il concetto di "Triple Bottom Line" (Fig. 5).

[118] Bocken, N. M. P., & Short, S. W. (2020). Sufficiency as a Core Strategy for Circular Economy Solutions: Opportunities and Challenges for Business Innovation, pp. 45-47.

[119] Allwood, J. M. (2014). Sustainable Materials Without the Hot Air: Making Buildings, Vehicles and Products Efficiently and With Less New Material, pp. 90-92.

Fig. 5: Concetto di "Triple Bottom Line". Fonte: Elkington, J. (1998).

Tale modello invita le aziende a misurare il proprio successo non solo in termini di profitti economici, ma anche considerando gli impatti sociali e ambientali delle loro attività^[120]. Secondo l'autore, le imprese dovrebbero focalizzarsi su tre aspetti fondamentali: il profitto, che rappresenta la dimensione economica; le persone, che si riferisce agli effetti sociali; e il pianeta, che riguarda le conseguenze ambientali. È importante notare che questi "compro-messi dell'economia circolare" altererebbero l'interpretazione della relazione tra economia circolare e sviluppo sostenibile e confermerebbero la necessità di valutare accuratamente gli effetti delle soluzioni di economia circolare prima della loro implementazione. La sovrapposizione labile tra economia circolare e sostenibilità e la mancanza di una visione d'insieme delle interpretazioni dei due concetti a livello aziendale limitano l'efficacia delle organizzazioni che adottano l'economia circolare per contribuire al raggiungimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile.

[120] Elkington, J. (1998). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*, p. 78.

Bibliografia

- Andersen, M. S. (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science*, 2(2), 133–140.
- Badalucco, L., & Chiapponi, M. (2009). Energia e design. *Innovazioni di prodotto per la sostenibilità energetica*. Franco Angeli.
- Baldo, G. L., Marino, M., & Rossi, S. (2008). *Analisi del Ciclo di Vita LCA. Gli strumenti per la progettazione sostenibile di materiali, prodotti e processi*. Milano: Edizioni Ambiente.
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York: William Morrow.
- Bertola, P., & Manzini, E. (2004). *Design multiverso. Appunti di fenomenologia del design*. Edizioni Poli-design.
- Blomsma, F., & Brennan, G. (2017). The emergence of circular economy: A new framing around prolonging resource productivity. *Journal of Industrial Ecology*, 45–48.
- Bonsiepe, G. (1993). *Teoria e pratica del disegno industriale* (I ed. 1975). Edizioni Laterza.
- Boulding, K. E. (1966). The economics of the coming spaceship earth. In H. Jarrett (Ed.), *Environmental quality in a growing economy* (pp. 3–14). Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Brezet, H., & Van Hemel, C. (1997). *Ecodesign: A promising approach to sustainable production and consumption*. Delft University of Technology & UNEP.
- Calisto Friant, M., Vermeulen, W. J. V., & Salomone, R. (2020). A typology of circular economy discourses: Navigating the diverse visions of a contested paradigm. *Sustainability Science*, 15.
- Ceschin, F. (2012). *Sustainable Product-Service Systems: Between Strategic Design and Transition Studies*. Springer.
- Ceschin, F., & Gaziulusoy, I. (2016). Evolution of design for sustainability: From product design to design for system innovation and transition. *Design Studies*, 47, 118–163.
- Chapman, J. (2014). *Meaningful Stuff: Towards Longer Lasting Products*. London: Routledge.

- Chapman, J., & Gant, N. (2007). *Designers, Visionaries and Other Stories: A Collection of Sustainable Design Essays*. London: Earthscan.
- Commissione Europea. (2020). *European Circular Economy Action Plan*.
- De los Rios, I. C., Charnley, F., Sundin, E., Lindahl, M., & Ijomah, W. (2017). Design for Circular Economy: Understanding the challenges in implementation. *Procedia CIRP*, 59–62.
- Ellen MacArthur Foundation. (2012). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*.
- Elkington, J. (1994). Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business. *Capstone*, p. 78.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 76(2), 762–769.
- Ghisellini, P., Cialani, C. & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, pp. 11–32.
- Global Footprint Network. (2022). *L'impronta ecologica*. Recuperato da <https://www.footprint-network.org>.
- Go, T. F., Wahab, D. A., & Rahman, M. N. A. (2015). Design for excellence (DfX): A review and future trends. *Procedia Manufacturing*, 2, 267–280.
- Hawken, P., Lovins, A., & Lovins, H. (1999). *Natural Capitalism: Creating the Next Industrial Revolution*. Boston: Little, Brown, and Company.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 126–129.
- Manzini, E., & Vezzoli, C. (2003). *Lo sviluppo di prodotti sostenibili: I requisiti ambientali dei prodotti industriali*. Milano: Edizioni Ambiente.
- McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. North Point Press.

Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The Limits to Growth*. Potomac Associates.

Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The Circular Economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of Business Ethics*, 35–37.

Papanek, V. (1973). *Design for the real world: Human ecology and social change*. Pantheon Books.

Pietroni, L., Mascitti, J., Paciotti, D., & Di Stefano, A. (2024). New scenarios for sustainable design toward an integrated approach between bio-inspired design, biomimetic materials, generative parametric modelling, additive manufacturing. In C. Gambardella (Ed.), *For Nature/With Nature: New Sustainable Design Scenarios*. Springer Series in Design and Innovation, vol. 38, 618–624.

Sonego, M., Echeveste, M. E. S., & Debarba, H. G. (2018). The role of modularity in sustainable design – A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, pp. 196-209.

Stahel, W. R. (2010). *The Performance Economy*. Palgrave Macmillan.

74 Tukker, A. (2015). Product services for a resource-efficient and circular economy – A review. *Journal of Cleaner Production*, 97, 76–91.

Vezzoli, C. (2004). L'unità funzionale, è la prestazione del prodotto rispetto alla quale sono fatte le valutazioni. In *Design multiverso* (p. 106).

Vezzoli, C. (2005). Design per la sostenibilità: Una disciplina (sempre più) articolata. In C. Vezzoli & P. Tambarrini (Eds.), *Atti del convegno: Formazione, sviluppo sostenibile e design: strategie e strumenti per la Decade* (pp. 1–2). CLUP Milano.

Vezzoli, C., & Manzini, E. (2007). *Design for Environmental Sustainability*. Springer.

WCED (World Commission on Environment and Development). (1987). *Our Common Future*.

Yang, D., & Vezzoli, C. (2024). Designing Environmentally Sustainable Furniture Products: Furniture-Specific Life Cycle Design Guidelines and a Toolkit to Promote Environmental Performance. *Sustainability*, pp. 7-28.

Capitolo 2

Il Design circolare come strumento di attuazione dell' Economia circolare

2.1. Definizione e caratteristiche del Design circolare

2.2. Approcci e strategie di circolarità nel ciclo di vita dei prodotti

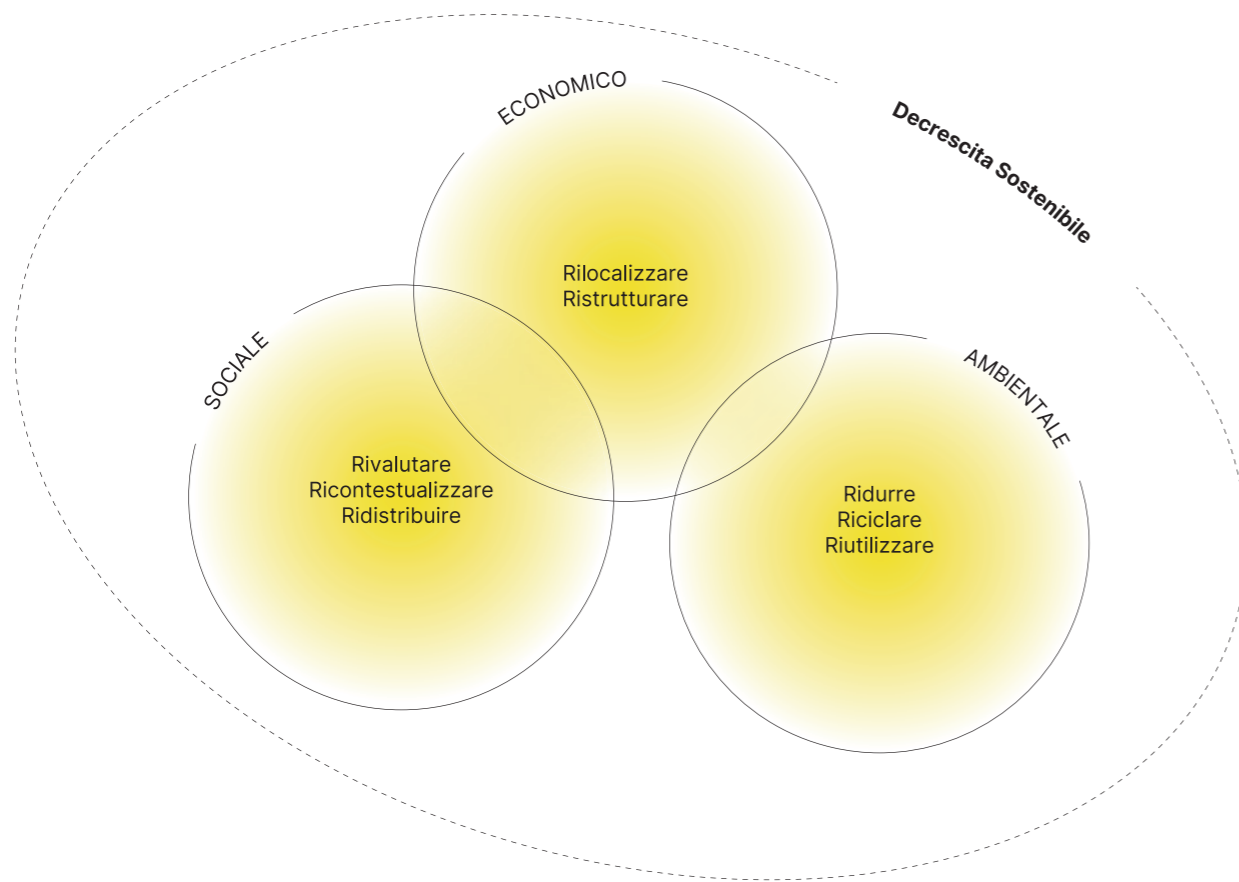
2.3. Modelli e strumenti di misurazione della circolarità

2.1. Definizione e caratteristiche del Design circolare

Negli ultimi decenni, il settore del design ha sperimentato una profonda evoluzione delle sue filosofie ambientali, passando dal concetto di green design al design per la sostenibilità e, più di recente, al design per la circolarità, noto anche come circular design. Questo cambiamento paradigmatico si lega a una crescente consapevolezza delle problematiche ambientali e alla necessità di integrare pratiche sostenibili all'interno dei processi progettuali. Il green design, nato come risposta alle crescenti preoccupazioni per l'ambiente, si è concentrato principalmente sull'uso di materiali ecocompatibili e sulla riduzione degli impatti negativi durante le fasi produttive. Tuttavia, con l'aumento della consapevolezza globale riguardo ai limiti delle risorse naturali e alle conseguenze del consumo eccessivo, è emersa l'esigenza di adottare un approccio più sistemico: il design per la sostenibilità. Questo modello propone di considerare l'intero ciclo di vita del prodotto, dall'estrazione delle materie prime fino al termine della sua vita utile, incoraggiando pratiche di utilizzo responsabile e un impatto ambientale complessivamente ridotto. L'idea di incorporare principi di sostenibilità nei processi di progettazione ha trovato ulteriore sviluppo grazie agli strumenti di valutazione del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA). Brezet e van Hemel, nel 1997, hanno evidenziato l'importanza di questi strumenti, sottolineando come essi possano quantificare l'impatto ambientale in ciascuna fase del ciclo di vita di un prodotto, fornendo informazioni essenziali per decisioni progettuali più consapevoli e responsabili^[1]. L'analisi del ciclo di vita permette, infatti, di identificare i punti critici del processo produttivo, offrendo ai designer l'opportunità di apportare modifiche significative volte a migliorare la sostenibilità complessiva. Il ruolo del design come catalizzatore della sostenibilità è stato ulteriormente esplorato da Bhamra e Lofthouse, i quali, nel 2007, hanno sostenuto che il design dovrebbe mirare non solo a minimizzare gli impatti negativi, ma anche a promuovere l'efficienza nell'uso delle risorse. Secondo gli autori, è fondamentale che il processo progettuale includa già nella fase iniziale una visione integrata che anticipi la gestione dello smaltimento e riduca gli sprechi, trasformando il design in uno

Nel secondo capitolo viene esaminato il design circolare come strumento fondamentale per l'attuazione dell'economia circolare. Vengono definiti i concetti chiave del design circolare e descritti i diversi approcci alla circolarità, tra cui la circolarità dei materiali, delle componenti e dei prodotti, nonché l'innovativo concetto del prodotto come servizio. Inoltre, si presentano modelli e strumenti per misurare la circolarità, come il Matrec Circular Tool, il Circularity Calculator e Tecla, che aiutano a valutare l'efficacia delle strategie di design circolare.

[1] Brezet, H., & van Hemel, C. (1997). Ecodesign: A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption. United Nations Environment Programme, pp. 45-47.



78 Fig. 6: Concetto delle "8R" nel programma di decrescita sostenibile. Fonte: Latouche (2007).

strumento strategico per l'ottimizzazione delle risorse^[2]. Il concetto delle "8R" nasce come evoluzione del tradizionale modello delle "3R" – Ridurre, Riutilizzare, Riciclare – che aveva caratterizzato i primi approcci alla sostenibilità ambientale. Nel corso degli ultimi decenni, studiosi e pensatori hanno ampliato questo schema per rispondere alla crescente complessità delle problematiche ecologiche e sociali legate ai modelli di produzione e consumo, sviluppando soluzioni più sistemiche e interconnesse.

Tra i principali sostenitori di questo approccio ampliato figura Serge Latouche, che nel 2007 ha integrato il concetto delle "8R" nel suo programma di decrescita sostenibile (Fig. 6). Latouche, uno dei promotori più influenti della "decrescita conviviale", propone questo sistema come uno strumento per mitigare gli effetti negativi del consumismo e per promuovere uno stile di vita più armonioso con i limiti ecologici. Secondo il suo pensiero, le otto linee guida – Rivalutare, Ricontestualizzare, Ristrutturare, Rilocalizzare, Ridistribuire, Ridurre, Riutilizzare e Riciclare – costituiscono un quadro integrato volto a incoraggiare un cambiamento radicale nel sistema economico e culturale^[3]. Questa prospettiva, infatti, non si limita a perseguire una riduzione degli impatti ambientali, ma mira a favorire una revisione profonda dei valori e delle strutture economiche. L'obiettivo è quello di costruire una società più equa e meno dipendente

[2] Bhamra, T., & Lofthouse, V. (2007). *Design for Sustainability: A Practical Approach*. Gower Publishing, pp. 68-71.

[3] Latouche, S. (2007). *Petit traité de la décroissance sereine*. Mille et une nuits, pp. 15-18.

dalla crescita continua, proponendo un'economia che rispetti i limiti ecologici e che adotti un approccio interdependente e integrato per affrontare le sfide globali. Le strategie delle "8R" delineano dunque un percorso che non si limita alla minimizzazione dell'impatto ecologico, ma promuove anche un nuovo equilibrio sociale e ambientale. Questo approccio mira a migliorare la qualità della vita, favorendo una gestione delle risorse più equa e sostenibile, e a costruire le basi per una società in cui il benessere collettivo sia prioritario rispetto al mero incremento economico.

Anche Braungart e McDonough (2002) affrontano il tema del design sostenibile, proponendo un approccio ispirato ai principi della natura, secondo cui ogni prodotto, una volta esaurito il suo ciclo di vita, può essere trasformato in nutrimento per nuovi cicli produttivi. Questo concetto è sintetizzato nella loro teoria del cradle to cradle ("dalla culla alla culla"), che immagina un modello produttivo rigenerativo. Gli autori considerano il design uno strumento capace di generare un impatto positivo sull'ecosistema, creando un circolo virtuoso in cui i prodotti dismessi diventano risorse per altri processi produttivi^[4]. Manzini e Vezzoli (2007) ampliano questa visione introducendo il concetto di debranding all'interno del design per un'economia circolare. Secondo i due autori, la sostenibilità non si realizza esclusivamente attraverso la creazione di prodotti a basso impatto ambientale, ma richiede un ripensamento radicale del design come pratica orientata alla condivisione e all'uso collaborativo. Essi sostengono che il design dovrebbe promuovere una cultura del consumo collaborativo, dove i prodotti sono progettati per avere una lunga durata, una manutenzione semplice e un alto grado di riutilizzabilità. Questo approccio, oltre a ridurre la domanda di nuovi beni, potrebbe portare a una diminuzione significativa dell'impatto ambientale^[5]. Successivamente, Winkler (2011) sviluppa ulteriormente questa prospettiva, descrivendo il design circolare come un'evoluzione naturale del design per la sostenibilità. In questo modello, non ci si limita a ridurre gli impatti negativi, ma si punta a chiudere il cerchio, favorendo il riutilizzo, il riciclo e l'ottimizzazione delle risorse. Il design circolare rappresenta un cambiamento di paradigma, dove l'obiettivo principale non è solo la minimizzazione

[4] Braungart, M., & McDonough, W. (2002), *Op.cit.*, pp. 56-59.

[5] Manzini, E., & Vezzoli, C. (2007), *Op.cit.*, pp. 78-82.

dei rifiuti, ma anche la creazione di valore attraverso l'innovazione sostenibile. In questa visione, i prodotti vengono concepiti come parte di un ecosistema di riuso e rifunzionalizzazione^[6].

L'economia circolare, infatti, si propone come un modello innovativo e sostenibile di gestione delle risorse, finalizzato alla riduzione degli sprechi e all'ottimizzazione dei materiali. Per implementarla, è necessario un cambiamento radicale nelle pratiche tradizionali di progettazione, con l'obiettivo di concepire prodotti e materiali per cicli chiusi in cui riutilizzo e riciclo siano integrati. Questo richiede non solo una trasformazione dei processi progettuali, ma anche una collaborazione interdisciplinare su scala globale. Le strategie delle "3R" – ridurre, riutilizzare e riciclare – sono centrali in questo contesto e rappresentano i pilastri fondamentali per la transizione verso pratiche più sostenibili. Ad esempio, il riutilizzo è stato approfondito da Su et al. (2013), che riportano numerosi casi di aziende che hanno implementato con successo strategie incentrate su questa pratica. Tali strategie non solo permettono di prolungare la vita utile dei prodotti, ma generano anche significativi risparmi economici. Di conseguenza, estendere il ciclo di vita dei materiali non rappresenta solo un imperativo ambientale, ma anche un'importante opportunità economica^[7]. Attualmente, la maggior parte dei prodotti disponibili sul mercato non è progettata per essere inserita in un modello di economia circolare, bensì per adattarsi a un sistema economico lineare, caratterizzato da rapidi tassi di sostituzione e da un ciclo di produzione, consumo e scarto.

Questo modello tradizionale, come sottolinea Andrews (2015), genera un aumento significativo dei rifiuti e pone una crescente pressione sulle risorse naturali^[8]. In questo contesto, Ghisellini et al. (2016) offrono una panoramica dettagliata su come l'adozione di un'economia circolare possa migliorare sia la sostenibilità che la competitività delle imprese. Gli autori evidenziano che l'integrazione quotidiana delle pratiche delle "3R" – ridurre, riutilizzare e riciclare – rappresenta un elemento chiave per il successo di modelli

[6] Winkler, H. (2011). Closed-Loop Economy and Circular Design Principles. EcoDesign Press, pp. 112-115.

[7] Su, B., Heshmati, A., Geng, Y., & Yu, X. (2013). A Review of Circular Economy Practices. Journal of Cleaner Production, pp. 215-217.

[8] Andrews, D. (2015). The Circular Economy, Design Thinking and Education for Sustainability. Local Economy, pp. 305-306.

di business circolari^[9]. Un contributo importante viene anche dalla ricerca di Goyal, Esposito e Kapoor (2016), che si focalizza sul ruolo cruciale della tecnologia e dell'innovazione nel facilitare il riciclo efficiente. Secondo questi autori, l'introduzione di tecnologie avanzate è indispensabile per ottimizzare i processi di recupero e riutilizzo dei materiali, favorendo così la chiusura del ciclo delle risorse^[10]. Lieder e Rashid (2016), invece, mettono in luce la necessità di una sinergia tra le diverse dimensioni delle "3R" per massimizzare il potenziale di sostenibilità dell'economia circolare. Gli autori sottolineano che un approccio integrato, capace di coniugare riduzione, riutilizzo e riciclo, è essenziale per creare un sistema economico coeso. In tale sistema, tutti gli attori coinvolti, dalle aziende ai consumatori, devono contribuire attivamente al raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità^[11]. Autori come Van Buren et al. (2016) e Potting et al. (2017) hanno ampliato il tradizionale modello delle "3R" nell'ambito della gestione aziendale e dell'economia circolare, proponendo un approccio più articolato che si adatta alle crescenti esigenze di sostenibilità. In questo contesto, la sostenibilità è diventata una sfida intersettoriale e il modello delle "8R" è stato applicato per favorire un sistema economico circolare, in netto contrasto con le pratiche produttive lineari tradizionali^[12]. Van Buren e Potting, in particolare, sottolineano l'importanza di pratiche aggiuntive come la riparazione, il ricondizionamento e il recupero di energia, evidenziando come tali strategie possano agevolare la transizione verso modelli produttivi più sostenibili. Questi modelli reintegrano i materiali nel ciclo economico, riducendo al contempo la dipendenza dall'estrazione di nuove risorse^[13].

[9] Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A Review on Circular Economy: The Expected Transition to a Balanced Interplay of Environmental and Economic Systems. Journal of Cleaner Production, 114, pp. 12-14.

[10] Goyal, S., Esposito, M., & Kapoor, A. (2016). Circular Economy: Potential and Challenges. Technological Forecasting and Social Change, pp. 40-42.

[11] Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards Circular Economy Implementation: A Comprehensive Review in Context of Manufacturing Industry. Journal of Cleaner Production, pp. 30-32.

[12] Van Buren, N., Demmers, M., van der Heijden, R., & Witlox, F. (2016). Towards a Circular Economy: The Role of Dutch Logistics Industries and Government. Sustainability, pp. 652-655.

[13] Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, pp. 24-27.

In tale contesto, il design circolare si configura come un obiettivo chiave per la sostenibilità, offrendo una prospettiva innovativa sul modo in cui i prodotti vengono concepiti, sviluppati e gestiti alla fine del loro ciclo di vita. Tuttavia, gli approcci attuali nel campo del design e dell'innovazione spesso si dimostrano poco efficaci nel promuovere cambiamenti sistemici significativi. Come osserva Gaziulusoy (2015), molti interventi si limitano ad affrontare problemi circoscritti, senza riuscire a modificare il sistema nella sua interezza^[14]. Secondo l'autore, per ottenere un cambiamento sostanziale è necessario adottare un approccio sistemico, che consideri il design come uno strumento per trasformare non solo i prodotti, ma anche le infrastrutture e le dinamiche culturali che costituiscono le fondamenta dei processi produttivi. Questo approccio invita i designer a superare la visione focalizzata esclusivamente sul prodotto, affrontando le cause profonde delle problematiche ambientali e sociali. Bocken et al. (2016) evidenziano come i designer, nel loro ruolo di mediatori e traduttori dei principi della circolarità in prodotti e servizi, debbano adottare una prospettiva olistica e interdisciplinare. Di fronte alle crescenti sfide ambientali, sociali ed economiche, i designer sono chiamati a considerare l'intero ciclo di vita dei prodotti, comprendendo che una parte significativa dell'impatto ambientale viene determinata già nella fase di progettazione. Questa prospettiva rafforza l'importanza di sviluppare soluzioni che chiudano i cicli produttivi, migliorino l'efficienza nell'uso delle risorse e promuovano modelli di business sostenibili^[15]. La Commissione Europea (2019) contribuisce a questa visione, sottolineando l'impatto sistemico delle varie fasi del ciclo di vita dei prodotti, dalla progettazione alla produzione, distribuzione, uso e smaltimento. Secondo la Commissione, il design ha un ruolo cruciale come catalizzatore nella transizione dall'attuale modello economico lineare, basato sul paradigma del "prende-fare-smaltire," a un sistema più circolare. In questo modello, le risorse vengono valorizzate e mantenute in circolazione, riducendo i rifiuti e promuovendo un'economia rigenerativa.

[14] Gaziulusoy, A. I. (2015). A Critical Review of Approaches to Design for System Innovations and Transitions. *Journal of Cleaner Production*, pp. 119-121.

[15] Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product Design and Business Model Strategies for a Circular Economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, pp. 315-317.

Questo approccio mira a conservare le risorse naturali e a minimizzare gli impatti negativi sull'ambiente, favorendo al contempo una maggiore sostenibilità economica e sociale^[16].

In modo analogo, Moreno, De los Rios, Rowe e Charnley (2016) esplorano il concetto di design circolare, definendolo come un approccio progettuale strettamente collegato all'economia circolare. Secondo questi autori, il design circolare si propone di superare il modello lineare tradizionale, ottimizzando l'uso delle risorse attraverso cicli continui di rigenerazione e reintegrazione. Questa filosofia progettuale si spinge oltre la semplice logica del riuso e del riciclo, promuovendo la creazione di prodotti e servizi pensati per facilitare la riparazione, la rigenerazione e la reintegrazione dei materiali nei sistemi economici.

Tale approccio, per sua natura innovativo, si pone come una strategia fondamentale per costruire un'economia resiliente, capace di affrontare le sfide ambientali globali e ridurre la dipendenza dalle risorse non rinnovabili^[17]. L'ecodesign, parte integrante del design circolare, rappresenta una strategia fondamentale per integrare la sostenibilità nei processi di progettazione, concentrandosi principalmente sulla riduzione dell'impatto ambientale attraverso scelte consapevoli di materiali e processi produttivi. Tuttavia, il design circolare si distingue per una visione più ampia, che supera la semplice progettazione di singoli prodotti, abbracciando l'intero sistema di produzione e consumo. Questa prospettiva olistica non solo si propone di minimizzare rifiuti e consumo di risorse, ma promuove anche un approccio collaborativo tra i diversi attori della filiera, spaziando dai designer ai consumatori, fino a includere le istituzioni legislative. In questo contesto, l'ecodesign diventa uno strumento chiave, fornendo metodologie capaci di orientare le aziende verso modelli di business più sostenibili e in linea con i principi dell'economia circolare. Secondo Bakker et al. (2014) il design circolare implica un ripensamento radicale della progettazione, che deve mirare a creare prodotti progettati per durare, essere modulari e facilmente riparabili. Gli autori evidenziano come la longevità dei prodotti, che deriva dall'uso di componenti aggiornabili e rici-

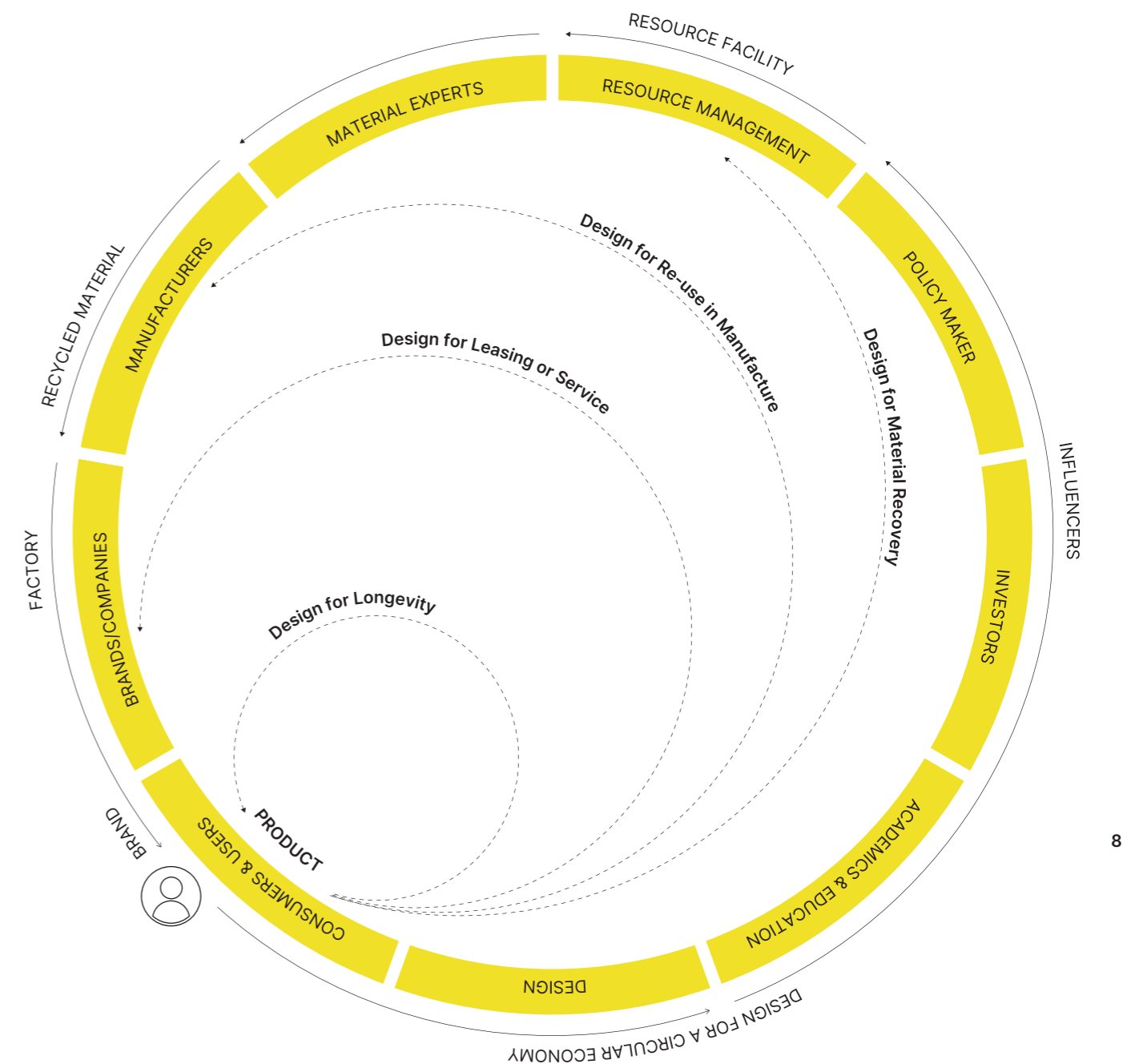
[16] European Commission. (2019). Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe. Publications Office of the European Union, pp. 14-16.

[17] Moreno, M., De los Rios, C., Rowe, Z., & Charnley, F. (2016). A Conceptual Framework for Circular Design. *Sustainability*, pp. 582-584.

clabili, contribuisca a ridurre la necessità di nuove risorse. Questo approccio, definito “design per la longevità”, si collega direttamente ai principi dell’economia circolare, offrendo strumenti concreti per aiutare le aziende a implementare strategie sostenibili. Inoltre, viene sottolineata l’importanza di strutturare sistemi di supporto che facilitino il riutilizzo e la manutenzione, trasformando il design in una leva per il cambiamento sistemico^[18]. In parallelo, il rapporto The Great Recovery della Ellen MacArthur Foundation approfondisce il ruolo cruciale del design nell’economia circolare, evidenziando come il progettista debba considerare l’intero ciclo di vita del prodotto (Fig. 7). Questo approccio non si limita a ridurre l’impatto ambientale alla fine della vita utile del prodotto, ma punta a garantire che i materiali utilizzati possano essere rigenerati e reinserti nei processi produttivi. Il documento sottolinea anche la necessità di una stretta collaborazione tra tutti gli attori del sistema produttivo e distributivo, evidenziando come il design possa fungere da catalizzatore per creare valore economico e ambientale^[19]. Anche il rapporto We All Design della European Design Innovation Initiative amplia la discussione, ponendo l’accento su come il design possa non solo migliorare l’efficienza dei prodotti, ma anche stimolare un cambiamento sistemico, ripensando radicalmente i modelli di produzione e consumo. Gli autori suggeriscono che, per realizzare una vera economia circolare, il design debba abbracciare anche la creazione di servizi e modelli di business capaci di ottimizzare l’utilizzo delle risorse e minimizzare gli sprechi. Questo approccio, quindi, fa convergere ecodesign e design circolare verso l’obiettivo comune di creare sistemi di produzione sostenibili e rigenerativi, adattabili ai cambiamenti economici, sociali e ambientali. Le diverse prospettive sottolineano che l’ecodesign, pur essendo fondamentale per ridurre l’impatto ambientale, deve essere integrato in una visione più ampia e sistemica rappresentata dal design circolare. Quest’ultimo non solo offre soluzioni tecniche per affrontare le sfide della sostenibilità, ma rappresenta anche un cambiamento culturale e organizzativo, necessario per costruire

[18] Bakker, C., Hollander, M., van Hinte, E., & Zijlstra, Y. (2014). Products that Last: Product Design for Circular Business Models. TU Delft Library, p. 45.

[19] MacArthur, E. (2013). The Great Recovery: Investigating the Role of Design in the Circular Economy. RSA, pp. 12-15.



un’economia più equa, resiliente e rispettosa dell’ambiente^[20]. Secondo Cristina Sousa Rocha e i suoi coautori, “il design circolare è la progettazione e lo sviluppo di prodotti, servizi e sistemi prodotto-servizio che sostituisce il concetto convenzionale di fine vita chiudendo, rallentando e restringendo i flussi di risorse nei processi di produzione, distribuzione e consumo.” Questa definizione sottolinea l’importanza di ripensare radicalmente il ciclo di vita dei prodotti, spostando l’accento dalla semplice gestione del fine vita al controllo e all’ottimizzazione dei flussi di risorse lungo tutte le fasi del ciclo produttivo^[21]. La progettazione circolare implica, dunque, la creazione di prodotti che possano essere facilmente riparati, riutilizzati, rifatti o riciclati, minimizzando così la creazione

Fig. 7: The Four Design Models (The Great Recovery 2013).

[20] Bakker, C., Hollander, M., van Hinte, E., & Zijlstra, Y. (2014), Op.cit., p. 47.

[21] Rocha, C. S., Antunes, P., & Partidário, P. (2019). Design for sustainability models: A multiperspective review, pp. 1428-1445.

di rifiuti e l'uso di nuove risorse. Questo approccio non solo riduce l'impatto ambientale, ma può anche generare vantaggi economici significativi, migliorando l'efficienza dei processi e riducendo i costi associati alla gestione dei materiali e dei rifiuti^[22]. Inoltre, il design circolare richiede una stretta collaborazione tra i diversi attori della filiera produttiva, inclusi designer, produttori, consumatori e legislatori. È necessaria una vera e propria trasformazione culturale, in cui tutti i partecipanti siano consapevoli delle implicazioni delle proprie scelte e attuino pratiche che promuovano la sostenibilità^[23]. Il design circolare nasce dall'intersezione tra la sostenibilità ambientale e l'economia circolare, diventando uno strumento operativo che si applica non più solo al prodotto singolo, ma al sistema complessivo di prodotti e servizi, nonché alle relazioni tra i diversi comparti produttivi. Oggi il design circolare si associa prioritariamente all'utilizzo di materiali circolari, ma assume un carattere sistematico che guarda anche alla possibilità di incrementare la vita utile del prodotto e la sua intensificazione d'uso attraverso gli strumenti e le strategie dell'ecodesign. Inoltre, l'economia circolare entra in piena sintonia con queste strategie applicandole a logiche di servizio e commerciali, in cui gli scarti di una filiera possono diventare materie prime per un'altra filiera produttiva^[24]. Il design circolare, quindi, implica ripensare l'intero processo produttivo, garantendo che la materia abbia un ciclo di vita rigenerativo e sostenibile. Questo approccio riduce il consumo di risorse e la produzione di rifiuti, ottimizza la logistica e la produzione, estende la vita utile dei prodotti e promuove una maggiore consapevolezza della sostenibilità sia a livello di consumatori che di progettisti^[25]. Per comprendere appieno il concetto di design circolare, è necessario partire dall'analisi dei principi di sostenibilità ambientale e di economia circolare, due ambiti strettamente connessi, la cui interazione rappresenta il punto di partenza per l'evoluzione del design circolare. Uno dei fondamenti dello sviluppo sostenibile risiede nel principio, già enunciato nel Rapporto Brundtland elaborato in ambito ONU, secondo cui è necessario soddisfare i bisogni materiali

[22] Whalen, K. A., & Peck, D. (2014). Design for Remanufacturing and Circular Business Models. *Journal of Cleaner Production*, 85, pp. 22-24

[23] Bakker, C., Hollander, M., van Hinte, E., & Zijlstra, Y. (2014), Op.cit., p. 50.

[24] MacArthur, E. (2013). Op.cit., pp. 16-20.

[25] Bakker, C., Hollander, M., van Hinte, E., & Zijlstra, Y. (2014), Op.cit., p. 50

delle generazioni attuali senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri^[26]. Il concetto di sostenibilità ambientale si associa frequentemente a quello di ecosistema, inteso come l'ambiente naturale che, per essere considerato eco-sostenibile, deve riuscire a mantenere inalterate le proprie caratteristiche nel tempo e nello spazio.

In tale contesto, un comportamento è definito sostenibile quando il bilancio tra i consumi di una popolazione e le risorse disponibili è positivo; diversamente, si verifica un abuso delle risorse, che compromette la capacità dell'ecosistema di assorbire gli scarti e i rifiuti generati dal consumo di queste stesse risorse^[27].

Il design per la sostenibilità, emerso dall'ecodesign e talvolta identificato come design sostenibile, si propone di eliminare del tutto l'impatto negativo sull'ambiente attraverso soluzioni progettuali intelligenti e sensibili^[28]. Questo termine è stato introdotto per precisare e delimitare il campo d'azione dell'ecodesign al settore del design industriale. Come evidenziato da John Thackara, «l'ottanta per cento dell'impatto ambientale esercitato dai prodotti viene determinato allo stadio progettuale»^[29].

Negli ultimi decenni, si è affermata una crescente consapevolezza dell'importanza di integrare sistematicamente l'impatto ambientale nella progettazione di artefatti e oggetti.

Tuttavia, mentre l'ecodesign si concentra sugli impatti ambientali ed economici, il design per la sostenibilità affronta anche le dimensioni sociali e culturali, incorporando una visione complessiva basata sulla prospettiva del ciclo di vita del prodotto e sugli impatti globali a lungo termine. Tale approccio considera sia la produzione sia il consumo, offrendo una valutazione olistica che include gli aspetti ambientali, sociali ed economici^[30].

[26] World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press, pp. 43-46.

[27] Silvestri, M. (2015). Sviluppo sostenibile: un problema di definizione. *Gentes. Strategie e pratiche delle culture contemporanee*, 2(2), p. 217.

[28] McLennan, J. F. (2004). *The Philosophy of Sustainable Design: The Future of Architecture*. Kansas City: Ecotone Publishing, p. 12.

[29] Thackara, J. (2005). *In the Bubble: Designing in a Complex World*. Cambridge, MA: MIT Press, p. 78.

[30] Ahmad, S., Wong, K. Y., Tseng, M. L., & Wong, W. P. (2018). Sustainable product design and development: A review of tools, applications, and research prospects. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, pp. 401-405.

L'ecodesign, nella sua definizione originale, si riferisce a qualsiasi forma di progettazione volta a minimizzare gli impatti ambientali negativi derivanti da prodotti e servizi.

Esso si concentra principalmente sulla progettazione dei prodotti, sulla selezione accurata dei materiali e sulle opzioni relative alla "fase post-uso". Tuttavia, il design per la sostenibilità adotta un approccio interdisciplinare, che integra e valuta in modo sistematico le diverse dimensioni della sostenibilità lungo tutte le fasi del processo di sviluppo del prodotto, promuovendo sia innovazioni incrementali sia interventi radicali^[31].

La transizione verso un approccio preventivo nell'affrontare le questioni ambientali ha segnato un'evoluzione significativa nel campo della sostenibilità e del design. In passato, l'attenzione era rivolta prevalentemente a politiche di riparazione, mentre oggi si punta a misure proattive che affrontano le cause profonde dell'inquinamento e degli impatti ambientali. Questo cambiamento ha interessato inizialmente le tecnologie pulite nei processi industriali, per poi estendersi allo sviluppo di prodotti ecologici.

Con il tempo, l'innovazione ha progressivamente abbracciato interventi più radicali, includendo l'esplorazione di modelli di innovazione sistemica e di consumo sostenibile^[32].

Secondo l'UNESCO, il concetto di sviluppo sostenibile sottolinea l'importanza di operare entro i limiti della resilienza ambientale, garantendo sia la conservazione delle risorse sia un'equa distribuzione per le generazioni future^[33]. Nel contesto del design, queste trasformazioni hanno ampliato il ruolo del progettista, che oggi guida l'innovazione non solo tecnica ma anche estetica e socio-etica, contribuendo a una maggiore consapevolezza nell'affrontare le sfide legate alla sostenibilità.

Questo sviluppo ha rafforzato la centralità del design nella ricerca e nella pratica, evidenziando il suo valore strategico per il cambiamento. La letteratura sottolinea inoltre l'importanza dell'innovazione verde, evidenziandone il ruolo cruciale nel migliorare il vantaggio competitivo delle imprese. È stato dimostrato che una forte

[31] Rocha, C., Antunes, P., & Partidário, M. R. (2019), Op.cit., 215–220.

[32] Daly, H. E. (2007). *Ecological Economics and Sustainable Development: Selected Essays of Herman Daly*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, pp. 123–130.

[33] UNESCO. (2007). *Education for Sustainable Development: A Global Perspective*. Paris: UNESCO Publishing, p. 45.

performance nell'innovazione verde influisce positivamente sulla competitività aziendale^[34]. Parallelamente, vengono discusse le difficoltà connesse allo sviluppo di prodotti verdi, che richiedono alle organizzazioni una comprensione approfondita delle complessità di questo processo^[35].

[34] Chen, Y. S., Lai, S. B., & Wen, C. T. (2006). The influence of green innovation performance on corporate advantage in Taiwan. *Journal of Business Ethics*, 67(4), pp. 331–339.

[35] Driessen, P. H., Hillebrand, B., Kok, R. A., & Verhallen, T. M. M. (2013). Green product innovation in small firms: The role of regulatory focus. *Journal of Product Innovation Management*, 30(6), pp. 1083–1097.

Negli ultimi decenni, si è sviluppata una crescente consapevolezza riguardo alle problematiche ambientali e alla limitata disponibilità di risorse naturali, fenomeno che ha spinto numerosi settori industriali a rivedere profondamente le proprie pratiche di sviluppo e produzione. Tale riflessione ha evidenziato l'importanza della circolarità nel design dei prodotti, un approccio che si configura come una risposta essenziale alle sfide poste dalla sostenibilità. Infatti, la circolarità consente di promuovere un utilizzo più efficiente delle risorse e, al contempo, di ridurre l'impatto ambientale derivante dai processi produttivi e dal ciclo di vita dei prodotti.

In questo contesto, il design dei prodotti emerge come elemento cruciale per favorire l'adozione di modelli economici circolari. Attraverso un'attenta progettazione, è possibile non solo ottimizzare l'impiego delle risorse ma anche ridurre significativamente gli effetti negativi sull'ambiente. Studi recenti, come quello condotto da Colin de Kwant et al. (2021), sottolineano il ruolo dei modelli di business circolari, applicati con successo in ambiti quali i veicoli elettrici e gli elettrodomestici, nel migliorare la sostenibilità del ciclo produttivo e nell'estendere la vita utile dei prodotti^[36].

In questo contesto, la transizione verso un'economia circolare non è solo una proposta teorica, ma una necessità pratica che richiede un cambiamento radicale nel modo in cui pensiamo e realizziamo i nostri prodotti. Un elemento centrale di questa transizione è la necessità di superare l'approccio lineare tradizionale nella produzione. Da un lato, l'economia lineare opera secondo un modello in cui i prodotti vengono realizzati, utilizzati e poi inevitabilmente scartati. Dall'altro, l'economia circolare cerca di instaurare un ciclo chiuso in cui i materiali vengono continuamente riutilizzati e riprocessati. Questo passaggio implica che i designer debbano considerare fin dall'inizio la possibilità di smontare e riutilizzare i loro prodotti, garantendo così una vita utile più lunga e una riduzione dei rifiuti. Per supportare questo approccio, l'analisi del ciclo di vita (LCA) si dimostra un metodo essenziale. Essa permette di esaminare ogni fase del ciclo di vita di un prodotto, dalla sua creazione fino alla sua dismissione, identificando così gli aspetti critici in cui

[36] Colin de Kwant et al., Circular Economy Business Models: Opportunities for Sustainability in Electric Vehicles and Home Appliances, *Journal of Sustainable Development*, 2021, pp. 45-67.

è possibile ridurre l'impatto ambientale. Parallelamente, l'innovazione nei materiali si afferma come un elemento cruciale per rispondere alle esigenze della sostenibilità contemporanea. La ricerca di soluzioni come bioplastiche e tessuti riciclati è fondamentale per realizzare prodotti che combinino un design accattivante con il rispetto dei principi della sostenibilità. L'utilizzo di materiali sostenibili sta trasformando il panorama del design, offrendo nuove opportunità per coniugare estetica e responsabilità ambientale^[37]. Molte aziende hanno intrapreso percorsi di innovazione incentrati sulla sostenibilità dei materiali, creando una nuova narrativa attorno ai propri prodotti. Questa trasformazione è resa possibile dalla cooperazione interdisciplinare tra designer, ingegneri e scienziati, che consente di affrontare con efficacia le sfide poste dal contesto contemporaneo e di sviluppare soluzioni innovative per rispondere alle richieste del mercato e dell'ambiente. Un altro aspetto fondamentale è il design centrato sull'utente, che mira a soddisfare non solo bisogni funzionali, ma anche esigenze legate all'identità sociale e alle emozioni. Progetti basati sulla modularità, la personalizzazione e la riparabilità dei prodotti incentivano una maggiore durata degli stessi e promuovono comportamenti di consumo più responsabili, contribuendo a ridurre gli sprechi. Il design modulare, in particolare, rappresenta un passaggio chiave verso l'economia circolare, trasformando i processi produttivi da una logica di "creare per dismettere" a una di "creare per rigenerare"^[38]. La circolarità dei materiali nel design si configura come un approccio innovativo e sostenibile che consente di ridurre l'impatto ambientale attraverso una gestione più attenta ed efficiente delle risorse. Questo modello si colloca nel più ampio contesto dell'economia circolare, una visione che considera i materiali non come risorse destinate a essere sfruttate e poi esaurite, ma come elementi preziosi da riutilizzare, riciclare e valorizzare. Come evidenziato, il design circolare implica la creazione di prodotti progettati per durare nel tempo e per essere facilmente smontati e riciclati^[39].

[37] Ferrara, M., & Squatrito, A. (2022). Innovative Sustainable Materials in Design: Opportunities and Challenges. *International Journal of Architecture, Art & Design*, 11, pp. 288-299.

[38] Pietroni, L., Di Stefano, A., & Galloppo, D. (2023). Modular design towards the circular economy: From 'making to unmake' to 'making to remake'. *AGATHÓN*, 14, pp. 274-283.

[39] Vezzoli, C., & Manzini, E. (2014). *Design for Environmental Sustainability* (2nd ed., pp. 123-145). Springer.

Tale approccio pone la sostenibilità al centro del processo progettuale, riconoscendo che ogni prodotto ha un ciclo di vita e che ogni materiale può essere reintegrato nel sistema produttivo. Un aspetto chiave di questa filosofia è l'efficienza dei materiali, insieme alla riduzione degli sprechi.

Questi elementi mirano a minimizzare il ricorso a risorse vergini, ottimizzando il ciclo di vita del prodotto e riducendo così il suo impatto sull'ambiente. In questo contesto, ai progettisti è affidata la responsabilità di considerare il ciclo di vita dei materiali fin dalle prime fasi del processo creativo. Un'attenta selezione dei materiali e una progettazione che consenta il loro riutilizzo o smaltimento sostenibile sono fondamentali per integrare i principi del design circolare. Inoltre, è stato sottolineato quanto sia cruciale sviluppare soluzioni progettuali che preservino il valore dei materiali nel tempo, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale e, al contempo, generando risparmi economici significativi^[40].

Questo modello non solo risponde alle esigenze della sostenibilità, ma stimola anche l'innovazione, invitando i designer a esplorare nuovi approcci creativi nella scelta e nell'impiego dei materiali. La circolarità, quindi, rappresenta non solo un'opportunità per ripensare il design, ma anche un punto di partenza per ridefinire le relazioni tra produzione, consumo e ambiente.

Secondo Manzini, l'innovazione nel design circolare può manifestarsi attraverso la creazione di nuovi materiali o l'adattamento di materiali esistenti per scopi diversi. "La creatività deve estendersi oltre la forma del prodotto, abbracciando la sua interezza, compreso il modo in cui verrà utilizzato e poi smesso", afferma, sottolineando l'importanza di un approccio olistico alla progettazione^[41]. Un esempio pratico di questa filosofia si osserva nell'uso di materiali riciclati per il packaging e i prodotti di consumo. Le aziende che abbracciano il design circolare non solo migliorano la loro sostenibilità, ma si distinguono sul mercato, rispondendo alla crescente domanda di soluzioni eco-compatibili.

Le ricerche mostrano come l'integrazione della sostenibilità nei modelli di business possa rappresentare un vantaggio competitivo

[40] MacArthur, E. (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*, pp. 32–45.

[41] Manzini, E. (2015). *Design, When Everybody Designs: An Introduction to Design for Social Innovation*, pp. 89–102. MIT Press.

significativo, poiché i consumatori tendono a premiare con la loro fedeltà le pratiche sostenibili^[42]. Il design circolare, oltre a generare valore economico per le aziende, offre benefici tangibili per la società e l'ambiente. Attraverso un framework che identifica archetipi di modelli di business circolari, vengono delineati approcci pratici per integrare principi ecologici ed economici. Tra questi archetipi emerge il "Modello di Recupero", che promuove il design di prodotti facilmente smontabili per il recupero e riutilizzo dei materiali. Un esempio significativo è rappresentato dalle aziende di elettronica, che progettano dispositivi facili da riparare e aggiornare, riducendo così la dipendenza da materiali nuovi.

Un altro modello è il "Modello di Ricarica", che incentiva i clienti a restituire prodotti a fine vita per il riciclo o il riutilizzo, diffuso in settori come l'abbigliamento e il packaging. Il "Modello di Prestazione" si focalizza invece sull'offerta di servizi anziché sulla vendita di prodotti, come il leasing di elettrodomestici, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale associato alla produzione di beni nuovi. Infine, il "Modello di Simbiosi" promuove la collaborazione tra aziende per trasformare i rifiuti di un'industria in risorse per un'altra, migliorando l'efficienza complessiva delle risorse^[43].

Adottare modelli di business circolari consente alle aziende di ridurre i costi operativi attraverso un uso più efficiente delle risorse e il recupero dei materiali, oltre a migliorare la lealtà dei consumatori e ad accedere a nuovi mercati emergenti. Inoltre, il design circolare stimola l'innovazione, spingendo le aziende a esplorare nuovi materiali sostenibili come bioplastiche e materiali riciclati. Questo approccio mira a superare il tradizionale paradigma lineare del "prendi-usa-smaltisci", promuovendo un'economia più sostenibile e resiliente. Ezio Manzini, uno dei principali teorici del design sostenibile, ha sottolineato come il concetto di circolarità si integri nella progettazione non solo come obiettivo ambientale, ma anche come un'opportunità per promuovere l'innovazione sociale. Nel suo lavoro, Manzini mette in luce l'importanza di progettare sistemi

[42] Bocken, N. M. P., Short, S. W., Rana, P., & Evans, S. (2016). A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*, 65, pp. 42–56.

[43] Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), pp. 308–320.

che facilitino il recupero, la rigenerazione e il riutilizzo dei materiali, mantenendone il valore nel tempo. Tali sistemi possono includere modelli di business come il leasing e la manutenzione programmata, i quali non solo riducono significativamente gli sprechi, ma rafforzano anche la relazione tra produttore e consumatore, promuovendo una responsabilità condivisa sul ciclo di vita del prodotto^[44]. Anche Carlo Vezzoli, figura di riferimento nel campo del design sostenibile, ha sviluppato metodologie che integrano la sostenibilità nelle fasi iniziali della progettazione. Attraverso l'analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA), Vezzoli afferma che ogni decisione progettuale dovrebbe essere orientata alla riduzione dell'impatto ambientale, dalla selezione dei materiali ai processi di assemblaggio e smaltimento. Una delle pratiche centrali è il Design for Disassembly (DfD), che consente di realizzare prodotti facilmente smontabili, facilitando il recupero dei materiali e riducendo i costi del riciclo^[45]. La circolarità nel design e nella gestione del ciclo di vita si sviluppa attraverso: la circolarità delle componenti; la circolarità dei prodotti e il concetto di prodotto come servizio (Product-as-a-Service, PaaS), ciascuno dei quali contribuisce a ridurre l'impatto ambientale e a migliorare l'efficienza delle risorse. La circolarità delle componenti si concentra sul recupero e sul riutilizzo degli elementi che compongono un prodotto. Tale approccio implica una progettazione che favorisca la modularità e la compatibilità dei componenti con i processi di disassemblaggio, facilitando così il recupero dei materiali al termine del ciclo di vita del prodotto. Come evidenziato da Bocken et al. (2016), il design modulare consente di estendere la vita utile dei prodotti, poiché le singole parti possono essere riparate o sostituite senza compromettere l'intero sistema^[46]. La circolarità dei prodotti, invece, enfatizza una visione più ampia, considerando il ciclo di vita completo dell'oggetto e promuovendone un utilizzo prolungato. Questo approccio integra strategie come il Design for Longevity, che privilegia la durabilità attraverso l'uso di materiali resistenti e processi di pro-

[44] Manzini, E. (2015), Op.cit., pp. 75–88.

[45] Vezzoli, C. (2014). Design for Environmental Sustainability: Life Cycle Design of Products (2nd ed.), pp. 135–150. Springer.

[46] Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), pp. 308–320.

duzione di alta qualità, e il Design for Upgradability, che permette di aggiornare le funzionalità di un prodotto senza doverlo sostituire integralmente. Vezzoli e Kohtala (2018) sottolineano che tali strategie non solo riducono la domanda di nuove risorse, ma favoriscono anche un cambiamento culturale verso modelli di consumo più responsabili^[47]. Un'ulteriore evoluzione della circolarità è rappresentata dal prodotto come servizio (Product-as-a-Service, PaaS), un modello innovativo che supera il concetto tradizionale di proprietà. In questo scenario, i beni vengono offerti come servizi, con l'azienda produttrice che mantiene la proprietà del prodotto e si occupa della sua manutenzione, riparazione e riciclo. Questo approccio non solo riduce lo spreco di risorse, ma incentiva i produttori a progettare prodotti più duraturi e facilmente riparabili, poiché il costo delle inefficienze ricade su di loro^[48]. Tukker (2015) evidenzia come il PaaS sia particolarmente efficace nei settori che richiedono beni durevoli, come elettrodomestici e automobili, poiché consente di ottimizzare l'utilizzo delle risorse attraverso il leasing, il noleggio o la condivisione^[49]. Inoltre, il modello del PaaS promuove un legame più stretto tra produttore e consumatore, trasformando l'azienda in un fornitore di soluzioni piuttosto che di prodotti fisici. Questa relazione favorisce una responsabilità condivisa sul ciclo di vita del prodotto, stimolando l'adozione di pratiche sostenibili. Come osservato dalla Ellen MacArthur Foundation (2013), il PaaS non solo genera valore economico per le aziende, ma offre anche vantaggi significativi per l'ambiente, riducendo la necessità di nuove produzioni e incentivando il riutilizzo e il riciclo^[50]. La combinazione di questi approcci offre una prospettiva sistemica per affrontare le sfide globali legate all'esaurimento delle risorse e all'inquinamento, promuovendo un'economia più resiliente e sostenibile. La transizione verso modelli circolari richiede, tuttavia, un cambiamento significativo nelle pratiche progettuali, nelle politiche aziendali e nelle abitudini dei consumatori, evidenziando l'importanza di un impegno congiunto da parte di tutti gli attori coinvolti.

[47] Vezzoli, C., & Kohtala, C. (2018). Design for Sustainability: A Step-by-Step Approach, pp. 90–105.

[48] Bocken, N. M. P., Short, S. W., Rana, P., & Evans, S. (2016). A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*, 65, pp. 42–56.

[49] Tukker, A. (2015). Product services for a resource-efficient and circular economy – A review. *Journal of Cleaner Production*, 97, pp. 76–91.

[50] MacArthur, E. (2013), Op.cit., pp. 15–28.

La misurazione della circolarità rappresenta un requisito imprescindibile per l'attuazione del percorso di transizione da un modello economico take-make-dispose verso un modello avente come paradigma di riferimento quello dell'economia circolare. Essa si fonda sul monitoraggio di aspetti fisici ed economici dei sistemi di volta in volta presi ad esame – organizzazioni, filiere, settori, etc. – al fine di acquisire informazioni utili a identificare gli ambiti di miglioramento e stabilire nuove priorità. In tale contesto, diviene pertanto necessario definire precisi riferimenti per misurare un livello di economia circolare, standardizzabili, verificabili e soprattutto, replicabili nonostante la specificità delle attività da monitorare. Non esiste, infatti, ad oggi, un approccio di misurazione unico ed universale che consenta di cogliere adeguatamente la complessità e i molteplici aspetti coinvolti nel percorso verso l'economia circolare. Gli indicatori di misurazione dell'economia circolare sono comunemente classificati in tre livelli, a seconda della dimensione di riferimento: livello "micro" (organizzazioni, imprese, prodotti), livello "meso" (focus su filiere e settori, nonché su dinamiche di simbiosi industriale) e livello "macro" (città, comuni, province, regioni, stati)^[51]. Gli indicatori sono definiti come «valori derivanti da parametri capaci di fornire un'informazione sintetica relativa ad uno specifico fenomeno»^[52]. Si riconoscono a questi una serie di vantaggi e benefici, quali ad esempio, la capacità di condensare fenomeni dinamici e complessi in forme gestibili e significative^[53], la capacità di risultare comunicativi su topic di interesse (come ad esempio, gli impatti ambientali potenziali), la capacità di "indicare" se un dato target potrà essere raggiunto o meno^[54]. Riguardo alla misurazione dell'economia circolare, va aggiunto che gli indicatori possono essere usati come "indicatori di performance" (Key Performance Indicators — KPI), aiutando ad esempio le imprese a definire propri benchmark interni ed esterni; per fornire informazioni utilizzabili in

[51] Ghisellini, P., Cialani, C. and Ulgiati, S. (2015), Op.cit., pp. 11–32.

[52] Measuring and managing results in development co-operation. (2014). OECD Publishing, p. 25.

[53] Singh R.K., Murty H.R., Gupta S.K. and Dikshit A.K. (2012), "An overview of sustainability assessment methodologies", *Ecological Indicators*, 15, pp. 281-299.

[54] European Environment Agency (1999), *Environmental indicators: Typology and overview*, Edith Smeets and Rob Weterings, EEA Technical report No 25/1999, testo disponibile al sito: <https://www.eea.europa.eu/publications/TEC25>, data di consultazione 05 dicembre 2024.

etichette di prodotto al fine di guidare il consumatore nelle proprie scelte di acquisto verso prodotti più "circolari"; possono divenire i fondamenti su cui elaborare cambiamenti nella regolazione oppure aiutare, grazie a linguaggi standardizzati, lo scambio di informazioni tra gli attori appartenenti ad una data filiera produttiva. Infine, ma non meno importante, gli indicatori di economia circolare potrebbero informare i progettisti e i designer, con lo scopo di supportare le decisioni di progettazione senza che venga necessariamente realizzata una dispendiosa, anche in termini di tempo, analisi del ciclo di vita^[55]. Lo sviluppo di strumenti specifici per la misurazione dell'economia circolare parte dalla comprensione di quali siano i requisiti gli aspetti che rendono un processo "circolare", cui va aggiunta la conoscenza di quali azioni possano essere intraprese o meno da una data realtà aziendale, perché i propri processi ed attività peculiari possano diventare a tutti gli effetti circolari. Il punto di partenza è rappresentato dall'individuazione di quali siano le fasi di un dato processo aziendale ad essere interessate dal paradigma dell'economia circolare.

Molti autori sono concordi nell'individuare le seguenti cinque fasi: l'approvvigionamento, il design, la produzione, la fase di utilizzo ed infine, la gestione delle risorse a fine-vita che può a sua volta provvedere a nuovi input per la prima fase in una logica a ciclo chiuso, obiettivo basilare dell'economia circolare stessa^[56].

A queste cinque ne viene aggiunta una sesta: la fase di distribuzione dei prodotti/erogazione dei servizi^[57]. Queste fasi rappresentano i processi le cui performance una volta misurate possono dare una visione di quanto circolare nel suo complesso risulti un dato sistema. La circolarità può essere implementata agendo su ciascuna delle fasi precedentemente descritte attraverso azioni mirate a massimizzarne l'efficacia. Tra queste, rientrano la progettazione e produzione di prodotti o servizi circolari, l'adozione di modelli di business circolari che chiudano il ciclo produttivo.

Inoltre, è fondamentale promuovere collaborazioni trasversali tra

[55] Saidani M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F. and Kendall A. (2019), "A taxonomy of circular economy indicators", *Journal of Cleaner Production*, 207, pp. 542-559.

[56] Elia V., Gnoni M.G. and Tornese F. (2017), "Measuring circular economy strategies through index methods: a critical analysis", *Journal of Cleaner Production*, 142, pp. 2741-2751.

[57] Griffiths, P., & Cayzer, S. (2016). Design of indicators for measuring product performance in the circular economy. In *Smart innovation, systems and technologies*, pp. 307–321.

settori produttivi, favorendo sinergie che amplifichino i benefici dell'economia circolare. In accordo con il report della European Environmental Agency (2016)^[58], con Ellen MacArthur Foundation (2015)^[59], per essere classificato come "processo circolare," un sistema deve rispondere a specifici requisiti. In primo luogo, è essenziale ridurre gli input e l'uso delle risorse naturali, obiettivo che punta a minimizzare lo sfruttamento degli stock limitati, tipico del modello economico lineare. Questo si ottiene attraverso un uso efficiente di materiali, acqua ed energia, massimizzando il valore ricavato dalle risorse effettivamente impiegate.

Un ulteriore aspetto cruciale è la riduzione delle emissioni, sia dirette che indirette, accompagnata dalla promozione del riuso, recupero e riciclaggio di materiali e prodotti. Queste pratiche mirano a prevenire la produzione di rifiuti e a limitare al massimo il ricorso a incenerimento e smaltimento in discarica, diminuendo così la perdita di materia ed energia lungo tutto il ciclo produttivo.

Inoltre, è fondamentale integrare l'uso di risorse rinnovabili e riciclabili, riducendo l'impiego di risorse naturali non rinnovabili a favore di alternative più sostenibili. A ciò si aggiunge l'importanza di estendere la durata dei prodotti, favorendo nuovi modelli di business use-oriented, come il leasing o il pooling, incentivando e favorendo il riuso dei prodotti e delle loro componenti.

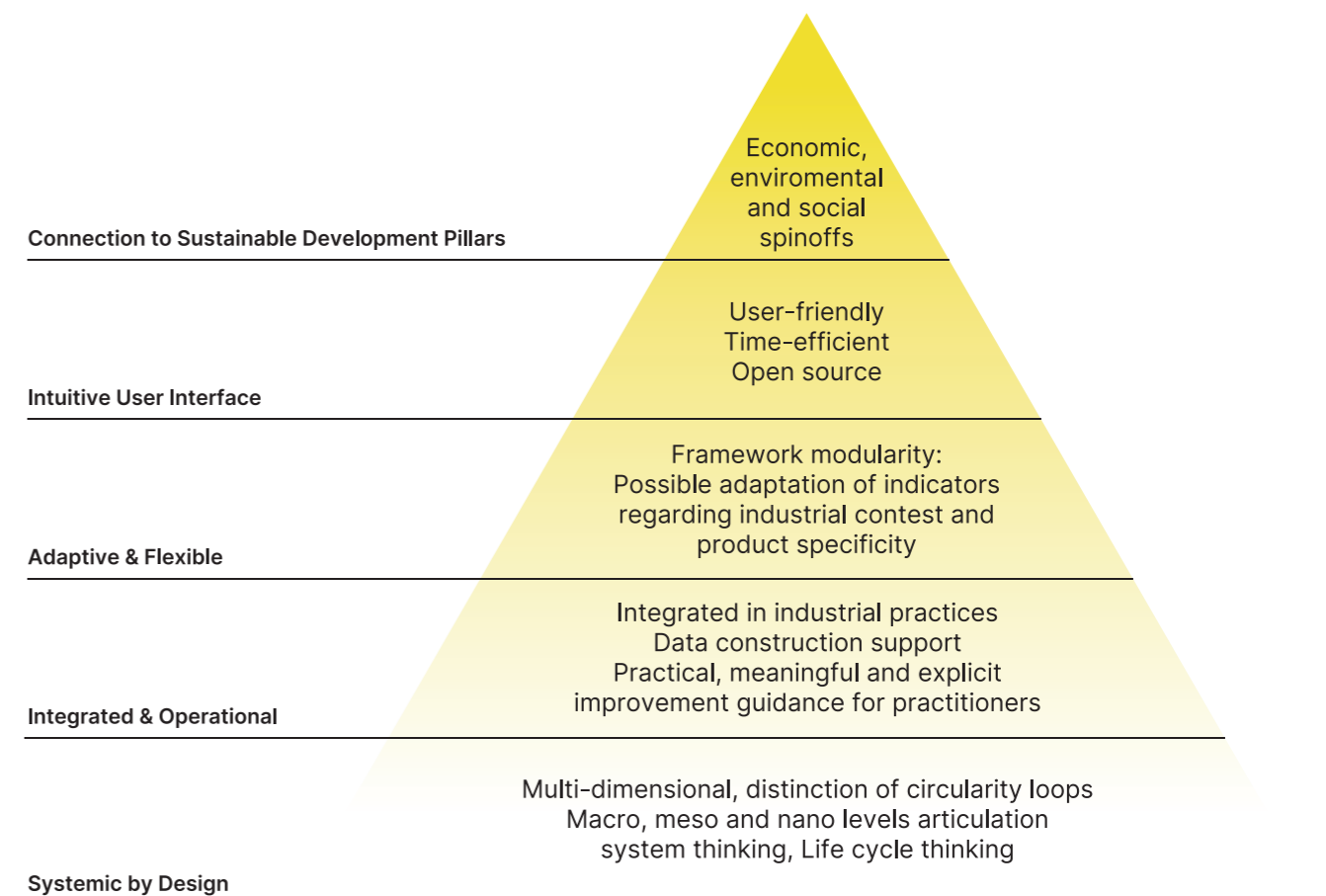
Focalizzando l'attenzione sugli indicatori finalizzati a misurare la circolarità di organizzazioni, imprese e prodotti (il cosiddetto livello micro), ed analizzandone, nello specifico, i limiti, è interessante notare che Saidani et al, (2019), nello studio "A taxonomy of circular economy indicators" evidenziano come la quasi totalità degli indicatori micro da loro analizzati (circa il 90%) risulti correlata ad attività di riciclo, mentre il 65% di questi consideri le attività di re-manufacturing e di riuso^[60].

Negli ultimi anni, parallelamente allo sviluppo di indicatori per l'economia circolare basati su rigorosi approcci metodologici, è emersa la necessità di creare strumenti di misurazione più acces-

[58] Agency, E. E., & Miljøagentur, E. (2014). Resource-efficient green economy and EU policies, testo disponibile al sito: <https://www.eea.europa.eu/publications/resourceefficient-green-economy-and-eu>, data di consultazione 05 dicembre 2024.

[59] Ellen MacArthur Foundation (2015), Circular economy indicators- an approach to measure circularity. Methodology & Project overview, Cowes. UK.

[60] Saidani M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F. and Kendall A. (2019), Op.cit., pp. 542-559.



sibili, capaci di essere utilizzati anche da utenti non esperti. Questi strumenti, pur semplificati, hanno l'obiettivo di abbracciare diversi aspetti della circolarità, fornendo risultati qualitativi e/o quantitativi in modo olistico. Si configurano, dunque, come strumenti pensati per aiutare le organizzazioni a valutare autonomamente le proprie performance di circolarità, senza richiedere un accesso complesso o massiccio a dati e informazioni.

Lo sviluppo di questi tool è frutto del contributo congiunto di comunità scientifica, organizzazioni internazionali, società di consulenza e aziende stesse. Saidani et al. (2017), hanno individuato una serie di linee guida che dovrebbero guidare la progettazione di strumenti di misurazione per la circolarità a livello di impresa e prodotto/servizio, per renderli il più efficaci possibile^[61].

Gli autori hanno proposto una gerarchia di caratteristiche ideali, ordinate per importanza, che un buon tool dovrebbe possedere: progettazione sistemica (Systemic by Design), praticità e integrazione operativa (Integrated & Operational), flessibilità e adattabilità (Adaptive & Flexible), facilità d'uso (Intuitive User Interface), e connessione con i pilastri dello sviluppo sostenibile (Connection to Sustainable Development Pillars) (Fig. 8). Il tool per la misurazione della circolarità deve essere progettato secondo una serie di linee guida che ne garantiscano l'efficacia e la versatilità.

[61] Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., & Cluzel, F. (2017). How to assess product performance in the circular Economy? Proposed requirements for the design of a circularity measurement framework. *Recycling*, 2(1), p. 6.

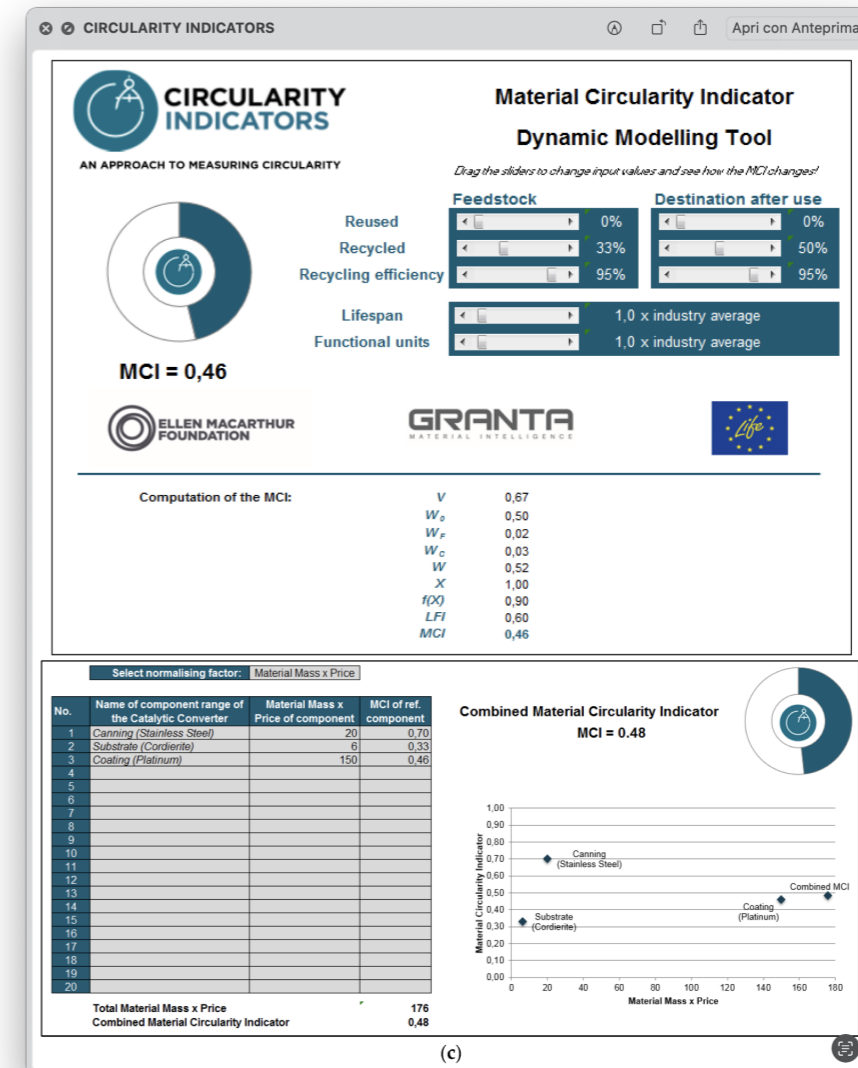
Fig. 8: Gerarchia di caratteristiche desiderate per progettare quadri, metodi, strumenti e indicatori volti a misurare le prestazioni della circolarità dei prodotti. Fonte: Saidani et al., (2017).

Innanzitutto, deve essere sviluppato con un approccio sistemico (Systemic by Design), in modo da abbracciare integralmente il paradigma dell'economia circolare. Ciò implica che debba tenere conto dei principi fondamentali di questa economia, includendo l'approccio basato sul ciclo di vita e i diversi livelli di implementazione (micro, meso e macro). Inoltre, il tool dovrebbe distinguere le modalità con cui un ciclo di materiale o prodotto può essere chiuso, assegnando a ciascuna un peso diverso nella valutazione della circolarità. A questo proposito, gli autori identificano quattro categorie principali: la progettazione per la durabilità del prodotto, che rappresenta il massimo livello di circolarità; il riutilizzo e la redistribuzione, attraverso lo sviluppo di sistemi di servizio per il prodotto; la rigenerazione e il reimpiego nel processo produttivo; e infine, il riciclo dei materiali. Nel contesto odierno, caratterizzato da un crescente interesse verso la sostenibilità e la necessità di ridurre l'impatto ambientale, le aziende si trovano nella condizione di dover adottare modelli di business circolari. Questa transizione verso un'economia circolare, supportata da una serie di strumenti e modelli di misurazione specifici, permette alle imprese non solo di valutare la propria performance in termini di efficienza nell'uso delle risorse e nella gestione dei rifiuti, ma anche di identificare pratiche più sostenibili da implementare in futuro^[62]. Tali strumenti, oltre a fornire un quadro chiaro sullo stato attuale delle operazioni aziendali, offrono un supporto prezioso per la pianificazione strategica orientata alla sostenibilità. Tra gli strumenti più rilevanti si distingue il Material Circularity Indicator (MCI) (Fig. 9), sviluppato dalla Ellen MacArthur Foundation, che rappresenta un metodo per ottenere una valutazione quantitativa della circolarità di un prodotto^[63]. Questo indicatore, calcolato attraverso un punteggio che considera diversi fattori, analizza il modo in cui vengono utilizzati i materiali, la percentuale di essi che è riciclata o riciclabile e la quantità di rifiuti generati alla fine del ciclo di vita del prodotto^[64]. Grazie a questa metodologia, è possibile effettuare un'analisi approfondita del ciclo di vita dei prodotti, offrendo alle aziende indicazioni fondamentali per migliorare il design e adottare pratiche operative più sostenibili.

[62] Ellen MacArthur Foundation. (2015). Towards the Circular Economy, pp.22-26.

[63] Ellen MacArthur Foundation. (2019). Material Circularity Indicator Methodology.

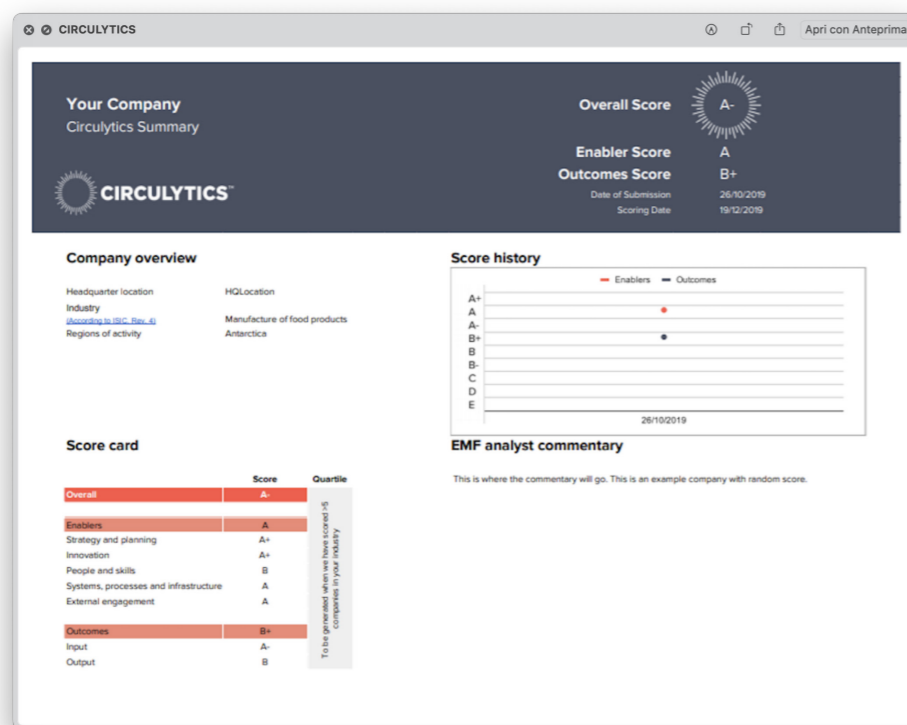
[64] Bocken, N., et al. (2016). Circular Business Models. Journal of Cleaner Production, 97, pp. 44-56.



La metodologia del MCI si basa su un approccio dettagliato che richiede l'inserimento di dati specifici relativi alla composizione del prodotto e ai materiali impiegati. Questo permette di ottenere un punteggio di circolarità ponderato, che integra variabili come la durabilità del prodotto e le possibilità di recupero dei materiali^[65]. La disponibilità di questo strumento tramite piattaforme digitali lo rende particolarmente accessibile e pratico, rappresentando un valido alleato per progettisti e aziende che desiderano monitorare e ottimizzare il proprio impegno verso la sostenibilità. Nel gennaio 2020, la Ellen MacArthur Foundation (EMAF) ha introdotto Circulytics® (Fig. 10), un tool online sviluppato con l'obiettivo di supportare le imprese nella transizione verso modelli di economia circolare. Il tool è progettato per misurare la circolarità di un'intera organizzazione, andando oltre la valutazione dei singoli prodotti o flussi di materiali, fornendo informazioni utili per facilitare i processi decisionali e definire strategie di sviluppo aziendale. I risultati, che vengono presentati sotto forma di "scorecard"

[65] Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016), Op.cit., pp. 11-32.

Fig. 9: Il Material Circularity Indicator Dynamic Modelling Tool dove possibile misurare l'MCI per un dato prodotto attraverso un foglio di calcolo Excel scaricabile dal sito online della Fondazione Elle MacArthur.



102 Fig. 10: Il tool Circulytics® sviluppato con l'obiettivo di supportare le imprese nella transizione verso modelli di economia circolare. Fonte: Ellen MacArthur Foundation (2020).

confidenziale, consentono alle imprese di individuare le aree di miglioramento e di trarre ispirazione da casi studio di aziende che hanno già applicato con successo i principi dell'economia circolare. La scorecard si basa su due categorie di indicatori. La prima categoria, denominata "enablers" (fattori abilitanti), valuta la capacità dell'azienda di implementare e sfruttare le opportunità offerte dai modelli circolari. La seconda, chiamata "outcomes" (risultati), si fonda su metodi di misurazione consolidati dei flussi materiali e comprende anche indicatori relativi alla progettazione di prodotti e servizi e al consumo di energia. Per utilizzare il tool, le aziende devono registrarsi sul sito della Fondazione, creando un account che permette loro di accedere ad una piattaforma, tramite la quale si compila un questionario online. Le informazioni raccolte vengono elaborate per generare una scorecard che contiene un punteggio complessivo a livello aziendale, oltre a valutazioni più dettagliate suddivise per categoria e argomenti.

I dati forniti dalle imprese, dopo essere stati anonimizzati e aggregati, contribuiscono alla creazione di benchmark settoriali, sebbene le informazioni specifiche delle singole aziende non vengano pubblicate. Va sottolineato che la Ellen MacArthur Foundation non valida né approva le scorecard generate, anche se mette a disposizione un toolkit per aiutare le imprese a comunicare i propri progressi ai clienti e agli stakeholder. Tra le informazioni richieste, solo i dati generali sono obbligatori, mentre le risposte omesse alle altre domande non contribuiscono al punteggio finale. Inoltre, alcune aziende, se lo desiderano, possono essere selezionate come case

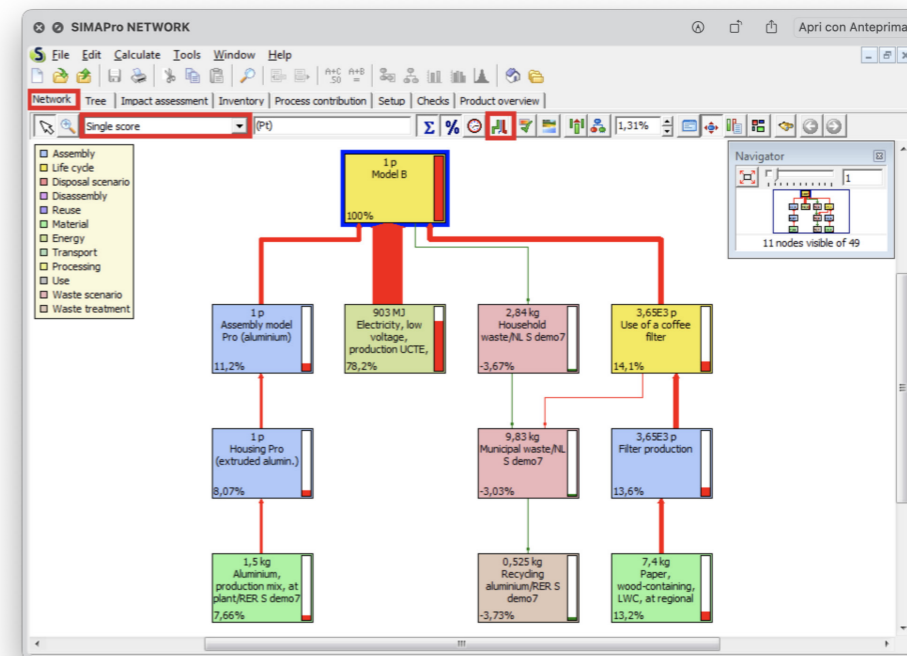


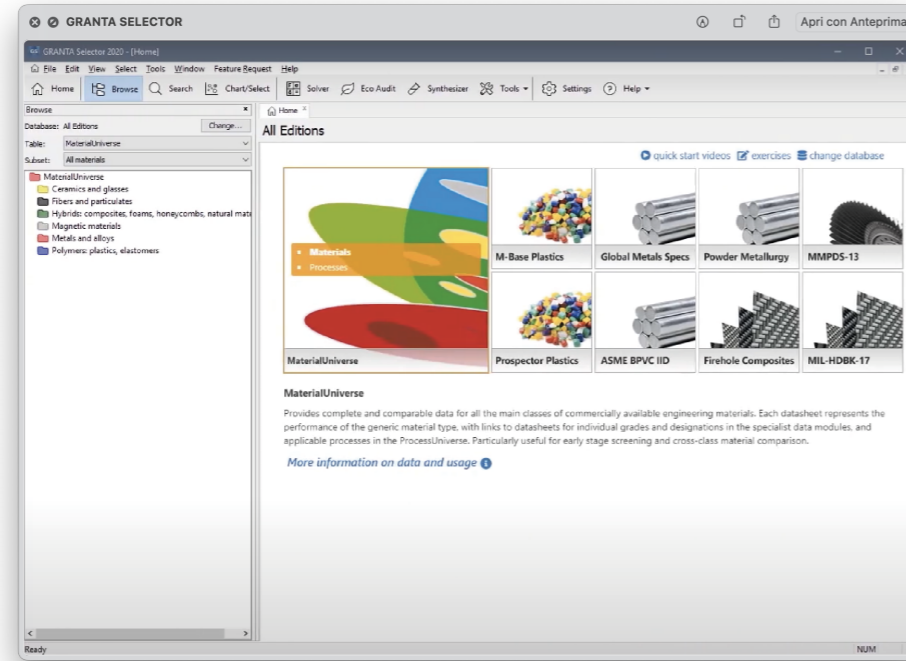
Fig. 11: interfaccia del software le l'analisi LCA SimaPro. 103

study, diventando esempi ispiratori di soluzioni basate sui principi di circolarità. Oltre al MCI e al Circulytics, si possono utilizzare altri strumenti e metodologie che arricchiscono ulteriormente la valutazione della circolarità.

Tra questi, un ruolo significativo è svolto dagli Eco-Design Tools, i quali consentono di analizzare, valutare e migliorare il ciclo di vita di un prodotto, considerando diversi aspetti, tra cui materiali, energia e riciclabilità. Questi strumenti si rivelano essenziali non solo per soddisfare le normative ambientali sempre più stringenti, ma anche per rispondere alla crescente domanda di soluzioni rispettose dell'ecosistema. Tra gli strumenti più importanti, emerge il Life Cycle Assessment (LCA), una metodologia che permette di analizzare il ciclo di vita completo di un prodotto, includendo le fasi di estrazione delle materie prime, produzione, distribuzione, utilizzo e smaltimento.

Grazie a software specifici, come SimaPro (Fig. 11), è possibile individuare le fasi più impattanti e adottare strategie per minimizzare gli effetti ambientali, contribuendo così alla realizzazione di progetti più sostenibili. Per quanto riguarda la scelta dei materiali, gli strumenti per la selezione dei materiali sostenibili giocano un ruolo cruciale, in quanto supportano i designer nella scelta di alternative a basso impatto ambientale.

Strumenti come Granta Selector (Fig. 12) offrono database dettagliati che classificano i materiali in base alla loro riciclabilità, durata e sostenibilità, permettendo di bilanciare le esigenze funzionali ed ecologiche. Il Material Flow Analysis (MFA) è una metodologia



104 Fig. 12: Granta Selector.

analitica che, attraverso una sistematica raccolta e interpretazione di dati, consente di quantificare i flussi di materiali all'interno di un sistema definito, concentrandosi sull'analisi di tali flussi per fornire un quadro dettagliato dell'efficienza nell'uso delle risorse all'interno del sistema stesso^[66]. Questo sistema, che può essere rappresentato da una regione geografica, un settore industriale o un'intera nazione, viene analizzato per comprendere come i materiali vengano estratti, trasformati, utilizzati e smaltiti. Grazie a questa analisi, diventa possibile identificare inefficienze, proporre soluzioni più sostenibili e promuovere una gestione più responsabile delle risorse. La metodologia dell'MFA, che si basa su un approccio quantitativo, prevede innanzitutto la definizione dei confini del sistema, i quali possono essere delimitati sia spazialmente (ad esempio una città o un'industria) sia temporalmente (ad esempio un anno solare). Una volta stabiliti questi limiti, si procede con l'identificazione dei materiali di interesse, che possono includere risorse naturali, come minerali, legname o acqua, oppure prodotti specifici, come plastica, metalli o rifiuti industriali. Dopo aver completato questa analisi preliminare, strumenti operativi possono essere impiegati per approfondire specifici aspetti della sostenibilità e dell'economia circolare. In questo contesto, il MATREC Circular Tool (Fig. 13) si configura come uno strumento avanzato dedicato alla promozione dell'economia circolare, il cui

[66] Brunner, P.H. and Rechberger, H. (2004) 'Practical handbook of material flow analysis,' The International Journal of Life Cycle Assessment, 9(5), pp. 337-338.

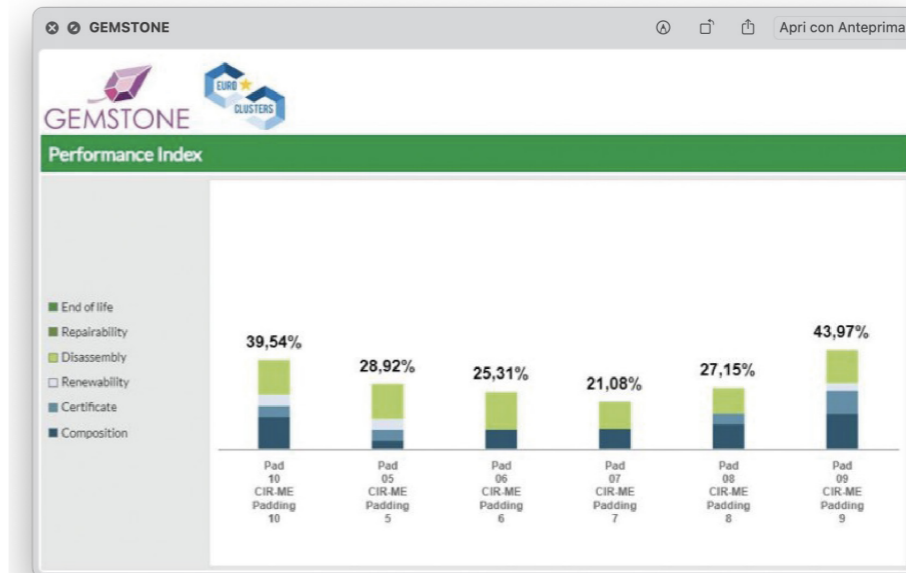
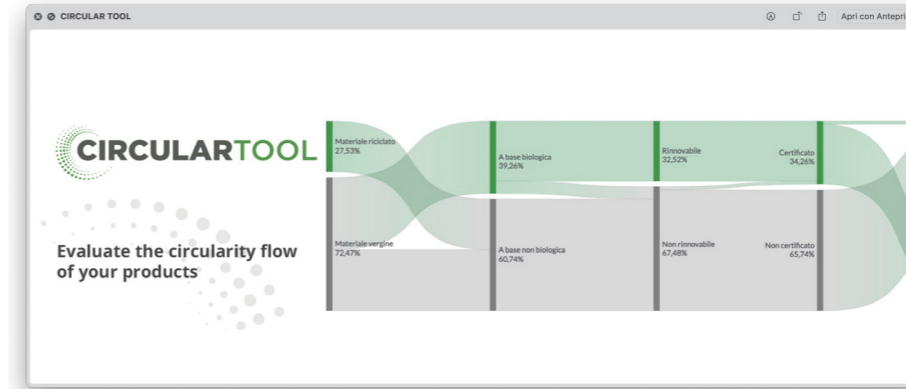


Fig. 13: MATREC Circular Tool.

obiettivo principale consiste nell'offrire supporto a professionisti e aziende che desiderano integrare principi di sostenibilità e circolarità nei loro progetti. Attraverso la combinazione di risorse analitiche e un ampio database di materiali sostenibili, il tool consente di valutare con precisione il livello di circolarità di un prodotto, tenendo conto di parametri fondamentali come l'impiego di materiali riciclati, la progettazione per il riuso e la facilità di riciclo. Grazie a un'interfaccia intuitiva, lo strumento non solo guida gli utenti nella selezione di materiali innovativi e a basso impatto ambientale, ma fornisce anche linee guida specifiche che favoriscono la progettazione responsabile, contribuendo a ridurre gli sprechi e ad aumentare l'efficienza delle risorse disponibili. Un elemento distintivo del MATREC Circular Tool risiede nella capacità di generare report dettagliati che possono essere utilizzati sia per monitorare le prestazioni ambientali dei progetti, sia per comunicare in modo efficace gli sforzi sostenibili a stakeholder e clienti, incrementando la trasparenza e il valore percepito delle iniziative intraprese. Inoltre, lo strumento agevola il benchmarking, permettendo alle aziende di confrontare le proprie prestazioni con quelle delle migliori pratiche del settore, così da identificare margini di miglioramento e opportunità per innovare.

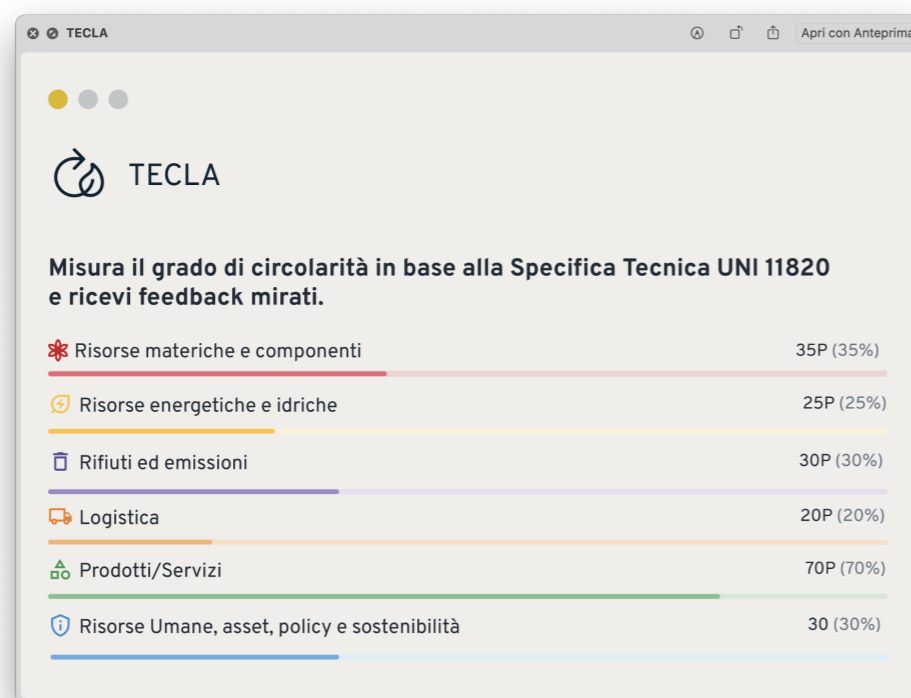


Fig. 14: TECLA Tool.

Altro strumento è il TECLA Tool (Fig. 14) pensato per promuovere e attuare un approccio circolare nel settore dell'arredamento, con l'obiettivo di trasformare le pratiche produttive in chiave sostenibile. In particolare, questo tool pone al centro la valorizzazione dei materiali provenienti da fonti rinnovabili, mirando a ridurre la dipendenza da risorse non sostenibili. Contestualmente, favorisce il riutilizzo dei prodotti attraverso l'adozione di strategie che ne allungano il ciclo di vita, come la riparazione e il recupero. Tra le sue componenti principali si distingue la guida alla progettazione sostenibile, che, fornendo indicazioni su come creare arredi facilmente disassemblabili e riparabili, promuove anche l'utilizzo di materiali riciclabili e sostenibili.

Un altro elemento di grande rilievo è rappresentato dalla valutazione del ciclo di vita (LCA), la quale offre strumenti utili per analizzare in dettaglio gli impatti ambientali dei prodotti lungo tutte le loro fasi, dalla produzione fino allo smaltimento.

Inoltre, mette a disposizione un'ampia gamma di risorse formative che, attraverso workshop e corsi dedicati, permettono ad aziende e progettisti di apprendere le migliori pratiche legate all'economia circolare, offrendo loro l'accesso a un database ricco di materiali innovativi e sostenibili. Lo strumento, infine, favorisce la creazione di una rete collaborativa tra imprese, artigiani ed esperti di sostenibilità, incentivando così la condivisione di esperienze e l'elaborazione di soluzioni innovative. Un ulteriore strumento di rilievo è l'Eco-Labeling, che fornisce certificazioni per i prodotti che soddisfano determinati criteri di sostenibilità e circolarità.

Questi marchi (Fig. 15), riconosciuti a livello internazionale, offrono ai consumatori l'opportunità di operare scelte più consapevoli, incentivando le aziende a migliorare le proprie pratiche di appro-

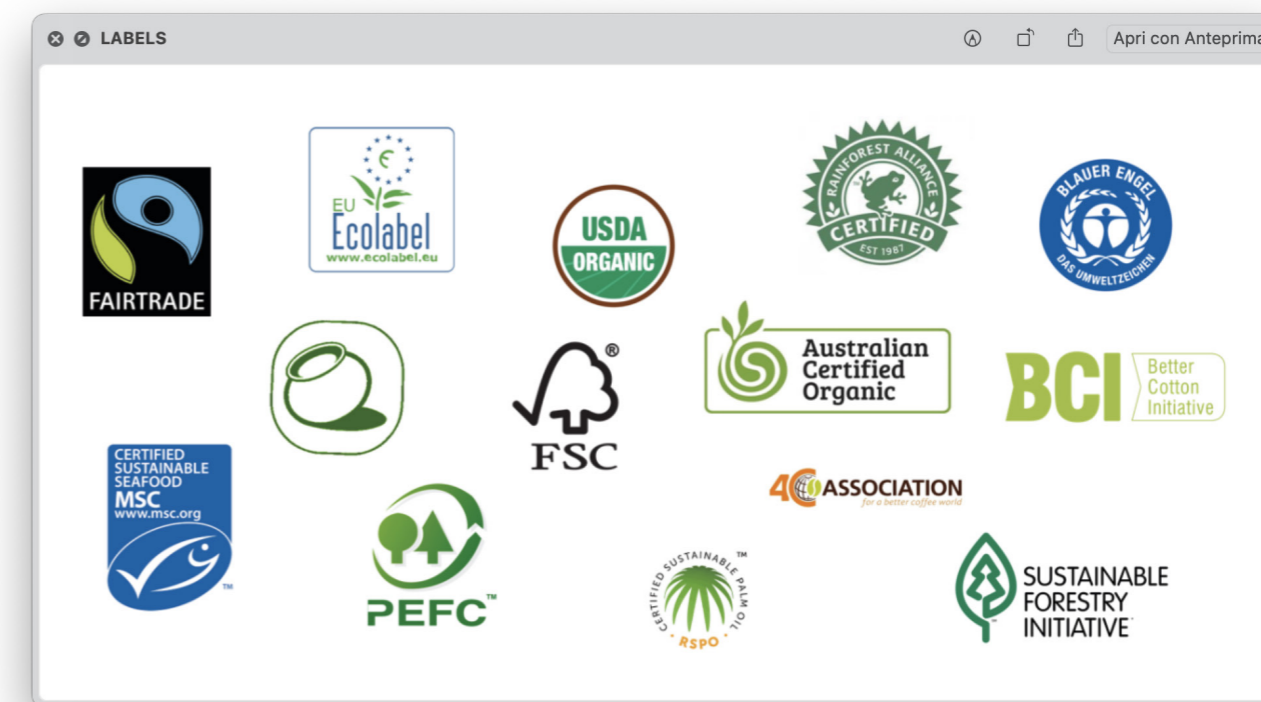


Fig. 15: Marchi Eco-Labeling.

vigionamento e produzione. Oggi i consumatori sono sempre più informati e attenti all'impatto ambientale delle loro decisioni d'acquisto; pertanto, l'Eco-Labeling gioca un ruolo cruciale nel guidare il mercato verso un orientamento più circolare.

Inoltre, l'uso di piattaforme di riciclo e recupero rappresenta un ulteriore strumento pratico per facilitare la circolarità. Tali piattaforme online mettono in contatto aziende, consumatori e centri di recupero, semplificando la raccolta e il riciclo dei materiali. Attraverso queste reti, è possibile promuovere un'economia basata sulla condivisione, dove i materiali possono rientrare nel ciclo produttivo piuttosto che terminare in discarica.

A livello politico, l'introduzione di normative e direttive sul design circolare, come quelle promosse dall'Unione Europea, influenza in modo significativo l'orientamento del mercato, poiché tali regolamenti incoraggiano comportamenti aziendali più responsabili e sostenibili. Attraverso queste normative, le istituzioni creano un quadro che rende la circolarità non solo una scelta strategica, ma un requisito fondamentale per competere nel mercato globale. Per applicare in modo efficace strumenti come il Material Circularity Indicator (MCI), l'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) e l'Analisi dei Flussi di Materiale (MFA), sono necessarie competenze specifiche. Queste possono essere sviluppate mediante programmi di formazione mirati, che aiutano le aziende a rafforzare le proprie capacità e a rispondere in modo adeguato alle sfide legate alla sostenibilità^[67].

[67] Stahel, W. R. (2016), Op.cit., pp. 435-438.

Bibliografia

Ahmad, S., Wong, K. Y., Tseng, M. L., & Wong, W. P. (2018). Sustainable product design and development: A review of tools, applications, and research prospects. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, pp. 401–405.

Andrews, D. (2015). The circular economy, design thinking and education for sustainability. *Local Economy*, 30(3), pp. 305–306.

Bakker, C., Hollander, M., van Hinte, E., & Zijlstra, Y. (2014). Products that last: Product design for circular business models. TU Delft Library, p. 45.

Bhamra, T., & Lofthouse, V. (2007). Design for sustainability: A practical approach. Gower Publishing, pp. 68–71.

Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), pp. 308–320.

Bocken, N. M. P., Short, S. W., Rana, P., & Evans, S. (2016). A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*, 65, pp. 42–56.

Braungart, M., & McDonough, W. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North Point Press, pp. 56–59.

Brezet, H., & van Hemel, C. (1997). *Ecodesign: A promising approach to sustainable production and consumption*. United Nations Environment Programme, pp. 45–47.

Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2004). Practical handbook of material flow analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(5), pp. 337–338.

Chen, Y. S., Lai, S. B., & Wen, C. T. (2006). The influence of green innovation performance on corporate advantage in Taiwan. *Journal of Business Ethics*, 67(4), pp. 331–339.

Colin de Kwant et al. (2021). Circular economy business models: Opportunities for sustainability in electric vehicles and home appliances. *Journal of Sustainable Development*, pp. 45–67.

Daly, H. E. (2007). *Ecological economics and sustainable development: Selected essays of Herman Daly*. Edward Elgar Publishing, pp. 123–130.

Driessen, P. H., Hillebrand, B., Kok, R. A., & Verhalen, T. M. M. (2013). Green product innovation in small firms: The role of regulatory focus. *Journal of Product Innovation Management*, 30(6), pp. 1083–1097.

Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Circularity indicators: An approach to measure circularity. Methodology & project overview*. Cowes, UK, pp. 22–26.

Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Material circularity indicator methodology*.

Elia, V., Gnoni, M. G., & Tornese, F. (2017). Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 142, pp. 2741–2751.

European Commission. (2019). *Circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe*. Publications Office of the European Union, pp. 14–16.

European Environment Agency. (1999). *Environmental indicators: Typology and overview*. Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/TEC25>, pp. 1–45.

Ferrara, M., & Squatrito, A. (2022). Innovative sustainable materials in design: Opportunities and challenges. *International Journal of Architecture, Art & Design*, 11, pp. 288–299.

Gaziulusoy, A. I. (2015). A critical review of approaches to design for system innovations and transitions. *Journal of Cleaner Production*, pp. 119–121.

Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, pp. 11–32.

Goyal, S., Esposito, M., & Kapoor, A. (2016). Circular economy: Potential and challenges. *Technological Forecasting and Social Change*, pp. 40–42.

Griffiths, P., & Cayzer, S. (2016). Design of indicators for measuring product performance in the circular economy. In *Smart innovation, systems and technologies*, pp. 307–321.

Latouche, S. (2007). *Petit traité de la décroissance sereine*. Mille et une nuits, pp. 15–18.

Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular

economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, pp. 30–32.

MacArthur, E. (2013). The great recovery: Investigating the role of design in the circular economy. *RSA*, pp. 12–15.

Manzini, E. (2015). *Design, when everybody designs: An introduction to design for social innovation*. MIT Press, pp. 75–102.

Manzini, E., & Vezzoli, C. (2007). *Design for environmental sustainability*. Springer, pp. 78–82.

McLennan, J. F. (2004). *The philosophy of sustainable design: The future of architecture*. Ecotone Publishing, p. 12.

Moreno, M., De los Rios, C., Rowe, Z., & Charnley, F. (2016). A conceptual framework for circular design. *Sustainability*, pp. 582–584.

Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular economy: Measuring innovation in the product chain*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, pp. 24–27.

Rocha, C. S., Antunes, P., & Partidário, P. (2019). Design for sustainability models: A multiperspective review. *Sustainability*, pp. 1428–1445.

Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., & Cluzel, F. (2017). How to assess product performance in the circular economy? Proposed requirements for the design of a circularity measurement framework. *Recycling*, 2(1), p. 6.

Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2012). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, 15, pp. 281–299.

Stahel, W. R. (2016). *The circular economy: A user's guide*. Routledge, pp. 435–438.

Su, B., Heshmati, A., Geng, Y., & Yu, X. (2013). A review of circular economy practices. *Journal of Cleaner Production*, pp. 215–217.

Thackara, J. (2005). *In the bubble: Designing in a complex world*. MIT Press, p. 78.

Tukker, A. (2015). Product services for a resource-efficient and circular economy – A review. *Journal of Cleaner Production*, 97, pp. 76–91.

UNESCO. (2007). *Education for sustainable de-*

velopment: A global perspective. UNESCO Publishing, p. 45.

Vezzoli, C., & Kohtala, C. (2018). *Design for sustainability: A step-by-step approach*. Springer, pp. 90–105.

Winkler, H. (2011). *Closed-loop economy and circular design principles*. EcoDesign Press, pp. 112–115.

World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford University Press, pp. 43–46.

Capitolo 3

Dal prodotto al prodotto come servizio: strategie e modelli di business per un approccio circolare

- 3.1. Concetto di prodotto come servizio (PaaS)
- 3.2. Impatto del modello PaaS nel design sulla sostenibilità e circolarità
- 3.3. Prospettive di sviluppo del circular design nei settori del Made in Italy

3.1. Concetto di prodotto come servizio (PaaS)

L'evoluzione dei modelli di business orientati al prodotto verso approcci focalizzati sulla soluzione rappresenta un cambiamento paradigmatico che ha trovato le sue prime radici nella letteratura a partire dal 1962 e che è stato successivamente approfondito sotto molteplici prospettive teoriche, spesso con terminologie differenti ma intrinsecamente sovrapponibili^[1]. Come evidenziato nel primo capitolo, Il Product-as-a-Service (PaaS) è parte integrante del modello dell'economia circolare. È un termine che viene utilizzato in vari ambiti e con significati diversi. Diversi sono inoltre i termini utilizzati per indicare il Product as a Service a seconda del campo di riferimento: l'ambito accademico utilizza infatti Product-Service System (PSS) e diverse sono le definizioni date nel corso del tempo da parte della letteratura scientifica.

A partire dal secondo millennio, il termine PSS acquista una notevole diffusione grazie alla pubblicazione di numerosi articoli su questo argomento. Tra le definizioni più rilevanti emerse nel corso degli anni, il concetto di "Servitizzazione" (Fig. 16), introdotto da Vandermerwe e Rada (1988), descrive il processo attraverso cui le imprese trasformano la propria offerta integrando servizi, al fine di creare maggiore valore per i clienti^[2]. In modo complementare, Goedkoop et al. (1999) hanno definito i Product-Service Systems (PSS) come sistemi che combinano prodotti, servizi, reti di supporto e infrastrutture, progettati per garantire la soddisfazione delle esigenze dei clienti minimizzando gli impatti ambientali^[3].

Un ulteriore contributo alla comprensione di questo approccio è dato da Tukker (2004), il quale ha elaborato il concetto di "Function-Oriented Business Models", sottolineando come questi modelli si concentrino sull'erogazione di una funzione o di un risultato, piuttosto che sulla semplice vendita di un prodotto^[4].

L'importanza di integrare progettazione di prodotto e servizi emerge in modo particolarmente evidente nel modello del "Functional Product", elaborato da Alonso-Rasgado et al. (2004), che enfatizza

[1] Boehm, M., & Thomas, O. (2013). Hybrid Value Creation. *Research-Technology Management*, pp. 23-25.

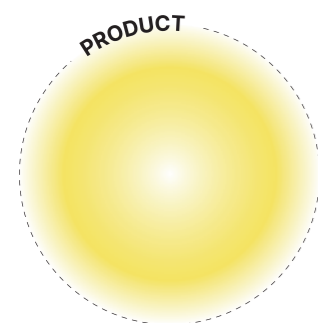
[2] Vandermerwe, S., & Rada, J. (1988). Servitization of business: Adding value by adding services. *European Management Journal*, 6(4), p. 315.

[3] Goedkoop, M. et al. (1999). Product-Service Systems, Ecological and Economic Basics. Report for the Dutch Ministries of Environment (VROM) and Economic Affairs (EZ), pp. 12-15.

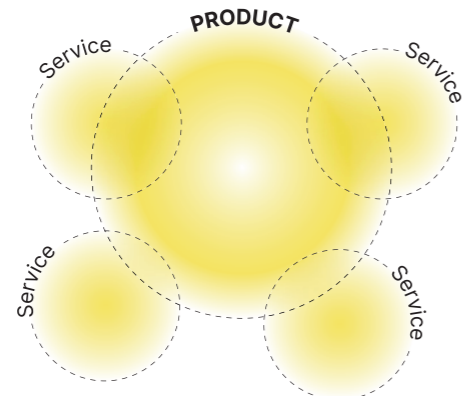
[4] Tukker, A. (2004). Eight Types of Product-Service System. *Business Strategy and the Environment*, pp. 246-247.

Il terzo capitolo esplora la transizione dal concetto di prodotto a quello di prodotto come servizio (PaaS). Viene discusso come il modello PaaS, che prevede l'offerta di prodotti come servizi, possa contribuire a migliorare la sostenibilità e la circolarità. Si esaminano le applicazioni pratiche di questo modello nel design e il suo impatto positivo sull'ambiente, analizzando anche le prospettive di sviluppo del circular design nei principali settori produttivi del Made in Italy.

Product or service
Product= value
Service= cost



Core product with added service (servicing)
Product= value
Service= differentiation



Product-Service System
Product + Service= value

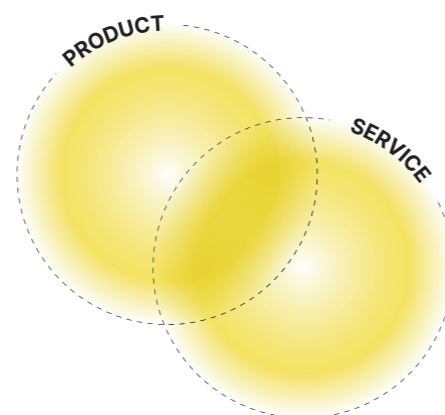


Fig. 16: Servitizzazione basata sul modello di Vandermerwe and Rada, (1988).

l'offerta di soluzioni "chiavi in mano", in cui il cliente riceve supporto continuo e manutenzione^[5]. Successivamente, Davies et al. (2006) hanno introdotto il termine "Integrated Solutions", evidenziando come la combinazione di prodotti e servizi in un unico pacchetto consenta di soddisfare in modo personalizzato le esigenze specifiche del cliente^[6]. Inoltre, Boehm e Thomas (2013) hanno contribuito alla discussione proponendo la nozione di "Hybrid Value Creation", con la quale hanno descritto l'integrazione sinergica di prodotti e servizi, non come entità distinte ma come elementi co-progettati, al fine di massimizzare il valore per le parti interessate^[7]. Tale approccio si lega ad altri concetti paralleli, come la "Sharing Economy" (Tukker, 2004)^[8], il "Industrial Product-Service System (IPSS)" (Meier et al., 2010)^[9] e il "Sustainable Product-Service System (S.PSS)", introdotto da Vezzoli et al. (2014), che pone una forte enfasi sulla sostenibilità e sull'adozione di modelli economici più responsabili dal punto di vista ambientale^[10]. Queste prospettive, pur differendo nei dettagli, convergono nell'evidenziare la trasformazione del ruolo delle imprese, non più limitate alla vendita di beni ma protagoniste nella fornitura di soluzioni integrate, capaci di rispondere alle complesse esigenze di mercato e di contribuire, al contempo, alla sostenibilità globale. Un'altra definizione, che divenne poi quella più citata nei paper a seguire, è quella di Mont (2002) che definisce il PSS non solo come una combinazione di prodotto e servizio ma come un sistema socioecono-

[5] Alonso-Rasgado, T., et al. (2004). The Design of Functional (Total Care) Products. *Journal of Engineering Design*, p. 520.

[6] Davies, A., et al. (2006). Integrated Solutions for Innovative Business Models. *European Management Journal*, p. 134.

[7] Boehm, M., & Thomas, O. (2013). Hybrid Value Creation. *Research-Technology Management*, pp. 27-28.

[8] Tukker, A. (2004). Sharing Economy as a Dimension of Sustainability. *Journal of Industrial Ecology*, pp. 112-113

[9] Meier, H., et al. (2010). Industrial Product-Service Systems (IPSS). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 483.

[10] Vezzoli, C., et al. (2014). Sustainable Product-Service Systems. Greenleaf Publishing, p. 105.

mico, "un sistema di prodotti, servizi, network e infrastrutture progettato per essere: competitivo, soddisfare le esigenze dei clienti e avere un minore impatto ambientale rispetto ai modelli di business tradizionali"^[11]. La maggior parte delle definizioni PSS enfatizza la "vendita dell'uso" invece di vendere il prodotto^[12].

Nei modelli di business tradizionali, il cliente acquisisce un prodotto, assumendosi la responsabilità di monitorarne le prestazioni, eseguire operazioni di manutenzione e assicurarne l'adeguato smaltimento. 'altra parte, nel concetto di PSS, il produttore guadagna dall'utilizzo da parte dei clienti del servizio fornito e la proprietà del prodotto non è necessariamente trasferita al cliente. L'idea chiave alla base dei sistemi prodotto-servizio è che i consumatori non richiedono specificamente prodotti, di per sé, ma piuttosto cercano l'utilità che questi prodotti e servizi forniscono^[13]. Questo spostamento di focus dalla ricerca di un prodotto a quella di una soluzione può essere definito come servitizzazione. Più precisamente, la servitizzazione è intesa come un processo che comporta «l'innovazione nelle capacità e nei processi di un'impresa, in modo che essa possa meglio creare valore – per il cliente e per l'impresa stessa – passando dalla vendita di prodotti alla vendita di sistemi di prodotto-servizio»^[14]. La servitizzazione consiste quindi in una combinazione di prodotti e servizi che portano a una risposta efficace ed efficiente dei bisogni del consumatore nel vendere soluzioni e risultati ai consumatori, piuttosto che prodotti tangibili. Invece di fornire solo i mezzi per soddisfare le esigenze dell'utente, i produttori stanno ora offrendo il valore effettivo di quell'oggetto tangibile^[15]. In questo senso l'acquirente non possiede più un bene fisico, ma l'attenzione si sposta su tutta una serie di fattori che prima erano a corollario del prodotto (ed a carico del

[11] Mont, O. (2002). Drivers and barriers for shifting towards more service-oriented businesses: Analysis of the PSS field and contributions from Sweden. *The Journal of Sustainable Product Design*, p. 239.

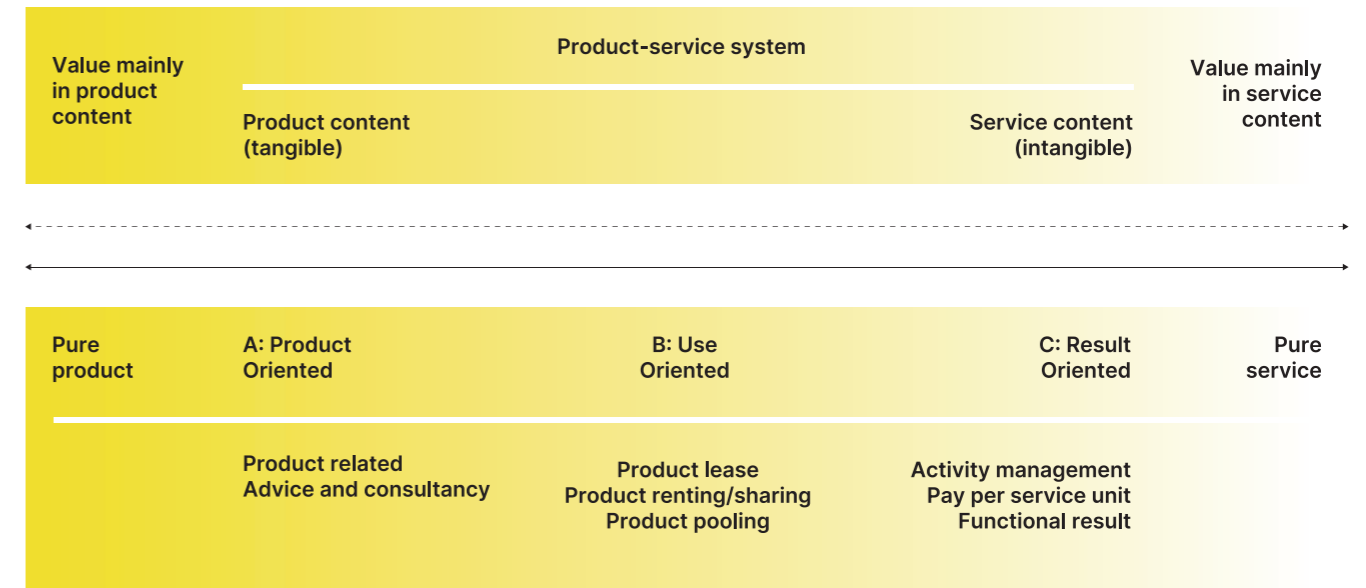
[12] Tukker, A. (2015). Product services for a resource-efficient and circular economy - A review. *Journal of Cleaner Production*, 97, pp. 76-91.

[13] Reim, W., Parida, V., & Örtqvist, D. (2015). Product-Service Systems (PSS) business models and tactics – a systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 97, pp. 61-75.

[14] Neely, A. (2009). "Exploring the Financial Consequences of the Servitization of Manufacturing." *Operations Management Research*, 1(2), pp. 103-118.

[15] Annarelli, A., Battistella, C., & Nonino, F. (2016). Product-Service System: A conceptual framework from a systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 139, pp. 1011-1032.

Fig. 17: Tipologie di sistemi prodotto-servizio. Fonte: Tukker, A., 2004. Otto tipi di sistemi prodotto-servizio: otto vie per la sostenibilità.



cliente) e che ora hanno acquisito un'importanza nuova e vengono veicolati insieme al prodotto. Possiamo quindi affermare che oggi i prodotti stanno lasciando spazio ai prodotti-servizi. Non vi è più la ricerca di prodotti (o servizi) in quanto tali ma di soluzioni, cioè qualcosa che finisce per essere più complesso del solo prodotto (o del solo servizio). Secondo Neely (2009), la servitizzazione implica l'innovazione nei processi e nelle capacità aziendali, consentendo alle imprese di rispondere in modo più efficace ai bisogni dei clienti e di garantire al contempo benefici economici più stabili e prevedibili, grazie all'adozione di modelli basati su ricavi ricorrenti, quali contratti di servizio o formule di leasing. Questo cambiamento, che sposta l'attenzione dal possesso del prodotto al suo utilizzo, richiede un significativo riassetto organizzativo, nonché l'integrazione di competenze trasversali in grado di coniugare la progettazione del prodotto con i servizi correlati. Tuttavia, come evidenziato dallo stesso autore, tale transizione non è priva di sfide, poiché comporta costi iniziali elevati, una maggiore complessità gestionale e la necessità di ridefinire il rapporto con i clienti, enfatizzando la capacità di comprendere e soddisfare le loro esigenze in modo dinamico. In questo contesto, la proposta di soluzioni integrate, che combinano prodotti e servizi in modo innovativo, consente alle imprese di differenziarsi dai competitor e di perseguire modelli di business più sostenibili e orientati al lungo termine. Nel corso degli anni, diverse classificazioni dei Product-Service Systems (PSS) sono state proposte, ma una delle più riconosciute nasce dal lavoro di Tukker^[16] nel 2004. L'autore, nell'analisi dei Product-Service Systems (PSS), evidenzia come questi modelli di business rappresentino un'opportunità per integrare prodotti tangibili e servizi intangibili, al fine di soddisfare in modo più efficace le esigenze dei clienti, promuovendo al contempo la sostenibilità e la competitività aziendale. Tuttavia, egli sottolinea che la loro effettiva implementazione e il loro impatto dipendono dalla specifica tipologia di PSS adottata, nonché dal contesto economico e ambientale in cui vengono applicati. Tukker identifica tre principali categorie di Product-Service Systems, ognuna caratterizzata da approcci distinti alla combinazione di prodotti e servizi (Fig. 17).

All'interno di queste tre categorie principali si articolano ulteriormente otto tipologie specifiche di PSS, che Tukker descrive per evidenziare le diverse modalità attraverso cui prodotti e servizi possono essere integrati per soddisfare le esigenze del cliente. La prima categoria è rappresentata dai servizi orientati al prodotto, in cui il focus del modello di business conserva ancora un approccio tradizionale alla vendita del prodotto fisico, con il cliente che ne mantiene la proprietà, ma a questo vengono aggiunti servizi accessori post-vendita per garantire l'efficienza e la durata del prodotto. Questi servizi possono includere, ad esempio, contratti di manutenzione, consulenza sull'uso del prodotto o accordi per il ritiro e il riciclo al termine del ciclo di vita riducendo così i costi di utilizzo durante il suo ciclo di vita. La seconda categoria comprende i servizi orientati all'uso, che si basano sull'idea che il prodotto non sia più venduto al cliente, ma rimanga di proprietà del fornitore. In questo caso, il prodotto viene messo a disposizione dell'utente attraverso formule come il leasing o la condivisione con altri utenti. Questo modello consente di massimizzare l'uso del prodotto, promuovendone la longevità e il recupero dei materiali. I clienti possono accedere ai prodotti attraverso diverse opzioni, come il leasing, l'affitto o il "product pooling". Nel leasing, i clienti pagano una tariffa regolare per l'uso esclusivo; nell'affitto, l'accesso è sequenziale tra vari utenti; nel "product pooling", più clienti utilizzano il prodotto simultaneamente. Questo approccio modifica radicalmente la relazione tra produttore e cliente, poiché la proprietà e la responsabilità del prodotto restano nelle mani del fornitore. Infine, la terza categoria, quella dei servizi orientati al risultato, sposta ulteriormente l'attenzione dal prodotto al risultato finale che il cliente desidera ottenere. In questo modello, il fornitore e il cliente si accordano su un obiettivo specifico, senza predeterminare i mezzi con cui tale obiettivo deve essere raggiunto. Ciò lascia al fornitore un'ampia libertà nell'elaborare soluzioni innovative, che potrebbero non prevedere affatto un prodotto fisico. Un esempio di questo approccio potrebbe essere un'azienda che non vende apparecchi

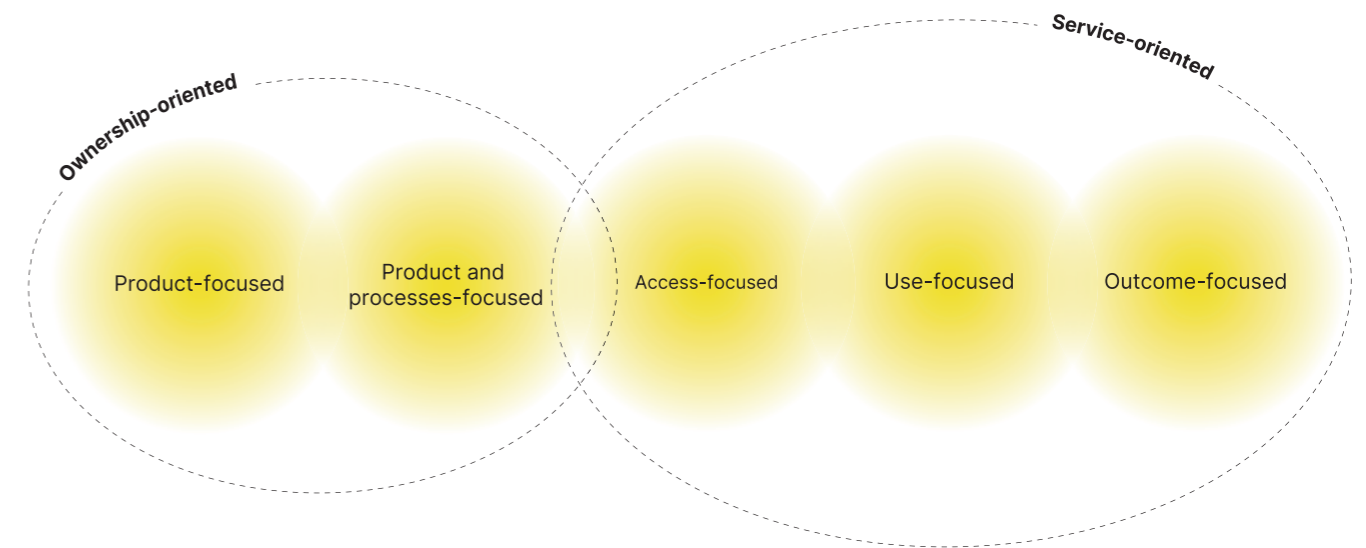
[16] Tukker, A. (2004). "Eight types of product-service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet." *Business Strategy and the Environment*, 13(4), pp. 246-260.

di climatizzazione, ma si impegna a garantire al cliente un ambiente lavorativo con temperature confortevoli. Questo tipo di PSS è particolarmente promettente per l'economia circolare, poiché il profitto si basa sul risultato ottenuto, incentivando il fornitore a minimizzare l'uso di materiali e risorse.

Tukker distingue ulteriormente tra tre tipi di servizi in questa categoria: outsourcing, pay per service unit-concepts, e functional result concept. Nell'outsourcing, il fornitore è responsabile delle operazioni e della manutenzione. Nel pay per service unit-concepts, il servizio è basato sul livello di utilizzo del prodotto fornito. Nel functional result concept, si stabilisce un accordo su un risultato, con il fornitore che mantiene la proprietà dei mezzi necessari per conseguirlo. Questa classificazione dimostra come, andando dai modelli più tradizionali ai più innovativi, si riduca progressivamente la centralità del prodotto fisico e aumenti la flessibilità del fornitore nel rispondere alle necessità dei clienti. Tukker mette in luce come i Product-Service Systems (PSS), grazie alla loro capacità di integrare e personalizzare prodotti e servizi, rappresentino un'opportunità strategica per generare valore aggiunto sia attraverso la fidelizzazione della clientela sia mediante un'innovazione più rapida e mirata. Tuttavia, non tutti i modelli di PSS si rivelano efficaci nel garantire benefici ambientali significativi, evidenziando contraddizioni e sfide operative.

In particolare, i modelli orientati al risultato, pur offrendo un elevato potenziale teorico per ridurre drasticamente gli impatti ambientali, si scontrano con problematiche pratiche quali la gestione del rischio e la definizione di indicatori di performance chiari e misurabili. Modelli come il leasing, spesso presentati come soluzioni sostenibili, possono produrre effetti contrari alle aspettative, favorendo un utilizzo meno responsabile da parte degli utenti e aumentando, paradossalmente, l'impatto ambientale complessivo. D'altra parte, i modelli basati sulla condivisione o sul pooling, che incentivano un uso intensivo dei beni, possono contribuire a una significativa riduzione degli impatti ambientali.

Tuttavia, tali approcci richiedono compromessi da parte dei clienti, sia tangibili sia intangibili, che ne riducono il valore percepito e, di conseguenza, la loro attrattività commerciale. Le soluzioni più semplici da implementare, come i servizi accessori o la consulenza, tendono a offrire miglioramenti incrementali sul piano ambientale,



poiché il sistema tecnologico di base rimane invariato e si limita a operare con maggiore efficienza. Al contrario, i modelli orientati al risultato, pur teoricamente promettenti, presentano ostacoli significativi nella loro applicazione, a causa di incertezze nella gestione delle responsabilità e di difficoltà nel controllo delle variabili necessarie per ottenere i risultati desiderati. Tukker sottolinea come la tensione tra sostenibilità e dinamiche di mercato costituisca una sfida cruciale per lo sviluppo e l'adozione dei PSS. Questa complessità richiede un approccio sistemico e multidimensionale, capace di bilanciare le esigenze delle imprese con la necessità di affrontare le pressanti sfide ambientali del nostro tempo.

Adrodegari et al. (2015) hanno proposto una nuova forma di tipologia di PSS che si basa sugli "elementi costitutivi del modello di business" che presenta "diversi meccanismi di ricavo per diverse proposte di valore e per selezionare le variabili rilevanti del modello di business che devono essere considerate al fine di definire una tipologia di PSS strutturata"^[17]. In questa tipologia, i servizi "orientati alla proprietà" sono simili ai servizi "orientati al prodotto" del punto di vista di Tukker (2004), mentre i servizi "orientati al servizio" sono più simili ai servizi "orientati all'uso" e "orientati al risultato". Gli autori hanno individuato cinque categorie suddivise in due gruppi: ownership-oriented e service-oriented. Nel PSS orientato alla proprietà, la vendita dei prodotti resta la principale fonte di ricavo, con i servizi venduti in aggiunta.

Questi servizi possono essere offerti con un approccio transazionale o relazionale. Il gruppo include i Product-focused PSS, dove i servizi sono venduti separatamente dal prodotto, e i product and processes focused PSS, dove il servizio viene offerto anche nella fase prevendita per ottimizzare gli acquisti. Nel Product-Service System (PSS) orientato al servizio, i guadagni principali derivano dai servizi connessi all'uso del prodotto, piuttosto che dalla vendita del prodotto stesso, di cui la proprietà rimane al fornitore.

[17] Adrodegari, F. et al., 2015. Dalla proprietà ai modelli di business orientati ai servizi: Un'indagine su aziende di beni strumentali e una tipologia di PSS. *Procedia CIRP*, 30, pp.245-250.

Fig. 18: Tipi di sistemi prodotto-servizio. Fonte: Adrodegari et al. (2015). Dalla proprietà ai modelli di business orientati ai servizi: Un'indagine in aziende di beni strumentali e una tipologia di PSS.

Questa categoria si suddivide in tre tipi principali: Access-focused PSS, Use-focused PSS, e Outcome-focused business PSS. Nel modello Access-focused, l'utente paga una quota fissa periodica per accedere al prodotto. Questa tariffa è indipendente dal livello di utilizzo del prodotto e può comprendere costi aggiuntivi come quelli per l'assicurazione o la manutenzione. Nel Use-focused PSS, invece, il cliente paga una quota variabile, calcolata in base al tempo effettivo di utilizzo del prodotto. Questo sistema incentiva un uso responsabile e ottimizzato del prodotto. Infine, nell'Outcome-focused business PSS, la tariffa è legata al raggiungimento di un risultato specifico, che viene concordato con il fornitore e formalizzato in un contratto. In questo caso, il pagamento dipende dall'effettiva realizzazione del risultato stabilito, incentivando l'efficacia e l'efficienza nel servizio offerto.

Il modello Product-as-a-Service (PaaS), inquadrato nel più ampio contesto dei Sistemi Prodotto-Servizio (PSS), rappresenta una delle strategie più significative per favorire la transizione verso un'economia circolare e sostenibile. Definito come un sistema che sposta l'attenzione dal possesso del prodotto alla fornitura della sua funzione, il PaaS si distingue per la capacità di allineare il design dei prodotti con modelli di business che valorizzano la sostenibilità ambientale, economica e sociale.

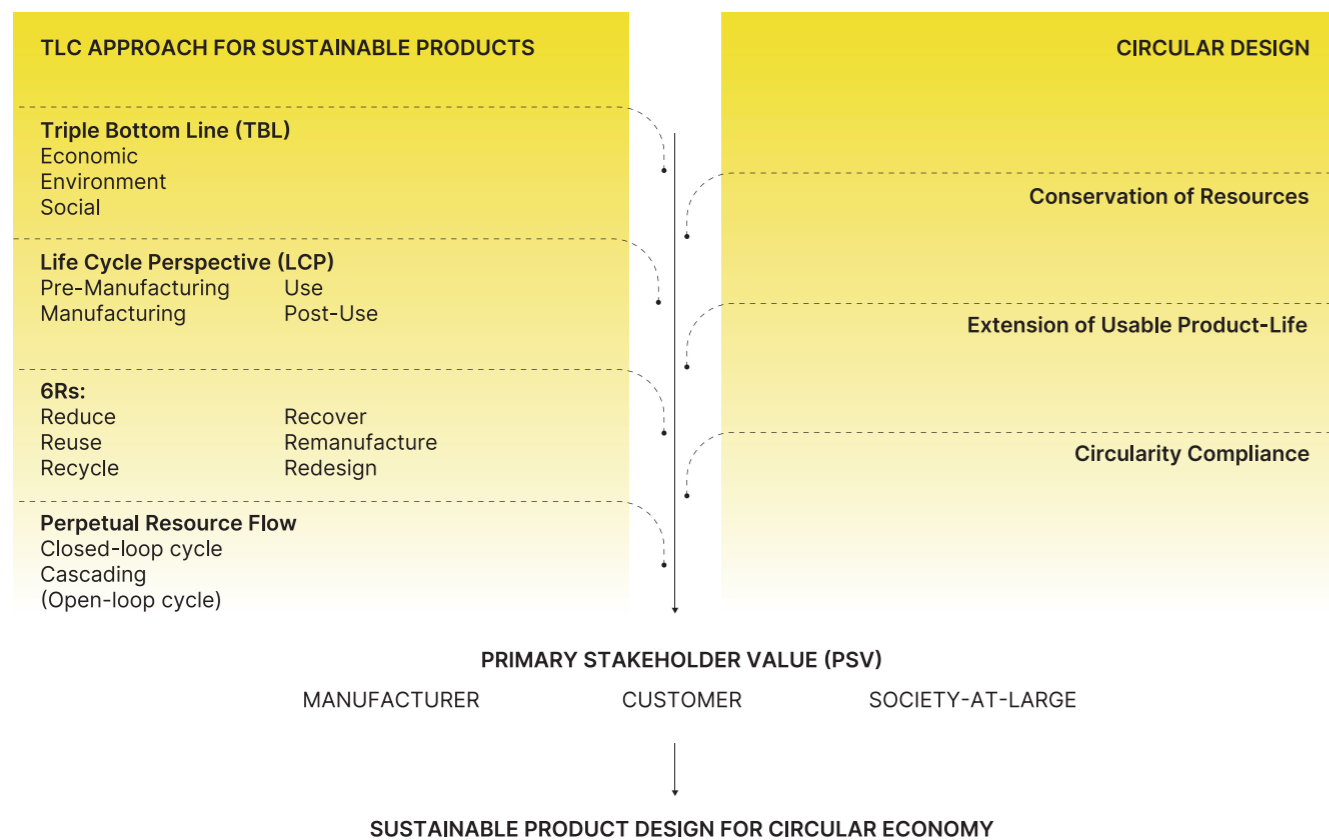
Tukker e Tischner (2006) offrono una riflessione approfondita sull'evoluzione di questo ambito negli ultimi anni. Gli autori si interrogano sulla maturità teorica del PSS come disciplina autonoma, evidenziando come, nonostante i progressi significativi, vi sia ancora necessità di un consolidamento teorico che ne rafforzi la struttura. Un tema centrale della loro analisi è il potenziale del PSS nel raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità, in particolare attraverso l'approccio del "Fattore 10"^[18], che punta a miglioramenti significativi nell'efficienza delle risorse. Sebbene promettente, l'implementazione su larga scala di tali modelli incontra ostacoli legati sia alle dinamiche di mercato sia alle complessità pratiche.

Inoltre, il PSS viene analizzato anche in termini di impatto sulla competitività aziendale, con particolare attenzione alla necessità di sviluppare modelli di business innovativi in grado di integrare efficacemente prodotti e servizi. Infine, gli autori sottolineano l'importanza di approcci integrati e interdisciplinari per sfruttare appieno il potenziale del PSS, evidenziando come il futuro della disciplina debba orientarsi verso strumenti più avanzati e una maggiore collaborazione tra settori^[19].

In questo contesto, il design assume un ruolo centrale, poiché deve essere concepito in funzione dell'intero ciclo di vita del prodotto. Secondo Neramballi et al. (2024), la trasformazione verso modelli di business circolari è realizzabile attraverso un'integrazione stra-

[18] Il "Fattore 10" è un principio di sostenibilità ambientale che propone di aumentare di dieci volte l'efficienza nell'uso delle risorse naturali, riducendo drasticamente l'impatto ambientale delle attività umane. Introdotto dal Wuppertal Institute negli anni '90, si basa sull'idea di produrre lo stesso livello di beni e servizi (o migliore) utilizzando solo un decimo delle risorse attualmente impiegate. Questo concetto promuove il disaccoppiamento tra crescita economica e consumo di risorse naturali, attraverso modelli innovativi come i sistemi prodotto-servizio (PSS), il design sostenibile e l'economia circolare, con l'obiettivo di garantire una gestione equa e responsabile del capitale naturale del pianeta.

[19] Tukker, A., & Tischner, U. (2006). Product-services as a Research Field, pp. 1552-1554.



122 Fig. 19: Considerazioni integrali sulla progettazione di prodotti sostenibili per l'economia circolare e loro sovrapposizione; "Closed-Loop Sustainable Product Design", approccio TLC.

tecnica tra la progettazione del prodotto e politiche che promuovano la circolarità. Tuttavia, gli autori evidenziano come barriere sistemiche, tra cui le catene di valore tradizionali e le infrastrutture obsolete, rappresentino ostacoli significativi all'adozione di soluzioni PaaS (Product-as-a-Service) realmente circolari.

Per superare tali difficoltà, propongono un framework politico che combina incentivi economici e regolamenti specifici volti a favorire la progettazione di prodotti facilmente smontabili e rigenerabili. In questa prospettiva, il modello PaaS non solo riduce i rifiuti e il consumo di risorse primarie, ma genera anche opportunità economiche, consentendo alle aziende di creare valore attraverso nuovi servizi, come manutenzione e aggiornamento dei prodotti, accanto alla tradizionale vendita. Affinché il modello PaaS si affermi, è fondamentale un approccio progettuale pienamente allineato ai principi della circolarità^[20]. Come evidenziato da Hapuwatte e Jawahir (2021), la progettazione sostenibile richiede un approccio integrato che consideri il Total Life Cycle (TLC), ovvero l'intero ciclo di vita del prodotto, dalla produzione all'uso fino alla gestione del fine vita. Questo approccio implica strategie mirate a minimizzare l'impatto ambientale e massimizzare il valore economico e sociale, adottando pratiche come il recupero dei materiali e la rigenerazione delle risorse. Per supportare questa visione, gli autori propongono il

[20] Neramballi, A., Smith, D. E., & Ziegler, R. E. (2024). Toward a policy landscape to support the product-as-a-service design process for a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, pp. 1045-1059.

modello di "Closed-Loop Sustainable Product Design", che si basa sull'adozione delle 6Rs: Ridurre, Riutilizzare, Riciclare, Riprogettare, Rigenerare e Recuperare. Questo modello integra la progettazione per la modularità e la riparabilità, facilitando interventi di manutenzione, smontaggio e rigenerazione, e creando flussi rigenerativi che chiudano efficacemente il ciclo di vita del prodotto (Fig. 19). Il "Closed-Loop Sustainable Product Design" si inserisce quindi come componente essenziale dell'approccio TLC, promuovendo non solo la sostenibilità ambientale ma anche nuove opportunità economiche attraverso una gestione efficiente delle risorse allineandosi sia al PaaS che al PSS, fornendo un quadro concettuale e operativo per integrare i prodotti e i servizi in un modello di economia circolare. Gli autori ribadiscono inoltre l'importanza di sviluppare strumenti e metriche che consentano ai progettisti di valutare l'efficacia delle strategie circolari e di pianificare interventi più mirati, capaci di ridurre al minimo gli sprechi e di ottimizzare l'intero sistema di progettazione e produzione^[21]. Un elemento cruciale per il successo del modello PaaS è la capacità di misurare l'impatto delle strategie di circolarità attraverso indicatori adeguati. Nußholz (2017) sottolinea che il passaggio da un modello economico tradizionale basato sulla vendita di prodotti a uno incentrato sull'erogazione di servizi rappresenta una strategia chiave per ridurre l'impatto ambientale. Questo approccio consente di disaccoppiare la crescita economica dall'uso intensivo delle risorse naturali, ponendo l'accento su concetti come il leasing e il pay-per-use. Questi modelli favoriscono una gestione più efficiente delle risorse, riducendo sprechi e risorse inutilizzate, e al contempo promuovono l'accessibilità ai beni, democratizzando il consumo. In pratica, il valore non risiede più nella proprietà del bene, ma nella sua funzionalità, sostenendo una transizione verso un'economia circolare basata sull'utilizzo anziché sul possesso^[22]. I contributi di Beuren et al. (2013), Kuijken et al. (2017) e Vezzoli et al. (2015) rafforzano questa visione, descrivendo i Sistemi Prodotto-Servizio come una combinazione di prodotti tangibili e servizi

[21] Hapuwatte, N., & Jawahir, I. S. (2021). Closed-loop sustainable product design: integrating circularity and sustainability for future industries. *Journal of Industrial Ecology*, 25(3), pp. 531-546.

[22] Nußholz, J. L. K. (2017). Circular business models: Defining a concept and framing an emerging research field. *Sustainability*, 9(10), p. 1815.

intangibili, progettati per soddisfare i bisogni dei consumatori in modo più efficiente e sostenibile. Essi sottolineano che il PaaS permette di estendere la vita utile dei prodotti, rendendoli più facili da riparare, aggiornare e rigenerare, grazie a un design modulare e smontabile. In questa prospettiva, il valore non è più determinato dalla quantità di prodotti venduti, ma dalla capacità del sistema di offrire prestazioni sostenibili e di lungo termine. L'integrazione tra design e modelli di business è un ulteriore aspetto critico per il successo del PaaS. Beuren et al. (2013) descrivono i Sistemi Prodotto-Servizio (PSS) come una combinazione di prodotti e servizi progettati per soddisfare in modo sostenibile le esigenze dei consumatori. Questo approccio consente di estendere la vita utile dei prodotti, enfatizzando la facilità di riparazione, aggiornamento e rigenerazione, grazie a soluzioni di design come la modularità e la disassemblabilità. I PSS non si limitano a offrire valore tramite la vendita di un bene, ma creano un sistema in cui l'efficienza e la sostenibilità sono centrali. Gli autori suggeriscono che questa visione può ridurre significativamente l'impatto ambientale e generare un cambiamento culturale nei consumatori verso un uso più consapevole delle risorse^[23].

Kuijken et al. (2017) forniscono un framework basato sul valore per definire cosa rende efficace un Sistema Prodotto-Servizio. Essi sottolineano che i PSS devono essere progettati per massimizzare il valore sia per il consumatore che per l'azienda, ponendo l'accento sulla qualità del servizio e sulle performance del sistema piuttosto che sulla vendita del prodotto fisico. Questo approccio consente di mantenere una relazione di lungo termine con i clienti, incentivando strategie che allungano il ciclo di vita del prodotto e promuovono la sostenibilità. Inoltre, gli autori evidenziano che la chiave per il successo di questi modelli è un design che renda i prodotti facilmente aggiornabili e rigenerabili^[24].

Vezzoli et al. (2015) analizzano le sfide e le opportunità associate all'implementazione dei Sistemi Prodotto-Servizio in un contesto sostenibile. Essi evidenziano che un design adeguato, combinato

[23] Beuren, F. H., Gomes Ferreira, M. G., & Cauchick Miguel, P. A. (2013). Product-service systems: A literature review on integrated products and services. *Journal of Cleaner Production*, 47, pp. 222–231.

[24] Kuijken, B., Gemser, G., & Wijnberg, N. M. (2017). Effective product-service systems: A value-based framework. *Journal of Cleaner Production*, 140, p. 25.

con modelli di business innovativi, è essenziale per il successo del PSS. L'approccio suggerito si concentra sulla progettazione modulare, che facilita riparazioni, aggiornamenti e riutilizzo, riducendo così i costi di produzione e l'impatto ambientale. Inoltre, l'integrazione tra design e modelli di business aiuta a creare un sistema resiliente e sostenibile, capace di adattarsi alle esigenze dei consumatori e alle mutevoli condizioni di mercato. Secondo gli autori, un elemento chiave è il passaggio dalla proprietà alla fruizione, trasformando il concetto di consumo^[25].

Pieroni et al. (2019) affermano che l'integrazione tra design orientato alla sostenibilità e modelli di business è cruciale per promuovere un'economia circolare e ottimizzare l'uso delle risorse lungo tutto il ciclo di vita dei prodotti. Questo approccio implica una stretta connessione tra il modo in cui i prodotti sono progettati e il modo in cui vengono distribuiti, utilizzati e gestiti a fine vita. La sincronizzazione tra design e modelli di business sostenibili consente di creare valore non solo economico, ma anche ambientale e sociale, riducendo lo spreco e aumentando la durata di vita dei beni. Ad esempio, l'adozione di pratiche come la progettazione modulare o il design per la disassemblabilità facilita la manutenzione e il riutilizzo dei componenti, mentre il design per il riciclo consente di recuperare materiali preziosi a fine vita del prodotto. Tali strategie devono essere supportate da modelli di business che incentivano questi comportamenti, come il pay-per-use, il leasing o il "product-as-a-service". Questo garantisce un uso efficace delle risorse e riduce l'impatto ambientale complessivo^[26]. Allo stesso modo, secondo Rossi et al. (2020), gli indicatori tradizionali risultano insufficienti, poiché non riescono a catturare la complessità della circolarità. Gli autori propongono quindi un sistema di metriche multidimensionali che valuta non solo gli impatti ambientali, ma anche quelli economici e sociali, fornendo così un quadro completo delle performance delle aziende che adottano pratiche circolari. Questi indicatori si dimostrano particolarmente utili nel contesto

[25] Vezzoli, C., Ceschin, F., Diehl, J. C., & Kohtala, C. (2015). Why have "sustainable product-service systems" not been widely implemented?. *Journal of Cleaner Production*, 35, pp. 288–290.

[26] Pieroni, M. P., McAloone, T. C., & Pigosso, D. C. (2019). Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches. *Journal of Cleaner Production*, 215, p. 205.

del modello PaaS, in cui il design dei prodotti deve essere strettamente integrato con l'innovazione nei modelli di business^[27]. Zacho et al. (2018) rafforzano questa visione, proponendo una concezione più ampia del valore generato dal PaaS, che tenga conto non solo dell'efficienza economica, ma anche dei vantaggi sociali e culturali derivanti da modelli più equi e sostenibili^[28].

Il modello PaaS, inserito nel quadro dei PSS, rappresenta una soluzione concreta per ripensare le pratiche di design e produzione in un'ottica di sostenibilità e circolarità. Attraverso un design strategico, supportato da innovazioni nei modelli di business e da politiche adeguate, il PaaS consente di prolungare la vita utile dei prodotti, ridurre i rifiuti e ottimizzare l'uso delle risorse. Tuttavia, il suo successo dipende dalla capacità di superare barriere sistemiche e culturali, adottando strumenti di misurazione e approcci integrati che bilancino i benefici ambientali, economici e sociali. In questo senso, il PaaS si afferma come un pilastro fondamentale per la transizione verso un'economia sostenibile e circolare.

[27] Rossi, M., Cagno, E., & Neri, A. (2020). Circular economy metrics: measuring the impact of circular economy principles on sustainability. *Sustainable Production and Consumption*, 23, 128-143.

[28] Zacho, K. O., Mosgaard, M. A., & Riisgaard, H. (2018). Capturing uncaptured values: a circular economy approach to reducing waste in the building and construction industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, pp. 318-328.

Il Circular design rappresenta un approccio strategico per affrontare le sfide legate alla sostenibilità nei settori produttivi del Made in Italy. Fondato sui principi dell'economia circolare, questo modello promuove la riduzione degli sprechi, la progettazione di prodotti orientati alla riparabilità, al riutilizzo e al riciclo, e l'impiego di materiali a basso impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita. Nel contesto del Made in Italy, riconosciuto a livello internazionale per l'eccellenza nei settori dell'arredamento, della moda e del design industriale, il Circular design costituisce non solo una risposta alle crescenti sfide ambientali, ma anche un'opportunità per rafforzare la competitività globale e la sostenibilità dei processi produttivi. Il settore legno-arredo, una delle eccellenze del Made in Italy, è particolarmente rilevante per l'applicazione dei principi del Circular Design. Da sempre legato all'uso di materiali naturali e a processi artigianali di alta qualità, il comparto si trova oggi ad affrontare trasformazioni significative per promuovere una gestione responsabile delle risorse e progettare prodotti più sostenibili.

Il legno, materia prima simbolica del settore, rappresenta il fulcro di questa transizione verso la circolarità. Le strategie includono l'utilizzo di legname certificato, proveniente da foreste gestite in modo sostenibile (ad esempio con certificazioni FSC o PEFC), e il recupero degli scarti di lavorazione per la produzione di nuovi materiali, come pannelli truciolari o compositi bio-based.

Nel Settore legno-arredo, la progettazione modulare, che facilita la riparazione e l'aggiornamento dei prodotti, consente di sostituire componenti specifici senza compromettere l'integrità del prodotto, prolungandone così la vita utile e riducendo la quantità di rifiuti generati. Tale approccio non solo risponde alle esigenze di sostenibilità ambientale nel settore, ma si integra perfettamente con la tradizione italiana di design orientato alla qualità e alla funzionalità. Parallelamente, l'adozione di materiali sostenibili e innovativi si sta diffondendo rapidamente. Oltre al legno recuperato, molte aziende italiane stanno sperimentando materiali alternativi, come pannelli realizzati con fibre naturali (canapa, lino) e materiali biodegradabili. Questi materiali non compromettono l'estetica e la qualità dei prodotti, ma offrono nuove opportunità per coniugare il rispetto per l'ambiente con l'eccellenza del design.

Inoltre, si osserva un crescente impegno verso l'uso di adesivi e finiture che non ostacolano il riciclo dei componenti, favorendo una

progettazione orientata al riciclo e al recupero dei materiali a fine vita. L'adozione dei principi del Circular Design sta trasformando radicalmente i modelli di business tradizionali del settore legno-arredo, favorendo approcci innovativi che promuovono la sostenibilità ambientale, l'ottimizzazione delle risorse e una maggiore responsabilizzazione dei consumatori. Questi nuovi modelli non solo permettono alle imprese di rispondere alla crescente domanda di prodotti sostenibili, ma offrono anche opportunità per creare valore aggiunto e fidelizzare i clienti attraverso servizi personalizzati. Un esempio significativo di applicazione del modello PaaS nel settore legno-arredo è il noleggio di arredi, che permette alle aziende di mantenere la proprietà dei prodotti e di recuperarli al termine del loro utilizzo per rigenerarli, riutilizzarli o riciclarli.

Questo approccio si rivela particolarmente efficace per mobili di fascia alta, facilmente riparabili e aggiornabili, contribuendo a ridurre gli sprechi e a prolungare la vita utile dei prodotti. In Italia, alcune aziende hanno già introdotto servizi di noleggio per mobili destinati a uffici e abitazioni, offrendo formule flessibili che includono manutenzione, aggiornamenti e la possibilità di sostituire gli arredi con nuove collezioni. Un settore particolarmente strategico per il legno-arredo italiano è quello che rifornisce la Pubblica Amministrazione. Le gare pubbliche per l'acquisto di arredi per uffici, scuole, biblioteche e altri edifici pubblici rappresentano un'importante occasione per promuovere il Circular Design. In questo contesto, le aziende possono distinguersi integrando criteri di sostenibilità nei prodotti e nei processi produttivi, rispondendo ai requisiti sempre più stringenti in materia di Green Public Procurement (GPP). L'adozione del modello Product-as-a-Service (PaaS) si sta rivelando promettente anche nel settore pubblico. Attraverso formule di noleggio per arredi destinati a uffici pubblici o spazi comuni, le aziende possono offrire soluzioni flessibili che includono manutenzione, aggiornamenti e recupero dei prodotti a fine utilizzo. Questo approccio consente non solo di ridurre l'impatto ambientale complessivo, ma anche di ottimizzare la gestione delle risorse pubbliche, favorendo un ciclo di vita esteso per gli arredi e un significativo contenimento degli sprechi.

Bibliografia

Adrodegari, F., Sacconi, N., Kowalkowski, C., & Valtorta, V. (2015). A structured typology of product-service systems based on different business model elements. *Journal of Cleaner Production*, 66, 514-528.

Alonso-Rasgado, T., Thompson, G., & Elfström, B. O. (2004). The design of functional (total care) products. *Journal of Engineering Design*, 15(6), 515-540.

Bargellini, C. (2014). *Il Design Management come leva strategica per le imprese*. Firenze: Firenze University Press.

Beuren, F. H., Gomes Ferreira, M. G., & Cauchick Miguel, P. A. (2013). Product-service systems: A literature review on integrated products and services. *Journal of Cleaner Production*, 47, 222-231.

Boehm, M., & Thomas, O. (2013). Looking beyond the rim of one's teacup: A multidisciplinary literature review of product-service systems in information systems, business management, and engineering & design. *Journal of Cleaner Production*, 51, 245-260.

Brown, T. (2008). Design thinking. *Harvard Business Review*, 86(6), 84-92.

Cautela, C. (2019). *Design-driven innovation: Creating new meanings through design*. Milano: Politecnico di Milano Press.

Davies, A., Brady, T., & Hobday, M. (2006). Charting a path toward integrated solutions. *MIT Sloan Management Review*, 47(3), 39-48.

Giarini, O., & Stahel, W. R. (1989). *The limits of certainty: Facing risks in the new service economy*. Dordrecht: Springer.

Goedkoop, M. J., van Halen, C. J., te Riele, H. R., & Rommens, P. J. (1999). *Product Service Systems, ecological and economic basics*. Report for the Dutch Ministries of Environment (VROM) and Economic Affairs (EZ), pp. 12-15.

Grigatti, M., & Peruccio, P. P. (2020). A systemic design perspective for territorial innovation. *Design Issues*, 36(3), 3-17.

Hapuwatte, B. M., & Jawahir, I. S. (2021). Closed-loop sustainable product design: Towards a circular economy. *Procedia CIRP*, 98, 37-42.

Kuijken, B., Gemser, G., & Wijnberg, N. M. (2017). Product service systems as a strategic design innovation. *International Journal of Design*, 11(1), 55-70.

Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The limits to growth*. New York: Universe Books.

Meier, H., Roy, R., & Seliger, G. (2010). Industrial product-service systems—IPS². *CIRP Annals*, 59(2), 607-627.

Mont, O. K. (2002). Clarifying the concept of product-service system. *Journal of Cleaner Production*, 10(3), 237-245.

NuBholz, J. L. (2017). Circular business models: Defining a concept and framing an emerging research field. *Sustainability*, 9(10), 1810.

Peruccio, P. P., Grigatti, M., & Ferrara, M. (2018). Systemic design: Strategic and sustainable approaches. *Design Journal*, 21(6), 779-795.

Pieroni, M. P. P., McAlloone, T. C., & Pigosso, D. C. A. (2019). Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches. *Journal of Cleaner Production*, 215, 198-216.

Rossi, M., Germani, M., & Zamagni, A. (2020). Review of circular economy in the framework of sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118594.

Ryan, C. (2014). Future visions of design systems and sustainability: Systemic design as catalyst for sustainable innovation. *Journal of Cleaner Production*, 73, 27-35.

Tamborrini, P. (2020). Design for sustainability: A systemic approach to innovation and development. *Journal of Sustainable Design*, 3(1), 15-32.

Tukker, A. (2004). Eight types of product-service system: Eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. *Business Strategy and the Environment*, 13(4), 246-260.

Tukker, A., & Tischner, U. (2006). *New business for old Europe: Product-service development, competitiveness and sustainability*. Sheffield: Greenleaf Publishing.

Tukker, A. (2015). Product services for a resource-efficient and circular economy—A review. *Journal of Cleaner Production*, 97, 76-91.

Vandermerwe, S., & Rada, J. (1988). Servitization of business: Adding value by adding services. *European Management Journal*, 6(4), 314-324.

Verganti, R. (2008). Design-driven innovation: Changing the rules of competition by radically innovating what things mean. *Harvard Business Review*, 86(12), 84-92.

Verganti, R. (2018). *Overcrowded: Designing meaningful products in a world awash with ideas*. Cambridge: MIT Press.

Vezzoli, C., Kohtala, C., Srinivasan, A., et al. (2014). *Product-service system design for sustainability*. Sheffield: Greenleaf Publishing.

Vezzoli, C., Ceschin, F., Diehl, J. C., & Kohtala, C. (2015). Sustainable product-service systems: Between strategic design and transition studies. *Design Issues*, 31(3), 20-34.

Zacho, K. O., Mosgaard, M. A., & Riisgaard, H. (2018). Capturing uncaptured values: A game changer in sustainable product design and waste prevention. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 297-305.

Parte seconda

Strategie, strumenti e metodi per l'ideazione e lo sviluppo di arredi circolari nel comparto Legno-Arredo

Capitolo 4

Analisi del settore Legno-Arredo: quadro normativo dell'arredo scolastico e casi studio di arredi sostenibili e circolari

- 4.1. Il settore legno-arredo
- 4.2. Quadro normativo per la produzione e distribuzione dell'arredo scolastico
 - 4.2.1. Criteri Ambientali Minimi (CAM) per il settore arredo
 - 4.2.2. Normative per il settore dell'arredo scolastico
- 4.3. Casi studio di arredi sostenibili e circolari

4.1. Il settore legno-arredo

Il settore legno-arredo, che rappresenta uno dei pilastri del made in Italy, si sta distinguendo per la crescente attenzione verso la sostenibilità, un tema che ha portato molte aziende a integrare i principi della green economy e dell'economia circolare nei propri processi produttivi. Questo percorso si traduce in un impegno tangibile verso l'adozione di strategie come l'ecodesign e la gestione virtuosa del ciclo di vita del prodotto, con l'obiettivo di ridurre le emissioni di anidride carbonica e limitare lo spreco di risorse materiali. L'industria, pur mantenendo la tradizionale cura artigianale per il dettaglio, ha dimostrato di saper affrontare le sfide poste dalle ripetute crisi economiche, consolidando la propria posizione competitiva sui mercati nazionali e internazionali. Nonostante due anni di crescita nel biennio 2021-2022, il settore ha registrato nel 2023 una flessione del fatturato pari al -7,8%, scendendo a 52,7 miliardi di euro. Tale calo è attribuibile a fattori come la contrazione della domanda interna, il ridotto potere d'acquisto delle famiglie e l'elevato livello dei tassi di interesse. A livello strutturale, il comparto si articola in oltre 66.000 imprese, che danno lavoro a circa 299.000 addetti, generando un valore pari al 4,2% del fatturato manifatturiero nazionale^[1]. Un elemento distintivo del settore è rappresentato dall'incremento delle certificazioni ambientali, come quelle FSC e PEFC, che confermano l'impegno delle aziende verso pratiche sostenibili lungo l'intera filiera produttiva. Tali certificazioni, oltre a garantire la tracciabilità e il riciclo dei materiali, sono diventate un requisito essenziale per molti clienti e fornitori. Inoltre, l'introduzione della norma UNI 11951:2024, che definisce standard per l'uso di materiali legnosi di recupero, rappresenta un passo importante per favorire l'adozione di pratiche produttive più responsabili. La sostenibilità si riflette anche nell'adesione della filiera al Global Compact delle Nazioni Unite e nell'elaborazione di strategie come il piano FLA Plus, che promuove l'internazionalizzazione e il supporto alle imprese nella rendicontazione della sostenibilità^[2]. A completare il quadro normativo e strategico si inserisce il Regolamento Europeo sui Prodotti Deforestazione-Free (EUDR), che pone nuovi requisiti per garantire la provenienza sostenibile dei prodotti legnosi, seb-

Il quarto capitolo fornisce un'analisi dettagliata del settore legno-arredo, con un focus specifico sull'arredo scolastico. Si esamina il quadro tecnico-normativo che regola la produzione, la commercializzazione e la distribuzione dell'arredo scolastico, con particolare attenzione ai Criteri Ambientali Minimi (CAM) e alle normative specifiche del settore. Inoltre, vengono presentati casi studio di arredi scolastici sostenibili e circolari, evidenziando le best practice nel settore.

[1] Fondazione Symbola & Unioncamere. (2024). GreenItaly 2024: Un'economia a misura d'uomo contro le crisi. Fondazione Symbola, p. 256.

[2] Ivi, p.258.

bene con alcune criticità legate agli oneri burocratici e tecnologici richiesti. L'ecodesign emerge come una leva cruciale per migliorare la sostenibilità del settore, favorendo l'utilizzo di materiali riciclabili e la progettazione modulare, in grado di estendere la vita utile dei prodotti. Sebbene l'adozione di strategie post-vendita, come il noleggio o il riciclo, sia ancora limitata, un numero crescente di aziende sta investendo in soluzioni che promuovano l'economia circolare e il riutilizzo. L'impegno complessivo del settore dimostra come la sostenibilità non rappresenti solo una necessità normativa, ma anche un'opportunità per rafforzare la competitività delle imprese italiane su scala globale. Attualmente la quota di imprese che ha attivato programmi di rigenerazione degli habitat naturali è molto modesta, attestandosi ad appena il 17,9%, contando sia chi ha attivato un programma direttamente e chi vi partecipa. Le imprese operanti nel comparto del legno appaiono essere leggermente più attive arrivando al 21,0% di partecipazione a fronte del 16,4% di coloro che operano nell'arredo. La buona notizia è che il 52,5% delle imprese dell'arredo hanno intenzione di attivare a breve questo tipo di programmi^[3]. La gestione del recupero degli arredi è un tema complesso e multidisciplinare che si inserisce nel più ampio quadro dell'economia circolare e della sostenibilità ambientale. Gli arredi, a differenza di altri prodotti come gli imballaggi, presentano caratteristiche peculiari che rendono il loro recupero e riciclo particolarmente impegnativi. La loro natura multimaterica – che spesso combina legno, metallo, plastica, tessuti e altri materiali – e la varietà di componenti strutturali e funzionali richiedono strategie avanzate e soluzioni tecnologiche innovative per garantire una gestione efficiente. Molti arredi tradizionali non sono progettati per essere facilmente disassemblati, il che rende complicato separare i materiali e avviarli a processi di riciclo. Inoltre, la qualità variabile dei materiali recuperati, l'uso di colle o trattamenti chimici, e la presenza di componenti non riciclabili complicano ulteriormente il processo. Un'altra sfida significativa è la logistica, che comprende la raccolta, il trasporto e lo stoccaggio degli arredi dismessi, spesso ingombranti e pesanti. La mancanza di un sistema nazionale strutturato per la gestione degli arredi dismessi rappresenta un altro ostacolo.

[3] Fondazione Symbola & Unioncamere. (2024), Op.cit, p. 259.

In Italia, a differenza di altri settori come gli imballaggi di legno gestiti dal Consorzio Rilegno^[4], non esiste uno dedicato esclusivamente agli arredi. Questo ha portato a un panorama frammentato, con iniziative locali o private che, sebbene virtuose, non riescono a coprire l'intero ciclo di vita del prodotto. Le normative europee, come il Piano d'Azione per l'Economia Circolare (PAEC), hanno obiettivi come la riduzione della pressione sulle risorse naturali, l'incentivazione della progettazione sostenibile e del consumo responsabile, e il miglioramento della gestione dei rifiuti^[5]. Attualmente il piano si focalizza su settori prioritari, ma sono necessarie misure più specifiche per il settore degli arredi. Quest'ultimo, pur essendo un comparto cruciale, è caratterizzato da un ingente consumo di risorse e da una significativa produzione di rifiuti difficili da riciclare. Per colmare tale vuoto, sarebbe necessario promuovere azioni mirate, come l'incentivazione del design modulare e della disassemblabilità, l'utilizzo di materiali riciclati, l'introduzione di sistemi di responsabilità estesa del produttore e la sensibilizzazione dei consumatori verso scelte più responsabili. Integrare misure specifiche per il settore degli arredi consentirebbe non solo di migliorare il ciclo di vita dei prodotti, ma anche di accelerare la transizione verso un'economia circolare più inclusiva ed efficace. Per affrontare in modo efficace le sfide legate alla sostenibilità nel settore, è necessario adottare un approccio complessivo e sistemico che integri il Design for Sustainability (DfS) fin dalle prime fasi della progettazione unitamente alle strategie del Design for X (DfX) che offrono una serie di strumenti e metodologie che permettono di considerare vari aspetti specifici, come la riparabilità, la disassemblabilità, l'aggiornabilità e solo in ultima istanza il riciclo. Adottare questi principi significa non solo creare una filiera produttiva circolare, ma anche ripensare la progettazione degli arredi in modo da garantirne una maggiore durabilità e facilità di manutenzione.

[4] L'ente si concentra sul recupero e la valorizzazione del legno, in particolare degli imballaggi come pallet e cassette per la frutta, attraverso una rete di piattaforme distribuite sul territorio nazionale. Nel 2023, su oltre 3,3 milioni di tonnellate di imballaggi immessi al consumo, più di 1,6 milioni di tonnellate sono state recuperate e riciclate, dimostrando l'efficacia delle attività di rigenerazione per l'ambiente e l'economia italiana.

[5] Commissione Europea. (2020). Piano d'azione per l'economia circolare - Per un'Europa più pulita e più competitiva, p. 3.

L'utilizzo di materiali biocompatibili o certificati, inoltre, facilita il recupero e il riutilizzo, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale dei processi produttivi. A ciò si aggiunge l'importanza della progettazione modulare, che permette di estendere significativamente il ciclo di vita dei prodotti, migliorandone la sostenibilità complessiva e favorendo l'adozione di modelli produttivi più responsabili. La transizione verso modelli produttivi circolari richiede una revisione profonda dei processi organizzativi e l'introduzione di tecnologie innovative, supportata da un quadro normativo chiaro e da incentivi economici. È necessario inoltre favorire un cambiamento culturale, sia tra le imprese che tra i consumatori, per superare le resistenze all'adozione di nuovi modelli di business, come il product-as-a-service, che consente l'uso dei prodotti senza la necessità di acquistarli. Nonostante le difficoltà, il comparto Legno-Arredo italiano ha dimostrato una crescente attenzione alla sostenibilità, con progetti pilota e iniziative che testimoniano un impegno concreto verso l'innovazione. Questa trasformazione non rappresenta solo una risposta alle pressioni ambientali, ma anche un'opportunità economica per rafforzare la competitività globale del settore, posizionandolo come modello di riferimento per la sostenibilità nel design e nella produzione industriale.

La produzione, la distribuzione e la commercializzazione degli arredi scolastici rappresentano un ambito complesso e strategico, regolamentato da un articolato quadro normativo che ha l'obiettivo di garantire sicurezza, qualità e sostenibilità degli ambienti educativi. La sicurezza rappresenta uno dei principi cardine nella progettazione degli arredi scolastici, andando ben oltre il semplice rispetto delle normative. Essa mira a prevenire incidenti e a eliminare ogni possibile fonte di rischio per gli utenti, in particolare gli studenti, che costituiscono una categoria vulnerabile. Gli arredi devono essere realizzati con materiali privi di sostanze tossiche, come formaldeide e metalli pesanti, seguendo le disposizioni del Regolamento REACH (CE 1907/2006)^[6], garantendo così la sicurezza anche nelle componenti che entrano in diretto contatto con gli utenti. L'ambiente scolastico, inoltre, è caratterizzato da un utilizzo intenso e spesso poco attento, il che rende indispensabile che i mobili siano in grado di resistere a urti accidentali e a movimenti bruschi senza compromettere la loro stabilità strutturale. A tal fine, norme europee come la EN 16121^[7] e la EN 1729^[8] stabiliscono criteri rigorosi e prevedono test specifici per verificare la resistenza meccanica e la stabilità dei prodotti, soprattutto in situazioni di carico non uniforme. Questi requisiti non solo salvaguardano la sicurezza degli studenti, ma contribuiscono anche a prolungare la vita utile degli arredi, rendendoli una scelta sostenibile ed efficiente per le istituzioni scolastiche. A livello europeo, la Direttiva 2001/95/CE^[9] sulla sicurezza generale dei prodotti stabilisce che gli arredi scolastici debbano essere privi di rischi per l'utente, costruiti con materiali atossici e privi di spigoli vivi, garantendo inoltre stabilità e resistenza strutturale. Questi requisiti sono ulteriormente dettagliati nella normativa EN 1729, che definisce i parametri ergonomici per banchi e sedie, assicurando che

[6] Regolamento REACH (CE n. 1907/2006) (2006). Regolamento concernente la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche. Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, L 396, pp. 1-849.

[7] EN 16121 (2013). Furniture - Non-domestic storage furniture - Requirements for safety, strength, durability and stability. European Committee for Standardization (CEN), pp. 1-30.

[8] EN 1729 (2015). Furniture - Chairs and tables for educational institutions - Functional dimensions, safety requirements and test methods. European Committee for Standardization (CEN), pp. 1-25.

[9] Direttiva 2001/95/CE (2001). Direttiva sulla sicurezza generale dei prodotti. Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, L 11, pp. 4-17.

essi supportino una postura corretta e contribuiscano al benessere degli studenti. Oltre alla sicurezza, il settore si orienta sempre più verso criteri di sostenibilità, soprattutto nell'ambito degli appalti pubblici. I Criteri Ambientali Minimi (CAM)^[10], obbligatori per le forniture scolastiche, incentivano l'uso di materiali a basso impatto ambientale, come il legno certificato FSC o PEFC, e promuovono processi produttivi progettati per ridurre le emissioni di CO₂. In Italia, tali criteri evidenziano la necessità di garantire ambienti scolastici sicuri, mentre le normative antincendio impongono che i materiali utilizzati per gli arredi siano ignifughi rispettando la normativa DM del 26 giugno 1984^[11], offrendo così un'ulteriore protezione a studenti e personale scolastico.

Il quadro tecnico-normativo che disciplina la produzione, la commercializzazione e la distribuzione degli arredi scolastici si basa su un sistema articolato di leggi, standard tecnici e disposizioni di sicurezza, il cui obiettivo è assicurare prodotti sicuri, di qualità e funzionalmente idonei agli ambienti educativi. In particolare, a livello nazionale, il Decreto Legislativo n. 81/2008^[12] pone l'accento sull'importanza della sicurezza negli ambienti scolastici, prescrivendo che gli arredi siano stabili, resistenti e privi di materiali o caratteristiche che possano rappresentare un rischio per la salute e l'incolumità di studenti e personale.

Il sistema produttivo italiano nel settore degli arredi scolastici si distingue come un esempio di integrazione tra innovazione, sostenibilità e conformità normativa, rispondendo in modo efficace alle esigenze di sicurezza e funzionalità tipiche dell'ambiente educativo contemporaneo. Molte aziende del settore si fanno apprezzare per l'impiego di legno certificato FSC o PEFC, garantendo l'approvvigionamento da foreste gestite responsabilmente e in maniera sostenibile. Questa attenzione alla sostenibilità non si limita alla selezione dei materiali, ma coinvolge anche i processi produttivi, ottimizzati per ridurre al minimo le emissioni di CO₂ e l'impatto ambientale complessivo, consolidando un approccio responsa-

[10] Criteri Ambientali Minimi (CAM) (2017). Criteri ambientali minimi per l'arredo e per i servizi di pulizia per le forniture pubbliche. Ministero dell'Ambiente, pp. 1-18.

[11] DM 26 giugno 1984 (1984). Norme di sicurezza antincendio per la costruzione e l'esercizio delle attività scolastiche. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 234, pp. 1-7.

[12] Decreto Legislativo n. 81/2008 (2008). Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Suppl. Ordinario n. 108, pp. 1-550.

bile lungo l'intera filiera produttiva. Gli arredi scolastici devono anche rispondere a criteri di progettazione tecnica specifici: devono essere ergonomici, sicuri, resistenti all'usura e progettati per un uso intensivo. La conformità a questi requisiti viene verificata tramite certificazioni obbligatorie come il marchio CE, che attesta il rispetto delle direttive europee, e attraverso standard di qualità internazionali come la ISO 9001^[13] per la gestione della qualità e la ISO 14001^[14] per la gestione ambientale. Inoltre, la distribuzione degli arredi scolastici richiede il rispetto di normative relative alla tracciabilità e alla corretta informazione del consumatore, come previsto dal Codice del Consumo^[15], nonché l'applicazione dei Criteri Ambientali Minimi (CAM). Questi ultimi, obbligatori negli appalti pubblici, garantiscono che i mobili siano prodotti in maniera sostenibile, con materiali a basso impatto ambientale e progettati per una lunga durata. L'acquisto degli arredi, nella maggior parte dei casi, avviene tramite appalti pubblici regolati dal Codice degli Appalti (D.Lgs. n. 36/2023)^[16]. Questi processi devono assicurare trasparenza, competitività e sostenibilità, includendo spesso requisiti per prodotti certificati e conformi ai CAM. In conclusione, la produzione e distribuzione degli arredi scolastici rappresentano un ambito in cui sicurezza, ergonomia e sostenibilità devono integrarsi perfettamente, supportati da certificazioni e controlli di qualità, per garantire ambienti di apprendimento sicuri, funzionali e rispettosi delle normative vigenti.

[13] ISO 9001 (2015). Quality management systems - Requirements. International Organization for Standardization, pp. 1-29.

[14] ISO 14001 (2015). Environmental management systems - Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization, pp. 1-36.

[15] Codice del Consumo (2005). Decreto legislativo n. 206/2005. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Suppl. Ordinario n. 235, pp. 1-170.

[16] Codice degli Appalti (D.Lgs. n. 36/2023) (2023). Nuovo codice degli appalti pubblici. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Suppl. Ordinario n. 67, pp. 1-350.

4.2.1. Criteri Ambientali Minimi (CAM) per il settore arredo

I Criteri Ambientali Minimi (CAM) costituiscono un insieme di specifiche tecniche basate su norme standardizzate, applicabili a determinati prodotti, servizi e soluzioni progettuali. In particolare, i produttori di arredi devono rispettare requisiti ambientali fissati dalla legislazione, imponendo alle stazioni appaltanti di aderire a tali criteri nell'ambito degli acquisti verdi della pubblica amministrazione, noti come Green Public Procurement (GPP)^[17].

I CAM per gli arredi interni, introdotti nell'ambito del Piano d'Azione Nazionale sul Green Public Procurement (PAN GPP), rappresentano uno strumento normativo volto a promuovere l'economia circolare e la sostenibilità ambientale negli appalti pubblici (Fig. 20).

Tali criteri sono strutturati per coprire l'intero ciclo di vita degli arredi, con l'obiettivo di ridurre l'impatto ambientale attraverso l'impiego di materiali riciclati, l'ottimizzazione della durabilità e la gestione responsabile del fine vita^[18].

La fornitura di nuovi arredi richiede il rispetto di rigorosi parametri tecnici e ambientali, tra cui l'adozione di principi di ecoprogettazione. Gli arredi devono includere materiali riciclati o rinnovabili, con una particolare attenzione al disassemblaggio non distruttivo per agevolare il riciclo e il riutilizzo dei componenti^[19]. Inoltre, il legno utilizzato deve provenire da fonti gestite in modo sostenibile, come certificato dagli standard FSC o PEFC, mentre le plastiche devono includere almeno il 30% di materiale riciclato o biologico.

Le emissioni di formaldeide e composti organici volatili (COV) sono sottoposte a limiti stringenti, per garantire la sicurezza degli ambienti interni e ridurre l'esposizione a sostanze nocive^[20]. Particolare enfasi è posta sugli imballaggi, che devono essere facilmente separabili e riciclabili, con una composizione minima del 70% di materiali riciclati per carta e cartone^[21]. Il noleggio di arredi, particolarmente utile in situazioni di esigenze temporanee o di cambia-



menti strutturali negli spazi, deve rispondere agli stessi standard ambientali della fornitura di nuovi arredi. Questa modalità rappresenta un'alternativa flessibile e sostenibile, riducendo la necessità di produzione di nuovi beni e allineandosi ai principi dell'economia circolare. I prodotti noleggiati devono rispettare i requisiti relativi all'uso di materiali sostenibili, all'abbattimento delle emissioni nocive e alla gestione responsabile degli imballaggi^[22].

Una delle innovazioni più rilevanti introdotte dai CAM è il servizio di estensione della vita utile degli arredi, che si basa su un censimento preliminare delle dotazioni esistenti. Questo processo consente di valutare lo stato di conservazione degli arredi e di pianificare interventi mirati per il riutilizzo, la riparazione o il disassemblaggio finalizzato al riciclo. Gli arredi dismessi possono essere donati a enti no-profit o, laddove possibile, rigenerati per un utilizzo futuro. Questa strategia riduce significativamente i rifiuti e massimizza il valore delle risorse materiali, incentivando al contempo l'adozione di processi produttivi circolari^[23].

I CAM per gli arredi perseguono molteplici obiettivi, tra cui la riduzione dell'impatto ambientale legato alla produzione, l'utilizzo di materiali certificati, e il contenimento delle emissioni di sostanze pericolose. Inoltre, promuovono innovazione e qualità nei processi produttivi, favorendo soluzioni modulari e facilmente adattabili, che ne aumentano la durabilità e la riusabilità. Secondo studi condotti dall'European Commission, il settore degli arredi è responsabile di impatti ambientali significativi, di cui l'80-90% è attribuibile ai materiali utilizzati^[24]. Per comprendere le origini dei CAM, è utile fare riferimento alla Comunicazione COM (2008) 400, intitolata "Appalti pubblici per un ambiente migliore", dove la Commissione Europea evidenzia i benefici del GPP a livello comunitario^[25].

Fig. 20: schema dei criteri premianti inseriti nei Criteri Ambientali Minimi (CAM) per gli arredi per interni, compreso l'ambito degli arredi scolastici.

[17] Il Green Public Procurement (GPP) è definito come un processo in cui le autorità pubbliche cercano di acquisire beni, servizi e lavori con un impatto ambientale ridotto durante tutto il loro ciclo di vita, rispetto a prodotti, servizi e lavori con la stessa funzione primaria che sarebbero altrimenti acquistati.

[18] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2022). Criteri Ambientali Minimi per la Fornitura di Arredi per Interni. Gazzetta Ufficiale, p. 143.

[19] Ivi, p. 145.

[20] UNI EN 16640: Plastica a base biologica. Standard tecnico europeo, pp. 150-151.

[21] UNI EN 13430: Requisiti di riciclabilità degli imballaggi. Standard tecnico europeo, p. 154.

[22] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2022), p. 158.

[23] European Commission. (2020). New Circular Economy Action Plan. Brussels, pp. 159-161.

[24] UNI EN ISO 14040: Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita. Standard tecnico europeo, p. 147.

[25] Commissione Europea. (2008). Appalti pubblici per un ambiente migliore, COM 2008/400, p. 3.

In questa comunicazione, l'Unione Europea presenta criteri volti a valutare l'impatto ambientale delle diverse categorie di approvvigionamento pubblico, coinvolgendo una varietà di prodotti e servizi, come articoli per la pulizia, elettronica e gestione degli edifici. Si precisa che, al momento della loro introduzione, l'adozione di questi criteri non è obbligatoria per gli Stati membri, il che consente una flessibilità nell'implementazione delle direttive^[26].

In Italia, nel 2008 è stato introdotto il "Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi della Pubblica Amministrazione", risultato di un processo di consultazione con enti e parti interessate. Successivamente, un decreto del 2013 ha aggiornato il piano, stabilendo che, entro il 2014, almeno il 50% degli appalti pubblici dovesse rispettare i CAM per poter accedere ai finanziamenti regionali. Con la Legge 221/2015, l'applicazione dei CAM è diventata obbligatoria, dimostrando un chiaro impegno verso la sostenibilità nella gestione degli acquisti pubblici. Questo impegno è stato ulteriormente rafforzato dalla pubblicazione del Supplemento alla "Gazzetta Ufficiale" del 14 settembre 2020, che ha consolidato gli obblighi relativi all'applicazione dei CAM, ora parte integrante della legislazione italiana. In questo contesto, i CAM, inizialmente concepiti come strumenti volontari a livello europeo, si sono trasformati in requisiti obbligatori. Tale evoluzione rappresenta un'opportunità per gli operatori del settore degli arredi, offrendo un supporto concreto alle aziende in difficoltà e promuovendo una crescita sostenibile^[27]. I CAM non costituiscono un insieme di regole rigide e immutabili, ma rappresentano un documento complesso articolato in diverse sezioni. Tra queste, si pone particolare attenzione alla riduzione della necessità di nuovi arredi, promuovendo pratiche di riutilizzo e riparazione che favoriscono approcci sostenibili e contribuiscono a ridurre l'impatto ambientale. L'attenzione crescente dell'industria del legno verso l'impiego di materiali riciclati rappresenta un segnale di cambiamento positivo nelle pratiche produttive. È fondamentale tuttavia riconoscere che il legno riciclato può contenere contaminanti derivanti dalla sua storia pregressa, essendo stato utilizzato in contesti che non garantivano i livelli di qualità e sicurezza coerenti con gli standard attuali.

[26] Ivi, p. 4.

[27] Gazzetta Ufficiale. (2020). Supplemento al Supplemento Ordinario n. 38, p. 7.

I Criteri Ambientali Minimi (CAM) stabiliscono in modo chiaro che i produttori sono tenuti a certificare la presenza di sostanze tossiche entro soglie critiche, seguendo normative già attive nell'ambito dell'Unione Europea. Il rispetto dei CAM non è soltanto un obbligo legale, ma rappresenta anche un'opportunità per le aziende di differenziarsi nel mercato. Oltre alla conformità ai requisiti legislativi, molte aziende stanno cercando di eccedere tali standard, puntando a certificazioni volontarie che attestino un impegno superiore rispetto ai requisiti minimi. Questo approccio non solo migliora la qualità totale dei prodotti, ma genera anche un significativo aumento della fiducia da parte dei clienti.

La disassemblabilità degli arredi, così come delineata nei Criteri Ambientali Minimi (CAM), tratta tematiche rilevanti legate alla sostenibilità e al ciclo di vita dei prodotti attraverso una progettazione degli arredi che consenta la sostituzione esclusivamente delle parti danneggiate o usurate prolungando la vita utile del prodotto e promuovendo un'economia circolare in cui i materiali possono essere recuperati, riutilizzati e riciclati, riducendo così la necessità di nuove risorse e limitando la produzione di rifiuti^[28]. La progettazione di parti e componenti modulari, tra i criteri premianti, non solo facilita il processo di disassemblaggio, ma offrono anche la possibilità di essere riutilizzate in diverse configurazioni, contribuendo così a una maggiore flessibilità nella configurazione degli arredi^[29]. L'approccio modulare nella progettazione degli arredi destinati alla pubblica amministrazione e all'istruzione riveste un'importanza particolare nell'ambito della sostenibilità e dell'efficienza degli spazi. Questi settori, caratterizzati da una varietà di esigenze funzionali e dalla necessità di adattarsi a contesti diversi, traggono enorme beneficio dalla modularità degli arredi. Questo aspetto di adattabilità non solo massimizza l'efficienza dello spazio, ma riduce anche la necessità di acquistare nuovi arredi quando le esigenze cambiano, contribuendo a un uso più responsabile delle risorse.

[28] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2022), op.cit., pp. 145-146.

[29] Ivi, p. 156.

4.2.2. Normative per il settore dell'arredo scolastico

L'arredo scolastico ricopre un ruolo fondamentale nel garantire un ambiente di apprendimento funzionale, sicuro e inclusivo. Non si tratta solo di un aspetto estetico o pratico: gli arredi influiscono direttamente sul benessere fisico e psicologico degli studenti, sulla loro capacità di concentrazione e, in definitiva, sul loro rendimento scolastico. Negli ultimi anni, il settore ha visto un crescente interesse verso normative che regolamentano materiali, progettazione e utilizzo degli arredi, con l'obiettivo di rispondere a standard sempre più elevati di sicurezza, ergonomia, funzionalità e sostenibilità. La sicurezza è un principio cardine nella progettazione degli arredi scolastici. Le normative prevedono che tutti i mobili destinati alle scuole siano realizzati con materiali non tossici e privi di sostanze chimiche nocive. Questo requisito è essenziale non solo per proteggere la salute degli studenti, ma anche per promuovere un ambiente di apprendimento sano. Un altro aspetto cruciale è la stabilità: sedie, banchi e cattedre devono essere progettati per resistere all'uso quotidiano e per evitare ribaltamenti accidentali. Questa attenzione non solo garantisce l'incolumità fisica degli studenti, ma riduce anche i rischi per il personale scolastico, creando un contesto educativo sicuro e affidabile.

L'UNI, l'Ente Italiano di Normazione, ha pubblicato le norme UNI EN 1729-1 e UNI EN 1729-2, che costituiscono un riferimento imprescindibile per la progettazione e la realizzazione degli arredi scolastici. Queste norme offrono indicazioni precise sia in termini di ergonomia che di sicurezza, garantendo che i mobili utilizzati negli ambienti educativi rispondano alle esigenze degli studenti e rispettino standard elevati di qualità e affidabilità. La norma UNI EN 1729-1 definisce i criteri ergonomici necessari per assicurare che sedie e tavoli siano adeguati alle diverse fasce d'età degli studenti. In particolare, essa stabilisce che le altezze di sedie e banchi debbano essere proporzionate tra loro e regolabili, al fine di consentire agli studenti di mantenere una postura corretta e prevenire l'insorgere di problemi posturali. Inoltre, vengono presi in considerazione lo spazio per le gambe e la libertà di movimento, garantendo il massimo comfort durante le attività scolastiche e promuovendo un ambiente favorevole all'apprendimento. Parallelamente, la norma UNI EN 1729-2 si concentra sui requisiti di sicurezza e sui metodi di prova necessari per certificare la conformità degli arredi scolastici. Essa specifica criteri rigorosi relativi alla stabilità, alla robu-

stezza e alla sicurezza dei materiali utilizzati, sottolineando l'importanza di prevenire potenziali rischi per gli utenti. Ad esempio, le superfici dei mobili devono essere prive di spigoli vivi o irregolarità che possano causare infortuni, mentre i metodi di prova descritti nella norma verificano che i mobili siano in grado di resistere all'uso quotidiano senza perdere le loro caratteristiche funzionali. Tali indicazioni non solo assicurano la sicurezza degli studenti, ma contribuiscono anche a garantire la durabilità e la sostenibilità degli arredi nel tempo, promuovendo un utilizzo responsabile delle risorse.

L'ergonomia è un elemento imprescindibile per gli arredi scolastici. Gli studenti trascorrono molte ore al giorno seduti, e arredi non adeguati possono causare problemi posturali o dolori muscolari, con effetti negativi a lungo termine. Le normative attuali richiedono che le sedie siano dotate di supporto lombare e che banchi e sedie siano regolabili in altezza. Questo permette di adattare l'arredo alle diverse corporature degli studenti, garantendo una postura corretta e confortevole. Una postura adeguata non influisce solo sul benessere fisico, ma ha un impatto significativo anche sulla capacità di apprendimento e concentrazione.

Studi dimostrano che gli studenti che utilizzano arredi ergonomici si distraggono meno e sono più propensi a partecipare attivamente alle attività scolastiche. L'accessibilità degli arredi scolastici è un altro tema centrale. Gli arredi devono essere progettati per accogliere le esigenze di tutti gli studenti, comprese le persone con disabilità. In questo contesto, è fondamentale che mobili come scrivanie e sedie siano adattabili, per esempio con altezze regolabili o caratteristiche specifiche per chi utilizza una sedia a rotelle. Questo approccio non si limita a garantire l'accesso agli spazi, ma promuove la partecipazione attiva di tutti gli studenti, creando un ambiente inclusivo che rispetta le diversità.

La progettazione accessibile favorisce anche un clima scolastico positivo, in cui ogni studente si sente valorizzato. Le esigenze educative moderne richiedono arredi versatili e funzionali. Le metodologie didattiche stanno evolvendo, includendo approcci collaborativi, attività di gruppo e insegnamento frontale. Gli arredi scolastici devono rispondere a queste necessità, offrendo soluzioni flessibili che permettano di riorganizzare facilmente gli spazi. Un aspetto sempre più rilevante nelle normative riguarda

la sostenibilità ambientale. Gli arredi scolastici devono essere prodotti con materiali eco-sostenibili, come legno proveniente da foreste gestite responsabilmente o materiali riciclati. Arredi leggeri e modulari consentono agli insegnanti di adattare rapidamente la disposizione dell'aula, favorendo differenti attività didattiche, che esse siano laboratoriali, frontali, singole o di gruppo. Questa versatilità non solo migliora l'esperienza educativa, ma permette anche di sperimentare nuove modalità di insegnamento e apprendimento, rendendo le lezioni più coinvolgenti. La crescente integrazione della tecnologia nelle scuole ha trasformato gli spazi educativi. Le aule moderne stanno diventando ambienti ibridi, in cui gli arredi devono supportare l'uso di dispositivi digitali come tablet, laptop e lavagne interattive. Arredi modulari e adattabili permettono di configurare lo spazio in base alle esigenze, passando rapidamente da attività individuali a quelle collaborative. Questa trasformazione richiede che le normative si adattino alle nuove necessità. In Italia, normative come la Legge 626/1994 e le linee guida UNI regolano la progettazione e la sicurezza degli arredi scolastici. Queste disposizioni si sono ulteriormente evolute in risposta alla pandemia di COVID-19, introducendo requisiti per il distanziamento fisico e la ventilazione. Questi aggiornamenti hanno evidenziato la necessità di spazi più flessibili e sicuri, che garantiscano il benessere degli studenti anche in situazioni di emergenza.

L'arredo scolastico non è solo una questione funzionale: rappresenta un investimento nel futuro degli studenti e dell'intero sistema educativo. Spazi ben progettati, sicuri e inclusivi comunicano un messaggio forte sull'importanza dell'istruzione come pilastro di sviluppo sociale e culturale. La collaborazione tra scuole, progettisti e politica è fondamentale per creare ambienti che non solo rispettino le normative, ma superino le aspettative. Arredi di qualità, sostenibili e progettati correttamente, possono trasformare le aule in luoghi dove gli studenti si sentano motivati, valorizzati e pronti a raggiungere il loro pieno potenziale.

Negli ultimi anni, il design e la produzione di arredi sostenibili e circolari hanno acquisito una crescente rilevanza nel panorama dell'economia circolare, ponendo l'accento sull'importanza di un approccio progettuale in grado di ridurre l'impatto ambientale e promuovere l'uso efficiente delle risorse. Attraverso l'analisi di casi studio rappresentativi, è possibile comprendere come materiali innovativi, processi produttivi ottimizzati e strategie di fine vita come il riciclo e il riutilizzo possano trasformare l'intero ciclo di vita del prodotto. Tali pratiche non solo rispondono alle sfide ambientali globali, ma dimostrano anche come il settore dell'arredamento possa diventare un esempio virtuoso di sostenibilità applicata, integrando estetica, funzionalità e responsabilità ambientale.

I casi selezionati offrono una panoramica di soluzioni innovative e replicabili, contribuendo a delineare un quadro operativo per il design sostenibile e circolare. L'analisi dei casi studio rappresenta un'occasione per approfondire le modalità con cui i principi del design circolare e della sostenibilità possono essere applicati al settore dell'arredo, rispondendo alle sfide della durabilità attraverso la modularità e l'adattabilità alle mutevoli esigenze degli utenti. Attraverso l'esame di progetti come la poltrona Costume di Magis, la serie Ascent di Green Furniture Concept e il sistema per ufficio Comma di Vitra, emerge chiaramente come il design possa essere un efficace strumento per contrastare le forme di obsolescenza – sia estetica, sia funzionale – e promuovere un modello di produzione e consumo più responsabile. Questi esempi, pur nella loro diversità, condividono un approccio progettuale orientato alla sostenibilità e all'economia circolare.

La modularità, in particolare, gioca un ruolo centrale: non solo consente una maggiore adattabilità alle esigenze degli utenti, ma facilita anche la riparazione, l'aggiornamento e il riciclo dei componenti, estendendo il ciclo di vita dei prodotti e riducendo il loro impatto ambientale^[30]. Questo approccio, come evidenziato da studi sul design modulare e circolare, rappresenta una delle strategie più efficaci per integrare la sostenibilità nei prodotti di arredo^[31].

[30] Sonogo, M., Echeveste, M., & Debarba, H. (2018). The role of modularity in sustainable design: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 176, pp. 196-209.

[31] Yang, D., & Vezzoli, C. (2024). Designing Environmentally Sustainable Furniture Products: Furniture-Specific Life Cycle Design Guidelines and a Toolkit to Promote Environmental Performance. *Sustainability*, pp. 15-26.

Inoltre, il contesto normativo e il crescente interesse verso modelli di business come il Product-as-a-Service (PaaS) stanno favorendo l'adozione di soluzioni circolari, non solo per migliorare l'impatto ambientale ma anche per rispondere alle esigenze di un mercato in evoluzione^[32]. Attraverso l'analisi di questi casi studio, si possono delineare strategie replicabili che combinano la durabilità dei materiali, l'innovazione progettuale e una gestione responsabile delle risorse.

“Costume” di Stefan Diez per Magis

La poltrona Costume, disegnata da Stefan Diez per Magis (Fig. 21), rappresenta un esempio significativo di come il design modulare possa essere impiegato per incrementare la durabilità tecnica ed estetica, contribuendo a contrastare l'obsolescenza programmata che caratterizza molti settori, incluso quello dell'arredo. Il progetto si inserisce in un più ampio movimento di ritorno verso la creazione di prodotti senza tempo, contrastando le tendenze 'usa e getta' che dominano il mercato e promuovendo un modello di sostenibilità basato sull'economia circolare. La filosofia progettuale di Stefan Diez si ispira al concetto di componibilità, paragonando i sistemi modulari a un alfabeto, in cui la corretta articolazione dei moduli produce configurazioni sempre nuove e adattabili. Questo approccio si riflette nella struttura di Costume, concepita come un sistema componibile e aggiornabile, che consente all'utente finale di riconfigurare e personalizzare la poltrona con operazioni semplici e intuitive. La modularità non è soltanto un espediente estetico o funzionale, ma diventa un elemento centrale per garantire la sostenibilità del prodotto (Fig. 22). La poltrona si basa su un'architettura modulare composta da quattro unità principali: il modulo 'a', il nucleo della poltrona, è un corpo in polietilene riciclato e riciclabile, realizzato attraverso la tecnologia dello stampaggio rotazionale. Questo elemento centrale è progettato per accogliere gli altri moduli attraverso un sistema di incastri che semplifica le operazioni di montaggio e smontaggio. Il modulo 'b' comprende un inserto di

[32] Hashemi Farahmand, S., & Rahimiaghdas, N. (2024). Circular Economy and Business Transformation in European Furniture Industry. Proceedings of The International Conference on Business, Management and Economics, pp. 10-18.



molle insacchettate, mentre il modulo 'c' consiste in uno strato di poliuretano che, pur non essendo riciclabile, è utilizzato in quantità minima rispetto ai divani tradizionali (Fig. 23). Questi componenti creano una seduta ergonomica e confortevole, facilmente disassemblabile per il riciclo o la sostituzione. Il modulo 'd' è costituito dal rivestimento in tessuto, fissato al nucleo con anelli elastici e completamente sfoderabile, consentendo una manutenzione semplice e la personalizzazione estetica (Fig. 24). Un aspetto distintivo del progetto Costume è la presenza di altri due moduli innovativi: il bracciolo e il connettore in plastica (Fig. 25), che ampliano le possibilità di configurazione del sistema. Questi elementi aggiuntivi permettono di creare composizioni su misura, come poltrone singole, divani modulari o chaise longue, rispondendo alle diverse esigenze degli spazi abitativi e lavorativi. I connettori, volutamente visibili e disponibili in colori a contrasto o coordinati, rendono le configurazioni immediatamente riconoscibili e aggiungono un elemento di personalità al design. La sostenibilità è al centro del progetto, non solo attraverso la scelta dei materiali, ma anche grazie a un approccio progettuale che enfatizza la semplicità del disassemblaggio e la manutenibilità. La struttura portante in polietilene riciclato proviene da scarti industriali dei settori automotive e arredamento, mentre l'utilizzo minimo di schiuma poliuretana riduce significativamente l'impatto ambientale rispetto agli imbottiti tradizionali. La separabilità dei materiali consente inoltre il riciclo a fine vita, promuovendo un modello di circolarità. Dal punto di vista funzionale, Costume si distingue per la sua capacità di adattarsi

Fig. 21: Poltrona Costume, disegnata da Stefan Diez per l'azienda Magis (2021). Fonte: www.magisdesign.com



152 Fig. 22: Vista d'insieme dei principali moduli della versione Armchair: il nucleo della poltrona 'a'; il sedile, composto da un inserto in molle 'b' e uno strato di poliuretano 'c'; il rivestimento in tessuto 'd'.
Fonte: www.diezoffice.com

ai cambiamenti delle esigenze degli utenti. Il sistema è facilmente trasportabile e riconfigurabile, rendendolo ideale per un mercato sempre più orientato alla flessibilità e alla personalizzazione. La possibilità di sostituire singoli componenti, combinata con la facilità di manutenzione, prolunga la vita utile del prodotto e lo rende una scelta sostenibile nel tempo. In sintesi, la poltrona Costume rappresenta una sintesi avanzata di design modulare, sostenibilità e innovazione funzionale. Attraverso un linguaggio progettuale chiaro e una struttura altamente componibile, questo progetto non solo ridefinisce il concetto di poltrona, ma offre una soluzione concreta alle sfide dell'obsolescenza estetica e tecnica, promuovendo un modello virtuoso di produzione e consumo responsabile.



Fig. 23: (a sinistra) sezione stratificata dei componenti interni della poltrona Costume, a partire dallo strato più esterno sfoderabile in tessuto, poi il modulo "c" in poliuretano, il modulo "b" composto da molle insacchettate ed infine il nucleo centrale "a".
Fonte: www.diezoffice.com



Fig. 24: Rivestimento in tessuto e fissaggio al nucleo della poltrona attraverso anelli elastici.
Fonte: www.diezoffice.com



Fig. 25: Immagine di dettaglio del connettore di plastica per unire gli altri moduli e del bracciolo.
Fonte: www.diezoffice.com



“Ascent” Seating Series di Green furniture concept

Fig. 26: “Ascent” Seating Series di Green furniture concept.
Fonte: www.greenfc.com

La serie Ascent (Fig. 26), sviluppata da Green Furniture Concept, rappresenta un caso studio esemplare nel settore dell’arredo pubblico per la sua capacità di integrare principi di sostenibilità, modularità e adattabilità. Fondata nel 2007 da Johan Berhin, Green Furniture Concept si distingue per il suo impegno verso un design orientato alla sostenibilità e alla longevità dei prodotti, caratteristiche che trovano piena espressione nella serie Ascent. Progettato specificamente per gli spazi pubblici, questo sistema modulare e componibile è stato concepito con l’obiettivo di massimizzare la durata dei componenti, ridurre gli scarti di produzione e rispondere alle mutevoli esigenze degli ambienti urbani. Il progetto si basa su un approccio di Design for Modularity (DfM), che suddivide i componenti in tre categorie principali: moduli strutturali, responsabili della stabilità e dell’integrità del sistema; moduli tecnologici, che integrano funzioni specifiche e accessori; e moduli funzionali, che includono elementi legati all’estetica, all’ergonomia e ad altre prestazioni (Fig. 27). Questa suddivisione funzionale non solo facilita la progettazione e la produzione, ma consente anche interventi rapidi di manutenzione, riparazione e aggiornamento. Grazie a questo modello organizzativo, la serie Ascent garantisce un prolungamento significativo della vita utile del prodotto, riducendo la necessità di sostituzioni e minimizzando l’impatto ambientale. Dal punto di vista dell’architettura del prodotto, la gamma Ascent si compone di dieci moduli principali, configurabili in maniera sistematica per creare layout personalizzati e variabili. Il modulo di seduta, ad esempio, è costituito da componenti singoli o doppi che vengono fissati alla struttura portante tramite un modulo di collegamento (Fig. 28). Gli elementi di connessione, come i connettori reversibili (Fig. 29), consentono un montaggio stabile e allo stesso tempo facilmente smontabile, permettendo l’adattamento a nuovi layout o l’integrazione di accessori specifici (Fig. 30). Un aspetto centrale della progettazione è il sistema di fissaggio innovativo, caratterizzato da una serie di connettori reversibili, tra cui inserti a farfalla in acciaio e altre parti progettate per favorire lo smontaggio intuitivo. Questo sistema agevola le operazioni di sostituzione, aggiornamento e manutenzione dei componenti, riducendo al minimo i tempi di inattività e migliorando l’esperienza dell’operatore.

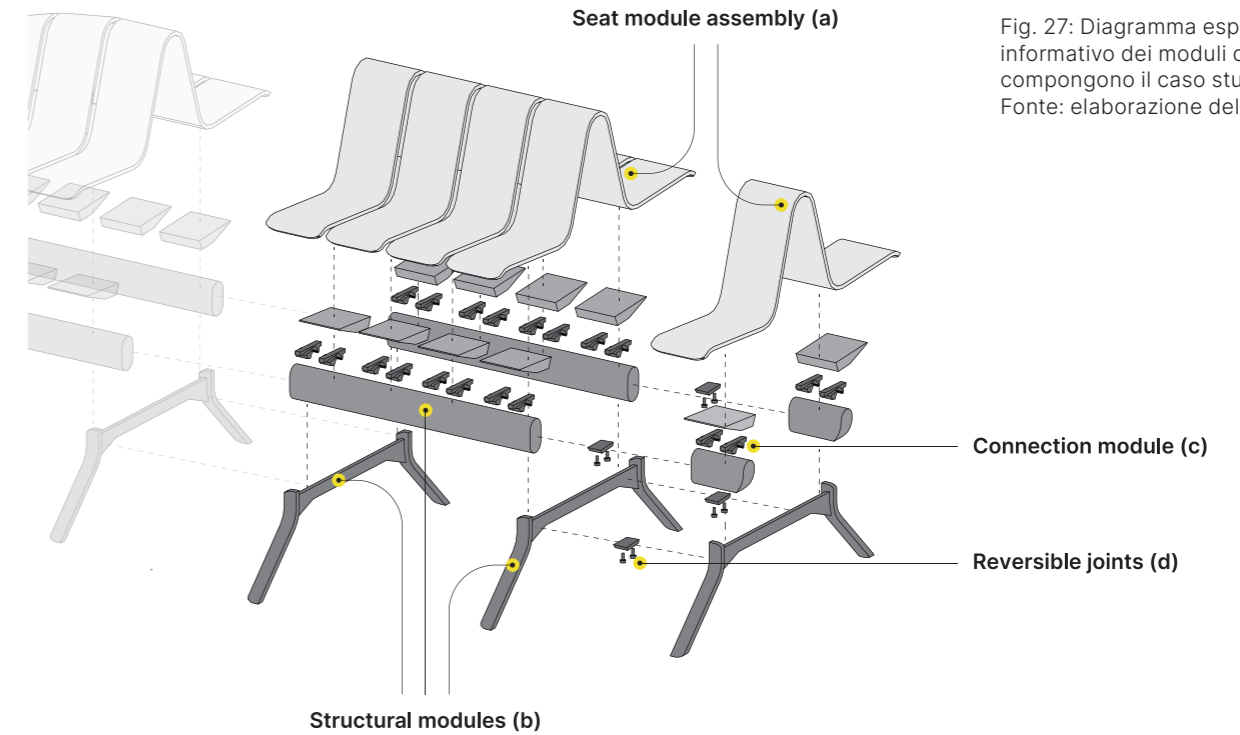


Fig. 27: Diagramma esploso informativo dei moduli che compongono il caso studio.
Fonte: elaborazione dell’autore.



Fig. 28: Connettore del modulo di seduta con la struttura portante.
Fonte: www.greenfc.com



Fig. 29: Connettori reversibili fissati dalla struttura portante che consentono l’integrazione di accessori specifici o l’adattamento a nuovi layout.
Fonte: www.greenfc.com

Fig. 30: Integrazione di accessori specifici come braccioli o mensole sempre alla struttura portante e attraverso connettori reversibili.
Fonte: www.greenfc.com



La sostenibilità del progetto Ascent si manifesta attraverso diverse strategie progettuali. I materiali utilizzati, come l'acciaio per le travi strutturali e il legno per le sedute, sono selezionati per garantire durabilità e possibilità di riciclo. Inoltre, l'adozione di un modello di gestione basato su servizi di manutenzione e sostituzione contribuisce a ridurre l'impatto ambientale complessivo, promuovendo un approccio di tipo Product-as-a-Service (PaaS). Questo modello consente all'azienda di mantenere il controllo sui componenti, garantendo un ciclo di vita più lungo e una gestione responsabile delle risorse. La serie Ascent dimostra inoltre un elevato grado di adattabilità, essenziale per gli ambienti pubblici contemporanei. La configurabilità modulare permette di rispondere alle specifiche esigenze spaziali e funzionali, che possono variare nel tempo. Gli elementi accessori, come braccioli e mensole, possono essere aggiunti o rimossi facilmente, migliorando la versatilità del sistema. La serie Ascent rappresenta un modello innovativo di design circolare applicato agli spazi pubblici. Attraverso l'uso di materiali sostenibili, una progettazione modulare e un sistema di gestione basato sui principi del PaaS, Green Furniture Concept offre una soluzione che combina estetica, funzionalità e sostenibilità. Questo caso studio evidenzia come un approccio progettuale integrato possa rispondere alle sfide contemporanee, promuovendo l'uso responsabile delle risorse e il miglioramento continuo delle prestazioni del prodotto. Questo caso studio evidenzia come un approccio progettuale integrato possa rispondere alle sfide contemporanee, promuovendo l'uso responsabile delle risorse e il miglioramento continuo delle prestazioni del prodotto.

"Comma" di Vitra

Il sistema per ufficio Comma di Vitra (Fig. 31) rappresenta un esempio paradigmatico di design circolare applicato all'arredo, integrando principi di sostenibilità, modularità e innovazione funzionale. Questo sistema risponde efficacemente alle sfide poste dagli ambienti lavorativi contemporanei, caratterizzati da una crescente domanda di flessibilità e adattabilità. Le implicazioni della pandemia di Covid-19 hanno ulteriormente evidenziato la necessità di spazi dinamici e multifunzionali, trasformando l'approccio tradizionale all'arredo ufficio. Comma si inserisce in questo contesto come una piattaforma progettuale evolutiva, capace di adattarsi ai mutamenti delle esigenze lavorative e contribuendo a ridefinire i paradigmi dell'arredamento sostenibile. Progettato come un kit modulare composto da sei elementi principali (Fig. 32), Comma si ispira alla semplicità costruttiva e alla flessibilità delle impalcature. Questa scelta progettuale non è solo estetica, ma funzionale, in quanto consente agli utenti di configurare e riconfigurare lo spazio senza l'utilizzo di strumenti complessi (Fig. 33). I telai modulari, assemblabili attraverso traverse orizzontali e diagonali, garantiscono stabilità e versatilità strutturale. Il sistema di giunti "branca" permette una riconfigurazione continua, trasformando il prodotto in una soluzione altamente adattabile e personalizzabile. Inoltre, la progettazione modulare estende significativamente il ciclo di vita del sistema, riducendo la necessità di sostituire l'intero arredo in caso di cambiamenti nelle esigenze. Dal punto di vista della sostenibilità, Comma incarna i principi del Design for Sustainability (DfS), concentrandosi sull'ottimizzazione delle risorse e sulla riduzione degli sprechi. Gli schermi divisorii, realizzati in plastica riciclata e certificati Cradle to Cradle Certified™, non solo contribuiscono all'insonorizzazione e alla privacy, ma rappresentano un esempio concreto di valorizzazione dei materiali post-consumo. Questo approccio si allinea ai principi dell'economia circolare, promuovendo il recupero, la rigenerazione e il riutilizzo dei componenti. La semplicità del design riduce la complessità produttiva e logistica, garantendo un impatto ambientale significativamente inferiore rispetto agli arredi tradizionali. Dal punto di vista funzionale, Comma offre una straordinaria versatilità, con la possibilità di creare campate modulari di lunghezze variabili da 40 cm a 2 metri.



Fig. 31: sistema per ufficio Comma di Vitra. Fonte: www.vitra.com

Accessori come tavoli, ripiani e moduli di elettrificazione si integrano facilmente nel sistema, offrendo soluzioni personalizzate per diversi contesti lavorativi. I cavi possono essere organizzati ordinatamente lungo i tubi strutturali mediante fascette elastiche, garantendo un design pulito e funzionale. Questa attenzione ai dettagli non solo migliora l'esperienza d'uso, ma riflette anche un'approfondita consapevolezza delle necessità operative degli spazi di lavoro moderni. Comma si configura quindi non solo come un prodotto di arredo, ma come una piattaforma progettuale che incorpora i principi del circular design e della sostenibilità. Come sottolineato da Christian Groesen, Chief Design Officer di Vitra, "Comma rappresenta un investimento in un ambiente flessibile, riprogettabile di continuo". Questa affermazione sintetizza l'essenza del sistema, che non solo risponde alle esigenze attuali, ma anticipa anche i bisogni futuri, offrendo una soluzione innovativa e responsabile per gli spazi lavorativi contemporanei.

La sua capacità di unire modularità, sostenibilità e funzionalità lo rende un caso studio significativo per esplorare l'applicazione pratica dei principi di economia circolare e design sostenibile nel settore dell'arredamento. Il progetto Comma, pur non essendo previsto dall'azienda Vitra, potrebbe integrarsi perfettamente in un modello di Product-as-a-Service (PaaS). Questo approccio consentirebbe agli utenti di noleggiare o condividere il sistema piuttosto che acquistarlo, favorendo una gestione circolare del prodotto. Attraverso il PaaS, Vitra manterrebbe il controllo sui materiali e sui componenti, che possono essere ricondizionati, aggiornati o riciclati al termine del loro utilizzo. Questo modello di business non solo ridurrebbe i rifiuti, ma creerebbe anche un ciclo virtuoso in cui il valore del prodotto viene massimizzato nel tempo.

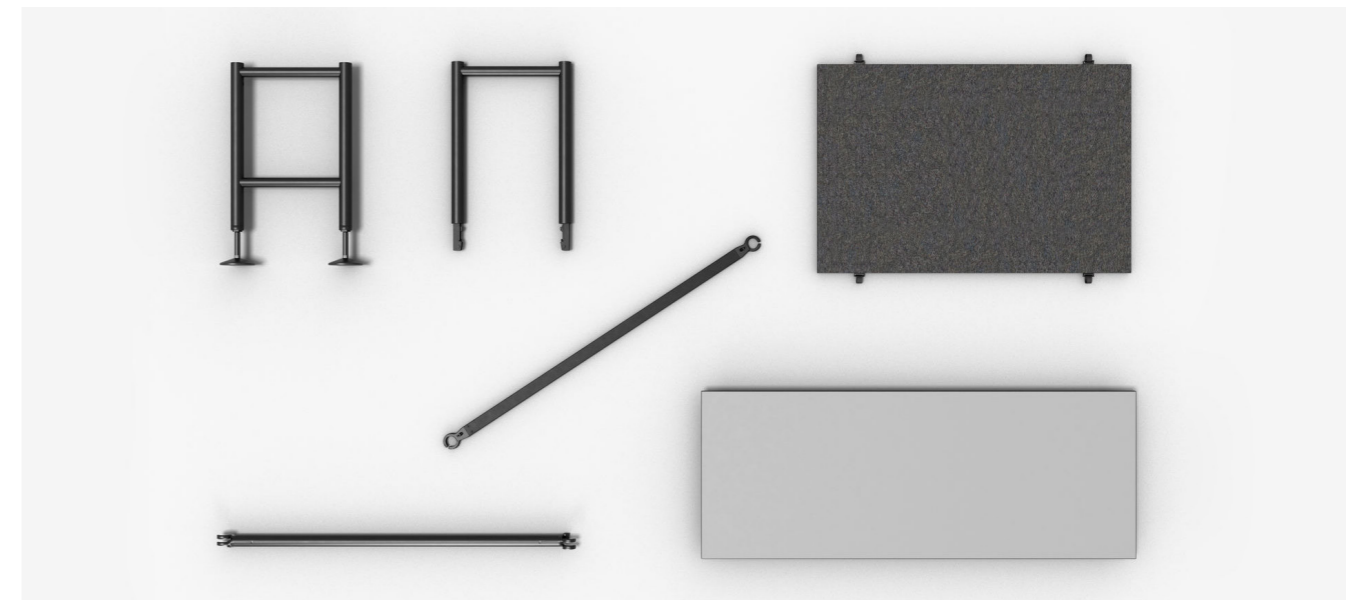


Fig. 32: scomposizione dei sei elementi principali che compongono il sistema: i telai di base e superiori che formano la struttura portante del sistema; travi orizzontali e diagonali che forniscono stabilità e supporto; la superficie di appoggio per varie esigenze; schermo divisorio che contribuisce. Fonte: www.vitra.com



Fig. 33: il sistema di incastro dei telai di Comma sfrutta un innesto a pressione ispirato ai ponteggi, con blocchi di fissaggio meccanico che garantiscono stabilità senza l'uso di viti. Questo consente un montaggio rapido e una configurazione modulare, adattabile alle diverse esigenze dello spazio. Fonte: www.vitra.com

Bibliografia

Codice degli Appalti (D.Lgs. n. 36/2023) (2023). Nuovo codice degli appalti pubblici. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Suppl. Ordinario n. 67, pp. 1-350.

Codice del Consumo (2005). Decreto legislativo n. 206/2005. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Suppl. Ordinario n. 235, pp. 1-170.

Commissione Europea. (2008). Appalti pubblici per un ambiente migliore, COM 2008/400, p. 3.

Commissione Europea. (2020). Piano d'azione per l'economia circolare - Per un'Europa più pulita e più competitiva, p. 3.

Criteri Ambientali Minimi (CAM) (2017). Criteri ambientali minimi per l'arredo e per i servizi di pulizia per le forniture pubbliche. Ministero dell'Ambiente, pp. 1-18.

Decreto Legislativo n. 81/2008 (2008). Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Suppl. Ordinario n. 108, pp. 1-550.

Direttiva 2001/95/CE (2001). Direttiva sulla sicurezza generale dei prodotti. Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, L 11, pp. 4-17.

DM 26 giugno 1984 (1984). Norme di sicurezza antincendio per la costruzione e l'esercizio delle attività scolastiche. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 234, pp. 1-7.

EN 16121 (2013). Furniture - Non-domestic storage furniture - Requirements for safety, strength, durability and stability. European Committee for Standardization (CEN), pp. 1-30.

EN 1729 (2015). Furniture - Chairs and tables for educational institutions - Functional dimensions, safety requirements and test methods. European Committee for Standardization (CEN), pp. 1-25.

European Commission. (2020). New Circular Economy Action Plan. Brussels, pp. 159-161.

Fondazione Symbola & Unioncamere. (2024). GreenItaly 2024: Un'economia a misura d'uomo contro le crisi. Fondazione Symbola, p. 256.

Gazzetta Ufficiale. (2020). Supplemento al Supplemento Ordinario n. 38, p. 7.

Hashemi Farahmand, S., & Rahimiaghdas, N. (2024). Circular Economy and Business Transformation in European Furniture Industry. Proceedings of The International Conference on Business, Management and Economics, pp. 10-18.

ISO 9001 (2015). Quality management systems - Requirements. International Organization for Standardization, pp. 1-29.

ISO 14001 (2015). Environmental management systems - Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization, pp. 1-36.

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2022). Criteri Ambientali Minimi per la Fornitura di Arredi per Interni. Gazzetta Ufficiale, pp. 145-158.

Regolamento REACH (CE n. 1907/2006) (2006). Regolamento concernente la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche. Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, L 396, pp. 1-849.

Sonego, M., Echeveste, M., & Debarba, H. (2018). The role of modularity in sustainable design: A systematic review. Journal of Cleaner Production, Vol. 176, pp. 196-209.

UNI EN 13430. Requisiti di riciclabilità degli imballaggi. Standard tecnico europeo, p. 154.

UNI EN 16640. Plastica a base biologica. Standard tecnico europeo, pp. 150-151.

UNI EN ISO 14040. Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita. Standard tecnico europeo, p. 147.

Yang, D., & Vezzoli, C. (2024). Designing Environmentally Sustainable Furniture Products: Furniture-Specific Life Cycle Design Guidelines and a Toolkit to Promote Environmental Performance. Sustainability, pp. 15-26.

Capitolo 5

Strategie di progettazione per l'estensione della vita utile e la durabilità del prodotto

5.1. Concetto di Modularità nel design

5.2. Approccio modulare nella progettazione

5.3. Casi studio di prodotti modulari

5.4. Manutenibilità, aggiornabilità e rifabbricabilità nel prodotto circolare

5.1. Concetto di Modularità nel design

La transizione verso l'Economia Circolare richiede una revisione profonda dei paradigmi progettuali tradizionali, ponendo il design al centro di questa trasformazione. In questo contesto, i concetti di modularità e design modulare assumono un ruolo strategico nella ridefinizione dei processi produttivi e dei modelli di consumo.

La modularità si configura come un approccio progettuale che suddivide un sistema complesso in componenti indipendenti o moduli, permettendo maggiore flessibilità durante le fasi di progettazione, utilizzo e smaltimento. Tale approccio si rivela particolarmente efficace nel prolungare la vita utile dei prodotti, rendendoli riparabili, aggiornabili e facilmente rigenerabili, in linea con i principi dell'Economia Circolare. Come sottolineato dalla Ellen MacArthur Foundation (2013)^[1] e da Charter (2018)^[2], il design modulare rappresenta una strategia progettuale chiave per contrastare l'obsolescenza programmata e promuovere una logica di riuso e riciclo dei materiali. La separabilità dei moduli, infatti, facilita sia la manutenzione che il recupero dei componenti, riducendo l'impatto ambientale e sostenendo la rigenerazione di risorse all'interno di cicli produttivi chiusi. Questo approccio richiede ai progettisti di adottare una visione sistemica che tenga conto dell'intero ciclo di vita del prodotto, dalla fase di concezione fino al fine vita, integrando estetica, funzionalità e sostenibilità.

Sebbene esistano sfide tecniche e operative, come la standardizzazione dei moduli e la riorganizzazione delle catene di fornitura, il design modulare offre opportunità significative per stimolare l'innovazione e promuovere modelli di business sostenibili. In sintesi, modularità e design modulare non solo agevolano la transizione verso un'economia più circolare, ma favoriscono anche un cambiamento culturale verso un consumo più consapevole e responsabile, contribuendo a ridefinire le relazioni tra produzione, uso e rigenerazione delle risorse. Il concetto di Design for Modularity (DfM) emerge come una componente centrale nella cultura progettuale e imprenditoriale orientata alla sostenibilità, promuovendo il principio del "fare per disfare". Questa visione si concentra sulla progettazione di prodotti disassemblabili, pensati principalmente per agevolare il recupero e il riciclo dei materiali al termine del loro ciclo di

[1] Ellen MacArthur Foundation (2013), Op.cit., p. 43.

[2] Charter, M. (2018), Op.cit., p. 39.

Il quinto capitolo si concentra sulle strategie di progettazione volte ad estendere la vita utile del prodotto e aumentarne la durabilità. Viene introdotto il concetto di modularità nel design e discusso l'approccio modulare nella progettazione. Si presentano casi studio di prodotti modulari, analizzando come la manutenibilità, l'aggiornabilità e la rifabbricabilità possano essere integrate nei prodotti circolari per migliorare la loro sostenibilità.

vita, riducendo così lo spreco di risorse e promuovendo un modello di economia circolare. Tuttavia, il DfM non si limita a facilitare il riciclo, ma si evolve verso una logica del “fare per rifare”, in cui i prodotti vengono progettati per essere sostenibili e durevoli sin dalla fase di concezione. Questa prospettiva non solo estende la vita utile dei prodotti, ma permette anche di integrarli più facilmente in nuovi cicli produttivi, contribuendo alla trasformazione sistemica necessaria per realizzare un’economia circolare. Attraverso la revisione della letteratura, emerge una riflessione consolidata sul ruolo della modularità come strategia chiave per incrementare la circolarità e la durabilità dei prodotti. Autori come Lacy e Rutqvist (2015)^[3] e van der Berg e Bakker (2015)^[4] evidenziano come il DfM rappresenti una leva strategica per affrontare i radicali cambiamenti richiesti dal sistema di produzione e consumo, trasformando la progettazione sostenibile da obiettivo ideale a paradigma operativo. Questo approccio, fortemente integrato nel design contemporaneo, punta a ottimizzare ogni fase del ciclo di vita dei prodotti, riducendo gli impatti ambientali e promuovendo un modello economico più resiliente e responsabile. Fin dagli anni '90, il dibattito accademico nell’ambito dell’ecodesign e del Design per la Sostenibilità ambientale si è concentrato sullo sviluppo di strategie di Design for Disassembling (DfD), volte a facilitare il riciclo dei componenti e dei materiali dei prodotti. Keoleian e Menerey (1994) hanno introdotto uno dei primi modelli sistematici per integrare il DfD nei processi di progettazione, sottolineando come la capacità di smontare facilmente un prodotto potesse ridurre l’impatto ambientale complessivo^[5]. Successivamente, Manzini e Vezzoli (1998) hanno ampliato questo approccio, proponendo metodologie pratiche per applicare il DfD ai sistemi di prodotto-servizio, evidenziando il potenziale della progettazione per la sostenibilità nel generare modelli economici più circolari, ripensando i prodotti come parte di un sistema più ampio, dove i materiali e i componenti non vengono considerati rifiuti, ma risorse destinate a nuovi cicli produttivi^[6]. Negli anni successivi, autori come Bryant et al. (2004) hanno con-

[3] Lacy, P., & Rutqvist, J. (2015), Op.cit, pp. 142-144.

[4] van der Berg, M. R. and Bakker, C. A. (2015), Op.cit., pp. 365-379.

[5] Keoleian, G. A. and Menerey, D. (1994), Op.cit., pp. 645-668.

[6] Manzini, E. & Vezzoli, C. (1998), Lo sviluppo di prodotti sostenibili – I requisiti ambientali dei prodotti industriali, Maggioli Editore, Rimini.

tribuito al tema affrontando le complessità tecniche legate alla disassemblabilità, concentrandosi su prodotti ad alta densità tecnologica, evidenziando la necessità di strumenti progettuali specifici per gestire l’interazione tra materiali diversi^[7]. Più recentemente, Machado e Morioka (2021) hanno aggiornato questa prospettiva, integrando i principi del DfD con gli sviluppi tecnologici e digitali. Il loro contributo si concentra sulla capacità di utilizzare tecnologie emergenti, come la progettazione parametrica e i modelli digitali, per migliorare ulteriormente la smontabilità e il recupero dei materiali. La modularità è emersa come un elemento chiave per la realizzazione delle strategie di DfD, poiché permette di semplificare l’architettura dei prodotti, soprattutto di quelli caratterizzati da elevata complessità^[8]. Ulrich (1994) è stato tra i primi a teorizzare la modularità come un mezzo per ridurre i costi di produzione e migliorare la flessibilità nella personalizzazione dei prodotti, creando basi teoriche fondamentali per le piattaforme modulari^[9]. Questa visione è stata ripresa e ampliata da Miller ed Elgård (1998), che hanno evidenziato come la modularità potesse facilitare il disassemblaggio e, al contempo, garantire una maggiore standardizzazione dei componenti^[10]. Per Bordignon (2009)^[11], la modularità rappresentava non solo una soluzione tecnica, ma anche una risposta alle esigenze crescenti di sostenibilità nei processi industriali, mentre Yan e Feng (2013) hanno mostrato come questa strategia fosse applicabile a settori industriali complessi, dove i benefici del recupero e del riuso dei componenti sono particolarmente rilevanti^[12]. Le soluzioni di Design for Manufacturing (DfM) hanno

[7] Bryant, C. R., Sivaramakrishnan, K. L., Van Wie, M., Stone, R. B. and McAdams, D. A. (2004). A Modular Design Approach to Support Sustainable Design, in Proceeding of the ASME 2004, Vol. 3d, pp. 909-918.

[8] Machado, N. T. and Morioka, S. N. (2021). Contributions of modularity to the circular economy – A systematic review of literature, in Journal of Building Engineering, vol. 44, pp. 1-11.

[9] Ulrich, K. (1994). Fundamentals of Product Modularity, in Dasu, S. and Eastman, C. (eds), Management of Design, Springer, Dordrecht, pp. 219-231.

[10] Miller, T. D., & Elgård, P. P. E. (1998). Defining Modules, Modularity and Modularization – Evolution of the Concept in a Historical Perspective. Design for Integration in Manufacturing, pp. 20-21.

[11] Bordignon, M. (2009). La modularità e il suo potenziale ruolo nelle imprese – La gestione dell’approccio modulare e le criticità, le opportunità e i rischi legati alla modularizzazione, Aracne Editrice, Roma.

[12] Yan, J. & Feng, C. (2013). Sustainable design-oriented product modularity combined with 6R concept – A case study of rotor laboratory bench, in Clean Technologies and Environmental Policy, vol. 16, issue 1, pp. 95-109.

svolto un ruolo centrale nell'ottimizzazione dei processi produttivi, consentendo di ridurre costi e tempi di produzione, aumentare la flessibilità e personalizzazione dei prodotti, oltre a migliorare la sostenibilità complessiva. Jacobs, Vickery e Droge (2007) hanno evidenziato come il DfM faciliti la razionalizzazione delle risorse produttive, riducendo le inefficienze nei processi e promuovendo approcci orientati al valore aggiunto^[13]. Parallelamente, Umeda et al. (2008) hanno approfondito il legame tra progettazione modulare e sostenibilità, dimostrando come il design modulare migliori le possibilità di disassemblaggio e riciclo, contribuendo a diminuire l'impatto ambientale dei prodotti a fine vita. In questo contesto, la concezione modulare dei prodotti ha rappresentato una strategia cruciale per coniugare benefici ambientali ed economici^[14]. Attraverso progetti pilota come piattaforme di disassemblaggio per elettrodomestici e automobili, è stata promossa una nuova cultura progettuale ed imprenditoriale orientata al "fare per disfare". Questo approccio ha permesso di sviluppare un know-how significativo sui processi di riciclo, sui materiali riciclati e sulle loro prestazioni, fornendo un importante contributo alla transizione verso modelli produttivi più sostenibili. van der Berg e Bakker (2015) hanno sottolineato come il design modulare possa ridurre drasticamente la produzione di rifiuti, concependo i prodotti in un'ottica di "fare per rifare". Questo significa progettare prodotti disassemblabili, con l'obiettivo primario di prolungarne la vita utile attraverso riparazione, manutenzione e aggiornamento. Solo come ultima istanza, i materiali vengono riciclati, garantendo una valorizzazione come materie seconde di elevata qualità^[15]. Inoltre, Sonogo, Echeveste e Debarba (2018) hanno esplorato le implicazioni pratiche del design modulare nelle strategie delle 3R – Ridurre, Riusare e Riciclare – dimostrando come i prodotti modulari possano minimizzare la produzione di rifiuti, favorendo il riutilizzo dei componenti grazie a progettazioni che ne assicurano la riparabilità, manutenzione,

[13] Jacobs, M. D., Vickery, S. K. & Droge, C. (2007). The effects of product modularity on competitive performance, in *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 27, issue 10, pp. 1046-1068.

[14] Umeda, Y., Fukushige, S., Tonoike, K. & Kondoh, S. (2008). Product modularity for life cycle design, in *CIRP Annals*, vol. 57, issue 1, pp. 13-16.

[15] van der Berg, M. R. and Bakker, C. A. (2015), *Op.cit.*, pp. 365-379.

aggiornabilità e rifabbricabilità^[16]. Questo approccio, in linea con i principi dell'Economia Circolare, contribuisce non solo alla sostenibilità ambientale, ma anche alla creazione di valore economico e sociale. Nello scenario attuale, caratterizzato da un'attenzione crescente alla sostenibilità e alla durabilità dei prodotti, la modularità si configura come un requisito progettuale fondamentale per favorire la transizione verso l'Economia Circolare. Questo approccio consente di trasformare la tradizionale "fase di uso" in un processo dinamico che include riuso, manutenzione e riparazione, e la "fase di produzione" in un'opportunità per aggiornare, rinnovare e rifabbricare i prodotti. Soh, Ong e Nee (2014) evidenziano come la modularità non solo migliori la flessibilità nella progettazione, ma costituisca anche una leva essenziale per facilitare interventi manutentivi e aggiornamenti, riducendo così l'impatto ambientale complessivo del ciclo produttivo, in particolare, sottolineano che il DfM agevola non solo la separabilità e sostituibilità dei componenti, ma anche la loro interoperabilità, rendendo più semplice e conveniente il passaggio da una logica lineare a una circolare^[17]. Parallelamente, Machado e Morioka^[18] approfondiscono l'importanza della modularità nel supportare modelli di business circolari, mettendo in luce come la progettazione modulare favorisca lo sviluppo di processi rigenerativi, dove i prodotti possono essere facilmente rifabbricati o riparati, garantendo un uso prolungato delle risorse. La loro ricerca sottolinea, inoltre, il ruolo del design nel creare valore aggiunto lungo tutta la filiera, incentivando pratiche di produzione e consumo più responsabili. Gli approcci di Design for Modularity (DfM), in questo contesto, emergono come strumenti progettuali centrali per ridisegnare l'attuale modello economico da lineare a circolare. Il DfM, infatti, permette di prolungare significativamente la vita utile dei prodotti, aumentando la loro intensità d'uso e promuovendo l'adattabilità ai cambiamenti tecnologici e funzionali.

[16] Sonogo, M., Echeveste, M. E. S. & Debarba, H. G. (2018). The role of modularity in sustainable design – A systematic review, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, pp. 196-209.

[17] Soh, S., Ong, S. and Nee, A. Y. C. (2014), "Design for Disassembly for Remanufacturing – Methodology and Technology", in T. K. Lien (ed.), *Procedia 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, vol. 15, pp. 407-412.

[18] Machado, N. T. and Morioka, S. N. (2021), *Op.cit.*, pp. 1-11.

Sin dall'inizio dell'industrializzazione, la progettazione orientata alla modularità, sviluppata attraverso processi di standardizzazione e razionalizzazione dei moduli, si è affermata come una strategia centrale per migliorare l'efficienza produttiva e accrescere la competitività delle imprese. La modularità costituisce infatti un principio progettuale di grande rilevanza. Miller ed Elgård (1998) sottolineano come il design modulare abbia permesso di rispondere alla crescente domanda di "personalizzazione di massa", ovvero la capacità di produrre una vasta gamma di prodotti combinando moduli standardizzati in configurazioni personalizzate^[19]. Questo concetto è ulteriormente esplorato da Baldwin e Clark (1999), che propongono un'analisi dei benefici economici derivanti dall'utilizzo di piattaforme modulari, evidenziando la possibilità di aumentare l'efficienza produttiva riducendo i costi e i tempi di sviluppo^[20]. In uno studio successivo, Bask et al. (2010) ampliano questa prospettiva, discutendo il ruolo delle piattaforme modulari nella gestione integrata delle supply chain, dimostrando come queste facilitino sia la flessibilità operativa che la personalizzazione del prodotto finale. Nell'attuale contesto economico e ambientale, la modularità assume un significato ancora più ampio, favorendo il disassemblaggio dei prodotti e il riciclo dei materiali a fine vita^[21]. Bordignon (2009) esplora il contributo del design modulare alla sostenibilità, evidenziando come la separabilità dei componenti consenta una maggiore efficienza nel recupero delle risorse^[22]. Parallelamente, Ijomah et al. (2010) affrontano il tema della rigenerazione dei prodotti modulari, proponendo modelli di progettazione che ottimizzano il riutilizzo dei componenti attraverso la manutenzione e il riciclo^[23]. Mital et al. (2014) rafforzano questi argomenti, introducendo metodologie progettuali che rendono i

[19] Miller, T. D., & Elgård, P. P. E. (1998), *Op.cit.*, pp. 20-21.

[20] Baldwin, C., & Clark, K. (1999). *Design Rules: The Power of Modularity*. MIT Press, pp. 123-128.

[21] Bask, A., Lipponen, M., Rajahonka, M. & Tinnilä, M. (2010). The concept of modularity – Diffusion from manufacturing to service production, in *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 21, issue 3, pp. 345-350.

[22] Bordignon, M. (2009), *La modularità e il suo potenziale ruolo nelle imprese – La gestione dell'approccio modulare e le criticità, le opportunità e i rischi legati alla modularizzazione*, Aracne Editrice, pp. 58-63.

[23] Ijomah, W. L., McMahon, C. A., Hammond, G. P. & Newman, S. T. (2010). Development of robust design for remanufacturing guidelines to further the aims of sustainable development, in *International Journal of Production Research*, vol. 45, issue 18-19, pp. 4513-4536.

prodotti modulari più facilmente riparabili e riciclabili, contribuendo così a ridurre l'impatto ambientale^[24]. Un ulteriore avanzamento teorico è stato proposto da Salhieh e Kamrani (1999), che hanno presentato un modello di progettazione modulare basato su due principi fondamentali: la scomposizione delle funzioni dei prodotti e la creazione di piattaforme modulari. Essi descrivono come le piattaforme possano fungere da unità centrali di base attorno alle quali vengono aggiunti moduli differenti per generare una varietà di configurazioni. Questo approccio, descritto attraverso il concetto di "commonality", definisce il modulo come un'unità funzionale autonoma, il cui impiego permette non solo di variare i prodotti finali ma anche di facilitare la sostituzione e l'aggiornamento dei componenti, creando famiglie di prodotti più efficienti e sostenibili^[25]. Sanderson e Uzumeri (1997) hanno approfondito questa idea, evidenziando come la modularità favorisca la gestione delle varianti e la creazione di linee di prodotto flessibili^[26]. Successivamente, Abdullah, Kamaruddin e Ripin (2008) hanno esplorato l'applicazione pratica della "commonality" in ambito industriale, analizzando i vantaggi economici e operativi derivanti dall'adozione di piattaforme modulari per la produzione su larga scala. La modularità emerge come un principio progettuale essenziale per l'ottimizzazione dei prodotti e dei loro componenti, consentendo non solo il perfezionamento continuo e l'adattabilità alle mutevoli esigenze di mercato e degli utenti, ma anche una più stretta connessione con lo scenario di fine vita dei prodotti^[27]. Bryant et al. (2004) hanno condotto uno studio negli Stati Uniti, incentrato sulla progettazione di metodi per integrare la sostenibilità ambientale nello sviluppo dei prodotti. Il loro lavoro ha introdotto un approccio modulare che considera l'intero ciclo di vita del prodotto, ponendo particolare attenzione alla facilità di riciclo, alla semplificazione

[24] Mital, A., Desai, A., Subramanian, A. & Mital, A. (2014). Designing for assembly and disassembly, in Mital, A., Desai, A., Subramanian, A. and Mital, A. (eds), *Product Development | A Structured Approach to Consumer Product Development, Design, and Manufacture*, Elsevier, Amsterdam, pp. 159-202.

[25] Salhieh, S. M. & Kamrani, A. K. (1999). Macro level product development using design for modularity, in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 15, issue 4, pp. 319-329.

[26] Sanderson, S. W. & Uzumeri, M. (1997). *Managing product families*, McGraw-Hill/Irwin, New York.

[27] Abdullah, A. G., Kamaruddin, A. R. and Ripin, Z. M. (2008). Utilization of Design for Modularity Approach to Identify Product Platform, in *Modern Applied Science*, vol. 2, issue 2, pp. 1-10.

delle operazioni di smontaggio e alla riduzione delle risorse impiegate sin dalle fasi di progettazione iniziale, avvalorando l'idea che la modularità possa essere un mezzo efficace per ottimizzare la sostenibilità ambientale nei processi industriali^[28]. Un altro contributo fondamentale proviene da Newcomb, Bras e Rosen (1998), che hanno esplorato il legame tra la progettazione modulare e il ciclo di vita dei prodotti. Il loro lavoro ha evidenziato come l'architettura di un prodotto sia determinante nel definire processi chiave come l'assemblaggio e il disassemblaggio, il riciclo e il servizio alla fine del ciclo di vita dimostrando che un elevato indice di modularità non solo facilita il recupero dei materiali e la loro reimmissione nel ciclo produttivo, ma consente anche di ridurre significativamente i costi associati alle operazioni di assemblaggio e manutenzione^[29]. Pertanto, fin dagli anni '90, la modularità è stata identificata come un requisito essenziale per il design sostenibile, promuovendo il concetto del "fare per disfare" che pone attenzione sull'importanza della progettazione orientata al disassemblaggio e al riciclo, favorendo una gestione più responsabile delle risorse e stimolando una cultura progettuale volta a massimizzare il valore intrinseco dei materiali lungo cicli di utilizzo successivi.

La modularità, pur non essendo un concetto nuovo nel design industriale, sta acquisendo una dimensione più ampia e innovativa nel contesto contemporaneo. Tradizionalmente, la modularità era associata alla componibilità e all'interfaccia tra componenti, ma oggi il focus si sposta su funzionalità come aggiornabilità, riparabilità e sostituzione di parti non funzionanti, specialmente nei prodotti elettronici. Questo cambiamento non solo favorisce l'estensione della vita utile dei prodotti, ma pone l'accento sull'idea di rigenerazione, in cui i componenti modulari diventano centrali in un paradigma progettuale orientato al "rifare". Un contributo importante a questa evoluzione è dato da van der Berg e Bakker (2015), che hanno delineato la transizione dal design per la disassemblabilità (Design for Disassembly, DfD) al design per la rifabbricazione (Design for Remanufacturing, DfRem)^[30].

[28] Bryant, C. R., Sivaramakrishnan, K. L., Van Wie, M., Stone, R. B. and McAdams, D. A. (2004), *Op.cit.*, pp. 909-918.

[29] Newcomb, P. J., Bras, B. and Rosen, D. W. (1998). Implications of Modularity on Product Design for the Life Cycle, in *Journal of Mechanical Design*, vol. 120, issue 3, pp. 483-490.

[30] van der Berg, M. R. and Bakker, C. A. (2015), *op.cit.*, pp. 365-379.

Secondo gli autori, il DfRem si distingue per una visione incentrata sulla progettazione di componenti che possano essere facilmente rigenerati e reintegrati in nuovi cicli produttivi, superando i limiti del DfD, focalizzato principalmente sullo smontaggio per il riciclo. van der Berg e Bakker evidenziano come il DfRem permetta una maggiore efficienza nell'uso delle risorse e contribuisca all'implementazione di modelli di economia circolare, offrendo soluzioni concrete per il riuso dei componenti. La revisione teorica e metodologica proposta da van der Berg e Bakker si è consolidata attraverso studi che identificano nuovi criteri di progettazione, i quali non solo ottimizzano i processi produttivi, ma migliorano anche le performance durante le fasi d'uso e dismissione dei prodotti. Questi criteri sottolineano l'importanza della durata programmata dei moduli, progettati per essere facilmente separabili, riparabili e rifabbricabili. Ad esempio, componenti più longevi possono essere riutilizzati, mentre quelli soggetti a maggiore usura possono essere sostituiti con parti aggiornate, garantendo così una maggiore sostenibilità rispetto al tradizionale riciclo. Un altro contributo fondamentale al tema della modularità è rappresentato dal principio secondo cui riusare e rifabbricare sono strategie più sostenibili rispetto al riciclo. Questo concetto si lega strettamente al paradigma del "fare per rifare", che ridefinisce non solo la fase d'uso del prodotto, ma anche i modelli di business associati. Tali modelli si basano su servizi di manutenzione, riparazione e rifabbricazione, contribuendo a una transizione efficace verso l'economia circolare. Il lavoro di van der Berg e Bakker, in particolare, evidenzia come questi nuovi approcci progettuali siano in grado di bilanciare la necessità di sostenibilità con la competitività aziendale, promuovendo pratiche produttive responsabili e innovative. La modularità, dunque, si configura in due dimensioni principali: una orientata all'utente, che beneficia di prodotti più personalizzabili, aggiornabili e longevi; e una orientata all'azienda, che ottiene vantaggi competitivi attraverso la riduzione degli sprechi e l'adozione di processi produttivi più efficienti. Queste due dimensioni si integrano nel concetto di modularità come leva strategica per la sostenibilità e la rigenerazione economica. La modularità rappresenta un concetto cardine nella transizione verso l'Economia Circolare, poiché consente di estendere la vita utile dei prodotti attraverso strategie progettuali che favoriscono riparabilità, aggiornabilità e riciclabilità.

Da un lato, una modularità orientata all'utente permette ai consumatori di effettuare interventi semplici di manutenzione e riparazione sui propri prodotti, aumentando la loro durabilità. Dall'altro lato, una modularità pensata per le aziende facilita il ritiro, l'aggiornamento e la reimmissione sul mercato di prodotti ricondizionati o rigenerati. Questo approccio, come evidenziato da Peeters et al. (2012), si fonda sull'ottimizzazione delle strategie di disassemblaggio. Gli autori sottolineano che il disassemblaggio non distruttivo è cruciale per la manutenzione e il ricondizionamento, mentre quello distruttivo è più adeguato per il riciclo. La qualità delle connessioni e degli elementi di fissaggio diventa, quindi, un aspetto determinante per il fine vita del prodotto, richiedendo una progettazione mirata che tenga conto della separabilità dei componenti^[31]. Mital et al. (2014) ampliano questa prospettiva analizzando come la progettazione dei processi di disassemblaggio influenzi la sostenibilità del ciclo di vita del prodotto. Il loro lavoro sottolinea l'importanza di sviluppare sistemi di connessioni reversibili e standardizzate, poiché tali elementi facilitano operazioni di manutenzione e riducono i costi associati al trattamento dei rifiuti. La loro ricerca contribuisce a definire criteri chiave per progettare prodotti modulari che siano compatibili con le logiche di circolarità^[32]. Parallelamente, van der Berg e Bakker (2015) introducono il concetto di "remake" nel contesto della circolarità dei prodotti, evidenziando il valore aggiunto che deriva dal ritorno dei prodotti dal cliente all'azienda per essere riparati, aggiornati e rigenerati. Secondo gli autori, il remake non è solo una pratica operativa, ma una vera e propria strategia per incrementare il valore residuo dei prodotti e rafforzare il loro impatto positivo nell'Economia Circolare^[33]. Affinché il "remake" sia efficace, i moduli devono essere progettati con interfacce standardizzate e connessioni reversibili, garantendo così interventi più semplici ed economici. Infine, l'introduzione di strumenti di supporto come la prognostica e la diagnostica – che valutano l'affidabilità residua dei componenti – permettono alle aziende di monitorare e ottimizzare le performance dei prodotti

[31] Peeters, J., Vanegas, P., Dewulf, W. and Duflou, J. (2012). Design for demanufacturing – A life cycle approach, in Proceedings of Conference I-SUP2012 – Innovation for Sustainable Production, pp. 6-9.

[32] Mital, A., Desai, A., Subramanian, A. and Mital, A. (2014), op.cit, pp. 159-202.

[33] van der Berg, M. R. and Bakker, C. A. (2015), op.cit, p. 369.

durante tutto il loro ciclo di vita. Inoltre, lo sviluppo della logistica "inversa", ossia il recupero e la gestione dei prodotti usati da parte delle aziende, rappresenta una componente fondamentale per implementare un modello di "fare per rifare", che è centrale nel Design for Modularization (DfM) convergendo verso un modello in cui la modularità e la rifabbricabilità diventano strumenti strategici per incrementare la circolarità, la durabilità e la riciclabilità dei prodotti, rispondendo così alle esigenze di un sistema economico sempre più orientato alla sostenibilità.

Roetz Life: una bicicletta progettata per riparazione e upgrading

Nel panorama della mobilità urbana sostenibile del nord Europa, la bicicletta elettrica Roetz Life, sviluppata dall'azienda olandese Roetz Bikes, costituisce un esempio emblematico di design circolare applicato. In un contesto in cui l'uso quotidiano della bicicletta è profondamente radicato nella cultura locale, emerge un paradosso significativo: ogni anno, oltre un milione di biciclette vengono trasformate in rifiuti, spesso senza essere mai state pienamente sfruttate.

La Roetz Life (Fig. 34) si pone come risposta a questa problematica, proponendo un nuovo paradigma progettuale che combina modularità, durabilità e sostenibilità per prolungare il ciclo di vita del prodotto e ridurre la generazione di scarti. Alla base della Roetz Life vi è un'architettura modulare, articolata in cinque componenti principali (Fig. 35): il telaio, che costituisce la struttura portante; la batteria, che alimenta l'assistenza elettrica; le ruote, progettate per garantire robustezza e prestazioni; il sistema di trasmissione, che include catena e cambio; e i freni, fondamentali per la sicurezza. Questo sistema è stato sviluppato seguendo i principi del Design for Modularity (DfM) e del Design for Disassembly (DfD), consentendo una manutenzione agevole, aggiornamenti continui e riparazioni mirate. Elemento centrale del progetto è il design innovativo del telaio, concepito come una struttura monolitica e modulare che integra componenti chiave come i tubi del manubrio e del sellino (Fig. 36).

Questo telaio è stato progettato per accogliere accessori e moduli aggiuntivi attraverso connessioni reversibili e accoppiamenti standardizzati, eliminando la necessità di saldature permanenti. Gli snodi e la minuteria, lasciati intenzionalmente a vista, semplificano le operazioni di smontaggio, permettendo agli utenti di intervenire facilmente per riparare o personalizzare la bicicletta. Questa configurazione facilita, ad esempio, la conversione della bicicletta da una versione urbana a una dedicata alle consegne, rispondendo a esigenze di utilizzo diversificate (Fig. 37). Una delle innovazioni più rilevanti della Roetz Life risiede nei sistemi di connessione reversibili, che consentono la sostituzione di componenti senza compromettere l'integrità del prodotto. I moduli batteria e trasmissione, in particolare, sono progettati per essere rimossi e aggiornati con facilità, prolungando la vita utile della bicicletta e migliorandone le prestazioni nel tempo. Inoltre, la

presenza di sensori intelligenti consente un monitoraggio continuo dello stato di usura delle parti più sollecitate, fornendo agli utenti informazioni tempestive per effettuare manutenzioni preventive. L'impegno verso un modello di economia circolare è ulteriormente consolidato da un sistema di supporto post-vendita che promuove la riparazione e il riutilizzo dei componenti. Attraverso un canale di vendita integrato, Roetz Bikes offre servizi di manutenzione che incentivano la sostituzione di parti usurate, riducendo il rischio di rifiuti prematuri e garantendo un ciclo di vita prolungato per ogni bicicletta. Questo approccio non solo crea valore per l'utente, che beneficia di un prodotto durevole e personalizzabile, ma contribuisce anche alla riduzione complessiva dell'impatto ambientale. La bicicletta Roetz Life rappresenta un modello virtuoso di mobilità urbana sostenibile, unendo design modulare, tecnologia intelligente ed economia circolare. Questo caso studio dimostra come un progetto ben concepito possa affrontare con successo le sfide contemporanee legate alla sostenibilità, riducendo gli sprechi e promuovendo un consumo responsabile, tutto senza sacrificare funzionalità o prestazioni.



Fig. 34: Roetz Life, la bicicletta elettrica modulare e sostenibile dell'azienda olandese Roetz Bikes. Fonte:

Fig. 35: architettura modulare della bicicletta Roetz Life, composta da cinque componenti principali: telaio portante, la batteria per l'assistenza elettrica, ruote robuste, sistema di trasmissione (catena e cambio) e freni. Fonte: www.roetz.life.



176

Fig. 36: Il telaio della Roetz Life, elemento portante dell'architettura modulare. Fonte: www.roetz.life.

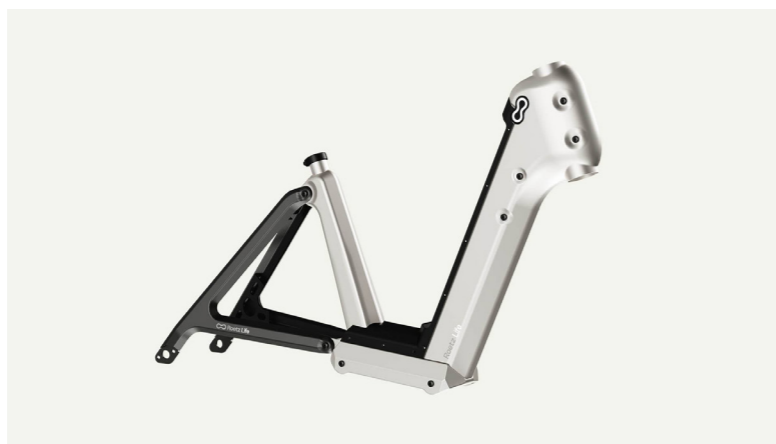


Fig. 37: personalizzazione della Roetz Life: l'architettura modulare e gli snodi a vista permettono di configurare la bicicletta in diverse varianti, come una versione urbana elegante e una pratica cargo bike ideale per le consegne. Fonte: www.roetz.life.

177

Framework Laptop 16: modularità e riparabilità nel mercato tecnologico

Il Framework Laptop 16, sviluppato da Framework Computer Inc., rappresenta un caso studio significativo nel settore dell'elettronica di consumo per la sua capacità di affrontare il problema dell'obsolescenza programmata e della fine del ciclo di vita dei dispositivi tecnologici. Questo laptop modulare è il risultato di un approccio progettuale basato sui principi del Design for Modularity (DfM) e del Design for Disassembly (DfD), che mira a ridurre gli sprechi, migliorare la riparabilità e prolungare la vita utile del prodotto. Framework Computer Inc., fondata a San Francisco, USA, ha trasformato il concetto tradizionale di laptop attraverso una visione innovativa che integra personalizzazione, sostenibilità e circolarità. Il Framework Laptop è progettato per rispondere a un'osservazione fondamentale: gran parte degli utenti aggiorna i propri dispositivi tecnologici non a causa di difetti strutturali o funzionali, ma per la diminuzione delle prestazioni del processore o per l'obsolescenza del software. Tuttavia, i notebook tradizionali rimangono fortemente limitati da una bassa modularità, che ostacola la sostituzione e l'aggiornamento di componenti chiave. In risposta a questa sfida, Framework ha sviluppato un sistema che consente all'utente di personalizzare, aggiornare e riparare il laptop con estrema facilità. Ogni componente, dal processore alla RAM, dalla memoria grafica integrata alle porte di connessione, è stato progettato come modulo indipendente e sostituibile, garantendo un livello di flessibilità senza precedenti (Fig. 38). Un elemento chiave del Framework Laptop è il sistema di porte modulari, che permette agli utenti di configurare il dispositivo in base alle proprie esigenze senza l'utilizzo di dongle o adattatori. Ogni porta, che può includere USB-C, HDMI, LAN e altre opzioni, è progettata come un modulo reversibile che si integra nel telaio principale del laptop (Fig. 39). Questi moduli possono essere rimossi e sostituiti utilizzando una chiave speciale fornita con il dispositivo, facilitando la personalizzazione e riducendo la necessità di accessori esterni. Dal punto di vista della sostenibilità, Framework ha implementato una serie di strategie innovative. Tutti i componenti sono etichettati con un codice QR univoco che fornisce istruzioni dettagliate per la sostituzione e la riparazione (Fig. 40).

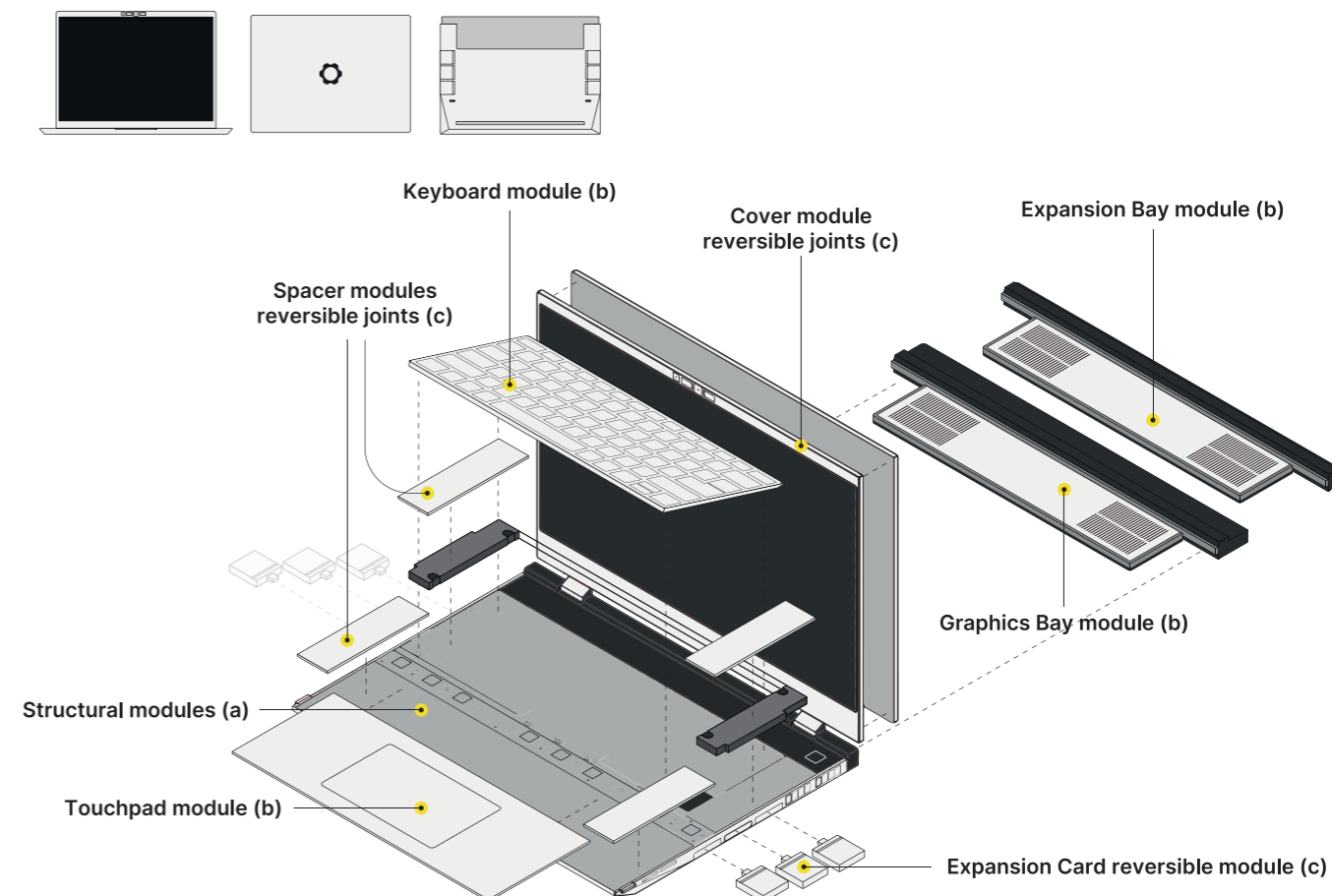


Fig. 38: Architettura del sistema Framework Laptop 16. Fonte: elaborazione dell'autore.

Inoltre, Framework ha sviluppato un marketplace dedicato alla vendita di parti di ricambio e aggiornamenti, che include anche componenti ricondizionati. Questo approccio non solo promuove la circolarità, ma riduce significativamente i rifiuti elettronici. L'azienda offre anche un servizio di ritiro dei pezzi di ricambio, che consente di riciclare o rigenerare i componenti non più utilizzabili, prolungando ulteriormente il ciclo di vita del prodotto. L'architettura del Framework Laptop è basata su un case in alluminio progettato per ospitare tutti i moduli principali del dispositivo. Questo include componenti hardware come la scheda madre, la batteria e la RAM, nonché moduli dedicati all'interazione con l'utente, come la tastiera, il touchpad e lo schermo. La struttura del laptop è caratterizzata da un sistema di connessioni e interfacce altamente intuitive, basato su guide scorrevoli che consentono di rimuovere e sostituire facilmente i singoli componenti (Fig. 41). Ogni modulo funzionale è progettato per integrarsi perfettamente con gli altri, contribuendo alle prestazioni complessive del dispositivo. Un altro elemento distintivo è l'attenzione dedicata alla progettazione delle connessioni interne, che sono state concepite per essere durevoli e facili da utilizzare. Il design modulare non si limita agli aspetti hardware, ma include anche un ecosistema di supporto per l'utente. Il marketplace di Framework, ad esempio, offre una piattaforma centralizzata dove gli utenti possono acquistare componenti originali, esplorare opzioni di aggiornamento e accedere a parti ricondizionate, incentivando un modello di consumo responsabile.

Fig. 39: Le porte modulari del Framework Laptop, progettate per una personalizzazione semplice e senza bisogno di adattatori esterni, permettono agli utenti di configurare il dispositivo in base alle proprie esigenze.
Fonte: www.framework.com.

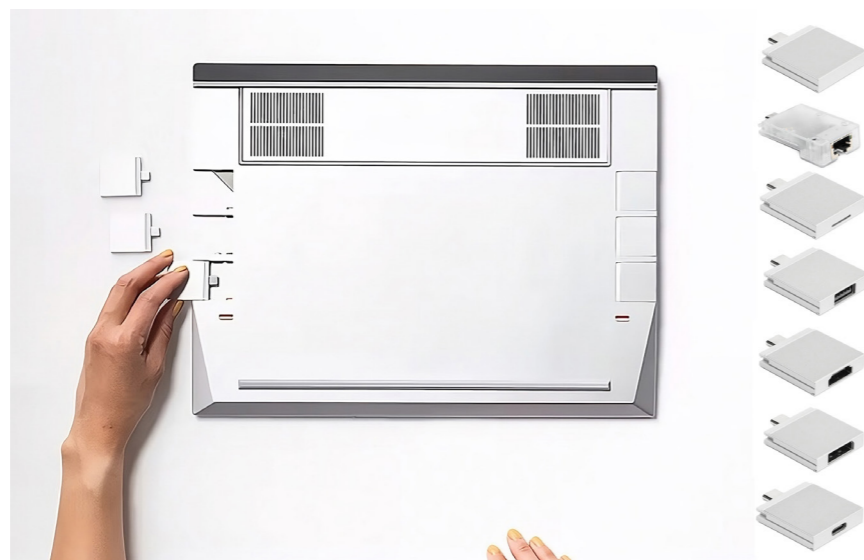


Fig. 40: Componenti del Framework Laptop con codici QR visibili, che forniscono istruzioni dettagliate per la sostituzione e la riparazione, un esempio di sostenibilità attraverso la facilità di manutenzione.
Fonte: www.framework.com.



Fig. 41: Dettagli del Framework Laptop che evidenziano il sistema di collegamento tra i componenti, con guide scorrevoli ed incastri che permettono una sostituzione semplice e intuitiva delle singole parti del dispositivo.
Fonte: www.framework.com.



Il Framework Laptop 16 rappresenta un'evoluzione nel design dei dispositivi elettronici di consumo, affrontando direttamente le sfide legate all'obsolescenza programmata e alla sostenibilità. Grazie a un design modulare, a un ecosistema di supporto ben sviluppato e a un impegno per la circolarità, Framework Computer Inc. offre una soluzione innovativa che ridefinisce il rapporto tra utente e dispositivo tecnologico. Questo caso studio evidenzia come un approccio progettuale integrato, basato sui principi del DfM e del DfD, possa creare un valore duraturo sia per gli utenti che per l'ambiente, promuovendo una nuova era di elettronica sostenibile e personalizzabile.



Bugaboo Butterfly: la mobilità infantile con un approccio circolare

Il caso studio della carrozzina Bugaboo Butterfly si inserisce nel contesto della mobilità infantile, settore in cui l'azienda olandese Bugaboo, fondata nel 1994, ha svolto un ruolo pionieristico nello sviluppo di soluzioni modulari. Grazie al progetto EU H2020 FP7, Bugaboo ha potuto sperimentare un modello di business circolare che combina sostenibilità ambientale, innovazione progettuale e redditività aziendale. Questo approccio ha portato alla creazione di un sistema di prodotti a ciclo chiuso, basato su pratiche di noleggio, ricondizionamento e vendita di prodotti certificati usati, con l'obiettivo di ridurre l'impatto ambientale e prolungare il ciclo di vita dei prodotti. La carrozzina Butterfly è un esempio emblematico di questo approccio progettuale. L'architettura del prodotto si basa su un design modulare che prevede tre componenti principali: il modulo strutturale del telaio, il modulo portaoggetti (disponibile in tre versioni: navicella, seduta passeggero o vano oggetti) e i moduli reversibili del sistema di ruote anteriori e posteriori (Fig. 42). Questi elementi costituiscono il nucleo funzionale del prodotto, al quale possono essere aggiunti moduli accessori come parasole, tasche portaoggetti inferiori o estensioni per il trasporto di due bambini (Fig. 43). Il design del telaio è stato concepito per consentire l'interconnessione reversibile di tutti i moduli e accessori, favorendo la sostituzione e l'aggiornamento dei componenti in base allo stato di usura o alle esigenze degli utenti (Fig. 44). L'adozione di un approccio di Design for Modularity (DfM) ha permesso di configurare la carrozzina in modo che rispondesse a esigenze d'uso diversificate e alle diverse fasi di crescita del bambino. Il telaio strutturale è progettato per aggregare moduli funzionali che possono essere facilmente smontati, riparati o sostituiti. Questo approccio non solo garantisce la durabilità tecnica del prodotto, ma consente anche agli utenti di adattarne le prestazioni nel tempo, aumentando significativamente la flessibilità d'uso. Un aspetto cruciale del progetto è rappresentato dalla reversibilità delle connessioni tra i moduli, che facilita le operazioni di manutenzione e aggiornamento. Ad esempio, la carrozzina può essere configurata per ospitare un solo bambino o per essere utilizzata come sistema di trasporto per due (Fig. 45), grazie a estensioni specifiche che si agganciano al telaio principale.



Fig. 42: Rappresentazione del design modulare del prodotto, con indicazioni che delineano i tre componenti principali: il modulo strutturale del telaio, il modulo portaoggetti (disponibile in tre versioni) e i moduli reversibili del sistema di ruote anteriori e posteriori.
Fonte: www.bugaboo.com.





Fig. 43: Rappresentazione dei componenti smontati del passeggino, che evidenzia il design progettato per consentire l'interconnessione reversibile di tutti i moduli e accessori, facilitando così la sostituzione e l'aggiornamento in funzione delle necessità dell'utente e dello stato di usura.
Fonte:www.bugaboo.com.

Questo livello di adattabilità non solo prolunga il ciclo di vita del prodotto, ma riduce anche la necessità di acquistare nuovi prodotti per esigenze specifiche, contribuendo a una riduzione complessiva dei rifiuti. Il modello di business circolare di Bugaboo, testato attraverso il servizio Bugaboo Flex Plan, ha ulteriormente consolidato questo approccio. Il servizio prevede il noleggio della carrozzina per due cicli consecutivi di utilizzo, con una fase di rimessa a nuovo tra un ciclo e l'altro. Dopo il secondo ciclo di noleggio, i prodotti vengono ricondizionati, certificati e venduti sul mercato dell'usato attraverso il programma Bugaboo Refurbished. Questo sistema non solo garantisce un uso prolungato dei prodotti, ma permette anche di mantenere elevati standard di qualità e affidabilità. In sintesi, il caso studio della carrozzina Bugaboo Butterfly dimostra come l'adozione di un design modulare e di un modello di business circolare possano contribuire a una significativa riduzione dell'impatto ambientale, senza compromettere la funzionalità e l'esperienza d'uso. Attraverso soluzioni innovative come il design reversibile e i servizi di noleggio e ricondizionamento, Bugaboo ha creato un prodotto che non solo risponde alle esigenze contemporanee di sostenibilità, ma ridefinisce anche il rapporto tra utenti, azienda e prodotto, promuovendo un modello di consumo più responsabile e duraturo.

Fig. 44: Esempio di configurazione del passeggino, con i moduli principali e accessori aggiuntivi, come parasole, tasche portaoggetti inferiori ed estensioni per il trasporto di due bambini, per una maggiore funzionalità e versatilità.
Fonte:www.bugaboo.com.



Fig. 45: Le immagini mostrano la versatilità del telaio, con connessioni reversibili che permettono una facile configurazione del passeggino. In un caso, il telaio è configurato per ospitare un solo bambino, mentre in un altro, grazie a estensioni specifiche, viene adattato per il trasporto di due bambini, dimostrando la flessibilità e la praticità del design modulare.
Fonte:www.bugaboo.com.



La modularità ha tradizionalmente rappresentato un elemento fondamentale nel processo di industrializzazione dei prodotti complessi, fungendo da strumento per massimizzare la standardizzazione e ottenere vantaggi significativi in termini di efficienza produttiva. Secondo Ulrich e Eppinger (1994), la scomposizione di un prodotto in moduli indipendenti consente alle aziende di ottimizzare i tempi e i costi di produzione e assemblaggio, migliorandone al contempo l'affidabilità attraverso l'identificazione e la sostituzione di moduli difettosi.^[34] Questo approccio, che mira alla realizzazione di sistemi a "zero difetti", ha storicamente favorito l'efficienza e l'affidabilità nei processi industriali. Con il crescente interesse verso la sostenibilità, il concetto di modularità ha iniziato ad assumere nuovi significati. Papanek (1995) ha sottolineato l'importanza di integrare la sostenibilità nella progettazione industriale, evidenziando come il design possa e debba incorporare considerazioni ambientali e sociali per affrontare le sfide ecologiche contemporanee.^[35] Questo approccio ha trovato applicazione pratica nei metodi progettuali sviluppati a partire dagli anni '90, in cui la modularità è diventata un prerequisito fondamentale per migliorare il fine vita dei materiali, permettendo una separazione efficace dei componenti da destinare alle piattaforme di riciclo. L'importanza di tali criteri è stata ulteriormente rafforzata dagli studi di Tischner (2001), che ha evidenziato come la progettazione per il disassemblaggio sia un elemento centrale nella costruzione di un'economia sostenibile.^[36] Con l'attuale transizione verso l'Economia Circolare, la modularità ha subito una trasformazione significativa. La Ellen MacArthur Foundation (2013) ha contribuito in maniera determinante a questo cambiamento, posizionando la modularità come una strategia chiave per estendere la durata utile dei prodotti e facilitarne la rifabbricazione, il riutilizzo e il riciclaggio.^[37] La fondazione ha sottolineato il ruolo del design nel superare il modello economico lineare, promuovendo sistemi che massimizzano l'uso delle risorse attraverso cicli produttivi chiusi. In parallelo, gli studi di Stahel e MacArthur (2019)

[34] Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2004). *Product Design and Development*, p. 145.

[35] Papanek, V. J. (1995). *The Green Imperative: Natural Design for the Real World*. Thames and Hudson eBooks, p. 87.

[36] Tischner, U. (2001). *Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future*. Routledge, p. 192.

[37] Ellen MacArthur Foundation (2013), op.cit, p. 34.

hanno evidenziato l'importanza di integrare i principi di circolarità nel design modulare, rendendo il prodotto non solo più sostenibile, ma anche più adattabile a nuovi cicli di utilizzo^[38].

Infine, il design modulare, come affermato da Bocken et al. (2016), rappresenta oggi una strategia progettuale centrale per una cultura del "fare per rifare", che espande i principi del "fare per disfare" alla base del design per la sostenibilità^[39]. Questo concetto incorpora la possibilità di rigenerare i prodotti e i loro componenti, contribuendo a un'economia rigenerativa e circolare.

Attraverso l'applicazione di approcci modulari, il design non solo migliora l'efficienza ambientale, ma favorisce anche l'innovazione e lo sviluppo di nuovi modelli di business sostenibili. Il design modulare si configura oggi come una strategia progettuale fondamentale per sostenere i principi dell'Economia Circolare, concentrandosi prioritariamente sul ridurre e riusare, e solo successivamente sul riciclare. I casi studio analizzati testimoniano una trasformazione culturale nel design, che evolve dal concetto di "disassembling" a quello di "remaking". Questa evoluzione sottolinea come la modularità, applicata allo sviluppo di nuovi prodotti, possa essere declinata in modi diversificati a seconda delle tipologie merceologiche, come mezzi di trasporto, arredi ed elettronica di consumo. L'obiettivo primario è prolungare la vita utile dei prodotti, rendendo le loro componenti riutilizzabili e rifabbricabili.

Questo approccio comporta una trasformazione dei modelli di business tradizionali: le aziende, da semplici fornitori di beni, si trasformano in erogatori di servizi innovativi, quali manutenzione, riparazione, aggiornamento e rifabbricazione, contribuendo così a una significativa riduzione dell'impatto ambientale. Un contributo essenziale a questa transizione è dato dalla Direttiva Ecodesign 2009/125/CE, che stabilisce requisiti di progettazione ecocompatibile per i prodotti legati all'energia, favorendo pratiche di design volte al miglioramento delle performance ambientali. Questa direttiva rappresenta un punto di riferimento normativo per molte aziende manifatturiere, incentivandole a sviluppare soluzioni progettuali che facilitino la riparabilità e la riciclabilità dei prodotti^[40].

[38] Stahel, W. R., & MacArthur, E. (2019). *The Circular Economy*. In Routledge eBooks, p. 62.

[39] Bocken, N. M. P., De Pauw, I., Bakker, C., & Van Der Grinten, B. (2016), op.cit, pp. 308-320.

[40] Direttiva Ecodesign 2009/125/CE, European Commission (2023), p. 15-20.

L'influenza normativa è particolarmente evidente nel settore dell'elettronica, dove le aziende hanno iniziato a implementare strategie di design modulare per migliorare la sostenibilità dei loro prodotti. Parallelamente, il contributo di Charter (2018) evidenzia l'importanza del design come leva strategica per la transizione verso un modello economico più circolare. Charter sottolinea come il design modulare possa essere utilizzato per prolungare la vita utile dei prodotti attraverso pratiche che includono la sostituzione di componenti e l'aggiornamento tecnologico. Questo approccio, secondo l'autore, non solo riduce la necessità di risorse vergini, ma favorisce anche l'emergere di nuovi modelli di business basati su servizi come la manutenzione e la riparazione^[41]. Infine, la Ellen MacArthur Foundation (2013) ha fornito un quadro teorico di riferimento per l'Economia Circolare, promuovendo la modularità come strategia centrale per raggiungere la sostenibilità. La Fondazione ha sottolineato come la progettazione modulare non solo renda i prodotti più facilmente riparabili e aggiornabili, ma supporti anche l'adozione di un'economia basata sul riutilizzo dei materiali, riducendo i rifiuti e il consumo di energia^[42]. Nonostante queste potenzialità, il percorso verso una concezione realmente circolare del fine vita dei prodotti appare ancora lungo in alcuni settori, ostacolato principalmente dalla scarsa diffusione di servizi di riparazione e rifabbricazione. Questi servizi, infatti, sono attualmente implementati quasi esclusivamente nel settore elettronico, lasciando indietro altre categorie produttive. Tuttavia, il crescente interesse per strategie progettuali sostenibili, stimolato anche dall'influenza normativa e dai contributi teorici citati, sta favorendo un'azione più ampia del design modulare, che si conferma come la strategia più promettente per realizzare prodotti realmente circolari.

[41] Charter, M. (2018), op.cit, p. 89-102.

[42] Ellen MacArthur Foundation (2013), op.cit, p. 45-50.

Bibliografia

Abdullah, A. G., Kamaruddin, A. R., & Ripin, Z. M. (2008). Utilization of Design for Modularity Approach to Identify Product Platform. *Modern Applied Science*, vol. 2, issue 2, pp. 1-10.

Baldwin, C., & Clark, K. (1999). *Design Rules: The Power of Modularity*. MIT Press, pp. 123-128.

Bask, A., Lipponen, M., Rajahonka, M., & Tinnilä, M. (2010). The concept of modularity – Diffusion from manufacturing to service production. *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 21, issue 3, pp. 345-350.

Bocken, N. M. P., De Pauw, I., Bakker, C., & Van Der Grinten, B. (2016). Circular business models for sustainable value creation. *Journal of Cleaner Production*, 308(320).

Berg, V. D., and Bakker, C. (2015), "A product design framework for a circular economy", in Cooper, T., Braithwaite, N., Moreno, M., and Salvia, G. (eds), *Product Lifetimes and the Environment – Conference Proceedings*, Nottingham Trent University, Nottingham, 17-19 June 2015. *Research in Design Series*, vol. 9, IOS Press, pp. 365-379.

Bordignon, M. (2009). La modularità e il suo potenziale ruolo nelle imprese – La gestione dell'approccio modulare e le criticità, le opportunità e i rischi legati alla modularizzazione. *Aracne Editrice*, pp. 58-63.

Bryant, C. R., Sivaramakrishnan, K. L., Van Wie, M., Stone, R. B., & McAdams, D. A. (2004). A Modular Design Approach to Support Sustainable Design. In *Proceeding of the ASME 2004*, Vol. 3d, pp. 909-918.

Bocken, N. M. P., De Pauw, I., Bakker, C., & Van Der Grinten, B. (2016). Sustainable Business Models for Circular Economy. pp. 308-320.

Charter, M. (2018), *Designing for the Circular Economy*, Routledge, London.

Direttiva Ecodesign 2009/125/CE. European Commission (2023). *Official Journal of the European Union*, pp. 15-20.

Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*, 34-50.

Ijomah, W. L., McMahan, C. A., Hammond, G. P.,

& Newman, S. T. (2010). Development of robust design for remanufacturing guidelines to further the aims of sustainable development. *International Journal of Production Research*, vol. 45, issue 18-19, pp. 4513-4536.

Jacobs, M. D., Vickery, S. K., and Droge, C. (2007), "The effects of product modularity on competitive performance", in *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 27, issue 10, pp. 1046-1068.

Keoleian, G. A., and Menerey, D. (1994), "Sustainable Development by Design: Review of Life Cycle Design and Related Approaches", in *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 44, issue 5, pp. 645-668.

Lacy, P. S., and Rutqvist, J. (2015), *The Roots of the Circular Economy*, Palgrave Macmillan, London, pp. 142-144.

Machado, N. T., & Morioka, S. N. (2021). Contributions of modularity to the circular economy – A systematic review of literature. *Journal of Building Engineering*, vol. 44, pp. 1-11

Manzini, E., and Vezzoli, C. (1998), *Lo sviluppo di prodotti sostenibili – I requisiti ambientali dei prodotti industriali*, Maggioli Editore, Rimini.

Miller, T. D., and Elgård, P. (1998), "Defining Modules, Modularity and Modularization – Evolution of the Concept in a Historical Perspective", in *Design for integration in manufacturing: Proceedings of the Thirteenth IPS Seminar Held at Fuglsø, Denmark on 20-21, April 1998*, Fuglsoe.

Mital, A., Desai, A., Subramanian, A., and Mital, A. (2014), "Designing for assembly and disassembly", in Mital, A., Desai, A., Subramanian, A., and Mital, A. (eds), *Product Development A Structured Approach to Consumer Product Development, Design, and Manufacture*, Elsevier, Amsterdam, pp. 159-202.

Newcomb, P. J., Bras, B., and Rosen, D. W. (1998), "Implications of Modularity on Product Design for the Life Cycle", in *Journal of Mechanical Design*, vol. 120, issue 3, pp. 483-490.

Papanek, V. J. (1995). *The Green Imperative: Natural Design for the Real World*. Thames and Hudson eBooks, p. 87.

Peeters, J., Vanegas, P., Dewulf, W., and Duflou, J. (2012), "Design for demanufacturing: a life cycle

approach”, in I-SUP2012 Innovation for Sustainable Production, Bruges, Belgium, May 7-9, 2012. pp. 6-9.

Salhieh, S. M., & Kamrani, A. K. (1999). Macro level product development using design for modularity. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 15, issue 4, pp. 319-329.

Sanderson, S. W., & Uzumeri, M. (1997). *Managing Product Families*. McGraw-Hill/Irwin, New York.

Soh, S., Ong, S., & Nee, A. Y. C. (2014). Design for Disassembly for Remanufacturing – Methodology and Technology. In T. K. Lien (Ed.), *Procedia 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, vol. 15, pp. 407-412.

Sonogo, M., Echeveste, M. E. S., & Debarba, H. G. (2018). The role of modularity in sustainable design – A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, pp. 196-209.

Tischner, U. (2001). *Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future*. Routledge, p. 192.

Ulrich, K. (1994). Fundamentals of Product Modularity. In Dasu, S. & Eastman, C. (Eds.), *Management of Design*. Springer, Dordrecht, pp. 219-231.

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2004). *Product Design and Development*. McGraw-Hill.

Umeda, Y., Fukushige, S., Tonoike, K., and Kondoh, S. (2008), “Product modularity for life cycle design”, in *CIRP Annals*, vol. 57, issue 1, pp. 13-16.

Yan, J., and Feng, C. (2013), “Sustainable design-oriented product modularity combined with 6R concept: a case study of rotor laboratory bench”, in *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 16, issue 1, pp. 95-109.

Capitolo 6

Aziende partner del progetto e requisiti per lo sviluppo di un modello di business circolare nell’arredo scolastico

6.1. Le aziende partner del progetto di ricerca

6.1.1. Vastarredo Industrie: profilo aziendale e processo produttivo

6.1.2. Camillo Sirianni: profilo aziendale e processo produttivo

6.2. Analisi e criticità della filiera produttiva nel settore dell’arredo scolastico

6.3. Definizione di un nuovo modello di business circolare per le aziende partner

6.4. Linee guida per lo sviluppo di un arredo scolastico: caso studio e strategie di riprogettazione circolare

6.1. Le aziende partner del progetto di ricerca

Il progetto di ricerca beneficia del supporto di due prestigiose aziende italiane, la Camillo Sirianni S.a.s. e la Vastarredo Industrie S.r.l., entrambe considerate modelli di eccellenza nell'ambito dell'innovazione e della sostenibilità nel settore dell'arredamento scolastico e per ufficio (Fig. 46). Queste realtà imprenditoriali offrono un contesto di particolare rilevanza per l'analisi delle dinamiche di innovazione, grazie alle loro storie aziendali di successo, alle strategie produttive avanzate e alla capacità di integrare tradizione e modernità in un mercato in costante evoluzione.

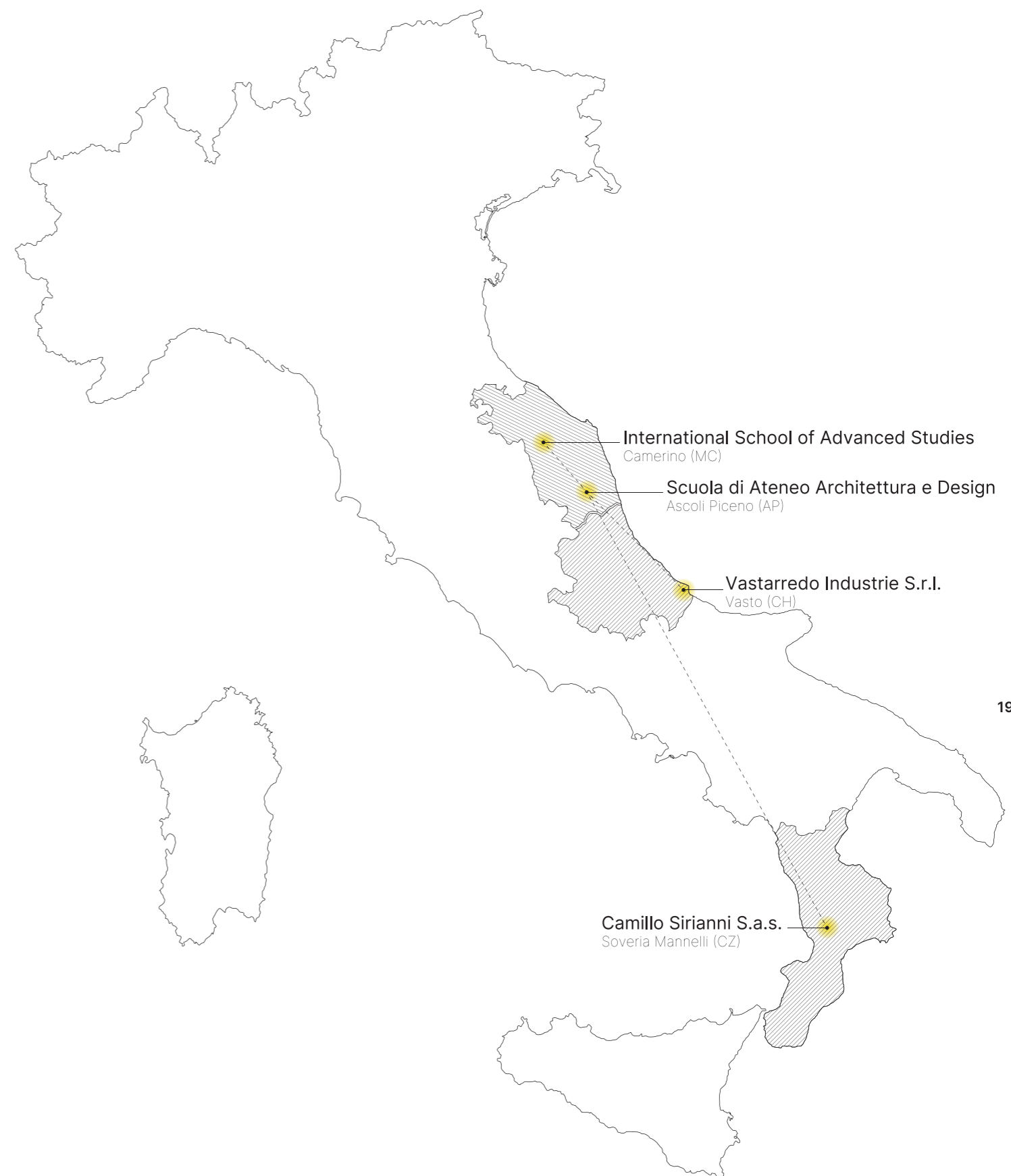
La Camillo Sirianni S.a.s., con sede a Soveria Mannelli, in Calabria, rappresenta un esempio di come una realtà artigianale possa evolversi in un'impresa industriale integrata, mantenendo saldi i principi di qualità e innovazione. Fondata nel 1909 come laboratorio artigianale, l'azienda ha progressivamente ampliato le proprie competenze fino a coprire l'intero ciclo produttivo: dalla lavorazione del legno e del metallo alla verniciatura e all'imballaggio. Questa integrazione verticale consente all'azienda di mantenere un controllo diretto su ogni fase del processo, garantendo standard elevati di qualità, sostenibilità e innovazione. La Camillo Sirianni vanta numerose certificazioni, tra cui ISO 9001, che attesta la qualità della gestione aziendale, ISO 14001, che sottolinea l'impegno verso la sostenibilità ambientale, FSC, a garanzia dell'uso responsabile delle risorse forestali, e SA 8000, che evidenzia l'attenzione verso la responsabilità sociale. Questi riconoscimenti non solo valorizzano l'azienda sul piano della competitività, ma testimoniano anche la capacità di rispondere alle crescenti esigenze di un mercato sempre più sensibile alla sostenibilità e all'etica aziendale.

Parallelamente, la Vastarredo Industrie S.r.l., situata a Vasto, in Abruzzo, si distingue come esempio emblematico di trasformazione industriale e di innovazione applicata all'arredo scolastico. Nata negli anni '50 come attività artigianale, l'azienda ha saputo trasformarsi in un modello industriale avanzato, con un forte focus su ricerca e sviluppo. L'obiettivo principale di Vastarredo è la progettazione di ambienti educativi moderni e funzionali, capaci di rispondere alle esigenze di un'educazione in continua evoluzione. Grazie all'impiego di tecnologie all'avanguardia, l'azienda produce arredi che soddisfano i più alti standard di ergonomia e sicurezza, in conformità con normative internazionali quali UNI, EN e ISO.

Nel sesto capitolo vengono analizzate due aziende partner del progetto di ricerca: Vastarredo Industrie e Camillo Sirianni. Per ciascuna azienda, si esamina il profilo aziendale e si ricostruisce la filiera produttiva, fornendo una panoramica dettagliata delle loro pratiche e delle potenzialità per implementare modelli di business circolari.

Fig. 46: Aziende Partner del Progetto di Ricerca: Vastarredo Industrie e Camillo Sirianni.

Inoltre, Vastarredo si distingue per la sua capacità di offrire soluzioni modulari e adattabili, rispondendo con flessibilità alle necessità di mercati diversificati e in rapida trasformazione. Nonostante entrambe le aziende condividano valori comuni, come l'attenzione alla sostenibilità dei materiali e dei processi produttivi, si differenziano per il loro approccio strategico. La Camillo Sirianni privilegia un modello basato sull'integrazione verticale, garantendo un controllo completo della filiera produttiva, mentre la Vastarredo si concentra sulla versatilità e sulla capacità di adattarsi rapidamente ai cambiamenti del mercato attraverso soluzioni modulari e personalizzabili. Queste differenze strategiche non rappresentano un limite, bensì una complementarità che il progetto di ricerca intende valorizzare. La sinergia tra la solidità del modello produttivo della Camillo Sirianni e l'approccio flessibile e innovativo della Vastarredo costituisce un elemento chiave per affrontare alcune delle principali sfide contemporanee del settore. Tra queste sfide emergono la digitalizzazione degli spazi educativi e la crescente necessità di adattare gli ambienti a contesti multifunzionali. L'integrazione tra la sostenibilità perseguita dalla Camillo Sirianni e la modularità sviluppata da Vastarredo offre un'opportunità unica per sviluppare soluzioni innovative che possano non solo rispondere alle esigenze immediate del mercato, ma anche anticipare le tendenze future. Il progetto di ricerca, in tal senso, si configura come un laboratorio di innovazione in grado di contribuire al progresso dell'intero settore dell'arredamento scolastico e per ufficio, promuovendo modelli produttivi più sostenibili, versatili ed efficienti. Questo approccio non solo mira a generare valore per le aziende coinvolte, ma anche a fornire un contributo significativo al miglioramento della qualità degli ambienti educativi e lavorativi, con un impatto positivo sia a livello economico che sociale.



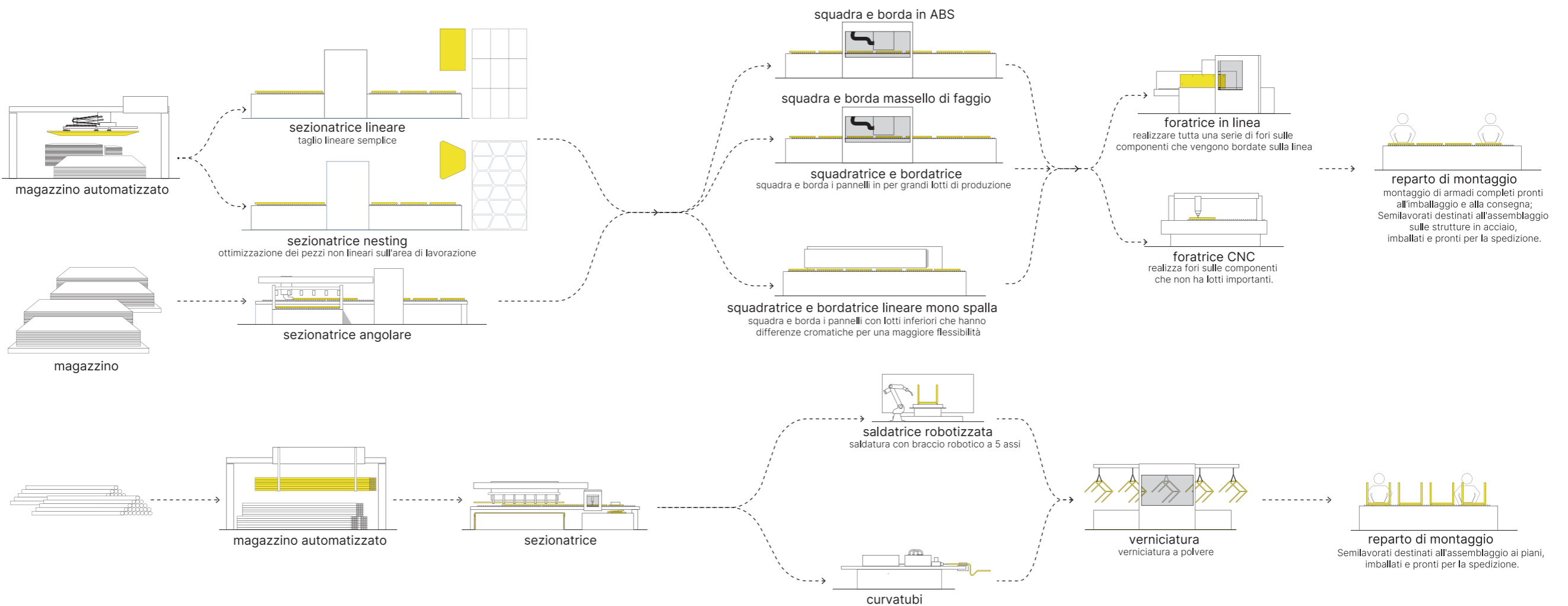
6.1.1. Vastarredo Industrie: profilo aziendale e processo produttivo

La Vastarredo S.r.l., con sede a Vasto (CH) (Fig. 47), rappresenta una delle realtà industriali più significative nel panorama della produzione di arredi scolastici, distinguendosi per il suo impegno verso la sostenibilità ambientale, l'innovazione tecnologica e l'eccellenza qualitativa. L'azienda, la cui struttura produttiva è stata concepita per integrare in maniera efficiente tutte le fasi della lavorazione, dalla progettazione fino alla logistica, è organizzata in modo da massimizzare il controllo qualitativo e l'ottimizzazione dei processi, così da garantire prodotti di alto valore funzionale ed estetico.

La mission aziendale, che si fonda sulla volontà di migliorare gli ambienti educativi mediante l'adozione di soluzioni ergonomiche, sicure e sostenibili, sottolinea l'importanza del benessere degli utenti finali e del rispetto per l'ambiente. Attraverso l'impiego di materiali certificati e processi produttivi avanzati, Vastarredo riesce a soddisfare le esigenze del settore scolastico, ponendo particolare attenzione alla durabilità e alla riciclabilità dei propri prodotti, caratteristiche che riflettono un approccio orientato all'economia circolare. Grazie alla certificazione secondo standard internazionali quali ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001, l'azienda dimostra di perseguire obiettivi elevati in termini di qualità, gestione ambientale e sicurezza sul lavoro, elementi imprescindibili per un modello di produzione responsabile e sostenibile. La struttura produttiva, localizzata interamente nel complesso industriale di Vasto, è dotata di tecnologie innovative che consentono un'efficace riduzione degli sprechi e un monitoraggio continuo delle emissioni, a conferma dell'attenzione verso l'impatto ambientale delle proprie attività. L'organizzazione commerciale, che si rivolge prevalentemente al mercato italiano ed europeo, si caratterizza per un servizio completo e personalizzato, il quale comprende la consulenza iniziale, la progettazione su misura e l'installazione degli arredi. Un aspetto distintivo di Vastarredo è il forte impegno verso la sostenibilità ambientale, testimoniato dall'ottenimento, nel 2004, della certificazione UNI EN ISO 14001 per il sistema di gestione ambientale del sito di Vasto (CH). A ciò si aggiunge la redazione di una Dichiarazione Ambientale, in conformità ai Regolamenti CE 1221/2009, 1505/2017 e 2026/2018, che esplicita la politica ambientale aziendale, descrive gli aspetti ambientali connessi alle attività produttive e definisce un programma di miglioramento



Fig. 47: Stabilimento dell'azienda Vastarredo Industrie S.r.l., Vasto (CH).



continuo. Tale documento, registrato ufficialmente nel 2008, rappresenta uno strumento essenziale per instaurare un rapporto di trasparenza con la comunità locale, gli enti pubblici di controllo e gli istituti scolastici, che costituiscono i principali utenti finali dei prodotti. La riorganizzazione aziendale avviata nel 2019 ha comportato il trasferimento delle attività produttive alla società Vastarredo Industrie, con la conseguente specializzazione della Vastarredo S.r.l. in funzioni tecniche, commerciali e amministrative. Lo stabilimento di Vasto, che copre un'area di 12.900 m², mantiene una configurazione strutturale che integra spazi dedicati al taglio, alla saldatura, alla verniciatura e al montaggio, oltre a una palazzina uffici, garantendo così una gestione efficiente delle risorse e una stretta sinergia tra progettazione e produzione. Dal punto di vista storico, l'azienda ha saputo affrontare le sfide poste dalle fluttuazioni economiche e dalle politiche di contenimento dei costi introdotte dal 2008, che hanno ridotto significativamente i budget destinati agli arredi scolastici. Nonostante queste difficoltà, Vastarredo ha mantenuto una posizione competitiva, beneficiando di strategie innovative come la partecipazione a convenzioni regionali e la fornitura straordinaria di arredi durante l'emergenza Covid-19 nel 2020. La certificazione della Catena di Custodia secondo gli standard FSC e PEFC, ottenuta a partire dal 2007, ha ulteriormente consolidato l'impegno aziendale verso una gestione sostenibile delle risorse, garantendo l'uso di materiali provenienti da foreste

gestite responsabilmente o da legno riciclato. Il processo produttivo di Vastarredo Industrie (Fig. 48) si caratterizza per una struttura organizzativa articolata e altamente ottimizzata, che consente di gestire in modo efficiente tutte le fasi di lavorazione necessarie alla realizzazione di arredi di alta qualità. L'intero flusso inizia con lo stoccaggio delle materie prime, suddiviso in due aree distinte: una è rappresentata dal magazzino automatico, progettato per alimentare e servire in modo autonomo due sezionatrici, di cui una lineare, dedicata al taglio semplice, e una per operazioni di nesting, che ottimizza il taglio di pezzi non lineari sfruttando al meglio l'area di lavoro; l'altra area, invece, è destinata al rifornimento manuale di una sezionatrice angolare, utilizzata per lavorazioni specifiche. Successivamente, i materiali sezionati vengono destinati alla fase di bordatura, che si articola in modalità diverse in base alla tipologia di sezionatrice utilizzata. I pannelli tagliati con la sezionatrice lineare vengono inviati ai centri di lavoro per la bordatura, che si concentra prevalentemente su lotti medio-piccoli. La sezionatrice nesting, invece, caratterizzata da un'elevata capacità produttiva, con un flusso che raggiunge fino a 100 pezzi al minuto, alimenta una linea di bordatura dedicata a lotti di grandi dimensioni, solitamente composti da almeno mille pezzi. Questa linea, particolarmente efficiente, è destinata principalmente alla produzione di piani per banchi o di componenti per armadi, con un processo che sfrutta formati standardizzati, generalmente limitati a cinque o sei

Fig. 48: Schematizzazione processo produttivo Vastarredo Industrie S.r.l., Vasto (CH).

varianti. Parallelamente, i pannelli che presentano lotti inferiori, spesso richiesti in varianti cromatiche o con specifiche esigenze di design, vengono lavorati su linee produttive separate, progettate per garantire una maggiore flessibilità. La sezionatrice angolare, invece, è affiancata da una bordatrice lineare mono-spalla, che si occupa di realizzare pezzi rettangolari, utilizzati principalmente per la produzione di ante per armadi o componenti per mobili contenitori di piccole dimensioni. Anche in questo caso, la produzione si concentra su lotti di dimensioni ridotte. Conclusa la fase di sezionatura e bordatura, i componenti vengono sottoposti a lavorazioni successive, tra cui la foratura in linea, che consente di realizzare i fori necessari sulle parti appena bordate. A questa operazione contribuiscono anche tre centri di lavoro, ciascuno specializzato in determinate tipologie di lavorazione. Il primo si dedica alla bordatura di pezzi sagomati, come quelli trapezoidali o circolari, avvalendosi di macchine punto-punto per forature e contornature. Il secondo centro, invece, si occupa di componenti lineari o sagomati, eseguendo bordature, forature e contornature su lotti che non superano le 500 unità. Infine, due linee produttive separate gestiscono lotti compresi tra 500 e 1000 unità: una linea è dedicata alla squadra e bordatura di pannelli nobilitati in ABS, mentre l'altra lavora massello di faggio. Per formati standard, come i pannelli 700x500 mm con bordo massello, gli ordini possono raggiungere le 5000 unità, distribuite su più giorni di lavoro.

Per le lavorazioni su lotti di piccole dimensioni, viene utilizzata una foratrice a controllo numerico (CNC), che consente di ottimizzare tempi e risorse, completando il ciclo produttivo con estrema precisione. L'ultima fase del processo riguarda il montaggio, che è suddiviso in due reparti principali. Il primo si occupa dell'assemblaggio di armadi completi, che vengono immediatamente imballati e resi pronti per la spedizione. Il secondo, invece, si concentra sui semilavorati destinati allo stabilimento adiacente, dove vengono combinati con strutture metalliche prodotte nel reparto "ferro" e successivamente completati, imballati e spediti. In particolare, in questo stabilimento si assemblano prevalentemente banchi e sedie, in cui i piani in legno, realizzati nel reparto precedente, vengono integrati con telai in ferro verniciato prima dell'imballaggio finale.

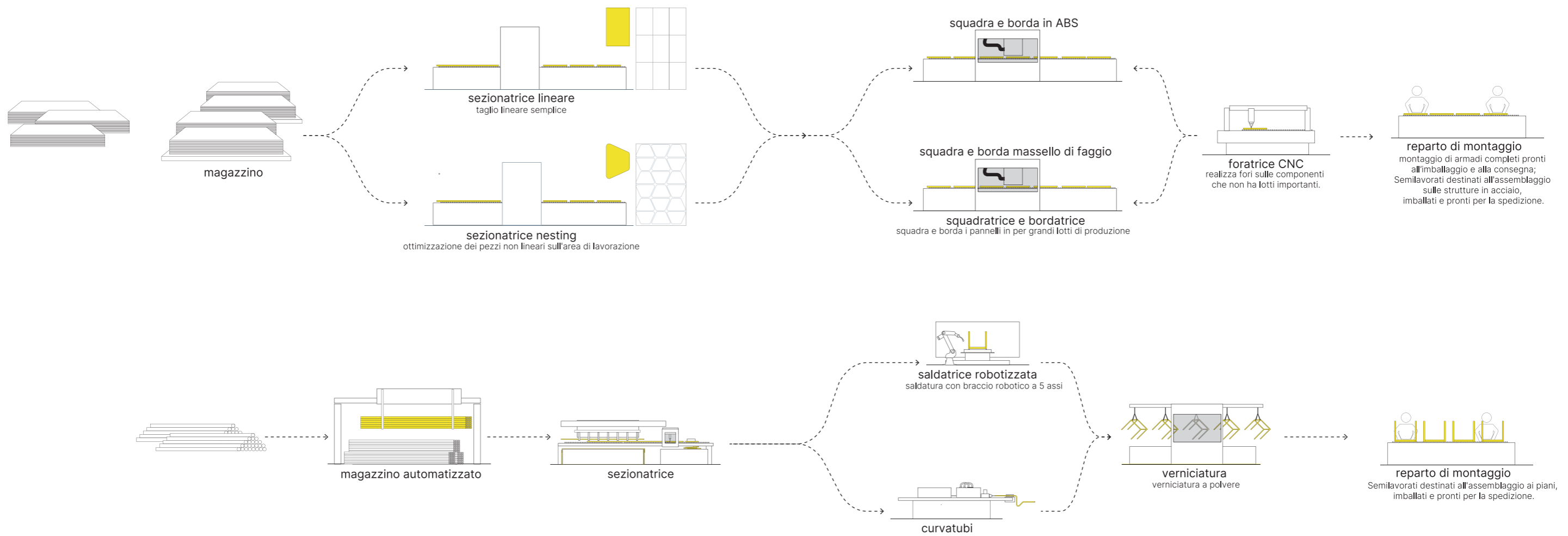
La Camillo Sirianni S.a.s., fondata nel 1909 a Soveria Mannelli (CZ) (Fig. 49), rappresenta un esempio emblematico di evoluzione aziendale che coniuga la tradizione artigianale locale con una moderna realtà industriale orientata alla sostenibilità. Operando principalmente nel settore degli arredi scolastici e universitari, l'azienda si è affermata come leader in Italia, consolidando la propria presenza in oltre 35 paesi grazie a un ciclo produttivo completo che integra progettazione, lavorazione del legno e dei metalli, assemblaggio e rigorosi controlli qualità. Un elemento distintivo del processo produttivo è l'impiego di materiali sostenibili, come i pannelli ecologici in legno riciclato al 100%, certificati PEFC e FSC, che testimoniano l'impegno aziendale verso la riduzione delle emissioni e il consumo responsabile delle risorse naturali. Ogni fase della produzione è attentamente monitorata: dalla progettazione avanzata con software CAD, al taglio e alla sagomatura del legno, fino alla lavorazione dei metalli attraverso robot per saldature e verniciature a polveri epossidiche. Questo approccio, che integra tecnologie avanzate e pratiche sostenibili, consente a Camillo Sirianni di garantire un'elevata qualità dei prodotti, minimizzando al contempo gli sprechi. L'attenzione dell'azienda verso la sostenibilità si riflette anche nell'adozione di pratiche produttive che favoriscono il riciclo e la valorizzazione dei materiali, contribuendo a un modello di economia circolare. Grazie a queste soluzioni tecnologiche, ogni fase del ciclo produttivo è ottimizzata per garantire standard qualitativi elevati e un basso impatto ambientale, dimostrando come l'innovazione possa essere un fattore chiave per la sostenibilità. Un altro aspetto fondamentale della strategia aziendale è il profondo legame con il territorio. Situata nel cuore della Sila, l'azienda valorizza le risorse locali e contribuisce allo sviluppo economico e sociale della comunità attraverso opportunità di lavoro stabili e pratiche di approvvigionamento sostenibili. Questo rapporto si riflette nella scelta di utilizzare legno riciclato e di promuovere progetti volti alla tutela ambientale e alla valorizzazione del patrimonio locale. La filosofia aziendale, incentrata sull'etica e sulla responsabilità sociale, si traduce in certificazioni come la ISO 9001 per la qualità, la ISO 14001 per la gestione ambientale e la SA 8000 per la responsabilità sociale. Inoltre, l'azienda ha saputo costruire un solido rapporto con il MePA (Mercato Elettronico della Pubblica Amministrazione), una piattaforma digitale che consente alle Pub-



Fig. 49: Stabilimento dell'azienda
Camillo Sirianni S.p.A., Soveria
Mannelli (CZ).

bliche Amministrazioni di acquistare beni e servizi in modo trasparente ed efficiente. Attraverso il MePA, Camillo Sirianni propone un portafoglio prodotti allineato ai Criteri Ambientali Minimi (CAM), rispondendo alle esigenze di sostenibilità richieste dal Ministero della Transizione Ecologica. Questo canale offre all'azienda una presenza strategica nel mercato pubblico, consentendo di raggiungere scuole, università e altri istituti educativi con soluzioni sicure, ergonomiche e sostenibili. L'adesione al MePA rafforza non solo le opportunità di business, ma anche il posizionamento dell'azienda come partner affidabile nel settore pubblico.

La produzione della Camillo Sirianni (Fig. 50) si distingue per un ciclo completo e integrato, che combina sapientemente lavorazioni del legno e del metallo. Ogni fase produttiva è studiata per garantire qualità, sostenibilità e precisione, grazie a tecnologie avanzate e a una forte attenzione per i dettagli. Analizziamo in modo approfondito le diverse fasi di questo processo produttivo. Per la lavorazione del legno tutto inizia con la selezione accurata del legno, rigorosamente certificato e spesso conforme agli standard FSC, a garanzia di una gestione forestale responsabile. Questo assicura l'uso di materie prime di alta qualità, essenziali per prodotti durevoli e sostenibili. Dopo la selezione, il legno grezzo viene tagliato con segatrici e macchine CNC, strumenti di precisione che permettono di ottenere pannelli delle dimensioni richieste, riducendo al minimo gli sprechi. Una volta tagliate, le tavole di legno passano alla sagomatura e fresatura, dove le macchine a controllo numerico danno forma ai componenti secondo i disegni tecnici. Questo processo garantisce un'altissima precisione e uniformità tra i pezzi. Successivamente, i componenti vengono forati con macchinari automatici per preparare i punti di assemblaggio, velocizzando il lavoro e mantenendo la precisione. La fase successiva prevede la levigatura, un passaggio fondamentale per eliminare imperfezioni e preparare la superficie del legno ai trattamenti finali. A questo punto, i pezzi vengono verniciati utilizzando vernici ecologiche a base d'acqua o poliuretaniche, applicate in cabine pressurizzate che assicurano una finitura uniforme e resistente. In alcuni casi, i componenti vengono parzialmente assemblati prima dello stoccaggio, per agevolare le fasi successive di integrazione. Parallelamente, la lavorazione del metallo inizia con la selezione di materiali come l'acciaio, scelti per le loro proprietà meccaniche e la resistenza.



204 Fig. 50: Schematizzazione processo produttivo Camillo Sirianni S.a.s., Soveria Mannelli (CZ).

Le barre e le lamiere vengono tagliate con precisione utilizzando macchine laser e seghe automatiche, che permettono di ottenere pezzi conformi ai progetti, anche per geometrie complesse. Successivamente, le lamiere metalliche vengono piegate con presse piegatrici CNC per ottenere le forme richieste, mentre la saldatura – eseguita sia manualmente sia tramite robot – garantisce giunzioni robuste e precise. Prima di passare alla verniciatura, i componenti metallici vengono sottoposti a trattamenti di sabbiatura o fosfatazione, che migliorano l'adesione della vernice e aumentano la durabilità delle superfici.

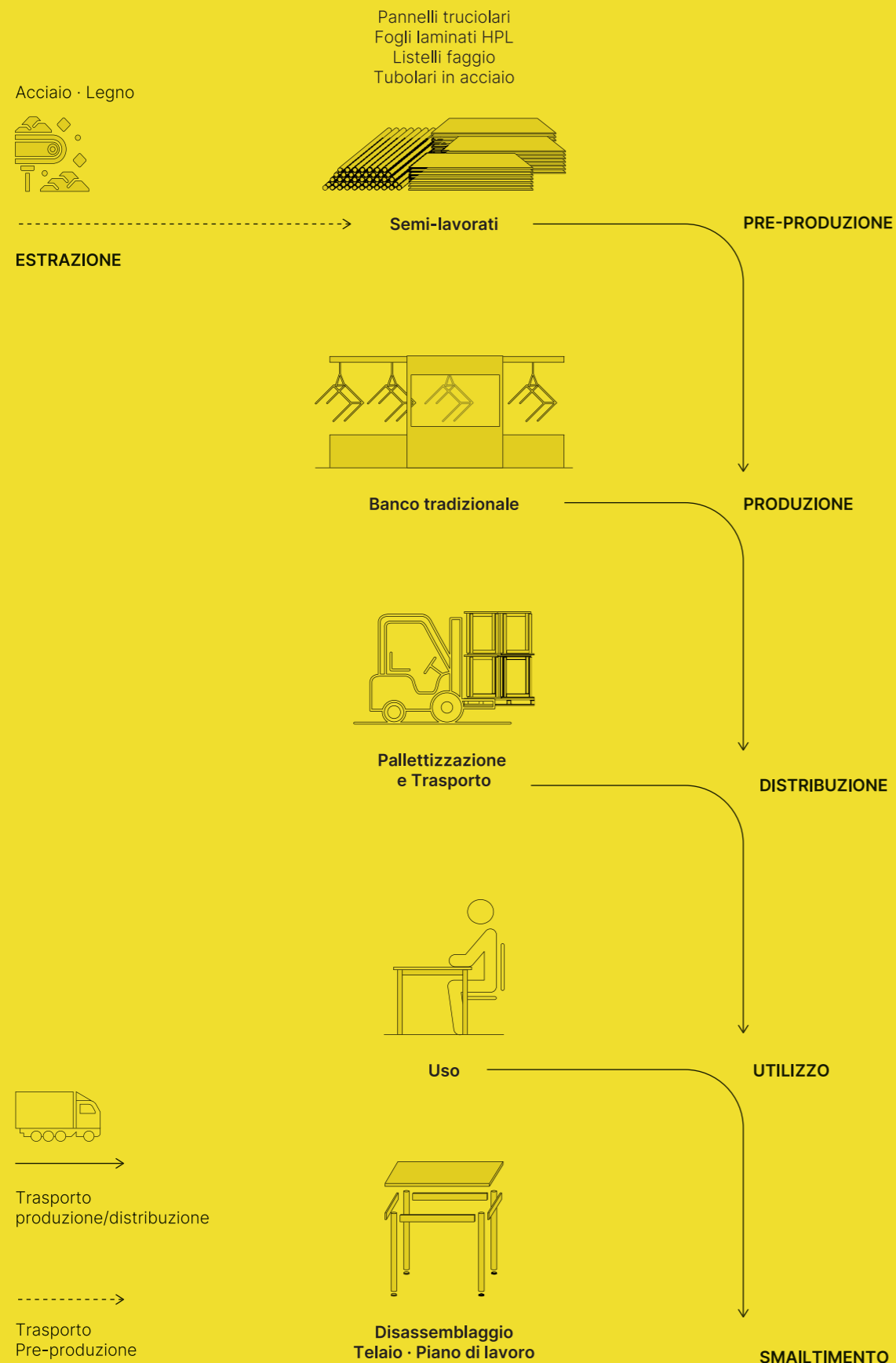
La verniciatura avviene con tecniche a polvere in cabine elettrostatiche, garantendo una finitura resistente a graffi e corrosione. Ogni pezzo lavorato viene poi sottoposto a un controllo qualità, durante il quale vengono verificati la precisione dimensionale e la qualità della finitura, assicurando che ogni componente soddisfi gli standard aziendali. Nella fase di assemblaggio, i componenti in legno e metallo vengono integrati seguendo con precisione i progetti definitivi. Il fissaggio avviene con l'ausilio di viti, bulloni e inserti che uniscono saldamente i materiali, creando prodotti robusti e funzionali. Ogni articolo completato viene poi testato per verificarne robustezza, funzionalità ed estetica, prima di passare al controllo qualità finale. Una volta superato il controllo qualità, i prodotti vengono imballati con materiali protettivi come cartone e plastica, per evitare danni durante il trasporto. Ogni confezione è etichettata con informazioni dettagliate sul prodotto, inclusi numero di lotto e destinazione. Infine, i prodotti vengono distribuiti tramite

una rete logistica ottimizzata, che garantisce consegne puntuali sia a livello nazionale che internazionale. Un aspetto fondamentale della produzione Camillo Sirianni è l'impegno per la sostenibilità e la responsabilità sociale. Tutte le fasi produttive rispettano rigorosi standard di qualità, come ISO 9001, di sostenibilità ambientale, come ISO 14001 e FSC, e di responsabilità sociale, come SA 8000. Questi certificati testimoniano un approccio etico alla produzione, che non solo valorizza l'ambiente, ma assicura anche condizioni di lavoro sicure e corrette.

La filiera produttiva degli arredi scolastici (Fig. 51) rappresenta un sistema complesso, caratterizzato dall'interazione di diverse fasi e attori, il cui scopo è garantire la produzione di manufatti funzionali e sostenibili destinati agli ambienti scolastici. Tale filiera si inserisce all'interno del più ampio contesto del settore legno-arredo italiano, il quale si distingue per la capacità di combinare tradizione artigianale e innovazione tecnologica. Essa può essere suddivisa in tre macro-fasi principali, ciascuna delle quali riveste un ruolo essenziale nella trasformazione della materia prima in prodotti finiti. La prima fase ha inizio con la gestione forestale, che si occupa di fornire il legname necessario attraverso pratiche sostenibili e certificate da programmi internazionali come FSC (Forest Stewardship Council) e PEFC (Programme for Endorsement of Forest Certification Schemes). Questa attività è cruciale non solo per preservare l'equilibrio ambientale, ma anche per garantire la legalità e la tracciabilità della materia prima. Il legno, proveniente prevalentemente da foreste italiane e da importazioni selezionate, viene sottoposto a operazioni di abbattimento, esbosco e trasporto verso le segherie, dove ha luogo la prima trasformazione. Qui, il tronco viene lavorato per ottenere tavolame grezzo, pannelli in truciolare e cippato, quest'ultimo spesso destinato alla produzione di energia. Successivamente, la filiera prosegue con la seconda e terza trasformazione, svolta in falegnamerie e mobilifici specializzati. In questa fase, i semilavorati in legno vengono ulteriormente trattati per acquisire le caratteristiche necessarie alla realizzazione dei diversi componenti degli arredi scolastici. Ad esempio, i piani dei banchi vengono prodotti in legno truciolare rivestito con laminati plastici, al fine di migliorarne la resistenza e la durabilità, mentre le strutture portanti, come i telai in acciaio, vengono piegate, saldate e verniciate per garantire stabilità e sicurezza. Tali lavorazioni rispettano le normative tecniche specifiche, come le UNI EN 1729-1 e UNI EN 1729-2, che definiscono i requisiti dimensionali e di sicurezza per sedie e tavoli destinati alle istituzioni scolastiche. La terza fase riguarda l'assemblaggio e distribuzione. In questa fase, i diversi componenti vengono assemblati per ottenere prodotti finiti, come banchi monoposto e sedie ergonomiche, che vengono poi distribuiti attraverso reti di vendita sia nazionali che internazionali. Una parte significativa della produzione è destinata alle scuole pubbliche, con una percentuale di export che si attesta

intorno al 5% del fatturato totale. In un'ottica di sostenibilità e circolarità, la gestione del fine vita degli arredi scolastici assume un ruolo centrale. L'economia circolare, che rappresenta un paradigma innovativo rispetto ai tradizionali modelli lineari, punta a massimizzare l'efficienza delle risorse attraverso il riciclo e la rigenerazione dei materiali. Nel contesto italiano, il 95% del legno post-consumo viene avviato a riciclo per la produzione di nuovi pannelli, riducendo la necessità di utilizzare legno vergine e contribuendo a una significativa riduzione delle emissioni di CO₂. Questo processo si integra con un design progettato per la disassemblabilità, che consente di separare e recuperare facilmente le componenti in legno, acciaio e plastica, garantendo una seconda vita ai materiali utilizzati. Infine, i Criteri Ambientali Minimi (CAM), obbligatori negli appalti pubblici dal 2016, rappresentano un ulteriore stimolo verso una transizione circolare. Essi prevedono, tra le altre cose, che i prodotti siano realizzati con materiali riciclati o provenienti da foreste gestite in maniera sostenibile, che siano progettati per essere disassemblati al termine della vita utile e che gli imballaggi siano costituiti da materiali riciclabili o recuperati. Il recente aggiornamento normativo (DM 23 giugno 2022) ha introdotto criteri ancora più stringenti, promuovendo l'utilizzo di prodotti modulari e riducendo ulteriormente l'impatto ambientale degli arredi scolastici.

Fig. 51: Schema lineare della filiera produttiva del settore dell'arredo scolastico.

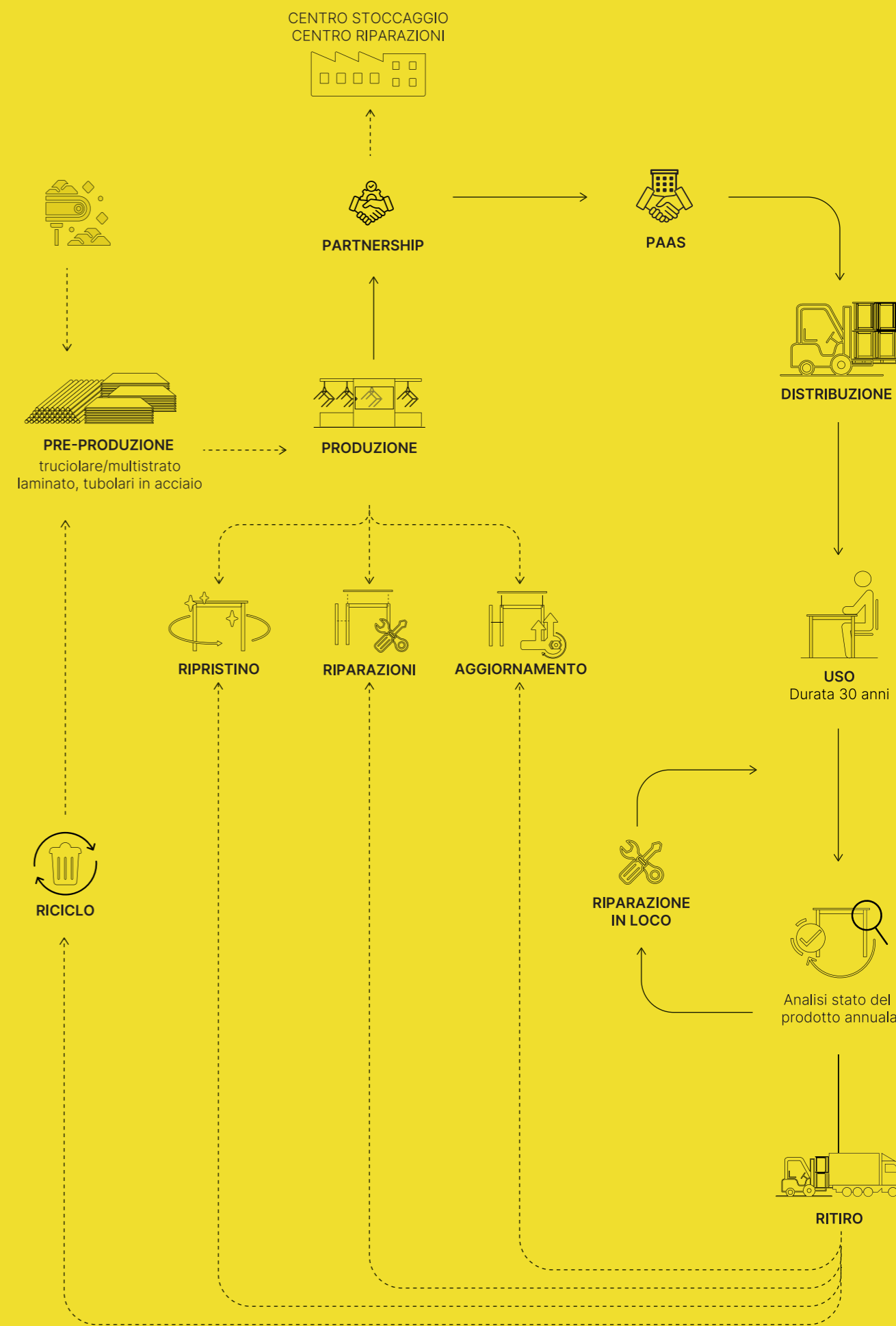


6.3. Definizione di un nuovo modello di business circolare per le aziende partner

Nell'ambito del progetto di ricerca dottorale, realizzato in collaborazione con due aziende leader nel settore dell'arredo scolastico, è stato sviluppato un modello di business circolare (Fig. 52) che mira a superare i limiti della tradizionale economia lineare, incentrata sulla vendita di prodotti, attraverso l'adozione del concetto di prodotto-servizio (PSS, Product-Service System). Questo approccio, che si propone come una soluzione innovativa e sistemica, pone l'accento sull'utilizzo del bene piuttosto che sul suo possesso, delineando una trasformazione significativa nel rapporto tra produttore e utilizzatore. Tale cambiamento si rivela particolarmente adatto al contesto della pubblica amministrazione, in cui il bisogno di ottimizzazione delle risorse si accompagna alla necessità di garantire servizi sempre aggiornati e in linea con le esigenze evolutive della didattica. La proposta prevede che le aziende partner forniscano arredi scolastici come parte di un servizio integrato che includa non solo la consegna, ma anche la manutenzione, l'aggiornamento e la rifabbricazione dei prodotti. Attraverso questo sistema, le scuole possono delegare completamente la gestione operativa degli arredi, beneficiando di prodotti sempre in condizioni ottimali e aggiornati in funzione delle nuove metodologie di insegnamento. In questo modo, le istituzioni scolastiche evitano sia i costi che le complessità legate alla sostituzione degli arredi obsoleti, sia la gestione dello smaltimento dei materiali giunti a fine vita. Parallelamente, le aziende partner acquisiscono un vantaggio competitivo significativo grazie alla possibilità di recuperare sistematicamente i prodotti per disassemblarli, ripararli o rigenerarli, reimmettendoli successivamente sul mercato in forma di nuovi servizi. Un elemento chiave per l'implementazione di questo modello risiede nella progettazione degli arredi, che deve essere orientata verso i principi del circular design. Come discusso nei capitoli precedenti, tali principi includono la modularità, la disassemblabilità, la riparabilità e la rigenerabilità, caratteristiche indispensabili per facilitare il recupero e il riutilizzo dei componenti a fine vita. Questo approccio progettuale consente non solo di estendere la vita utile dei prodotti, ma anche di ridurre l'impatto ambientale attraverso il riciclo dei materiali non recuperabili, i quali vengono trasformati in semilavorati da reintegrare nei processi di pre-produzione. Dal punto di vista strategico, l'introduzione di un modello circolare basato sul prodotto-servizio rappresenta una svolta importante per

Fig. 52: Schema del modello di business della filiera produttiva del settore dell'arredo scolastico in chiave circolare per un sistema prodotto-servizio.

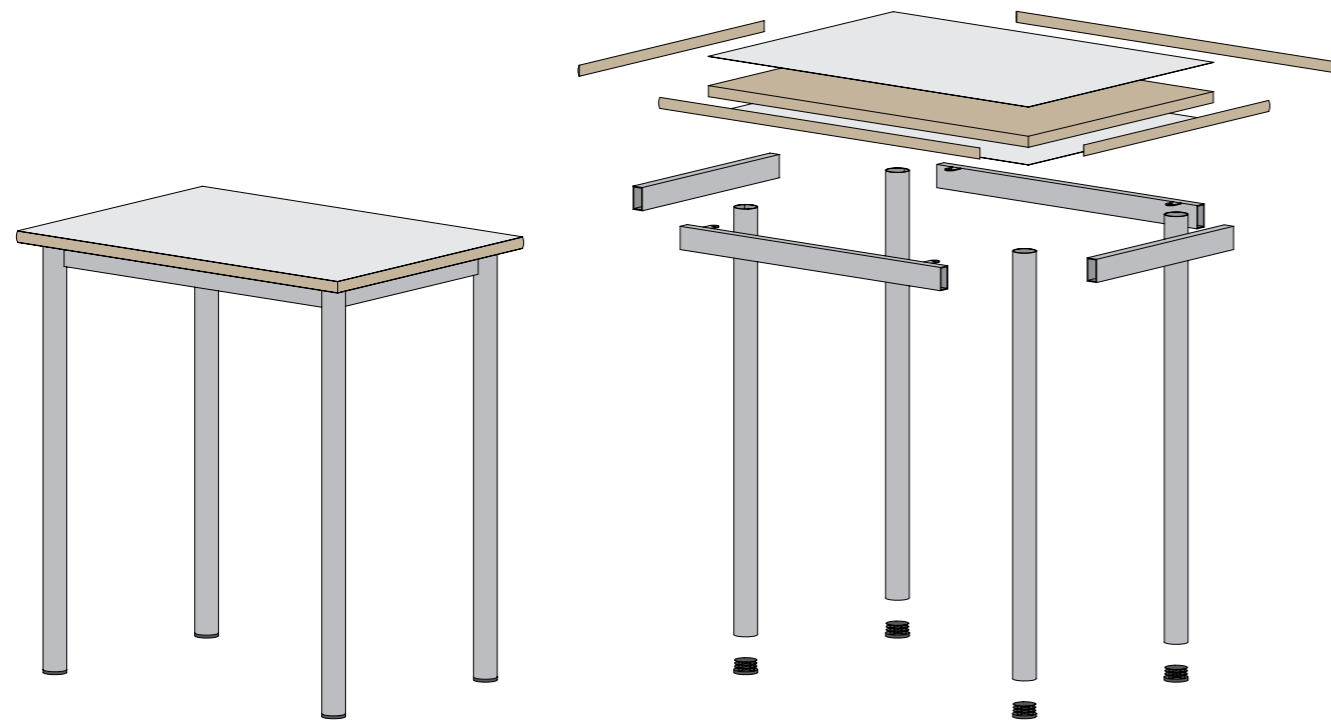
le aziende coinvolte, le quali, oltre a migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse, possono costruire un rapporto più solido e continuativo con i propri clienti. Questo tipo di relazione, basata su contratti di servizio a lungo termine, non solo rafforza la fedeltà del cliente, ma garantisce anche flussi di entrate ricorrenti e prevedibili, riducendo al contempo la dipendenza dalla vendita una tantum di prodotti. Inoltre, il recupero e la rigenerazione sistematica dei materiali favoriscono una riduzione dei costi di produzione, minimizzando la dipendenza da materie prime vergini e aumentando la resilienza aziendale rispetto alle oscillazioni dei prezzi delle risorse. In un contesto più ampio, la transizione verso un modello di business circolare contribuisce a ridefinire il ruolo delle aziende nell'economia globale, promuovendo un paradigma produttivo e distributivo incentrato sulla sostenibilità. Per il settore dell'arredo scolastico, tale trasformazione assume un significato ancora più rilevante, in quanto risponde non solo alle sfide ambientali, ma anche alle esigenze di un sistema educativo in evoluzione, sempre più orientato verso soluzioni innovative e flessibili.



6.4. Linee guida per lo sviluppo di un arredo scolastico: caso studio e sintesi delle strategie di riprogettazione circolare

All'interno della filiera del sistema arredo, il settore dell'arredo scolastico costituisce un ambito che si distingue per complessità e varietà, essendo caratterizzato da una molteplicità di soluzioni progettuali destinate a rispondere a esigenze funzionali ed educative diversificate. Questa pluralità si riflette nella gamma di prodotti disponibili, che spazia dai banchi e le sedie, indispensabili per le attività quotidiane degli studenti, ai sistemi di archiviazione, concepiti per organizzare e ottimizzare gli spazi scolastici, fino a nuove tipologie di arredi progettati per supportare le modalità didattiche più recenti, come quelle collaborative, digitali o interdisciplinari. Questo contesto eterogeneo impone una costante innovazione, sia sul piano progettuale che produttivo, al fine di garantire soluzioni che rispondano a criteri di ergonomia, sostenibilità e funzionalità. Nell'ambito di questa analisi, il banco monoposto standard si configura come un elemento centrale, poiché è attualmente il più diffuso nelle scuole (Fig. 53). La sua prevalenza è stata ulteriormente accentuata dalle recenti restrizioni imposte dalla pandemia da COVID-19, che hanno reso necessario il rispetto delle misure di distanziamento sociale, favorendo l'adozione di soluzioni individuali. Tale banco, oltre a rappresentare uno dei prodotti più richiesti dalle aziende operanti nel settore, è anche uno dei più normativizzati. Deve infatti rispettare rigorosi standard di sicurezza per evitare incidenti, nonché requisiti di differenziazione antropometrica, al fine di adattarsi alle diverse caratteristiche fisiche degli studenti, suddivisi per classi dimensionali. Nonostante la durata di vita dichiarata per questi banchi sia generalmente fissata intorno ai 15 anni, essi raramente raggiungono il termine del loro ciclo di vita in condizioni ottimali. L'usura legata all'utilizzo intensivo e quotidiano, combinata con una manutenzione spesso insufficiente a causa delle limitazioni di bilancio delle scuole, compromette la funzionalità e l'estetica del banco in tempi relativamente brevi. Questa situazione crea non solo problematiche legate alla gestione delle scorte dismesse, ma evidenzia anche la necessità di ripensare il design e i materiali utilizzati per aumentare la durabilità del prodotto. Nell'ambito di questa analisi, il banco monoposto standard si configura come un elemento centrale, poiché è attualmente il più diffuso nelle scuole. La sua prevalenza è stata ulteriormente accentuata dalle recenti restrizioni imposte dalla pandemia da COVID-19, che hanno reso necessario il rispetto delle misure di distanziamento

sociale, favorendo l'adozione di soluzioni individuali. Tale banco, oltre a rappresentare uno dei prodotti più richiesti dalle aziende operanti nel settore, è anche uno dei più normativizzati. Deve infatti rispettare rigorosi standard di sicurezza per evitare incidenti, nonché requisiti di differenziazione antropometrica, al fine di adattarsi alle diverse caratteristiche fisiche degli studenti, suddivisi per classi dimensionali. Nonostante la durata di vita dichiarata per questi banchi sia generalmente fissata intorno ai 15 anni, essi raramente raggiungono il termine del loro ciclo di vita in condizioni ottimali. L'usura legata all'utilizzo intensivo e quotidiano, combinata con una manutenzione spesso insufficiente a causa delle limitazioni di bilancio delle scuole, compromette la funzionalità e l'estetica del banco in tempi relativamente brevi. Questa situazione crea non solo problematiche legate alla gestione delle scorte dismesse, ma evidenzia anche la necessità di ripensare il design e i materiali utilizzati per aumentare la durabilità del prodotto. Un punto particolarmente critico nell'analisi del banco monoposto riguarda la struttura in acciaio, che risulta rigida e poco flessibile essendo totalmente saldata. Sebbene tale configurazione possa offrire una maggiore robustezza iniziale, essa impedisce la sostituzione delle singole parti danneggiate o usurate, come i piedini, le giunzioni o i supporti. Questo limite costruttivo comporta che, in caso di danni a una parte specifica del banco, sia necessario sostituire l'intera struttura, aumentando considerevolmente i costi di gestione e generando una maggiore quantità di rifiuti (Fig. 54). La struttura in acciaio, seppur robusta, presenta una limitata capacità di adattamento. Ogni variazione nella forma del piano di lavoro, che può essere circolare, rettangolare, trapezoidale o di altre configurazioni, richiede la progettazione e realizzazione di una struttura ad hoc, aumentando i costi di produzione e limitando l'efficienza produttiva. Questa rigidità progettuale ostacola anche la possibilità di configurare i banchi in base a esigenze didattiche variabili, come nel caso di aule multifunzionali. Anche il piano di lavoro presenta criticità significative. Solitamente realizzato in truciolare nobilitato, esso viene scelto per il suo basso costo, un fattore fondamentale per le scuole che devono operare con risorse finanziarie limitate. Tuttavia, questo materiale, pur economico, offre una resistenza limitata all'usura e alle sollecitazioni, richiedendo frequenti interventi di sostituzione che gravano



214 Fig. 53: Banco monoposto standard.

ulteriormente sui costi a lungo termine. Un'ulteriore criticità deriva dal sistema dei piedini antiscivolo, che costituiscono una componente fondamentale per la stabilità e la sicurezza del banco. Questi piedini, spesso realizzati in gomma o materiale plastico, si usurano rapidamente a causa dell'uso continuativo e delle sollecitazioni meccaniche, richiedendo frequenti interventi di manutenzione o sostituzione. La combinazione di strutture rigide, piedini facilmente usurabili e piani di lavoro economicamente vantaggiosi ma non duraturi crea significative difficoltà gestionali per le amministrazioni pubbliche. La necessità di sostituire frequentemente i banchi o le loro componenti aumenta i costi complessivi di gestione e genera elevate quantità di rifiuti, contribuendo a un impatto ambientale significativo. Per superare queste problematiche, risulta essenziale ripensare la progettazione del banco scolastico attraverso un approccio innovativo. La modularità della struttura dovrebbe essere una priorità, consentendo la sostituzione di singole parti senza dover intervenire sull'intero banco. Analogamente, l'adozione di materiali più resistenti e sostenibili potrebbe ridurre l'usura e prolungare la vita utile del prodotto, diminuendo al contempo i costi di gestione e l'impatto ambientale. Infine, lo sviluppo di piedini antiscivolo più durevoli, realizzati in materiali innovativi, rappresenterebbe un ulteriore passo avanti verso la creazione di arredi scolastici più funzionali e longevi.

L'elaborazione di linee guida per lo sviluppo di un banco monoposto scolastico in un'ottica di design circolare richiede un approccio metodologico che integri i principi della sostenibilità, della

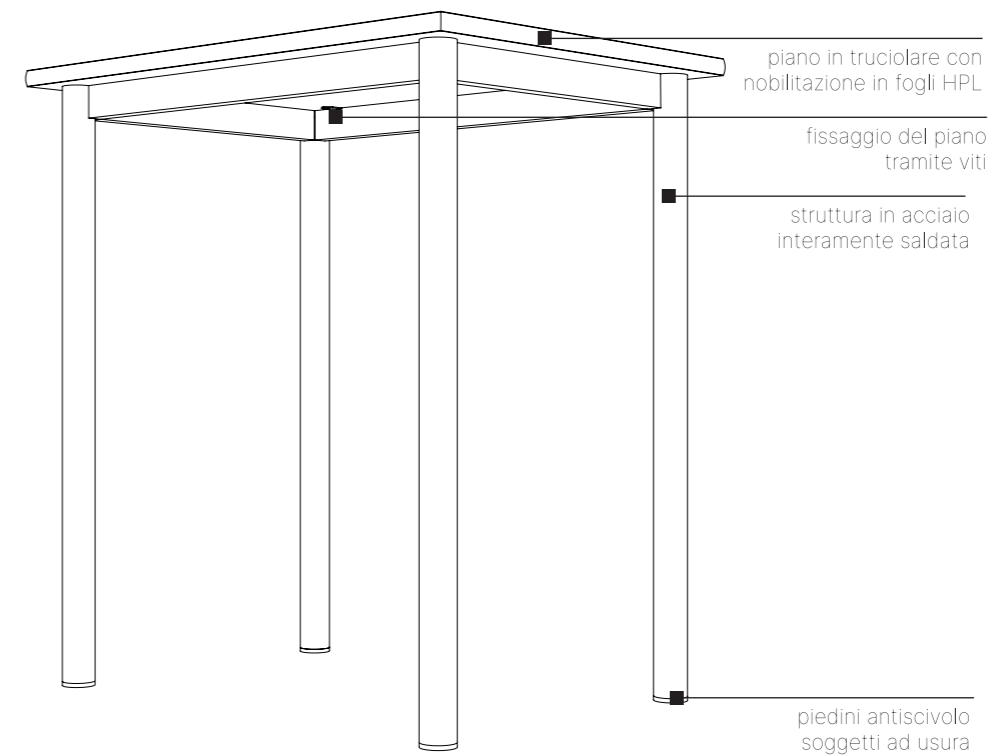


Fig. 54: Schema di analisi dell'architettura del banco monoposto standard.

durabilità e della flessibilità d'uso, in linea con i Criteri Ambientali Minimi (CAM) e con le moderne strategie di riprogettazione orientate all'economia circolare. Questi criteri, concepiti per ridurre gli impatti ambientali dell'intero ciclo di vita del prodotto, si concretizzano innanzitutto nella scelta di materiali certificati e a basso impatto ambientale. In particolare, l'utilizzo di legno proveniente da foreste gestite in modo sostenibile, accompagnato dalla preferenza per materiali plastici e metallici riciclati o riciclabili, costituisce un requisito fondamentale per rispettare gli standard di sostenibilità richiesti dagli appalti pubblici verdi. Un approccio al design modulare, in grado di applicare strategie progettuali adeguate, che includano la disassemblabilità, la riparabilità e l'aggiornabilità del prodotto, costituisce un elemento fondamentale per promuovere la circolarità e prolungare la vita utile del banco. La riduzione della complessità materiale, ottenuta sia eliminando i compositi difficili da separare sia privilegiando l'uso di connessioni meccaniche, risponde in modo efficace alle esigenze di una gestione ottimale dei rifiuti, in linea con i principi della progettazione orientata al fine vita. In un contesto scolastico, dove la durabilità e la capacità di adattamento agli utenti sono essenziali, il banco deve essere progettato per garantire un uso prolungato, riducendo così l'impatto ambientale associato alla produzione di nuovi arredi. Questo obiettivo può essere raggiunto mediante la scelta di materiali resistenti e finiture che riducano i danni da usura, nonché attraverso soluzioni ergonomiche che permettano di adattare il prodotto a studenti di età e stature differenti. Inoltre, la possibilità di aggiornare o ricon-

figurare il banco, anche in un'ottica di economia della funzionalità, rappresenta un elemento strategico per prolungare ulteriormente la vita del prodotto, trasformandolo in un servizio in grado di evolversi nel tempo secondo le necessità educative. Un aspetto centrale della progettazione circolare è rappresentato dall'analisi del ciclo di vita (LCA), che consente di valutare gli impatti ambientali del prodotto in ogni fase, dalla produzione allo smaltimento, identificando i punti critici da ottimizzare.

In questa prospettiva, l'integrazione di biomateriali innovativi e tecnologie intelligenti, come superfici antibatteriche o materiali autoriparanti, può contribuire a migliorare ulteriormente le prestazioni ambientali del banco, soddisfacendo al contempo le esigenze funzionali e igieniche del contesto scolastico.

La progettazione di un banco monoposto scolastico, assunto come caso studio, si configura come un'opportunità per applicare in modo concreto le strategie di riprogettazione circolare, che trovano il loro fondamento nei principi della sostenibilità, della modularità e della durabilità. In particolare, la scelta dei materiali rappresenta il primo ambito di intervento, poiché è necessario che le componenti principali del banco siano realizzate con legno certificato, proveniente da foreste gestite in maniera sostenibile, e con plastica e metallo riciclati, evitando al contempo l'uso di sostanze tossiche come colle o vernici contenenti composti organici volatili. Questo approccio consente di ridurre sensibilmente l'impatto ambientale del prodotto, promuovendo al contempo l'utilizzo di risorse riciclabili e migliorando la qualità dell'aria negli ambienti scolastici. Parallelamente, il design modulare costituisce un elemento essenziale per garantire che il banco possa essere facilmente smontato e riparato, riducendo così la necessità di sostituire l'intero prodotto in caso di danno o usura di una parte. A tal fine, è opportuno adottare soluzioni progettuali che privilegino l'uso di viti, incastri meccanici o altri sistemi di connessione reversibile, evitando l'impiego di materiali compositi difficili da separare. Inoltre, l'introduzione di componenti standardizzati e intercambiabili agevola non solo le operazioni di manutenzione, ma anche il recupero delle risorse a fine vita, rendendo possibile un'efficace gestione del prodotto secondo i principi dell'economia circolare. Un ulteriore aspetto da considerare riguarda la durabilità del banco, che deve essere progettato per resistere agli usi intensivi tipici dell'ambiente scolastico.

A tale scopo, l'applicazione di finiture antigraffio e anti-macchia, oltre all'impiego di materiali robusti e durevoli, consente di prolungare significativamente la vita utile del prodotto, riducendo al contempo i costi associati alla sua sostituzione. In questa prospettiva, l'utilizzo di materiali innovativi, come superfici autoriparanti o trattamenti antibatterici, può migliorare ulteriormente la resistenza del banco, garantendo al contempo un'elevata igiene e funzionalità. L'integrazione di soluzioni ergonomiche e flessibili, quali la regolabilità in altezza e un design universale capace di adattarsi a studenti con diverse esigenze fisiche, rappresenta un ulteriore tassello cruciale per assicurare il comfort e l'inclusività del banco. La possibilità di personalizzare il prodotto, adattandolo alle differenti fasce di età e alle evoluzioni delle necessità didattiche, non solo incrementa il valore d'uso del banco, ma ne previene anche l'obsolescenza prematura. Infine, la fase di fine vita del prodotto richiede un'attenzione particolare per massimizzarne il recupero e ridurre l'impatto ambientale. Per raggiungere questo obiettivo, è necessario progettare il banco secondo un approccio cradle-to-cradle, che consenta di separare e reintrodurre i materiali nei cicli produttivi, eventualmente etichettando le componenti per facilitarne lo smistamento. A ciò si affianca la possibilità di aggiornare il banco nel tempo, aggiungendo accessori o modificandone la configurazione per rispondere a nuove esigenze, trasformandolo così in un elemento adattabile e duraturo. L'applicazione di queste strategie non solo consente di rispettare i Criteri Ambientali Minimi richiesti dagli appalti pubblici, ma trasforma il banco monoposto in un prodotto circolare e sistemico, capace di generare valore non solo ambientale, ma anche economico e sociale, contribuendo alla diffusione di una cultura della sostenibilità nelle scuole.

Parte terza

**Sviluppo progettuale di un
arredo-scuola circolare,
manutenibile, riparabile e
aggiornabile per il settore
dell'arredo scolastico**

Capitolo 7

Studio ambientale del ciclo di vita (LCA) applicato a un banco-scuola tradizionale

- 7.1. Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema
- 7.2. Fase Life Cycle Inventory (LCI)
- 7.3. Risultati e opzioni di miglioramento ambientale

7.1. Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema

Lo studio pone l'obiettivo di analizzare l'impatto ambientale di un banco monoposto, rappresentativo della media nazionale, destinato all'utilizzo nelle istituzioni scolastiche per una durata di 30 anni. Il banco è progettato per rispettare i requisiti delle normative UNI EN 1729-1 (UNI EN, 2016a) e UNI EN 1729-2 (UNI EN, 2016b), che definiscono le specifiche tecniche per i banchi scolastici, includendo test sulla durata ciclica, la resistenza, la stabilità e la resistenza agli urti. La funzione del sistema è garantire l'utilizzo del banco in modo da assicurare agli alunni condizioni confortevoli per lo studio e il lavoro durante l'intero periodo di utilizzo. Per raggiungere tale obiettivo, è necessario produrre due banchi, considerando che la durata stimata di ciascun banco è di 15 anni. Per rappresentare adeguatamente questa funzione, l'unità funzionale è stata definita come un banco monoposto di dimensioni standard (700 mm x 500 mm x 760 mm in altezza) e peso di 12,60 kg. Il flusso di riferimento, che costituisce la base dell'analisi, è rappresentato da un banco monoposto con telaio in acciaio e piano in truciolare con bordi in faggio. L'analisi del ciclo di vita (LCA) è stata sviluppata in conformità con le norme ISO 14040 e ISO 14044 (UNI EN, 2021a; UNI EN, 2021b), adottando un approccio "attribuzionale" e seguendo le fasi previste dalle suddette norme (Fig. 55). Il banco monoposto considerato per lo studio LCA si compone di un telaio in acciaio che sorregge un ripiano in legno (Fig. 56). Il telaio in acciaio è composto da quattro tubolari in acciaio opportunamente tagliati che costituiscono i piedi del banco a loro volta saldati a quattro profilati a sezione rettangolare in acciaio, anch'essi tagliati su misura, per realizzare una struttura rettangolare (telaietto) di supporto alla struttura in legno; il ripiano in legno, costituito da un piano truciolare grezzo al quale vengono incollati sulla parte superiore e inferiore due fogli di laminati HPL (High Pressure Laminate) e bordato per tutto il perimetro con listelli di faggio, è assemblato al telaio attraverso sei viti in acciaio e infine quattro gommini vengono incassati ai piedini del telaio per garantire la funzione antiscivolo. I tubolari che compongono i piedi del banco sono realizzati con acciaio del tipo E 220 + CR2S2 conformi alla normativa europea EN 10305 (UNI EN, 2016c) (tubi saldati longitudinalmente di acciaio al carbonio non legato per applicazioni di precisione). Il codice E220 indica il grado di acciaio, con relativa composizione chimica e caratteristiche meccaniche; il codice CR2 indica che il tubolare non è adatto a trattamento ter-

LIFE CYCLE ASSESSMENT
Framework



224 Fig. 55: Schema delle fasi dell'analisi del ciclo di vita (LCA) secondo le norme ISO 14040 e ISO 14044.

mico dopo saldatura e il codice S2 indica che il tubolare è stato realizzato da nastro laminato a caldo decapato. I profilati a sezione rettangolare in acciaio che compongono il telaio sono realizzati con acciaio del tipo E 220 + CR2S3 anch'essi conformi alla normativa europea EN 10305 (UNI EN, 2016c) in cui il codice S3 indica che la barra semiovale è stata realizzata da nastro laminato a freddo. Il pannello truciolare grezzo che compone il ripiano del banco è di tipo P2 conforme alla normativa EN 312:2010 (UNI EN, 2010a) dove la sigla P2 si riferisce ai pannelli per utilizzo interno come componente non strutturale in ambiente secco. I fogli di laminato HPL che rivestono il piano del banco nella parte superiore e inferiore sono conformi agli standard UNI EN 438 (UNI EN, 2016d) e ISO 4586 (UNI EN ISO, 2015). Il bordo che contorna perimetralmente il piano truciolare è realizzato con listelli di faggio essiccato ad una percentuale di umidità < 15%. Il processo produttivo del banco monoposto si sviluppa attraverso due sotto-processi principali, ossia la lavorazione dell'acciaio e quella del legno, che vengono eseguiti contemporaneamente in due stabilimenti distinti (Fig. 57). Per quanto riguarda la lavorazione dell'acciaio, questa inizia con la sezionatura dei tubolari e dei profilati a sezione rettangolare, che arrivano in azienda sotto forma di barre di acciaio. Questi elementi vengono tagliati da una macchina da taglio apposita per ottenere i piedi del banco e le traversine, componenti fondamentali per realizzare il telaio di supporto al piano in legno. Successivamente, i tubolari vengono saldati alle traversine in quattro punti, formando così il telaio grezzo del banco. Una volta completata la saldatura,



Fig. 56: L'unità funzionale è un banco monoposto standard di 700x500x760 mm e 12,60 kg con telaio in acciaio e piano in truciolare bordato in faggio

225

si procede con il processo di verniciatura, che comprende diverse fasi. Il primo passaggio è il pretrattamento, in cui i telai grezzi, appesi a una catenaria automatica, attraversano un tunnel di prelavaggio. Qui, un liquido fosfosgrassante rimuove le impurità accumulate sul metallo, tra cui residui di polvere metallica e oli derivanti dalle lavorazioni precedenti. Dopo il pretrattamento, i telai entrano in un forno per l'asciugatura completa delle superfici trattate. Una volta asciutti, i telai passano alla fase di verniciatura vera e propria, durante la quale vengono ricoperti con polveri epossidiche attraverso pistole elettrostatiche automatiche all'interno di cabine specializzate. Eventuali eccessi di vernice vengono recuperati e riutilizzati per i successivi telai, riducendo così gli sprechi. Al termine di questa fase, i telai vengono sottoposti a polimerizzazione in un forno a circa 200°C, dove la vernice applicata si solidifica completamente. Una volta verniciati e polimerizzati, i telai proseguono sulla catenaria fino alla zona di pallettizzazione, dove vengono sganciati e trasportati in magazzino con muletti elettrici. La lavorazione del legno segue un percorso parallelo. I pannelli di truciolare arrivano in azienda sotto forma di lastre grezze, che vengono sezionate con una macchina apposita per ottenere i piani del banco con le dimensioni richieste. Contemporaneamente, i fogli di laminato HPL vengono tagliati alla stessa dimensione del piano di truciolare. In una fase successiva, questi fogli vengono incollati sulla parte superiore e inferiore del piano truciolare, creando così un piano laminato pronto per ulteriori lavorazioni. A questo punto, si procede con l'incollaggio dei listelli di faggio lungo il perimetro del

piano, i quali hanno un'altezza pari allo spessore del piano truciolare comprensivo dei laminati, ossia circa 20 mm.

Dopo l'incollaggio, una macchina apposita rifinisce il bordo in faggio, eliminando le parti in eccesso e smussando gli angoli del piano per arrotondarli, in conformità con le normative vigenti. Infine, avviene l'assemblaggio del banco: il telaio in acciaio viene fissato al piano in legno tramite l'avvitamento di sei viti. Inoltre, ai piedi del telaio vengono applicati quattro gommini antiscivolo. Il prodotto finito non richiede alcun tipo di imballaggio, poiché i banchi possono essere facilmente impilati e caricati manualmente sui mezzi di trasporto. Questo complesso processo produttivo è progettato per garantire la conformità del banco monoposto alle normative tecniche e ambientali, ottimizzando ogni fase per minimizzare gli sprechi e migliorare l'efficienza complessiva. Per lo studio LCA della filiera è stato adottato un approccio "cradle-to-grave" (dalla culla alla tomba), considerando tutti i processi che intervengono nella fase di approvvigionamento delle materie prime fino all'uso e alla gestione del fine vita del prodotto. Questo approccio include anche i processi che avvengono al di fuori del "cancello aziendale", come la distribuzione del banco monoposto al cliente finale e le fasi di utilizzo, riuso, riciclo o smaltimento. La scelta di definire questi confini del sistema (Fig. 58) si estende dalla fase di acquisizione dei componenti necessari alla produzione del banco fino all'assemblaggio del prodotto finito, che viene consegnato pronto per la distribuzione senza imballaggio. Tale definizione è stata considerata rilevante per rappresentare accuratamente le attività tipiche delle aziende della filiera dell'arredo scolastico. Nello specifico, il sistema include le seguenti fasi e processi: la produzione delle materie prime principali, ovvero acciaio, pannello truciolare grezzo, fogli laminati HPL e listelli per il bordo in faggio, e il loro trasporto fino alle aziende produttrici del banco. Successivamente, i processi produttivi includono il taglio dei tubolari e dei profilati a sezione rettangolare in acciaio, che richiede l'uso di materie ausiliarie come olio da taglio, acqua ed energia per le macchine utensili. La saldatura dei tubolari e dei profilati a sezione rettangolare comprende il consumo di filo di saldatura ed energia per il funzionamento delle saldatrici, mentre il pretrattamento chimico del telaio prevede l'uso di liquidi fosfosgrassanti, acqua ed energia elettrica per il movimento delle catenarie a cui sono appesi i telai.

Fig. 57: Diagramma di flusso che illustra il processo produttivo del banco monoposto standard secondo l'approccio cradle-to-grave. Sono rappresentate le fasi di pre-produzione, produzione, distribuzione, utilizzo e dismissione, evidenziando i principali materiali, lavorazioni e impatti lungo il ciclo di vita del prodotto

FLOWCHART banco standard cradle to grave



Trasporto
produzione/distribuzione



Trasporto
Pre-produzione

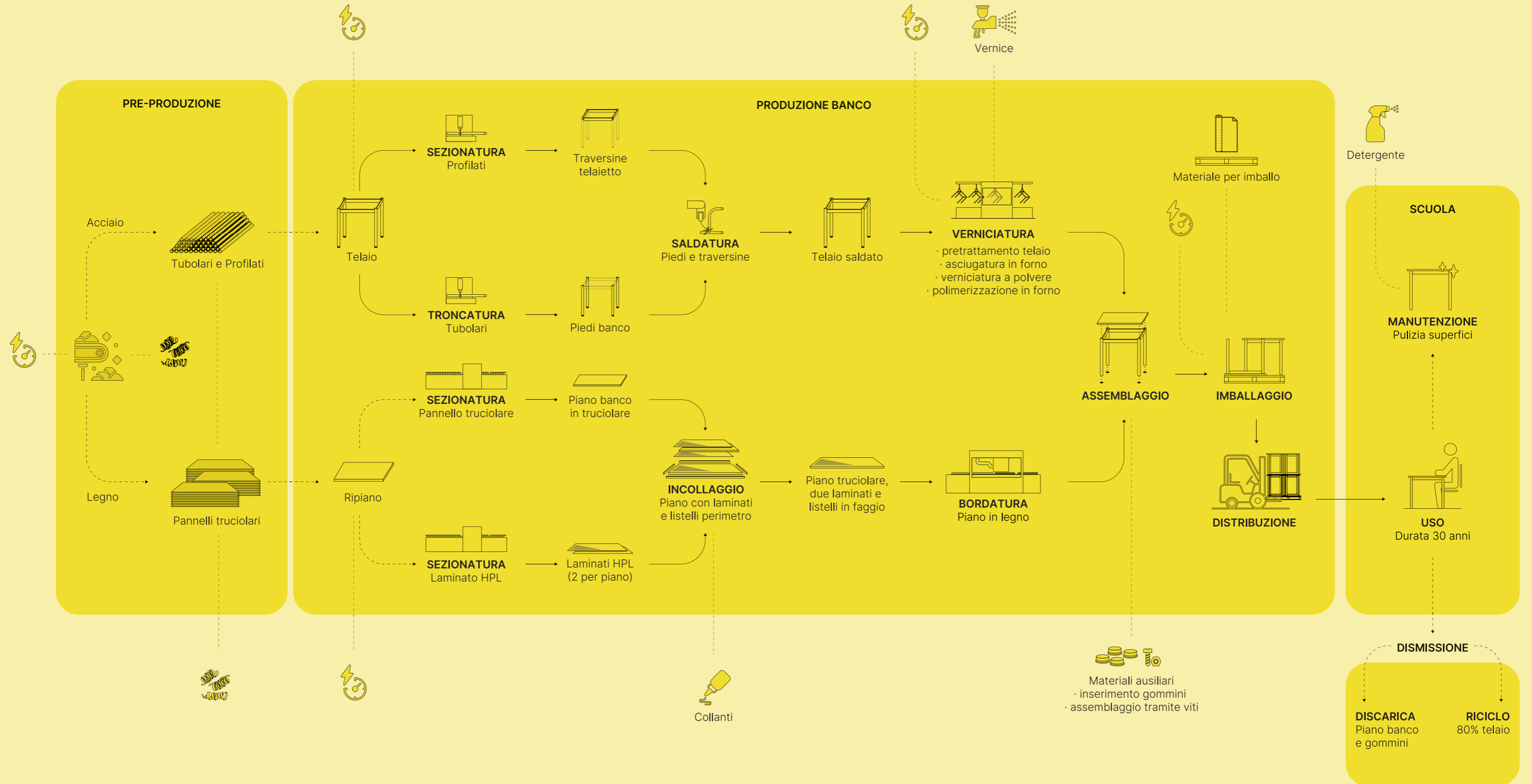
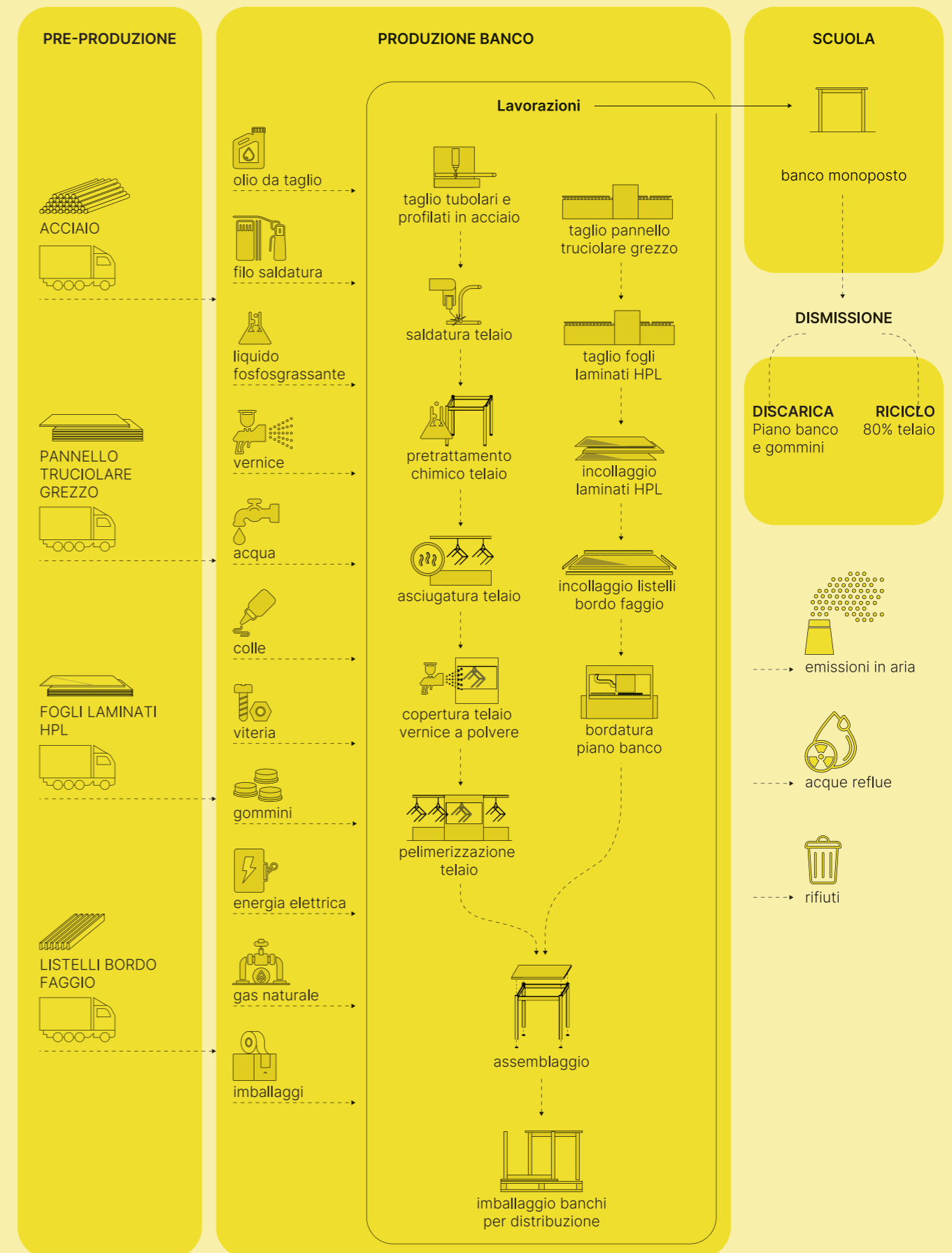


Fig. 58: Confini del sistema relativo al processo di produzione di un banco monoposto medio, rappresentativo della filiera dell'arredo scolastico, destinato all'utilizzo nelle scuole, nonché al successivo riciclo e smaltimento.

Il processo di asciugatura del telaio avviene attraverso forni alimentati a gas naturale, con ulteriore utilizzo di energia elettrica per la movimentazione delle catenarie. La fase di verniciatura prevede l'applicazione di polveri epossidiche sul telaio in acciaio, seguita dalla polimerizzazione della vernice attraverso un secondo passaggio in forno, che richiede combustibile (gas naturale) ed energia elettrica per le pistole elettrostatiche. Per quanto riguarda la lavorazione del pannello truciolare grezzo, esso viene sezionato utilizzando macchinari dedicati, così come avviene per i fogli laminati HPL. I fogli laminati vengono poi incollati su entrambe le facce del pannello truciolare, con consumo di colla, energia e acqua per il risciacquo dei macchinari. I listelli di faggio sono incollati lungo il bordo del pannello, con ulteriore utilizzo di colla ed energia, e successivamente il bordo viene rifinito con macchine smussatrici. L'assemblaggio finale del banco prevede il montaggio del piano in legno con il telaio in acciaio, utilizzando materiali come viti e gommini e il relativo consumo di energia. La movimentazione interna dei banchi monoposto è garantita da muletti alimentati elettricamente. La produzione dei rifiuti generati durante queste fasi, così come il loro trasporto e trattamento finale, rientra nei confini del sistema, insieme alle emissioni atmosferiche derivate dalla combustione di gas naturale nei forni e dai vapori emessi durante i processi di verniciatura e pretrattamento chimico.

La modellazione del sistema analizzato è stata effettuata utilizzando dati primari raccolti presso le aziende partner della filiera, riferiti alla produzione del banco monoposto per l'anno 2024. Questi dati, rappresentativi della filiera italiana per questa tipologia di prodotto e delle tecnologie impiegate, includono macchinari, attrezzature e procedure operative, e sono stati considerati adeguati per rappresentare il sistema oggetto di studio. I dati di inventario relativi ai diversi processi inclusi nei confini del sistema possono quindi essere considerati ragionevolmente accurati e pertinenti per descrivere le dinamiche della filiera. Per la modellazione dei processi di trasporto, sono state utilizzate le quantità fisiche di materiali trasportati (in base al peso) e le distanze medie necessarie per il trasporto verso le aziende produttrici, desunte dalle informazioni fornite dalle imprese partecipanti. Nel caso del pannello truciolare nobilitato, non presente nella banca dati di Eco-it, è stato necessario ricorrere al software GRANTA e alla sua banca dati.



La resina melamminica è stata sostituita con “formic acid from methyl formate”, mentre per la carta è stato ipotizzato l’uso di “kraft paper”. Per il truciolato, la scelta è ricaduta su “particle board, outdoor use” in quanto il più vicino, in termini di impatti, a quello presente in GRANTA. Il rivestimento laterale, basato su dati relativi al legno di faggio (0,312-0,345 Kg CO₂), è stato assimilato al “particle board, outdoor use” (0,33 Kg CO₂), in quanto ritenuto il più rappresentativo. Per l’adesivo poliuretano usato nell’incollaggio, è stato utilizzato il dato di GRANTA relativo al TPU (5,46-6,02 Kg CO₂), poi convertito in “PU flexible form” (4,76 Kg CO₂). La modellazione dei componenti metallici, come profilati e tubolari in acciaio, ha previsto una distribuzione equa del peso complessivo della struttura tra le gambe e i profilati. Per stimare i chilogrammi di vernice a polvere utilizzata, sono stati calcolati i metri quadrati della superficie della struttura, ipotizzando che 1 kg di vernice copra circa 6 metri quadrati. La vernice epossidica o poliesterica, non presente in Eco-it, è stata modellata tramite GRANTA utilizzando “Epoxy resin” (5,65-6,23 Kg CO₂). Per un confronto, il valore più vicino su Eco-it è risultato “Toner, black powder” (5,51 Kg CO₂). Le distanze di trasporto dei materiali sono state definite in base ai fornitori. Per esempio, il pannello truciolare e i materiali di nobilitazione sono stati ipotizzati provenienti dal Gruppo Saviola (541 km), mentre la colla è stata modellata come acquistata da un’azienda di Roma (290 km). I profilati e i tubolari in acciaio sono stati associati al fornitore Tubi Acciaio Castiglioni (662 km), la vernice a Icro Coating (640 km), e i componenti come viti e gommini a Univiti (608 km). La distribuzione finale è stata ipotizzata verso la SAAD di Ascoli Piceno (160 km). Per l’imballaggio dei banchi, è stato considerato un pallet in grado di contenere sei unità, avvolto con film LDPE. I dati relativi al pallet sono stati ricavati da un EPD specifico e successivamente integrati con informazioni sui materiali e la composizione. Poiché il legno di abete non è presente in Eco-it, è stato modellato tramite GRANTA utilizzando i valori per “Timber, hardwood” (0,19 Kg CO₂). Per il film LDPE, necessario ad avvolgere e proteggere i banchi, è stata calcolata l’area totale sviluppata dalla struttura del banco e il volume del film, basandosi su uno spessore di 0,023 mm e sul peso specifico del materiale. Il valore è stato moltiplicato per un fattore di sicurezza, ipotizzando l’uso di più strati di film per garantire la protezione. Per tutti i materiali utilizza-

ti, sono stati applicati coefficienti di scarto per tenere conto delle perdite durante la produzione: 10% per plastica e metallo, e 20% per il legno. Nella fase d’uso, il detergente utilizzato per la pulizia dei banchi è stato modellato come alcalino con meno del 5% di tensioattivi anionici. Poiché né Eco-it né GRANTA disponevano di dati specifici, è stato selezionato “Fatty alcohol sulfate {Row}” dal software SimaPro (2,92 Kg CO₂) e successivamente confrontato con un prodotto simile in Eco-it, “Silicon product” (2,69 Kg CO₂). La quantità di detergente necessaria è stata stimata ipotizzando due spruzzate da 1,5 cc ciascuna per ogni banco, con una pulizia settimanale per un periodo di 30 anni, risultando in un consumo totale di circa 4 litri. Il metodo di valutazione dell’impatto adottato si basa sull’analisi dei chilogrammi equivalenti di CO₂, combinata con l’utilizzo del metodo ReCiPe per una valutazione più completa degli impatti ambientali del sistema. ReCiPe consente di integrare due prospettive: da un lato, quella specifica, che analizza gli impatti diretti e distinti dei processi produttivi; dall’altro, quella complessiva, che misura i danni ambientali aggregati. Per lo svolgimento dello studio è stato utilizzato il software Eco-it versione 1.4, che include un database predefinito per la modellazione degli impatti ambientali. Questo software è stato scelto per la sua capacità di fornire dati rappresentativi delle tecnologie medie globali e dei processi più comuni, sebbene il livello di dettaglio e di specificità geografica sia limitato rispetto ad altre soluzioni, come SimaPro. Tutti i dataset utilizzati per la modellazione dei dati di background sono stati selezionati direttamente dal database integrato di Eco-it, assicurandosi di utilizzare i valori più aggiornati e rappresentativi disponibili all’interno del software. Sebbene il focus principale del database sia su tecnologie e materiali standardizzati, esso offre una base sufficientemente robusta per valutare i processi rilevanti, garantendo una buona rappresentatività temporale e tecnologica rispetto al sistema studiato.

Ai fini della raccolta dei dati primari presso le aziende coinvolte, a seguito di un'attenta analisi della filiera e di confronti interni con i responsabili aziendali. I dati provenienti dalle aziende coinvolte. Nello studio di filiera sono state effettuate le seguenti assunzioni: In accordo con le aziende partner, si è considerato, per la produzione del telaio del banco, un acciaio primario (carbonio non legato), conforme alla norma europea EN 10305 (UNI EN, 2016c), che specifica i requisiti per i tubi saldati di acciaio al carbonio non legato per applicazioni di precisione; per ciascun processo della lavorazione si è concordato di utilizzare il dato calcolato come media quantitativa dei dati forniti dalle due aziende; per il consumo di materiali e relativi imballaggi durante il processo di saldatura e per il consumo di energia necessario per tale lavorazione, si sono considerati i dati provenienti dalle due aziende. Nel complesso non vi sono da segnalare importanti carenze di dati in quanto presso entrambe le aziende è stata effettuata una dettagliata raccolta dati. In ogni caso, laddove i dati misurati non fossero disponibili per entrambe le aziende si è proceduto, in collaborazione con le aziende stesse, a stimare i quantitativi mancanti. Il telaio in acciaio del banco è costituito da quattro piedi opportunamente tagliati che si congiungono attraverso quattro punti di saldatura all'estremità di quattro traversine, ottenendo così la struttura portante del piano in legno del banco; il telaio grezzo sarà poi sottoposto alla fase della verniciatura e infine assemblato al ripiano in legno del banco. In dettaglio, le quattro gambe del telaio di lunghezza pari a 735 mm sono ricavate attraverso quattro tagli di un tubolare in acciaio del tipo EN 10305 -3 E220 + CR2S2. Le traverse hanno dimensioni uguali a due a due nel rispetto della larghezza e profondità del piano in legno del banco e si ricavano tramite quattro tagli di una barra a sezione rettangolare in acciaio del tipo EN 10305 -3 E220 + CR2S3(2016a). Per quanto riguarda la produzione dell'acciaio, si è deciso di utilizzare il dataset "chromium steel 18/8" presente in Eco-it, che è stato giudicato come il più rappresentativo sia della tipologia di acciaio utilizzato per il telaio della seduta sia della tecnologia con cui esso è prodotto. La struttura portante, si avvale di lavorazioni ad alta precisione, quali la laminazione delle lamiere (sheet rolling, steel), la foratura convenzionale (drilling, conventional, steel), il disegno dei tubi (drawing of pipes, steel), e la laminazione di barre sezionali (section bar rolling, steel),

che contribuiscono a garantire robustezza e durata nel tempo. Per quanto riguarda il consumo di acciaio, si è assunto il valore medio dei quantitativi utilizzati da ciascuna azienda coinvolta nello studio. Considerando che in entrambe le aziende si realizzano telai anche per altri co-prodotti, il consumo energetico è stato calcolato con un quantitativo pari a 0,6 kWh di elettricità da fonti fotovoltaiche (electricity photovoltaic, Italy) e 0,4 kWh di elettricità tradizionale dalla rete italiana (electricity, Italy). In accordo con le aziende, si è considerato che le barre di acciaio arrivino senza alcun imballo. Il piano in legno del banco, di dimensioni medie pari a 700 mm di lunghezza per 500 mm di larghezza e 20 mm di spessore, è composto da un piano truciolare grezzo delle dimensioni di 500 mm per 700 mm per 18,5 mm (dati primari medi tra le due aziende) al quale sono incollati (uno sulla parte superiore e uno sulla parte inferiore) due laminati HPL delle dimensioni 500 mm per 700 mm per 0,7 mm (dati primari medi tra le due aziende), e una bordatura di listelli di faggio dell'altezza di 23 mm (dato primario medio delle due aziende) lungo tutto il perimetro del piano di 2400 mm (somma dei lati del piano in legno). In dettaglio, il piano truciolare scelto per il banco monoposto è di tipo P2 nel rispetto della normativa UNI EN 312:2010 (UNI EN, 2010a). Il consumo energetico per la sezionatura è stato calcolato con un quantitativo pari a 0,6 kWh di elettricità da fonti fotovoltaiche (electricity photovoltaic, Italy) e 0,4 kWh di elettricità tradizionale dalla rete italiana (electricity, Italy). Si è concordato con le aziende di non considerare l'imballo relativo ai pannelli truciolari in quanto in entrambe le aziende i pannelli sono consegnati privi di imballo. I laminati HPL (High Pressure Laminate) sono costituiti da strati di materiale di fibra cellulosica (carta Kraft) impregnati con resine fenoliche e melamminiche. La produzione del laminato HPL è stata modellata sulla base delle specifiche tecniche dichiarate dall'EPD relativa a "PRINT HPL (High Pressure Laminate) Thin" pubblicata su EPDItaly (ABET LAMINATI S.p.A., 2021). Per ogni banco si necessita di due piani di laminato HPL e si è considerata la media dei quantitativi forniti direttamente dalle aziende coinvolte. Per quanto riguarda il consumo energetico per il taglio dei laminati HPL, è stato calcolato con un quantitativo pari a 0,6 kWh di elettricità da fonti fotovoltaiche (electricity photovoltaic, Italy) e 0,4 kWh di elettricità tradizionale dalla rete italiana (electricity, Italy). In accordo con le aziende, l'imballo in cui sono contenuti

Fig. 59: LCI del banco standard monoposto.

Name: **BANCO_STANDARD_MONOPOSTO**
Method: ReCiPe

Grafico by
ECO-it 1.4

i laminati non è stato considerato perché ritenuto trascurabile. Per quanto riguarda la bordatura in faggio, in azienda giungono listelli di faggio che una volta incollati ai quattro lati del piano truciolare sono rifilati dalla macchina di bordatura. Il consumo dei listelli in faggio è stato calcolato sulla base dei dati primari forniti dalle aziende. Poiché la produzione del listello di faggio si è deciso di utilizzare il dataset "sawn timber, hardwood": esso infatti riguarda listelli di legno di latifoglie (tra cui il faggio). Il consumo energetico è stato calcolato con un quantitativo pari a 0,6 kWh di elettricità da fonti fotovoltaiche (electricity photovoltaic, Italy) e 0,4 kWh di elettricità tradizionale dalla rete italiana (electricity, Italy). I listelli di bordo faggio giungono in azienda imballati con un film di LDPE di peso trascurabile. Infine, per quanto riguarda le fasi d'incollaggio dei listelli di faggio e dei laminati HPL si sono considerate le medie dei quantitativi di colle e di energia fornite dalle due aziende. La colla utilizzata per l'incollaggio dei listelli di bordo faggio è stata scelta attraverso il database Granta, individuando il TPU (Thermoplastic Polyurethane), che presenta un'impronta di carbonio tra 5,46 e 6,02 kg CO₂/kg. Per adattare i dati al software Eco-it 1.4, questo materiale è stato convertito in "PU flexible foam", con un'impronta inferiore di 4,76 kg CO₂/kg. La scelta di utilizzare una vernice a polvere per la struttura del banco monoposto scolastico si basa su un'attenta valutazione tecnica e ambientale. Per stimare la quantità necessaria, è stata calcolata l'area complessiva da verniciare in metri quadrati, basandosi sul presupposto che 1 kg di vernice a polvere consente di coprire circa 6 metri quadrati. Questo metodo garantisce una stima accurata e contestualizzata al progetto. La vernice utilizzata è di tipo epossidico o poliesteri, selezionata per la sua capacità di fornire una finitura resistente, durevole e uniforme, ideale per proteggere la struttura in acciaio. Tuttavia, il software Eco-it 1.4 non include un dataset specifico per la vernice a polvere, offrendo solo dati relativi a vernici a base acquosa. Per superare questa limitazione, si è fatto riferimento al database Granta, dove è disponibile un componente principale delle vernici epossidiche, ossia la resina epossidica ("Epoxy resin"), con un'impronta di carbonio compresa tra 5,65 e 6,23 kg CO₂/kg. Per integrare questa informazione in Eco-it, è stato scelto il dataset relativo al "Toner, black", che presenta un valore di emissioni di CO₂ simile e risulta quindi il più rappresentativo dal punto di vista ambientale. Questa scelta consente di mantenere una coe-

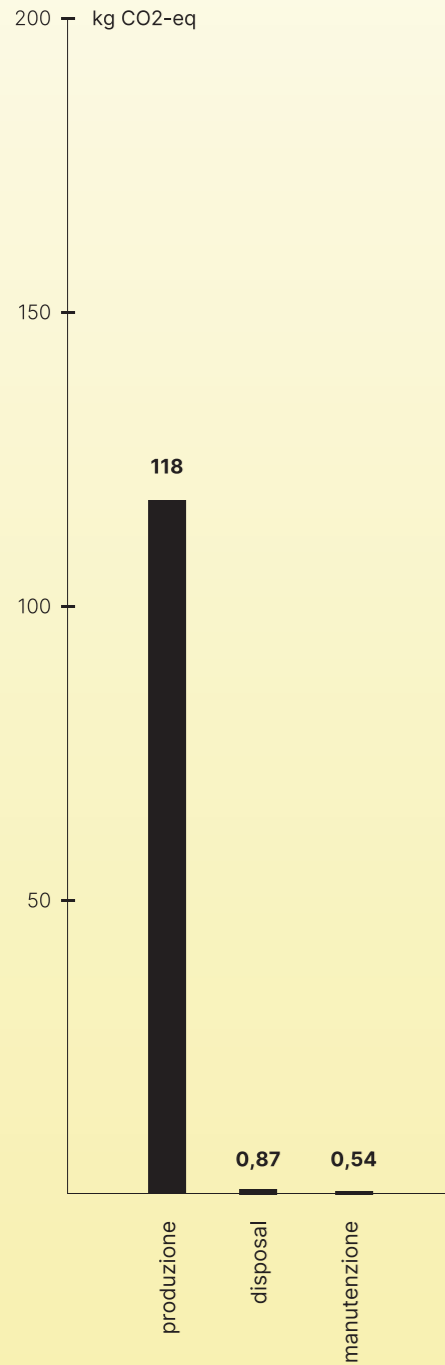
Production	Amount	Unit	Number	Impact
Product	1	p	1	118
BANCO	2	p	1	118
PIANO TRUCIOLARE	1	p	2	10
Particle board, outdoor use	8400000	mm3	2	5,6
Kraft paper, unbleached	0,3	kg	2	0,51
Formic acid from methyl formate	0,3	kg	2	1,9
Sawn timber, hardwood	230400	mm3	2	0,043
PU, flexible foam	0,1	kg	2	0,95
Electricity photovoltaic, Italy	0,6	kWh	2	0,08
Electricity, Italy	0,4	kWh	2	0,51
TRASPORTI	1	p	2	0,94
piano truciolare	1	p	2	0,72
Transport, lorry >32t, EURO5	3,45	tkm	2	0,72
nobilizzazione	1	p	2	0,11
Transport, lorry >32t, EURO5	0,51	tkm	2	0,11
colla	1	p	2	0,12
Transport, van <3.5t	0,03	tkm	2	0,12
STRUTTURA ACCIAIO	1	p	2	83
Chromium steel 18/8	7,32	kg	2	77
Sheet rolling, steel	37,4	g	2	0,027
Drilling, conventional, steel	1,2	g	2	0,0077
Drawing of pipes, steel	3,64	kg	2	2,7
Section bar rolling, steel	3,64	kg	2	1,2
Toner, black, powder	0,07	kg	2	0,77
Welding, arc, steel	0,52	m	2	0,13
TRASPORTI	1	p	2	1
trasporto telaio	1	p	2	1
Transport, lorry >32t, EURO5	4,84	tkm	2	1
trasporto vernice	1	p	2	0,027
Transport, lorry	0,05	tkm	2	0,027
COMPONENTI TERZISTI	1	p	2	0,64
VITERIA	1	p	2	0,024
Steel, electric, un- and low-alloyed	8,8	g	2	0,0075
Wire drawing, steel	8,8	g	2	0,0059
Turning, steel	1,6	g	2	0,011
PIEDINI GOMMATI	1	p	2	0,62
EPDM rubber	66	g	2	0,43
Injection moulding	66	g	2	0,18
TRASPORTI	1	p	2	0,012
Transport, lorry 16-32t, EURO5	0,04	tkm	2	0,012
DISTRIBUZIONE	1	p	2	0,097
Road transport 40 t (volume)	0,261225	m3	2	0,097
PALLETIZZAZIONE	1	p	2	24
pallet	1	p	2	23
Sawn timber, hardwood	0,02938	m3	2	5,5
Particle board, outdoor use	0,013	m3	2	8,6
Chromium steel 18/8	0,66	kg	2	6,9
Wire drawing, steel	0,66	kg	2	0,44
Turning, steel	0,13	kg	2	0,86
Industrial residual wood chopping	14,69	kg	2	0,32
wrap	1	p	2	0,87
Packaging film, LDPE	0,161	kg	2	0,87
MANUTENZIONE	1	p	2	0,54
Silicone product	0,1	kg	2	0,54
Water deionised	2	kg	2	0,004

renza metodologica nell'analisi, pur adattandosi alle limitazioni del software. L'approccio adottato riflette un equilibrio tra precisione tecnica e praticità, garantendo che la verniciatura soddisfi i requisiti estetici e funzionali della struttura, senza trascurare l'impatto ambientale. L'uso di una vernice a polvere, inoltre, riduce gli sprechi e le emissioni durante l'applicazione, contribuendo ulteriormente alla sostenibilità del processo produttivo. Per quanto riguarda i materiali di finitura (viti in acciaio e gommini) che concorrono alla produzione del prodotto nella fase dell'assemblaggio, si sono utilizzati dati primari forniti dalle aziende. Nel dettaglio, si è assunto un valore medio di n° 4 viti in acciaio, con materiale selezionato come dataset "Steel, electric, un- and low-alloyed" e n°4 gommini con materiale dataset "EPDM rubber". Per quanto riguarda i trasporti relativi alla produzione del banco monoposto, è stato scelto di prendere come riferimento lo stabilimento dell'azienda partner Vastarredo Industrie, situata presso la località di Vasto (CH), con la consapevolezza che la stessa analisi del ciclo di vita potrebbe essere replicata considerando l'azienda Camillo Sirianni, variando esclusivamente le distanze di trasporto. In questa configurazione, si è ipotizzato che il pannello truciolare e i materiali necessari per la nobilitazione vengano acquistati presso il Gruppo Saviola, ubicato a 541 km dalla sede produttiva, data la sua rilevanza nella produzione di pannelli in legno riciclato. La colla, indispensabile per l'assemblaggio dei componenti, è fornita da "Antichità Belsito" di Roma, a una distanza di 290 km. I profilati e i tubolari in acciaio, fondamentali per la struttura del banco, provengono da "Tubi Acciaio Castiglioni", situata a 662 km, mentre la vernice, necessaria per il trattamento del telaio, è acquistata da "Icro Coating", a 640 km. Inoltre, i componenti di finitura, come viti e gommini, sono forniti da "Univiti", che si trova a 608 km dalla sede produttiva. Infine, per la distribuzione finale, si è considerata la consegna presso la Scuola di Ateneo Architettura e Design (SAAD) di Ascoli Piceno, situata a una distanza di 160 km. Queste scelte logistiche, che implicano percorrenze variabili per le diverse forniture, incidono in modo significativo sul bilancio energetico complessivo e sulle emissioni associate, rendendo i trasporti un elemento cruciale da considerare nell'analisi del ciclo di vita del prodotto. La sintesi grafica dell'inventario del ciclo di vita (LCI) del banco standard monoposto è riportata in Figura 59.

7.3. Risultati e opzioni di miglioramento ambientale

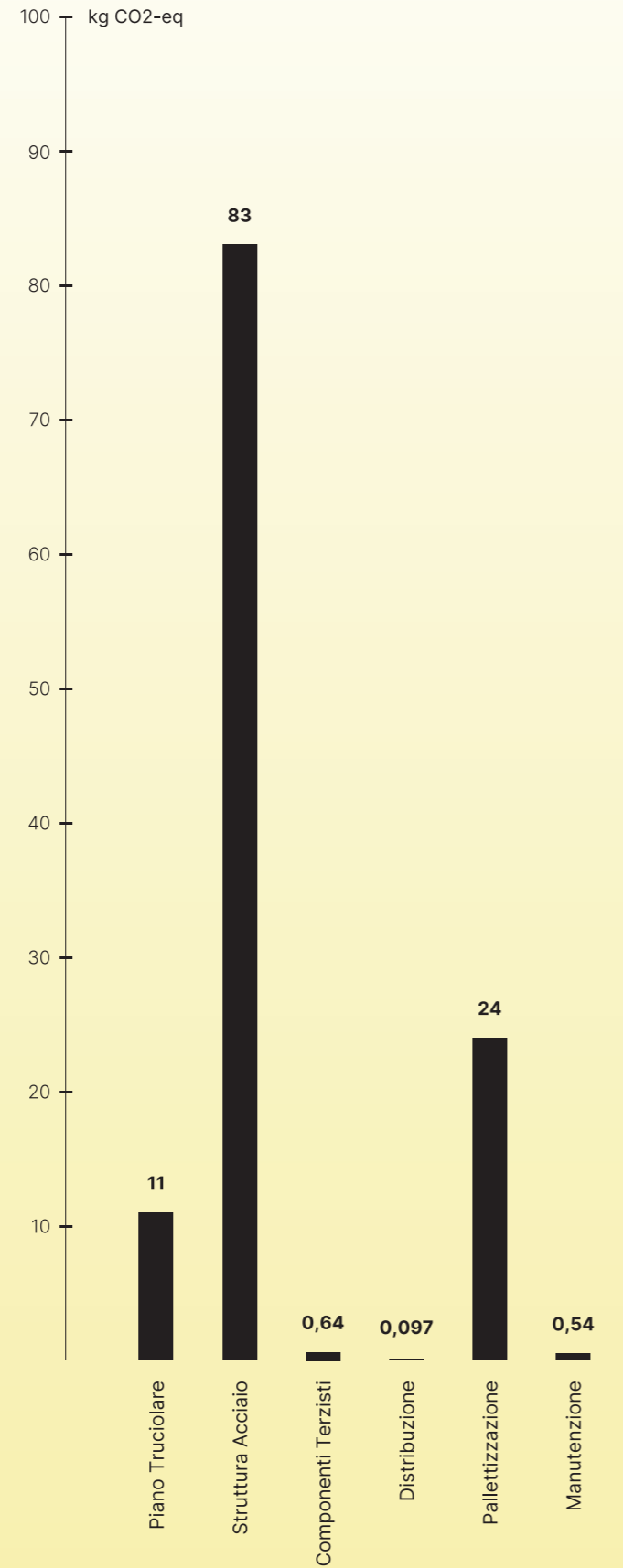
Dall'analisi del ciclo di vita (LCA) del banco standard emerge chiaramente che la fase di produzione rappresenta il contributo più significativo in termini di emissioni (Fig. 60a), con un totale di 118 kg CO₂-eq, ponendosi come elemento prioritario su cui intervenire per ridurre l'impatto ambientale complessivo. All'interno di questa fase, la struttura in acciaio risulta il principale responsabile (Fig. 60b), generando 83 kg CO₂-eq, ovvero circa il 70% delle emissioni totali. Questo dato sottolinea la necessità di ottimizzare il design strutturale, sia riducendo la quantità di materiale utilizzato, sia esplorando alternative meno impattanti. Il piano in truciolare, pur contribuendo in misura minore, con 11 kg CO₂-eq, richiede comunque una revisione, che potrebbe prevedere l'adozione di materiali più sostenibili, l'eliminazione delle resine melamminiche o un design monomaterico capace di ridurre la complessità del processo produttivo. L'analisi del ciclo di vita (LCA) del banco monoposto standard evidenzia diversi aspetti critici da affrontare per migliorare la sostenibilità ambientale del prodotto. I risultati mostrano che il piano in truciolare e la struttura in acciaio sono i principali responsabili dell'impatto ambientale complessivo. Il piano in truciolare, con una quota significativa di materiale destinato alla discarica (38,4%) e una modesta frazione avviata al riciclo (63,1%), rappresenta una porzione rilevante dell'impatto totale. Questo materiale contribuisce per 5,6 punti, derivati principalmente dalla produzione e dall'utilizzo di risorse come il legno e la carta kraft, che aumentano i carichi ambientali associati. La struttura in acciaio, con un peso di 7,32 kg e un impatto complessivo di 77 punti, è un ulteriore elemento critico. Questo valore deriva dall'intensa lavorazione del materiale, che include laminazione, perforazioni e saldature, nonché dall'energia necessaria per il trattamento dell'acciaio (Fig. 61). Inoltre, il trasporto delle componenti, calcolato in 4,84 tkm per il telaio e in valori minori per altri elementi, contribuisce ulteriormente agli impatti associati. Anche i piedini in gomma EPDM, sebbene di dimensioni contenute, mostrano un impatto rilevante, attribuibile sia alla produzione del materiale che al processo di stampaggio a iniezione. La pallettizzazione rappresenta un ulteriore fattore significativo, con un'incidenza di 24 punti dovuta principalmente all'impiego di film in LDPE e di legno lavorato per la produzione dei pallet. A fronte dei risultati emersi, l'analisi del ciclo di vita del banco monoposto ha evidenziato come le principali

Chart banco monoposto standard
Life cycle: BANCO 119 kg CO2-eq
 Method: IPCC 2007, 100 yr



a)

Chart banco monoposto standard
Production: BANCO 118 kg CO2-eq
 Method: IPCC 2007, 100 yr



b)

#: One or more disposal indicator values are unknown.

Fig. 60: a) Diagramma di flusso Life Cycle banco standard monoposto; b) produzione banco standard monoposto.

criticità ambientali siano concentrate nella fase di produzione, attribuibili soprattutto alla struttura in acciaio e al piano in truciolare. La struttura, che genera l'impatto maggiore, è caratterizzata da un consumo elevato di acciaio grezzo e dalle lavorazioni per la produzione di semilavorati tubolari e profilati. In questa prospettiva, la riprogettazione del banco monoposto dovrebbe essere orientata prioritariamente alla riduzione del materiale impiegato, obiettivo che potrebbe essere raggiunto mediante l'ottimizzazione delle geometrie strutturali, e ad un approvvigionamento più sostenibile – incentivando l'uso di acciaio con un maggiore indice di riciclabilità. Inoltre, sarebbe opportuno prevedere l'integrazione di sistemi di connessione modulari che, a differenza della struttura attuale del telaio, interamente saldata e monoblocco, consentano di facilitare sia le operazioni di riparazione sia quelle di aggiornamento funzionale. In particolare, l'introduzione di connessioni reversibili per le gambe, in sostituzione delle saldature permanenti attualmente impiegate, non solo potrebbe prolungare significativamente il ciclo di vita del banco monoposto, ma permetterebbe anche di abilitare servizi di recupero e rifabbricazione. In tale contesto, i componenti provenienti da banchi dismessi potrebbero essere sottoposti a processi di valutazione, rigenerazione e successiva reimmissione sul mercato, contribuendo così alla promozione di un modello produttivo maggiormente sostenibile e basato sui principi dell'economia circolare.

Per quanto riguarda il piano del banco monoposto, realizzato in truciolare e responsabile di una quota significativa dell'impatto ambientale complessivo, una soluzione più sostenibile potrebbe consistere nell'utilizzo di materiali alternativi, quali pannelli monomateriali o in fibre naturali certificati FSC. Un ulteriore miglioramento potrebbe derivare dalla progettazione di un rivestimento facilmente disassemblabile, che consentirebbe di prolungare la vita utile del piano. Anche i materiali attualmente utilizzati, come la resina melamminica e la colla, che contribuiscono in parte all'impatto ambientale, potrebbero essere sostituiti con alternative maggiormente sostenibili e poco nocive, laddove tecnicamente possibile, eliminate grazie all'impiego di soluzioni progettuali innovative, che rispetterebbero i requisiti ambientali citati all'interno dei CAM. La fase di distribuzione, influenzata significativamente dall'imballaggio e dal trasporto, potrebbe essere migliorata ottimizzando le

Chart banco monoposto standard**Production: STRUTTURA ACCIAIO** 83 kg CO2-eq

Method: IPCC 2007, 100 yr

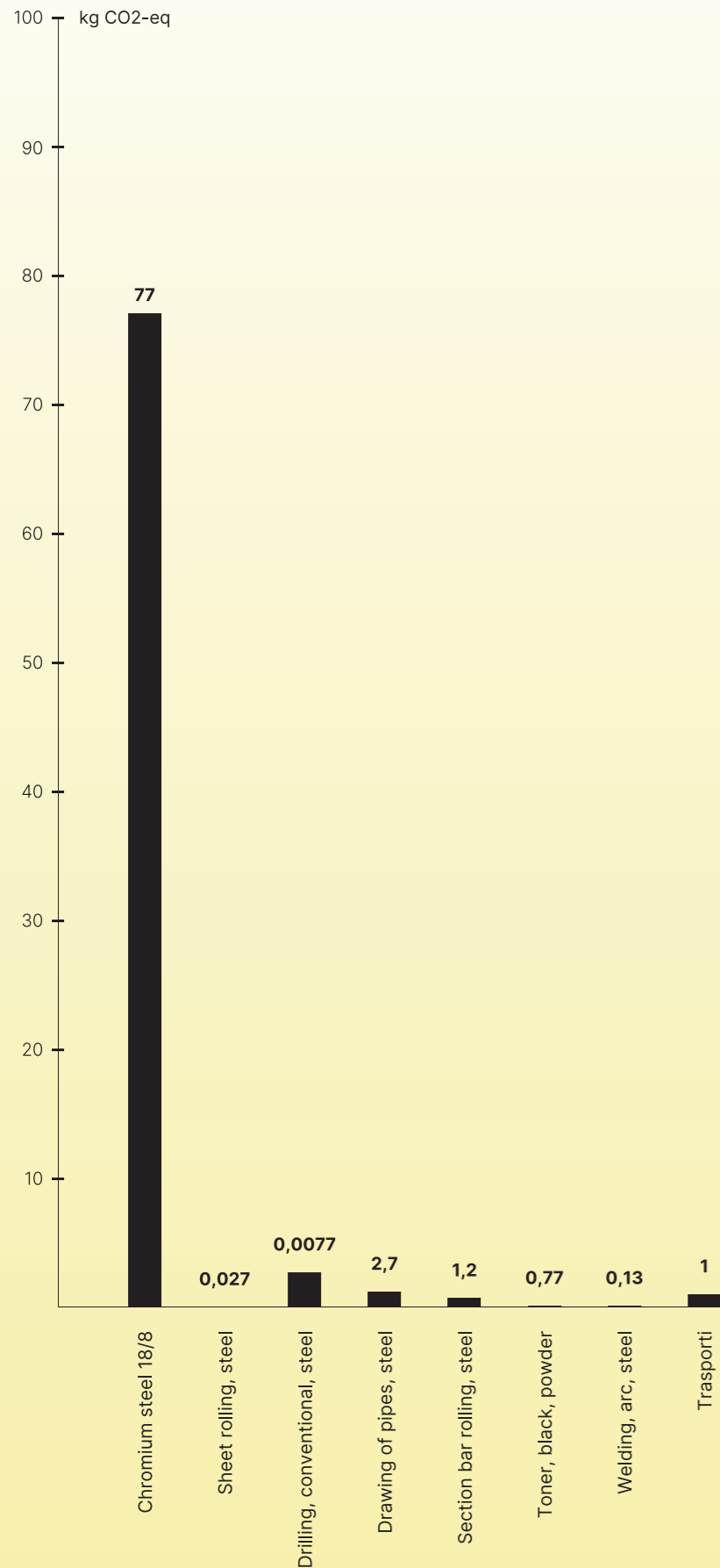


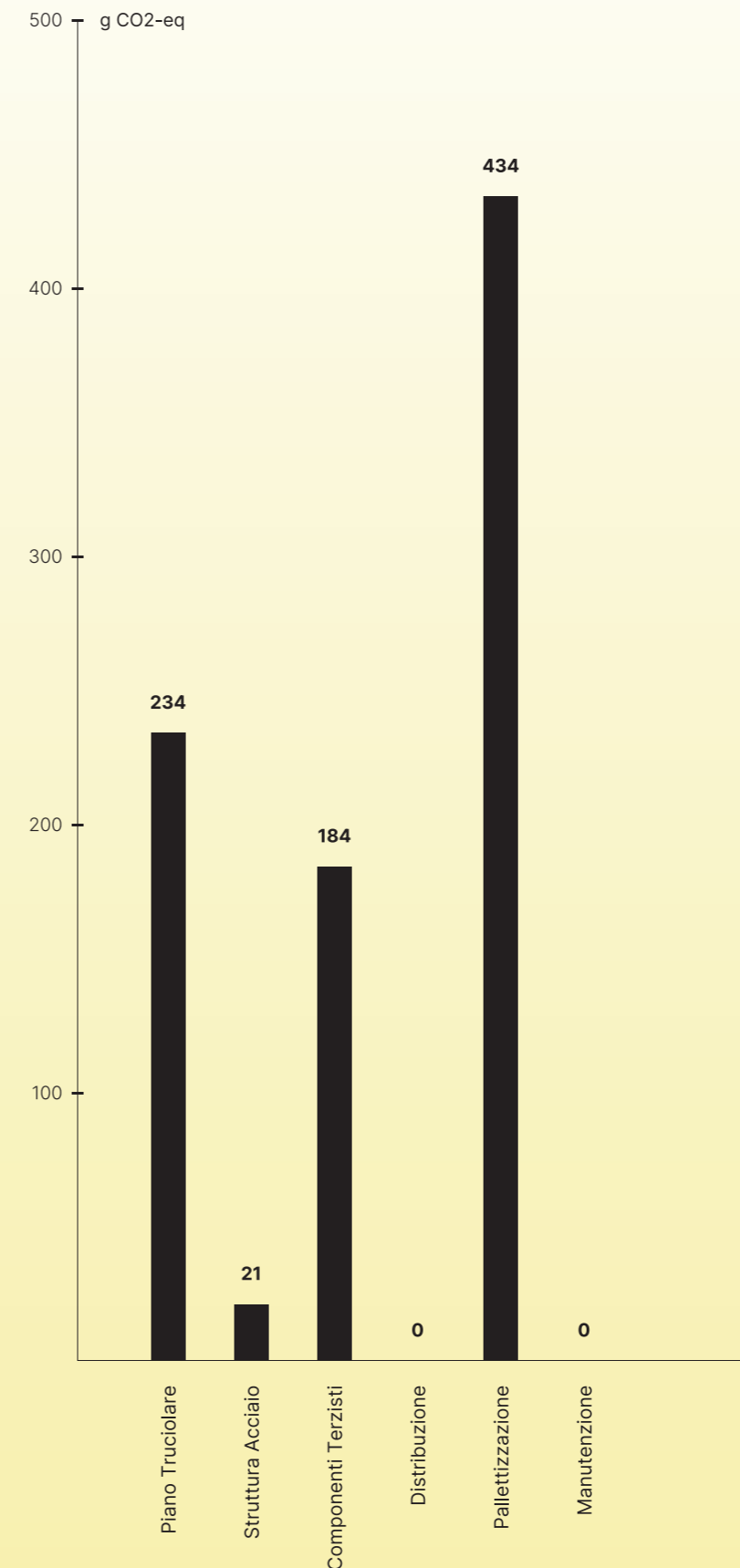
Fig. 61: Diagramma di flusso produzione struttura acciaio banco standard monoposto.

dimensioni e il peso del banco per favorire il riutilizzo dei pallet e ridurre il consumo di materiali come il film LDPE. Inoltre, riducendo gli ingombri complessivi, si potrebbero aumentare le unità trasportabili per pallet, migliorando l'efficienza logistica. La dismissione del banco trarrebbe beneficio dall'applicazione di tutte le strategie citate, grazie all'adozione del "design for disassembly", che renderebbe agevole lo smontaggio del prodotto e la separazione delle sue parti. Questo approccio, unito all'uso di connessioni reversibili e alla riduzione al minimo del numero di viti, faciliterebbe il riciclo e ridurrebbe il numero di componenti destinati alla discarica, promuovendo un modello di economia circolare (Fig. 62). Ciò significa che una riprogettazione in chiave sostenibile deve tenere conto che le strategie da applicare devono apportare miglioramenti in questa fase. Spacchettando la fase di produzione abbiamo come la struttura sia l'elemento che genera il maggiore impatto su tutto il banco. All'interno della struttura il contributo maggiore è dato dall'acciaio grezzo e dalla produzione dei semilavorati tubolari e profilati. Ciò indica come la riprogettazione del banco dovrebbe razionalizzare l'uso materico soprattutto in questa fase, trovando geometrie che a parità di funzione possano fare meno uso di materiale o puntare ad una sostituzione materica. Altra possibile strategia è quella di prevedere un sistema di recupero e rifabbricazione, quindi progettare parti del banco o della struttura in modo tale che possano far fronte a questa estensione del ciclo di vita. Un'estensione del ciclo di vita del genere richiederebbe la creazione di un servizio, questa nuova modalità permetterebbe di evitare di creare nuovi prodotti, valorizzando parti di vecchi banchi mediante passaggi industriali a poco impatto per verificarne il buono stato dei pezzi e avviare la rifabbricazione del banco. La creazione del servizio inoltre richiederebbe una nuova analisi di questo servizio per valutare l'effettivo beneficio apportato al ciclo di vita del banco. Per quanto riguarda la verniciatura non genera un impatto significativo ma è comunque bene tenerlo presente e in fase di progettazione scegliere tipologie di vernici più sicure e meno impattanti, se il suo utilizzo è necessario. Oltre alla struttura un grande impatto lo abbiamo dal piano che vede il maggior contributo dato dal pannello truciolare seguita dalla resina melamminica e, infine, dalla colla. In questo caso un possibile miglioramento sarebbe quello di sostituire la resina melamminica con un'alternativa meno impattante laddove

Disposal	Municipal	Household	Recycling	Incineration	Landfill	Impact
Product	0%	0%*	0%*	0%*	0%*	0,87
BANCO	0%	0%*	0%*	0%*	0%*	0,87
PIANO TRUCIOLARE	0%	0%*	63,1%	2,1%*	38,4%*	0,23
Particle board, outdoor use	0%	0%	63,1%	2,1%	38,4%	0,00041
Kraft paper, unbleached	0%	0%	63,1%	2,1%	38,4%	0,22
Formic acid from methyl formate	0%	*	63,1%	*	*	0
Sawn timber, hardwood	0%	0%	63,1%	2,1%	38,4%	1,1E-5
PU, flexible foam	0%	*	63,1%	2,1%	38,4%	0,017
TRASPORTI	0%	0%	63,1%	2,1%	38,4%	0
piano truciolare	0%	0%	63,1%	2,1%	38,4%	0
nobilizzazione	0%	0%	63,1%	2,1%	38,4%	0
colla	0%	0%	63,1%	2,1%	38,4%	0
STRUTTURA ACCIAIO	0%	0%*	82,2%	0%	17,8%	0,021
Chromium steel 18/8	0%	*	82,2%	0%	17,8%	0,018
Toner, black, powder	0%	*	82,2%	0%	17,8%	0,0023
TRASPORTI	0%	0%	82,2%	0%	17,8%	0
trasporto telaio	0%	0%	82,2%	0%	17,8%	0
trasporto vernice	0%	0%	82,2%	0%	17,8%	0
COMPONENTI TERZISTI	0%	0%*	0%	0%	0%	0,18
VITERIA	0%	0%*	82,2%	0%	17,8%	2,2E-5
Steel, electric, un- and low-alloyed	0%	*	82,2%	0%	17,8%	2,2E-5
PIEDINI GOMMATI	0%	0%*	45,5%	44%	10,1%	0,018
EPDM rubber	0%	*	45,5%	44%	10,1%	0,018
TRASPORTI	0%	0%	45,5%	44%	10,1%	0
DISTRIBUZIONE	0%	0%	0%	0%	0%	0
PALLETTIZZAZIONE	0%	0%*	0%	0%	0%	0,43
pallet	0%	0%*	63,1%	2,1%	38,4%	0,0061
Sawn timber, hardwood	0%	0%	63,1%	2,1%	38,4%	0,0014
Particle board, outdoor use	0%	0%	63,1%	2,1%	38,4%	0,00064
Chromium steel 18/8	0%	*	63,1%	2,1%	38,4%	0,004
wrap	0%	0%	45,5%	44%	10,5%	0,43
Packaging film, LDPE	0%	*	45,5%	44%	10,5%	0,43
MANUTENZIONE	0%	0%*	0%*	0%*	0%*	0
Silicone product	0%	*	0%	0%	0%	0
Water deionised	0%	*	*	*	*	0

*: One or more disposal indicator values are unknown.

Chart banco monoposto standard
Disposal: BANCO 0,87 kg CO2-eq
Method: IPCC 2007, 100 yr.



*: One or more disposal indicator values are unknown.

244

Fig. 62. (sopra) Disposal banco standard monoposto. (a destra) Diagramma banco standard monoposto.

ce ne fosse, oppure di riprogettare il piano monomaterico che eviterebbe l'uso della resina e della colla. Tuttavia è altresì possibile ripensare la nobilitazione come un qualcosa di reversibile, per farlo si deve ripensare il piano in chiave modulare e progettare il rivestimento come qualcosa che possa essere sostituito all'esigenza senza grossi investimenti in termini di infrastrutture. Questo favorirebbe l'estensione della vita utile del prodotto anche in un'ottica di rifabbricazione. Anche questa strategia può essere integrata al servizio. Il pallet e il wrap sono elementi esterni ma per andare a migliorare le performance di questa voce bisognerebbe ottimizzare la quantità di banchi che può ospitare un pallet e favorire il riutilizzo dello stesso. Progettare dei banchi con ingombri ridotti andrebbe a migliorare anche la fase di distribuzione del banco finito. Per la fase di manutenzione, l'unica accortezza possibile è quella di creare superfici che agevolino la pulizia richiedendo meno quantità di prodotto per il mantenimento. La fase della dismissione otterrebbe di riflesso benefici dalle precedenti strategie e dal servizio ipotiz-

Capitolo 8

Riprogettazione di un banco-scuola circolare

8.1 Progettazione del prodotto in chiave circolare: banco KJ01

8.1.1. Sistema di connessione reversibile per il piano e i piedi antiscivolo

8.1.2. Telaio disassemblabile e aggiornabile in base alle classi dimensionali

8.1.3. Flessibilità e diversificazione delle configurazioni dei banchi scuola

8.2 Valutazione dei benefici ambientali: LCA per il prodotto-servizio del banco KJ01

8.2.1. Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema

8.2.2. Fase Life Cycle Inventory (LCI)

8.2.3. Interpretazione dei risultati

8.3 Analisi ambientale comparata: i benefici della riprogettazione circolare

8.3.1. Confronto tra i risultati oggettivi dell'analisi del ciclo di vita (LCA)

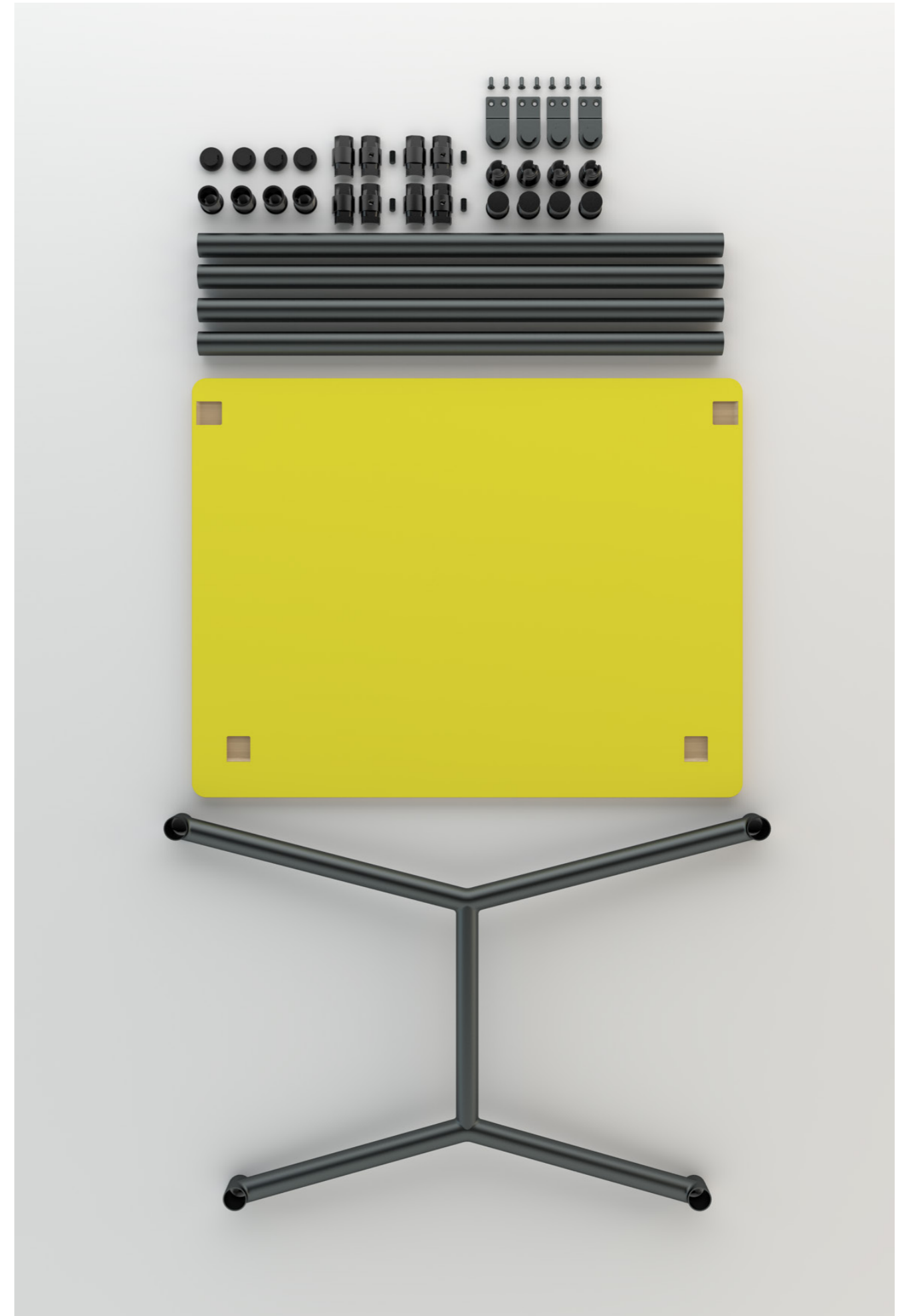
8.3.2. I benefici di carattere qualitativo del banco KJ01

Nel contesto della progettazione di un banco scolastico monoposto in chiave circolare, la scelta progettuale è stata orientata verso lo sviluppo di un sistema prodotto-servizio in grado di rispettare i principi dell'economia circolare, rispondendo a esigenze di sostenibilità, durabilità e adattabilità. Questa impostazione nasce dall'obiettivo di creare un prodotto non solo funzionale, ma anche capace di integrarsi in un modello circolare, in cui il ciclo di vita del banco non termina con il suo disuso, ma viene prolungato attraverso strategie di riparazione, ripristino, aggiornamento e rifabbricazione. A tal fine, si è fatto ricorso a metodologie progettuali che includono il Design for X (DfX) e il Design for Modularity, strumenti fondamentali per facilitare sia le operazioni di disassemblaggio che quelle di manutenzione, consentendo di intervenire in modo mirato sulle componenti soggette a maggiore usura. Il banco è stato progettato con un'architettura modulare in grado di soddisfare requisiti specifici, tenendo conto delle parti che, più di altre, sono frequentemente soggette a deterioramento, come il piano di lavoro, i piedini antiscivolo e la struttura portante in acciaio (Figg. 63-64). Attualmente quest'ultima risulta saldata in modo permanente, rendendo impossibili interventi di riparazione o sostituzione di singoli elementi; per ovviare a tale limite, sarà ripensata per consentire il ripristino delle parti ancora funzionali, evitando di dover produrre interamente nuovi elementi. Si è deciso di implementare un design che consenta un assemblaggio reversibile che permetta – attraverso un sistema di connessione progettato ad hoc – la sostituzione delle gambe (Fig. 65). In questa configurazione, le componenti critiche, come il piano, saranno facilmente sostituibili in caso di danni o di un eventuale aggiornamento tipologico – come il passaggio da una configurazione rettangolare, trapezoidale o circolare – mentre i piedini, progettati con materiali resistenti, potranno essere sostituiti con semplicità, attraverso un sistema ad innesto e bloccaggio a baionetta, per garantire stabilità e sicurezza nel tempo. Queste scelte progettuali si collegano direttamente alla finalità di migliorare la vita utile del prodotto, riducendo la necessità di nuove produzioni e minimizzando al contempo l'impatto ambientale. Inoltre, il sistema prodotto-servizio è stato pensato per rispondere alle esigenze della pubblica amministrazione, che necessita di soluzioni flessibili, aggiornabili e prive di difficoltà legate alla gestione e allo smaltimento di materiali obsoleti. Attraverso un approccio circola-

Nell'ottavo capitolo si descrive il processo di progettazione del prodotto in chiave circolare e si valutano i benefici ambientali derivanti da tale approccio. Viene condotta un'analisi ambientale comparata per dimostrare i vantaggi di una progettazione circolare. Inoltre, si descrivono la metodologia e gli strumenti utilizzati per lo sviluppo progettuale del prodotto, evidenziando le fasi e le tecniche applicate.



re, si elimina il problema dei banchi inutilizzabili, garantendo invece la possibilità di ritirare i prodotti a fine ciclo, rigenerarli e redistribuirli in nuove scuole o istituti, assicurando così una continuità di servizio efficiente e sostenibile. Per le aziende coinvolte, questo modello offre l'opportunità di trasformare il proprio approccio produttivo, spostando il focus dalla mera produzione all'erogazione di servizi basati sulla rigenerazione e sull'ottimizzazione delle risorse. L'adozione di centri specializzati per la manutenzione e il ripristino consentirà di recuperare componenti ancora utilizzabili, limitando la produzione ex novo a quelle parti che necessitano di essere sostituite. Questo non solo garantisce una significativa riduzione degli sprechi, ma consente anche un notevole risparmio economico, migliorando al contempo l'efficienza e la sostenibilità del ciclo produttivo. La progettazione del banco scolastico monoposto in chiave circolare non rappresenta solo una scelta tecnica, ma un vero e proprio paradigma di innovazione sostenibile, che integra esigenze di design, funzionalità e responsabilità ambientale, offrendo una soluzione capace di generare valore sia per gli utenti finali che per il sistema produttivo nel suo complesso.



Figg. 63-64: esploso sistema banco KJ01 e banco disassemblato in tutte le sue componenti.

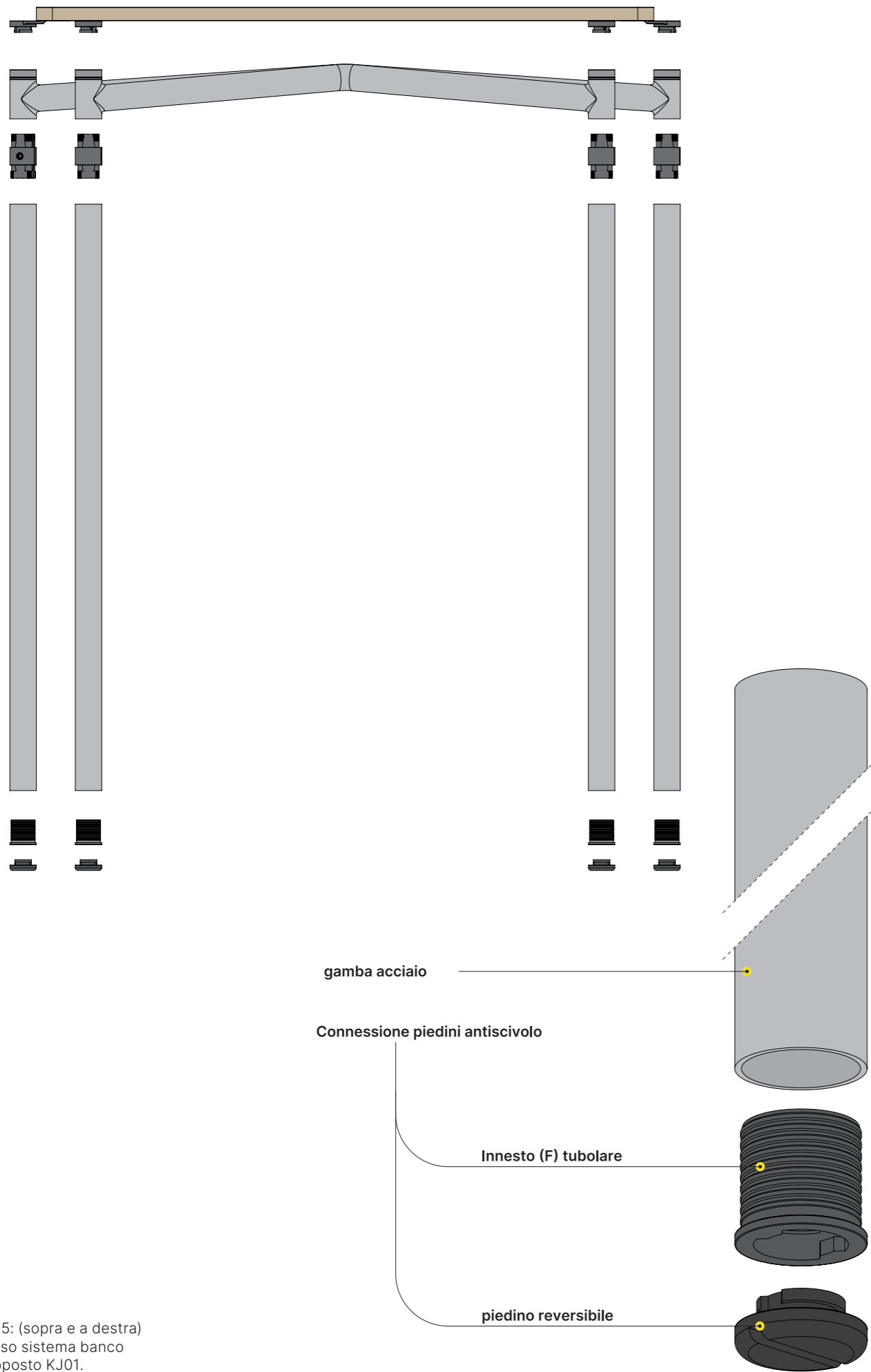
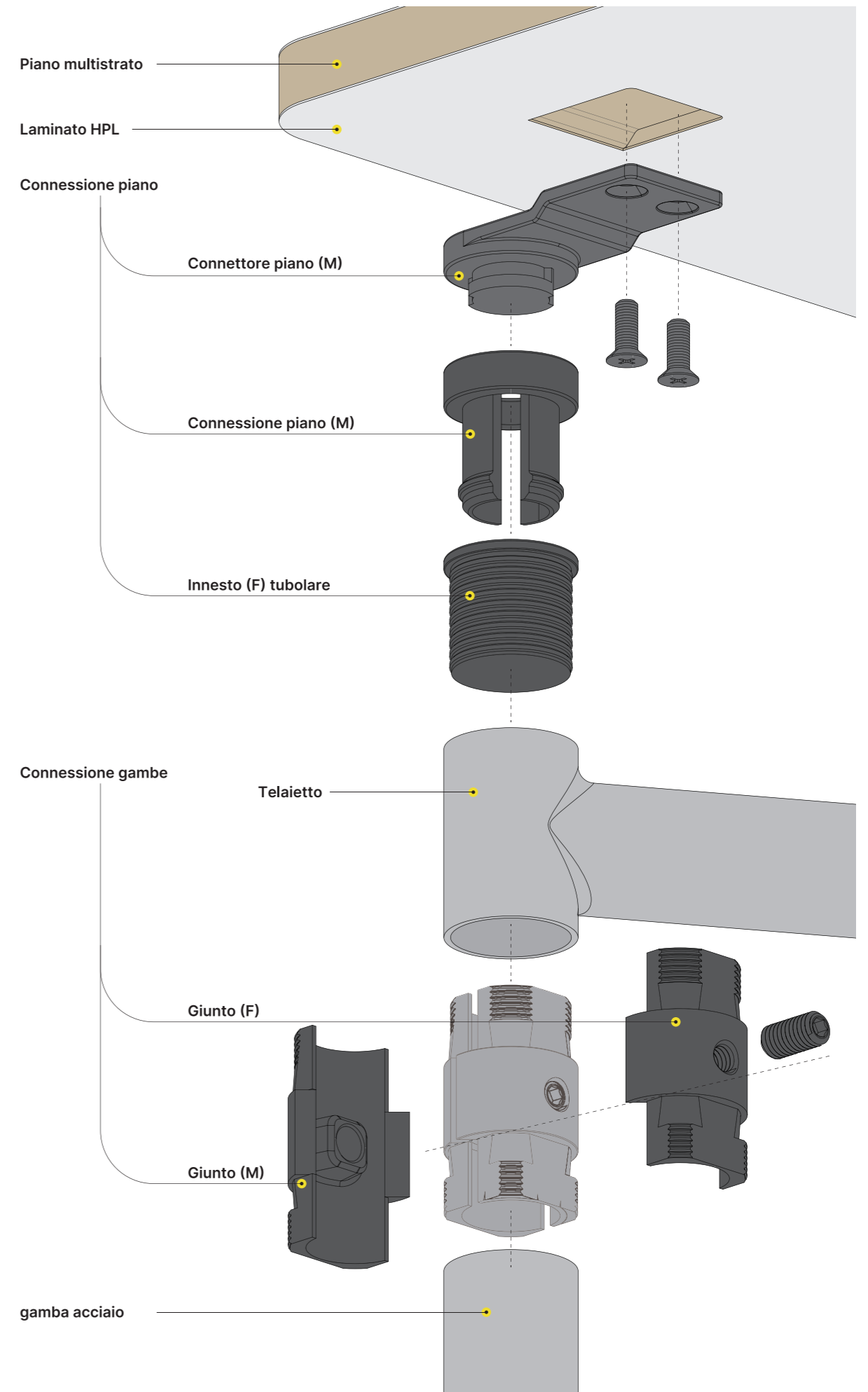


Fig. 65: (sopra e a destra) esploso sistema banco monoposto KJ01.



8.1.1. Sistema di connessione reversibile per il piano e i piedi antiscivolo

Uno degli aspetti più innovativi del banco KJ01 è rappresentato dal sistema di connessione reversibile, progettato per consentire la sostituzione rapida e sicura del piano di lavoro senza l'ausilio di utensili, né manuali né elettrici. Tale sistema si articola in una serie di componenti interconnessi, ciascuno con una specifica funzione, che nel loro insieme garantiscono stabilità, modularità e un elevato grado di efficienza nell'operazione di montaggio e smontaggio. Elemento cardine di questo sistema è il "connettore piano (M)", la cui architettura è costituita da una piastra metallica dotata di un elemento a baionetta maschio.

Tale componente, una volta fissato al piano mediante due viti, è progettato per innestarsi in una struttura di connessione denominata "connessione (M)", realizzata in Nylon 66, un materiale plastico caratterizzato da un'elevata resistenza meccanica e durabilità nel tempo. Questa connessione viene successivamente alloggiata nella componente chiamata "innesto (F) tubolare", la quale, a sua volta, si incassa all'interno del "telaietto", ovvero la struttura portante in acciaio del banco (Fig. 66).

Il funzionamento di questo sistema si basa su un meccanismo di rotazione controllata: una volta che il piano di lavoro, con i suoi quattro connettori fissati nei punti di ancoraggio predisposti, viene incassato nella struttura di supporto, la componente "connessione (M)" consente, tramite una rotazione di 45 gradi, di bloccare il piano nella posizione desiderata (Fig. 67).

Questo meccanismo, concepito per garantire un'installazione rapida e intuitiva, permette all'operatore di rimuovere e sostituire il piano in modo semplice e veloce, senza la necessità di ricorrere a strumenti aggiuntivi. Affinché il sistema risulti sicuro e impedisca il rilascio accidentale del piano, è stato previsto un meccanismo di bloccaggio, come ad esempio un grano di sicurezza, che può essere azionato esclusivamente dall'operatore.

Questa soluzione tecnica assicura che l'utente finale non possa sganciare il piano involontariamente o intenzionalmente, garantendo così la stabilità strutturale del banco e la protezione degli studenti che lo utilizzano. L'adozione di un sistema di connessione reversibile non solo contribuisce alla sostenibilità del prodotto, consentendo la sostituzione di parti specifiche senza dover intervenire sull'intero banco, ma introduce anche una maggiore flessibilità nell'uso e nella manutenzione dell'arredo scolastico. In questo



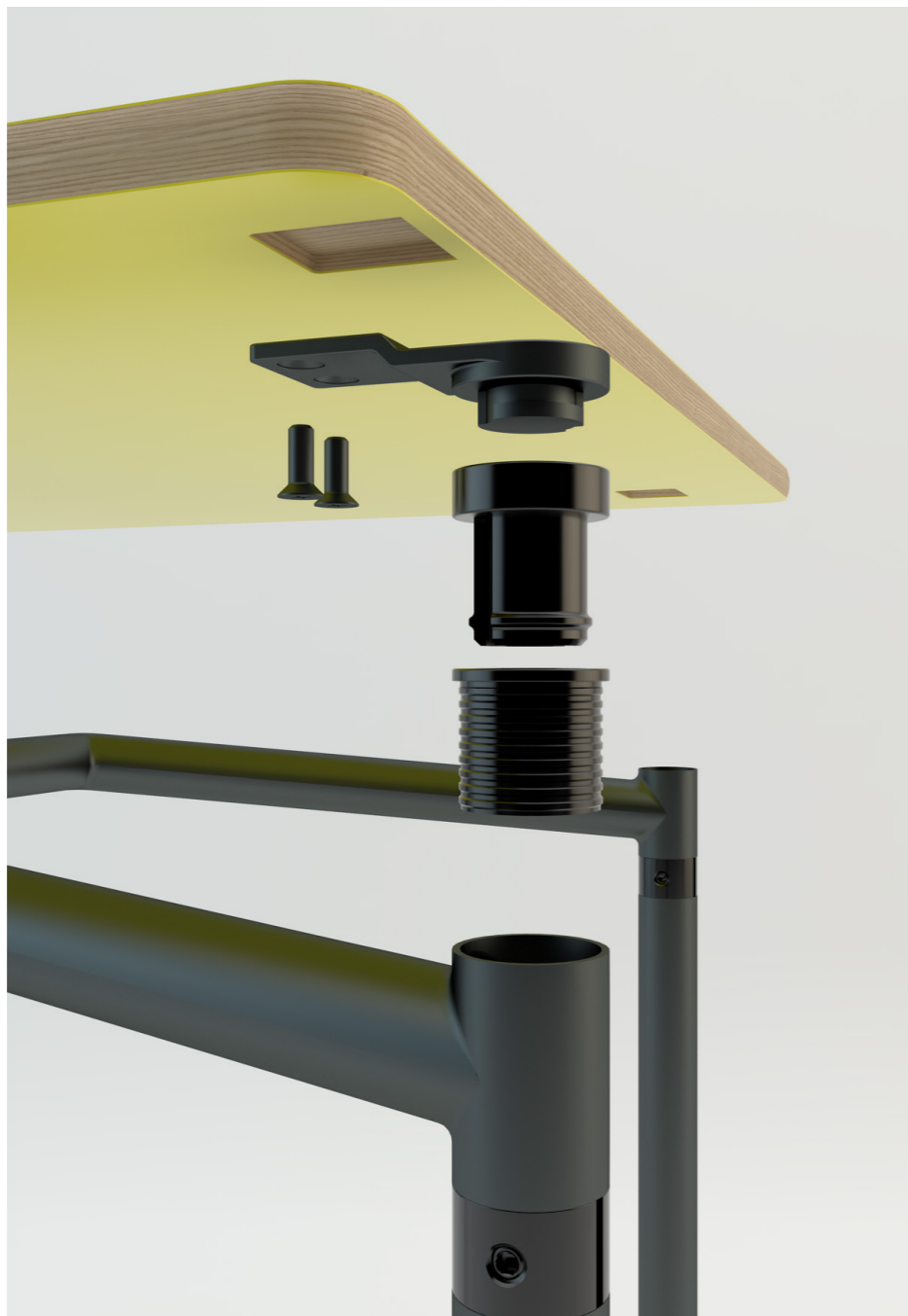


Fig. 66: esploso sistema connessione banco KJ01

modo, il banco KJ01 si configura come una soluzione innovativa, orientata alla durabilità e alla riduzione degli sprechi, grazie alla possibilità di aggiornare o riparare il piano di lavoro senza inutili costi di smaltimento e riciclo. Oltre al sistema di connessione reversibile del piano di lavoro, il banco KJ01 è dotato di un innovativo sistema di installazione e sostituzione dei piedi antiscivolo, progettato per garantire la massima stabilità e sicurezza durante l'uso prolungato del prodotto (Fig. 68). Tale sistema, sviluppato per semplificare le operazioni di montaggio e manutenzione, sfrutta la stessa componente impiegata per la connessione del piano, ovvero l'"innesto (F) tubolare", che gioca un ruolo cruciale nel fissaggio del piedino antiscivolo alla struttura del banco. L'innesto (F) tubolare, realizzato in Nylon 66, è progettato per inserirsi a pressione all'interno del tubolare della gamba del banco, garantendo un accoppiamento stabile e sicuro senza necessità di viti o collanti. Grazie

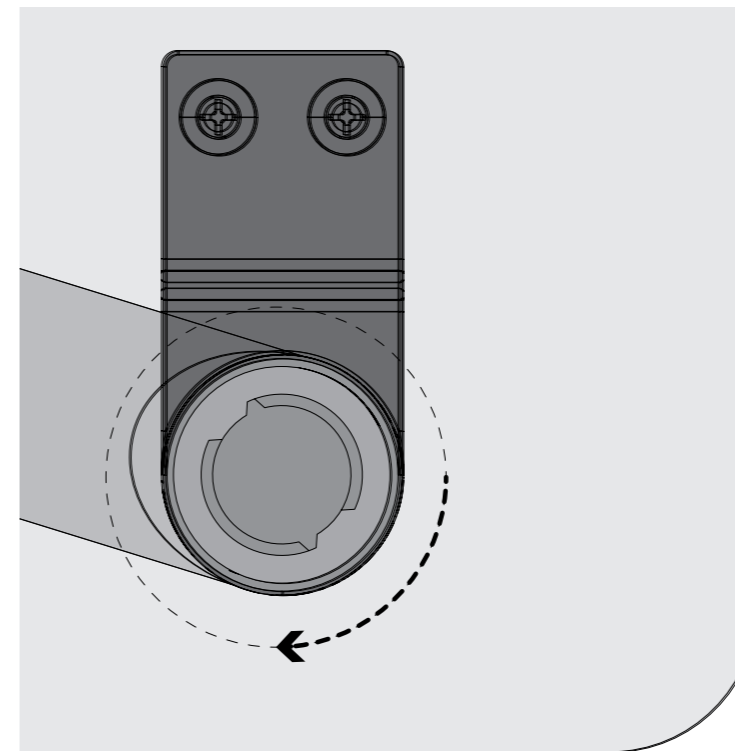


Fig. 67: Sistema a baionetta per la connessione del piano al telaio del banco KJ01.



Fig. 68: esploso sistema connessione piedino antiscivolo banco KJ01.

a questa soluzione, l'elemento di connessione non solo assicura un'ottima tenuta meccanica, ma permette anche una rapida sostituzione del piedino antiscivolo qualora dovesse deteriorarsi a causa dell'usura nel tempo. Il piedino antiscivolo, realizzato in copolimero ABS, è caratterizzato da una struttura che incorpora un innesto maschio a baionetta, il quale, una volta inserito nell'innesto (F) tubolare, può essere fissato in modo definitivo mediante una semplice rotazione. L'architettura del piedino è inoltre dotata di un taglio sulla sommità, progettato per facilitare l'aggancio all'interno della componente in ABS, assicurando così un montaggio intuitivo e privo di attrezzi specializzati. Grazie a questa configurazione, il piedino può essere facilmente sostituito in caso di danneggiamento, senza dover intervenire sull'intera gamba del banco. Questa soluzione non solo prolunga la vita utile del prodotto, ma contribuisce anche a una maggiore sostenibilità, riducendo la necessità di smaltire componenti ancora funzionali e minimizzando l'impatto ambientale legato alla produzione di nuovi elementi. Infine, il sistema di installazione e sostituzione dei piedi antiscivolo svolge un ruolo essenziale nella sicurezza dell'arredo scolastico. La presenza di piedini in ABS, oltre a garantire un'elevata resistenza all'attrito e alla deformazione, previene il rischio di scivolamento del banco su superfici lisce, aumentando la stabilità complessiva e contribuendo a migliorare l'ergonomia dello spazio di apprendimento. In questo modo, il banco KJ01 si distingue non solo per la sua modularità e facilità di manutenzione, ma anche per la sua attenzione agli aspet-

8.1.2. Telaio disassemblabile e aggiornabile in base alle classi dimensionali

Il banco KJ01 è stato progettato seguendo una logica di modularità avanzata, affinché non solo fosse possibile separare le diverse componenti e configurarle secondo le esigenze specifiche, ma anche per adottare un approccio innovativo al concetto di prodotto-servizio, capace di rispondere a una pluralità di necessità. Grazie a questa impostazione, è possibile sostituire in maniera mirata esclusivamente le parti danneggiate, oltre a consentire il ripristino del banco sia in loco che presso strutture specializzate nello stoccaggio e nella rigenerazione. Questo sistema, che riduce sensibilmente gli sprechi, contribuisce anche ad aumentare la durata complessiva del prodotto. Per garantire una struttura completamente disassemblabile, si è scelto di adottare un sistema di connessione innovativo, il quale è stato sviluppato dopo un'approfondita analisi brevettuale delle possibili soluzioni esistenti. Tale scelta ha portato alla progettazione di un componente denominato "connessione gambe", costituito da due elementi simmetrici che, una volta inseriti rispettivamente nel tubolare della gamba e in quello del telaio, vengono fissati tramite l'azione di un grano filettato (Fig. 69). Quest'ultimo, esercitando una spinta inversa, induce le due metà della connessione a premere sulle pareti interne del tubolare, generando così un effetto di bloccaggio in grado di conferire alla struttura una stabilità paragonabile a quella di un telaio interamente saldato. Oltre a garantire robustezza e resistenza meccanica, questa soluzione permette di disassemblare e sostituire le gambe con estrema facilità, agevolando le operazioni di manutenzione e aggiornamento. Un ulteriore vantaggio derivante dalla natura disassemblabile del telaio riguarda la possibilità di regolare l'altezza del banco in base alle diverse classi dimensionali previste dalle normative vigenti. In particolare, il sistema consente di configurare il banco in conformità alle classi 3, 4, 5 e 6, che corrispondono rispettivamente agli arredi destinati agli studenti della scuola primaria, della scuola secondaria di primo grado e della scuola secondaria di secondo grado. Grazie alla possibilità di intercambiare rapidamente le gambe, il banco può essere adattato alle esigenze ergonomiche degli studenti senza dover necessariamente produrre nuove unità, favorendo così un utilizzo più efficiente delle risorse disponibili e riducendo gli sprechi. Oltre agli evidenti benefici in termini di manutenzione e flessibilità, il design disassemblabile del banco KJ01 introduce vantaggi significativi anche sotto il

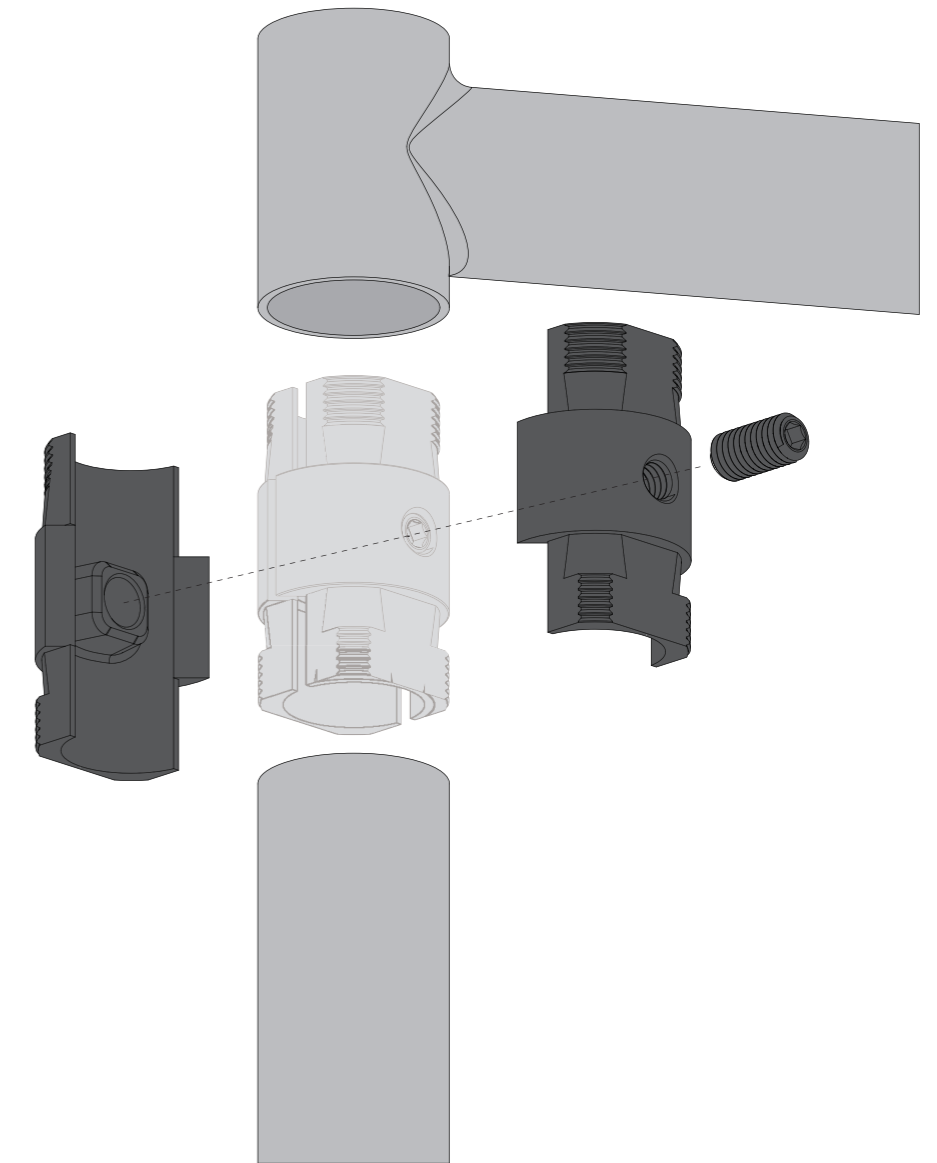
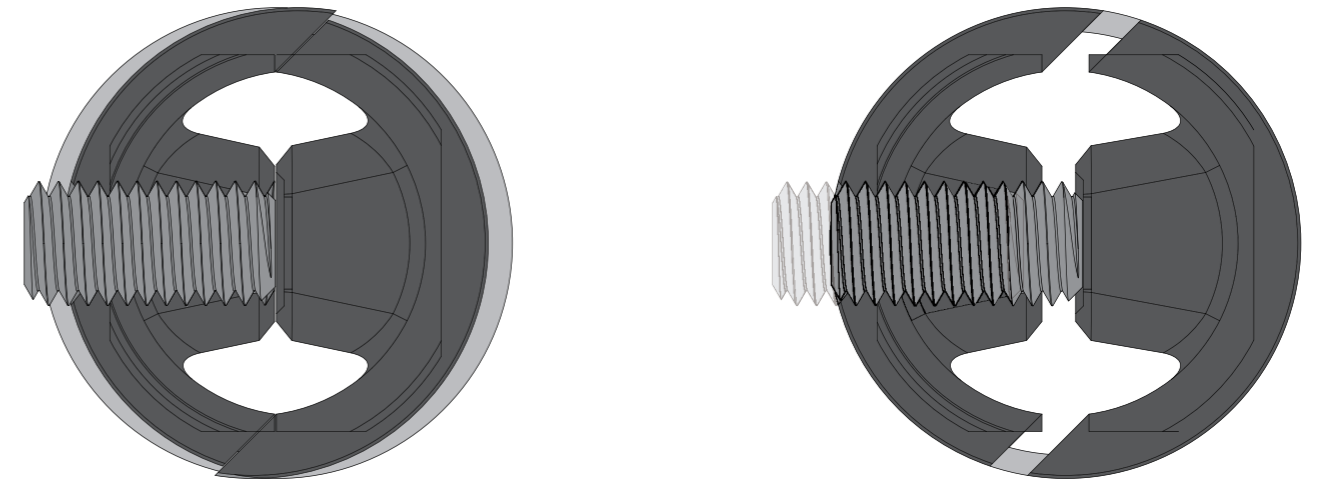
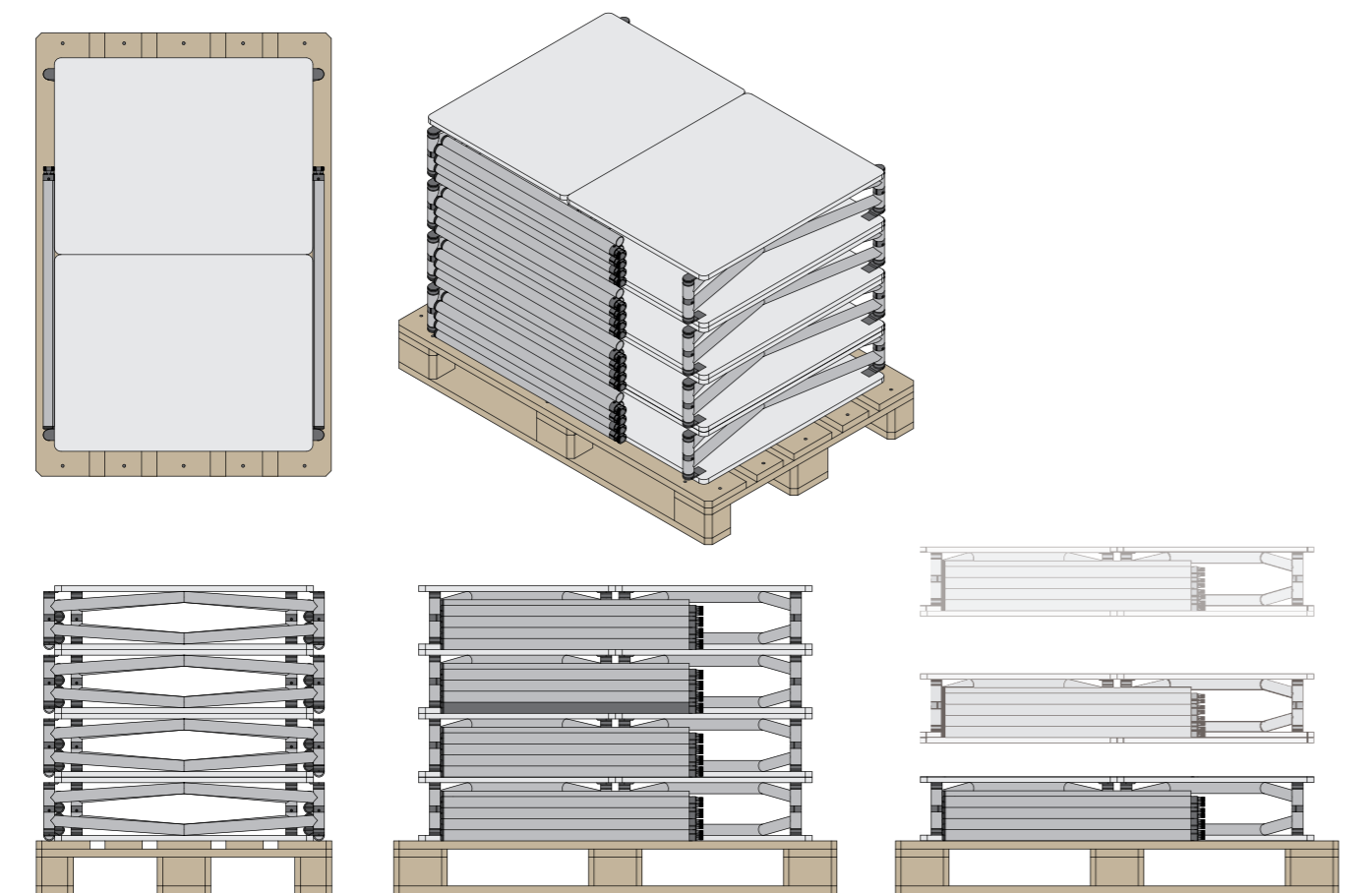


Fig. 69: esploso sistema connessione gambe banco KJ01



profilo logistico e ambientale, consentendo una notevole ottimizzazione del trasporto. Infatti, durante le operazioni di spedizione dalla produzione ai centri di distribuzione, i banchi possono essere parzialmente assemblati e trasportati su europallet di dimensioni 800x1200 mm, riducendo drasticamente il volume occupato rispetto ai modelli tradizionali (Fig. 70). Per rendere il trasporto ancora più efficiente, il telaio viene già unito al piano multistrato, mentre le gambe vengono impilate separatamente, permettendo così di accoppiare due banchi per pallet in maniera ottimizzata. L'efficacia di questa soluzione risulta evidente se confrontata con il sistema tradizionale, secondo cui un pallet standard può ospitare al massimo 12 banchi monoposto assemblati, mentre il sistema modulare KJ01 consente di trasportarne fino a 36, triplicando la capacità di carico e garantendo un incremento del 200% nel numero di unità trasportabili. La riduzione del volume trasportato non solo si traduce in un notevole risparmio nei costi logistici, ma contribuisce anche a una sensibile riduzione delle emissioni di CO₂, rendendo la gestione della catena di approvvigionamento più sostenibile e in linea con le attuali esigenze di riduzione dell'impatto ambientale.

Fig. 70: Impilabilità e compattezza del banco KJ01 in fase di trasporto.

8.1.3. Flessibilità e diversificazione delle configurazioni dei banchi scuola

La flessibilità e la diversificazione delle configurazioni dei banchi scuola rappresentano aspetti cruciali per garantire un ambiente didattico dinamico e adattabile alle molteplici esigenze pedagogiche contemporanee, le quali, in virtù dell'evoluzione delle metodologie educative, richiedono soluzioni sempre più versatili, riconfigurabili e funzionali. In tale contesto, il banco KJ01 si configura come una risposta progettuale avanzata, orientata alla massima adattabilità tipologica e spaziale, grazie a un sistema costruttivo basato su un telaio unificato, capace di supportare diverse configurazioni di piano – rettangolare, trapezoidale e circolare – attraverso semplici variazioni nei componenti superiori (Fig. 71).

Questa versatilità geometrica consente di declinare il banco secondo differenti modalità d'uso, adattandosi agevolmente tanto alle lezioni frontali, caratterizzate da un'interazione unidirezionale tra docente e studenti, quanto alle attività laboratoriali e collaborative, che richiedono configurazioni circolari o semicircolari capaci di facilitare il lavoro in gruppo e l'interazione tra pari. Tale flessibilità non si limita alla fase d'uso, ma si estende anche alla gestione logistica dell'arredo. Nella versione rettangolare, il banco KJ01 è progettato per garantire un impilaggio sicuro, razionale e salvaspazio (Fig. 72), aspetto particolarmente strategico nei contesti in cui si rende necessario rimuovere temporaneamente gli arredi per favorire lo svolgimento di attività sperimentali o dinamiche. Il design strutturale, che prevede gambe sagomate e proporzionate in modo da ridurre l'ingombro verticale durante l'accatastamento, ottimizza l'ergonomia del processo di stoccaggio e movimentazione, contribuendo al tempo stesso alla razionalizzazione della gestione scolastica degli spazi. A supporto di tali qualità funzionali, la configurazione rettangolare consente inoltre di affiancare i banchi senza generare fughe tra i piani d'appoggio, grazie a una progettazione meticolosa delle geometrie laterali (Fig. 73).

Questo elemento si traduce in un miglioramento della resa estetica e della continuità dimensionale, oltre che in una maggiore igiene e stabilità durante l'uso quotidiano. L'intercambiabilità tra le tre tipologie di piano – valorizzata in modo particolare nelle versioni trapezoidale e circolare – permette di ottenere layout configurabili in maniera fluida e coerente, rispondendo alle diverse strategie di disposizione dello spazio didattico (Figg. 74–75). Il sistema modulare, infatti, consente di passare da configurazioni lineari a disposizioni



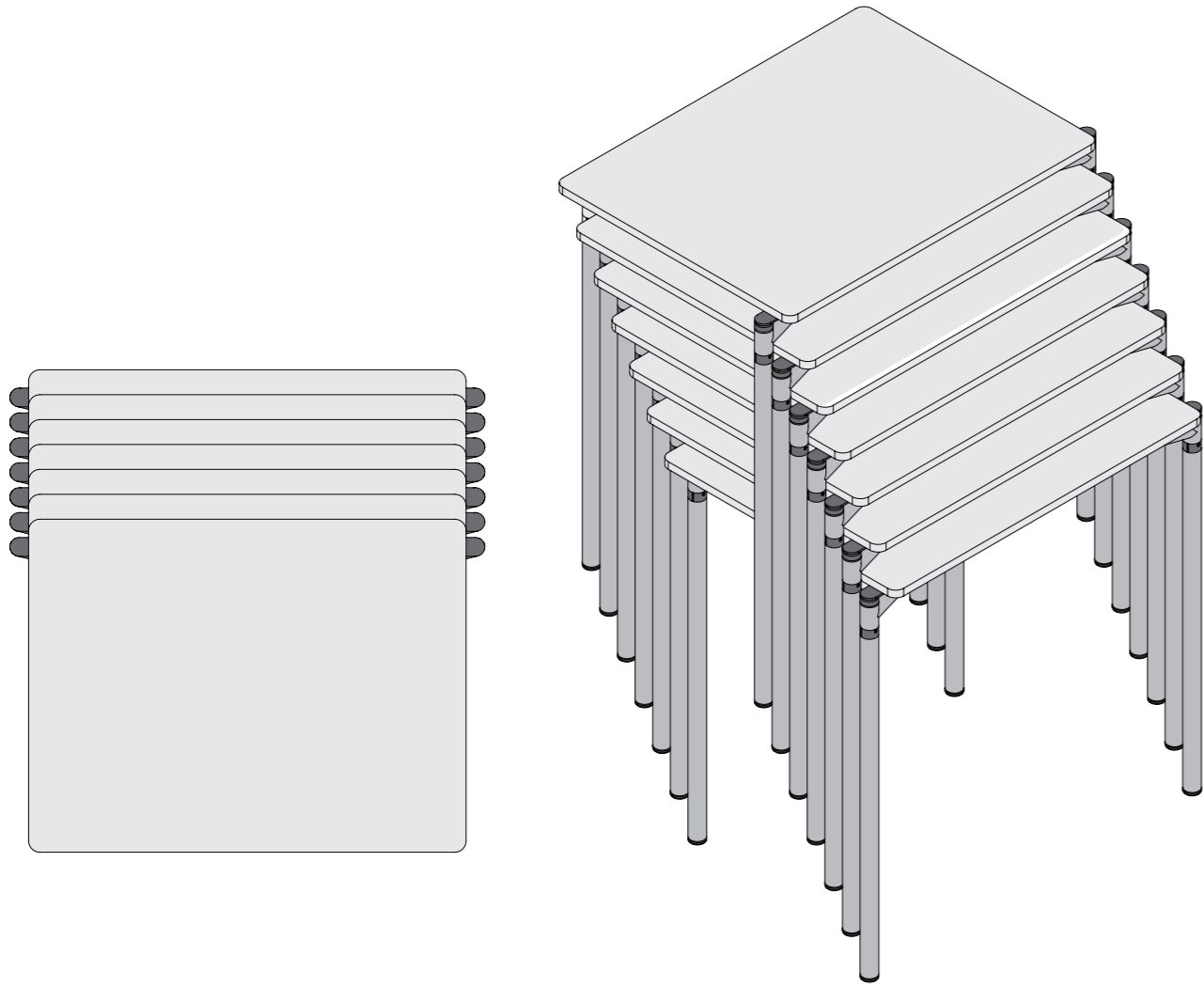
Fig. 71: Diversificazione delle configurazioni del banco KJ01 nella versione rettangolare, trapezoidale e circolare aventi tutte lo stesso telaio.

semicircolari o radiali, senza dover modificare il telaio o gli elementi strutturali di base, garantendo uniformità e continuità formale tra le varie combinazioni. Elemento centrale dell'architettura del banco KJ01 è rappresentato dalla presenza di connessioni reversibili tra piano e struttura portante, le quali, grazie all'inversione delle piastre di montaggio, permettono di utilizzare un unico telaio per tutte le varianti di piano disponibili (Fig. 76).

Questa soluzione tecnica, oltre a ridurre la complessità produttiva e a favorire l'interoperabilità tra componenti, consente una maggiore facilità di montaggio, smontaggio e riadattamento nel tempo. La reversibilità delle connessioni costituisce, pertanto, una leva progettuale fondamentale per abilitare strategie di aggiornabilità, estensione della vita utile e manutenzione in loco, configurando il banco come un sistema evolutivo e scalabile.

Un ulteriore vantaggio, che rafforza la valenza sistemica del progetto KJ01, riguarda la gestione logistica e la programmazione scalabile degli approvvigionamenti scolastici. Qualora le istituzioni ne facciano richiesta, è possibile ordinare solamente i piani d'appoggio desiderati in base a specifiche esigenze didattiche, evitando la sostituzione completa del banco e contribuendo così alla riduzione dell'impatto ambientale associato al trasporto, alla produzione e allo smaltimento dei materiali. Questo modello operativo, in linea con i principi dell'economia circolare, promuove un utilizzo più efficiente delle risorse, la riduzione dei rifiuti e la valorizzazione delle infrastrutture esistenti, attraverso una logica di riuso selettivo dei componenti e di ottimizzazione del ciclo di vita del prodotto.

Fig. 72: Impilabilità del banco KJ01 nella versione rettangolare.



264

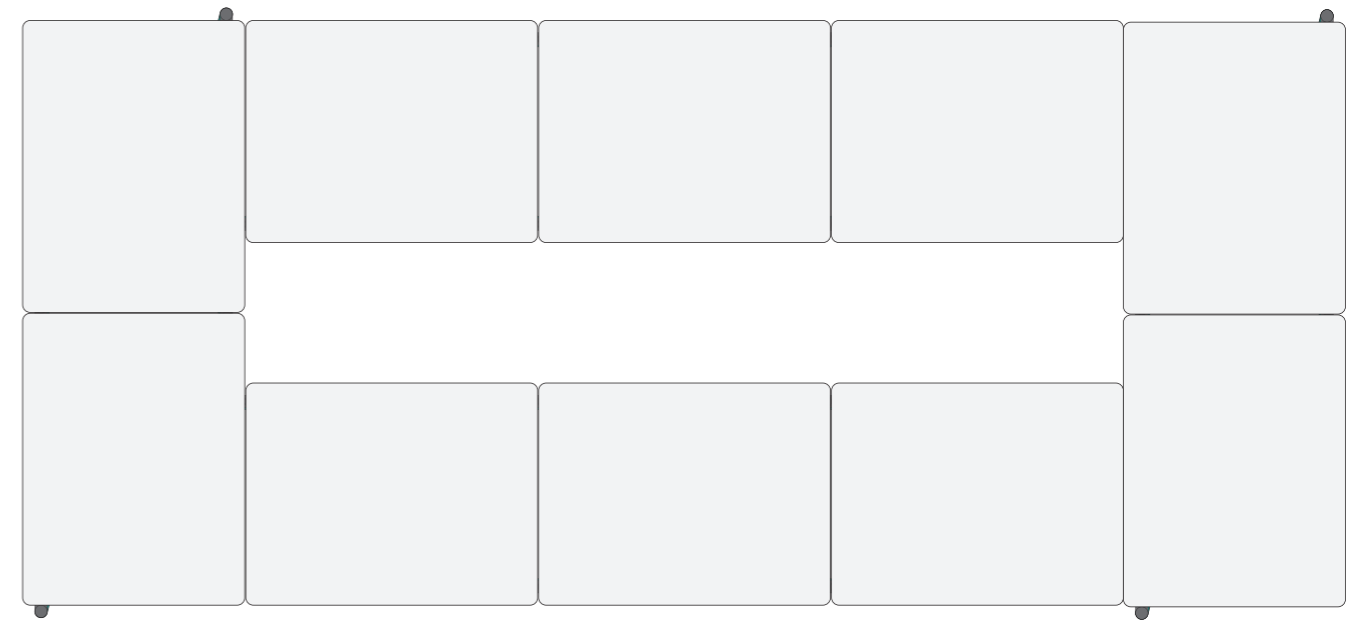
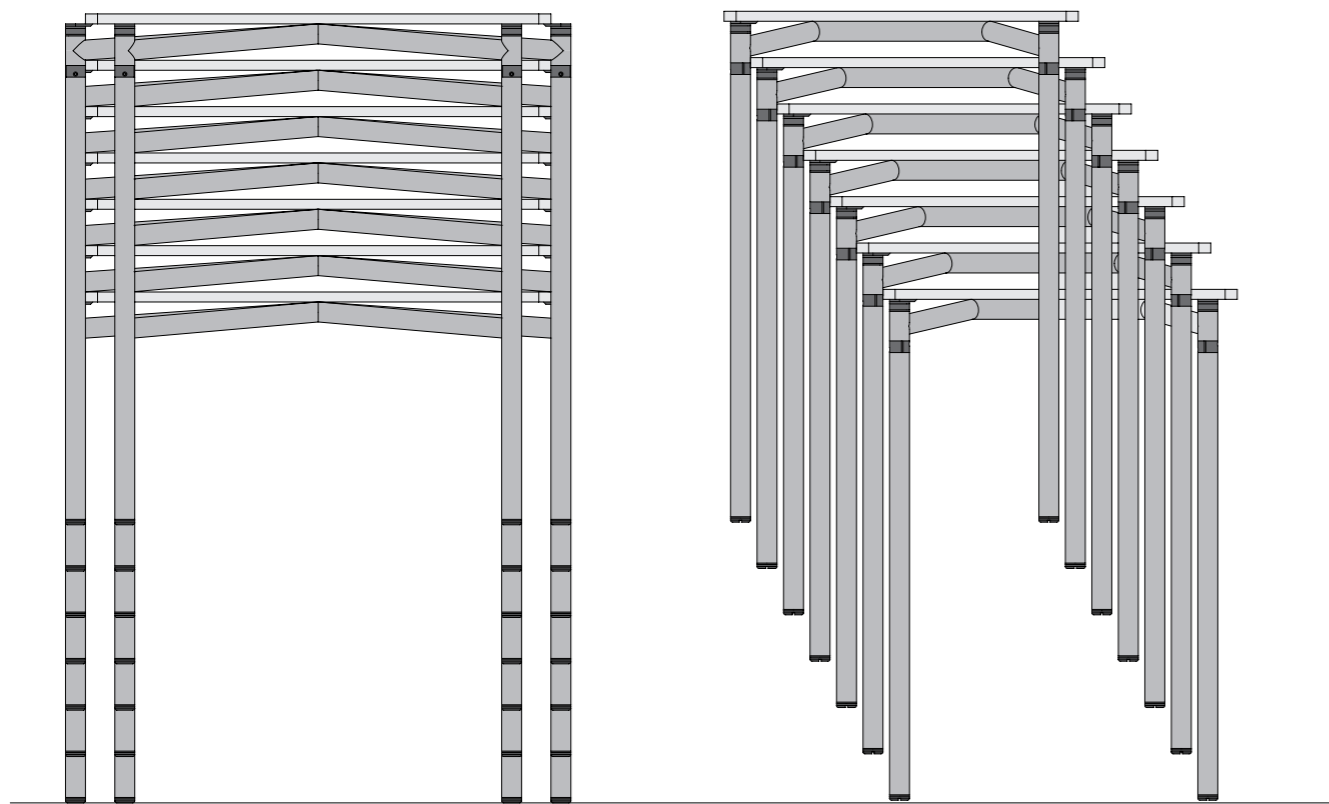


Fig. 73: layout del banco KJ01 rettangolare e possibili configurazioni.



265



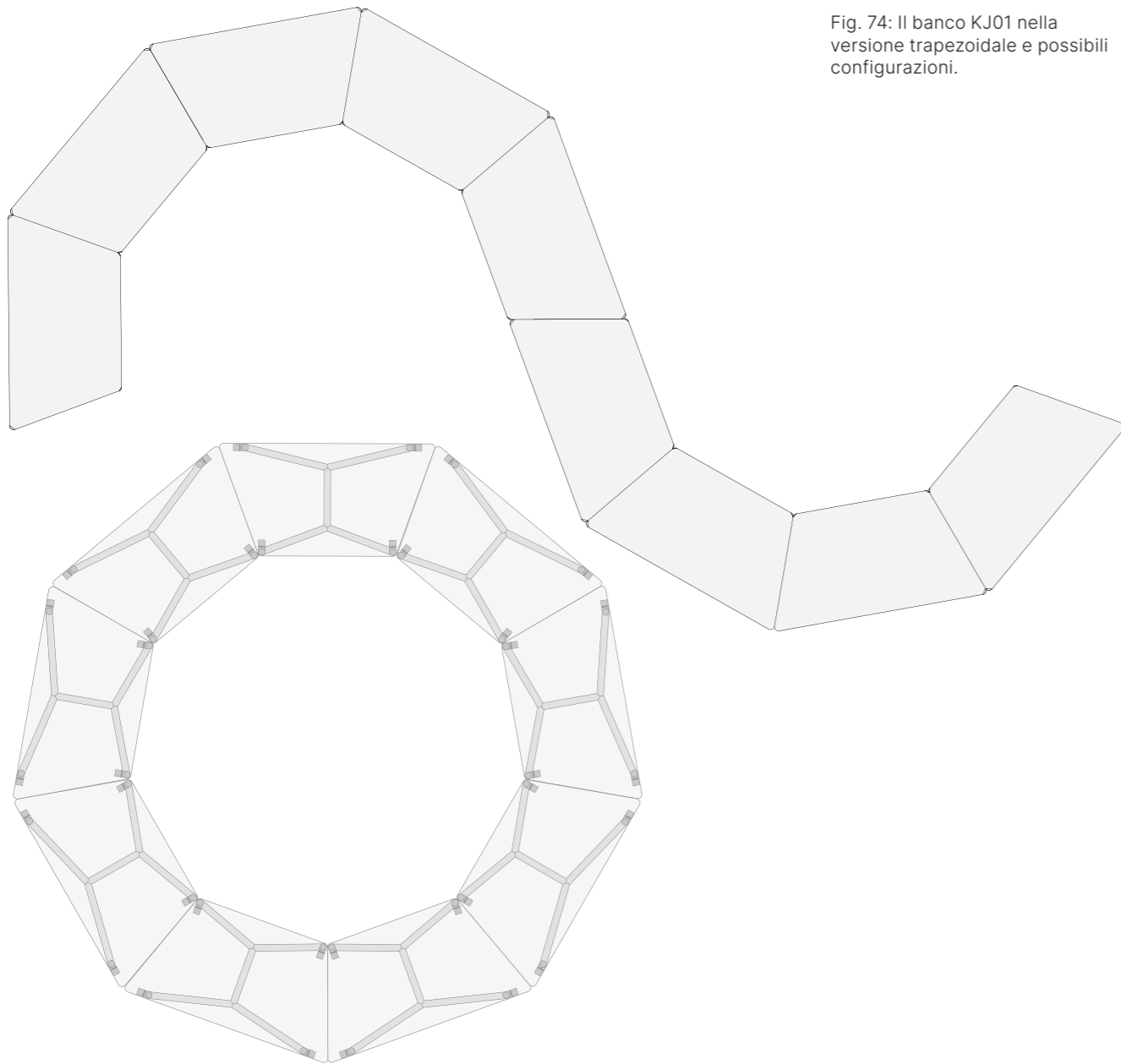


Fig. 74: Il banco KJ01 nella versione trapezoidale e possibili configurazioni.

266

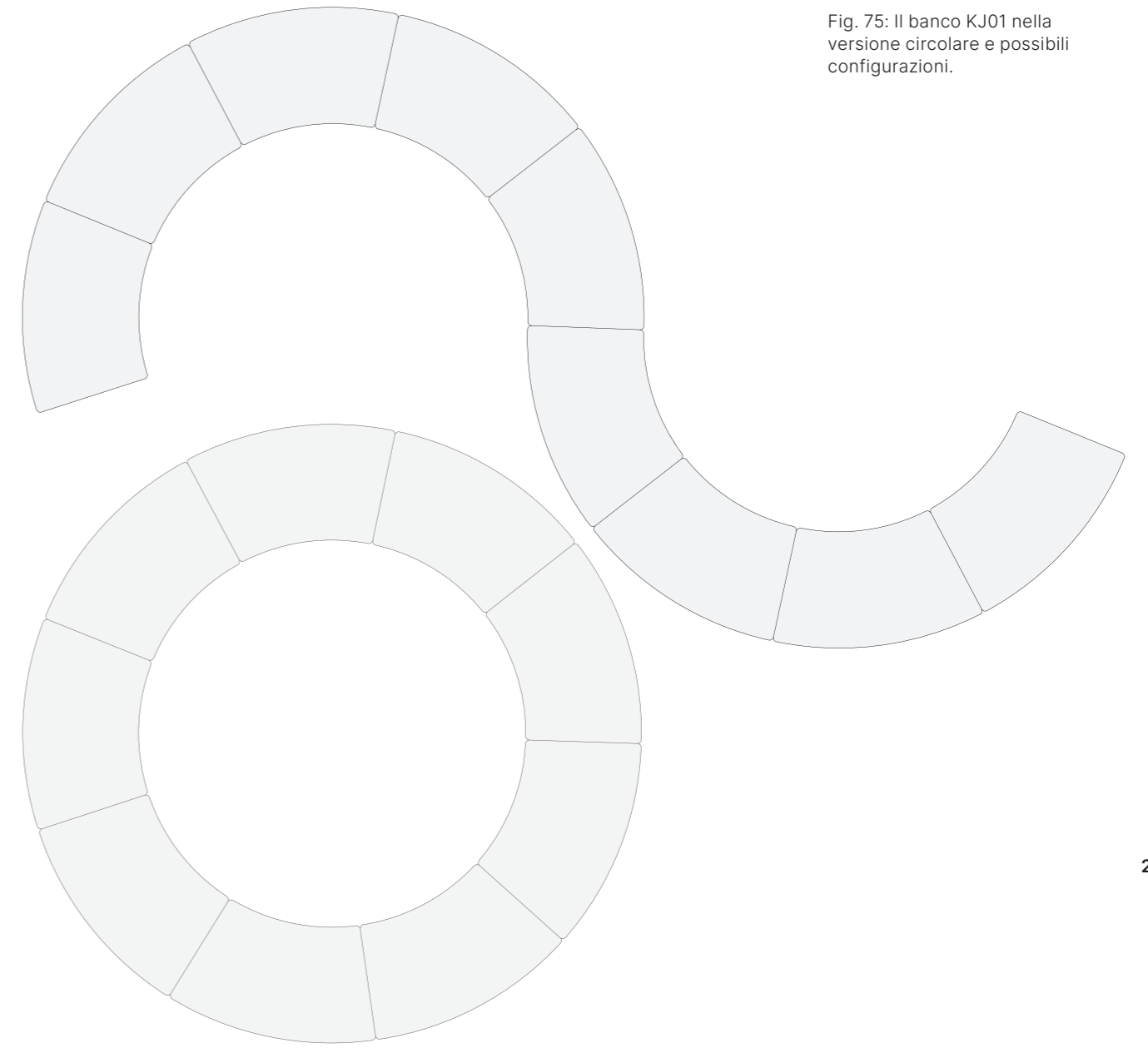
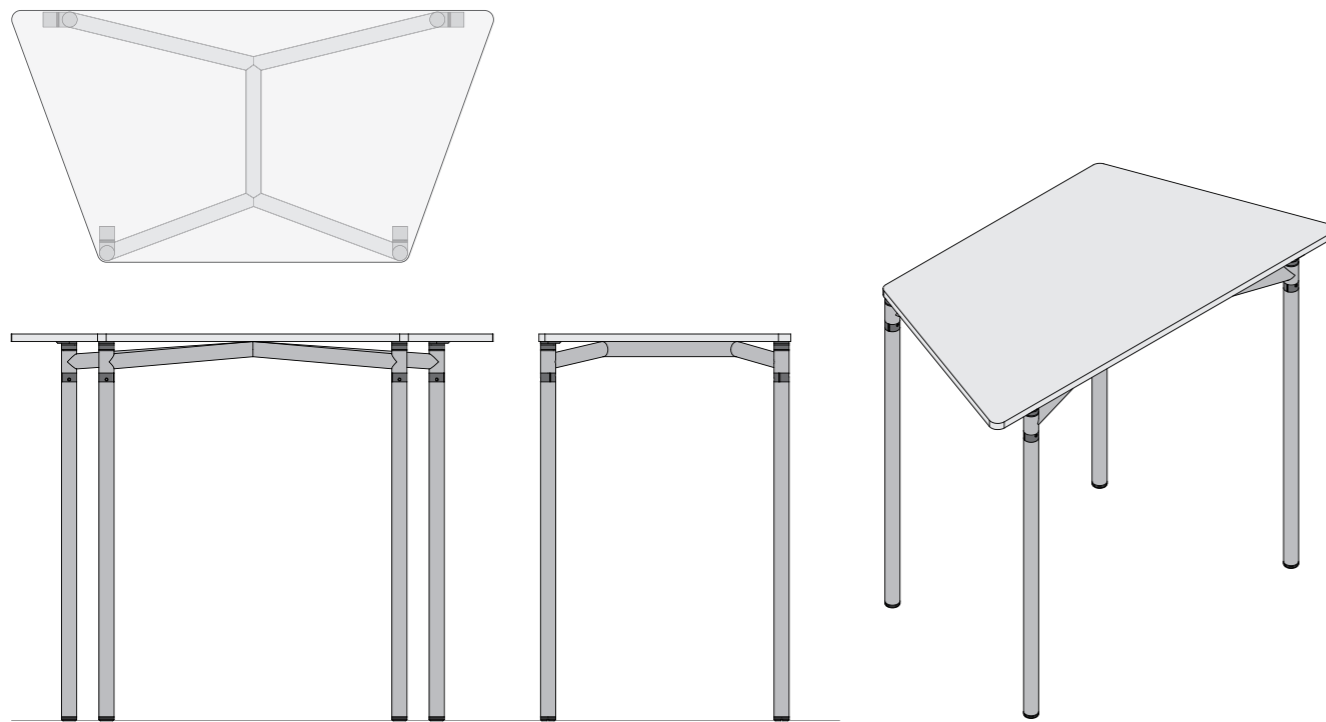
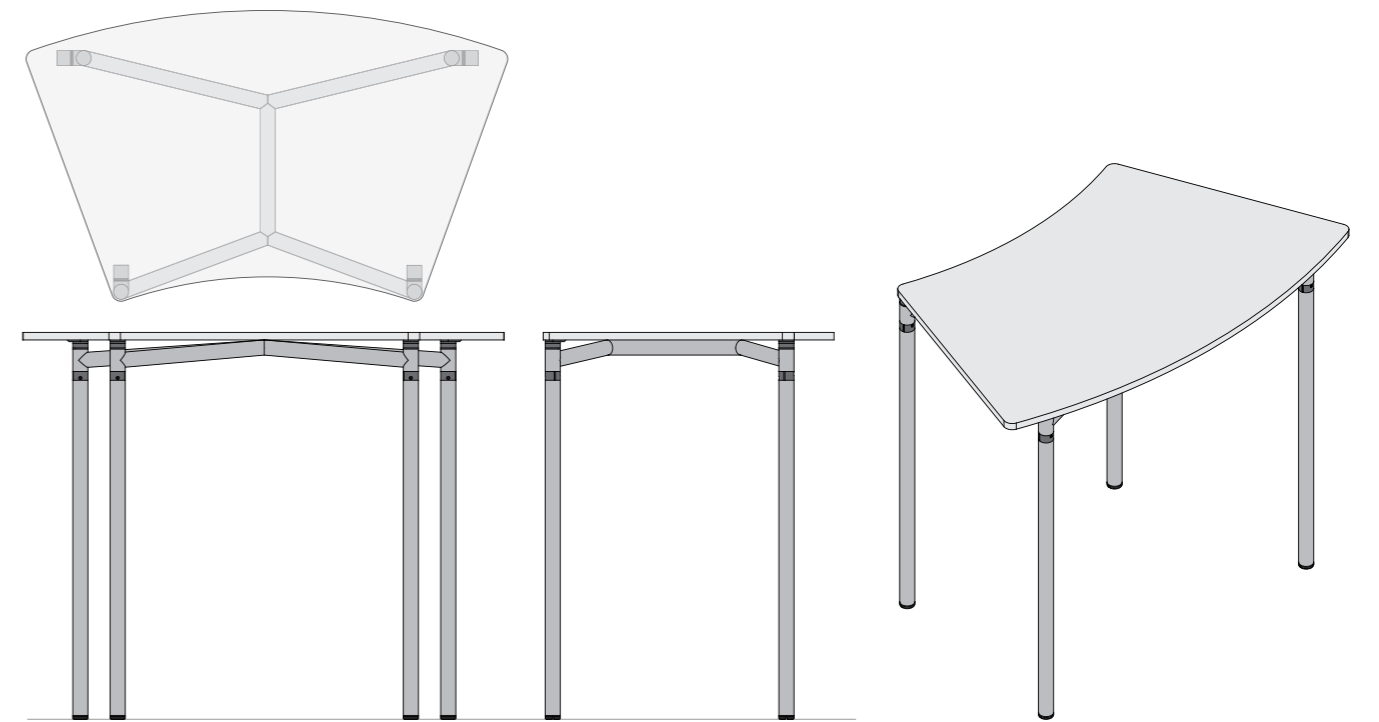


Fig. 75: Il banco KJ01 nella versione circolare e possibili configurazioni.

267



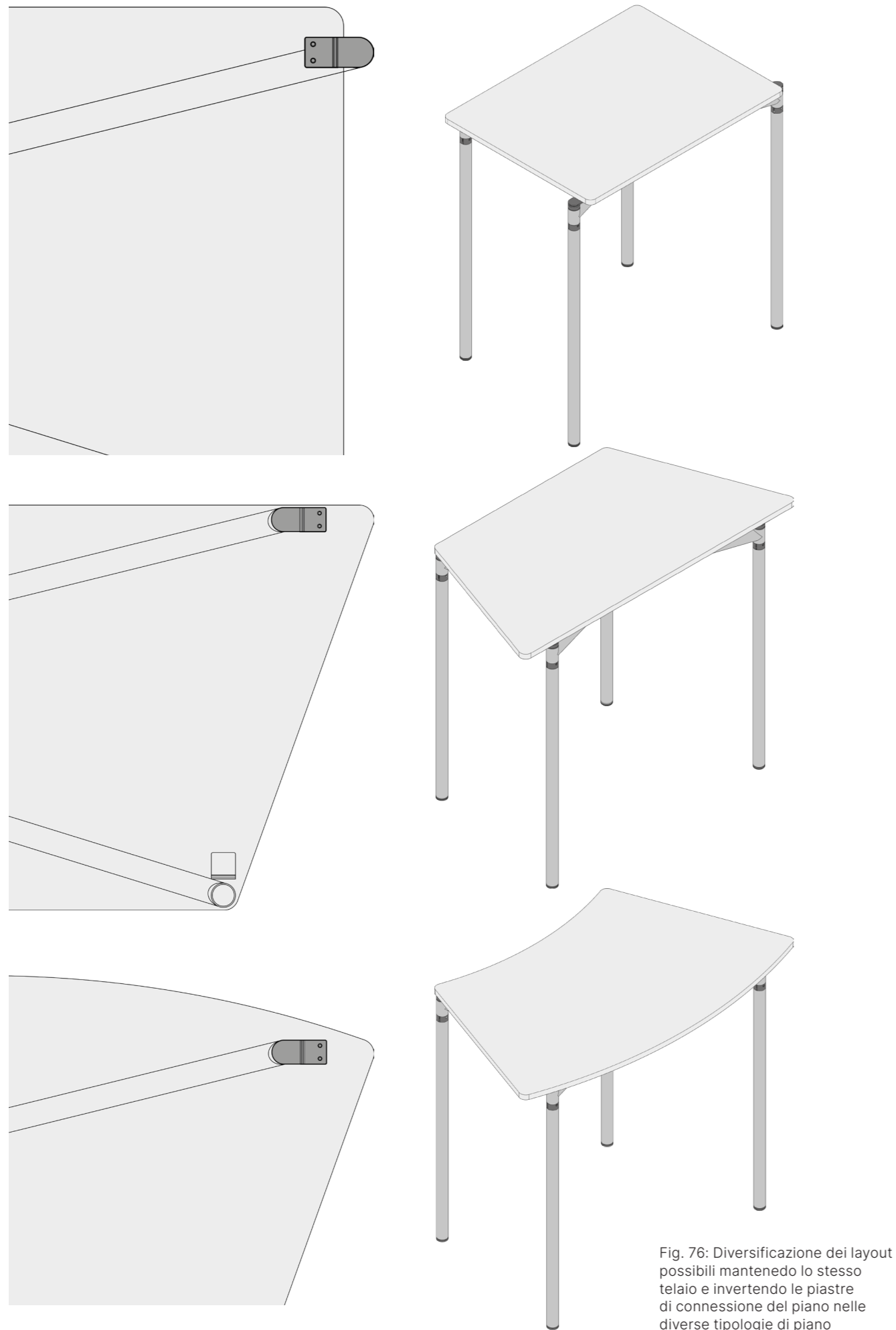


Fig. 76: Diversificazione dei layout possibili mantenendo lo stesso telaio e invertendo le piastre di connessione del piano nelle diverse tipologie di piano

L'analisi del ciclo di vita (LCA) del banco KJ01, condotta utilizzando il software di analisi ECO-it PRé Consultants attraverso le metodologie ReCiPe, si configura come uno strumento essenziale per la quantificazione dei benefici ambientali derivanti dall'adozione di un approccio circolare nel settore dell'arredo scolastico. L'uso di tale software consente una valutazione dettagliata degli impatti ambientali, mentre le metodologie ReCiPe forniscono una struttura analitica avanzata per la quantificazione degli effetti su diverse categorie di impatto. Attraverso l'analisi comparativa tra il sistema-prodotto-servizio (PSS) del banco KJ01 e il modello tradizionale, è possibile evidenziare in modo oggettivo e quantitativo gli impatti ambientali associati alle diverse fasi del ciclo di vita del prodotto e comprendere in che misura strategie come la modularità, la riparabilità e la rigenerazione contribuiscono alla riduzione del consumo di risorse e delle emissioni di gas serra. A differenza dei banchi convenzionali, che una volta danneggiati o obsoleti vengono destinati allo smaltimento senza possibilità di reinserimento in un ciclo produttivo, il modello KJ01 è concepito per massimizzare la sua durata e ridurre la produzione di rifiuti, grazie all'integrazione di una progettazione per anelli interni e servizi di manutenzione e riparazione. L'LCA condotta non si limita a valutare il banco come un oggetto statico, ma considera l'intero sistema in cui esso è inserito, includendo gli impatti derivanti dal trasporto, dalla manutenzione in loco e dalla rigenerazione presso il centro di riparazione e stoccaggio. La progettazione modulare e la possibilità di sostituire singoli componenti anziché l'intero prodotto permettono di ridurre significativamente l'impronta carbonica rispetto ai banchi tradizionali, la cui sostituzione completa comporta una nuova produzione con conseguente maggiore impiego di materie prime ed energia. Un altro indicatore chiave è il Cumulative Energy Demand (CED), che misura il consumo totale di energia primaria necessaria per la produzione, l'uso e la gestione del fine vita del prodotto. Il banco KJ01, grazie alla sua progettazione orientata alla manutenzione e alla riparabilità, presenta un consumo energetico inferiore rispetto ai modelli tradizionali, poiché le operazioni di rigenerazione richiedono un quantitativo di energia nettamente inferiore rispetto alla produzione ex-novo. Inoltre, la possibilità di sostituire esclusivamente il piano di lavoro o i piedini antiscivolo riduce la necessità di nuovi materiali e, di conseguenza, l'energia impiegata nei processi

di lavorazione e trasformazione. Dal punto di vista della gestione delle risorse, il Material Circularity Indicator (MCI) permette di valutare il grado di circolarità del banco, evidenziando in che misura le strategie adottate contribuiscono a ridurre la dipendenza da risorse vergini e a incrementare il riutilizzo e il riciclo dei materiali. Il banco KJ01, a differenza dei modelli tradizionali, è progettato per favorire il recupero di materiali ad alto valore, come l'acciaio e il multistrato di legno, grazie alla presenza di connessioni reversibili che facilitano la separazione e il reinserimento nel ciclo produttivo. Questo aspetto rappresenta un vantaggio significativo rispetto ai modelli convenzionali, nei quali la difficoltà di disassemblaggio porta spesso alla perdita di materiali riciclabili e all'incremento dei rifiuti destinati alla discarica. Un ulteriore parametro di valutazione riguarda la Water Footprint, indicatore che quantifica il consumo idrico associato alla produzione e alla gestione del banco. Grazie alla possibilità di prolungare il ciclo di vita del prodotto attraverso la rigenerazione, il modello KJ01 consente di ridurre il prelievo di acqua necessario per la lavorazione delle materie prime e per i processi produttivi. La minore necessità di sostituzione dell'arredo scolastico comporta, inoltre, una riduzione del fabbisogno di acqua nei cicli industriali, contribuendo a una gestione più sostenibile delle risorse idriche. L'ultimo aspetto analizzato riguarda la Waste Generation, ovvero la quantità di rifiuti generata durante le diverse fasi del ciclo di vita del banco. Nei modelli tradizionali, la fine della vita utile coincide con la completa dismissione del prodotto, mentre nel caso del banco KJ01 la possibilità di sostituire singole parti e di rigenerare il prodotto consente di ridurre drasticamente il volume di rifiuti generati. Inoltre, i materiali impiegati per la costruzione del banco sono selezionati in funzione della loro riciclabilità, garantendo che, al termine del ciclo di utilizzo, essi possano essere recuperati e reimmessi nel sistema produttivo senza impatti negativi significativi sull'ambiente. Tra gli indicatori ambientali chiave valutati, il Global Warming Potential (GWP) consente di quantificare le emissioni di CO₂ equivalente lungo tutto il ciclo di vita. Nel confronto tra il banco KJ01 e il modello standard, l'analisi del ciclo di vita evidenzia come l'integrazione tra progettazione e servizio consenta di ottenere una riduzione significativa dell'impatto ambientale, non solo in termini di emissioni di CO₂ e consumo energetico, ma anche in relazione alla gestione delle risorse e alla minimizza-

zione dei rifiuti. L'adozione di un sistema circolare applicato all'arredo scolastico rappresenta, pertanto, un'opportunità concreta per la transizione verso modelli produttivi più sostenibili, in cui il valore dei materiali viene preservato nel tempo e la produzione di nuovi beni è progressivamente sostituita da strategie di riutilizzo e rigenerazione. L'approccio cradle to cradle (dalla culla alla culla), adottato per il banco KJ01, non solo dimostra la fattibilità di un modello alternativo rispetto al sistema lineare tradizionale, ma rappresenta anche un caso studio replicabile in altri ambiti dell'arredo pubblico e privato. Il potenziale impatto di questa innovazione, infatti, non si limita al singolo prodotto, ma contribuisce alla costruzione di un sistema più efficiente dal punto di vista ambientale, in cui la manutenzione, il recupero e la rigenerazione diventano elementi chiave per la sostenibilità del settore.

8.2.1. Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema

L'analisi del ciclo di vita (LCA) del banco KJ01 si propone di valutare l'impatto ambientale del sistema-prodotto-servizio (PSS) in un'ottica circolare, al fine di quantificare i benefici derivanti dall'adozione di strategie di modularità, riparabilità e rigenerazione rispetto ai modelli tradizionali. A differenza delle soluzioni convenzionali, che seguono un approccio cradle to grave, in cui il ciclo di vita del prodotto termina con lo smaltimento in discarica o con il recupero parziale di alcuni materiali, il banco KJ01 è concepito secondo una logica cradle to cradle, che ne consente il reinserimento in un ciclo continuo di utilizzo e valorizzazione (Fig. 77), come illustrato dal diagramma di flusso che rappresenta le principali fasi del ciclo di vita, includendo anche i servizi di rigenerazione e manutenzione. Il sistema di analisi adottato, pertanto, non si limita a considerare esclusivamente il banco come unità funzionale isolata, ma include anche i servizi di manutenzione, aggiornamento e rigenerazione, i quali permettono di estendere significativamente la vita utile del prodotto e di ridurre la necessità di nuove produzioni. Al fine di definire in modo chiaro i confini del sistema (Fig. 78), è necessario individuare le diverse fasi del ciclo di vita del banco, comprendendo sia gli input di materiali ed energia sia gli output in termini di emissioni, rifiuti e impatti ambientali. La prima fase riguarda l'approvvigionamento delle materie prime e la produzione dei componenti, durante la quale vengono considerati tutti i processi relativi all'estrazione, alla lavorazione e al trasporto dei materiali impiegati. In particolare, il piano di lavoro è realizzato in multistrato di legno proveniente da foreste gestite in modo sostenibile, mentre la struttura portante è costituita da acciaio, un materiale scelto sia per la sua resistenza meccanica che per l'elevata riciclabilità. Oltre a questi elementi principali, il banco è dotato di piedini anti-scivolo, realizzati in materiali polimerici riciclabili e progettati per essere sostituibili con un sistema a baionetta, e di un sistema di connessione modulare, il quale consente il disassemblaggio e la sostituzione selettiva delle componenti strutturali. Successivamente, l'analisi prende in considerazione la fase di assemblaggio e distribuzione, nella quale vengono valutati i consumi energetici legati alla produzione e all'assemblaggio finale del banco, nonché gli impatti derivanti dal trasporto verso i centri di distribuzione e, successivamente, verso le scuole. In questo contesto, particolare attenzione viene rivolta alla logistica e ai materiali di imballaggio,

Fig. 77: Diagramma di flusso che illustra il processo produttivo del banco monoposto KJ01 secondo l'approccio cradle-to-cradle. Sono rappresentate le fasi di pre-produzione, produzione, distribuzione, utilizzo, e il servizio di riparazione e ripristino, sia in loco che attraverso il ritiro e stoccaggio nei centri di riparazione, evidenziando i principali materiali, lavorazioni e impatti lungo il ciclo di vita del prodotto.

FLOWCHART banco monoposto KJ01 cradle to cradle

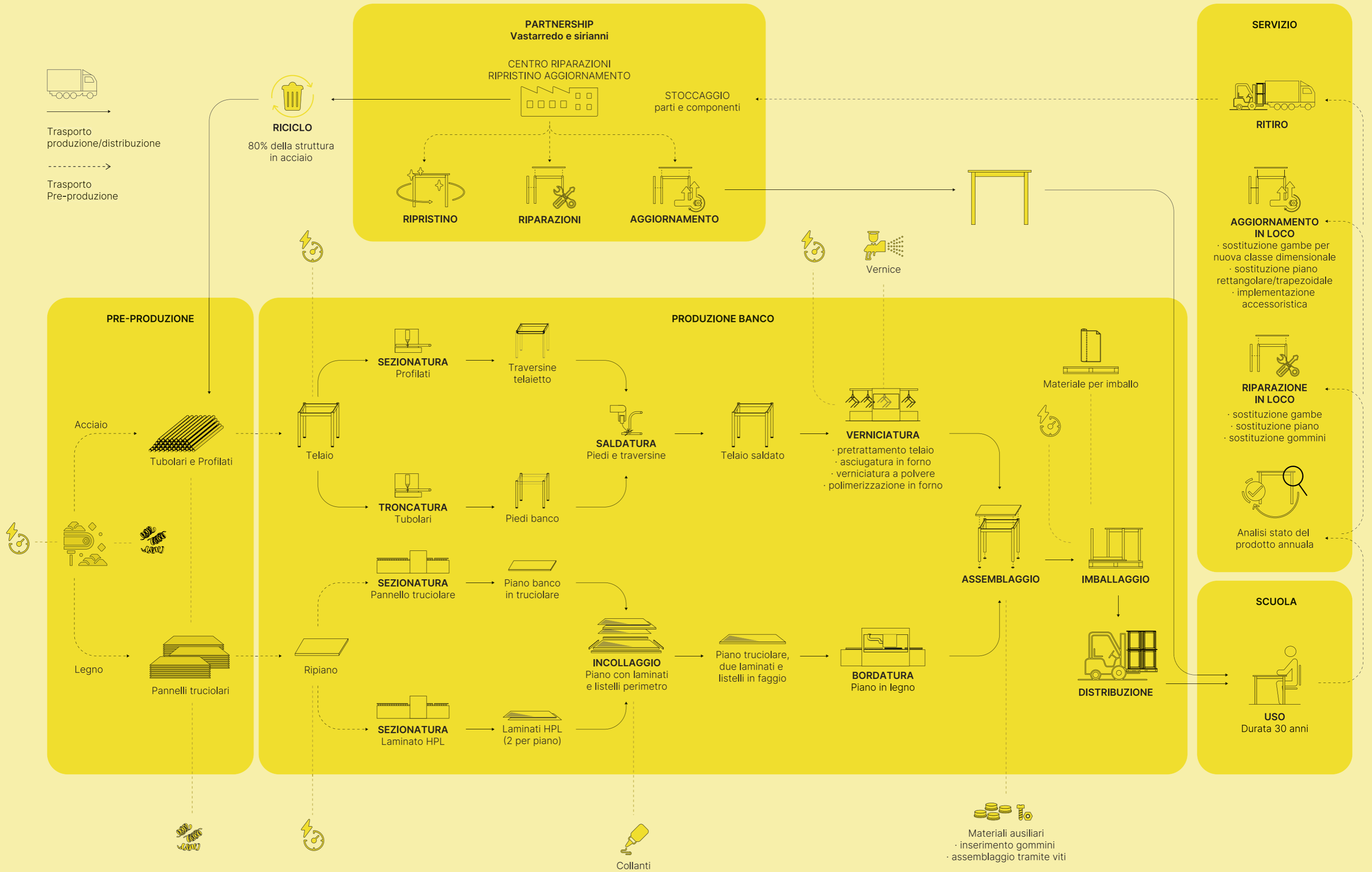
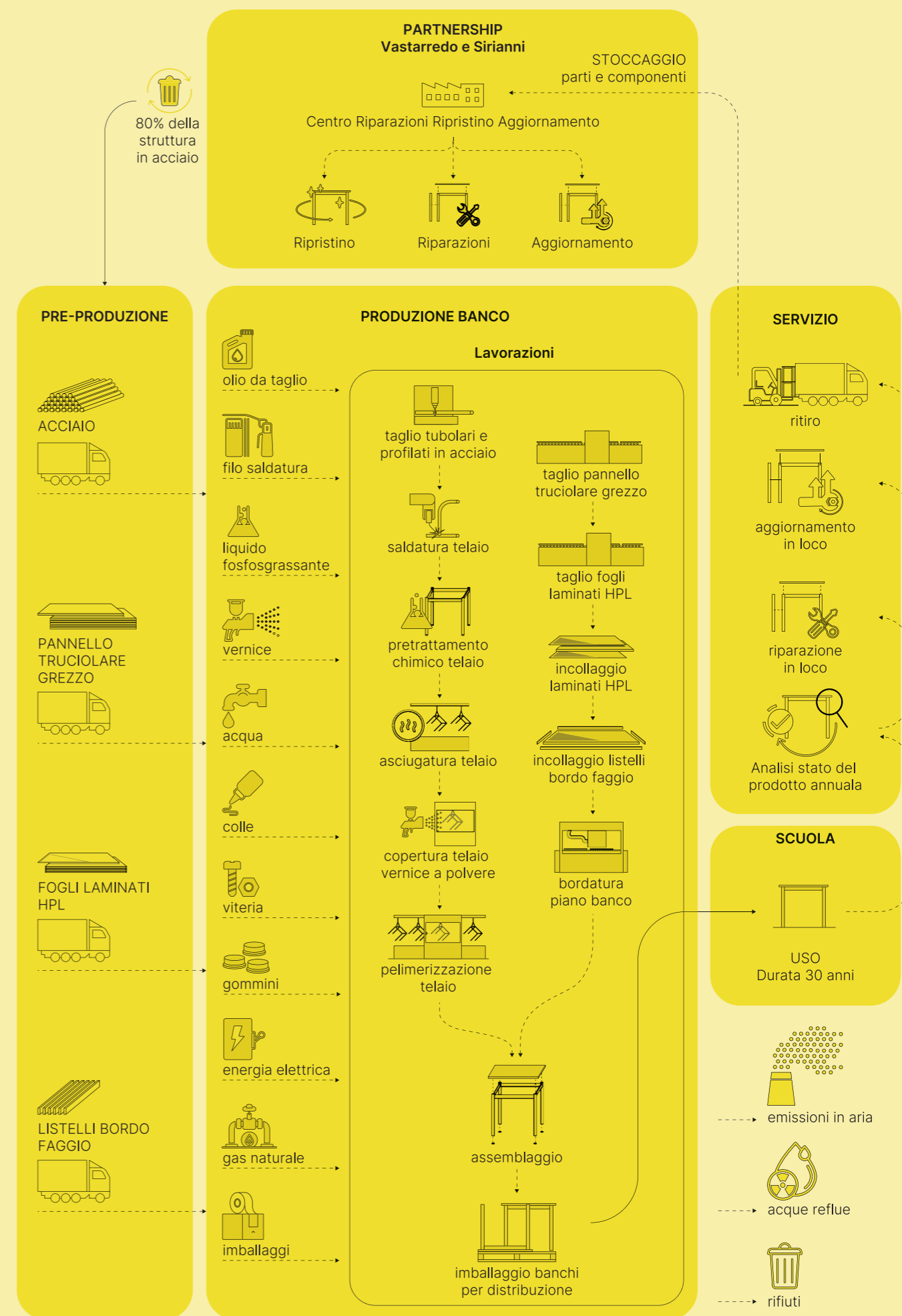


Fig. 78: Confini del sistema relativo al processo di produzione del banco monoposto KJ01, rappresentativo della filiera dell'arredo scolastico, destinato all'utilizzo nelle scuole, nonché alla fase del servizio che prevede il successivo processo di riparazione, ripristino, aggiornamento e solo in ultima istanza il riciclo e smaltimento.

con l'obiettivo di minimizzare gli sprechi e ridurre le emissioni associate alla movimentazione del prodotto. La terza fase riguarda l'uso e la manutenzione in loco, momento in cui il banco entra effettivamente in funzione all'interno degli ambienti scolastici. A differenza dei modelli tradizionali, nei quali eventuali danni o segni di usura portano spesso alla sostituzione dell'intero arredo, il banco KJ01 è progettato per essere riparato direttamente presso l'istituto scolastico, attraverso la sostituzione mirata di componenti come il piano di lavoro o i piedini antiscivolo. La possibilità di effettuare interventi di manutenzione in loco consente non solo di prolungare la vita utile del banco, ma anche di ridurre significativamente i costi e gli impatti ambientali legati alla produzione di nuovi elementi e al loro trasporto. Nel momento in cui il banco non risulta più adeguato all'uso scolastico, entra in gioco la fase di rigenerazione presso il centro di riparazione e stoccaggio, dove il prodotto viene sottoposto a interventi di ripristino più approfonditi. In questa fase, le strutture in acciaio vengono ispezionate e, se necessario, riverniciate o riparate, mentre i piani di lavoro vengono sostituiti e recuperati, garantendo che il banco possa essere riportato a condizioni funzionali pari al nuovo. L'inclusione di questa fase all'interno dei confini del sistema consente di evidenziare come il modello KJ01 riduca la necessità di nuove produzioni, sfruttando un'infrastruttura dedicata alla manutenzione e alla reimmissione del prodotto sul mercato della pubblica amministrazione.

Infine, viene considerata la fase di smaltimento e recupero finale dei materiali, la quale, a differenza dei modelli tradizionali, non rappresenta necessariamente la fine del ciclo di vita del banco, bensì un'ulteriore opportunità per il recupero di materiali strategici. Grazie alla progettazione basata su connessioni reversibili, i componenti in acciaio e legno possono essere facilmente separati e riciclati, riducendo al minimo la quantità di rifiuti destinati alla discarica o all'incenerimento con recupero energetico. L'inclusione del servizio di manutenzione e rigenerazione all'interno dell'analisi consente di passare da una visione limitata al solo prodotto a un approccio sistemico più ampio, in cui il valore dei materiali e delle risorse viene preservato nel tempo. L'approccio cradle to cradle adottato per il banco KJ01 non solo consente di ridurre l'impronta ecologica del settore dell'arredo scolastico, ma rappresenta un modello replicabile anche in altri ambiti, favorendo una transizione concreta verso un'economia circolare e rigenerativa.



La fase di Life Cycle Inventory (LCI) del banco monoposto KJ01 rappresenta un passaggio fondamentale per la quantificazione degli input e output ambientali associati alla produzione del prodotto (Fig. 79). Tale analisi è stata sviluppata utilizzando sia dati primari forniti dalle aziende coinvolte sia mediante l'impiego di database riconosciuti per la modellazione dei materiali e dei processi produttivi. Nel caso del banco KJ01, la struttura portante è realizzata con 2,13 kg di acciaio inossidabile 18/8, a cui si aggiungono processi di lavorazione come la trafilatura dei tubi e la laminazione delle barre, con impatti rispettivi di 0,79 e 0,3 punti secondo il modello ECO-it. Il processo di saldatura ad arco, necessario per l'assemblaggio del telaio, comporta un impatto aggiuntivo di 0,064 unità. Per quanto riguarda il piano di lavoro, il banco KJ01 adotta un piano in multistrato con una combinazione di 0,005391 m³ di compensato, 0,34968 kg di carta Kraft non sbiancata e 0,3 kg di acido formico, con impatti rispettivi di 2,7, 0,3 e 0,93 unità.

La scelta del pannello in multistrato comporta una maggiore disponibilità di materiali riciclati rispetto al compensato, il processo di nobilitazione con laminato HPL, caratterizzato da strati impregnati con resine fenoliche e melamminiche, incide sull'impronta ambientale a causa del consumo energetico e delle emissioni generate durante la produzione. Il consumo energetico per la sezionatura del piano è di 0,6 kWh di elettricità fotovoltaica e 0,4 kWh di elettricità di rete per unità prodotta. Per il banco KJ01 il trasporto su camion EURO5 (>32t) per la struttura in acciaio e il piano multistrato comporta un impatto rispettivamente di 0,22 e 0,084 unità, valori inferiori rispetto a quelli del banco standard monoposto, grazie a una maggiore razionalizzazione delle tratte di approvvigionamento e una filiera più compatta. Un ulteriore elemento distintivo del banco KJ01 è la modularità della sua progettazione, che consente la sostituzione selettiva di componenti senza necessità di sostituire l'intero prodotto. Ad esempio, i connettori in acciaio per il fissaggio del piano, con un impatto ambientale di 3,3 unità, sono realizzati con 0,086 kg di acciaio 18/8 e progettati per essere facilmente disassemblabili. Si può, quindi, validare una maggiore longevità del banco KJ01 e una riduzione dei rifiuti generati a fine vita, a differenza del modello tradizionale, per cui la sostituzione del piano comporta spesso la dismissione completa della struttura. Anche la fase di finitura riveste un ruolo significativo nell'impatto com-

Production	Amount	Unit	Number	Impact
Product	1	p	1	77
BANCO	1	p	1	77
PIANO MULTISTRATO	1	p	1	4,4
Plywood, indoor use	0,005391	m ³	1	2,7
Kraft paper, unbleached	0,34968	kg	1	0,3
Formic acid from methyl formate	0,3	kg	1	0,93
Electricity fotovoltaic, Italy	0,6	kWh	1	0,04
Electricity, Italy	0,4	kWh	1	0,26
trasporto	1	p	1	0,15
piano multistrato	1	p	1	0,084
Transport, lorry >32t, EURO5	0,80865	tkm	1	0,084
nobilitazione	1	p	1	0,0036
Transport, lorry >32t, EURO5	0,034968	tkm	1	0,0036
colla	1	p	1	0,058
Transport, van <3.5t	0,03	tkm	1	0,058
STRUTTURA ACCIAIO	1	p	1	36
telaio	1	p	1	13
Chromium steel 18/8	2,13834	kg	1	11
Drawing of pipes, steel	2,13834	kg	1	0,79
Section bar rolling, steel	1,78195	kg	1	0,3
Welding, arc, steel	0,52	m	1	0,064
Toner, black, powder	0,07	kg	1	0,39
trasporto	1	p	1	0,32
Transport, lorry >32t, EURO5	2,13834	tkm	1	0,22
Transport, van <3.5t	0,05	tkm	1	0,097
gamba	4	p	1	23
Chromium steel 18/8	0,8388	kg	4	18
Drawing of pipes, steel	0,8388	kg	4	1,2
Section bar rolling, steel	0,67104	kg	4	0,45
Toner, black, powder	0,07	kg	4	1,5
Electricity fotovoltaic, Italy	0,6	kWh	4	0,16
Electricity, Italy	0,4	kWh	4	1
trasporto	1	p	4	0,74
Transport, lorry >32t, EURO5	0,8388	tkm	4	0,35
Transport, van <3.5t	0,05	tkm	4	0,39
CONNESSIONE PIANO	1	p	1	3,9
connettore piano (M)	4	p	1	3,3
Chromium steel 18/8	0,086	kg	4	1,8
Electricity, Italy	1,1	MJ	4	0,78
trasporto	1	p	4	0,67
Transport, van <3.5t	0,086	tkm	4	0,67
connettore piano (F)	4	p	1	0,32
Nylon 66	0,007	kg	4	0,22
Injection moulding	0,007	kg	4	0,038
trasporto	1	p	4	0,054
Transport, van <3.5t	0,007	tkm	4	0,054
innesto (F) tubolare	4	p	1	0,36
Nylon 66	0,008	kg	4	0,26
Injection moulding	0,008	kg	4	0,043
trasporto	1	p	4	0,062
Transport, van <3.5t	0,008	tkm	4	0,062
CONNESSIONE GAMBE	1	p	1	3,8
giunto (F)	4	p	1	1,8
Chromium steel 18/8	0,047	kg	4	0,99
Electricity, Italy	0,6	MJ	4	0,43
trasporto	1	p	4	0,36
Transport, van <3.5t	0,047	tkm	4	0,36
giunto (M)	4	p	1	2
Chromium steel 18/8	0,055	kg	4	1,2
Electricity, Italy	0,6	MJ	4	0,43
trasporto	1	p	4	0,43
Transport, van <3.5t	0,055	tkm	4	0,43
PIEDINI ANTISCIVOLO	1	p	1	0,37
innesto (F) tubolare	4	p	1	0,26
Nylon 66	0,007	kg	4	0,22
Injection moulding	0,007	kg	4	0,038
trasporto	1	p	4	0,0029
Transport, lorry >32t, EURO5	0,007	tkm	4	0,0029

Production	Amount	Unit	Number	Impact
piedino (M)	4	p	1	0,11
Copolymer ABS	0,005	kg	4	0,077
Injection moulding	0,005	kg	4	0,027
trasporto	1	p	4	0,0021
Transport, lorry >32t, EURO5	0,005	tkm	4	0,0021
COMPONENTI TERZISTI	1	p	1	0,36
viteria giunto gambe	4	p	1	0,26
Chromium steel 18/8	0,008	kg	4	0,17
Cold impact extrusion, steel	0,008	kg	4	0,028
trasporto	1	p	4	0,062
Transport, van <3.5t	0,008	tkm	4	0,062
viteria standard	8	p	1	0,1
Steel, electric, un- and low-alloyed	0,002534	kg	8	0,0087
Wire drawing, steel	0,002534	kg	8	0,0068
Turning, steel	0,002	kg	8	0,053
trasporto	1	p	8	0,033
Transport, lorry >32t, EURO5	0,04	tkm	8	0,033
PALLETTIZZAZIONE	1	p	1	12
pallet 800x1200	1	p	1	11
Sawn timber, hardwood	0,02938	m3	1	2,8
Particle board, outdoor use	0,013	m3	1	4,3
Chromium steel 18/8	0,66	kg	1	3,5
Wire drawing, steel	0,66	kg	1	0,22
Turning, steel	0,13	kg	1	0,43
Industrial residual wood chopping	14,69	kg	1	0,16
wrap	1	p	1	0,43
Packaging film, LDPE	0,161	kg	1	0,43
DISTRIBUZIONE	1	p	1	0,0065
Road transport 40 t (volume)	0,035079	m3	1	0,0065
MANUTENZIONE	1	p	1	0,27
Silicone product	0,1	kg	1	0,27
Water deionised	2	kg	1	0,002
SERVIZIO	1	p	1	16
TRASPORTO BANCO	1	p	1	0,047
Road transport 40 t (volume)	0,252638	m3	1	0,047
RIPRISTINO BANCO	1	p	1	16
piano ripristinato	1	p	1	4,3
Plywood, indoor use	0,005391	m3	1	2,7
Kraft paper, unbleached	0,34968	kg	1	0,3
Formic acid from methyl formate	0,3	kg	1	0,93
Electricity fotovoltaic, Italy	0,6	kWh	1	0,04
Electricity HV, production UCTE	0,4	kWh	1	0,21
trasporto	1	p	1	0,15
piano multistrato	1	p	1	0,084
Transport, lorry >32t, EURO5	0,80865	tkm	1	0,084
nobilitazione	1	p	1	0,0036
Transport, lorry >32t, EURO5	0,034968	tkm	1	0,0036
colla	1	p	1	0,058
Transport, van <3.5t	0,03	tkm	1	0,058
ripristino gamba	2	p	1	11
Chromium steel 18/8	0,8388	kg	2	8,8
Drawing of pipes, steel	0,8388	kg	2	0,62
Section bar rolling, steel	0,67104	kg	2	0,23
Toner, black, powder	0,07	kg	2	0,7
Electricity fotovoltaic, Italy	0,6	kWh	2	0,08
Electricity, Italy	0,4	kWh	2	0,51
trasporto	1	p	2	0,37
Transport, lorry >32t, EURO5	0,8388	tkm	2	0,1
Transport, van <3.5t	0,05	tkm	2	0,19
ripristino piedino	4	p	1	0,11
Copolymer ABS	0,005	kg	4	0,077
Injection moulding	0,005	kg	4	0,027
trasporto	1	p	4	0,0021
Transport, lorry >32t, EURO5	0,005	tkm	4	0,0021

plussivo del ciclo di vita. Il banco KJ01 è verniciato a polvere con una vernice epossidica o poliestere con un impatto di 0,39 unità. Poiché il software ECO-it non prevede un dataset specifico per la verniciatura a polvere, è stato scelto il dataset "Toner, black", la cui impronta di carbonio è simile a quella della resina epossidica. Infine, la fase di distribuzione evidenzia ulteriori differenze tra i due modelli. Per quanto riguarda la fase di distribuzione, il trasporto finale del banco KJ01, comporta un impatto di 0,047 unità. Inoltre, la manutenzione e la possibilità di ripristino del banco KJ01, con un impatto di 16 unità, consentono di prolungarne il ciclo di vita, riducendo la necessità di nuove produzioni e limitando le emissioni complessive nel tempo.

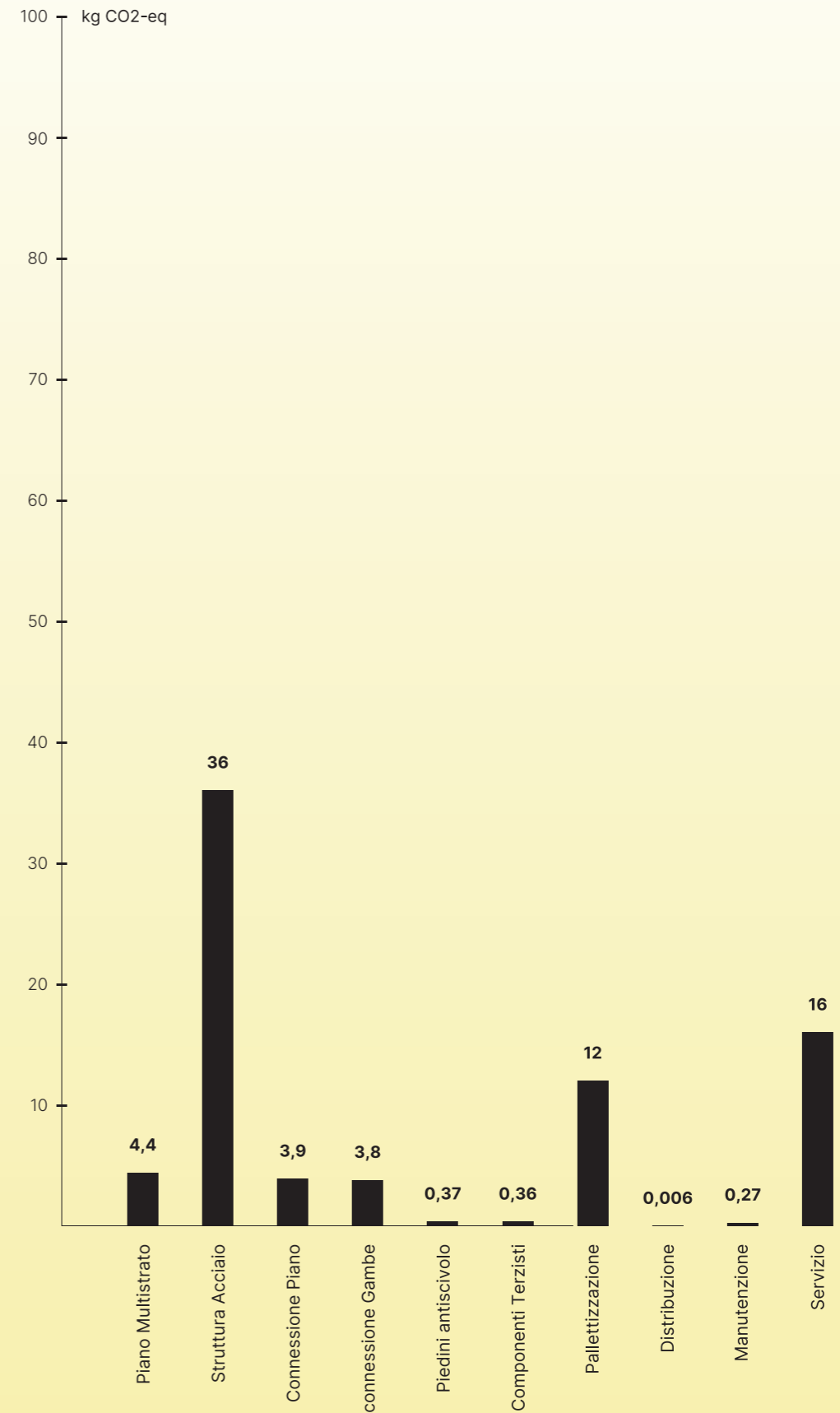
Nel caso del banco standard, invece, il ripristino è meno efficiente a causa della complessità di sostituzione dei componenti, che porta frequentemente alla dismissione prematura del prodotto. La fase di Life Cycle Inventory evidenzia come il banco KJ01, grazie alla scelta di materiali più durevoli, a una progettazione orientata alla modularità e a una filiera produttiva più efficiente, presenti un impatto ambientale complessivo inferiore rispetto al banco monoposto standard. La possibilità di riparazione, il minor consumo di energia nei processi di produzione e la riduzione degli sprechi di materiali rappresentano i principali vantaggi di questa soluzione innovativa, rendendola un modello di riferimento per l'adozione di strategie di economia circolare nel settore dell'arredo scolastico.

8.2.3. Interpretazione dei risultati

Fig. 80: (a destra) Diagramma relativo al processo di produzione del banco monoposto KJ01.

L'analisi del ciclo di vita (LCA) condotta sul banco monoposto KJ01, in confronto al modello standard, ha fornito una visione dettagliata degli impatti ambientali legati alle diverse fasi del ciclo di vita del prodotto, evidenziando come l'integrazione di strategie innovative, quali la modularità, la riparabilità e la rigenerazione, consenta di ridurre in modo significativo l'impronta ecologica complessiva. L'impiego dello strumento ECO-it 1.4, combinato con l'applicazione della metodologia ReCiPe, ha permesso di quantificare con precisione le emissioni di CO₂ equivalente e i consumi energetici, nonché di valutare nel dettaglio le implicazioni ambientali delle varie fasi, dalla produzione alla distribuzione, fino all'uso e allo smaltimento finale del banco KJ01. In tal senso, il diagramma riportato in Figura 80 (a destra) illustra in modo sintetico e sistemico il processo di produzione del banco KJ01, mettendo in evidenza le principali fasi operative e i materiali coinvolti. Uno degli aspetti più rilevanti emersi dall'analisi riguarda la diversa incidenza delle componenti del banco KJ01 sugli impatti complessivi, i quali non risultano distribuiti in modo omogeneo lungo il ciclo di vita del prodotto. In particolare, la fase di produzione della struttura in acciaio emerge come la principale fonte di emissioni di CO₂ equivalente, con un valore pari a 36 kg CO₂-eq, rappresentando quasi il 50% dell'impatto ambientale totale del banco. Tale evidenza è ulteriormente chiarita dal diagramma riportato in Figura 81, il quale mostra nel dettaglio gli impatti ambientali associati alla produzione della struttura metallica del banco KJ01, evidenziando i contributi specifici dei diversi processi produttivi coinvolti. Tuttavia, rispetto al modello tradizionale, la scelta di un telaio disassemblabile e aggiornabile riduce sensibilmente la necessità di nuove produzioni, favorendo il riutilizzo delle parti ancora in buono stato e abbattendo così la quantità di materiale destinato allo smaltimento. Anche il piano di lavoro in multistrato incide in modo significativo dell'impatto ambientale del banco, sebbene il suo contributo sia inferiore rispetto a quello della struttura metallica. Le emissioni associate alla sua produzione si attestano intorno a 4,4 kg CO₂-eq, originate principalmente dai processi di lavorazione del legno e dalle emissioni legate alla produzione di colle e laminati impiegati nel rivestimento. Il modello KJ01 prevede la possibilità di sostituire esclusivamente il piano di lavoro senza dover smaltire l'intero banco, contribuendo così a prolungare la vita utile e riducendo la necessità di estrarre

Chart banco monoposto KJ01
Production: BANCO 77 kg CO₂-eq
Method: IPCC 2007, 100 yrr



nuove risorse, ottimizzando al contempo il ciclo di manutenzione. Un altro elemento chiave dell'analisi riguarda il sistema di connessione reversibile, adottato sia per il fissaggio del piano di lavoro sia per il telaio e i piedi antiscivolo. La produzione delle connessioni in acciaio per il piano genera un impatto ambientale di 3,9 kg CO₂-eq, mentre la connessione delle gambe contribuisce con un valore di 3,8 kg CO₂-eq, impatto dovuto prevalentemente alla lavorazione dell'acciaio e ai processi di stampaggio e trattamento superficiale. Tuttavia, grazie all'impiego di questi sistemi di connessione, il banco risulta più flessibile nella configurazione e adattabile a diverse esigenze, permettendo di aggiornare le altezze in base alle classi dimensionali previste. Ciò consente di minimizzare gli sprechi legati all'obsolescenza funzionale e di estendere ulteriormente la durata del prodotto. Un ulteriore vantaggio significativo rispetto ai modelli tradizionali emerge nella fase di distribuzione e trasporto, dove il banco KJ01 dimostra una maggiore efficienza logistica. Grazie alla possibilità di essere trasportato in forma parzialmente assemblata, si riduce il volume occupato nei pallet, con un incremento della capacità di carico pari al 200% rispetto ai banchi tradizionali. Questa ottimizzazione della logistica si traduce in una riduzione sostanziale delle emissioni di CO₂ derivanti dal trasporto, mitigando così gli impatti negativi legati alle spedizioni su lunghe distanze. Dal punto di vista della fase d'uso e della manutenzione, il sistema prodotto-servizio KJ01 si distingue per la capacità di essere riparato e rigenerato direttamente in loco o presso centri specializzati. La possibilità di sostituire selettivamente le parti soggette a usura, come il piano di lavoro o i piedini antiscivolo, consente di prolungare la durata operativa del banco, evitando così la necessità di acquistare nuovi arredi scolastici e riducendo l'impatto ambientale complessivo. Il processo di rigenerazione, che include il recupero di componenti strategici quali l'acciaio e il legno multistrato, comporta un impatto stimato di 16 kg CO₂-eq, dimostrando che il ripristino dei banchi esistenti rappresenta un'alternativa decisamente più sostenibile rispetto alla produzione ex novo. La fase di fine vita del banco KJ01 conferma ulteriormente i benefici derivanti dall'adozione di un modello circolare. La struttura in acciaio, infatti, viene riciclata per l'85%, mentre il piano in legno segue un processo misto che prevede il riutilizzo del 35% dei materiali, l'incenerimento con recupero energetico del 50% e lo smaltimento in discarica del 15%.

Chart Struttura acciaio – gambe KJ01
Production: **GAMBE** 23 kg CO2-eq
Method: IPCC 2007, 100 yr

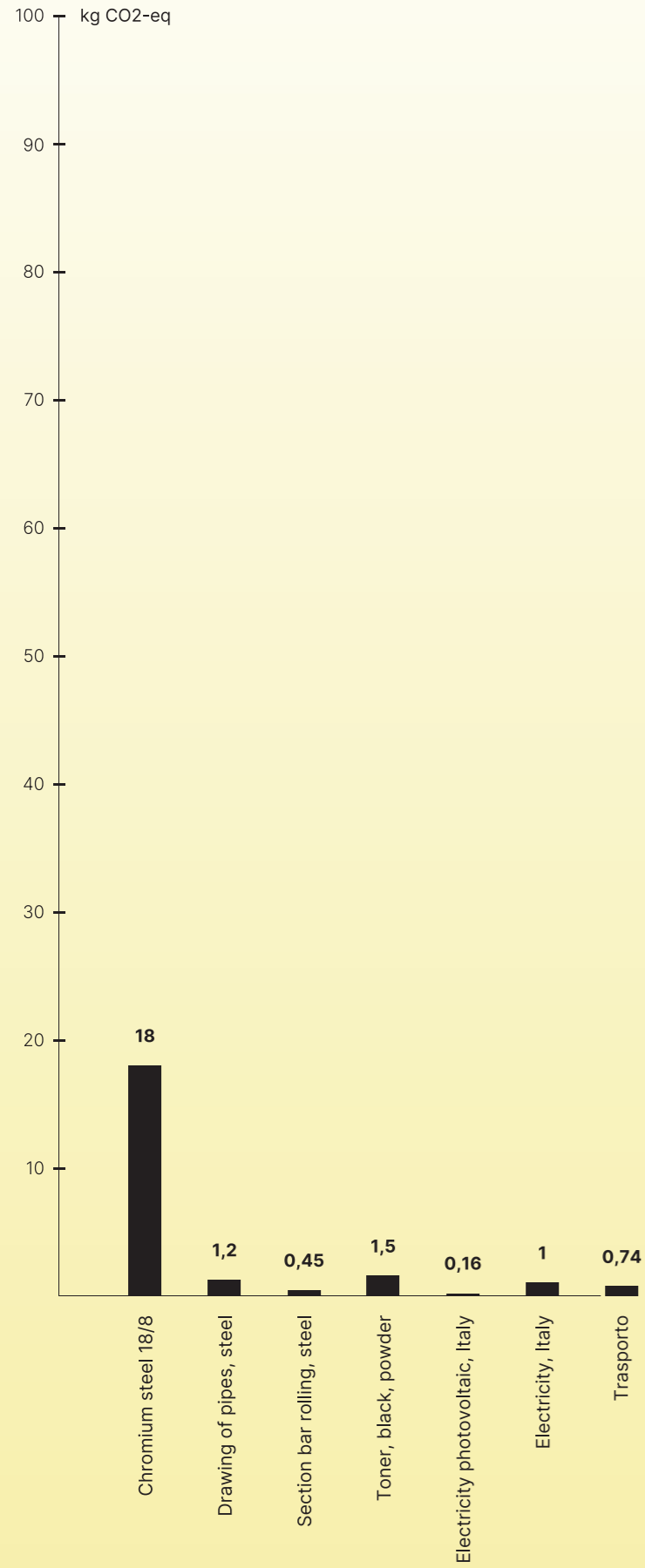


Chart Struttura acciaio – telaietto KJ01
Production: **TELAIETTO** 13 kg CO2-eq
Method: IPCC 2007, 100 yr

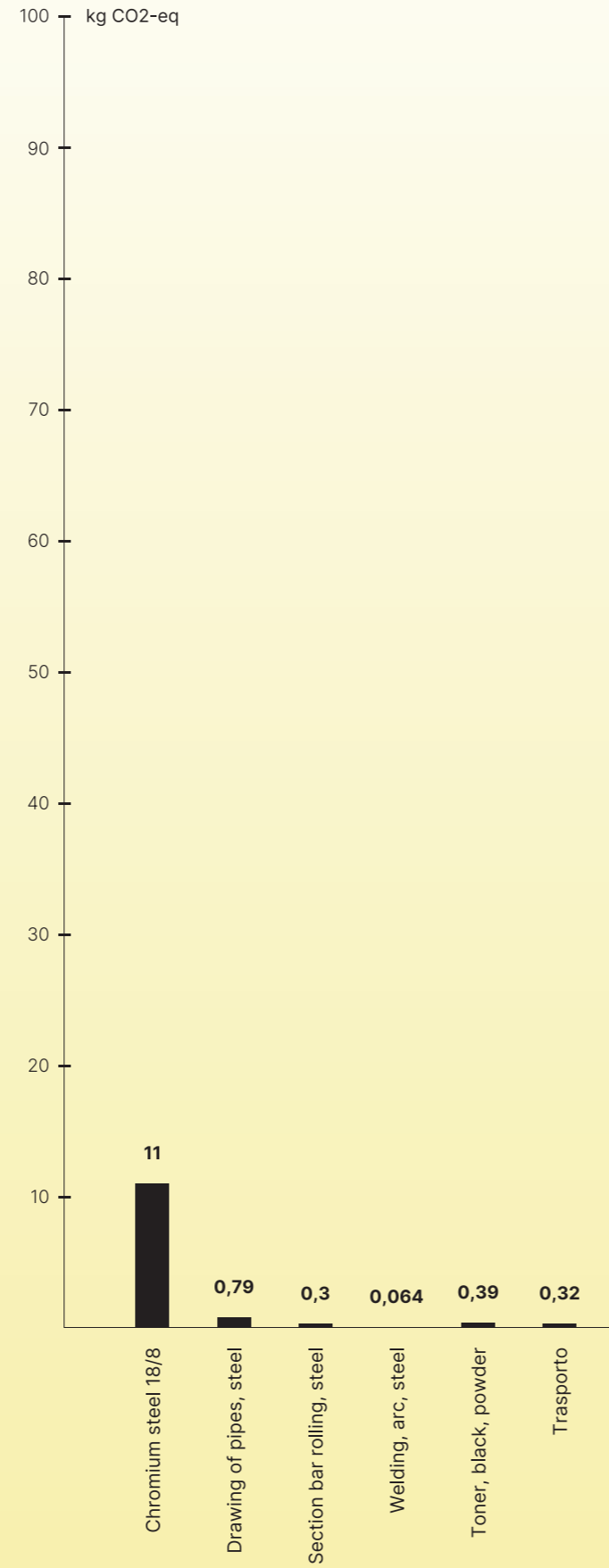


Chart Struttura acciaio – connessione gambe KJ01
Production: **CONNESSIONE GAMBE** 3,8 kg CO2-eq
Method: IPCC 2007, 100 yr

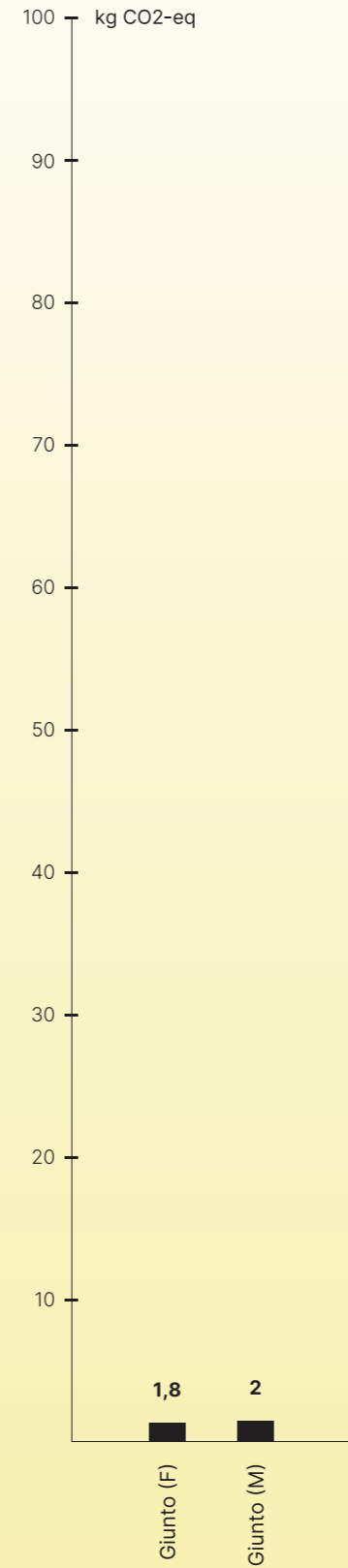
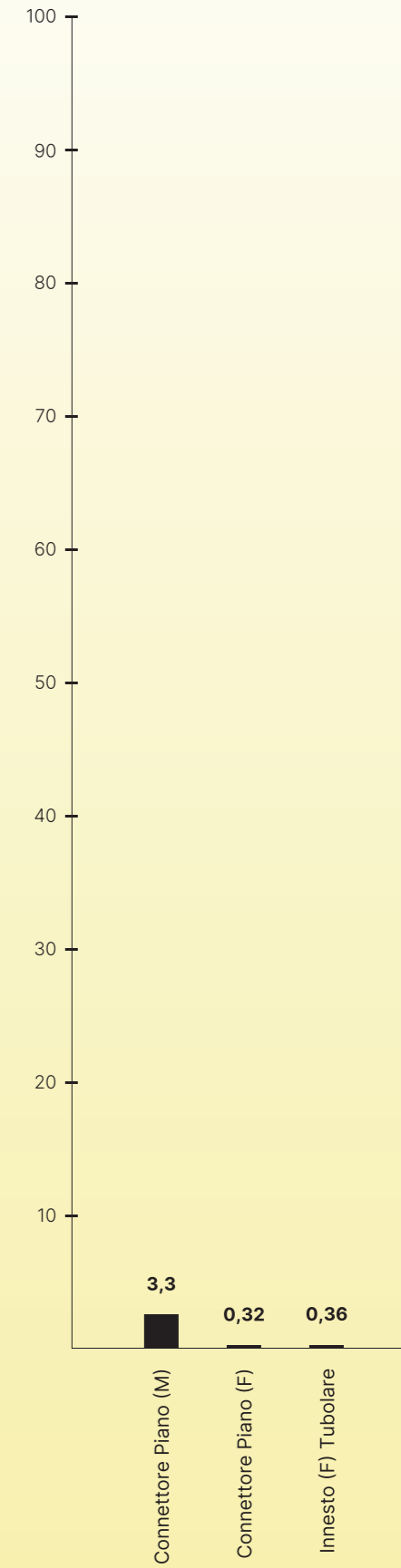


Chart Struttura acciaio – connessione piano KJ01
Production: **CONNESSIONE PIANO** 3,9 kg CO2-eq
Method: IPCC 2007, 100 yr



Disposal	Municipal	Household	Recycling	Incineration	Landfill	Impact
Product	0%	0%*	0%*	0%*	0%*	0,42
BANCO	0%	0%*	0%*	0%*	0%*	0,42
PIANO MULTISTRATO	0%	0%*	35%	50%*	15%*	0,053
Plywood, indoor use	0%	0%	35%	50%	15%	8,3E-5
Kraft paper, unbleached	0%	0%	35%	50%	15%	0,053
Formic acid from methyl formate	0%	*	35%	*	*	0
trasporto	0%	0%	35%	50%	15%	0
piano multistrato	0%	0%	35%	50%	15%	0
nobilizzazione	0%	0%	35%	50%	15%	0
colla	0%	0%	35%	50%	15%	0
STRUTTURA ACCIAIO	0%	0%*	85%	0%	15%	0,011
telaio	0%	0%*	85%	0%	15%	0,0032
Chromium steel 18/8	0%	*	85%	0%	15%	0,0022
Toner, black, powder	0%	*	85%	0%	15%	0,00097
trasporto	0%	0%	85%	0%	15%	0
gamba	0%	0%*	85%	0%	15%	0,0074
Chromium steel 18/8	0%	*	85%	0%	15%	0,0035
Toner, black, powder	0%	*	85%	0%	15%	0,0039
trasporto	0%	0%	85%	0%	15%	0
CONNESSIONE PIANO	0%	0%*	0%	0%	0%	0,21
connettore piano (M)	0%	0%*	85%	0%	15%	0,00036
Chromium steel 18/8	0%	*	85%	0%	15%	0,00036
trasporto	0%	0%	85%	0%	15%	0
connettore piano (F)	0%	0%*	20%	35%	45%	0
Nylon 66	0%	*	0%	0%	0%	0
trasporto	0%	0%	20%	35%	45%	0
innesto (F) tubolare	0%	0%*	20%	35%	45%	0,021
Nylon 66	0%	*	20%	35%	45%	0,021
trasporto	0%	0%	20%	35%	45%	0
CONNESSIONE GAMBE	0%	0%*	85%	0%	15%	0,00043
giunto (F)	0%	0%*	85%	0%	15%	0,0002
Chromium steel	0%	*	85%	0%	15%	0,0002
trasporto	0%	0%	85%	0%	15%	0
giunto (M)	0%	0%*	85%	0%	15%	0,00023
Chromium steel 18/8	0%	*	85%	0%	15%	0,00023
trasporto	0%	0%	85%	0%	15%	0
PIEDINI ANTISCIVOLO	0%	0%*	0%	0%	0%	0,041
innesto (F) tubolare	0%	0%*	20%	35%	45%	0,018
Nylon 66	0%	*	20%	35%	45%	0,018
trasporto	0%	0%	20%	35%	45%	0
piardino (M)	0%	0%*	15%	35%	50%	0,023
Copolymer ABS	0%	*	15%	35%	50%	0,023
trasporto	0%	0%	15%	35%	50%	0
COMPONENTI TERZISTI	0%	0%*	90%	2%	8%	4,7E-5
viteria giunto gambe	0%	0%*	90%	2%	8%	2,9E-5
Chromium steel 18/8	0%	*	90%	2%	8%	2,9E-5
trasporto	0%	0%	90%	2%	8%	0
viteria standard	0%	0%*	90%	2%	8%	1,8E-5
Steel, electric, un- and low-alloyed	0%	*	90%	2%	8%	1,8E-5
trasporto	0%	0%	90%	2%	8%	0
PALLETIZZAZIONE	0%	0%*	0%	0%	0%	0,22
pallet 800x1200	0%	0%*	63,1%	2,1%	38,4%	0,003
Sawn timber, hardwood	0%	0%	63,1%	2,1%	38,4%	0,00072
Particle board, outdoor use	0%	0%	63,1%	2,1%	38,4%	0,00032
Chromium steel 18/8	0%	*	63,1%	2,1%	38,4%	0,002
wrap	0%	0%*	45,5%	44%	10,5%	0,21
Packaging film, LDPE	0%	*	45,5%	44%	10,5%	0,21
DISTRIBUZIONE	0%	0%	0%	0%	0%	0
MANUTENZIONE	0%	0%*	0%*	0%*	0%*	0
Silicone product	0%	*	0%	0%	0%	0
Water deionised	0%	*	*	*	*	0

*: One or more disposal indicator values are unknown.

Disposal	Municipal	Household	Recycling	Incineration	Landfill	Impact
SERVIZIO	0%	0%*	0%	0%*	0%*	0,08
TRASPORTO BANCO	0%	0%	0%	0%	0%	0
RIPRISTINO BANCO	0%	0%*	0%	0%*	0%*	0,08
piano ripristinato	0%	0%*	35%	50%*	15%*	0,053
Plywood, indoor use	0%	0%	35%	50%	15%	8,3E-5
Kraft paper, unbleached	0%	0%	35%	50%	15%	0,053
Formic acid from methyl formate	0%	*	35%	*	*	0
trasporto	0%	0%	35%	50%	15%	0
piano multistrato	0%	0%	35%	50%	15%	0
nobilizzazione	0%	0%	35%	50%	15%	0
colla	0%	0%	35%	50%	15%	0
ripristino gamba	0%	0%*	85%	0%	15%	0,0037
Chromium steel 18/8	0%	*	85%	0%	15%	0,0018
Toner, black, powder	0%	*	85%	0%	15%	0,0019
trasporto	0%	0%	85%	0%	15%	0
ripristino piedino	0%	0%*	15%	35%	50%	0,023
Copolymer ABS	0%	*	15%	35%	50%	0,023
trasporto	0%	0%	15%	35%	50%	0

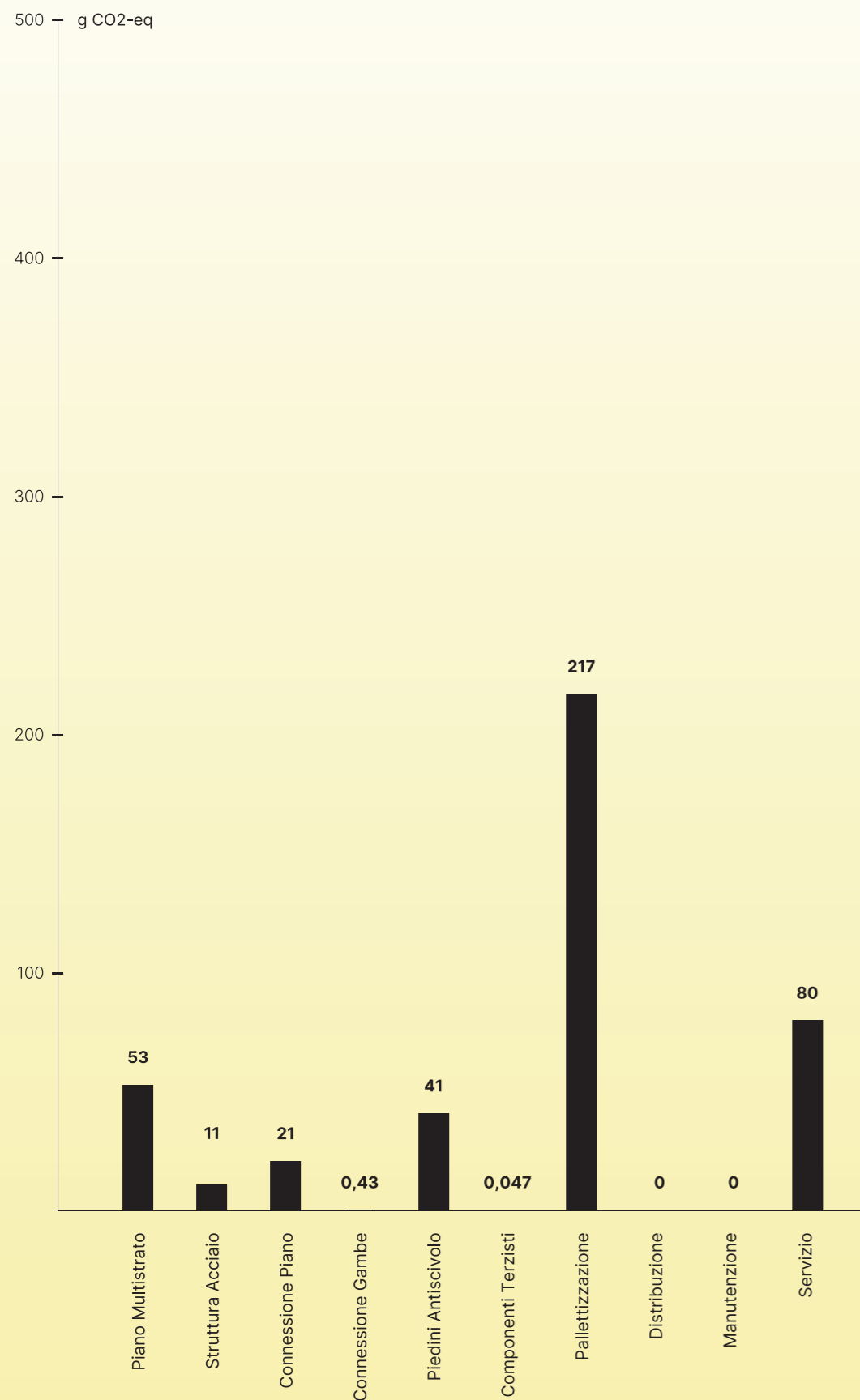
*: One or more disposal indicator values are unknown.

L'elenco dei risultati del disposal riportati in Figura 82 fornisce una rappresentazione sintetica del disposal relativo all'intero processo di produzione del banco monoposto KJ01, evidenziando i flussi in uscita e le percentuali di recupero, incenerimento e smaltimento connesse alle diverse componenti. A complemento, il diagramma illustrato in Figura 83 dettaglia visivamente il disposal specifico del banco KJ01, distinguendo tra materiali riutilizzabili, riciclabili e destinati allo smaltimento definitivo, e mettendo in luce l'efficacia del modello rigenerativo implementato. Rispetto ai banche tradizionali, in cui la difficoltà di disassemblaggio comporta spesso la perdita di materiali riciclabili, il sistema KJ01 permette una gestione più efficiente delle risorse, riducendo sensibilmente la quantità di rifiuti destinati allo smaltimento definitivo. I risultati dell'analisi evidenziano come il banco KJ01, grazie alla sua architettura modulare e al sistema prodotto-servizio associato, sia in grado di ridurre in modo significativo gli impatti ambientali rispetto ai modelli standard. L'adozione di strategie di manutenzione e rigenerazione, l'ottimizzazione della filiera logistica e la possibilità di sostituire selettivamente i componenti danneggiati rappresentano i principali punti di forza di questo approccio innovativo. Tali evidenze confermano la validità della riprogettazione circolare come modello replicabile in altri settori dell'arredo scolastico, delineando una chiara direzione verso un'economia basata sulla sostenibilità e sulla riduzione degli sprechi.

Fig. 82: Disposal relativo al processo di produzione del banco monoposto KJ01.

Chart DISPOSAL banco monoposto KJ01
Disposal: BANCO 0,42 kg CO2-eq
 Method: IPCC 2007, 100 yr.

Fig. 83: Diagramma del disposal banco monoposto KJ01.



#: One or more disposal indicator values are unknown.

8.3. Analisi ambientale comparata: i benefici della riprogettazione circolare

L'adozione di un approccio circolare nella progettazione del banco scolastico KJ01 rappresenta un significativo passo avanti rispetto al modello tradizionale, sia in termini di riduzione degli impatti ambientali sia per l'ottimizzazione delle risorse lungo l'intero ciclo di vita del prodotto. Attraverso un'analisi comparativa basata sulla metodologia del Life Cycle Assessment (LCA), condotta mediante lo strumento ECO-it e il metodo ReCiPe, è stato possibile evidenziare come la riprogettazione del banco in ottica modulare e rigenerativa abbia portato a una drastica riduzione delle emissioni di CO₂ e del consumo energetico rispetto al banco monoposto standard. L'approccio adottato si allontana dal tradizionale modello lineare di produzione e smaltimento, basato sulla sostituzione integrale degli arredi scolastici, e introduce invece una strategia circolare che prevede la possibilità di aggiornamento e rigenerazione dei componenti, contribuendo così alla riduzione dello spreco di materiali e all'allungamento della vita utile del prodotto. Uno degli aspetti centrali di questa riprogettazione riguarda la struttura portante del banco, che, grazie alla modularità e alla connessione reversibile tra gli elementi, consente la sostituzione mirata delle singole parti senza compromettere l'integrità della struttura complessiva. A differenza del banco monoposto standard, caratterizzato da un telaio saldato e da una struttura monoblocco difficilmente smontabile, il banco KJ01 permette di sostituire esclusivamente gli elementi soggetti a usura, come il piano di lavoro e i piedini antiscivolo, garantendo un notevole risparmio di risorse. Questo approccio si traduce non solo in una riduzione della quantità di rifiuti generati a fine vita, ma anche in un minor impatto ambientale legato alla produzione ex-novo di interi banchi. Un ulteriore elemento di distinzione tra i due modelli è rappresentato dall'ottimizzazione della fase di trasporto e stoccaggio. L'analisi comparativa ha dimostrato che il banco KJ01, grazie alla possibilità di essere trasportato in forma disassemblata, permette di incrementare significativamente il numero di unità trasportabili per ogni carico. In particolare, in un veicolo di classe N2 è possibile trasportare fino a 784 banchi KJ01, a fronte dei soli 252 banchi standard, con un incremento pari al 211% della capacità di carico. Questa ottimizzazione logistica si traduce in una riduzione considerevole delle emissioni di CO₂ legate ai trasporti e in un abbattimento dei costi associati alla distribuzione.

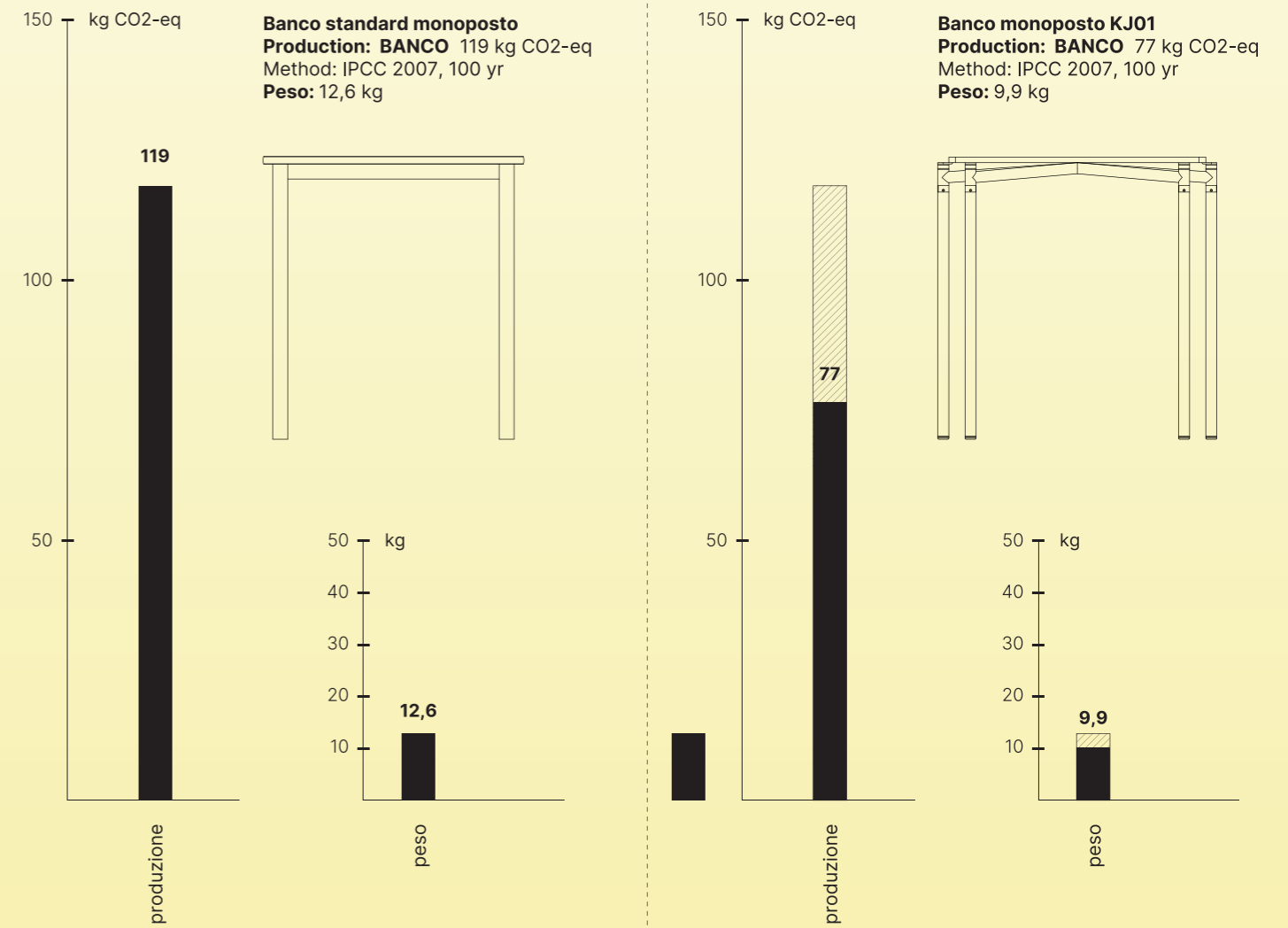
Oltre ai benefici di carattere quantitativo, l'approccio circolare del banco KJ01 introduce anche significativi vantaggi di natura qualitativa, sia per gli istituti scolastici sia per le aziende fornitrici del servizio. L'adozione di un modello di fornitura basato sulla logica del just-in-time consente alle aziende di mantenere a magazzino un numero adeguato di componenti, pronti per essere consegnati alle scuole in caso di necessità, senza dover ricorrere a produzioni su larga scala e riducendo così l'impatto complessivo delle operazioni logistiche. Inoltre, la possibilità di intervenire direttamente sul banco con operazioni di manutenzione e ripristino consente di evitare il problema della dismissione prematura degli arredi scolastici, migliorando la gestione delle risorse a lungo termine

Questi risultati dimostrano come la progettazione circolare del banco KJ01 non si limiti a una semplice ottimizzazione dei materiali e dei processi produttivi, ma rappresenti un cambiamento strutturale nel modo in cui gli arredi scolastici vengono concepiti, utilizzati e gestiti nel tempo. L'integrazione di strategie di modularità, riparabilità e rigenerazione non solo consente di ridurre l'impatto ambientale del prodotto, ma offre anche un modello replicabile per il settore dell'arredo scolastico, con importanti implicazioni per la sostenibilità dell'intero comparto.

L'analisi del ciclo di vita (LCA) condotta sui due modelli di banco scolastico, il banco monoposto standard e il banco KJ01, ha permesso di identificare in modo oggettivo le differenze in termini di impatti ambientali tra le due soluzioni, mettendo in evidenza i benefici derivanti dalla riprogettazione in ottica circolare. Attraverso lo strumento ECO-it 1.4 e l'applicazione del metodo ReCiPe, è stato possibile misurare e confrontare le emissioni di CO₂ equivalente, il cumulative energy demand (CED) e il consumo complessivo di risorse, considerando l'intero ciclo di vita di ciascun banco, dalla produzione fino alla fase di smaltimento. Uno dei parametri più significativi emersi dal confronto riguarda le emissioni di CO₂ equivalente, che nel caso del banco monoposto standard risultano pari a 54 kg CO₂-eq, contro i 36 kg CO₂-eq del banco KJ01, evidenziando una riduzione delle emissioni del 33% rispetto al modello tradizionale (Fig. 84). Tale differenza è riconducibile principalmente alla progettazione modulare del KJ01, che riduce il consumo di materia prima e consente la sostituzione selettiva delle parti soggette a usura, evitando la necessità di produrre un nuovo banco per intero. Dal punto di vista del consumo energetico totale (CED), il banco KJ01 registra un valore di 210 MJ, inferiore rispetto ai 290 MJ richiesti per la produzione del banco standard, con un risparmio energetico di circa 27%. Questo risultato è attribuibile alla maggiore efficienza nei processi produttivi e all'ottimizzazione del ciclo di rigenerazione, che permette di riutilizzare il telaio e sostituire unicamente il piano di lavoro o altri componenti minori, riducendo significativamente la necessità di nuove materie prime. Un altro elemento chiave dell'analisi quantitativa riguarda l'ottimizzazione del trasporto e dello stoccaggio, che ha un impatto significativo sulla riduzione complessiva delle emissioni di CO₂. La progettazione modulare e disassemblabile del banco KJ01 consente di trasportare un numero nettamente superiore di unità per carico: in un camion di classe N2 è possibile trasportare fino a 784 banchi KJ01, rispetto ai soli 252 banchi standard, con un incremento della capacità di carico pari al 211%. Questo significa che, a parità di trasporto, il banco KJ01 consente di ridurre del 66% il numero di viaggi necessari, abbattendo in modo significativo le emissioni legate alla logistica e il consumo di carburante per ogni unità trasportata. Anche la fase di fine vita evidenzia differenze sostanziali tra le due soluzioni. Il banco monoposto standard, a causa della difficoltà di

Fig. 84: Confronto Kg di CO2 e il peso in Kg del banco standard monoposto e del banco KJ01.

separazione dei materiali, vede solo il 50% delle sue componenti effettivamente recuperabili, mentre il restante 50% è destinato allo smaltimento in discarica o all'incenerimento. Al contrario, il banco KJ01, grazie alla sua progettazione modulare, consente il riciclo dell'85% delle sue componenti, con un recupero particolarmente elevato della struttura in acciaio e del piano multistrato. Nel complesso, il confronto quantitativo tra il banco standard e il banco KJ01 evidenzia come quest'ultimo rappresenti un'alternativa nettamente più sostenibile dal punto di vista ambientale, grazie alla riduzione dell'impatto in tutte le fasi del ciclo di vita. Il minore consumo di materie prime, l'ottimizzazione energetica, la riduzione dei volumi di trasporto e l'elevata riciclabilità delle componenti rendono il banco KJ01 un modello di riferimento nell'ottica dell'economia circolare applicata all'arredo scolastico, dimostrando che la riprogettazione dei prodotti in chiave modulare e rigenerativa rappresenta una strategia efficace per abbattere gli impatti ambientali su larga scala.



#: One or more disposal indicator values are unknown.

8.3.2. I benefici di carattere qualitativo del banco KJ01

Oltre agli evidenti vantaggi in termini di riduzione degli impatti ambientali e del consumo di risorse, l'adozione del banco KJ01 introduce una serie di benefici qualitativi che contribuiscono a migliorare l'efficienza del sistema produttivo, la gestione logistica e la flessibilità nell'uso del prodotto. La riprogettazione in chiave modulare, infatti, non solo ottimizza il ciclo di vita del banco dal punto di vista della sostenibilità, ma favorisce anche una gestione più efficiente della distribuzione e dello stoccaggio, migliorando la capacità di risposta alle esigenze delle scuole e dei fornitori di servizi. Uno degli aspetti più significativi in termini di ottimizzazione logistica riguarda la drastica riduzione dei volumi di trasporto e stoccaggio. A differenza del banco monoposto standard, che viene trasportato in forma completamente assemblata, il banco KJ01 può essere spedito disassemblato, sfruttando una configurazione compatta che consente di trasportare un numero molto maggiore di unità in un singolo carico. Come evidenziato nei dati quantitativi, in un camion di classe N2, che nella versione standard può trasportare 252 banchi, è possibile caricare fino a 784 banchi KJ01, con un incremento del 211% nella capacità di carico. Questa riduzione del volume trasportato si traduce in un abbattimento dei costi logistici e in una significativa diminuzione delle emissioni di CO₂ legate alla movimentazione dei prodotti. L'ottimizzazione della gestione delle scorte rappresenta un ulteriore vantaggio qualitativo derivante dall'adozione del banco KJ01.

Grazie alla sua modularità, le aziende che forniscono il servizio possono implementare un sistema di gestione just-in-time, mantenendo a magazzino solo i componenti necessari alla rigenerazione o all'aggiornamento dei banchi già in uso. Questo approccio consente di rispondere in modo più rapido ed efficiente alle esigenze delle scuole, evitando inutili accumuli di stock e riducendo al minimo gli sprechi di materiali. Dal punto di vista della qualità percepita e dell'ergonomia, il banco KJ01 si distingue anche per la sua flessibilità di adattamento alle diverse classi dimensionali, consentendo di configurare l'altezza del banco in base all'età degli studenti. Mentre il banco monoposto standard prevede modelli differenti per ciascuna fascia d'età, il banco KJ01 permette di aggiornare l'altezza della struttura senza sostituire l'intero arredo, riducendo il numero di varianti da produrre e semplificando la gestione degli arredi all'interno delle scuole.

Infine, un ulteriore aspetto qualitativo riguarda la facilità di manutenzione e riparazione, che nel banco KJ01 viene notevolmente migliorata grazie alla possibilità di sostituire singole parti senza dover intervenire sull'intera struttura. Questo significa che, in caso di danni accidentali o usura di specifici componenti come il piano di lavoro o i piedini antiscivolo, le scuole possono effettuare interventi di ripristino in modo rapido ed economico, senza dover procedere alla sostituzione completa del banco. Nel complesso, la riprogettazione del banco KJ01 non solo ha portato a una riduzione significativa dell'impatto ambientale, ma ha anche introdotto miglioramenti sostanziali nella gestione logistica, nell'ergonomia e nella manutenzione del prodotto. Questi elementi rendono il banco KJ01 un modello innovativo per l'arredo scolastico, capace di combinare efficienza, sostenibilità e adattabilità alle esigenze del settore educativo, rappresentando un esempio concreto di applicazione dell'economia circolare nel design di prodotti destinati all'uso pubblico.

Capitolo 9

Conclusioni

- 9.1. Sintesi dei risultati
- 9.2. Linee guida progettuali
- 9.3. Possibili sviluppi futuri della ricerca

Il nono capitolo rappresenta la sintesi e la conclusione del percorso di ricerca intrapreso. Inizialmente, viene fornita una panoramica dei risultati ottenuti, evidenziando come l'adozione del design circolare nel settore dell'arredo scolastico possa portare a significativi benefici ambientali, economici e sociali. I principali contributi teorici e pratici del lavoro sono riassunti, mostrando come le strategie di progettazione circolare, la modularità, la manutenibilità e l'approccio del prodotto come servizio (PaaS) possano essere integrate efficacemente nel ciclo di vita dei prodotti per estenderne la durata e ridurre l'impatto ambientale.

Successivamente, si riflette sulle implicazioni pratiche dei risultati della ricerca per le aziende del settore legno-arredo, con particolare attenzione alle aziende partner del progetto. Vengono discusse le opportunità di implementazione delle strategie di design circolare e i potenziali benefici per la competitività e sostenibilità delle aziende.

9.1. Sintesi dei risultati

La ricerca condotta ha dimostrato come il design circolare, applicato al settore degli arredi scolastici, rappresenti una soluzione concreta per affrontare le sfide della sostenibilità ambientale, economica e sociale. Attraverso un approccio sistemico che integra strategie progettuali e modelli di business innovativi, sono stati sviluppati strumenti teorici e applicazioni pratiche capaci di ridefinire le logiche tradizionali di produzione e consumo.

In primo luogo, l'elaborazione delle linee guida per la progettazione circolare, che valorizzano modularità, riparabilità e aggiornabilità, ha offerto un contributo pratico e replicabile per le aziende del comparto legno-arredo. La modularità consente di progettare arredi come insiemi di componenti facilmente sostituibili, adattabili e aggiornabili, garantendo così una maggiore flessibilità e una vita utile più lunga per i prodotti. Questa caratteristica permette agli arredi di adattarsi alle mutevoli esigenze degli spazi scolastici, riducendo al minimo gli sprechi materiali. La riparabilità, strettamente legata alla modularità, agevola interventi mirati su componenti specifici, evitando la sostituzione dell'intero prodotto, con evidenti vantaggi economici e ambientali. L'aggiornabilità, infine, consente di mantenere i prodotti in linea con le normative o le esigenze funzionali emergenti, rafforzando ulteriormente il legame tra sostenibilità e competitività aziendale.

Queste strategie si integrano perfettamente con il modello di business del prodotto-servizio (Product-as-a-Service, PaaS), che sposta il focus dalla proprietà del bene all'accesso al servizio. Attraverso questo approccio, le scuole possono usufruire di arredi sempre aggiornati e mantenuti, senza dover affrontare gli oneri del fine vita. Le aziende, d'altro canto, mantengono il controllo sul ciclo di vita del prodotto, migliorando l'efficienza operativa e promuovendo una relazione duratura con i clienti. In particolare, la modularità e l'aggiornabilità rendono possibile il ritiro degli arredi a fine contratto per essere riportati in azienda, dove vengono ripristinati e aggiornati per una successiva rivendita a nuovi istituti scolastici. Questo processo crea un ciclo virtuoso che non solo riduce gli sprechi, ma amplia il valore economico del prodotto, generando un flusso di entrate ricorrenti e diversificate.

Il caso studio del banco monoposto KJ_01 ha rappresentato un esempio emblematico di applicazione pratica delle linee guida sviluppate e del modello PaaS, dimostrando come il design circo-

lare possa generare benefici tangibili sia dal punto di vista ambientale sia economico. La progettazione del banco, basata su principi di modularità, disassemblabilità e aggiornabilità, ha permesso di introdurre soluzioni innovative, quali la sostituzione facilitata dei componenti usurati e l'adattabilità alle diverse configurazioni scolastiche. Un elemento chiave del caso studio è stato rappresentato dall'analisi comparata tra il banco monoposto standard e il banco circolare KJ_01, condotta attraverso l'analisi del ciclo di vita (LCA). Questa comparazione, che ha considerato un periodo di 30 anni come confine del sistema, ha fornito dati concreti per valutare l'impatto ambientale delle due soluzioni. I risultati hanno evidenziato come il banco circolare, integrato nel modello PaaS, abbia significativamente ridotto le emissioni di CO2 rispetto al banco tradizionale. Questa riduzione, dovuta principalmente alla possibilità di riparare e aggiornare i componenti anziché sostituire l'intero prodotto, si traduce in un risparmio rilevante in termini di KG di CO2 emessi lungo tutto il ciclo di vita.

In particolare, il banco KJ_01, una volta restituito all'azienda per il ripristino, può essere rigenerato e aggiornato per essere reimmesso sul mercato, prolungando la vita utile e riducendo la necessità di produrre nuovi arredi. Questa caratteristica, combinata con il modello PaaS, ottimizza l'uso delle risorse e riduce ulteriormente l'impatto ambientale. Le operazioni di manutenzione e aggiornamento, rese semplici e rapide dalla progettazione modulare e disassemblabile, garantiscono una gestione efficiente del prodotto e minimizzano gli sprechi materiali, contribuendo al risparmio complessivo di risorse e alle minori emissioni di gas serra.

I dati raccolti attraverso questa analisi comparata non solo confermano l'efficacia del design circolare, ma evidenziano anche come il modello di business PaaS sia in grado di amplificare i benefici ambientali, trasformando la riduzione delle emissioni in un vantaggio competitivo per le aziende. Questa combinazione di progettazione innovativa e gestione circolare permette alle scuole di disporre di arredi scolastici più sostenibili, mentre le aziende possono ottimizzare i processi produttivi e ridurre i costi legati all'approvvigionamento di nuove risorse. La collaborazione con aziende partner quali Vastarredo Industrie e Camillo Sirianni ha rappresentato un elemento cruciale per la validazione delle strategie proposte, permettendo di verificare la loro applicabilità in un contesto industriale

reale. Attraverso un approccio integrato, è stato possibile analizzare la fattibilità tecnica ed economica delle soluzioni progettuali e del modello di business basato sul prodotto-servizio (PaaS). Questa collaborazione ha inoltre fornito un quadro pratico per osservare come i principi del design circolare possano essere implementati nei processi produttivi esistenti, favorendo una transizione verso modelli operativi più sostenibili.

La ricerca ha mostrato come le strategie progettuali di modularità, riparabilità e aggiornabilità, integrate in un modello di business circolare come il PaaS, possano trasformare radicalmente il settore degli arredi scolastici. Le soluzioni proposte non solo migliorano l'efficienza nell'uso delle risorse, ma creano un valore aggiunto sostenibile per le aziende e gli utenti finali. Questo approccio, replicabile anche in altri settori del design, offre un esempio concreto di come l'economia circolare possa tradursi in vantaggi ambientali, economici e sociali, delineando una strada promettente per il futuro della progettazione e della produzione sostenibile.

Alla luce dell'analisi approfondita condotta nel presente lavoro, è possibile definire un insieme strutturato di linee guida progettuali che, se opportunamente integrate sin dalle fasi iniziali di concezione del prodotto, possono contribuire in maniera significativa alla transizione verso un modello di design circolare applicato all'arredo scolastico. Nel dettaglio, le linee guida progettuali elaborate includono:

- la progettazione per la modularità, finalizzata alla scomposizione dell'arredo in unità funzionali autonome, mediante l'impiego di connessioni reversibili e standard dimensionali;
- valorizzazione della durabilità tecnica e funzionale (manutenibilità, riparabilità e aggiornabilità) attraverso componenti facilmente accessibili, smontabili e sostituibili, accompagnati da strumenti operativi a supporto;
- la definizione di ruoli operativi differenziati tra aziende fornitrici e personale scolastico, per una gestione integrata e scalabile delle operazioni di manutenzione e rigenerazione;
- l'adozione del Product-as-a-Service (PaaS), che sposta l'attenzione dal possesso all'uso e prevede contratti scalabili e servizi integrati;
- la selezione di materiali durevoli, riciclabili e conformi ai criteri ambientali minimi (CAM), evitando accoppiamenti irreversibili;
- l'integrazione di sistemi di tracciabilità dei materiali e approcci basati sul Life Cycle Thinking e Life Cycle Assessment (LCA);
- l'impiego di strumenti di modellazione parametrica per simulazioni e ottimizzazione delle configurazioni progettuali;
- la progettazione per la disassemblabilità e rifabbricabilità, tramite riduzione della varietà dei materiali e uso di giunzioni facilmente separabili;
- l'inclusione di strategie di personalizzazione e adattabilità d'uso, per rispondere in modo efficace e flessibile ai cambiamenti del contesto educativo.

Queste linee guida, articolate secondo i principi di modularità, durabilità, sostenibilità ambientale e adattabilità d'uso, non solo risultano conformi alle normative tecniche attualmente vigenti, ma si configurano altresì come strumenti operativi in grado di generare valore lungo l'intero ciclo di vita del prodotto. Progettare per la modularità, costituisce il fondamento per una progettazione orien-

tata sia alla flessibilità funzionale che alla sostituibilità dei componenti. Attraverso l'adozione di sistemi di connessione reversibili e l'impiego di standard dimensionali finalizzati a garantire l'interoperabilità tra le diverse parti, è possibile scomporre il prodotto in unità funzionali autonome. Tale approccio consente non solo di semplificare le operazioni di manutenzione, ma anche di intervenire selettivamente sui singoli moduli senza compromettere la struttura complessiva dell'arredo, determinando una riduzione dei costi e degli sprechi associati all'intervento tecnico e alla sostituzione integrale degli elementi. La seconda linea guida, incentrata sui principi di manutenibilità, riparabilità e aggiornabilità, si propone di estendere la vita utile degli arredi scolastici, riconfigurandoli come elementi dinamici e suscettibili di rigenerazione nel tempo. Nel contesto del modello circolare applicato al settore dell'arredo scolastico la gestione delle operazioni di ripristino coinvolge due principali categorie di utenti finali, ciascuna con ruoli e competenze differenziate. Da un lato, le aziende fornitrici del servizio, che operano secondo il paradigma del Product-as-a-Service (PaaS), assumono la responsabilità della rigenerazione avanzata del prodotto. Queste imprese, mantenendo la proprietà del bene lungo l'intero ciclo di vita, si occupano del ritiro degli arredi, del loro ripristino funzionale e aggiornamento tecnologico, e della successiva reimmissione sul mercato verso nuovi istituti scolastici. Tale processo consente di estendere la vita utile del prodotto, ridurre la produzione di rifiuti e generare valore economico attraverso cicli multipli di utilizzo. Dall'altro lato, un ruolo operativo rilevante è affidato alle istituzioni scolastiche, in particolare al personale tecnico-amministrativo o a figure competenti interne alla scuola, che costituiscono l'utenza quotidiana degli arredi. In presenza di una progettazione modulare e disassemblabile e con il supporto di manuali operativi accessibili, questi utenti sono abilitati a svolgere interventi di manutenzione leggera, come la sostituzione di componenti usurati o la regolazione di elementi adattabili. Queste operazioni, concepite per essere eseguite in autonomia e senza ricorso all'assistenza tecnica specializzata, promuovono una gestione efficiente e decentralizzata del bene, contribuendo alla riduzione dei costi di servizio e al miglioramento della sostenibilità operativa. L'integrazione di questi due livelli di responsabilità — uno centralizzato, gestito dalle aziende, e uno distribuito, affidato agli utenti

scolastici — consente di ottimizzare le strategie di manutenzione e aggiornamento, supportando in maniera efficace la transizione verso modelli circolari resilienti e scalabili. L'adozione di soluzioni progettuali che prevedano la possibilità di aggiornamenti incrementali delle funzionalità, come nel caso della regolazione dell'altezza degli elementi o della sostituzione dei pannelli maggiormente soggetti a usura, così come la possibilità di integrare nuovi moduli in futuro, rappresenta una strategia progettuale particolarmente efficace per assicurare una progressiva adattabilità dell'arredo scolastico. Tale approccio, infatti, consente di rispondere in modo flessibile e continuo alle trasformazioni che interessano il contesto educativo, le cui esigenze sono in costante evoluzione, sia in relazione ai cambiamenti pedagogici, sia rispetto alla diversificazione degli utenti e delle modalità d'uso degli spazi. In questo scenario, assume un rilievo particolare l'adozione del paradigma del Product-as-a-Service (PaaS), il quale comporta un'evoluzione concettuale significativa che sposta il focus dal possesso all'utilizzo del bene, generando ricadute di rilievo sotto il profilo gestionale ed economico. Progettare gli arredi scolastici considerando non solo la loro durabilità fisica, ma anche quella contrattuale, e prevedere fin dalle prime fasi di sviluppo servizi integrati di manutenzione, aggiornamento e sostituzione, permette alle istituzioni scolastiche di ridurre sensibilmente l'onere legato alla gestione diretta del bene, favorendo nel contempo l'adozione di soluzioni più flessibili, adattabili e personalizzabili. In questa prospettiva, la definizione di contratti scalabili e modulabili, pienamente integrati nei sistemi pubblici di approvvigionamento — come il MEPA (Mercato Elettronico della Pubblica Amministrazione) — si configura come un elemento strategico imprescindibile per l'implementazione diffusa del modello PaaS all'interno del settore pubblico. Contestualmente, la selezione accurata di materiali caratterizzati da elevata durabilità, riciclabilità e basso impatto ambientale risulta determinante per il contenimento dell'impronta ecologica associata all'arredo scolastico. In particolare, l'impiego di materiali rispondenti ai criteri ambientali minimi (CAM), preferibilmente derivanti da fonti rinnovabili, unitamente all'eliminazione di accoppiamenti non reversibili tra materiali eterogenei, agevola in modo significativo le operazioni di smontaggio, riciclo e smaltimento a fine vita, contribuendo così all'adozione di un modello realmente sostenibile lungo l'intero ciclo

di vita del prodotto. Un ulteriore elemento strategico risiede nell'adozione di sistemi avanzati di tracciabilità dei materiali, i quali consentono non solo un monitoraggio accurato dei flussi di materia impiegati, ma anche una gestione più efficiente e sostenibile delle risorse lungo l'intero ciclo di vita del prodotto. Affinché tali strumenti risultino realmente efficaci, risulta fondamentale integrare il paradigma del Life Cycle Thinking sin dalle fasi iniziali del concept design, orientando le scelte progettuali verso una visione sistemica e a lungo termine. In tale contesto, l'applicazione metodologica e strutturata del Life Cycle Assessment (LCA) come supporto ai processi decisionali progettuali permette di analizzare in maniera olistica gli impatti ambientali associati al prodotto, nonché di confrontare scenari alternativi, sia seguendo un approccio lineare tradizionale, sia adottando i principi dell'economia circolare. Questo approccio consente di orientare le soluzioni progettuali verso configurazioni più sostenibili e coerenti con le sfide ambientali contemporanee. L'impiego di software di modellazione parametrica si configura come uno strumento strategico di primaria importanza per la simulazione e l'analisi di configurazioni progettuali alternative, rendendo possibile l'ottimizzazione delle scelte in funzione della sostenibilità complessiva del sistema prodotto. Tale approccio, orientato alla flessibilità e all'efficienza, si integra strettamente con strategie progettuali finalizzate alla promozione della disassemblabilità e della rifabbricabilità, intese come pratiche fondamentali per massimizzare il recupero funzionale dei componenti e favorirne il reinserimento in cicli produttivi rigenerativi. A tal fine, risulta essenziale privilegiare l'impiego di connessioni meccaniche facilmente separabili — idealmente non saldate — e ridurre la varietà di materiali utilizzati per ciascun componente, al fine di facilitare le operazioni di smontaggio, manutenzione e rigenerazione. La progettazione di telai e strutture secondo criteri di rifabbricazione consente, inoltre, di estendere significativamente la vita utile degli arredi, contribuendo al contempo alla riduzione dei rifiuti e della domanda di materie prime vergini. In parallelo, l'introduzione di soluzioni che favoriscano la personalizzazione e l'adattabilità d'uso si rivela determinante per accrescere la resilienza del prodotto, permettendone un'efficace risposta alle trasformazioni continue che caratterizzano i contesti educativi contemporanei. La possibilità di generare una pluralità di configurazioni funzionali a partire da

una struttura modulare di base, integrata con elementi regolabili e progettati per essere compatibili con eventuali evoluzioni future del prodotto, rappresenta una strategia progettuale capace di rispondere con flessibilità alle trasformazioni di natura pedagogica, demografica e organizzativa che interessano il sistema scolastico. In questo contesto, l'adozione consapevole e sistemica delle linee guida precedentemente delineate consente di superare una concezione dell'arredo scolastico come mero oggetto d'uso, riconfigurandolo invece come componente strategica di un ecosistema educativo orientato alla sostenibilità, all'efficienza e alla resilienza. Tali principi progettuali, fondati su criteri ambientali, funzionali ed economici, si configurano come strumenti operativi concreti e replicabili, a disposizione di progettisti, aziende e amministrazioni pubbliche che intendano promuovere una transizione ecologica effettiva e sostenere l'adozione di modelli di economia circolare all'interno del settore dell'arredo scolastico.

9.3. Possibili sviluppi futuri della ricerca

Gli sviluppi futuri della presente ricerca si articolano secondo una molteplicità di direttrici, ciascuna delle quali mira ad ampliare l'ambito di applicazione del modello proposto, a consolidarne la validità e a promuoverne la scalabilità. Una prima prospettiva di approfondimento riguarda l'estensione delle strategie di design circolare e del modello di business basato sul paradigma Product-as-a-Service (PaaS) all'intero sistema degli arredi scolastici. Ciò implicherebbe il superamento della focalizzazione esclusiva sui banchi monoposto, includendo anche sedute, armadi, cattedre e ulteriori elementi indispensabili per la configurazione di un ambiente didattico coerente, interconnesso e adattabile. L'ampliamento dell'approccio sistemico permetterebbe non solo una maggiore flessibilità nella gestione degli spazi educativi, ma anche un rafforzamento dell'efficienza e della circolarità delle soluzioni, incrementandone l'efficacia su scala più ampia. Parallelamente, risulta fondamentale promuovere attività di validazione empirica del modello attraverso studi pilota condotti su larga scala, coinvolgendo un numero significativo di istituzioni scolastiche e aziende partner. Tali sperimentazioni consentirebbero di raccogliere dati oggettivi riguardanti il risparmio economico ottenibile nel medio-lungo periodo, la riduzione delle emissioni di CO₂ associate al ciclo di vita del prodotto e l'affidabilità tecnica delle soluzioni modulari. Le evidenze raccolte attraverso tali studi fornirebbero una base solida per la costruzione di business plan dettagliati e per la simulazione di scenari di adozione differenziati in funzione del contesto geografico e delle caratteristiche dell'utenza. Un ulteriore ambito di sviluppo riguarda l'integrazione di tecnologie digitali, in particolare quelle legate all'Internet of Things (IoT), con l'obiettivo di monitorare in tempo reale il ciclo di vita degli arredi e raccogliere dati utili per l'ottimizzazione della manutenzione predittiva. La possibilità di attivare interventi manutentivi basati sull'effettivo stato d'uso dei componenti contribuirebbe a ridurre ulteriormente gli sprechi e a migliorare l'efficienza operativa. In questo contesto, la generazione di digital twins — ossia repliche virtuali degli arredi che evolvono in parallelo al loro stato fisico — potrebbe rappresentare un ulteriore strumento per la gestione intelligente e sostenibile dei prodotti. La diffusione su larga scala del modello PaaS richiede tuttavia il supporto attivo delle istituzioni pubbliche. Una collaborazione strutturata con la pubblica amministrazione potrebbe concretizzarsi attraverso

la definizione di incentivi fiscali, l'elaborazione di linee guida operative e l'integrazione di criteri specifici nei capitolati delle piattaforme di acquisto pubbliche, come il Mercato Elettronico della Pubblica Amministrazione (MePA). L'obiettivo è rendere il modello non solo tecnicamente valido e sostenibile, ma anche accessibile e implementabile all'interno delle procedure amministrative vigenti, agevolando l'adozione da parte delle scuole e degli enti locali. La trasferibilità del modello a contesti diversi da quello scolastico costituisce un ulteriore ambito di interesse. L'applicazione dei principi del design circolare agli arredi per uffici, spazi pubblici o ambienti sanitari aprirebbe nuove opportunità di mercato per le aziende del comparto legno-arredo, consentendo loro di affrontare sfide progettuali complesse e di adeguarsi alle sempre più stringenti normative europee in materia di sostenibilità ambientale. In quest'ottica, la ricerca su materiali innovativi, come i biocompositi o i materiali completamente riciclabili, potrebbe rafforzare ulteriormente la sostenibilità complessiva degli arredi, contribuendo alla riduzione dell'impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita del prodotto. Infine, una riflessione approfondita sull'impatto sociale e culturale delle soluzioni proposte appare imprescindibile. L'introduzione di arredi sostenibili e di modelli di servizio come il PaaS può incidere positivamente sulla percezione degli utenti, promuovendo una cultura della sostenibilità, della manutenzione e della responsabilità condivisa. Tali trasformazioni culturali, se adeguatamente accompagnate da strumenti educativi e percorsi formativi, possono contribuire a consolidare comportamenti virtuosi all'interno della scuola e della società, generando impatti positivi sia sul piano ambientale che su quello civico e formativo.

Bibliografia generale

- Abdullah, A. G., Kamaruddin, A. R., & Ripin, Z. M. (2008). Utilization of Design for Modularity Approach to Identify Product Platform. *Modern Applied Science*, vol. 2, issue 2, pp. 1-10.
- Adrodegari, F., Sacconi, N., Kowalkowski, C., & Valtorta, V. (2015). A structured typology of product-service systems based on different business model elements. *Journal of Cleaner Production*, 66, 514-528.
- Ahmad, S., Wong, K. Y., Tseng, M. L., & Wong, W. P. (2018). Sustainable product design and development: A review of tools, applications, and research prospects. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, pp. 401-405.
- Alonso-Rasgado, T., Thompson, G., & Elfström, B. O. (2004). The design of functional (total care) products. *Journal of Engineering Design*, 15(6), 515-540.
- Andersen, M. S. (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science*, 2(2), 133-140.
- Andrews, D. (2015). The circular economy, design thinking and education for sustainability. *Local Economy*, 30(3), pp. 305-306.
- Badalucco, L., & Chiapponi, M. (2009). Energia e design. *Innovazioni di prodotto per la sostenibilità energetica*. Franco Angeli.
- Bakker, C., Hollander, M., van Hinte, E., & Zijlstra, Y. (2014). Products that last: Product design for circular business models. *TU Delft Library*, p. 45.
- Baldo, G. L., Marino, M., & Rossi, S. (2008). *Analisi del Ciclo di Vita LCA. Gli strumenti per la progettazione sostenibile di materiali, prodotti e processi*. Milano: Edizioni Ambiente.
- Baldwin, C., & Clark, K. (1999). *Design Rules: The Power of Modularity*. MIT Press, pp. 123-128.
- Bargellini, C. (2014). *Il Design Management come leva strategica per le imprese*. Firenze: Firenze University Press.
- Bask, A., Lipponen, M., Rajahonka, M., & Tinnilä, M. (2010). The concept of modularity – Diffusion from manufacturing to service production. *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 21, issue 3, pp. 345-350.
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York: William Morrow.
- Berg, V. D., and Bakker, C. (2015), "A product design framework for a circular economy", in Cooper, T., Braithwaite, N., Moreno, M., and Salvia, G. (eds), *Product Lifetimes and the Environment – Conference Proceedings*, Nottingham Trent University, Nottingham, 17-19 June 2015. *Research in Design Series*, vol. 9, IOS Press, pp. 365-379.
- Bertola, P., & Manzini, E. (2004). *Design multiverso. Appunti di fenomenologia del design*. Edizioni Polidesign.
- Beuren, F. H., Gomes Ferreira, M. G., & Cauchick Miguel, P. A. (2013). Product-service systems: A literature review on integrated products and services. *Journal of Cleaner Production*, 47, 222-231.
- Bhamra, T., & Lofthouse, V. (2007). *Design for sustainability: A practical approach*. Gower Publishing, pp. 68-71.
- Blomsma, F., & Brennan, G. (2017). The emergence of circular economy: A new framing around prolonging resource productivity. *Journal of Industrial Ecology*, 45-48.
- Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), pp. 308-320.
- Bocken, N. M. P., De Pauw, I., Bakker, C., & Van Der Grinten, B. (2016). Circular business models for sustainable value creation. *Journal of Cleaner Production*, 308(320).
- Bocken, N. M. P., De Pauw, I., Bakker, C., & Van Der Grinten, B. (2016). Sustainable Business Models for Circular Economy. pp. 308-320.
- Bocken, N. M. P., Short, S. W., Rana, P., & Evans, S. (2016). A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*, 65, pp. 42-56.
- Boehm, M., & Thomas, O. (2013). Looking beyond the rim of one's teacup: A multidisciplinary literature review of product-service systems in information systems, business management, and engineering & design. *Journal of Cleaner Production*, 51, 245-260.

- Bonsiepe, G. (1993). *Teoria e pratica del disegno industriale* (1 ed. 1975). Edizioni Laterza.
- Bordignon, M. (2009). La modularità e il suo potenziale ruolo nelle imprese – La gestione dell'approccio modulare e le criticità, le opportunità e i rischi legati alla modularizzazione. *Aracne Editrice*, pp. 58-63.
- Boulding, K. E. (1966). The economics of the coming spaceship earth. In H. Jarrett (Ed.), *Environmental quality in a growing economy*, pp. 3-14.
- Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Braungart, M., & McDonough, W. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North Point Press, pp. 56–59.
- Brezet, H., & van Hemel, C. (1997). *Ecodesign: A promising approach to sustainable production and consumption*. United Nations Environment Programme, pp. 45–47.
- Brezet, H., & Van Hemel, C. (1997). *Ecodesign: A promising approach to sustainable production and consumption*. Delft University of Technology & UNEP.
- Brown, T. (2008). Design thinking. *Harvard Business Review*, 86(6), 84-92.
- Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2004). Practical handbook of material flow analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(5), pp. 337–338.
- Bryant, C. R., Sivaramakrishnan, K. L., Van Wie, M., Stone, R. B., & McAdams, D. A. (2004). A Modular Design Approach to Support Sustainable Design. In *Proceeding of the ASME 2004*, Vol. 3d, pp. 909-918.
- Calisto Friant, M., Vermeulen, W. J. V., & Salomone, R. (2020). A typology of circular economy discourses: Navigating the diverse visions of a contested paradigm. *Sustainability Science*, p. 15.
- Cautela, C. (2019). *Design-driven innovation: Creating new meanings through design*. Milano: Politecnico di Milano Press.
- Ceschin, F. (2012). *Sustainable Product-Service Systems: Between Strategic Design and Transition Studies*. Springer.
- Ceschin, F., & Gaziulusoy, I. (2016). Evolution of design for sustainability: From product design to design for system innovation and transition. *Design Studies*, 47, 118–163.
- Chapman, J. (2014). *Meaningful Stuff: Towards Longer Lasting Products*. London: Routledge.
- Chapman, J., & Gant, N. (2007). *Designers, Visionaries and Other Stories: A Collection of Sustainable Design Essays*. London: Earthscan.
- Charter, M. (2018), *Designing for the Circular Economy*, Routledge, London.
- Chen, Y. S., Lai, S. B., & Wen, C. T. (2006). The influence of green innovation performance on corporate advantage in Taiwan. *Journal of Business Ethics*, 67(4), pp. 331–339.
- Codice degli Appalti (D.Lgs. n. 36/2023) (2023). *Nuovo codice degli appalti pubblici*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Suppl. Ordinario n. 67, pp. 1-350.
- Codice del Consumo (2005). Decreto legislativo n. 206/2005. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Suppl. Ordinario n. 235, pp. 1-170.
- Colin de Kwant et al. (2021). Circular economy business models: Opportunities for sustainability in electric vehicles and home appliances. *Journal of Sustainable Development*, pp. 45–67.
- Commissione Europea. (2008). *Appalti pubblici per un ambiente migliore*, COM 2008/400, p. 3.
- Commissione Europea. (2020). *European Circular Economy Action Plan*.
- Commissione Europea. (2020). *Piano d'azione per l'economia circolare - Per un'Europa più pulita e più competitiva*, p. 3.
- Criteri Ambientali Minimi (CAM) (2017). *Criteri ambientali minimi per l'arredo e per i servizi di pulizia per le forniture pubbliche*. Ministero dell'Ambiente, pp. 1-18.
- Daly, H. E. (2007). *Ecological economics and sustainable development: Selected essays of Herman Daly*. Edward Elgar Publishing, pp. 123–130.
- Davies, A., Brady, T., & Hobday, M. (2006). Charting a path toward integrated solutions. *MIT Sloan Management Review*, 47(3), 39-48.
- De los Rios, I. C., Charnley, F., Sundin, E., Lindahl, M., & Ijomah, W. (2017). Design for Circular Economy: Understanding the challenges in implementation. *Procedia CIRP*, 59–62.
- Decreto Legislativo n. 81/2008 (2008). *Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Suppl. Ordinario n. 108, pp. 1-550.
- Direttiva 2001/95/CE (2001). *Direttiva sulla sicurezza generale dei prodotti*. Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, L 11, pp. 4-17.
- Direttiva Ecodesign 2009/125/CE. European Commission (2023). *Official Journal of the European Union*, pp. 15-20.
- DM 26 giugno 1984 (1984). *Norme di sicurezza antincendio per la costruzione e l'esercizio delle attività scolastiche*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 234, pp. 1-7.
- Driessen, P. H., Hillebrand, B., Kok, R. A., & Verhallen, T. M. M. (2013). Green product innovation in small firms: The role of regulatory focus. *Journal of Product Innovation Management*, 30(6), pp. 1083–1097.
- Elia, V., Gnoni, M. G., & Tornese, F. (2017). Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 142, pp. 2741–2751.
- Elkington, J. (1994). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business*. Capstone, p. 78.
- Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*, 34–50.
- Ellen MacArthur Foundation. (2012). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*.
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Circularity indicators: An approach to measure circularity. Methodology & project overview*. Cowes, UK, pp. 22–26.
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Material circularity indicator methodology*.
- EN 16121 (2013). *Furniture - Non-domestic storage furniture - Requirements for safety, strength, durability and stability*. European Committee for Standardization (CEN), pp. 1-30.
- EN 1729 (2015). *Furniture - Chairs and tables for educational institutions - Functional dimensions, safety requirements and test methods*. European Committee for Standardization (CEN), pp. 1-25.
- European Commission. (2019). *Circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe*. Publications Office of the European Union, pp. 14–16.
- European Commission. (2020). *New Circular Economy Action Plan*. Brussels, pp. 159-161.
- European Environment Agency. (1999). *Environmental indicators: Typology and overview*. Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/TEC25>, pp. 1–45.
- Ferrara, M., & Squatrito, A. (2022). Innovative sustainable materials in design: Opportunities and challenges. *International Journal of Architecture, Art & Design*, 11, pp. 288–299.
- Fondazione Symbola & Unioncamere. (2024). *GreenItaly 2024: Un'economia a misura d'uomo contro le crisi*. Fondazione Symbola, p. 256.
- Gaziulusoy, A. I. (2015). A critical review of approaches to design for system innovations and transitions. *Journal of Cleaner Production*, pp. 119–121.
- Gazzetta Ufficiale. (2020). *Supplemento al Supplemento Ordinario n. 38*, p. 7.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 76(2), pp. 762–769.
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, pp. 11–32.
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, pp. 11–32.
- Giarini, O., & Stahel, W. R. (1989). *The limits of certainty: Facing risks in the new service economy*. Dordrecht: Springer.
- Global Footprint Network. (2022). *L'impronta ecologica*.

- Go, T. F., Wahab, D. A., & Rahman, M. N. A. (2015). Design for excellence (DfX): A review and future trends. *Procedia Manufacturing*, 2, 267–280.
- Goedkoop, M. J., van Halen, C. J., te Riele, H. R., & Rommens, P. J. (1999). *Product Service Systems, ecological and economic basics*. Report for the Dutch Ministries of Environment (VROM) and Economic Affairs (EZ), pp. 12-15.
- Goyal, S., Esposito, M., & Kapoor, A. (2016). Circular economy: Potential and challenges. *Technological Forecasting and Social Change*, pp. 40–42.
- Griffiths, P., & Cayzer, S. (2016). Design of indicators for measuring product performance in the circular economy. In *Smart innovation, systems and technologies*, pp. 307–321.
- Grigatti, M., & Peruccio, P. P. (2020). A systemic design perspective for territorial innovation. *Design Issues*, 36(3), 3-17.
- Hapuwatte, B. M., & Jawahir, I. S. (2021). Closed-loop sustainable product design: Towards a circular economy. *Procedia CIRP*, 98, 37-42.
- Hashemi Farahmand, S., & Rahimiaghdas, N. (2024). Circular Economy and Business Transformation in European Furniture Industry. *Proceedings of The International Conference on Business, Management and Economics*, pp. 10-18.
- Hawken, P., Lovins, A., & Lovins, H. (1999). *Natural Capitalism: Creating the Next Industrial Revolution*. Boston: Little, Brown, and Company.
- Ijomah, W. L., McMahon, C. A., Hammond, G. P., & Newman, S. T. (2010). Development of robust design for remanufacturing guidelines to further the aims of sustainable development. *International Journal of Production Research*, vol. 45, issue 18-19, pp. 4513-4536.
- ISO 14001 (2015). *Environmental management systems - Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization, pp. 1-36.
- ISO 9001 (2015). *Quality management systems - Requirements*. International Organization for Standardization, pp. 1-29.
- Jacobs, M. D., Vickery, S. K., and Droge, C. (2007), "The effects of product modularity on competitive performance", in *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 27, issue 10, pp. 1046-1068.
- Keoleian, G. A., and Menerey, D. (1994), "Sustainable Development by Design: Review of Life Cycle Design and Related Approaches", in *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 44, issue 5, pp. 645-668.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 126–129.
- Kuijken, B., Gemser, G., & Wijnberg, N. M. (2017). Product service systems as a strategic design innovation. *International Journal of Design*, 11(1), 55-70.
- Lacy, P. S., and Rutqvist, J. (2015), *The Roots of the Circular Economy*, Palgrave Macmillan, London, pp. 142-144.
- Latouche, S. (2007). *Petit traité de la décroissance sereine*. Mille et une nuits, pp. 15–18.
- Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, pp. 30–32.
- MacArthur, E. (2013). *The great recovery: Investigating the role of design in the circular economy*. RSA, pp. 12–15.
- Machado, N. T., & Morioka, S. N. (2021). Contributions of modularity to the circular economy – A systematic review of literature. *Journal of Building Engineering*, vol. 44, pp. 1-11.
- Manzini, E. (2015). *Design, when everybody designs: An introduction to design for social innovation*. MIT Press, pp. 75–102.
- Manzini, E., & Vezzoli, C. (2003). *Lo sviluppo di prodotti sostenibili: I requisiti ambientali dei prodotti industriali*. Milano: Edizioni Ambiente.
- Manzini, E., & Vezzoli, C. (2007). *Design for environmental sustainability*. Springer, pp. 78–82.
- Manzini, E., and Vezzoli, C. (1998), *Lo sviluppo di prodotti sostenibili – I requisiti ambientali dei prodotti industriali*, Maggioli Editore, Rimini.
- McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. North Point Press.
- McLennan, J. F. (2004). *The philosophy of sustainable design: The future of architecture*. Ecotone Publishing, p. 12.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The limits to growth*. New York: Universe Books.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The Limits to Growth*. Potomac Associates.
- Meier, H., Roy, R., & Seliger, G. (2010). Industrial product-service systems—IPS². *CIRP Annals*, 59(2), pp. 607-627.
- Miller, T. D., and Elgård, P. (1998), "Defining Modules, Modularity and Modularization – Evolution of the Concept in a Historical Perspective", in *Design for integration in manufacturing: Proceedings of the Thirteenth IPS Seminar Held at Fuglsø, Denmark on 20-21, April 1998*, Fuglsoe.
- Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2022). *Criteri Ambientali Minimi per la Fornitura di Arredi per Interni*. Gazzetta Ufficiale, pp. 145-158.
- Mital, A., Desai, A., Subramanian, A., and Mital, A. (2014), "Designing for assembly and disassembly", in Mital, A., Desai, A., Subramanian, A., and Mital, A. (eds), *Product Development A Structured Approach to Consumer Product Development, Design, and Manufacture*, Elsevier, Amsterdam, pp. 159-202.
- Mont, O. K. (2002). Clarifying the concept of product–service system. *Journal of Cleaner Production*, 10(3), 237-245.
- Moreno, M., De los Rios, C., Rowe, Z., & Charnley, F. (2016). A conceptual framework for circular design. *Sustainability*, pp. 582–584.
- Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). *The Circular Economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context*. *Journal of Business Ethics*, 35–37.
- Newcomb, P. J., Bras, B., and Rosen, D. W. (1998), "Implications of Modularity on Product Design for the Life Cycle", in *Journal of Mechanical Design*, vol. 120, issue 3, pp. 483-490.
- Nußholz, J. L. (2017). Circular business models: Defining a concept and framing an emerging research field. *Sustainability*, 9(10), 1810.
- Papanek, V. (1973). *Design for the real world: Human ecology and social change*. Pantheon Books.
- Papanek, V. J. (1995). *The Green Imperative: Natural Design for the Real World*. Thames and Hudson eBooks, p. 87.
- Peeters, J., Vanegas, P., Dewulf, W., and Duflou, J. (2012), "Design for demanufacturing: a life cycle approach", in *I-SUP2012 Innovation for Sustainable Production*, Bruges, Belgium, May 7-9, 2012. pp. 6-9.
- Peruccio, P. P., Grigatti, M., & Ferrara, M. (2018). Systemic design: Strategic and sustainable approaches. *Design Journal*, 21(6), 779-795.
- Pieroni, M. P. P., McAloone, T. C., & Pigosso, D. C. A. (2019). Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches. *Journal of Cleaner Production*, 215, 198-216.
- Pietroni, L., Mascitti, J., Paciotti, D., & Di Stefano, A. (2024). New scenarios for sustainable design toward an integrated approach between bio-inspired design, biomimetic materials, generative parametric modelling, additive manufacturing. In C. Gambardella (Ed.), *For Nature/With Nature: New Sustainable Design Scenarios*. Springer Series in Design and Innovation, vol. 38, 618–624.
- Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular economy: Measuring innovation in the product chain. *PBL Netherlands Environmental Assessment Agency*, pp. 24–27.
- Regolamento REACH (CE n. 1907/2006) (2006). *Regolamento concernente la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche*. Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, L 396, pp. 1-849.
- Rocha, C. S., Antunes, P., & Partidário, P. (2019). Design for sustainability models: A multiperspective review. *Sustainability*, pp. 1428–1445.
- Rossi, M., Germani, M., & Zamagni, A. (2020). Review of circular economy in the framework of sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118594.
- Ryan, C. (2014). Future visions of design systems and sustainability: Systemic design as catalyst for sustainable innovation. *Journal of Cleaner Production*, 73, 27-35.
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., & Cluzel, F.

- (2017). How to assess product performance in the circular economy? Proposed requirements for the design of a circularity measurement framework. *Recycling*, 2(1), p. 6.
- Salhieh, S. M., & Kamrani, A. K. (1999). Macro level product development using design for modularity. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 15, issue 4, pp. 319-329.
- Sanderson, S. W., & Uzumeri, M. (1997). *Managing Product Families*. McGraw-Hill/Irwin, New York.
- Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2012). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, 15, pp. 281-299.
- Soh, S., Ong, S., & Nee, A. Y. C. (2014). Design for Disassembly for Remanufacturing – Methodology and Technology. In T. K. Lien (Ed.), *Procedia 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, vol. 15, pp. 407-412.
- Sonego, M., Echeveste, M. E. S., & Debarba, H. G. (2018). The role of modularity in sustainable design – A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, pp. 196-209.
- Stahel, W. R. (2010). *The Performance Economy*. Palgrave Macmillan.
- Stahel, W. R. (2016). *The circular economy: A user's guide*. Routledge, pp. 435-438.
- Su, B., Heshmati, A., Geng, Y., & Yu, X. (2013). A review of circular economy practices. *Journal of Cleaner Production*, pp. 215-217.
- Tamborrini, P. (2020). Design for sustainability: A systemic approach to innovation and development. *Journal of Sustainable Design*, 3(1), 15-32.
- Thackara, J. (2005). In the bubble: Designing in a complex world. MIT Press, p. 78.
- Tischner, U. (2001). *Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future*. Routledge, p. 192.
- Tukker, A. (2004). Eight types of product-service system: Eight ways to sustainability? *Experiences from SusProNet*. *Business Strategy and the Environment*, 13(4), 246-260.
- Tukker, A. (2015). Product services for a resource-efficient and circular economy—A review. *Journal of Cleaner Production*, 97, 76-91.
- Tukker, A., & Tischner, U. (2006). *New business for old Europe: Product-service development, competitiveness and sustainability*. Sheffield: Greenleaf Publishing.
- Ulrich, K. (1994). Fundamentals of Product Modularity. In Dasu, S. & Eastman, C. (Eds.), *Management of Design*. Springer, Dordrecht, pp. 219-231.
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2004). *Product Design and Development*. McGraw-Hill.
- Umeda, Y., Fukushige, S., Tonoike, K., and Kondoh, S. (2008), "Product modularity for life cycle design", in *CIRP Annals*, vol. 57, issue 1, pp. 13-16.
- UNESCO. (2007). *Education for sustainable development: A global perspective*. UNESCO Publishing, p. 45.
- UNI EN 13430. Requisiti di riciclabilità degli imballaggi. Standard tecnico europeo, p. 154.
- UNI EN 16640. Plastica a base biologica. Standard tecnico europeo, pp. 150-151.
- UNI EN ISO 14040. Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita. Standard tecnico europeo, p. 147.
- Vandermerwe, S., & Rada, J. (1988). Servitization of business: Adding value by adding services. *European Management Journal*, 6(4), 314-324.
- Verganti, R. (2008). Design-driven innovation: Changing the rules of competition by radically innovating what things mean. *Harvard Business Review*, 86(12), 84-92.
- Verganti, R. (2018). *Overcrowded: Designing meaningful products in a world awash with ideas*. Cambridge: MIT Press.
- Vezzoli, C. (2005). Design per la sostenibilità: Una disciplina (sempre più) articolata. In C. Vezzoli & P. Tamborrini (Eds.), *Atti del convegno: Formazione, sviluppo sostenibile e design: strategie e strumenti per la Decade*, pp. 1-2. CLUP Milano.
- Vezzoli, C., & Kohtala, C. (2018). *Design for sustainability: A step-by-step approach*. Springer, pp. 90-105.
- Vezzoli, C., & Manzini, E. (2007). *Design for Environmental Sustainability*. Springer.
- Vezzoli, C., Ceschin, F., Diehl, J. C., & Kohtala, C. (2015). Sustainable product-service systems: Between strategic design and transition studies. *Design Issues*, 31(3), 20-34.
- Vezzoli, C., Kohtala, C., Srinivasan, A., et al. (2014). *Product-service system design for sustainability*. Sheffield: Greenleaf Publishing.
- WCED (World Commission on Environment and Development). (1987). *Our Common Future*.
- Winkler, H. (2011). Closed-loop economy and circular design principles. *EcoDesign Press*, pp. 112-115.
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford University Press, pp. 43-46.
- Yan, J., and Feng, C. (2013), "Sustainable design-oriented product modularity combined with 6R concept: a case study of rotor laboratory bench", in *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 16, issue 1, pp. 95-109.
- Yang, D., & Vezzoli, C. (2024). Designing Environmentally Sustainable Furniture Products: Furniture-Specific Life Cycle Design Guidelines and a Toolkit to Promote Environmental Performance. *Sustainability*, pp. 15-26.
- Zacho, K. O., Mosgaard, M. A., & Riisgaard, H. (2018). Capturing uncaptured values: A game changer in sustainable product design and waste prevention. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 297-305.