

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in
INGEGNERIA DEI MATERIALI

Tesi di Laurea Magistrale

**Calcolo degli impatti ambientali di prodotti
riciclati: ottimizzazione della Circular
Footprint Formula (CFF) e integrazione con
indicatori di circolarità**

Caso studio sulla fibra di lana riciclata MWool® prodotta da Manteco® SpA



**Politecnico
di Torino**

MANTECO®
MANTELLASSI COMPAGNIA TESSILE

Supervisor

Ing. Bianco Isabella
Dr. Picerno Giuseppe

Candidato

Morvidoni Laura

marzo 2024

INDICE

Introduzione	1
1. Transizione verso un'economia circolare nell'industria tessile e dell'abbigliamento (T&C).....	3
1.1. L'industria tessile: contesto ambientale, tendenze produttive e settore laniero	3
1.1.1. <i>Contesto nel quadro ambientale</i>	3
1.1.2. <i>Tendenze ed obiettivi nella produzione di fibre tessili</i>	5
1.1.3. <i>Focus sul settore laniero: stime e proprietà</i>	6
1.2. Dalla fibra allo smaltimento del rifiuto tessile.....	8
1.2.1. <i>L'impatto dell'industria tessile nell'era della sostenibilità</i>	8
1.2.2. <i>Dal filato al tessuto: le fasi chiave della produzione tessile</i>	8
1.2.3. <i>Tipologie di consumi e di rifiuti generati</i>	11
1.2.4. <i>I diversi approcci al riciclo</i>	12
2. Metodologie di valutazione del ciclo di vita.....	15
2.1. L'LCA come strumento in campo sostenibilità	15
2.1.1. <i>La promozione di una strategia per l'analisi degli impatti ambientali</i>	15
2.1.2. <i>Un percorso in quattro fasi</i>	16
2.1.3. <i>Gli approcci di LCA attribuzionale e consequenziale</i>	17
2.1.4. <i>La complessa analisi del ciclo di vita dei prodotti tessili lanieri</i>	18
2.2. L'EF come risposta alle sfide lasciate dall'LCA.....	21
2.2.1. <i>Una moderna, coerente e completa valutazione ambientale</i>	21
2.2.2. <i>Un approccio modulare tra le varie parti</i>	22
2.3. Descrizione delle PEFCR A&F	23
2.3.1. <i>Timeline e processo di progettazione</i>	23
2.3.2. <i>Una prevenzione del greenwashing in aggiornamento</i>	25
2.3.3. <i>Aspetti chiave per la realizzazione di uno studio PEFCR</i>	26
3. Modellazione del riciclo nella valutazione del ciclo di vita.....	29
3.1. Panoramica dei metodi di allocazione per il fine vita	29
3.2. Analisi dei metodi di assegnazione più rilevanti.....	30
3.2.1. <i>Approccio 100:0</i>	30
3.2.2. <i>Approccio 50:50</i>	32

3.2.3. <i>La formulazione della guida PEF: la Circular Footprint Formula (CFF)</i>	33
3.2.4. <i>Approccio linearmente digressivo (LDA)</i>	39
4. Caso studio: MANTECO®	40
4.1. <i>La sostenibilità di Manteco®: un esempio di eccellenza tessile</i>	40
4.1.1. <i>Il contributo alla sostenibilità ambientale</i>	40
4.1.2. <i>I prodotti cardine</i>	41
4.2. <i>Analisi del caso studio</i>	47
4.2.1. <i>Confronto degli impatti ottenuti con le formule di allocazione</i>	47
4.2.2. <i>Andamento dell'impatto in funzione dei parametri</i>	51
4.2.3. <i>Nuova descrizione del fattore di qualità</i>	57
4.2.4. <i>Applicazione dell'approccio iterativo per valutare il fattore di qualità</i>	61
4.3. <i>Integrazione tra gli strumenti di misura della circolarità per uno sviluppo futuro</i>	64
4.3.1. <i>Introduzione al Material Circularity Indicator (MCI)</i>	64
4.3.2. <i>Valutazione dell'MCI nel modello dell'economia circolare</i>	66
4.3.3. <i>Applicazione della misura della circolarità al caso studio Manteco®</i>	71
4.3.4. <i>Collaborazione tra un tool e una formula</i>	75
Conclusioni.....	78
Bibliografia.....	82

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1 Panoramica delle iniziative del pacchetto Economia Circolare.	2
Figura 2 Produzione di prodotti tessili dell'UE-27 nel 2020 (a) in milioni di tonnellate e (b) in miliardi di euro.	3
Figura 3 Andamento della produzione globale di fibre dal 1980 al 2025 in milioni di tonnellate.	5
Figura 4 (a) Produzione globale di lana vergine per paese nel 2021 e (b) quota di mercato per paese dei programmi certificati di lana.	7
Figura 5 Diagramma di flusso della supply chain per tessile e abbigliamento.	9
Figura 6 Schematizzazione di riciclo (a) <i>open-loop</i> , (b) <i>closed-loop</i> e (c) <i>cradle-to-cradle</i> .	13
Figura 7 Workflow generale per uno studio LCA.	16
Figura 8 Schematizzazione del ciclo di vita della lana dalla culla alla tomba.	19
Figura 9 Panoramica dei metodi analizzati tramite dieci criteri (✓=criteri soddisfatti, √=criteri parzialmente soddisfatti e X=criteri non soddisfatti).	30
Figura 10 L'approccio di cut-off come descritto nel sistema EPD International.	31
Figura 11 Illustrazione del metodo 50:50 aggiustato per la qualità ed applicato al prodotto 2.	33
Figura 12 Illustrazione dell'applicazione della CFF al prodotto 2 con fattore A=0.5.	35
Figura 13 Schema dell'approccio LD per un sistema a cascata di prodotti con n=3.	39
Figura 14 Risparmi ambientali in risorse nel 2022.	40
Figura 15 Sustainable Development Goals (SDGs) sostenuti da Manteco®.	41
Figura 16 Diagramma di flusso della filiera produttiva delle fibre ReviWool®.	43
Figura 17 Diagramma di flusso della filiera produttiva delle fibre MWool®.	46
Figura 18 Sequenza da seguire per la scelta dei parametri.	47
Figura 19 Confronto impatti MWool®.	48
Figura 20 Confronto impatti MWool® con $R_1=0.9$.	49
Figura 21 Confronto impatti ReviWool®.	50
Figura 22 Schema generale del ciclo di vita di un prodotto.	52
Figura 23 Andamento $E(R_1)$ per caso closed-loop assunti $R_2=1$, $Q_{sin}/Q_p=1$ e $Q_{sout}/Q_p=0.5$.	52
Figura 24 Andamento $E(R_1)$ per caso open-loop assunti $R_2=1$, $Q_{sin}/Q_p=1$ e $Q_{sout}/Q_p=0.5$.	53
Figura 25 Andamento $E(R_2)$ per caso closed-loop assunti $R_1=1$, $Q_{sin}/Q_p=1$ e $Q_{sout}/Q_p=0.5$.	53
Figura 26 Andamento $E(R_2)$ per caso open-loop assunti $R_1=1$, $Q_{sin}/Q_p=1$ e $Q_{sout}/Q_p=0.5$.	54
Figura 27 Andamento $E(Q_{sin}/Q_p)$ per caso closed-loop assunti $R_1 = R_2 = 1$ e $Q_{sout}/Q_p = 0.5$.	54
Figura 28 Andamento $E(Q_{sin}/Q_p)$ per caso open-loop assunti $R_1=R_2=1$ e $Q_{sout}/Q_p=0.5$.	54
Figura 29 Andamento $E(Q_{sout}/Q_p)$ per caso closed-loop assunti $R_1=R_2=1$ e $Q_{sin}/Q_p=1$.	55
Figura 30 Andamento $E(Q_{sout}/Q_p)$ per caso open-loop assunti $R_1 = R_2 = 1$ e $Q_{sin}/Q_p = 1$.	55
Figura 31 Andamento $E(R_1)$ per caso closed-loop assunti $R_2=0.97$, $R_3=0.105$, $Q_{sin}/Q_p=1$ e $Q_{sout}/Q_p=0.5$.	56
Figura 32 Andamento $E(R_2)$ per caso closed-loop assunti $R_1=1$, $R_3=0.105$, $Q_{sin}/Q_p=1$ e $Q_{sout}/Q_p=0.5$.	56
Figura 33 Andamento $E(R_3)$ per caso closed-loop assunti $R_1=1$, $R_2=0.97$, $Q_{sin}/Q_p=1$ e $Q_{sout}/Q_p=0.5$.	56

Figura 34 Andamento $E(Q_{\text{sin}}/Q_p)$ per caso closed-loop assunti $R_1=1$, $R_2=0.97$, $R_3=0.105$ e $Q_{\text{sout}}/Q_p=0.5$.	57
Figura 35 Andamento $E(Q_{\text{sout}}/Q_p)$ per caso closed-loop assunti $R_1=1$, $R_2=0.97$, $R_3=0.105$ e $Q_{\text{sin}}/Q_p=1$.	57
Figura 36 Riciclo meccanico di capi tessili in lana basato su riciclo a ciclo aperto e chiuso.	59
Figura 37 Andamento del fattore di qualità in entrata vs numero di cicli di riciclo.	61
Figura 38 Andamento del fattore di qualità in uscita vs numero di cicli di riciclo.	61
Figura 39 Andamento dell'impatto di M Wool® yarn (assunti $A=0.8$, $R_1=R_2=1$) vs numero di cicli di riciclo.	62
Figura 40 Andamento dell'impatto di Revi Wool® fabric (assunti $A=0.8$, $R_1=1$, $R_2=0.97$ e $R_3=0.105$) vs numero di cicli di riciclo.	62
Figura 41 Schema dell'economia circolare: il "diagramma farfalla".	65
Figura 42 Trend del tasso di riciclo complessivo nelle principali cinque economie dell'UE.	67
Figura 43 Rappresentazione schematica dei flussi di materiali tecnici.	67
Figura 44 Confronto tra l'indicatore materiale di circolarità dell'azienda e dei prodotti.	73
Figura 45 Andamenti dell'MCIP al variare di F_R e C_R rispetto a X , con $E=0.5$ e $E=1$.	74
Figura 46 Andamenti dell'MCIP al variare di X rispetto a F_R , con $E=0.5$ e $E=1$.	75
Figura 47 Andamenti dell'MCIP al variare di F_R e C_R rispetto a E .	75
Figura 48 Dati richiesti per il calcolo dell'MCI.	76

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1 Principali problematiche ambientali legate alle fasi del ciclo di vita del prodotto.	4
Tabella 2 Elenco delle migliori pratiche secondo il NRDC.	11
Tabella 3 Esempio di opzioni di miglioramento trattate da uno studio LCA per la riduzione degli impatti ambientali del ciclo di vita di un prodotto tessile.	18
Tabella 4 Riepilogo delle sfide, delle conseguenze sulla comparabilità e delle proposte avanzate.	37
Tabella 5 Dichiarazione di contenuto del prodotto MWool®.	45
Tabella 6 Dati assunti per la trattazione analitica.	47
Tabella 7 Risultati relativi al fattore di qualità al variare del numero di cicli di riciclo per il caso d'esempio.	63
Tabella 8 Indicatori che misurano la circolarità di un prodotto.	68
Tabella 9 Definizione delle principali variabili.	70
Tabella 10 Schema riassuntivo delle formule da applicare per il calcolo finale dell'MCI.	70
Tabella 11 Specifiche tecniche dei prodotti Manteco® in analisi.	72
Tabella 12 Risultati di MCI _P per i prodotti di riferimento.	74

ABSTRACT

La transizione verso un'economia circolare rappresenta una risposta cruciale alle sfide ambientali, soprattutto nel caso dell'industria tessile, notoriamente ad alto impatto ambientale. La presente tesi si propone di contribuire a tale transizione attraverso l'analisi e l'ottimizzazione di strumenti come le linee guida *Product Environmental Footprint* (PEF) e la *Circular Footprint Formula* (CFF), con un particolare focus sul settore dell'abbigliamento e delle calzature.

Il lavoro si è rivolto alla misura della sostenibilità nell'industria tessile utilizzando la guida PEF, nello specifico, alla definizione di una metodologia per il corretto calcolo degli impatti ambientali. Tuttavia, emerge la sfida legata alla trattazione della qualità del prodotto durante i cicli di riciclo, sottolineando l'importanza di considerare attentamente la qualità delle fibre e gli effetti del numero dei cicli di lavorazione.

L'elaborato affronta le lacune presentate nello schema PEF, rivolgendosi nello specifico alla valorizzazione delle strategie di riciclo dei materiali nel settore tessile. Dopo aver condotto un'analisi dettagliata della CFF, strumento per valutare gli scenari di fine vita, riferita al caso studio delle fibre di lana riciclata MWool® di Manteco®, è stata proposta un'implementazione tecnica del parametro di qualità per arricchire il *PEF score* finale. Quest'ultimo viene presentato come un valore trasparente, utile sia per guidare le scelte sostenibili dei consumatori che come strumento di marketing per i marchi.

Inoltre, lo studio riflette sulle sfide e opportunità del settore tessile, sottolineando l'importanza di sviluppare metodi di valutazione avanzati e misure di circolarità innovative. Nello specifico, l'integrazione delle tecnologie digitali, insieme all'uso combinato del *Material Circularity Indicator* (MCI) e della CFF, è proposta come un approccio per migliorare la valutazione dell'impatto ambientale e promuovere l'aspetto di circolarità.

In sintesi, la ricerca indica che la strada verso un'industria tessile sostenibile richiede innovazione, collaborazione e particolare attenzione alla qualità dei materiali riciclati.

INTRODUZIONE

Nel corso dell'ultimo decennio, e ancora di più recentemente, il modello di economia lineare non risulta essere particolarmente adatto per la realizzazione della cosiddetta transizione ecologica, parte integrante dello sviluppo sostenibile, a cui si stanno rivolgendo numerosi settori industriali. Il passaggio graduale verso un'economia circolare di interesse implica l'introduzione di numerose strategie, quali la progettazione *zero-waste*, l'aumento della vita di un prodotto, ma anche il riciclo di risorse e le metodologie di recupero dell'oggetto materiale. L'idea alla base consiste nell'applicazione del principio di "riduzione, riutilizzo e riciclo" del prodotto lungo il suo intero ciclo di vita. In particolare, questa transizione è supportata dalla Commissione Europea che ha redatto un piano d'azione con obiettivi chiari e definiti che devono essere raggiunti da parte degli Stati membri. Il processo per raggiungere la transizione non è standardizzato quindi occorre che le politiche da attuare siano affini allo specifico settore industriale.

Documenti come *A Strategic Innovation and Research Agenda for the European Textile and Clothing Industry* pubblicato da Textile ETP, sulla base dell'*European Green Deal* (2019) redatto dalla CE, evidenziano dei punti cardine da rispettare affinché il passaggio a questo nuovo tipo di economia sia completo. Textile ETP ha mostrato nuove tendenze di innovazione in termini di:

- digitalizzazione dei prodotti lungo l'intera *supply chain* dalla fase di progettazione all'interazione consumatore/utente finale;
- sostenibilità, circolarità ed efficienza delle risorse materiali e processi operativi richiedendo un'adeguata trasparenza;
- modelli aggiornati di business e di consumo legati ad un'economia di condivisione [1].

D'altra parte, il *Green Deal* per l'Unione Europea e i suoi cittadini dettante strategie mirate ad efficientare l'UE è integrato nell'Agenda 2030 della CE per lo sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite. L'obiettivo a lungo termine è il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050 attraverso una graduale riduzione del livello di emissioni nette di gas serra e una decarbonizzazione del sistema energetico in materia di clima. Infatti, circa il 75% delle emissioni dei GHG sul suolo europeo sono dovute alla produzione e all'utilizzo energetico nei diversi settori economici. La transizione per un'economia circolare ottimizzata richiede infrastrutture energetiche innovative che rendano partecipi anche i consumatori e l'adozione di pratiche che sostengano la progettazione circolare di prodotti sostenibili.

Per raggiungere questi obiettivi, è necessario concentrarsi su settori ad alta intensità di risorse come quello tessile, edile, elettronico e plastico. Ciò implica la riduzione dei rifiuti, il recupero del valore economico dei materiali e la limitazione dell'impatto ambientale, ad esempio, attraverso la riduzione degli imballaggi e l'uso responsabile di sostanze chimiche. La cooperazione tra le catene del valore e l'adozione di pratiche più sostenibili sono fondamentali per promuovere un'economia circolare e affrontare sfide ambientali cruciali [2].

L'utilizzo di strumenti essenziali per misurare l'impatto ambientale dei prodotti lungo il loro ciclo di vita, come possono essere le metodologie di *Life Cycle Assessment* (LCA) ed ancora di più specificatamente del

Product Environmental Footprint (PEF), permette di fornire dati ed informazioni cruciali per guidare la transizione circolare e la sostenibilità nell'industria tessile. In Figura 1 sono riportati i punti focali del recente *Circular Economy Package* (2022), pubblicato dalla CE, che introduce azioni volte all'accelerazione verso la transizione verde. I provvedimenti oggetto riguardano sia iniziative generali sulla regolamentazione della progettazione ecocompatibile di prodotti sostenibili e circolari (ESPR) insieme ai diritti del consumatore (ECGT), sia strategie più settoriali riguardanti il settore edile (revisione sul regolamento dei prodotti da costruzione) e tessile (strategia europea per prodotti tessili sostenibili e circolari) [3].

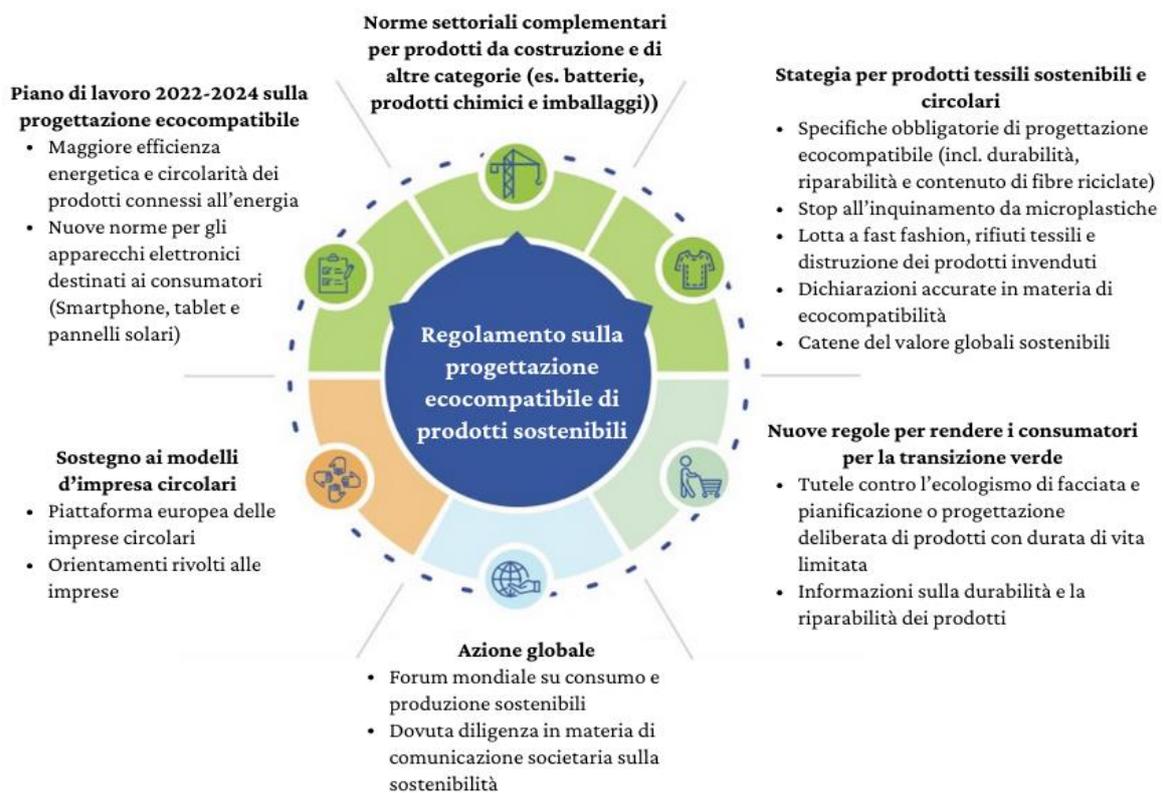


Figura 1 Panoramica delle iniziative del pacchetto Economia Circolare [4].

Questo lavoro si propone di affrontare le lacune esistenti nello schema PEF, concentrandosi sulle regole di categoria dell'abbigliamento e delle calzature [5]. In particolare, ci focalizzeremo sulla frequenza con cui i materiali vengono riciclati, cercando di contribuire ad un approccio più circolare nell'industria dell'abbigliamento attraverso un modello teorico. I primi capitoli riguarderanno un approfondimento mirato sul settore tessile, con un'attenzione particolare rivolta alle fibre di lana riciclata, che sono al centro del caso studio, e alle metodologie di valutazione ambientale. Successivamente, si passerà all'analisi della *Circular Footprint Formula* (CFF), strumento che consente di valutare gli scenari di fine vita di un prodotto, discutendo delle modifiche necessarie per applicarla in modo specifico in relazione al numero di cicli di riciclo di un materiale, debolezza su cui si concentrerà il presente elaborato [6].

In breve, l'introduzione di un valore ben definito, coerente e trasparente come il *PEF score* avrebbe un duplice scopo: da un lato, consentirebbe al marchio di utilizzarlo come strumento di marketing, e dall'altro, permetterebbe ai consumatori finali di effettuare scelte consapevoli in ottica sostenibilità.

CAPITOLO 1

TRANSIZIONE VERSO UN'ECONOMIA CIRCOLARE NELL'INDUSTRIA TESSILE E DELL'ABBIGLIAMENTO (T&C)

1.1. L'industria tessile: contesto ambientale, tendenze produttive e settore laniero

1.1.1. Contesto nel quadro ambientale

Come anticipato brevemente, l'industria tessile rappresenta una componente di impatto all'interno dell'industria manifatturiera europea, con un fatturato nominale di 169 miliardi di euro in lenta ripresa dopo il crollo subito nel periodo di crisi da COVID-19, con una media di 1.3 milioni di cittadini in forza lavoro in 160 mila imprese europee. Il giro d'affari di tessili e abbigliamento, a seguito di un forte impatto da parte delle importazioni dalla Cina e dal Bangladesh, aumenta così la già critica dipendenza da materie prime e fibre. Con le importazioni provenienti principalmente da fornitori quali Cina, Bangladesh e Turchia, il controllo qualità è sempre più decisivo ed impegnativo in ottica del sostegno sia dei mercati ormai consolidati che delle filiere locali. A livello globale, l'UE-27 si attesta in seconda posizione come maggiore esportatore di abbigliamento subito dopo la Cina ed a questi è attribuita la vendita di più di un terzo dei prodotti T&C. All'interno dei confini europei, i maggiori produttori ed esportatori nel settore tessile sono Germania, Italia, Francia, Spagna e Regno Unito [7].

Nel 2020, anche se solo il 9% del volume di produzione tessile è stato rappresentato dall'abbigliamento (Figura 2a), esso raffigura il 38% della produzione individuando i capi di abbigliamento come prodotti di alto valore a fronte di un peso ridotto (Figura 2b). Tra gli altri dati, il 67% delle aziende appartengono al settore dell'abbigliamento ed il 33% a quello tessile indicando l'Unione Europea come importante produttore anche di prodotti intermedi per il tessile come fibre, filati e tessuti [8]. Secondo il rapporto annuale di EURATEX, nel 2022 la popolazione europea ha speso in media 490 €/a per i propri capi d'abbigliamento con un consumo totale di tessuti di 15 kg per persona all'anno, ben differente dagli 8.4 kg per persona nel 1975 [7]. Entro il 2030, si stima che il consumo globale di indumenti e calzature passi dagli attuali 62 milioni di tonnellate a 102 milioni di tonnellate [9].

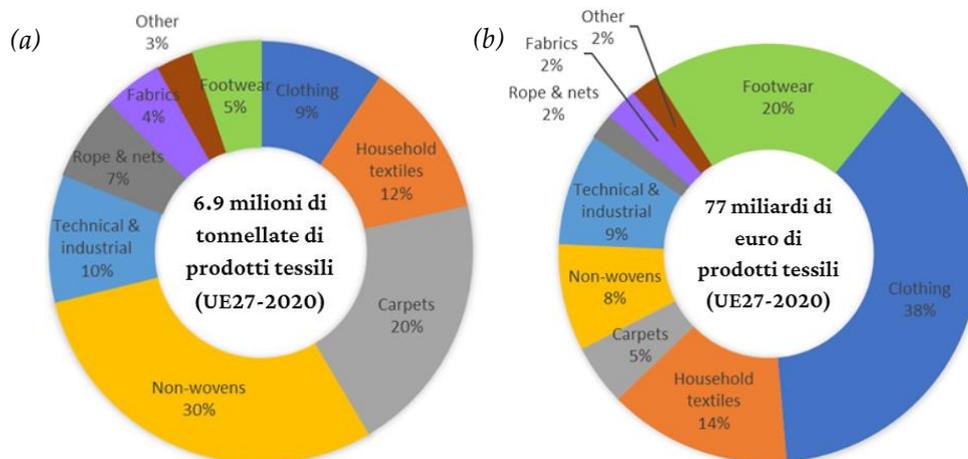


Figura 2 Produzione di prodotti tessili dell'UE-27 nel 2020 (a) in milioni di tonnellate e (b) in miliardi di euro [8].

Tuttavia, il settore tessile e dell'abbigliamento, uno tra i più globalizzati dell'economia europea, non è solo redditizio a livello di mercato ma risulta essere anche uno tra i maggiori protagonisti del danno ambientale, come mostrato in Tabella 1, in relazione all'uso di energia, risorse idriche, prodotti chimici, emissioni inquinanti e rifiuti solidi, il cui impatto ambientale ha differente intensità a seconda della fase del ciclo di vita del prodotto tessile.

Tabella 1 Principali problematiche ambientali legate alle fasi del ciclo di vita del prodotto [1].

Problemi ambientali	Le fasi più impattanti del ciclo di vita del prodotto
Consumo energetico	Produzione di fibre artificiali, lavorazione filati, processi di finissaggio, lavaggio e asciugatura di indumenti in fase di utilizzo
Consumo di acqua e prodotti chimici	Crescita delle fibre, pretrattamento a umido, tintura, finitura e lavanderia
Rifiuti solidi	Principalmente lo smaltimento dei prodotti a fine vita, la produzione tessile/abbigliamento
Emissioni dirette di CO ₂	Trasporto all'interno di una catena di approvvigionamento distribuita a livello globale

Il panorama consumistico del settore T&C è andato aggravandosi anche a seguito dell'introduzione del commercio del *fast fashion* influenzando la clientela con prezzi competitivi a discapito di una peggiore qualità del prodotto che ne riduce inevitabilmente la vita utile ed il possibile valore di recupero. Le catene di approvvigionamento sono state semplificate con l'abbattimento dei tempi di produzione che ha causato una diminuzione del prezzo di un capo rendendone l'acquisto più conveniente. Questo ha avuto come conseguenza un non trascurabile aumento della varietà di capi d'abbigliamento portando il consumatore ad acquistarne in maggiore quantità trattandoli poi quasi come fossero usa e getta. Rispetto agli anni '90, il volume di acquisti è aumentato del 40%, e si stima che in Europa ogni anno vengano generati 5.8 milioni di tonnellate di rifiuti tessili con indumenti scartati dopo una media di soli sette o otto utilizzi. I rifiuti tessili rappresentano una delle componenti più impattanti dei rifiuti urbani risultando quindi soggetti ad obiettivi di raccolta differenziata stabiliti dalla Direttiva (UE) 2018/851.

Pertanto, passare a pratiche di riciclo efficace dei rifiuti tessili e di riutilizzo di materie prime potrebbe riuscire a far decrementare la domanda finale dei prodotti tessili. L'applicazione di un processo di economia circolare riuscirebbe a supportare la scarsità delle materie prime e ad incanalare lo smaltimento dei tessuti in direzioni differenti dalle discariche. Questo pensiero è senza dubbio legato alla messa in pratica di un'istruzione consapevole per i partecipanti del mercato.

Quindi, la sfida per gli stati membri dell'UE riguarderà la riduzione di materiali ed energia puntando sull'uso di risorse rinnovabili, minor accumulo di inquinanti nocivi e potenziamento delle operazioni di riciclo. In particolare, la gestione efficace dei rifiuti è strettamente dipendente dalla fase di progettazione iniziale e dal conseguente sviluppo del prodotto [9].

1.1.2. Tendenze ed obiettivi nella produzione di fibre tessili

Gli attuali modelli di produzione e consumo portano inevitabilmente ad una richiesta in aumento di fibre con conseguente aumento dei rifiuti tessili. Secondo l'ultimo report dell'organizzazione no-profit Textile Exchange, nel 2021 la produzione globale di fibre ha raggiunto il record di 113 milioni di tonnellate, cifra ben superiore a quella proiettata dalle stime, prevedendo il raggiungimento di circa 150 milioni di tonnellate entro il 2030 con crescita superiore al 3.7% annuo. Un punto a favore dell'organizzazione riguarda l'incremento del numero di siti certificati passati da 29 mila nel 2020 a più di 48 mila nel 2021. La crescente produzione di fibre tessili, come mostrato in Figura 3, innegabilmente metterà a dura prova l'ambiente. Le fibre sintetiche vergini di origine fossile rappresentano i due terzi della produzione mondiale di fibre (63 milioni di tonnellate nel 2021) rendendo merito al loro basso costo, con il poliestere che domina la quota di mercato con il 54% di cui solo il 14.8% viene allo stato attuale riciclato. Il cotone si posiziona al secondo posto con una produzione che è andata decrescendo dal 27% al 24% nel corso del 2021, suggerendo l'azione di un impegno maggiore da parte dei marchi del settore per sostenere adeguatamente le esigenze degli agricoltori. Le fibre cellulosiche (viscosa, acetato, lyocell, modal e cupro) detengono attorno il 7% mentre la lana e il lino rispettivamente l'1.3% e il 0.5% del mercato globale. L'investimento nel mercato delle fibre riciclate ha incrementato la quota dall'8.4% nel 2020 al 8.9% nel 2021 soprattutto per merito dell'uso di fibre di poliestere derivanti dal riciclo delle bottiglie in plastica, mentre rimangono meno dell'1% le fibre riciclate derivanti da tessuti riciclati. Si prevede che il 43% dei marchi di retail, che hanno risposto ad EURATEX, includeranno fibre riciclate in oltre il 30% dei loro prodotti entro il 2025.

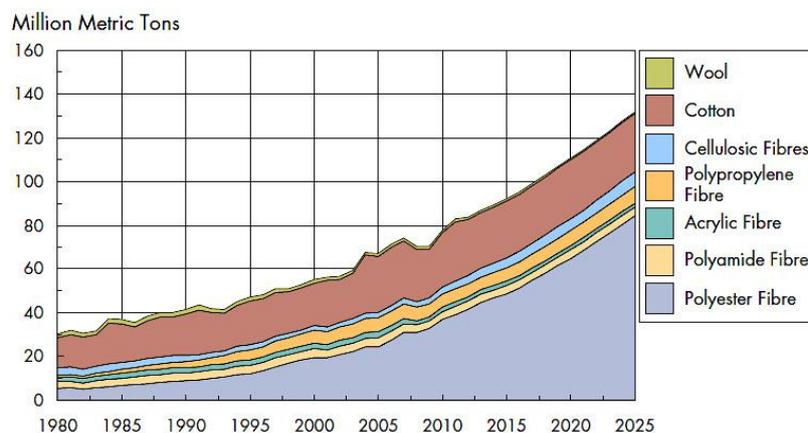


Figura 3 Andamento della produzione globale di fibre dal 1980 al 2025 in milioni di tonnellate [1].

L'introduzione di materiali di nuova generazione come poliestere (PL) e poliammide (PA) a base biologica sembra essere promettente, ma rimane comunque necessaria un'azione sui fronti della sostituzione dei materiali, innovazione su scala e riduzione della produzione, al fine di non oltrepassare la soglia dei 1.5°C stipulati nell'Accordo di Parigi (2015). Gli obiettivi prefissati consistono nell'aiutare le industrie produttrici di fibre a raggiungere una riduzione del 45% delle emissioni GHG entro il 2030, alla base della *Climate+ strategy*, insieme all'adozione di prodotto rigenerativo, riciclato e biologico come alternativa alle fibre convenzionali.

In secondo luogo, è fondamentale l'istituzione di standard globali, certificazioni e *benchmarking* per valutare i progressi. Questi standard dovrebbero derivare dalla creazione di modelli circolari e innovativi che possano essere implementati in tutta la *supply chain* puntando alla comunicazione efficace della necessità di un cambiamento di mentalità che sia in armonia con l'ambiente [7], [10].

1.1.3. Focus sul settore laniero: stime e proprietà

Nel Regno Unito, la guida WRAP (*Waste and Resources Action Program*) per la progettazione di capi d'abbigliamento sottolinea come le fibre naturali, la lana per esempio, siano preferibili ai materiali sintetici per quanto riguarda la longevità dei tessuti, poiché resistono meglio allo sporco e favoriscono una migliore traspirazione, riducendo il rischio di trattenere cattivi odori corporei. Tuttavia, talvolta vengono utilizzati materiali misti, ad esempio PL o PA, per conferire resistenza all'abrasione, funzionalità come traspirabilità, morbidezza, comfort e solidità del colore portando tuttavia a intrinseche difficoltà finali in fase di riciclo.

La lana di pecora è una fibra naturale di alto valore e rinnovabile con una vasta gamma di utilizzi, tra cui abbigliamento, prodotti ignifughi, isolanti e interni di lusso quando viene riciclata. Nel dettaglio, la lana è utilizzata principalmente nell'abbigliamento (circa due terzi del totale), nei prodotti per interni come tessili per la casa (circa un terzo) e in usi industriali come isolamento (circa il 5%). Grazie alle sue proprietà isolanti e alla resistenza agli odori, i tessuti in lana richiedono meno lavaggi e permettono di conservare i capi per periodi più lunghi rispetto ad altre fibre. I capi d'abbigliamento in lana, tipicamente lavati con metodi delicati come il lavaggio a secco o a mano e a una temperatura più bassa di circa 10°C rispetto ad altre fibre, tendono ad avere una vita più lunga e sono più propensi a essere riutilizzati o riciclati. È preferibile, inoltre, che i vestiti in lana siano realizzati al 100% con questa fibra e abbiano colori simili [11], [12].

La sua importanza è elevata nonostante rappresenti solo l'1.3% del consumo tessile globale attuale. La qualità della lana dipende dal diametro della fibra, con la razza merino che produce la lana più pregiata con gradi di qualità che vanno da ultrafine (<15 µm) a lana larga (≤24.5 µm), mentre altre razze con fibre più grosse (fino a 35-45 µm) sono utilizzate per scopi diversi, come i rivestimenti dei pavimenti.

La produzione mondiale di lana pulita (*clean wool*), fibra di origine animale, è rimasta all'incirca costante attestandosi attorno ad 1 milione di tonnellate nel 2021, che equivale ad una produzione di lana sucida (*greasy wool*) per circa 1.9 milioni di tonnellate. La quota di mercato della lana prodotta secondo Responsible Wool Standard (RWS), ZQ e SustainaWOOL GOLD GREEN è stata pari a circa 58 mila tonnellate, cioè il 3% della produzione totale di *greasy wool* ed un'altrettanta percentuale è stata certificata secondo questi programmi.

Per quanto riguarda la filiera della lana, questa inizia con l'allevamento di pecore coinvolgendo fino a cento diverse regioni geografiche, con Australia, Cina e Nuova Zelanda come principali produttori di lana grezza (Figura 4a), mentre la lana certificata RWS ha raggiunto quote di mercato pari al 30% in Sud Africa, 17% in Uruguay e 15% in Argentina (Figura 4b). La Cina svolge un ruolo chiave nella lavorazione

e produzione. Anche l'Italia ed il Regno Unito sono paesi importatori per il mercato che insieme rappresentano il 20% per le fasi di filatura e tessitura [13]. La produzione della lana convenzionale nel corso degli ultimi anni è andata calando, a differenza della quota di mercato di tipologia *non-mulesed wool* in aumento grazie all'incremento del numero di marchi *mulesing-free*. L'unico paese in cui è ancora in vigore la pratica di *mulesing* è l'Australia, dopo anche l'ultimo divieto conferito alla Nuova Zelanda nel 2018, che detiene circa il 22% del mercato della lana pulita.

Il trend di questa fibra naturale è positivo e l'impegno nei confronti della stessa si rivolge all'adozione di programmi che si interessano al benessere degli animali insieme all'utilizzo etico e responsabile del territorio e della biodiversità che ne fa parte. La trasformazione di aziende agricole e paesaggi, compresa la gestione del pascolo, in direzione di un'agricoltura rigenerativa permetterebbe di migliorare la salute del suolo e della vegetazione della zona di allevamento ridimensionando le emissioni di gas serra attraverso il sequestro di carbonio, con conseguente riduzione dell'impronta di carbonio delle fibre di origine animale.

Per la lana riciclata si seguono altri riferimenti come Recycled Claim Standard (RCS), Global Recycled Standard (GRS) e Cardato Recycled per la lana riciclata sul distretto di Prato in Italia. Un aspetto interessante da considerare è la quota di mercato globale, che corrisponde al 6% e presenta un volume di produzione stimato di circa 70 milioni di tonnellate. Per fare un esempio specifico, nel solo Distretto Tessile di Prato vengono prodotte circa 22 mila tonnellate all'anno di lana riciclata. Altri importanti produttori operano in paesi come India e Cina [7], [10].

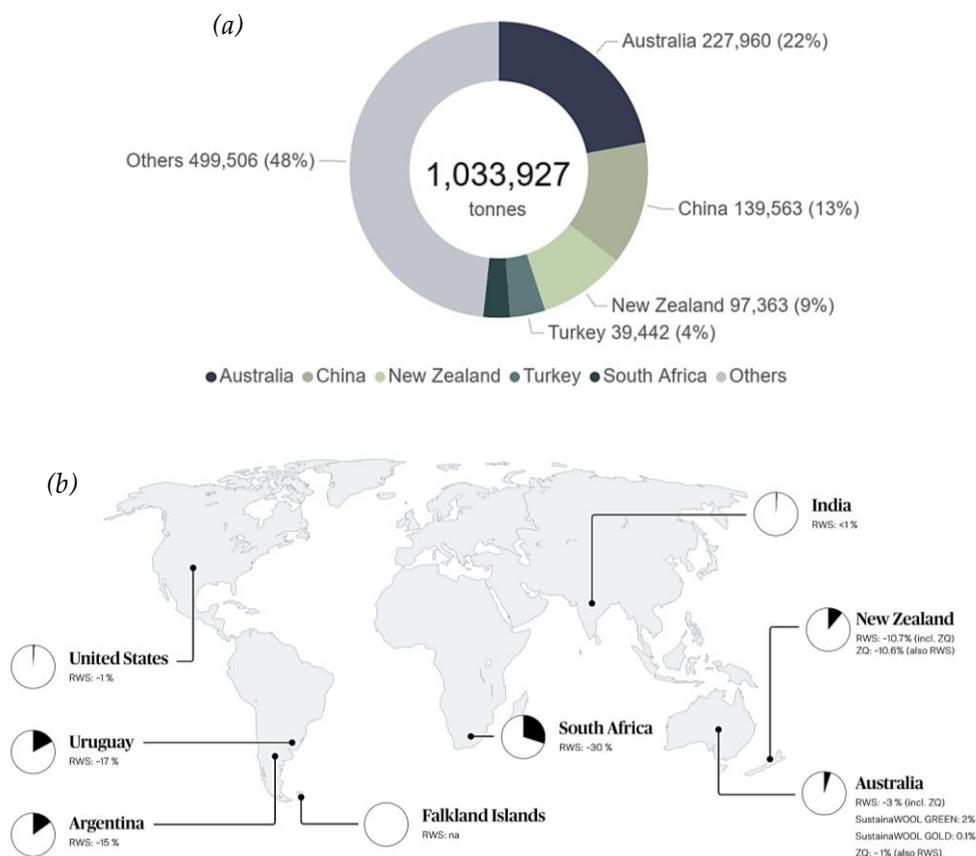


Figura 4 (a) Produzione globale di lana vergine per paese nel 2021 e (b) quota di mercato per paese dei programmi certificati di lana [10].

1.2. Dalla fibra allo smaltimento del rifiuto tessile

1.2.1. *L'impatto dell'industria tessile nell'era della sostenibilità*

L'industria T&C si classifica in quarta posizione in termini di impatti ambientali dopo l'industria edile, dei trasporti e alimentare. Nel 2020, il consumo tessile pro capite ha richiesto 400 m² di terreno, 9 m³ di acqua e 391 kg di materie prime causando un'impronta di carbonio di circa 270 kg, vale a dire che i prodotti tessili consumati nell'UE hanno generato emissioni di GHG pari a 121 milioni di tonnellate. Per quanto riguarda l'inquinamento globale delle acque pulite, si dichiara che la produzione tessile ne sia responsabile per il 20%. Il settore tessile insieme a quello alimentare, energetico, manifatturiero, chimico, farmaceutico e minerario gravano per oltre il 70% sull'uso e sull'inquinamento dell'acqua dolce nel mondo. A tal proposito, Greenpeace International e World Wildlife Fund for Nature (WWF) sono coinvolti in azioni collettive con le piccole e medie imprese (PMI) per attuare progetti riguardanti la corretta gestione dell'acqua in Cina, India e Pakistan. Anche a livello energetico, con predominanza di energia termica (48% gas naturale) ed elettrica (42%), si ha un importante impatto di consumo con il 38% del totale in fase di filatura, il 20% in tessitura, il 37% in processazione chimica ed il restante 5% per scopi vari [7], [14], [15].

Durante le fasi di lavorazione per arrivare al prodotto tessile si consumano fonti come acqua (media di 50-150 l di acqua/kg materiale tessile), energia (media di 2.47 MJ distribuiti tra la fase di cucito, taglio e confezionamento) e prodotti chimici producendo svariati rifiuti come sostanze chimiche di scarico, lubrificanti, materiale da imballaggio, filati, scarti di abbigliamento e microfibre. Studi basati sull'LCA hanno mostrato come le fasi di lavorazione e di utilizzo contribuiscono maggiormente per la domanda di energia primaria mentre la fase di utilizzo governa l'uso dell'acqua [16]. Ad esempio, la produzione di 1 kg di poliestere richiederebbe 97.4 MJ di energia, 17.2 kg di acqua emettendo nell'ambiente 2.31 kg di CO₂, 18.2 g di CO e 39.5 g di CH. O ancora, per realizzare una t-shirt di cotone sarebbero necessari 2700 l di acqua, pari al soddisfacimento del fabbisogno potabile di una persona per 2.5 anni [17].

1.2.2. *Dal filato al tessuto: le fasi chiave della produzione tessile*

Preparazione e produzione delle fibre

La filiera tessile, rappresentata schematicamente in Figura 5, prende il via dalla preparazione della materia prima, ovvero fibre naturali (di origine animale o cellulosiche) o sintetiche. Le prime includono le fibre cellulosiche come cotone convenzionale ed organico, lino e canapa o fibre proteiche come seta e lana. A queste ultime è rivolta una particolare attenzione per via dell'utilizzo di fertilizzanti chimici e pesticidi durante la coltivazione insieme ad un consumo elevato di acqua. Queste sono fibre biodegradabili ma a causa delle sostanze utilizzate nelle fasi di finitura o tintura, possono avere un impatto negativo sul suolo e sulle acque dopo lo smaltimento.

D'altra parte, le fibre artificiali possono essere costituite da materiali inorganici o organici da base petrolchimica o cellulosica: le fibre sintetiche sono prodotte con polimeri sintetici come poliestere, nylon, acrilico mentre le artificiali quali rayon viscosa, acetato e modal derivano da derivati della cellulosa.

Queste fibre richiedono meno acqua e suolo ma impattano gravemente a livello energetico per via del consumo di risorse non rinnovabili e rilasciano al contempo emissioni e sostanze chimiche in grande volume portando a problemi ambientali.

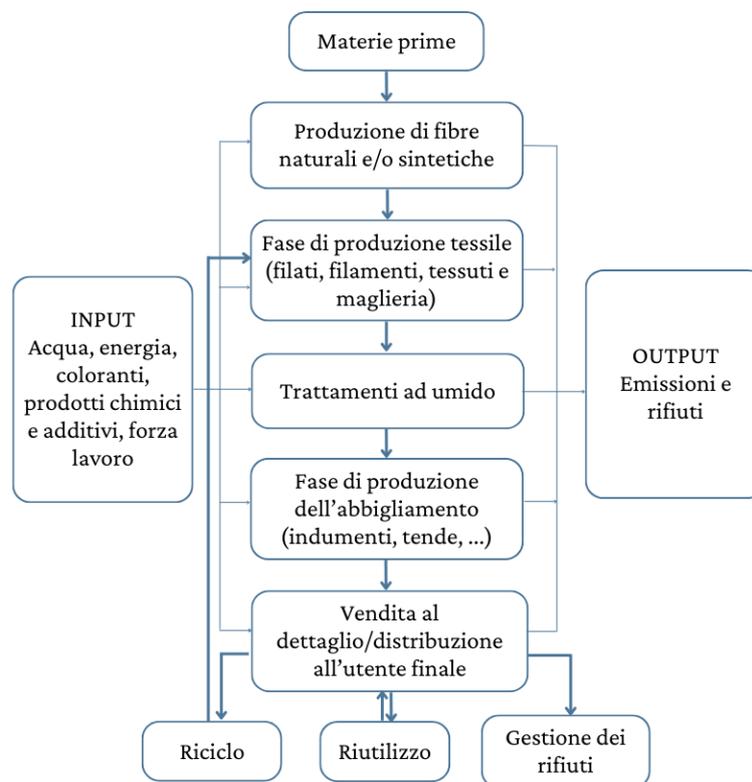


Figura 5 Diagramma di flusso della supply chain per tessile e abbigliamento [17], [18].

Fase di produzione tessile

Dopo l'estrazione di risorse (non) rinnovabili per l'approvvigionamento di materie prime e la seguente fase di trasporto della fibra dal luogo di produzione alla fabbrica di filatura, si passa alla filatura del filato che comprende apertura, cardatura, pettinatura, stiratura, filatura e roccatura con consumo di energia e vari materiali, produzione di polvere e numerosi scarti di fibre e filati. In questa fase sono tendenzialmente combinate più fibre formando miscele richieste dal cliente ed il rischio maggiore è dato alla possibile inalazione di polveri.

Il passaggio successivo riguarda la realizzazione della struttura del tessuto mediante lavorazione a maglia, tessitura o produzione di tessuto-non-tessuto, vale a dire di processi che richiedono l'utilizzo di oli, lubrificanti, agenti imbozzimanti (come PVA o CMC) o coloranti contenenti formaldeide e ammine aromatiche, insieme ad acqua, imballaggi ed elevati livelli di consumo energetico.

Trattamenti ad umido

I processi ad umido sono ripartibili in pretrattamento, colorazione e rifinitura e comprendono, in funzione della composizione fibrosa e della tipologia di tessuto finito che si vuole produrre, le fasi di sbiancamento, carbonizzazione, neutralizzazione, purga, imbozzimatura, mercerizzazione, tintura, rammollimento, lavaggio, stampa e finissaggio chimico o fisico dei tessuti.

In queste lavorazioni è richiesto il maggior dispendio energetico (75-80% per i soli processi di lavaggio) e chimico. Si stima che ci siano circa 3000 sostanze comunemente utilizzate nelle fasi di tintura e stampa, anche se esistono circa 10000 composti disponibili. Questa vasta gamma di opzioni può rappresentare una sfida quando si tratta di sviluppare e applicare regolamenti per il loro corretto utilizzo. L'obiettivo è minimizzare gli impatti negativi, come ad esempio la produzione di sostanze volatili, la dispersione di coloranti nelle acque di scarico e la presenza di tensioattivi o solventi nei tessuti. La richiesta di acqua in ogni fase della sequenza di lavorazioni ad umido viene utilizzata sia per indirizzare le sostanze chimiche nel materiale che per lavarle via prima della fase successiva. Nello specifico, si mostra come gli stabilimenti di tintura e finissaggio solitamente impieghino fino a 200 tonnellate di acqua per ogni tonnellata di tessuto prodotto con il risultato che ogni anno vengono rilasciate 0.5 milioni di tonnellate di microfibre nei mari.

Sulla base di numerosi rapporti di screening di organizzazioni ambientaliste, sono stati riscontrati nelle acque di scarico post lavaggio dei capi di abbigliamento residui significativi di sostanze persistenti usate che finiscono per essere scaricate in mari, laghi e fiumi come derivati fenolici, ftalati, sostanze perfluorurate (PFC) e inquinanti organici persistenti (POP). Secondo quanto dichiarato nell'*Environment Program* dell'ONU, si stima che l'industria tessile sia responsabile dello scarico in acqua di 300-500 milioni di tonnellate di solventi, fanghi tossici, oli, solfati, fosfati, metalli pesanti e rifiuti vari ogni anno.

Fase di produzione dell'indumento

La fase conclusiva è rappresentata dalla produzione del capo di abbigliamento che include le operazioni di stesura, taglio, cucitura, stiratura e confezionamento, che somma il consumo energetico e lo scarto di materiali ad elevate emissioni di carbonio durante il trasporto e all'utilizzo di manodopera minorile durante la fase di produzione.

È essenziale una gestione efficiente delle operazioni logistiche lungo l'intera catena, dato che le diverse fasi di produzione, dalla materia prima fibrosa al prodotto tessile finito, sono distribuite in diverse parti del globo. In particolare il trasporto merci, comprendente quello via terra, mare, ferroviario o aereo, raggiunge quasi il 10% della CO₂ emessa a livello globale se si include lo stoccaggio e la movimentazione delle merci.

Una catena di approvvigionamento complessa porta ad un'inevitabile mancanza di trasparenza sulle varie fasi produttive e potenziali impatti ambientali. Per portare l'industria T&C ad essere ecologicamente meno impattante sono state proposte azioni diversificate in ambito di utilizzo di prodotti chimici, consumo di acqua, consumo energetico, produzione di rifiuti, emissioni atmosferiche, trasporti e materiali da imballaggio. Si riportano in Tabella 2 le migliori pratiche redatte dal Natural Resources Defense Council (NRDC) che consentono di risparmiare acqua, energia, carburante ed elettricità con un minimo investimento iniziale e senza rischi per i tempi di consegna, prezzo o qualità del prodotto per la realizzazione di un settore tessile più sostenibile [17], [18].

Tabella 2 Elenco delle migliori pratiche secondo il NRDC [18].

Nr.	Azione
1	Effettuare il rilevamento delle perdite, la manutenzione preventiva, una migliore regolare pulizia
2	Riutilizzare l'acqua di raffreddamento proveniente da (1) bruciatura, (2) sistema di compressione dell'aria e (3) pre-restringimento
3	Riutilizzare la condensa
4	Riutilizzare l'acqua di processo da (1) sbiancamento e (2) mercerizzazione
5	Recuperare il calore dall'acqua calda di risciacquo
6	Utilizzare carbone pre-vagliato
7	Manutenzione degli scaricatori di condensa
8	Isolamento di tubi, valvole e flange
9	Recuperare il calore dalle ciminiere
10	Ottimizzare il sistema di aria compressa

1.2.3. Tipologie di consumi e di rifiuti generati

Il modello di economia circolare è la strategia migliore per affrontare la carenza di risorse e le problematiche ambientali concentrandosi sull'efficienza energetica e sulla riciclabilità dei prodotti tessili. Il passaggio da un flusso lineare di *take-make-dispose* ad una visione a ciclo chiuso riassumibile in *reduce-reuse-recycle*, porta anche alla raccolta di sottoprodotti e scarichi dei processi produttivi incrementandone il valore e riducendo l'estrazione di materie prime. Come delineato nell'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile (2015) dell'ONU, un'economia circolare di successo mira a dare sostegno a tutte e tre le dimensioni dello sviluppo sostenibile (economica, ambientale e sociale) limitando il flusso produttivo e rispettando i cicli degli ecosistemi. Nell'*EU's Circular Economy Action Plan (2020)* spiccano come interventi da adottare nell'industria T&C il riciclo dei prodotti e relativi componenti insieme al riutilizzo degli stessi aumentando la loro vita di servizio [19].

Il processo di produzione tessile consuma numerose risorse durante il suo ciclo di vita generando al tempo stesso una quantità significativa di rifiuti con problemi relativi all'inquinamento atmosferico, ad elevati livelli di tossicità e alla produzione di rifiuti solidi. A questi si unisce la contaminazione delle acque reflue rilasciate durante le fasi di pulizia contenenti una certa quantità di detersivi e sostanze persistenti (PBT) ed il rilascio di metano e gas serra a seguito della decomposizione della fibra.

La sovrapproduzione di rifiuti tessili implica che solo il 30% dell'abbigliamento prodotto venga venduto ad un prezzo suggerito, mentre il 30% finisce nel reparto saldi ed il 40% rimane invenduto in negozio o direttamente lasciato in magazzino, a riprova del fatto che oggi i prodotti tessili vengono smaltiti tempo prima che perdano la loro funzionalità. I rifiuti tessili possono essere classificati secondo una suddivisione basata sulla fonte.

- I rifiuti post-industriali sono prodotti come risultato delle attività industriali o manifatturiere.
- I rifiuti pre-consumo comprendono sottoprodotti di qualità inferiore danneggiati e non adatti alla vendita o indumenti intatti ma sovrapprodotti presenti presso il sito di produzione e di distribuzione.

- I rifiuti post-consumo sono quei rifiuti che vengono scartati dal consumatore dopo l'utilizzo, spesso a causa di danni o usura. Questi rifiuti possono seguire varie vie, tra cui la trasformazione in bottiglie di plastica, la conversione in filati per scopi come l'isolamento acustico, l'incenerimento per la produzione di calore o l'emissione di polveri e gas, oppure essere smaltiti direttamente in discarica.

I rifiuti tessili pre e post-consumo passano poi alla fase di smontaggio (meccanico, chimico, termico o combinazione di questi) o riassettaggio a seconda della tipologia di fibra. La complessità e varietà dei materiali rende questa fase di trattamento particolarmente delicata per prevenire l'eventuale danneggiamento del tessuto riducendone la lunghezza e di conseguenza le performance.

1.2.4. I diversi approcci al riciclo

Nell'industria tessile, la riduzione del consumo di materiali ed energia è strettamente legata all'idea di riciclo. Questo concetto riguarda l'atto di recuperare materia dai materiali esistenti e di riutilizzare parti integre di prodotti usati, processo che comprende anche l'estrazione di valore da prodotti che hanno raggiunto la fine del loro ciclo di vita. In uno studio è stato analizzato come la raccolta di 1 kg di capi d'abbigliamento usati evita l'emissione di 3.6 kg di CO₂, risparmia di 6000 l di acqua e non utilizza 0.3 kg di fertilizzanti e 0.2 kg di pesticidi [17].

Il termine riciclo si riferisce alla separazione di un prodotto nelle sue materie prime di modo che queste siano recuperate ed utilizzate in altri prodotti, mentre il concetto di riutilizzo è legato alla reintroduzione di un prodotto già esistente all'interno della stessa catena di produzione. Tra le strategie proposte nell'industria dell'abbigliamento si menzionano:

- il riciclo primario derivante dalla raccolta degli scarti di tessuto pre-consumo;
- il riciclo secondario che trasforma un rifiuto tessile post-consumo in altri indumenti o prodotti tessili per la casa, poi donato a servizi di raccolta che a seconda della qualità del capo lo rivendono o lo indirizzano ad un'altra fase di riciclo;
- il riciclo terziario che converte i rifiuti plastici (come nylon o PET) in prodotti chimici o combustibili;
- il riciclo quaternario (recupero termico), ossia l'incenerimento dei tessuti al fine di recuperarne almeno il valore energetico.

A livello applicativo occorre fare una distinzione tra le fibre provenienti da rifiuti tessili pre e post-consumo. Essendo i tessuti realizzati con miscele di fibre, la pratica di riciclo più efficiente è la progressiva triturazione meccanica del tessuto in fibra impiegabile poi in tessuti non tessuti, tappezzeria e materiali isolanti. Se si parte dal post-consumo, la fibra risultante è di bassa qualità in termini di lunghezza e colore (scala dei grigi o nero) e quindi poco attraente al riutilizzo nel settore dell'abbigliamento. Mentre un rifiuto pre-consumo pulito e selezionato sottoposto a riciclo meccanico può essere trasformato in un filato finale con una *staple length* costante ed impiegabile nel settore, anche se le fibre risultanti inevitabilmente avranno una lunghezza inferiore. Proprio per questo le fibre riciclate sono generalmente combinate con fibre vergini.

Una volta riciclata la materia prima, il prodotto può seguire il flusso di riciclo a circuito aperto (OLR) o chiuso (CLR). Nell'OLR (Figura 6a), o *downcycling*, il capo arriva al punto finale della sua vita, ma la fibra viene recuperata per essere nuovamente utilizzata in un nuovo ciclo di vita del prodotto che verrà comunque smaltito come rifiuto a fine vita. L'*open-loop* garantisce un riutilizzo del materiale del prodotto originario minimizzando l'ulteriore consumo di materiale vergine per il secondo prodotto e riducendo al tempo stesso l'impronta di carbonio del prodotto. Dall'altra parte, nel CLR (Figure 6b) gli indumenti tessili pre- (cicli grigio e rosso) o post-consumo (ciclo blu) sono prima raccolti e poi rielaborati in nuova fibra idonea ad essere utilizzata per nuovi capi rimanendo nello stesso ciclo produttivo del prodotto tessile originario. In alternativa, il *closed-loop* comprende anche il flusso *cradle-to-cradle* (C2C), mostrato in Figura 6c, di materiali biologici poi compostati o di materiali tecnici di sintesi. Questa opzione, a differenza del riciclo a ciclo aperto, porta potenzialmente la fibra ad essere riciclata ripetutamente per la realizzazione di un'industria ancora più sostenibile. Anche se risulta un approccio su larga scala più difficile da gestire, marchi come Patagonia, PUMA e H&M sono leader in questa metodologia. Al fine di promuovere il riciclo, diversi studi hanno suggerito di progettare indumenti in modo che siano realizzati principalmente da un unico tipo di tessuto, con parti accessorie che possano essere facilmente staccate dall'indumento senza connessioni rigide, consentendo così uno smontaggio più rapido [20].

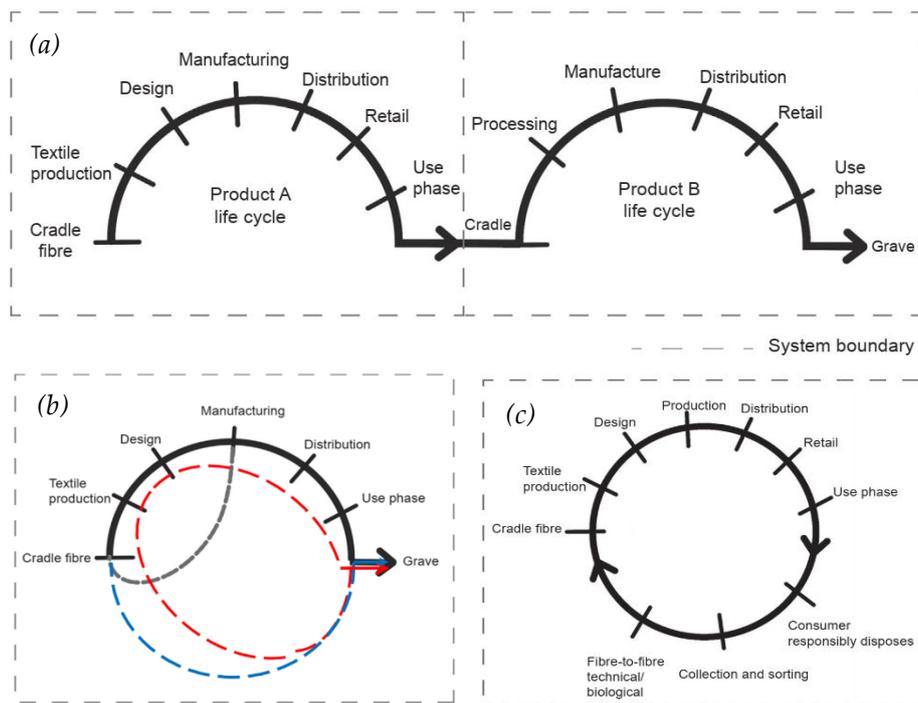


Figura 6 Schematizzazione di riciclo (a) *open-loop*, (b) *closed-loop* e (c) *cradle-to-cradle* [20].

L'industria della moda incanala al momento sia il flusso di capi di abbigliamento di breve vita destinati al riciclo sia quello degli indumenti di lunga durata preposti al riutilizzo. I primi sono caratterizzati da materiali di bassa qualità che possono essere separati o recuperati per la produzione di nuovi prodotti, mentre i secondi sono orientati all'estensione della fase di utilizzo in combinazione all'impiego di materiali di alta qualità e di design resistente. Il riutilizzo, che include la riparazione e la rigenerazione,

prolunga la vita utile del materiale per molti anni conservandone l'energia ed il materiale con una manodopera che mantiene un impatto inferiore rispetto a quello del riciclo.

Al momento si stanno definendo le corrette pratiche di smaltimento da parte dei produttori e dei consumatori insieme a funzionali ed efficienti tecnologie di smistamento e di riciclo cercando di mantenere forma, dimensione e composizione se non delle fibre, almeno dei materiali polimerici impiegati conservando una complessità dei prodotti quanto più bassa possibile. Solo una media del 25-30% dei rifiuti del mondo dell'abbigliamento viene raccolto al fine di essere sottoposto a riutilizzo o riciclo, mentre il restante viene mandato in discarica o bruciato. Le proiezioni prevedono un aumento del livello totale di rifiuti legato al settore dell'abbigliamento fino a raggiungere i 148 milioni di tonnellate entro il 2030, ovvero 17.5 kg pro capite/a [1].

Uno studio di McKinsey & Company ha stimato che il 70% dei rifiuti tessili potrebbe essere riciclato da fibra a fibra, ovvero il rifiuto tessile viene trasformato in nuove fibre poi utilizzate per la realizzazione di altri prodotti tessili mentre il restante 30% richiederebbe l'impiego di un riciclo a circuito aperto o termochimico. Resta di fatto che meno dell'1% dei rifiuti viene attualmente riciclato in nuove fibre per l'abbigliamento e la frazione non riutilizzabile diventa per lo più stracci industriali, imbottiture e isolanti per tappezzeria, oppure viene incenerita o messa in discarica [8], [21].

La circolarità delle fibre è piuttosto limitata nella produzione di nuovi prodotti tessili, considerando che spesso è richiesto fino l'80% di fibre vergini insieme al 20% di fibre riciclate. L'aumento nell'utilizzo di fibre riciclate porta ad un sostegno alla sostenibilità poiché i marchi tendono a realizzare collezioni aggiuntive per portare sul mercato questa gamma di prodotti [19].

CAPITOLO 2

METODOLOGIE DI VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA

2.1. L'LCA come strumento in campo sostenibilità

2.1.1. La promozione di una strategia per l'analisi degli impatti ambientali

Recentemente, la circolarità è diventata un concetto di crescente importanza, attirando l'attenzione di governi, comunità di ricerca, aziende e cittadini. Essa mira a mantenere il valore delle risorse, dei prodotti e dei materiali nell'economia il più a lungo possibile, riducendo al minimo la produzione di rifiuti. Questo contribuisce a promuovere economie sostenibili, a basse emissioni di carbonio, efficienti e competitive aumentando la durata di vita dei prodotti. Nello specifico, nell'industria tessile, l'adozione di pratiche circolari può portare a un uso ridotto di materiali vergini e quindi a una riduzione degli impatti ambientali legati alla loro produzione [22]. Negli ultimi anni si è resa sempre più indispensabile l'implementazione di metodologie adatte ad individuare e valutare gli impatti ambientali associati ad un prodotto, servizio o organizzazione soprattutto a seguito della richiesta di enti esterni alle imprese (*stakeholder*) che hanno iniziato a richiedere garanzie riguardo la compatibilità ambientale dei prodotti. Indipendentemente dalla fase del ciclo di vita, ogni prodotto e servizio ha un certo impatto sull'ambiente. L'*Integrated Product Policy* (IPP), parte integrante dell'azione comunitaria per lo sviluppo sostenibile, mira a migliorare le prestazioni ambientali dei prodotti utilizzando il ciclo di vita come base di valutazione. Questo approccio coinvolge tutti gli attori nella catena del valore, influenzando progettazione, produzione, distribuzione e consumo dei prodotti al fine di affrontare gli impatti ambientali in modo completo. Inoltre, è stato evidenziato che il *Life Cycle Thinking* (LCT) sia un approccio importante per considerare gli impatti ambientali in modo globale, evitando di concentrarsi solo su singole fasi del ciclo di vita del prodotto [23].

Attualmente, la metodologia *Life Cycle Assessment* (LCA) si raffigura come il principale strumento per quantificare e valutare gli impatti ambientali, consentendo la rappresentazione pratica del concetto di sostenibilità, che si articola sulla sfera ambientale, sociale ed economica. Questo approccio scientifico sistematico esamina i potenziali effetti ambientali di un processo decisionale e punta l'attenzione su tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto, dall'estrazione delle materie prime, passando per la fase di lavorazione, produzione e distribuzione per terminare con l'utilizzo ed il fine vite dei materiali. Essa è un'analisi multicriterio, quantitativa e comparativa in quanto include differenti categorie di impatto ambientale facendo uso di indicatori basati su modelli relazionali di causa-effetto in unione alla possibilità di realizzare comparazioni tra gli scenari coinvolti nello studio. Inoltre, la metodologia LCA è applicabile sia a sistemi locali che globali potendo così essere adottata in un ampio range di casistiche. Questa metodologia è standardizzata dalle norme ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 che descrivono principi e requisiti metodologici per condurre uno studio LCA. Le linee guida forniscono informazioni per ridurre gli impatti ambientali di prodotti e servizi e sono integrabili con altre norme dettagliate per includere, ad esempio, l'approccio di *eco-design* per apportare miglioramenti ecologici (ISO 14006:2020),

l'impronta di carbonio dei gas ad effetto serra (ISO 14064-67:2018) e l'impronta idrica dei prodotti (ISO 14046:2014) [24].

L'LCA è uno strumento di valutazione dell'impatto ambientale che identifica il consumo totale di energia, gli input di materiali e i rifiuti generati dal punto di ottenimento delle materie prime fino allo smaltimento finale del prodotto. L'analisi può essere di tipo *cradle-to-grave* ("dalla culla alla tomba") includendo gli impatti dalla materia prima allo smaltimento o di tipo *cradle-to-gate* ("dalla culla al cancello") se si ferma al punto di consegna e distribuzione. In quest'ultimo tipo di valutazione del ciclo di vita parziale del prodotto vengono escluse le fasi di utilizzo e di smaltimento del prodotto, rappresentando talvolta il fondamento per le *Environmental Product Declaration* (EPD) di tipo *business-to-business* [18].

2.1.2. Un percorso in quattro fasi

In breve, la metodologia LCA convalidata a livello internazionale consente di effettuare valutazioni e/o confronti di impatto su una base scientifica attendibile, considera tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto e valuta sedici tipi di indicatori ambientali.

La prestazione ambientale via LCA è analizzata tramite le fasi, schematizzate in Figura 7, di:

1. definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione (*goal and scope definition*),
2. analisi dell'inventario del ciclo di vita (*Life Cycle Inventory, LCI*),
3. valutazione dell'impatto del ciclo di vita (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*),
4. interpretazione dei risultati (*interpretation*).

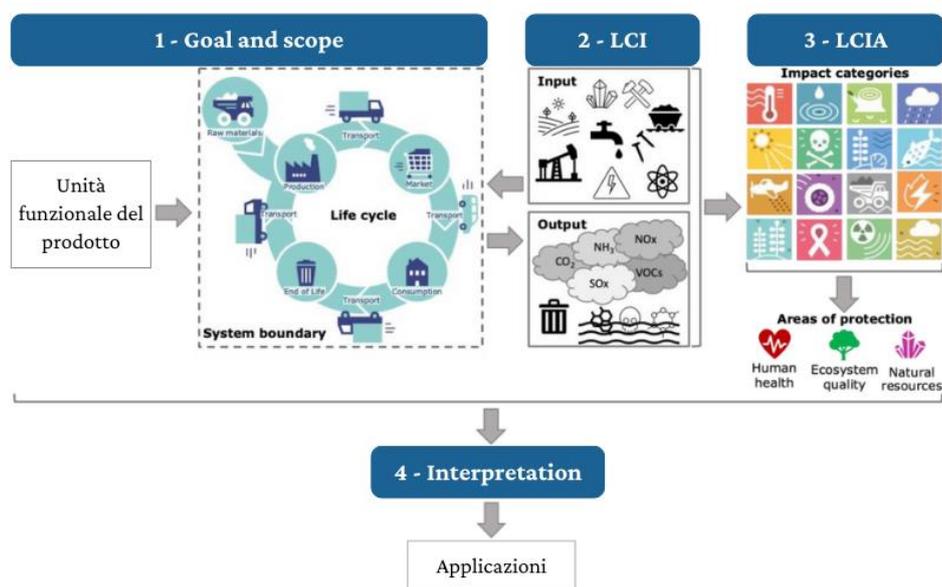


Figura 7 Workflow generale per uno studio LCA [22].

La prima fase (1) coinvolge la definizione degli obiettivi previsti dallo studio, campo di applicazione, usi e destinatari insieme ai confini del sistema e requisiti di qualità dei dati. In questa fase sono inclusi le analisi comparative di un prodotto e l'identificazione di punti critici durante il ciclo di vita. Inoltre, sono anche identificati il sistema produttivo, l'unità funzionale, i confini del sistema e le categorie di impatto oggetto dello studio.

La successiva fase di analisi LCI (2) comprende la raccolta di dati dettagliati relativi all'uso delle risorse e delle emissioni di tutte le fasi del ciclo di vita rilevanti dal punto di vista ambientale come l'estrazione delle materie prime, la produzione, la distribuzione, la fase d'uso e di fine vita dei materiali. Si crea un inventario completo delle quantità di input e output per ciascuna fase (fabbisogni energetici e di materie prime, emissioni ambientali, scarichi del prodotto e altri processi) così che nella successiva LCIA (3) i flussi di dati raccolti vengano tradotti in indicatori di valore di impatti ambientali mediante dei metodi di caratterizzazione. Tra questi sono inclusi l'uso di risorse naturali, l'emissione di gas serra, l'inquinamento dell'aria e delle risorse idriche.

Nella fase finale (4), i risultati appena ottenuti sono interpretati sfruttando differenti tipologie di analisi basate, ad esempio, sul contributo o sulla sensibilità per formulare considerazioni finali sulla base degli obiettivi e scopi definiti. Sono valutate le possibili strategie di miglioramento della sostenibilità ed i risultati sono comunicati con chiarezza e trasparenza agli *stakeholder* interessati. In particolare, essendo il metodo iterativo, può esserci la necessità di ridefinire la prima fase in caso di mancanza di sufficienti dati per l'LCI o anche dopo aver riscontrato un certo grado di incertezza sulle stime riportate [25].

2.1.3. *Gli approcci di LCA attribuzionale e consequenziale*

La norma ISO 14044 fornisce una guida generale per l'applicazione dell'LCA in un processo sequenziale che va dalla definizione degli obiettivi e del campo di applicazione fino alla valutazione degli impatti ambientali. Ricordando che la seguente è al momento una suddivisione semplicistica, questo approccio può essere utilizzato sia per la descrizione del modello LCA attribuzionale (aLCA) che per quello consequenziale (cLCA) che differiscono principalmente per la raccolta dei dati e la gestione della multifunzionalità (ovvero i co-prodotti): il primo descrive in maniera statistica un sistema di prodotto medio ed i suoi effetti ambientali mentre il secondo si concentra sull'influenza degli scambi ambientali conseguenti le modifiche apportate nel sistema [16].

In una modellazione attribuzionale, gli impatti ambientali sono direttamente assegnati alle diverse fasi del ciclo di vita del prodotto, servizio o processo escludendo gli effetti indiretti o le conseguenze a livello di sistema. Essa si pone l'obiettivo di identificare la quota degli oneri ambientali totali considerando come processi d'interesse quelli fisicamente relazionabili al prodotto sottoposto allo studio per poi modificarli mediante dati medi. La maggior parte degli studi pubblicati sull'LCA seguono questo tipo di approccio grazie ad una più semplice applicazione e richiesta di dati più facili da ottenere. L'aLCA restituisce le prestazioni ambientali del prodotto utili al produttore per, ad esempio, le EPD. Questo approccio suggerisce quindi una valutazione del ciclo di vita legato a meno ipotesi consentendo il *benchmarking* delle prestazioni ambientali e il riconoscimento degli *hot-spot* al fine di agevolare lo sviluppo di strategie efficienti.

Tuttavia, al momento si sta osservando un aumento dell'interesse riguardo la conduzione di una LCA consequenziale di modo da poter includere l'indagine degli effetti marginali del cambiamento della produzione o i possibili effetti delle sostituzioni su altri settori. Le conseguenze ambientali possono derivare da cambiamenti, ad esempio, nella domanda o nell'offerta o da decisioni prese nell'ambito del

ciclo di vita sui flussi di materiali e risorse. La modellazione cLCA ha lo scopo di valutare come il prodotto studiato influenzi i flussi fisici di rilevanza ambientale, le modifiche apportate al sistema coinvolto e i processi influenzati attraverso le dinamiche di mercato. Questo tipo di analisi prende in considerazione gli effetti a cascata, ossia come una decisione presa nella fase di produzione può portare ad impatti sul comportamento dei consumatori e sul mercato nel suo complesso. Seppur questo è un approccio più complesso da applicare che richiede un maggior grado di dettaglio dati, può al tempo stesso fornire una visione più completa degli impatti complessivi e si auspica che lo sviluppo di ulteriori linee guida future aiutino a superare i limiti dell’LCA attribuzionale [13], [25].

Considerando l’ambito di fine vita di un prodotto, il riciclo di un materiale ha il vantaggio di ridurre la necessità di produrne di nuovi e di gestire i rifiuti derivanti da quelli usati, portando spesso a un beneficio ambientale complessivo. Tuttavia, quando si applica la metodologia LCA per valutare l’impatto ambientale di un singolo prodotto, il riciclo a circuito aperto, in cui il materiale viene utilizzato in diversi prodotti, rappresenta una sfida. Nel contesto di una LCA consequenziale, è necessario esaminare o fare delle supposizioni sulle riduzioni nella produzione di nuovi materiali e nella gestione dei rifiuti che si verificano grazie all’uso di materiali riciclati nel prodotto e al riciclo del prodotto stesso alla fine della sua vita utile. Di conseguenza, il sistema considerato viene esteso per includere anche questi processi. D’altra parte, la scelta di una LCA attribuzionale comporta la necessità di decidere come ripartire l’impatto ambientale effettivo della produzione iniziale, dei processi di riciclo e della gestione finale dei rifiuti tra i vari prodotti che utilizzano il materiale riciclato [26].

2.1.4. La complessa analisi del ciclo di vita dei prodotti tessili lanieri

La metodologia LCA può essere utilizzata per definire le principali aree di impatto, valutare potenziali sfide e decisioni ambientali, garantire l’etichettatura ecologica e la certificazione dei tessili. Ad esempio, dallo studio di una prestazione ambientale dei prodotti tessili nell’UE-27 realizzato a partire dall’analisi degli impatti lungo le fasi di produzione e trasformazione, distribuzione, utilizzo e fine vita, è stato realizzato in Tabella 3 un elenco di possibili opzioni di miglioramento per la riduzione degli stessi nel ciclo di vita di un prodotto tessile [23].

Tabella 3 Esempio di opzioni di miglioramento trattate da uno studio LCA per la riduzione degli impatti ambientali del ciclo di vita di un prodotto tessile [23].

Stage	Opzioni
Produzione	Ridurre l’uso di prodotti agrochimici
	Sostituzione del cotone con canapa o lino
	Riduzione del consumo di sostanze chimiche di dimensionamento
	Sostituzione delle sostanze chimiche con enzimi
	Utilizzo di tecniche alternative di maglieria
	Utilizzo di controller di coloranti e macchine per la tintura
	Riciclo dell’acqua
Distribuzione	Riduzione del trasporto aereo

Uso	Riduzione della temperatura di lavaggio
	Ottimizzazione del carico degli elettrodomestici
	Riduzione dell'asciugatura a tamburo
	Miglioramento dell'efficienza degli apparecchi di lavaggio/asciugatura
End-of-life	Promozione del riutilizzo e del riciclo

Si esamina ora brevemente il ciclo di vita di un prodotto tessile laniero al fine di sintetizzare le attuali sfide a cui va incontro l'LCA. Le fasi coinvolte nel ciclo di vita dei prodotti tessili e di abbigliamento in lana differiscono in quanto coinvolgono intricate catene di approvvigionamento con trasferimenti tra diversi paesi e regioni. Inoltre, le proprietà uniche della lana, come la durabilità degli indumenti, l'usura e i vari metodi di pulizia, introducono variabili complesse difficili da quantificare.

La filiera della lana può essere considerata altamente efficiente, poiché le fibre scartate nelle diverse fasi del flusso principale (la lavorazione pettinata) confluiscono generalmente nella lavorazione laniera per la produzione di filati più grossolani. Nella maggior parte dei casi, i processi della filiera produttiva sono *multi-output* e richiedono uno specifico criterio di allocazione per la distribuzione dell'impatto. Da uno studio italiano si è osservato come i prodotti derivanti dalla lavorazione pettinata a base di fibre lunghe hanno impatti maggiori rispetto ai prodotti derivanti dalla lavorazione laniera a base di fibre corte. Ne risulta che le fibre più corte hanno generalmente impatti inferiori rispetto alle fibre più lunghe utilizzate per la produzione di filati fini. Nello specifico, la maggior parte delle fibre corte hanno un impatto sul cambiamento climatico compreso tra 25 e 30 kg CO₂-eq/kg, mentre le fibre più lunghe hanno un impatto di 78-97 kg CO₂-eq/kg [27].

Gli indumenti di lana sono prodotti attraverso una sequenza di fasi, come mostrato in Figura 8 con le principali fasi di produzione e i co-prodotti, che iniziano con la produzione di *greasy wool* negli allevamenti di pecore, passando attraverso varie fasi di lavorazione, il confezionamento dei capi, la vendita al dettaglio, fino all'uso da parte dei consumatori.

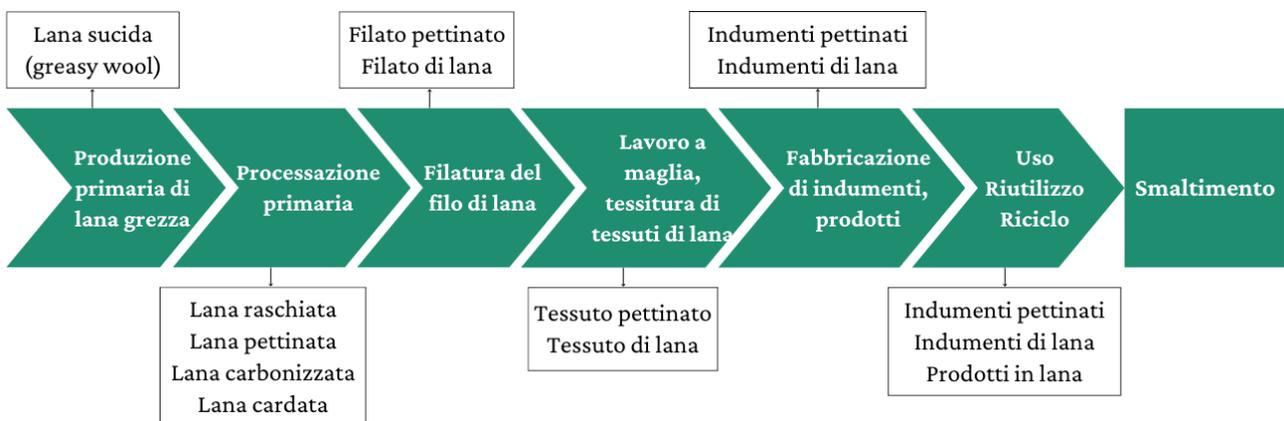


Figura 8 Schematizzazione del ciclo di vita della lana dalla culla alla tomba [11].

La maggior parte dei lavori trovati in letteratura si sono concentrati più sull'iniziale segmento della fase di lavorazione della lana che sulle fasi di *end-of-life* sia per mancanza di dati sia perché le azioni di smaltimento differiscono in tipologia da paese a paese. Gli studi fino ad ora pubblicati hanno valutato in maniera rilevante soprattutto la categoria d'impatto del potenziale di riscaldamento globale (GWP), associato all'effetto serra delle emissioni di gas serra tradotto in CO₂-eq e comunemente chiamata impronta di carbonio del prodotto. Ulteriori indicatori come quelli relativi all'acidificazione, eutrofizzazione, tossicità umana, impatto sulla biodiversità, uso dell'acqua e del suolo permetterebbero di fornire un quadro più completo sulle misure di sostenibilità ambientale.

L'analisi LCA si complica ulteriormente a causa della richiesta di introdurre nello studio sia i prodotti intermedi che i co-prodotti (come grano, carne, latte, lanolina e letame) che hanno impatto economico e sociale rilevante. In particolare, la presenza di questi ultimi implica una maggiore validità nell'utilizzo di uno studio basato sull'LCA attribuzionale che fa uso di un sistema di allocazione per differenziare l'onere ambientale tra la gamma di co-prodotti. Infatti, essendo in un caso di fibre animali come la lana, per la gestione dei co-prodotti, si specifica l'adozione di un sistema di allocazione biofisica (calcolata su un periodo di un anno) dalla culla all'allevamento per tenere conto delle specie animali miste negli allevamenti.

I dati ricavabili dalla fase di utilizzo da parte del consumatore risultano essere i meno affidabili ed i più incerti. Questa fase ha un impatto ben rilevante sull'intero ciclo di vita del prodotto tessile con input riferito ad acqua, detersivo ed energia, mentre output ad acque reflue. Gli elementi che interessano questa fase sono la durata della vita utile del prodotto, la frequenza di usura, la tipologia di pulizia, il numero di cicli di lavaggio con tanto di temperatura e volume di lavaggio, la quantità e tipologia di detersivo e la modalità di asciugatura. Per via delle ovvie difficoltà nell'ottenimento di dati rappresentativi la comunità dei consumatori, questa fase è spesso esclusa dalle analisi LCA di un prodotto tessile anche se si prevede che le ricerche in corso forniranno conoscenze maggiormente rappresentative sul comportamento dei consumatori [11], [13], [16]. A questi è destinato anche la scelta del processo di fine vita del capo in lana, che tra le varie opzioni possono seguire percorsi di riciclo a circuito chiuso o aperto in alternativa al riutilizzo commerciale o non. In particolare, durante il processo di riciclo meccanico delle fibre di lana, è importante conservarne la lunghezza il più possibile in quanto ciò facilita le fasi successive di lavorazione e migliora la qualità del prodotto finale. Le fibre di lana possono essere estratte più facilmente dai tessuti a maglia rispetto ai tessuti (pettinati), il che consente loro di conservare una maggiore lunghezza delle fibre. Le fibre con lunghezza sufficiente possono essere filate nuovamente per creare filati, mentre le fibre più corte sono più adatte per la produzione di tessuti non tessuti [12].

I processi di riciclo e riutilizzo hanno il potenziale di ridurre l'impatto ambientale del prodotto grazie all'aumento della sua durata di vita utile moderando l'ulteriore produzione di nuovi indumenti, ma anche in questa fase di fine vita la metodologia LCA presenta lacune di dati in molti paesi.

In conclusione, è possibile osservare numerosi limiti applicativi associati all'LCA dei prodotti tessili in lana. Prima di tutto, la complessità della catena di approvvigionamento che coinvolge numerose regioni e paesi rende difficile una corretta trasparenza e tracciabilità degli impatti lungo tutto il percorso.

La variabilità nelle proprietà della lana, ma anche nelle pratiche di allevamento a livello di gestione del pascolo o di alimentazione, così come la distribuzione geografiche delle pecore, influenzano i dati delle emissioni. A queste contribuiscono anche la scelta del metodo di trasporto e la distanza che dovranno affrontare la lana grezza ed il prodotto finito. La scarsità di dati riguardanti le fasi di uso e di *end-of-life* dei capi non permette di riflettere adeguatamente la realtà pratica. In più, l'allocazione degli impatti può portare a discussioni sul migliore metodo da utilizzare. Oltre agli aspetti ambientali, l'LCA dovrebbe considerare anche gli impatti sociali legati alle condizioni lavorative nei paesi produttori e alle questioni dei diritti umani per ottenere una valutazione più completa.

2.2. L'EF come risposta alle sfide lasciate dall'LCA

2.2.1. Una moderna, coerente e completa valutazione ambientale

Il Joint Research Centre (JRC) della Commissione Europea ha svolto un passo significativo per l'armonizzazione dell'LCA grazie allo sviluppo dell'*International Reference Life Cycle Data System* (ILCD) che fornisce linee guida, dati e metodi standardizzati per condurre analisi LCA coerenti e confrontabili su scala internazionale valorizzando i principi di qualità dei dati.

Sulla base di questi principi, la CE ha emesso la *Recommendation on the Product and Organisation Environmental Footprint* (2013), documento che rappresenta un avanzamento scientifico per la valutazione e la comunicazione dell'impatto ambientale dei prodotti lungo tutto il loro ciclo di vita. Questa raccomandazione è finalizzata a promuovere la sostenibilità ambientale e a orientare i consumatori verso scelte più informate e responsabili.

Infatti, come anticipato al Sottoparagrafo 2.1.3., la metodologia LCA non è restia da questioni che ne limitano l'applicazione. La raccolta di una vasta quantità di dati per coprire tutti i flussi di materiali ed energia relativi al sistema d'oggetto può comportare un certo grado di incertezza, specialmente quando si considerano le ultime fasi del ciclo di vita. Nello specifico, durante gli studi LCA di catene del valore globalizzate come può essere l'industria del tessile e dell'abbigliamento, è talvolta necessario fare ipotesi su processi per i quali non esistono dati sufficienti o utilizzare dati medi associati ad una risoluzione spaziale e temporale ben limitata. Nonostante gli standard abbia regole specifiche per affrontare queste problematiche, l'introduzione della PEF, una nuova metodologia basata sull'analisi del ciclo di vita (LCA), offre benefici significativi per l'industria (regole specifiche, comparabilità, ottimizzazione dei costi, eco-design e quadro comune) [24].

Le divergenti affermazioni talvolta ottenibili da studi di LCA hanno portato allo sviluppo del metodo dell'*Environmental Footprint* (EF), schema autorevole definito dalla CE riguardante qualsiasi prodotto o organizzazione presente sul mercato europeo. Questo progetto si prospetta come una valida risposta in termini di riproducibilità e comparabilità dei prodotti al fine di procurare un chiaro supporto decisionale ed un'affidabilità finale che richieda minimi revisioni e dettagli di verifica aggiuntivi. Dopo il completamento della Fase Pilota (2013-2018), che ha comportato lo sviluppo di 21 PEFCR per specifiche categorie di prodotti coinvolgendo circa 300 organizzazioni, tra cui associazioni settoriali e importanti

produttori, oltre a 3000 *stakeholder*, l'attuale Fase di transizione è incentrata sull'ulteriore sviluppo, aggiornamento e sperimentazione delle PEFCR perfezionandone il metodo e le politiche alla base che la guidano [28].

Nell'ambito dello studio della fase di riciclo via LCA, la modellazione relativa può presentare sfide nella corretta assegnazione degli oneri e benefici al prodotto riciclato o incenerito, a seconda dell'approccio di modellazione utilizzato. All'interno dello schema PEF, la *Circular Footprint Formula* (CFF) viene utilizzata per attribuire correttamente crediti per il riciclo, l'uso di materiale riciclato ed il recupero energetico. Tuttavia, questa è una concettualizzazione limitata della circolarità poiché si concentra principalmente sui flussi di materiali. Mentre la durata del servizio e gli attributi dei materiali, come la rinnovabilità delle materie prime, possono non essere adeguatamente considerati. Pertanto, nei criteri di accreditamento della circolarità, spesso sono inclusi requisiti aggiuntivi che vanno oltre il semplice riciclo di materiali. Questi possono comprendere la certificazione delle materie prime provenienti da sistemi agricoli rigenerativi o biologici, l'eliminazione graduale di sostanze tossiche come i coloranti e il progressivo abbandono del poliestere a causa delle microfibre di plastica, insieme alla spinta verso l'uso di fonti energetiche rinnovabili [22], [29]. L'LCA è quindi un metodo di valutazione e di per sé non suggerisce azioni risolutive o politiche ma porta a risultati finali che possono dare un contributo alle eventuali azioni da impiegare in futuro. La necessità di sviluppare un metodo armonizzato, come definito da EURATEX, sostenitore del *Circular Economy Action Plan* (2020), permetterebbe alle imprese di avere una risorsa competitiva per la valutazione delle intere prestazioni ambientali e non un ulteriore onere.

2.2.2. Un approccio modulare tra le varie parti

All'interno del progetto *European Commissions' Single Market for Green Products* (2013) è stata introdotta la guida al *Product Environmental Footprint* (PEF) con il fine di realizzare una base solida per l'integrazione degli standard internazionali già esistenti per l'LCA con linee guida più specifiche, essendo questi standard spesso troppo ampi e generici per garantire studi coerenti e comparabili. La metodologia PEF offre un quadro che consente all'industria di valutare gli impatti ambientali dei prodotti seguendo regole di calcolo standardizzate. La guida valuta i prodotti mediante sedici indicatori ambientali per definire correttamente i punti critici e le opportunità di azione sostenibili perfezionando il processo decisionale. Le aziende riescono così a misurare, comprendere e a migliorare l'impatto ambientale dei loro prodotti in modo da fornire ai consumatori i mezzi per scelte più consapevoli [24].

Questo metodo sviluppato dalla CE e allineato con gli obiettivi del *Green Deal* europeo, già citato al paragrafo introduttivo, mira alla costruzione di un approccio metodologico comune per la valutazione ed il *benchmarking* delle prestazioni ambientali dei prodotti sulla base di una valutazione globale degli impatti ambientali. Il processo di sviluppo è piuttosto lungo e impegnativo ed allo stato attuale mantiene un approccio di tipo teorico. Come verrà approfondito al Sottoparagrafo 2.3.1., esso fornisce un *benchmark* finale basato sul cosiddetto *average product* che non ha alcun riferimento ad un prodotto reale presente sul mercato.

Valutare e confrontare l'impatto effettivo dei prodotti è una sfida notevole a causa della complessità e della diversificazione dei prodotti e dei processi coinvolti, della partecipazione di diverse parti interessate, della diffusa catena di approvvigionamento globale e della varietà di capi d'abbigliamento (compresi colori, stampe e taglie varie). In particolare, nell'industria della moda, i prodotti hanno un ciclo di vita relativamente breve in termini di disponibilità sul mercato per la vendita.

Le *Product Environmental Footprint Category Rules* (PEFCR), sviluppate tra il 2013 e il 2016 e precedentemente menzionate, sono regole di categoria che estendono essenzialmente le linee guida della PEF per specifiche categorie di prodotti, assicurando che le stesse ipotesi, misurazioni e calcoli siano utilizzati per supportare dichiarazioni ambientali comparabili all'interno dello stesso gruppo di prodotti. Riassumendo, le PEFCR completano ed integrano le linee guida generali fornendo indicazioni distinte a livello della singola categoria di prodotto. Dal 2019, è in sviluppo un insieme unico di regole dedicato ai prodotti di abbigliamento e calzature (*PEFCR for Apparel & Footwear*), una tra le categorie di prodotti più complesse fino ad oggi e suddivisa in 13 sottocategorie di prodotti (magliette; camicie e camicette; maglioni e strati intermedi; giacche e cappotti; pantaloni e pantaloncini; abiti, gonne e tute; leggings, calze, collant e calzini; biancheria intima; costumi da bagno; accessori di abbigliamento; scarpe aperte; scarpe chiuse; stivali) [3].

In conclusione, la PEF rappresenta un passo cruciale per migliorare la coerenza nei calcoli LCA in tutta l'UE affrontando le carenze attuali nelle metodologie. Le correnti limitazioni possono generare dati errati, influenzando le decisioni di acquisto e le strategie ambientali. La Commissione Europea è proiettata verso l'implementazione di varie politiche ecologiche, come gli standard di *Ecodesign for Sustainable Products Regulation* (ESPR) per i tessili e criteri verdi per gli appalti pubblici, con la PEF come supporto. Questo dovrebbe consentire un approccio modulare tra i vari attori coinvolti nel programma (dalle PMI, aziende di nicchia alle multinazionali) permettendo un confronto più efficace tra le opzioni disponibili.

2.3. Descrizione delle PEFCR A&F

2.3.1. Timeline e processo di progettazione

Il processo di elaborazione di una PEFCR è articolato e coinvolge numerosi attori, come ben evidenziato in Figura 9.



Figura 9 Rappresentazione schematica dei ruoli ed interazioni chiave tra gli attori principali coinvolti nella redazione di una PEFCR [3].

La Segreteria Tecnica (TS) coordina lo sviluppo delle regole e del progetto ed è composta dal presidente, dal coordinatore della segreteria tecnica (TSC, tipicamente associazione industriale finanziata da grandi marchi), dai membri e dal responsabile tecnico (Quantis). La TS deve garantire la rappresentatività di almeno il 51% del mercato coinvolgendo *stakeholder* ed esperti dello specifico prodotto o settore in esame. La Segreteria Tecnica (Figura 10), istituita nel 2019 ed attiva dal 2020, per la realizzazione della PEFCR A&F differisce dalle altre regole di categorie in quanto i membri sono suddivisi in votanti o non votanti (gruppi di moda, enti industriali del settore tessile, ONG, esperti scientifici e governi), e osservatori (CE e EEB) a seconda del contributo finanziario versato dall'organizzazione di appartenenza.



Figura 10 I 26 membri della Segreteria Tecnica [3].

Nel processo di sviluppo delle regole di categorie di prodotto, la TS definisce inizialmente un prodotto rappresentativo (RP) rappresentante, appunto, il prodotto medio venduto sul mercato dell'UE all'interno della categoria di prodotti considerata. Questo RP può essere un prodotto reale o un prodotto virtuale, creato basandosi su una media ponderata delle vendite nel mercato europeo e la cui prestazione ambientale funge da *benchmark* con cui confrontare la prestazione ambientale di altri prodotti. Esso mira a visualizzare gli impatti ambientali medi dell'intera categoria di prodotto ed in maniera del tutto

facoltativa, possono essere presentate insieme delle classi di performance (ad esempio, da A a F) al fine di facilitare il confronto delle performance di un prodotto rispetto al *benchmark* [24], [30].

Essendo lo sviluppo di una PEFCR integrata in un processo democratico, al ruolo della TS si unisce la parte di società civile composta dal comitato direttivo (durante la Fase pilota, il SC era composto da un membro di ogni progetto pilota, dei rappresentanti della CE e di ciascun Stato membro, EFTA o paese candidato, e un rappresentante dei principali gruppi di *stakeholder*) a cui spetta l'approvazione della bozza e dei documenti definitivi insieme ad un comitato consultivo tecnico (TAB) formato da un esperto di LCA, un esperto del settore ed un rappresentante delle ONG della società civile, che fornisce un rapporto dichiarativo di revisione sulla seconda bozza del rapporto. Nel mentre le PEFCR si apprestano ad essere compilate, si tengono due consultazioni pubbliche in cui sono forniti *feedback* sulla bozza. A seguire delle raccomandazioni fornite dal TAB e dagli Stati membri dell'UE, la decisione finale spetta alla Commissione Europea. Il completamento e la fase di lancio della PEFCR A&F inizialmente previsti per fine 2021, sono stati posticipati al quarto trimestre del 2024 per via di ritardi sul fronte database di dati secondari (EF 3.1) [3].

2.3.2. Una prevenzione del *greenwashing* in aggiornamento

Il metodo PEF, come la metodologia LCA, è anch'esso uno strumento di valutazione ambientale che porta con sé dei limiti. In particolare, la PEFCR A&F è descritta come parte integrante della politica per affrontare il *fast fashion*, ma la sua metodologia è complessa e in evoluzione. La sfida principale è definire quanto spesso un prodotto verrà indossato, considerando durabilità emotiva e fisica.

Le regole di categoria non coprono tutti gli aspetti socio-economici ed ambientali della sostenibilità, inclusi l'effetto sulla biodiversità, il rilascio di microplastiche senza una soglia definita, tossicità terrestre ed ecotossicità marina, impatto completo delle sostanze chimiche su persone ed ecosistemi, impatto sociale nel settore tessile e differenze tra prodotti nuovi e usati. Inoltre, ci sono incertezze sulla gestione dell'uso dei prodotti ed il conteggio dei loro utilizzi in relazione alla durabilità che ne modifica le prestazioni finali.

Queste regole dovrebbero bilanciare il rigore e l'accessibilità dei dati, ma l'uso di database commerciali per i dati secondari potrebbe comprometterne la trasparenza non essendo tutti ad accesso aperto. Per far fronte a questa mancanza, è in corso d'opera lo sviluppo del progetto indipendente EF 3.1.

Nonostante la presenza di queste limitazioni, che verranno via via analizzate nel corso dei vari aggiornamenti, uno studio PEF può essere sfruttato dai marchi sia per scopi interni che esterni. I primi riguardano l'ottimizzazione dei processi lungo il ciclo di vita del prodotto al fine di ridurre l'impatto ambientale, l'identificazione di *hotspot* ambientali e come strumento di monitoraggio e comunicazione delle prestazioni ambientali. In alternativa, tra le applicazioni esterne, uno studio PEF si pone come risposta politica alle richieste dei consumatori o del rivenditore, utilizzata per fini comunicativi di marketing in base alle performance del prodotto rispetto al *benchmark* o per realizzare dichiarazioni *business-to-consumer* (B2C) o *business-to-business* (B2B). Un'integrazione interessante del metodo PEF nelle politiche europee è lo schema volontario nazionale *Made Green in Italy* che ha l'obiettivo di etichettare,

valorizzare e comunicare l'impronta ambientale di prodotti italiani che soddisfano certi requisiti di prestazioni ambientali secondo le classi di performance.

Allo stato attuale, lo schema include categorie di prodotti alimentari (aceto, formaggi e pasta) e non alimentari (imballaggi in legno, borse multiuso, servizi delle attività di lavanderia industriale e tessuti in lana cardata o peli fini cardati) [3], [31].

Il metodo PEF sta diventando sempre più importante nella valutazione delle prestazioni ambientali dei prodotti, con ancora limitazioni pratiche da affrontare, soprattutto per la gestione dei costi di fattibilità di uno studio PEF. Ad ogni modo, gli studi sull'impronta ambientale supportano l'allineamento con le politiche dell'UE, facilitando il commercio transfrontaliero e identificando opportunità di miglioramento ambientale. Inoltre, l'EF aiuta a costruire reputazione del marchio, fidelizzare i clienti e affrontare le preoccupazioni ambientali dei consumatori. L'uso di un unico metodo riduce i costi e promuove una concorrenza equa, evitando il greenwashing. In aggiunta, le istituzioni finanziarie collegano il profilo di rischio all'impronta ambientale, promuovendo maggiormente gli investimenti sostenibili [24].

2.3.3. Aspetti chiave per la realizzazione di uno studio PEFCR

Per la produzione di studi PEF affidabili, riproducibili e verificabili è necessario rispettare i principi analitici fondamentali di (1) rilevanza affinché tutti i dati e i metodi utilizzati siano pertinenti con l'obiettivo dello studio ed includano tutti i flussi materiali ed energetici rilevanti; (2) completezza per garantire la messa in opera rigorosa del metodo definito al fine di assicurare (3) coerenza; (4) precisione volta a ridurre le incertezze risultanti nella modellazione; (5) trasparenza in quanto le informazioni ricavate siano divulgate per la conoscenza consapevole degli utenti e lo studio di attendibilità da parte degli *stakeholder* [32]. I risultati ottenuti per uno specifico prodotto con il metodo generale non sono direttamente paragonabili ai risultati di altri prodotti poiché essendo certi abbastanza peculiari, alcune scelte a livello di metodo e di dati possono essere non sempre condivisibili. Di conseguenza, la richiesta nello sviluppo delle PEFCR è quella di stabilire requisiti di categoria e di settore sull'impronta ambientale consentendone la comparabilità. Seguendo l'illustrazione in Figura 11, si passano di seguito in rassegna alcuni aspetti fondamentali del documento tecnico del PEFCR A&F (o del metodo PEF più in generale).

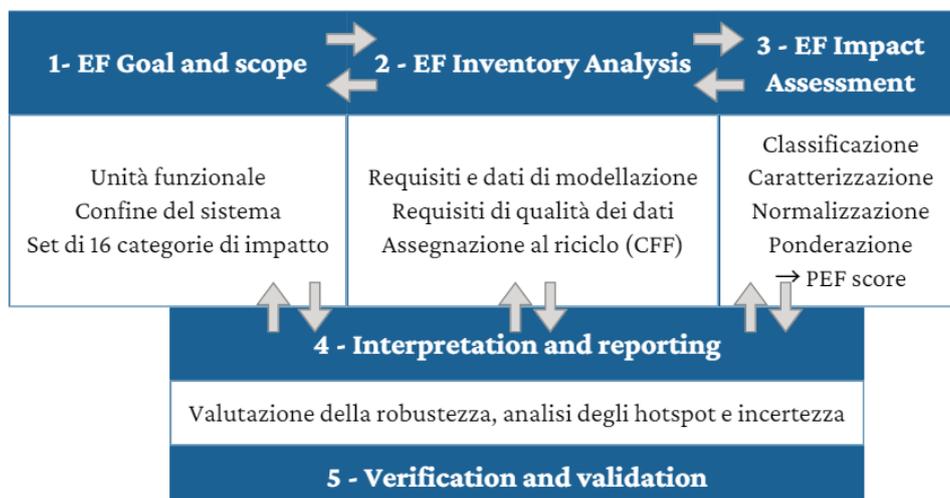


Figura 11 Sequenza degli step da seguire per l'utilizzo del metodo EF [24].

Fase 1 – EF goal and scope definition

Nella fase di definizione dell'obiettivo sono stabiliti gli scopi, i motivi per cui si effettua lo studio, i destinatari ed il pubblico di destinazione dello studio, nonché l'identità del verificatore. Si stabiliscono quindi i confini del sistema, l'unità funzionale (FU), il flusso di riferimento, le categorie d'impatto EF (tutte le PEFCR devono coprire sedici categorie) ed informazioni aggiuntive (impatti sulla biodiversità e perdita di microplastiche). Il confine del sistema definisce i processi e le fasi del ciclo di vita del prodotto considerando tutti gli input e output presenti dall'estrazione delle materie prime al fine vita. La FU, impiegata come unità di riferimento, descrive la prestazione quantificata di un sistema di prodotto secondo i seguenti criteri: funzione o servizio forniti ("cosa"), portata della funzione o del servizio ("quanto"), durata o vita del prodotto ("quanto tempo") e livello di qualità atteso ("quanto bene"). Per il caso tessile d'interesse la FU è definita in modo da dare il giusto merito a quei prodotti che durano più a lungo in quanto l'impatto viene distribuito sul numero di utilizzi. Invece, il flusso di riferimento è la quantità di prodotti necessaria a fornire la funzione definita.

Fase 2 – EF Inventory Analysis

Si procede con la fase di raccolta ed inventariato di tutti gli elementi in ingresso e in uscita (materie prime, energia, rifiuti, prodotti e co-prodotti, varie emissioni nell'aria, nell'acqua e nel suolo) relativi alla catena di approvvigionamento del prodotto. La modellazione dei dati avviene mediante regole di allocazione (biofisica e/o economica) rispettando i requisiti di qualità dei dati. Nello specifico, riguardo la fase d'uso, il contenuto di materiale riciclato e la fine del ciclo di vita sono modellati attraverso la formula dell'impronta circolare (CFF), su cui verrà fatta una più approfondita analisi dal capitolo successivo.

I dati dell'LCI sono classificati come set di dati primari o di dati secondari. I primi fanno riferimento ai dati specifici della filiera produttrice o dell'azienda che conduce lo studio (dati sui consumi, misurazioni delle emissioni, composizione di prodotti e rifiuti, beni acquistati/venduti) pertinenti al prodotto specifico, mentre i secondi si riferiscono a dati che non sono specifici del prodotto oggetto di studio (dati tratti dalla letteratura, pubblicazioni scientifiche, statistiche governative o rapporti di settore) rappresentanti un livello di attività del mercato medio ed utilizzati per colmare le lacune dove i dati primari sono mancanti. A questi dataset conforme a EF è richiesto il soddisfacimento dei *data quality rating* (DQR) che derivano dagli attributi di completezza, adeguatezza e coerenza metodologica, combinati a quattro criteri qualitativi specifici (rappresentatività tecnologica TeR, geografica GeR, temporale TiR e precisione P). Questi requisiti sono classificati secondo cinque livelli di qualità a cui viene assegnato un punteggio da 1="eccellente" a 5="scarso" ed il valore medio definisce la qualità totale dei dati. Per i set di dati primari si richiede un punteggio di qualità eccellente (≤ 1.5) mentre per i dati secondari è sufficiente almeno una buona qualità (≤ 3.0). In aggiunta, il metodo PEF fornisce anche una cosiddetta *data need matrix* (DNM) per identificare ed organizzare i dati in categorie e fasi specifiche del ciclo di vita del prodotto consentendo un'efficiente attività di acquisizione dati.

Qualora i set di dati conformi all'EF non siano disponibili, è possibile passare all'utilizzo di *proxy*, cioè valori rappresentativi alternativi dei dati effettivi necessari per condurre lo studio basati su valori medi o su stime ricavate da dati simili e correlati.

Fase 3 – EF Impact Assessment

Dopo questa fase iterativa, la successiva fase di valutazione dell'impatto consta di classificazione, caratterizzazione, normalizzazione e ponderazione. I risultati dello studio PEF sono riportati come valori caratterizzati, normalizzati e ponderati per ciascuna categoria d'impatto EF e come punteggio complessivo unico (*PEF score*). Pertanto, si procede all'assegnazione dei flussi d'inventario dell'LCI alla pertinente categoria d'impatto EF quantificando l'entità dell'impatto mediante fattori di caratterizzazione forniti dai modelli, poi tradotti mediante calcoli in valori di contributo quantitativo. La fase seguente normalizza i risultati rispetto ad un'unità di riferimento trasformandoli in valori adimensionali, poi convertiti mediante fattori di ponderazione percentuali basati sul grado di importanza espresso dalle singole categorie d'impatto.

Fase 4 – Interpretation and reporting e fase 5 – Verification and validation

Dopo aver effettuato la valutazione dell'impatto ambientale e l'interpretazione dei risultati per garantire l'aderenza agli obiettivi e ai criteri di qualità, il processo di studio PEF si conclude con una revisione completa del modello. Questa revisione comprende controlli di completezza, di sensitività e di coerenza per valutare la conformità e la solidità del modello.

La parte finale prevede la verifica obbligatoria e convalida della valutazione di conformità, da parte di uno o più verificatori esterni, quando ne è richiesto l'utilizzo per una comunicazione esterna [3], [24], [32].

Nello specifico caso, la PEF CR A&F riguarda uno tra i settori industriali più complessi ed eterogenei ma al tempo stesso mira a fornire indicazioni sull'ottimizzazione delle prestazioni ambientali dei prodotti singoli introducendo anche un *PEF score* che può servire per scopi di marketing e per dichiarazioni comparative.

CAPITOLO 3

MODELLAZIONE DEL RICICLO NELLA VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA

3.1. Panoramica dei metodi di allocazione per il fine vita

La scelta del metodo di modellazione per la fase di riciclo dei materiali ha un significativo impatto riguardo l'analisi ambientale di quei prodotti realizzati con un'alta percentuale di materiale riciclato e di quelli che sono introdotti in un nuovo ciclo di riciclo. A questo proposito si possono definire i concetti di ciclo di vita del prodotto e di ciclo di vita del materiale, che si riferiscono ad un sistema di attività associato a flussi materiali ed energetici. Il ciclo di vita del prodotto (approccio di prodotto) considera la fase iniziale di creazione del materiale primario o riciclato, passando attraverso i processi di fabbricazione e utilizzo, fino alla gestione dei rifiuti del prodotto, che può a sua volta generare materiali destinati al riciclo in altri prodotti. D'altra parte, il ciclo di vita del materiale (approccio di sistema globale) si concentra sul percorso del materiale primario, includendo eventuali cicli multipli di produzione, utilizzo e riciclo, fino alla fase finale di gestione dei rifiuti del materiale che non è più soggetto a riciclo. La scelta di uno o l'altro approccio è funzione dell'espansione dei confini di un sistema che vuole includere tutti i prodotti che ne fanno parte e dell'etichettatura dei prodotti finali potendoli correttamente distinguere. Poiché non esiste un unico approccio di allocazione universalmente accettato tra le numerose opzioni disponibili ed il settore tessile è particolarmente complesso, per poter affrontare al meglio le difficoltà intrinseche occorre passare al testing pratico di più metodi di modellazione [26].

Le formule di assegnazione di fine vita consentono una valutazione degli scenari possibili di fine vita, appunto, quali riciclo, riutilizzo, incenerimento e smaltimento sia nel caso di sistemi a circuito aperto che chiuso. Come risposta al metodo LCA che comprende linee guida generali, sono stati sviluppati numerosi approcci di allocazione a fine vita basati sugli standard ISO per diverse applicazioni, settori e prodotti, fondamentalmente suddivisibili in tre tipologie:

- l'approccio 0:100 (*EoL recycling*) assegna totalmente l'impatto del riciclo al prodotto che produce un materiale riciclato e nessun onere ai prodotti a valle che utilizzano materiali riciclati in ingresso;
- l'approccio 100:0 (*cut-off*) assegna totalmente l'impatto del riciclo al prodotto che utilizza materiale riciclato e nessun onere derivante dalle operazioni di riciclo al prodotto a monte;
- l'approccio 50:50 (*equal share*) assegna il 50% dell'impatto del riciclo ad entrambi i prodotti ovvero a quello che produce e a quello che utilizza materiale riciclato (include la CFF) [33].

Ulteriori metodi che non ricorrono in alcun standard, ma discussi in letteratura, sono l'approccio 100:100 che assegna il 100% dell'impatto del riciclo ad entrambi i prodotti e un nuovo approccio di tipo 50:50 denominato *linearly degressive* (LDA) che distribuisce progressivamente l'impatto derivante dalla produzione iniziale a tutti i prodotti in un sistema a cascata, con la maggior quota dell'impatto attribuito al primo prodotto.

Il riciclo comporta due importanti benefici che devono essere considerati nella valutazione interna di un sistema di cascata: la riduzione dell'utilizzo di risorse primarie e la diminuzione dello smaltimento di rifiuti. La prima conseguenza è dovuta all'impiego di materiali riciclati nei prodotti, mentre la seconda deriva direttamente dal riciclo dei prodotti stessi.

In Figura 9 è mostrata una sintesi dei vari metodi fino ad ora applicati negli standard a seguito di un'analisi condotta utilizzando criteri di valutazione specifici. Occorre a tal proposito fare una premessa, ovvero al momento non esiste un approccio universale e ampiamente riconosciuto per l'allocatione poiché può variare in base a diversi parametri e circostanze specifiche. Pertanto, spesso è consigliato utilizzare una combinazione di diversi approcci, in modo che uno possa servire come base per dichiarazioni ambientali di prodotto o certificazioni LCA, mentre l'altro possa fornire dettagli specifici a fini informativi [34].

Metodo	Facilità di utilizzo	Dati facilmente reperibili	Risultati generalizzabili	Riflette caratteristiche decisive	Ambito del ciclo di vita	Esplicito, giustificato e valutato	Comprensibile	Rilevante per i decisori	Legittimo	Riproducibile
Cut-off semplice	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cut-off economico	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Assegnazione alle perdite materiali	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Assegnazione all'uso di materiale vergine	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Approcci 50:50	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Approcci 50:50 modificati per la qualità	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Circular Footprint Formula (CFF)	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Assegnazione basata sul prezzo di mercato	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sostituzione basata sul prezzo di mercato	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗
Approcci basati sull'elasticità del prezzo	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗
Assegnazione al punto di sostituzione	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗

Figura 9 Panoramica dei metodi analizzati tramite dieci criteri (✓=criteri soddisfatti, ✓=criteri parzialmente soddisfatti e ✗=criteri non soddisfatti) [26].

3.2. Analisi dei metodi di assegnazione più rilevanti

3.2.1. Approccio 100:0

Il metodo di *cut-off*, che rappresenta un approccio di modellazione della fase di riciclo relativamente semplice, consiste nell'assegnare a ciascun prodotto i carichi ambientali associati ai processi nel ciclo di vita di quel prodotto. La difficoltà principale che risiede nella definizione del confine tra i cicli di vita è stata superata considerando il sistema internazionale per le EPD che definisce il confine come il punto in

cui il materiale ha il suo minore valore di mercato, ovvero prima che il materiale di scarto venga raccolto per essere poi riciclato, come mostrato in Figura 10.

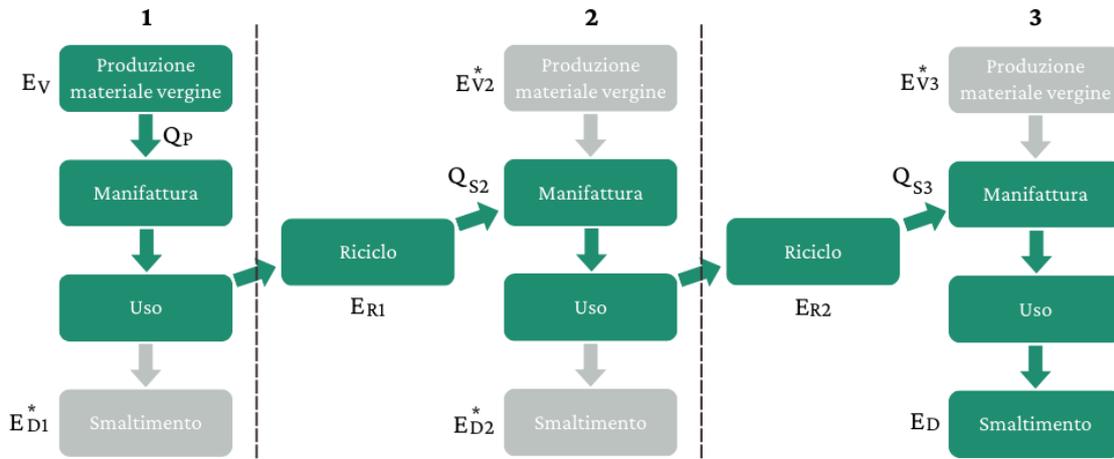


Figura 10 L'approccio di *cut-off* come descritto nel sistema EPD International [26].

Lo standard PAS 2050:2011 ha proposto due formulazioni per il calcolo delle emissioni GHG:

- se il prodotto non mantiene le stesse proprietà intrinseche del materiale vergine in ingresso (Equazione 1), l'impatto ambientale derivante per unità funzionale (E) rifletterà il contenuto riciclato specifico e/o il tasso di riciclo secondo l'approccio *open-loop*:

$$E = (1 - R_1) \times E_V + R_1 E_{recycled} + (1 - R_2) \times E_D \quad (1)$$

- se il prodotto mantiene le stesse proprietà intrinseche del materiale vergine in ingresso nello stesso o in un altro sistema di prodotto (Equazione 2), l'impatto ambientale derivante per unità funzionale (E) rifletterà il tasso di riciclo specifico del prodotto secondo l'approccio *closed-loop*:

$$E = (1 - R_2) \times E_V + R_2 E_{recycled} + (1 - R_2) \times E_D \quad (2)$$

dove:

- R_1 = contenuto di riciclato, ovvero la proporzione di materiale in ingresso nella produzione che è stato riciclato a partire da un sistema precedente ($0 \leq R_1 \leq 1$).
- R_2 = tasso di riciclo, ovvero la proporzione del materiale presente nel prodotto che sarà riciclata (o riutilizzata) in un sistema successivo. Questo valore deve tener conto delle inefficienze nei processi di raccolta e riciclo (o riutilizzo) ed essere misurato all'uscita dell'impianto di riciclo ($0 \leq R_2 \leq 1$).
- $E_{recycled}$ (o E_{rec}) = impatto derivante dal processo di riciclo del materiale riciclato (o riutilizzato), compresi i processi di raccolta, smistamento e trasporto.
- E_D = impatto derivante dallo smaltimento dei materiali di scarto (per esempio, discarica, incenerimento, pirolisi).
- E_V = impatto derivante dall'acquisizione e dalla prelaborazione di materiale vergine [13], [35].

Il metodo delineato tramite l'Equazione 1 considera esclusivamente le fasi nel ciclo di vita del prodotto, rendendolo una scelta appropriata per un'ALCA che tiene conto delle attività globali. Quindi, gli impatti associati alla produzione vergine e al riciclo a fine vita (EoL) vengono assegnati completamente all'utilizzatore del materiale.

Questo approccio promuove l'uso di materiale riciclato a patto che il processo di riciclo abbia un impatto ambientale inferiore rispetto alla produzione di materiale vergine ($E_V > E_R$). Inoltre, il metodo di *cut-off* semplificato favorisce il riciclo del prodotto dopo l'uso se lo smaltimento finale ha un impatto negativo sull'ambiente ($E_D > 0$) o quando il beneficio ambientale complessivo derivante dal riciclo ($E_V + E_D - E_R$) è significativo, come ad esempio nel caso di materiali come l'acciaio, l'alluminio o il rame. Tuttavia, per materiali come il legno o la carta, lo smaltimento dei rifiuti può avere un impatto positivo ($E_D < 0$) se questo prevede l'incenerimento con recupero energetico di materiali biogenici, ed il *cut-off* finisce per non incentivare il riciclo del materiale seppur questo sia positivo nei confronti dell'ambiente ($E_V + E_D - E_R > 0$). Il protocollo sui gas serra (GHG) di World Resources Institute (WRI) e World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) raccomandano l'utilizzo del presente metodo quando: il prodotto in studio contiene materiale riciclato ma la fase di riciclo dopo l'uso non è conosciuta o presente, l'offerta di materiale riciclabile supera la domanda di materiale riciclato o l'azienda che esegue l'LCA ha il controllo sulla quantità di materiale riciclato da utilizzare.

D'altra parte, non verrà analizzata con ulteriore dettaglio l'approccio *closed-loop* espresso tramite l'Equazione 2 in quanto non risulta essere un buon metodo da applicare nel settore tessile. Infatti, il protocollo GHG ne raccomanda l'applicazione nei casi in cui: il contenuto di riciclato non sia noto poiché non è possibile distinguere il materiale riciclato da quello vergine, la domanda di materiale riciclato supera l'offerta di materiale riciclabile o la vita utile del prodotto è breve e/o nota.

3.2.2. Approccio 50:50

Un metodo 50:50 prevede che gli oneri ambientali di ciascun processo di riciclo siano equamente divisi, come accennato al Paragrafo 3.1, tra il sistema di prodotto che fornisce materiale riciclabile e il prodotto in cui viene utilizzato il materiale riciclato. Il calcolo dell'impatto ambientale (E) derivante dalla produzione, riciclo e smaltimento dei rifiuti di materiale vergine è fornito dall'Equazione 3 che introduce i parametri di $E_{recycled}$ e $E_{recyclingEoL}$, ovvero l'impatto derivante il processo di riciclo che fornisce materiale secondario al prodotto ($E_{recycled}$) e l'impatto derivante il processo di riciclo che accetta i materiali dal prodotto ($E_{recyclingEoL}$):

$$E = 0.5 \times [(1 - R_1) + (1 - R_2)] \times (E_V + E_D) + 0.5 \times (R_1 E_{recycled} + R_2 E_{recyclingEoL}) \quad (3)$$

Questa tipologia di metodo presuppone che l'uso di materiali richieda sia la produzione di materiale vergine che la gestione finale dei rifiuti. Inoltre, implica che sia disponibile sia un'offerta che una domanda di materiali riciclabili affinché il riciclo possa avvenire. Ciò significa che questi metodi generalmente promuovono l'utilizzo di materiali riciclati e il riciclo dei prodotti dopo l'uso, quando il riciclo porta un beneficio ambientale positivo ($E_V + E_D > E_R$). Tuttavia, l'incentivo al riciclo potrebbe diminuire se la gestione finale dei rifiuti comporta un beneficio ambientale netto ($E_D < 0$).

La formulazione per modellare il riciclo presente nello standard proposto da ADEME-AFNOR, noto come BP X30-323 ed applicabile ad una vasta gamma di prodotti di consumo, è stato rivisitato mediante l'introduzione di criteri di valutazione basati su fattori come realismo fisico, praticità ed equità nella distribuzione degli oneri e dei benefici tra i vari prodotti. La versione adattata, conosciuta come BP X

50/50, ha incluso un nuovo elemento nella valutazione: la qualità del materiale riciclato (o secondario) derivante direttamente dal prodotto in questione (indicato come Q_s).

Questo metodo (illustrato in Figura 11) si adatta bene al contesto CLCA, per cui riflette l'idea che tanto più un materiale si degrada, tanto prima richiederà lo smaltimento e la sostituzione con materiale vergine [26], [34].

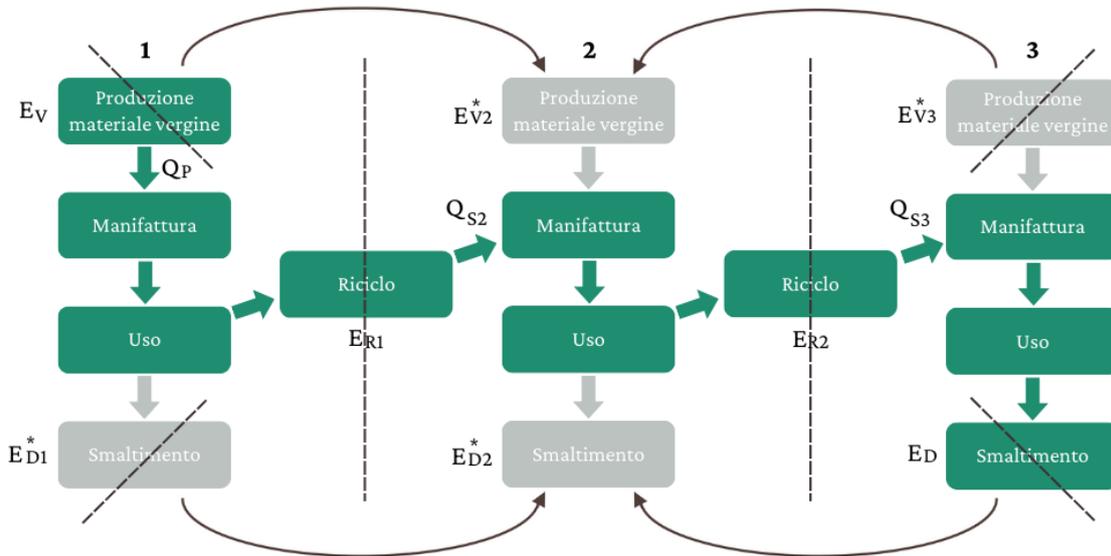


Figura 11 Illustrazione del metodo 50:50 aggiustato per la qualità ed applicato al prodotto 2 [26].

Si riporta, quindi, l'Equazione 4 per il calcolo dell'impatto ambientale

$$E = (1 - R_1) \times E_V + \frac{R_1}{2} \times E_{recycled} + \frac{R_2}{2} \times (E_{recyclingEoL} - E_V^* \times \frac{Q_s}{Q_p}) + (1 - R_2) \times E_D \quad (4)$$

introducendo ulteriori parametri:

- Q_p = termine di qualità del materiale vergine (o primario).
- E_V^* = impatti derivanti dall'acquisizione e dalla prelaborazione di materiale vergine che si presume possa essere sostituito da materiale riciclabile.
- $E_{recyclingEoL}$ (E_{recEoL}) = impatti derivanti dal processo di riciclo nella fase di end-of-life, compresi i processi di raccolta, smistamento e trasporto.

3.2.3. La formulazione della guida PEF: la Circular Footprint Formula (CFF)

Nel contesto dell'analisi dell'impronta ecologica, c'è una riflessione in corso riguardo a come considerare i vantaggi e gli svantaggi derivanti dal riciclo, dal recupero energetico, nonché dall'uso di materiali riciclati e dell'energia [31].

Nel corso dell'analisi delle linee guida precedentemente esaminate, si è potuto osservare come sia indispensabile una modellazione attenta e coerente dei rifiuti prodotti a fine vita e dei materiali riciclati tramite corretta allocazione degli oneri e crediti ambientali sia per i consumatori finali che i fornitori. Nello schema PEF, tutti i flussi di materiali prodotti durante ciascuna fase del ciclo di vita del prodotto devono essere sottoposti a modellazione seguendo il modo standardizzato della *Circular Footprint Formula* (CFF), la cui applicazione rappresenta una delle principali sfide relative alla PEF [24], [36].

La valutazione dell'impronta circolare comprende tre aspetti chiave: la componente legata ai materiali, quella energetica e quella relativa allo smaltimento. Sommando questi tre aspetti, si ottiene una visione completa delle emissioni e delle risorse coinvolte nei processi di riciclo, recupero energetico e smaltimento all'interno del sistema. La formulazione (completa di Equazioni 5, 6 e 7) considera quindi le emissioni specifiche e le risorse consumate presentandosi come una combinazione di "materiale + energia + smaltimento" esprimibile come $CFF_{totale} = CFF_{materiale} + CFF_{energia} + CFF_{smaltimento}$.

$$\text{Materiale } (1 - R_1)E_v + R_1 \times \left(AE_{recycled} + (1 - A)E_v \times \frac{Q_{Sin}}{Q_P} \right) + (1 - A)R_2 \times \left(E_{recyclingEoL} - E_v^* \times \frac{Q_{Sout}}{Q_P} \right) \quad (5)$$

$$\text{Energia } (1 - B)R_3 \times \left(E_{ER} - LHV \times X_{ER,heat} \times E_{SE,heat} - LHV \times X_{ER,elec} \times E_{SE,elec} \right) \quad (6)$$

$$\text{Smaltimento } (1 - R_2 - R_3) \times E_D \quad (7)$$

La componente legata ai materiali si applica a tutte le fasi della catena del valore in cui i materiali riciclati vengono utilizzati al posto delle materie prime vergini. Essa include, in sequenza, parti legate alla fase di inventario del ciclo di vita (LCA) associato alla materia prima, all'input di materiale secondario e al processo di riciclo o riutilizzo dei materiali diminuito del credito per il materiale primario scartato. Questa formula risponde alla necessità di avere un metodo coerente per allocare gli oneri ambientali (e i crediti) ai fornitori e agli utilizzatori di materiali riciclati, basandosi sulle dinamiche di mercato. In situazioni in cui l'offerta di materiali riciclabili è bassa e la domanda è elevata, si attribuiscono più crediti alla produzione di materiali riciclabili, riducendo così gli oneri ambientali per i produttori che promuovono il riciclo. Al contrario, quando c'è un eccesso di offerta e la domanda è bassa, vengono concessi più crediti agli utilizzatori di materiali riciclati.

Invece, la componente energetica tiene conto della quantità di materiale utilizzato nel recupero energetico a fine vita e assegna i crediti corrispondenti alle emissioni evitate e all'utilizzo delle risorse delle fonti energetiche sostituite. Essa globalmente rappresenta l'LCI del processo di recupero energetico sottratta del credito per l'energia primaria evitata.

Infine, l'ultima componente legata allo smaltimento calcola le emissioni e l'utilizzo delle risorse associate allo smaltimento di tutti i materiali che non vengono riciclati o utilizzati nel recupero energetico. In breve, integra l'LCI dello smaltimento dei rifiuti rimanenti.

Per garantire la trasparenza in questo processo, è fondamentale valutare e dichiarare la riciclabilità basandosi su dati aziendali o settoriali [31].

La CFF si propone di offrire una valutazione completa di tutti i possibili scenari alla fine del ciclo di vita del prodotto. Ciò include riutilizzo, riciclo, incenerimento con o senza recupero di energia e smaltimento finale in discarica, sia per sistemi a circuito aperto che chiuso, con un approccio coerente e replicabile. A differenza degli approcci di allocazione tradizionali che si concentrano solo sui materiali secondari in entrata o in uscita, questa formulazione cerca di considerare entrambi gli aspetti, prendendo in considerazione sia il contenuto riciclato all'inizio del ciclo che la riciclabilità alla fine della vita. Inoltre, tiene conto delle variazioni nella qualità del materiale tra i cicli di vita.

Il CFF sfrutta gli approcci esistenti e combina diversi metodi, applicando tre approcci generali di allocazione (ovvero 100:0, 0:100 e 50:50 come nell'illustrazione riportata in Figura 12) a seconda del materiale e delle condizioni di mercato del materiale [33]. Ad esempio, in situazioni di riutilizzo di materiali da imballaggio, quando un componente o materiale viene utilizzato nuovamente per lo stesso scopo, il peso degli elementi riutilizzabili viene suddiviso tra le varie volte in cui viene riutilizzato, con conseguente suddivisione degli impatti associati [37].

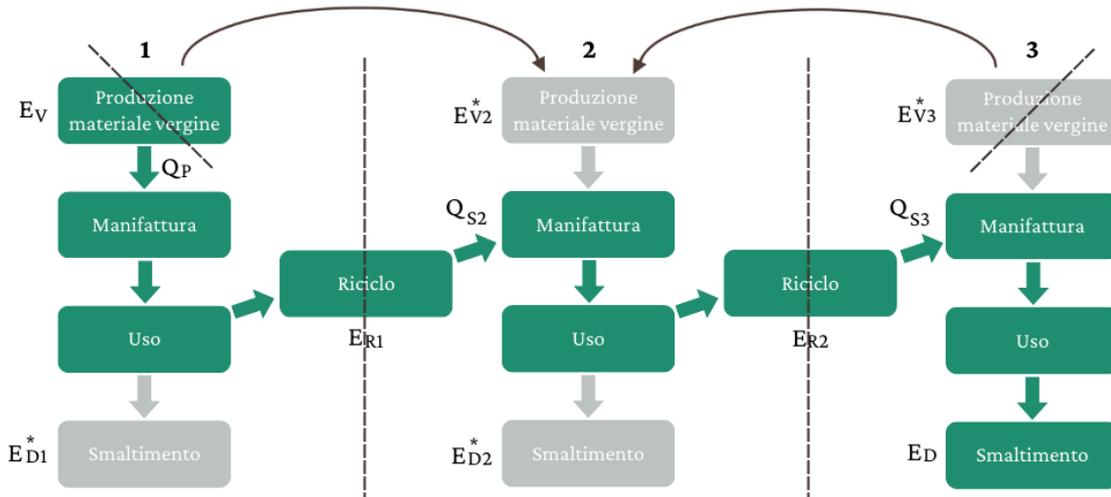


Figura 12 Illustrazione dell'applicazione della CFF al prodotto 2 con fattore $A=0.5$ [26].

Il presente elaborato si concentrerà sulla prima parte della formulazione, coerente con una prospettiva di CLCA, che coinvolge numerosi parametri ed aspetti della fase di riciclo, come il tipo di materiale. Occorre menzionare il fatto che al momento non sono stati definiti tutti gli aspetti che riguardano la metodologia PEF, e di conseguenza l'applicazione della CFF. In particolare, non sono espresse indicazioni su come stimare le modifiche della qualità di un materiale in base al numero di cicli di riciclo a cui è stato sottoposto. È una tipologia di approccio che rimanda alla realtà del mercato scontrandosi con l'insicurezza dell'effetto del numero di cicli, che potrebbe tuttavia essere risolta tramite l'introduzione di un parametro aggiuntivo [24], [26], [33].

L'Equazione 5 usata per calcolare l'impronta circolare coinvolge una serie di fattori che prendono in considerazione le caratteristiche fisiche dei prodotti destinati al riciclo, gli impatti dei processi e le dinamiche del mercato dei prodotti riciclati. Questo lavoro desidera concentrarsi principalmente sull'eventuale implementazione di un modello per la parte legata ai materiali, che richiede una definizione dettagliata dei parametri per ciascun tipo di materia prima (materiale primario o vergine) e materiale da smaltire (materiale secondario o riciclato). In aggiunta, è richiesto di determinare il cosiddetto punto di sostituzione in cui i materiali secondari sostituiscono i materiali primari nella catena del valore. Si parla di "livello 1" quando questo punto si trova all'inizio, dove i flussi di input provengono sia da fonti 100% primarie che da fonti 100% secondarie. D'altra parte, si parla di "livello 2" quando il punto di sostituzione è successivo a una certa fusione tra flussi di materiali primari e secondari.

Il nuovo vettore creato (E_{CFF}) è calcolato tramite la CFF tenendo in considerazione sia il materiale vergine che riciclato. Tra i parametri adimensionali A , R_1 , R_2 , $\frac{Q_{Sin}}{Q_P}$ e $\frac{Q_{Sout}}{Q_P}$ sono introdotti:

- A = fattore di ripartizione degli oneri e dei crediti tra il fornitore e l'utilizzatore dei materiali riciclati.
- $\frac{Q_{Sin}}{Q_P}$ = fattore di qualità del materiale in ingresso (materiale secondario in ingresso al punto di sostituzione/materiale primario).
- $\frac{Q_{Sout}}{Q_P}$ = fattore di qualità del materiale in uscita (materiale secondario in uscita al punto di sostituzione/materiale primario).

Per ogni processo di riciclo sono definiti, oltre a R_2 , i parametri E_v , E^*_v , $E_{recycled}$ e $E_{recyclingEoL}$ che rappresentano le emissioni specifiche e le risorse consumate (per unità funzionale), che sono stati precedentemente descritti nelle altre tipologie di approcci [36]. L'applicazione del CFF incentiva all'utilizzo di materiali riciclati e al riciclo dei prodotti usati. Sottolinea anche l'importanza di preservare la qualità dei materiali utilizzati e riciclati, evitando l'uso di materiali di alta qualità quando quelli di qualità inferiore sono sufficienti. L'intensità di questi incentivi varia in base ai materiali e dipende dal fattore A , nonché dalle perdite di qualità durante l'uso e dal riciclo dei materiali [26].

In uno studio PEF, il fattore A tiene conto della situazione di mercato per garantire che i due aspetti cruciali del riciclo, cioè il contenuto riciclato e la riciclabilità a fine vita, contribuiscano in modo adeguato, implicando che:

- se $A=0.2$, l'offerta di materiali riciclabili è bassa e la domanda è elevata (più materiale secondario di alta qualità richiesto rispetto a quello prodotto, come nel caso metallurgico e dell'industria del vetro) quindi la formula è incentrata sul fattore riciclabilità;
- se $A=0.5$, c'è equilibrio tra domanda e offerta, quindi la formula è incentrata tanto sul contenuto riciclato quanto sulla riciclabilità;
- se $A=0.8$, l'offerta di materiali riciclabili è elevata e la domanda è bassa (ad esempio, nell'industria tessile il prezzo di mercato è molto basso rispetto a quello primario), quindi la formula è incentrata sul contenuto riciclato.

Per quanto riguarda i fattori di qualità, che valutano la qualità del materiale riciclato sia in entrata che in uscita, emergono due situazioni distinte:

- a. se $E_v=E^*_v$, sono necessari due indicatori di qualità, ovvero uno associato al contenuto riciclato ($\frac{Q_{Sin}}{Q_P}$) e uno associato alla riciclabilità a fine vita ($\frac{Q_{Sout}}{Q_P}$) per catturare le situazioni in cui il materiale secondario subisce *downcycling* rispetto a quello primario;
- b. se $E_v \neq E^*_v$, come accade nel riciclo a ciclo aperto, è necessario solo un indicatore di qualità, specificamente $\frac{Q_{Sin}}{Q_P}$, associato al contenuto riciclato. In questo caso il parametro E^*_v incorpora indirettamente il parametro $\frac{Q_{Sout}}{Q_P}$ attraverso la definizione dell'unità funzionale equivalente.

La determinazione dei fattori di qualità deve avvenire al punto di sostituzione per applicazione o materiale. La loro quantificazione si basa su considerazioni economiche, ovvero il rapporto tra il prezzo

dei materiali secondari e dei materiali primari al punto di sostituzione. Ad esempio, se il prezzo dei materiali secondari è superiore a quello dei materiali primari, i fattori di qualità saranno pari a 1. Quando gli aspetti economici sono meno rilevanti rispetto a quelli fisici, è possibile utilizzare questi ultimi come base per la valutazione [5], [31], [32].

Pertanto, il metodo CFF offre l'opportunità di evitare favoritismi nell'incenerimento dei materiali rispetto al riutilizzo e al riciclo, ma persistono sfide per garantire una comparabilità equa. D'altra parte, la guida PEF, con la sua riduzione della flessibilità nella modellazione EoL e la necessità di formule specifiche per ciascun modello di prodotto, rischia di compromettere l'equa comparabilità, come mostrato da varie incompletezze descritte in letteratura. In Tabella 4 sono riportate le varie sfide identificate per il miglioramento ulteriore del metodo PEF al fine di garantire una giusta comparabilità [30].

Tabella 4 Riepilogo delle sfide, delle conseguenze sulla comparabilità e delle proposte avanzate [30].

Sfide	Implicazioni per la comparabilità	Raccomandazioni
Misurazione delle prestazioni del prodotto	È possibile confrontare prodotti con prestazioni diverse	Includere le prestazioni dei prodotti nell'unità funzionale Definire test standardizzati per misurare le prestazioni del prodotto
Definizione di categoria di prodotto	È possibile confrontare prodotti con applicazioni diverse dal punto di vista del consumatore	Definire in modo coerente la categoria di prodotti
Definizione del prodotto rappresentativo	Il benchmark stabilito è spesso troppo elevato per avere un effetto guida sul mercato	Migliorare l'approccio per definire il prodotto rappresentativo
Utilizzo del mix elettrico specifico del paese	L'influenza dei luoghi di produzione è troppo alta	Non dovrebbe essere consentito l'uso di mix elettrici specifici per paese
Utilizzo dei dati secondari	I dati secondari non possono riflettere i miglioramenti individuati dalle aziende	Utilizzo di dati primari specifici per processi/materiali rilevanti Fornitura di dati specifici o set di dati adattabili da parte della CE
Modellazione del fine vita: a. non viene considerata la frequenza con cui un materiale viene riciclato b. la qualità dei materiali riciclati non viene affrontata adeguatamente c. per i sistemi a circuito chiuso può essere assegnato solo l'80% massimo dei crediti	Gli impatti ambientali di molti materiali e gli sforzi delle aziende per creare sistemi a circuito chiuso non vengono adeguatamente presi in considerazione	Affinare la formula, in modo che vengano considerati i cicli di riciclo e la qualità del materiale riciclato, oltre a consentire crediti del 100% per sistemi closed-loop

<p>Applicabilità dei metodi di valutazione dell'impatto del ciclo di vita:</p> <ol style="list-style-type: none"> la granularità delle categorie di impatto porta ad una ponderazione implicita i metodi regionalizzati sono applicati senza dati di inventario regionalizzati esclusione delle categorie di tossicità 	<p>Gli impatti ambientali non vengono adeguatamente presi in considerazione</p>	<p>Raggruppare le categorie in modo coerente Applicare metodi regionalizzati solo quando sono disponibili dati di inventario regionalizzati o scegliere metodi globali per i dati di inventario globali Considerare le categorie di tossicità</p>
<p>Priorità delle categorie di impatto mediante normalizzazione e ponderazione:</p> <ol style="list-style-type: none"> la normalizzazione è un approccio relativo fattori di normalizzazione mancanti la ponderazione è soggettiva 	<p>Non è garantita l'identificazione delle categorie rilevanti per il sistema merceologico considerato</p>	<p>La normalizzazione dovrebbe essere saltata La ponderazione dovrebbe essere scollegata dal metodo di valutazione scientifica Le categorie pertinenti dovrebbero essere definite durante l'attuazione delle politiche Analizzare diversi approcci per determinare i risultati dei singoli punteggi</p>

In particolare, le principali carenze in ambito modellazione dell'allocation del fine vita includono:

- l'assenza di considerazione della frequenza di riciclo dei materiali, il che significa che un materiale riciclato una sola volta riceve lo stesso onere/credito di uno riciclato più volte (eccezione fatta per i soli materiali da imballaggio).
- Il parametro A, introdotto dal metodo CFF, varia tra 0.2 e 0.8 e dovrebbe riflettere la situazione attuale di mercato. Questo causa un conflitto con la norma ISO 14044 per i sistemi a ciclo chiuso, poiché solo l'80% dei crediti può essere assegnato con il CFF, mentre l'ISO consente il 100% dei crediti per il sistema del prodotto. Inoltre, la Commissione Europea fornisce un elenco di valori A per diversi materiali, ma la proposta di utilizzare un valore di A compreso tra 0 e 1 permetterebbe la valutazione delle conseguenze ambientali a lungo termine di acquisiti e decisioni varie. Ad esempio, un valore A=1 sarebbe ben esplicativo per il caso di alluminio riciclato per il quale la domanda supera l'offerta, mentre un valore A=0 sarebbe più applicativo per i materiali di cui esiste un surplus, ovvero che sono in parte trattati come rifiuti.
- Il dato predefinito fornito per il termine qualità non è adeguato, in quanto non tiene conto di "quanto tempo" e "quanto bene" un materiale dura. Ad esempio, tutti i metalli ricevono lo stesso valore pari a 1, nonostante le differenze significative nella qualità dei metalli secondari. Analogamente, la plastica è assegnata al valore 1, anche se di solito subisce un processo di degrado di qualità chiamato *downcycling*, il che significa che il materiale secondario non raggiunge la stessa qualità del materiale vergine. Inoltre, per alcuni materiali, la qualità del materiale secondario dipende dall'uso originario [30], [38].

3.2.4. Approccio linearmente digressivo (LDA)

Questo nuovo approccio non integrato ancora negli standard esistenti, ma discusso da altri ricercatori, richiede la definizione di un sistema a cascata di prodotti introducendo il parametro n (come mostrato nelle Equazioni 8 e 9), ovvero il numero di cicli di riciclo attraverso cui un prodotto è stato fabbricato a partire dal materiale vergine originale:

$$\text{per } R_1 \neq R_2: EF = (1 - R_1) \times \left(\frac{(2 \times n - 1)}{n^2} E_V + \frac{E_D}{n^2} \right) + (1 - R_2) \times \left(\frac{E_V}{n^2} + \frac{(2 \times n - 1)}{n^2} E_D \right) + \frac{R_1}{2} \times E_{rec} + \frac{R_2}{2} \times E_{recEoL} \quad (8)$$

$$\text{per } R_1 = R_2: EF = \left(\frac{E_V}{n} + \frac{E_D}{n} \right) + 0.5 \times E_{rec} + 0.5 \times E_{recEoL} \quad (9)$$

L'approccio *linearly degressive* (LD) segue il modello di allocazione 50:50, che assegna il 50% dell'impatto del riciclo al ciclo di vita precedente e il 50% al successivo, ad eccezione degli impatti associati al materiale vergine iniziale e allo smaltimento alla fine del ciclo di vita [39]. Esso prende in considerazione la fase di produzione del materiale vergine, distribuendo in modo linearmente digressivo la maggior parte dell'impatto al primo ciclo all'interno del sistema a cascata dei prodotti (come mostrato schematicamente in Figura 13), mentre la rimanente parte dell'impatto è attribuita ai cicli successivi seguendo lo stesso schema. Lo stesso approccio vale per l'impatto dovuto allo smaltimento finale, assegnando la quota più elevata all'ultimo ciclo. Inoltre, questo metodo non tiene conto di eventuali oneri o benefici potenziali che possono essere ottenuti dal riutilizzo, riciclo o recupero energetico come previsto negli standard precedentemente menzionati. Infatti, il metodo LD differisce significativamente dai precedenti non solo nella formulazione ma anche nella filosofia che lo guida.

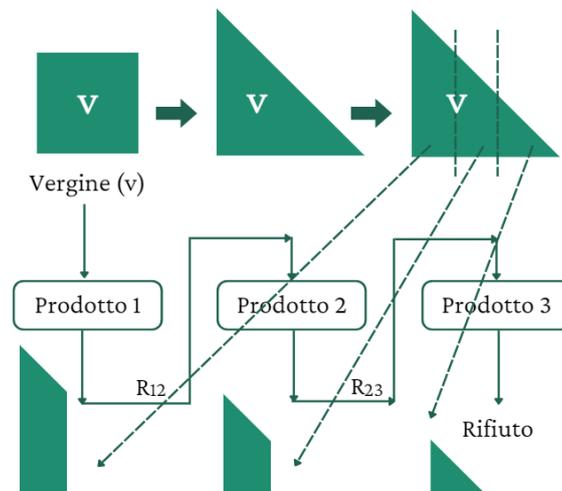


Figura 13 Schema dell'approccio LD per un sistema a cascata di prodotti con $n=3$ [34].

L'allocazione degli oneri risulta più equa e l'approccio è interessante in termini di economia circolare poiché tiene conto del numero di volte in cui un materiale verrà riutilizzato e riciclato. Così facendo, esso considera implicitamente i cambiamenti nelle qualità dei materiali nel corso dei cicli. Tuttavia, l'applicazione pratica può essere complessa poiché richiede una conoscenza o un'assunzione qualitativa sul numero di cicli che un prodotto subirà, il che può essere difficile a causa dell'incertezza legata al periodo di riciclo. Gli esperti hanno suggerito di migliorare l'accuratezza dell'approccio distinguendo tra diversi tipi di cicli (certi/incerti, a breve/lungo termine, aperti/chiusi e di basso/alto valore) suggerendo l'introduzione di un fattore di probabilità che si verifichi un ciclo [33], [34].

CAPITOLO 4

CASO STUDIO: MANTECO®

4.1. La sostenibilità di Manteco®: un esempio di eccellenza tessile

4.1.1. Il contributo alla sostenibilità ambientale

L'azienda italiana Manteco®, con sede nel distretto tessile di Prato, si è aggiudicata il prestigioso riconoscimento *The Climate Action Award* ai CNMI Sustainable Fashion Awards 2023. Il premio è diretto ai marchi di moda, ai fornitori e alle organizzazioni che hanno sviluppato soluzioni per ridurre le significative emissioni di gas serra del settore tessile. L'azienda, produttrice di tessuti di alta qualità dal 1943, ha fondato la sua etica sulla realizzazione di tessuti in lana di qualità e durevolezza, con impatti ambientali molto più bassi. Marchi come ReviWool® (lana vergine a basso impatto) e MWool® (nuova generazione di lana riciclata), entrambi prodotti Manteco®, hanno contribuito in modo significativo alla riduzione delle emissioni di CO₂-eq, risparmiando rispettivamente il 65.6% e il 99.2% rispetto a capi realizzati con lana vergine generica. Inoltre, questi tessuti Manteco® utilizzano notevolmente meno acqua ed energia nel processo di produzione. A tal proposito, in Figura 14 sono riassunti i risparmi di materiali e risorse raggiunti grazie a MWool®, ReviWool® e al processo di creazione del colore senza l'utilizzo di sostanze chimiche per MWool® (Recype®) nell'anno 2022.



Figura 14 Risparmi ambientali in risorse nel 2022 [40].

L'azienda è impegnata nella sostenibilità e sta lavorando attivamente alla certificazione delle materie prime. Oltre la metà (54%) di quelle usate oggi sono provviste di certificazione (+10.8% rispetto al 2021), con un forte ricorso ai filati riciclati (sono il 37%), ed il 37.1% sono riciclate (+5.9% rispetto al 2021). Nel rapporto di sostenibilità del 2022, Manteco® ha registrato un aumento annuale della produzione del 9% rispetto al 2021, con un fatturato in crescita del +24.8% a 96.8 milioni di euro.

Manteco® è anche coinvolta nel progetto Project43, che promuove pratiche *zero-waste*. L'azienda recupera gli scarti di produttori di abbigliamento che utilizzano prodotti Manteco® per trasformarli in nuovi tessuti di lusso. La maggior parte dei tessuti di lana prodotti sono mono o bifibra, il che permette di riciclarli meccanicamente in nuove fibre MWool® e trasformarle in tessuti circolari di alta gamma. Gli scarti generati dalla rete produttiva e provenienti dalle fasi di filatura, roccatura, tessitura e finissaggio sono raccolti e riclassificati per composizione e colore per poi essere riciclati per la creazione di nuove fibre MWool®.

Nel 2022, sono stati recuperati 53.5 mila kg di scarti di confezione attraverso Project43, e sono stati raccolti 215 mila kg. di scarti di produzione interna di cui il 71.5% è stato riutilizzato nel ciclo produttivo. Inoltre, Project53 recupera gli avanzi di abbigliamento di qualsiasi produttore, inclusi tessuti e capi tessili, trasformandoli in nuove fibre M Wool®.

La politica dell'azienda, incentrata su design sostenibile ed economia circolare, si basa sulle regole di eco-design, come la scelta di materie prime riciclabili, il loro utilizzo come singole o miscelate per realizzare composizioni riciclabili. Allo stato attuale, grazie a questa politica più di 500 tessuti della collezione sono riciclabili al 100% e tra questi vi sono i prodotti più venduti dall'azienda. Circa il 90% del tessuto venduto dall'azienda è riciclabile nel loro sistema aziendale a circuito chiuso. La roadmap per la sostenibilità di Manteco®, denominata *MantEco for Planet®*, mira a perseguire costantemente obiettivi di crescita e di miglioramento attraverso soluzioni innovative e responsabili. L'azienda si impegna a promuovere i 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs) dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite (Figura 15) attraverso una Carta dei Valori per la Sostenibilità che copre vari aspetti, tra cui politiche e obiettivi, tracciabilità e catena di approvvigionamento sostenibile, design e scelta di materiali sostenibili, controllo del rischio chimico, impegno per il clima e benessere delle persone come parte fondamentale del loro operato [40].



Figura 15 Sustainable Development Goals (SDGs) sostenuti da Manteco®.

4.1.2. I prodotti cardine

ReviWool®

Secondo quanto calcolato e certificato dallo schema internazionale EPD, la gamma di tessuti ReviWool® comprende prodotti con una percentuale del 75/80% di lana e 25/20% di poliammide, che può essere vergine o riciclata a seconda delle specifiche esigenze dei clienti. Questi tessuti, che variano in spessore da 195 g/m² a 435 g/m², sono costituiti da fibre di co-prodotto ottenute dal processo di pettinatura della lana vergine, che vengono recuperate ed elaborate in modo appropriato per creare prodotti di alta qualità a basso impatto ambientale. La lana ReviWool® è una lana vergine extrafine che presenta tutte le caratteristiche tipiche della lana vergine, tra cui morbidezza, resistenza al fuoco e agli odori, ed è completamente riciclabile con zero scarti. Durante la fase di pettinatura delle fibre di lana, circa il 10% di queste fibre, che altrimenti verrebbero perse, vengono recuperate e reintegrate nel processo produttivo. Questo approccio riduce l'impatto ambientale complessivo del tessuto ReviWool® del 65.6% in termini di cambiamento climatico, consumo d'acqua e consumo complessivo di energia, rispetto ai prodotti realizzati con lana vergine generica.

Le fibre recuperate vengono trasformate in tessuti premium con sprechi minimi all'interno della catena di fornitura MSystem, una rete composta da oltre 50 aziende tessili all'interno del distretto tessile pratese. Inoltre, l'azienda segue le corrette pratiche relative al benessere degli animali, conformemente alle linee guida dell'International Wool Textile Organisation (IWTO). La lana utilizzata è certificata secondo lo standard Responsible Wool Standard (RWS), garantendo una produzione responsabile nel rispetto dell'ambiente e del benessere degli animali. In aggiunta, il programma ZQ garantisce la responsabilità e la tracciabilità nelle filiere della lana per la realizzazione di fibra Merino, assicurando che le pecore coinvolte non siano sottoposte a pratiche di *mulesing* [40].

Nello specifico, ReviWool® sta per i *noils* selezionati da Manteco® dopo la prima pettinatura, che possono contenere sostanze vegetali o essere carbonizzati. Come presentato in Figura 16, le prime fasi della produzione della lana coinvolgono il pascolo, la tosatura e la pulizia per ottenere lana priva di grasso e sporcizia. Queste fasi generano diversi prodotti: il vello pulito, composto da fibre lunghe e pulite (*clean fleece* circa il 50% in massa della lana tosata), la lana pulita del ventre (*clean belly wool*, circa il 12% in massa), i residui puliti (*clean addments*, circa il 10% in massa e di qualità inferiore), il grasso di lana (*wool grease* o lanolina, circa il 7% in massa) e gli scarti (circa il 21% in massa). Talvolta, per la lana del ventre ed i residui, è necessaria una fase di carbonizzazione per rimuovere le sostanze vegetali (VM). Questa fase coinvolge un trattamento con acido solforico diluito, seguito da un processo di essiccazione. La lana pulita e il ventre pulito (eventualmente carbonizzato) vengono trasformati in filati fini attraverso il processo di lavorazione pettinata (*worsted processing system*), mentre i residui e altre fibre scartate vengono utilizzati per produrre filati più spessi attraverso il processo di lavorazione laniera (*woollen processing system*). In entrambi i casi, le fibre passano attraverso una fase di cardatura, che separa le fibre e rimuove le impurità.

Nel processo di lavorazione pettinata, il principale prodotto derivante dalla cardatura è costituito dalle fibre lunghe (*long staple fibers*, circa il 97% in massa), mentre le fibre scartate, note come bava di lana (*burry wool*), rappresentano circa il 3%. Queste ultime possono essere sottoposte a carbonizzazione e poi utilizzate nel processo di lavorazione laniera. Le fibre lunghe vengono successivamente pettinate e parallelizzate, con tre operazioni di parallelizzazione prima della pettinatura e due successive. Questo processo allinea le fibre in direzione parallela e produce una striscia (*sliver*) continua con peso uniforme. La pettinatura ulteriore rettifica le fibre, rimuove quelle corte e le impurità. Le fibre corte, chiamate *noils*, costituiscono circa il 10% della lana pettinata e, se necessario, vengono impiegate nel processo di lavorazione laniera dopo una eventuale fase di carbonizzazione. Le fibre lunghe pettinate (*combed long fibers*), dopo due ulteriori operazioni di parallelizzazione, diventano un nastro pettinato continuo, noto come *top*, che può essere confezionato in *bumps*. In alcuni casi, il *top* può rompersi o separarsi, creando l'*open top* utilizzato nel processo di lavorazione laniera. La tintura, se necessaria, avviene di solito sui *bumps*. Successivamente, il nastro subisce una seconda pettinatura, in cui vengono rimosse le fibre corte rimanenti (circa il 2%) e inviate al processo di lavorazione laniera.

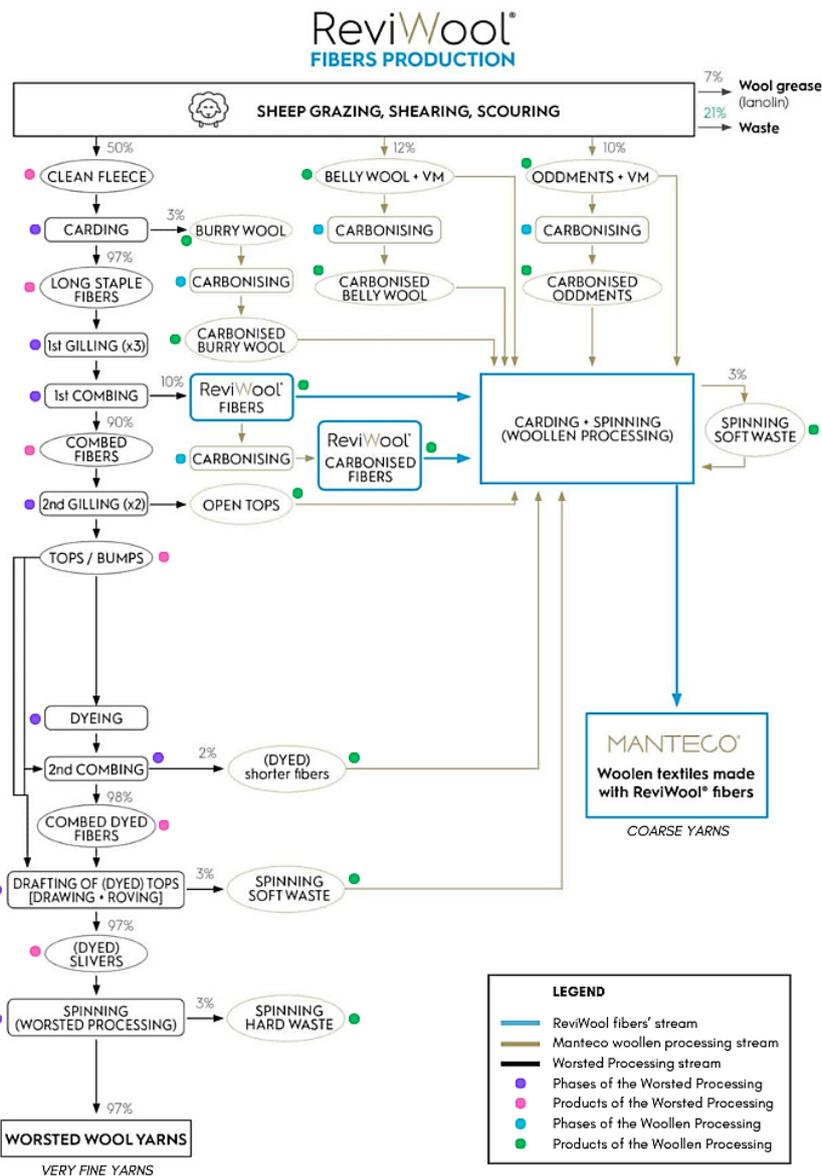


Figura 16 Diagramma di flusso della filiera produttiva delle fibre ReviWool® [40].

La lavorazione pettinata prosegue con la stesura, che riduce lo spessore del nastro e trasforma il *top* in *sliver*, passando attraverso trafilatura e *roving*. Le fibre scartate da questo processo, ovvero i cascami morbidi di filatura (*spinning soft waste*), vengono generalmente utilizzate nel processo di lavorazione laniera. Alla fine, il nastro viene filato per creare filati molto fini (*very fine yarns*). Le fibre scartate da questo processo, note come scarti duri da filatura (*spinning hard waste*), sono solitamente riciclate. D'altra parte, la lavorazione laniera è adatta anche per l'uso di fibre più corte ed è nota per produrre filati più grossolani (*coarse yarns*) rispetto alla lavorazione pettinata. Per ottenere la resistenza desiderata nei filati con fibre molto corte, è necessario mescolarle con fibre naturali più lunghe o sintetiche. Inoltre, la lavorazione laniera può utilizzare lana del ventre, residui e altre fibre scartate dal processo di lavorazione pettinata, come *burs*, *open top*, *noils* e cascami morbidi di filatura. Queste fibre subiscono solo le fasi di cardatura e filatura, seguendo principi simili a quelli del processo di lavorazione pettinata. Le fibre scartate (circa il 3% in massa) rientrano nel processo di lavorazione laniera.

La filiera di produzione della lana è notevolmente efficiente, con una perdita di materiale limitata. La quasi totalità della lana grezza delle pecore trova impiego nell'industria tessile, con fibre di qualità superiore provenienti da parti specifiche della pecora utilizzate per tessuti lisci e leggeri mediante lavorazione pettinata. Al contrario, le fibre più corte e spesse, insieme a quelle scartate, subiscono la lavorazione laniera per produrre capispalla.

Nel complesso, le aziende adottano processi integrati, riutilizzando gli scarti generati durante la trasformazione. Ciò consente la produzione di una varietà di fibre e prodotti correlati con caratteristiche diverse. Ad esempio, le fibre a fiocco lungo sono impiegate per tessuti di alta qualità come strati di base e moda di lusso, mentre le fibre più spesse sono utilizzate per capispalla come maglioni e sciarpe.

Lo schema produttivo di interesse è rappresentato dalla lavorazione pettinata, che utilizza le fibre più lunghe del vello per creare filati pregiati destinati a tessuti lisci e leggeri. D'altra parte, la lavorazione laniera impiega fibre più corte e scartate per la produzione di filati più spessi utilizzati in tessuti pesanti o indumenti lavorati a maglia. Le fibre più fini, considerate di qualità superiore, hanno costi maggiori rispetto alle fibre più corte. In sintesi, la produzione principale di lana si concentra sui filati pregiati, i quali possono presentare impatti ambientali superiori rispetto alla produzione secondaria di filati più spessi. Fino ad ora si è considerata l'allocazione di massa per garantire la comparabilità tra tessuti, tenendo conto delle differenze di peso e prestigio associati a prodotti realizzati con fibre di diverse qualità [27], [41].

MWool[®]

Il filato *MWool*[®] rappresenta una nuova generazione di lana 100% riciclata, ottenuta sia da scarti di lavorazione che da capi pre e post-consumo (quantitativamente descritto in Tabella 5). Questi materiali vengono inizialmente selezionati, testati e suddivisi in base al colore e alla composizione, per poi essere trasformati nuovamente in fibre attraverso un processo di riciclo meccanico a basso impatto ambientale. La vasta gamma di oltre 1000 colori disponibili è il risultato di un processo esclusivo chiamato *Recype*[®], che permette di creare nuove sfumature senza l'uso di sostanze chimiche aggiuntive. Questo avviene attraverso la miscelazione di numerose tonalità diverse di fibre di lana riciclata, producendo colori *no-dye*, poi archiviati e adattati alle quantità di filato che verranno prodotte. I filati *MWool*[®] sono sottoposti a rigorosi controlli di qualità e test, garantiti dalla specializzata catena di fornitura *MSystem*. Oltre a presentare le stesse qualità della lana vergine, *MWool*[®] promuove l'economia circolare attraverso il riciclo meccanico di scarti e indumenti. È certificata secondo lo standard *Global Recycled Standard (GRS)* lungo tutte le fasi della produzione, garantendo la tracciabilità e il rispetto degli standard sociali ed ambientali. Rispetto alle generiche fibre di lana vergine, *MWool*[®] riduce l'impatto del 99.2% sul cambiamento climatico, del 99.9% sul consumo di acqua e del 93.3% sul consumo complessivo di energia. Questo filato è altamente riciclabile, come *ReviWool*[®], ed è anche biodegradabile senza causare effetti ecotossicologici nell'ambiente marino [40], [42].

Tabella 5 Dichiarazione di contenuto del prodotto MWool® [42].

Materiali/sostanza chimica	% del peso del materiale	% di materiale biobased	% di cui riciclati	
			Quota di pre-consumo	Quota di post-consumo
<i>Lana riciclata</i>	93%	100%	36%	64%
<i>Pigmenti e coloranti</i>	<1%	0%	0%	100%
<i>Altri materiali (per esempio anti-statici, oli)</i>	1%	0%	0%	0%
<i>Acqua</i>	5%	0%	0%	0%
<i>Totale</i>	100%			

Seguendo il flusso in Figura 17, i tessuti MWool® sono prodotti principalmente da scarti tessili sia pre- che post-consumo, con il 15% dei materiali provenienti da scarti pre-consumo e l'85% da scarti post-consumo. I tessuti pre-consumo provengono principalmente da processi sartoriali e di filatura, con il 32% proveniente da processi sartoriali in Europa dell'Est, Turchia, Italia e Nord Africa e il restante 68% proveniente da processi di filatura in Europa dell'Est o Italia.

I rifiuti tessili post-consumo sono raccolti negli Stati Uniti e nel Nord Europa, dove i vestiti dismessi vengono raccolti in contenitori appositi o sacchetti di plastica. Questi vestiti vengono quindi trasportati in un centro di raccolta, dove vengono separati i materiali non tessili. Il resto dei tessuti viene inviato principalmente in India (85%) o in Pakistan (15%), dove vengono smistati manualmente in base al materiale e gli accessori vengono rimossi. Successivamente, i tessuti vengono imballati in grandi balle di plastica e inviati in Italia, a Prato.

Qui, i tessuti provenienti da processi sartoriali e i capi post-consumo vengono separati in base al trattamento futuro e al colore, un processo manuale che evita la necessità di tintura.

I tessuti possono quindi essere sottoposti a processi di sfilacciatura (*fraying*) o triturazione (*shredding*), con la triturazione che coinvolge un trattamento meccanico umido per aprire i tessuti e la sfilacciatura che utilizza un trattamento meccanico a secco. Le fibre MWool® riciclate vengono poi filate per creare nuovi tessuti di lana. La filatura pettinata è possibile solo con fibre vergini più lunghe, mentre la cardatura e la filatura *open-end* possono coinvolgere fibre riciclate. Questi tessuti riciclati possono essere ulteriormente riciclati in base alla qualità delle fibre. Infine, il filato MWool® viene prodotto e trasportato alle aziende locali per la produzione di capi d'abbigliamento. Alla fine della vita utile, i capi possono essere smaltiti o riciclati, con la maggior parte dei rifiuti tessili che finisce in discarica [42], [43].

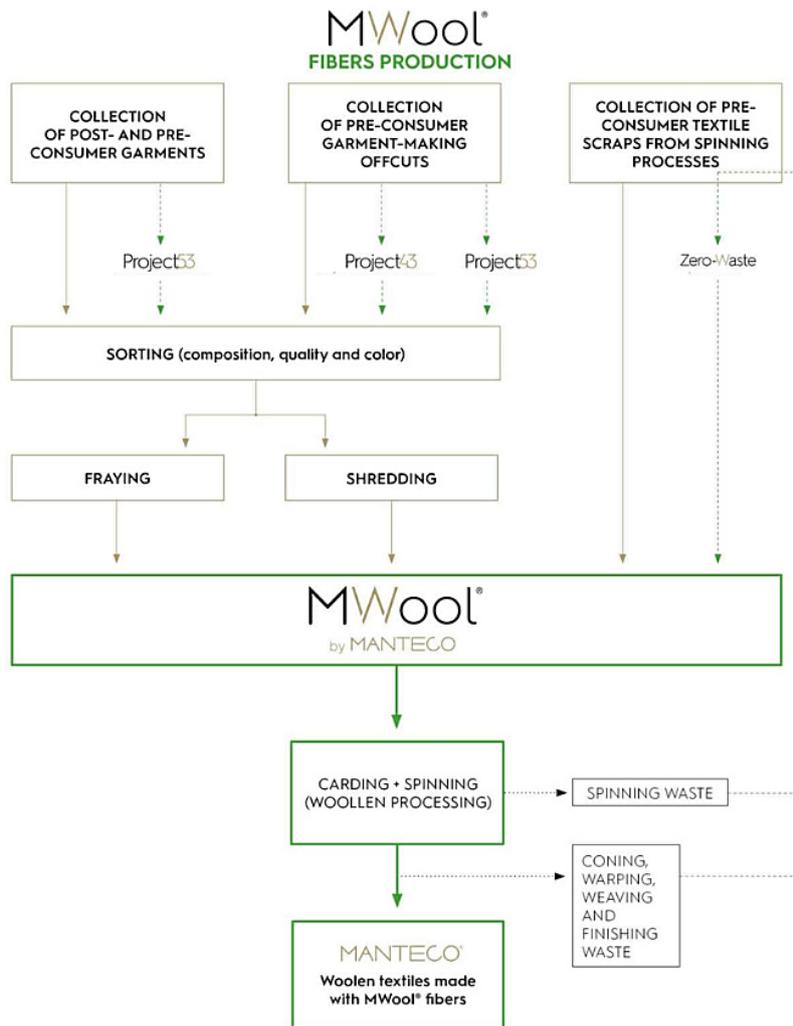


Figura 17 Diagramma di flusso della filiera produttiva delle fibre MWool® [40].

I tessuti di lana sono altamente apprezzati dai consumatori a causa della loro longevità, della facilità di cura e della tradizione di tramandarli da una generazione all'altra. Nonostante rappresentino solo fino al 5% in peso degli indumenti donati dai consumatori, il riciclo meccanico della lana consente di ottenere fibre che possono essere cardate e rifilate in filati di pura lana o utilizzate in mischie. I capi in lana hanno una durata media di 2-10 anni, in contrasto con i 2-3 anni dei capi in fibre sintetiche [44].

Le iniziative legate all'economia circolare e alla *green economy* nel distretto italiano pratese, di cui Manteco® fa parte, sono fortemente incentrate su processi di riciclo meccanico e termico dei prodotti tessili, grazie alla struttura organizzativa delle piccole e medie imprese interconnesse all'interno dei distretti industriali e tessili. In particolare, il riciclo meccanico dei tessuti usati coinvolge diverse fasi, tra cui la triturazione dei tessuti per ottenere frammenti di fibra tessile, che vengono successivamente cardati. Questi frammenti possono essere utilizzati in due modi principali: intrecciati insieme per creare tessuti-non-tessuti utilizzati per produrre materiali compositi per l'edilizia, l'arredamento e l'industria automobilistica o rigenerati in filati, che a loro volta possono essere utilizzati per creare nuovi tessuti e capi d'abbigliamento mantenendo una qualità comparabile all'originale [16], [45].

4.2. Analisi del caso studio

4.2.1. Confronto degli impatti ottenuti con le formule di allocazione

L'analisi dei dati si è focalizzata principalmente sui prodotti fibre MWool® (lana 100% riciclata) e tessuti ReviWool® (80% lana riciclata + 20% PA riciclata). Come primo passo, tramite il software Microsoft Excel, sono state confrontate le sei formulazioni EoL descritte nei paragrafi precedenti al fine di ottenere una visione più completa del panorama metodologico. Per la selezione dei parametri R_1 , R_2 , R_3 , A , Q_{sin}/Q_p e Q_{sout}/Q_p , è stata seguita la sequenza delineata nelle linee guida della PEF (Figura 18).

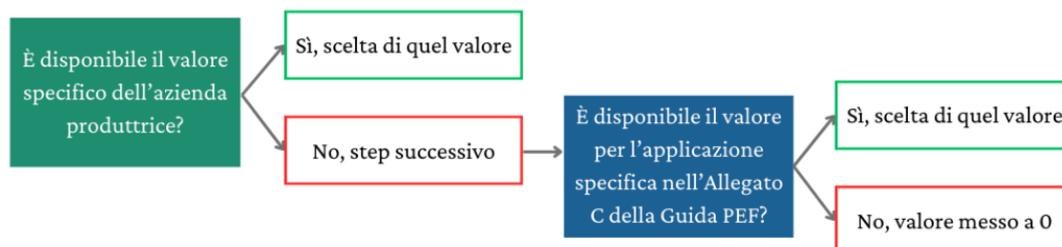


Figura 18 Sequenza da seguire per la scelta dei parametri.

Nell'elenco delle formule, è stata inclusa anche quella definita dallo schema nazionale del *Made Green in Italy* (MGI) per tessuti in lana cardata o peli fini cardati, il quale ha stabilito valori leggermente diversi per i parametri sopra menzionati. Si osserva come l'Equazione 10 riprenda la prima parte della *Circular Footprint Formula*:

$$(1 - R_1)E_v + R_1 \times \left(AE_{recycled} + (1 - A)E_v \times \frac{Q_{sin}}{Q_p} \right) \quad (10)$$

Di conseguenza, i valori di impatto finale ottenuti mediante l'applicazione dei dati forniti dalla guida PEF e dal MGI, riportati in Tabella 6, sono stati confrontati nel medesimo grafico, sia per MWool® che per ReviWool®.

Tabella 6 Dati assunti per la trattazione analitica.

Dati del produttore	MWool®	ReviWool®
R_1	1	1
R_2	1	0.97
R_3	/	0.105
Dati delle guide	Guida PEF - tessili	Made Green in Italy (MGI)
A	0.8	0.5
Q_{sin}/Q_p	1	0.8
$Q_{sout}/Q_p=Q_s/Q_p$	0.5	0.8

Per MWool®, l'analisi della parte energetica e dello smaltimento è stata esclusa, poiché non rilevante e nessun residuo è stato assunto per il recupero energetico. Le assunzioni relative alle emissioni e alle risorse specifiche consumate, in relazione al *climate change*, sono state fatte a partire dall'EPD:

- $E_v = E_v^* = 0.622 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$, introducendo la condizione di closed-loop, in cui il materiale vergine sostituito è il materiale vergine del prodotto di partenza, in questo caso assunto come il materiale riciclato. Un ipotetico scenario con l'introduzione di lana vergine richiederebbe la considerazione di

un nuovo impatto $E_v=75.8$ kg CO₂-eq/kg fornito dalla lana vergine, relativo al solo primo ciclo di riciclo in open-loop, con $E_v \neq E_v^*$.

- $E_D=0.604$ kg CO₂-eq/kg è stato calcolato considerando la fase di downstream, cioè il trasporto e la fine della vita nella fase di riciclo.
- E_{rec} è stato impostato considerando la somma delle fasi di upstream e core, inclusa la raccolta, selezione e triturazione nella fase di riciclo. L'assunzione di $E_{recEoL}=E_{rec}=1.91$ kg CO₂-eq/kg deriva dal fatto che non si modifica il metodo di riciclo del prodotto.

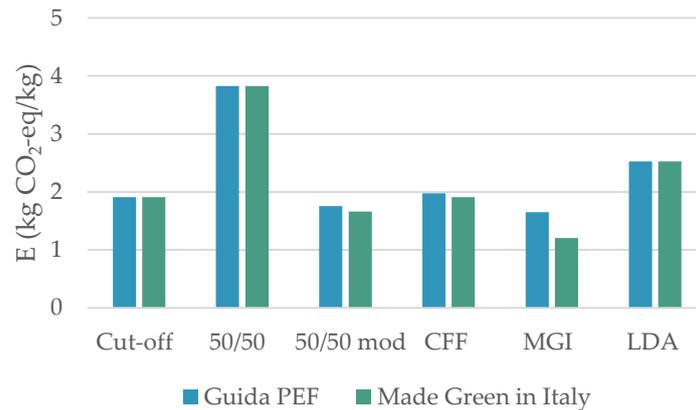


Figura 19 Confronto impatti MWool®.

Il confronto degli impatti per MWool® è mostrato in Figura 19. Inizialmente, va notato che i risultati ottenuti tramite le metodologie cut-off (100:0), 50/50 e LDA rimangono costanti, rispettivamente a 1.91, 3.82 e 2.53 kg CO₂-eq/kg, nonostante l'applicazione di differenti fattori di allocazione e di qualità, poiché non ne sono influenzati. L'approccio del cut-off non fornisce particolari incentivi a migliorare i processi di riciclo, ma piuttosto favorisce l'uso di materiali riciclati nella produzione. La metodologia 50/50 mostra l'impatto maggiore a 3.82 kg CO₂-eq/kg, suggerendo una distribuzione poco equa, come non dovrebbe essere, dell'impatto tra il materiale riciclato e il prodotto che lo utilizza. Proponendo formule diverse per i vari mercati dei materiali, si riconosce che le attività di riciclo non portano necessariamente a una riduzione degli impatti ambientali in tutte le situazioni. La formulazione 50/50 non specifica esplicitamente che il contenuto riciclato sostituisce i rifiuti nel ciclo di vita precedente anziché in quello attuale, e le perdite di qualità non sono considerate.

Un miglioramento si ottiene introducendo il metodo 50/50 modificato, che distribuisce più efficacemente gli impatti del riciclo, della produzione vergine e dello smaltimento sui diversi prodotti. Questo metodo dipende dal fattore Q_s/Q_p , che influisce direttamente sulla riduzione complessiva dell'impatto. L'uso di valori da 0.5 a 0.8 ha effetti significativi, variando l'impatto da 1.75 a 1.66 kg CO₂-eq/kg.

Sebbene la praticità della formula diminuisca con l'introduzione di parametri aggiuntivi, questo consente di considerare informazioni rilevanti come la qualità del prodotto e il numero di cicli di riciclo. Il metodo LDA, non ancora integrato negli standard, è l'unico a introdurre il concetto di cicli di riciclo, considerando le proprietà intrinseche dei materiali che diminuiscono con il passare dei cicli, portando a un impatto complessivamente inferiore all'aumentare nel numero di cicli.

Le metodologie della CFF e del Made Green in Italy presentano impatti minori, specialmente utilizzando i valori forniti dallo schema nazionale nel caso del MGI. Tuttavia, la formula del MGI non considera i valori di emissione o consumo del prodotto vergine da sostituire con il materiale riciclato, né la fase di riciclo a fine vita e lo smaltimento, oltre al tasso di riciclo.

In modo analogo a quanto osservato nel caso del 50/50 modificato, l'impatto derivante dall'applicazione della CFF, focalizzata esclusivamente sulla componente materiale, mostra una leggera diminuzione quando si adottano i valori proposti dal Made Green in Italy. Tale riduzione, legata alla dipendenza da A , Q_{sin}/Q_p e Q_{sout}/Q_p , porta l'impatto a passare da 1.97 a 1.91 kg CO₂-eq/kg.

Esaminando il caso closed-loop, entrambi gli indici di qualità sono essenziali: Q_{sin}/Q_p è associato al contenuto riciclato, mentre Q_{sout}/Q_p alla riciclabilità a fine vita. Infatti, variando i valori di questi parametri, si osserva come l'impatto subisca variazioni, riflettendo il fenomeno del *downcycling* di un materiale rispetto a quello primario originale e mettendo in evidenza gli effetti dei ricicli multipli.

Introducendo, ad esempio, il 10% di lana vergine ($E_v=75.8$ kg CO₂-eq/kg), come presentato in Figura 20, si registra sì un significativo e globale aumento degli impatti finali, soprattutto nei metodi CFF e MGI, formulati per descrivere in modo più efficace la fase di fine vita. I nuovi valori si collocano nel range tra 19.8 e 22.8 kg CO₂-eq/kg, a differenza dei valori ottenuti con i metodi restanti, compresi tra 7.45 (50/50) e 9.45 kg CO₂-eq/kg (LDA). In particolare, poiché in questo caso $E_v \neq E_v^*$, è necessario solo l'indice di qualità Q_{sin}/Q_p associato al contenuto riciclato. Si osserva che i valori di impatto ottenuti applicando i valori dello schema nazionale nei metodi CFF e MGI risultano praticamente equiparabili, poiché la formulazione nel Made Green in Italy non considera il rapporto Q_{sout}/Q_p .

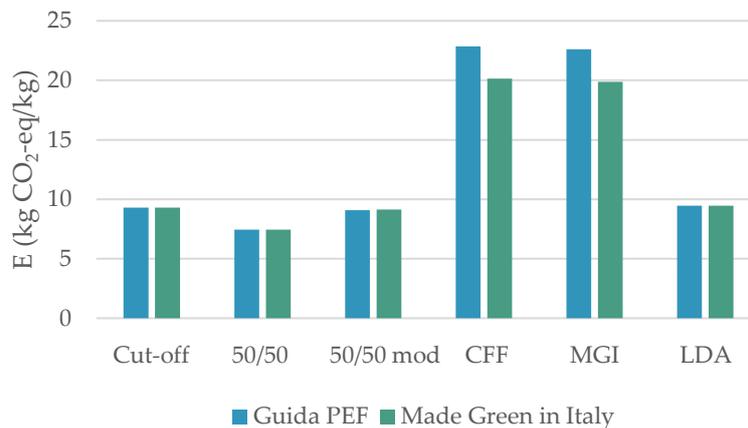


Figura 20 Confronto impatti MWool® con $R_1=0.9$.

Poiché la guida PEF è stata creata per essere applicata a un prodotto finito, è stata eseguita una verifica sulla stessa linea di quanto appena discusso, ma sul tessuto ReviWool®. Tuttavia, la selezione dei moduli del ciclo di vita non è precisa a causa della presenza di numerosi co-prodotti e di due diverse linee di lavorazione (pettinata e laniera), ai quali occorrerebbe circoscriversi. Gli impatti sono stati calcolati considerando solo la fase di produzione della lana pettinata senza considerare le fibre recuperate e reintrodotte nel ciclo laniero, poiché non direttamente riutilizzate nel ciclo in esame.

Per il tessuto ReviWool®, per via della maggiore disponibilità di dati, sono stati utilizzati impatti associati alle fasi EoL più specifici per le fasi di smaltimento, riciclo e recupero energetico. Nella CFF è stata inclusa la parte legata allo smaltimento introducendo il parametro R_3 , che rappresenta la quota di prodotto inviato all'incenerimento con recupero energetico. Questo include la quota di prodotto inviato all'inceneritore come rifiuto urbano e alla quota di prodotto raccolto come indumenti usati, selezionati come non riciclabili e inviati all'inceneritore. L'impatto associato allo smaltimento si prevede comunque basso se confrontato con quello relativo alla parte materiale. A partire dall'EPD, l'analisi ha considerato le seguenti assunzioni per le emissioni e le risorse specifiche consumate:

- E_v è stato calcolato considerando la somma dei moduli di fornitura di materia prima, trasporto e produzione, con $E_v = E_v^* = 13.7 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$, introducendo la condizione di closed-loop.
- $E_D = 0.384 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$, è stato derivato dalla fase di downstream (fasi di trasporto e di end-of-life) nella fase di riciclo, considerando la somma dei moduli di smontaggio/selezione, trasporto verso il recupero/smaltimento e smaltimento in discarica.
- E_{rec} è stato quantificato considerando le fasi di raccolta, smistamento e trasporto del materiale riciclato nella fase di riciclo, e per l'assunzione di closed-loop, $E_{rec} = E_{recEoL} = 0.208 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$.

L'analisi del caso di ReviWool®, composto al 80% da lana riciclata e al 20% da PA riciclata, mostra impatti complessivamente inferiori del 4% rispetto all'utilizzo di PA vergine.

Per semplicità, si è analizzato il caso di 100% materiale riciclato ($R_1=1$), ed anche in questo caso si è rimasti vincolati al closed-loop ipotizzando il riciclo della stessa tipologia di prodotto.

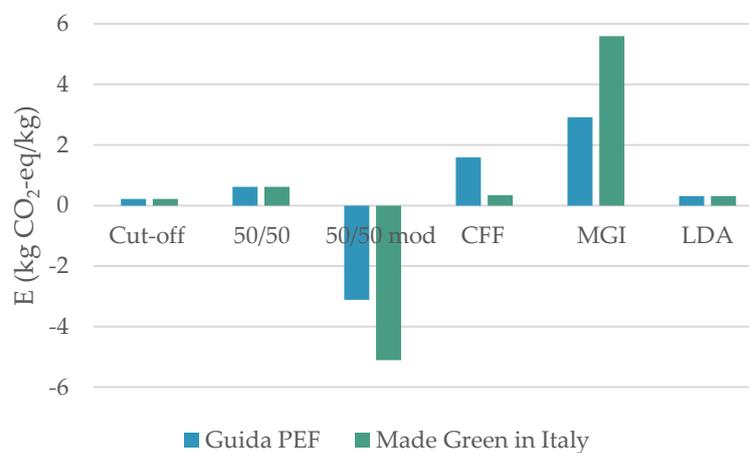


Figura 21 Confronto impatti ReviWool®.

Come osservato nel caso precedente, osservando ora la Figura 21, gli impatti derivanti dai metodi di cut-off (100:0), 50/50 e LDA rimangono costanti nei due set di valori, assumendo complessivamente i valori minimi di 0.219, 0.621 e 0.316 kg CO₂-eq/kg, rispettivamente. Il metodo 50/50 modificato ha generato impatti negativi (-5.11 e -3.11 kg CO₂-eq/kg), ma per l'analisi dei dati, questi vengono riportati con il modulo, conseguentemente l'impatto ottenuto con questo metodo risulta leggermente inferiore a quello ottenuto con il metodo e i valori del MGI (2.91 kg CO₂-eq/kg).

Tali valori elevati potrebbero suggerire che il metodo proposto potrebbe non essere appropriato per la rappresentazione accurata del sistema in analisi, oppure l'introduzione dell'indice di qualità potrebbe erroneamente modificare l'assegnazione del carico d'impatto.

La CFF assume la forma di un approccio 50/50, ma con maggiore complessità a livello di parametri. Un valore medio di impatto è stato ottenuto utilizzando i valori della guida PEF (0.340 kg CO₂-eq/kg), mentre l'adozione dei parametri dello schema nazionale ha portato ad un aumento dell'impatto (1.59 kg CO₂-eq/kg). Quando si utilizza la CFF, l'impatto climatico è strettamente legato all'equilibrio tra domanda e offerta sul mercato. Pertanto, la CFF fornisce incentivi non solo per fornire materiali riciclati di alta qualità al ciclo di vita successivo del prodotto, ma anche per riciclare e recuperare materiali per i quali esiste una domanda sul mercato, anche se il processo di riciclo stesso ha un elevato impatto ambientale.

L'introduzione di uno scarto percentuale del 3%, che non verrà recuperato nel successivo ciclo di riciclo, ha causato un aumento medio nelle formulazioni che dipendono dal parametro R₂. In particolare, l'impatto calcolato con la CFF ipotizzando un 100% di materiale prodotto all'uscita che verrà riciclato mostra una diminuzione fino a 0.167 kg CO₂-eq/kg.

Nel caso di ReviWool[®], i materiali in ingresso, vale a dire la lana riciclata e la poliammide riciclata, non sono stati differenziati in alcun modo. Pertanto, è come se la miscela iniziale fosse stata modellata come un singolo materiale senza catturare le sue diverse proprietà, qualità di degradazione, domande e offerte. In più, la scelta dei parametri A, Q_{sin}/Q_p e Q_{sout}/Q_p ha un impatto diretto sull'impatto finale, modificandone sensibilmente il valore. Per una precisione ulteriore, sarebbe necessario assegnare in modo più dettagliato i moduli specifici del ciclo di vita alle emissioni e alle risorse specifiche consumate (E_V, E_V^{*}, E_{rec}, E_{recEoL} ed E_D).

Si noti che il grado di complessità della CFF la rende particolarmente impegnativa da applicare negli studi sui futuri sistemi di riciclo, poiché considera sia il tasso di riciclo sia l'equilibrio tra domanda e offerta del mercato, nonché ciò che viene sostituito e i cambiamenti di qualità di ciascun componente nel riciclo. Man mano che la società cambia e la tecnologia si sviluppa, tutte queste variabili sono destinate a cambiare. Un approccio per gestire questo aspetto negli studi orientati al futuro potrebbe essere quello di esaminare scenari migliori e peggiori.

4.2.2. Andamento dell'impatto in funzione dei parametri

Per comprendere il funzionamento del vettore prodotto attraverso la CFF (sulla base della Figura 22), i seguenti grafici sono stati concepiti per illustrare l'andamento dell'impatto globale rispetto ai parametri R₁, R₂ e R₃ secondo una serie di A in aumento, assegnando ai parametri non direttamente in analisi i valori forniti dall'azienda produttrice e modificando gli indici di qualità attraverso vari esempi di combinazioni (qui non riportati) per descriverne l'andamento in maniera più completa. Per quanto riguarda gli indici di qualità Q_{sin}/Q_p e Q_{sout}/Q_p , anche il loro comportamento è stato rappresentato in funzione dell'aumento di A, utilizzando i valori aziendali per i parametri R₁, R₂ e R₃ ed i valori suggeriti dalla guida PEF per il fattore di qualità non in analisi.

È importante sottolineare che, a seconda della scelta tra closed-loop e open-loop, gli andamenti possono differire notevolmente e risultare scarsamente comparabili tra loro, con conseguenti andamenti e relativi punti di inizio e fine diversi. Al fine di mostrare meglio le differenze, è stato deciso di presentare un esempio di andamento grafico per ciascun parametro, sia in versione closed-loop che open-loop, per il caso MWool® e limitandosi al solo closed-loop per ReviWool®. Nei grafici seguenti, ai parametri variabili è stato associato il valore della casa produttrice, quando disponibile, o il valore suggerito dalla guida PEF per l'applicazione della CFF che si basa sullo schema di Figura 22.

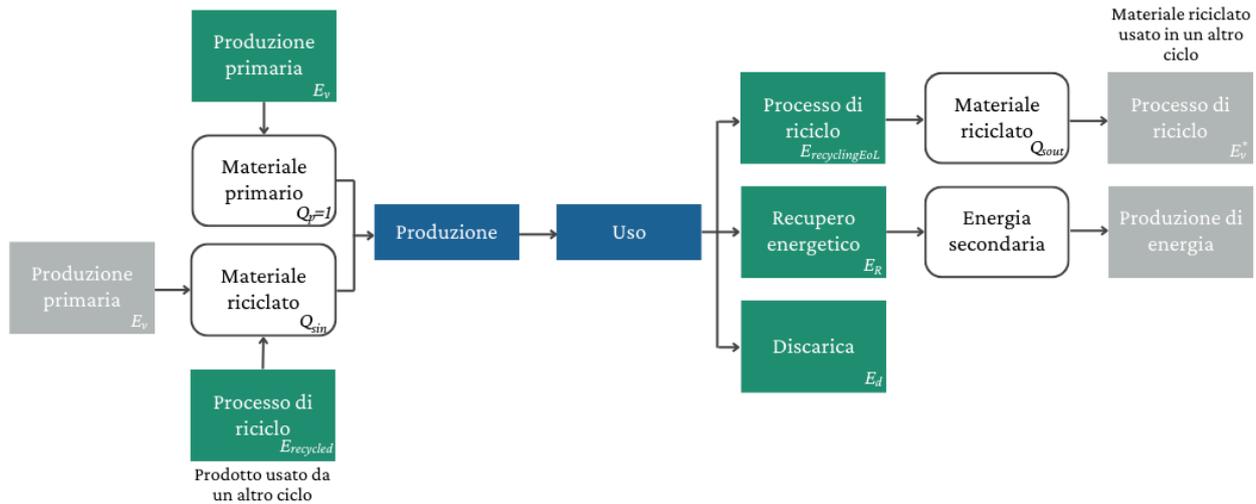


Figura 22 Schema generale del ciclo di vita di un prodotto [46].

- MWool®

R_1

Analizzare l'andamento dell'impatto in funzione di R_1 nella condizione closed-loop (Figura 23) potrebbe sembrare poco significativo poiché non si tiene conto dell'impatto del materiale vergine, tranne che al primo ciclo, ma del materiale già riciclato. Tuttavia, sono stati riportati entrambi gli andamenti per confrontare i due casi. L'andamento converge a $R_1=1$ con $E=1.91 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}=E_{\text{rec}}$ per qualsiasi valore assunto dagli indici di qualità. Aumentando questi (ad esempio, da 0.8 a 1), si osserva un leggero aumento dell'impatto iniziale che diminuisce con il fattore A. Se l'indice di qualità in entrata è diverso da quello in uscita, si verifica un punto d'incrocio prima di $R_1=1$ se $Q_{\text{sin}}/Q_p > Q_{\text{sout}}/Q_p$, mentre nel caso $Q_{\text{sin}}/Q_p < Q_{\text{sout}}/Q_p$ non si osserva alcun punto di convergenza finale, e l'impatto finale aumenta con A.

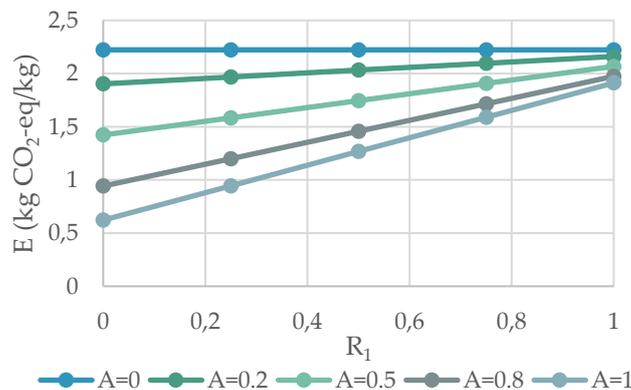


Figura 23 Andamento $E(R_1)$ per caso closed-loop assunti $R_2=1$, $Q_{\text{sin}}/Q_p=1$ e $Q_{\text{sout}}/Q_p=0.5$.

L'andamento per il caso open-loop è opposto (Figura 24), con un punto di convergenza iniziale a $E=75.8$ kg CO₂-eq/kg=Ev. Gli impatti finali diminuiscono all'aumentare di R_1 e A. Incrementando gli indici di qualità, il punto di partenza iniziale non varia, ma l'impatto globalmente aumenta progressivamente con A. Se $Q_{sin}/Q_p > Q_{sout}/Q_p$, si osserva una non convergenza iniziale con un impatto iniziale maggiore al diminuire di A, mentre se $Q_{sin}/Q_p < Q_{sout}/Q_p$ si ha una diminuzione globale dell'impatto con conseguente aumento della pendenza degli andamenti.

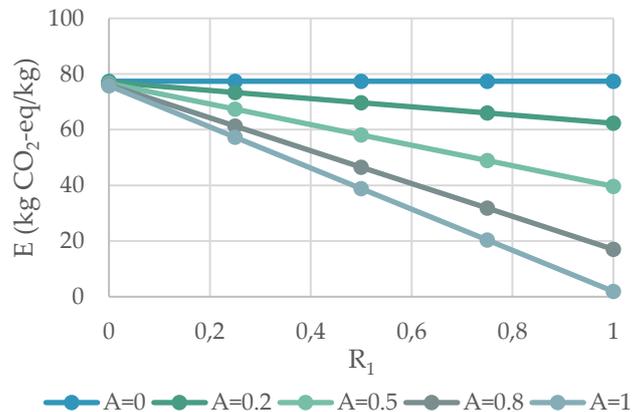


Figura 24 Andamento E(R₁) per caso open-loop assunti R₂=1, Q_{sin}/Q_p=1 e Q_{sout}/Q_p=0.5.

R₂

In CL (Figura 25), l'andamento dell'impatto converge a $R_2 \approx 0.8$ con $E=E_{rec}$ aumentando con A; incrementando entrambi i fattori di qualità, l'impatto iniziale aumenta in maniera meno progressiva con A. Se $Q_{sin}/Q_p > Q_{sout}/Q_p$, si osserva un punto d'incrocio prima di $R_2=1$ oltre il quale gli impatti sono maggiori al diminuire di A. Se $Q_{sin}/Q_p < Q_{sout}/Q_p$, non si arriva a convergenza finale ma è mantenuto l'andamento lineare crescente con R all'aumentare di A.

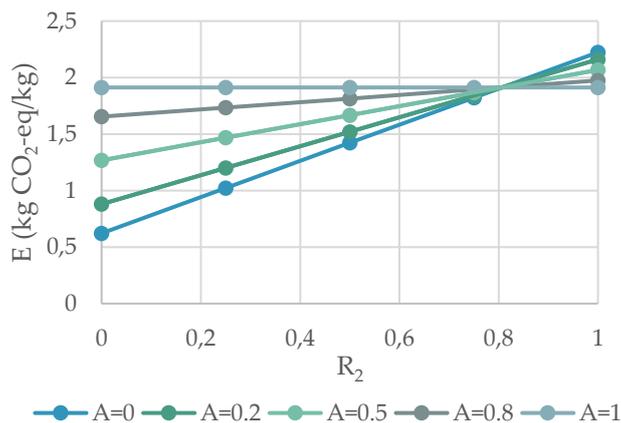


Figura 25 Andamento E(R₂) per caso closed-loop assunti R₁=1, Q_{sin}/Q_p=1 e Q_{sout}/Q_p=0.5.

In OL (Figura 26), l'impatto segue un andamento lineare leggermente crescente con R₂ con uno scarto globale in diminuzione al diminuire di A. Aumentando i fattori di qualità, l'impatto globalmente aumenta in maniera progressiva con il diminuire di A. Il punto di inizio a $R_2=0$ dipende esclusivamente da Q_{sin}/Q_p , per qualsiasi valore si associ a Q_{sout}/Q_p .

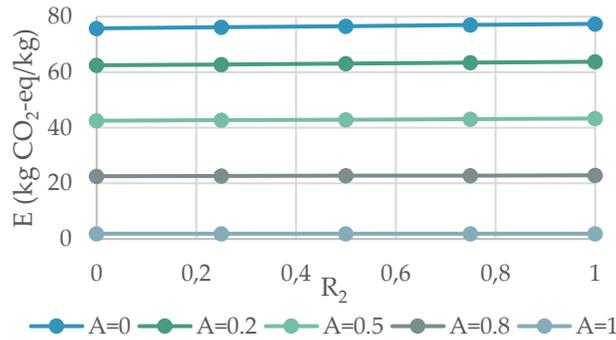


Figura 26 Andamento E(R₂) per caso open-loop assunti R₁=1, Q_{sin}/Q_p=1 e Q_{sout}/Q_p=0.5.

Introducendo quindi del materiale vergine al 10% (caso di confronto e non analizzato in dettaglio), si osserva un globale ed evidente aumento dell'impatto che tende ad avvicinarsi al valore di E_v al diminuire di A.

Q_{sin}/Q_p

In CL (Figura 27), l'andamento dell'impatto è crescente con il fattore di qualità all'entrata; si osserva poi un punto di incrocio per Q_{sin}/Q_p=Q_{sout}/Q_p oltre il quale l'impatto risulta maggiore al diminuire di A.

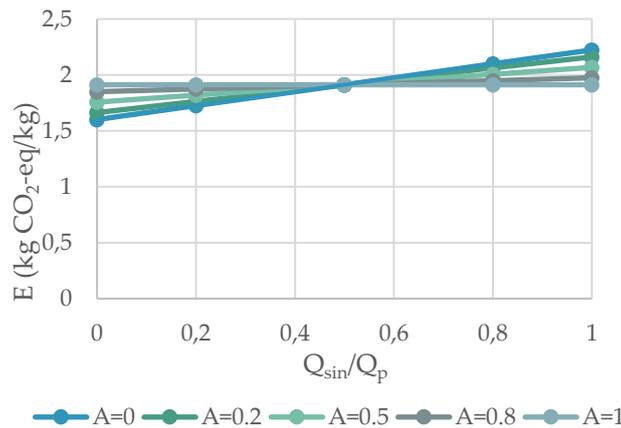


Figura 27 Andamento E(Q_{sin}/Q_p) per caso closed-loop assunti R₁ = R₂ = 1 e Q_{sout}/Q_p = 0.5.

In OL (Figura 28), si parte da un punto di convergenza iniziale a Q_{sin}/Q_p=0 per seguire un andamento lineare sempre più crescente al diminuire di A. Aumentando Q_{sout}/Q_p, l'andamento generale dell'impatto diminuisce di pendenza.

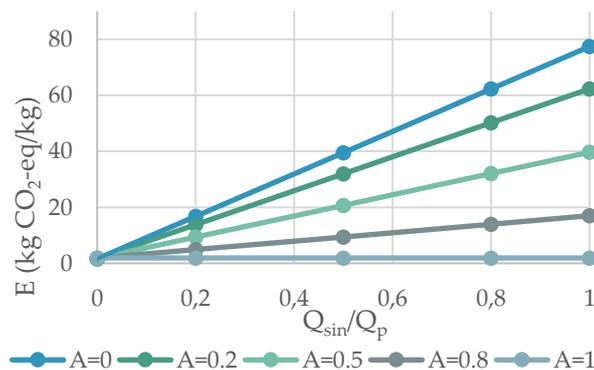


Figura 28 Andamento E(Q_{sin}/Q_p) per caso open-loop assunti R₁=R₂=1 e Q_{sout}/Q_p=0.5.

Q_{sout}/Q_p

In CL (Figura 29), l'andamento segue un profilo decrescente con valori di impatto maggiori al diminuire di A fino ad un punto di convergenza al valore di $Q_{sin}/Q_p=Q_{sout}/Q_p$. Se il fattore di qualità in entrata diminuisce, l'impatto globalmente diminuisce ottenendo i valori minori oltre il punto di incrocio.

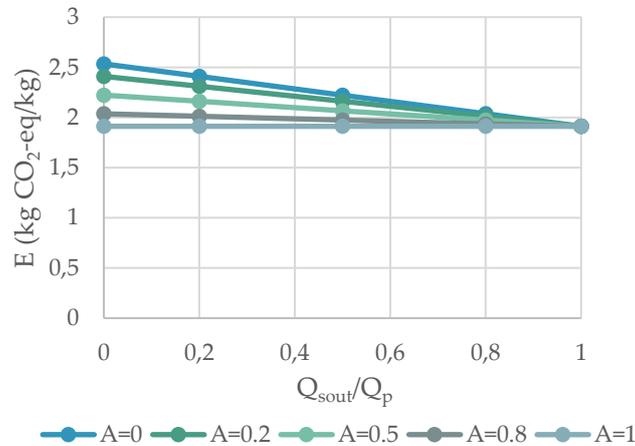


Figura 29 Andamento $E(Q_{sout}/Q_p)$ per caso closed-loop assunti $R_1=R_2=1$ e $Q_{sin}/Q_p=1$.

In OL (Figura 30), l'andamento è non percettibilmente decrescente con Q_{sout}/Q_p , e l'impatto aumenta con il diminuire di A. Anche in questo caso, diminuendo il fattore di qualità in entrata, l'impatto decresce globalmente.

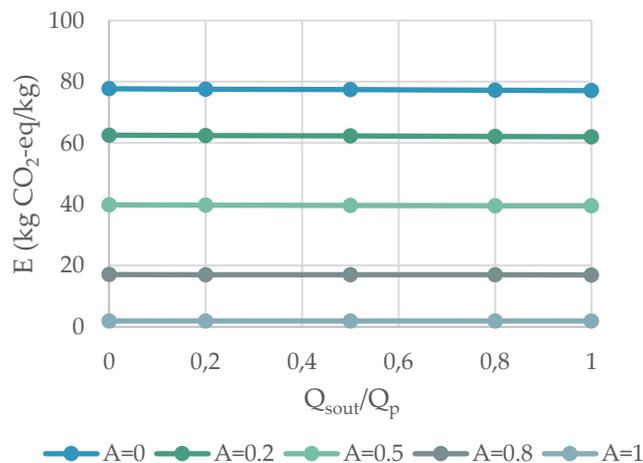


Figura 30 Andamento $E(Q_{sout}/Q_p)$ per caso open-loop assunti $R_1 = R_2 = 1$ e $Q_{sin}/Q_p = 1$.

- ReviWool®

R_1

In CL (Figura 31), l'impatto è decrescente con R_1 arrivando a un punto d'incrocio a $R_1 \approx 0.5$; inoltre, l'impatto è maggiore con A prima del punto di incrocio. Incrementando i fattori di qualità, l'impatto progressivamente diminuisce. Nel caso $Q_{sin}/Q_p > Q_{sout}/Q_p$, si osserva un punto d'incrocio a un R_1 molto vicino al valore ipotizzato per Q_{sout}/Q_p , oltre il quale gli impatti finali sono minori e aumentano con la diminuzione di A. Nel caso $Q_{sin}/Q_p < Q_{sout}/Q_p$, non si arriva a convergenza entro $R_1=1$ ma si ipotizza che vi arrivi a valori superiori, e l'impatto segue comunque un andamento decrescente.

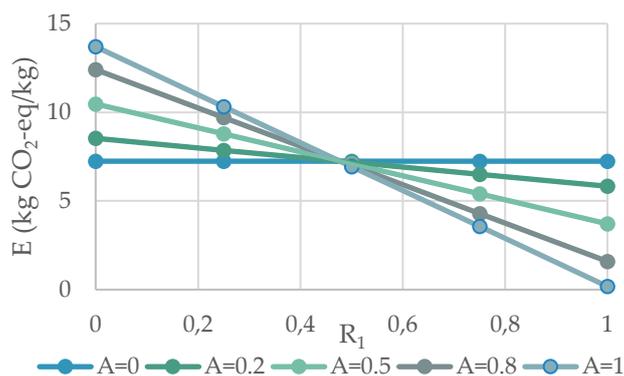


Figura 31 Andamento $E(R_1)$ per caso closed-loop assunti $R_2=0.97$, $R_3=0.105$, $Q_{sin}/Q_p=1$ e $Q_{sout}/Q_p=0.5$.

R₂

In CL (Figura 32), l'andamento dell'impatto è decrescente con R_2 senza in questo caso arrivare a convergenza; l'impatto aumenta con la diminuzione di A . Diminuendo entrambi i fattori di qualità, l'impatto complessivo diminuisce. In maniera invertita al caso precedente, nel caso $Q_{sin}/Q_p > Q_{sout}/Q_p$, non si arriva a convergenza entro $R_2=1$ ma si ipotizza che vi arrivi a valori superiori, e l'impatto segue un andamento decrescente. Se $Q_{sin}/Q_p < Q_{sout}/Q_p$, si osserva un punto d'incrocio a un R_2 molto vicino al valore ipotizzato per Q_{sin}/Q_p , oltre il quale gli impatti finali sono minori ed aumentano con l'aumento di A .

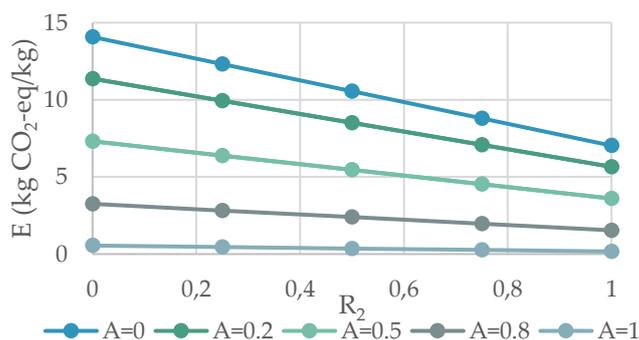


Figura 32 Andamento $E(R_2)$ per caso closed-loop assunti $R_1=1$, $R_3=0.105$, $Q_{sin}/Q_p=1$ e $Q_{sout}/Q_p=0.5$.

R₃

In CL (Figura 33), l'andamento dell'impatto è linearmente decrescente con l'aumento di R_3 , e aumentando A l'impatto aumenta mantenendo comunque valori tra loro poco distanti. Diminuendo il fattore qualità, gli impatti diminuiscono.

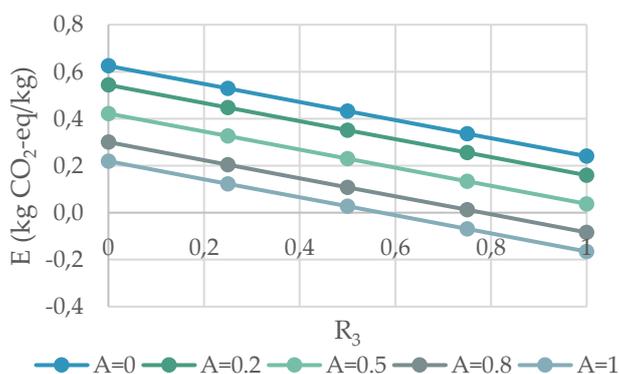


Figura 33 Andamento $E(R_3)$ per caso closed-loop assunti $R_1=1$, $R_2=0.97$, $Q_{sin}/Q_p=1$ e $Q_{sout}/Q_p=0.5$.

Q_{sin}/Q_p

In CL (Figura 34), si osserva un punto di incrocio al valore $Q_{sin}/Q_p \approx Q_{sout}/Q_p$, oltre il quale l'andamento dell'impatto prosegue in maniera crescente lineare assumendo valori positivi. Quindi, l'impatto maggiore si ha con la diminuzione di A. Aumentando Q_{sout}/Q_p , il punto di incrocio si sposta per valori di Q_{sin}/Q_p vicino a questo, e l'impatto complessivo diminuisce.

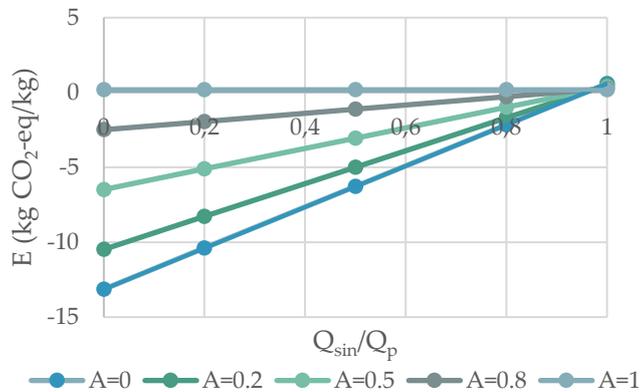


Figura 34 Andamento E(Q_{sin}/Q_p) per caso closed-loop assunti $R_1=1$, $R_2=0.97$, $R_3=0.105$ e $Q_{sout}/Q_p=0.5$.

Q_{sout}/Q_p

In CL (Figura 35), l'impatto segue un andamento decrescente lineare con valori maggiori al diminuire di A. Diminuendo il fattore di qualità in entrata, si osserva la presenza di un punto di incrocio per valori $Q_{sout}/Q_p \approx Q_{sin}/Q_p$, oltre il quale l'impatto diminuisce ed è minore con A.

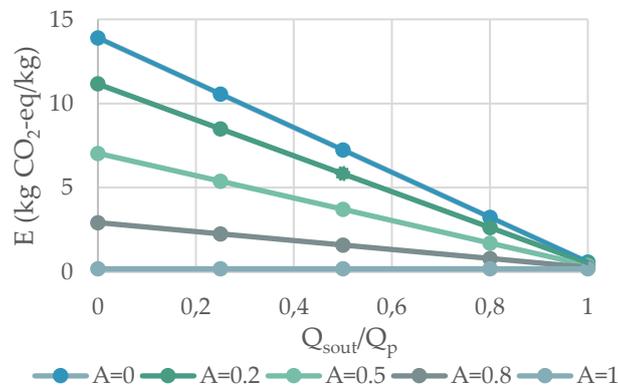


Figura 35 Andamento E(Q_{sout}/Q_p) per caso closed-loop assunti $R_1=1$, $R_2=0.97$, $R_3=0.105$ e $Q_{sin}/Q_p=1$.

4.2.3. Nuova descrizione del fattore di qualità

Per una migliore definizione del fattore di qualità, è essenziale comprendere il modo in cui viene attualmente definito. Attualmente, la guida PEF identifica i rapporti Q_{sin}/Q_p e Q_{sout}/Q_p al punto di sostituzione come fattori di correzione di credito e debito per possibili differenze tra la materia secondaria e la materia primaria. Tuttavia, la definizione non è univoca e a volte è presentata come un fattore di sostituzione relativa, indicando la quantità di materiale riciclato che sostituisce il materiale vergine, oppure come un parametro legato alla qualità tecnica del materiale, come la lunghezza delle fibre o la resistenza alla trazione [13].

Nello specifico, la guida PEF descrive il fattore di qualità focalizzandosi sull'aspetto economico, ossia sul rapporto di prezzo tra materie secondarie e primarie al momento della sostituzione, oppure sugli aspetti fisici se più rilevanti, senza fornire dettagli aggiuntivi. Come mostrato, la PEF CR A&F, lo schema del *Made Green in Italy* ed i limitati articoli nella letteratura che affrontano l'applicazione della CFF assegnano valori divergenti a questo parametro. Fino ad ora, numerosi studi hanno descritto il fattore di qualità in proporzione al prezzo medio di mercato del prodotto. Nonostante l'allocazione economica sia un metodo riconosciuto nella metodologia LCA, l'andamento del mercato è soggetto a variazioni e incertezze, anche considerando i prezzi delle materie prime in senso non assoluto [27], [47].

Riguardo a questo, l'Australian Wool Innovation (AMI) ha sottolineato i rischi a breve termine legati alla gestione delle scorte di lana e ai cambiamenti nella domanda da parte dei filatori. Ad esempio, l'accumulo di lana nei magazzini e una diminuzione degli acquisti da parte dei filatori possono impattare i prezzi della lana grezza. Un altro aspetto cruciale riguarda la pratica della miscelazione di lana da parte degli acquirenti, necessaria per soddisfare specifiche ordini, influenzando direttamente il ciclo domanda-offerta e causando volatilità dei prezzi.

D'altra parte, a lungo termine, vengono esplorati fattori che influenzano il mercato nel corso di un anno o più. La crescente preferenza dei consumatori per tessuti leggeri, le tendenze nella moda, la competizione con altre fibre e i cambiamenti nei comportamenti di abbigliamento sono elementi che plasmano la domanda di lana nel tempo. Inoltre, si sottolinea la necessità per i produttori di adattarsi a queste tendenze, concentrandosi su settori specifici come l'abbigliamento sportivo outdoor.

Ritornando alla *Circular Footprint Formula*, la realtà del mercato è già globalmente analizzata tramite il fattore A, che consente di allocare oneri e crediti derivanti dal riciclo e dalla produzione di materiale vergine tra due cicli di vita. Al settore tessile, la guida associa un $A=0.8$ per evidenziare sia il contenuto di materiale riciclato che la riciclabilità a fine vita, mantenendo predominante il contenuto riciclato e avvicinandosi a un approccio *cut-off* (100:0) con fattore $A=1$.

Di conseguenza, l'introduzione di un ulteriore parametro rischierebbe di concentrare eccessivamente l'attenzione sul rapporto prezzo-qualità, che spesso non riflette la vera qualità del prodotto finale, ma riflette solo le fluttuazioni di mercato. Poiché la guida è ancora in fase di sviluppo e revisione continua, si cerca di contribuire calcolando il fattore di qualità in modo più preciso basandosi sulle proprietà tecniche del materiale. Questo approccio mira a integrare un parametro di qualità descrittivo della materia prima, che si modifica ad ogni ciclo di riciclo successivo, permettendone una descrizione più accurata. Un inconveniente dell'approccio a fine vita della CFF è rappresentato dalle ipotesi relative ai coefficienti che riducono la comparabilità. Pertanto, la raccomandazione è di affinare la formulazione considerando la frequenza del riciclo e descrivendo la qualità in modo adeguato.

La qualità della fibra, come definita nella direttiva di Manteco®, è valutata in base ai parametri di finezza (legata al diametro della fibra), lunghezza, colore e presenza di vegetali. Con il progresso della qualità del filato, le aziende di abbigliamento tradizionali hanno adottato la tecnologia che comporta la

triturazione fisica di tessuti post-industriali o post-consumo e la loro trasformazione in filato. Tuttavia, nonostante il riciclo meccanico si impegni a evitare l'uso di additivi chimici e a utilizzare poche risorse energetiche per preservare la qualità e le prestazioni del filato, la lunghezza della fibra di lana è inevitabilmente influenzata dalla qualità del processo di riciclo.

Da studi sperimentali condotti in collaborazione con l'azienda, emerge che le performance di resistenza e le dimensioni del diametro medio delle fibre di lana sottoposte a riciclo meccanico, sia a secco che ad umido, rimangono invariate. L'unico fattore che subisce modifiche è la lunghezza delle singole fibre a seguito della triturazione, risultando in un filato finale di qualità inferiore. Di conseguenza, la fibra così degradata non può essere utilizzata singolarmente ma richiede la combinazione con nuova materia vergine, ottenendo un materiale più problematico dal punto di vista della riciclabilità. Infatti, la presenza di un eccessivo numero di fibre corte in un filato può causare la formazione di pelucchi indesiderati negli indumenti, rendendo le lane corte meno ambite sul mercato rispetto alle lane lunghe, portandole così in un diverso settore di mercato, come quello dei tappeti (come riassunto tramite lo schema in Figura 36).

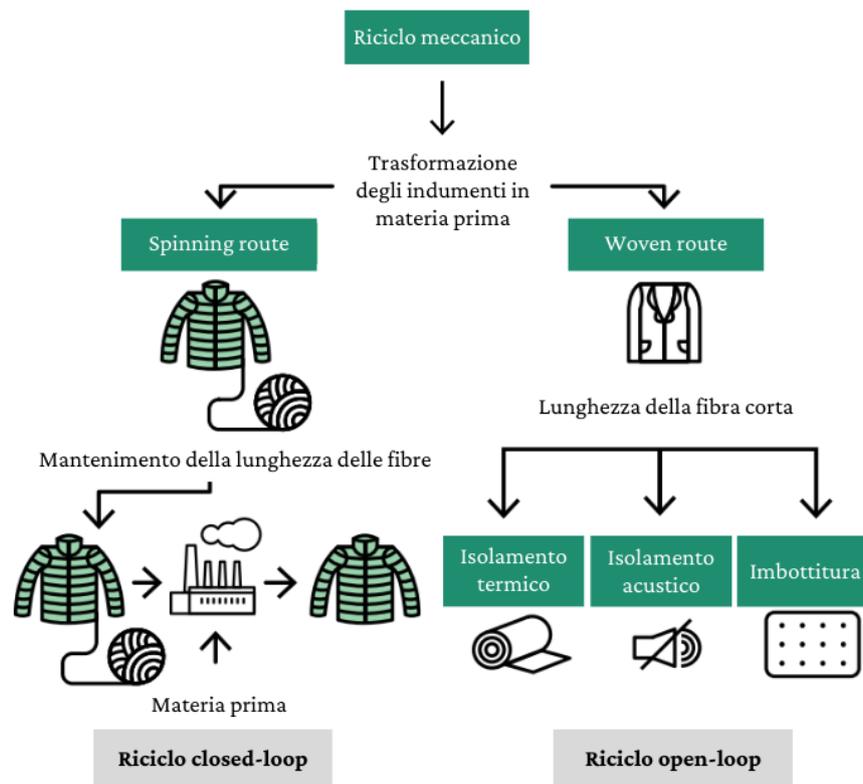


Figura 36 Riciclo meccanico di capi tessili in lana basato su riciclo a ciclo aperto e chiuso [48].

La lunghezza della fibra gioca un ruolo fondamentale nel determinare il sistema di lavorazione della lana e le proprietà del filato risultante. Le fibre lunghe sono generalmente più facili da filare e producono filati più resistenti e uniformi. La lunghezza media delle fibre della lana può essere ridotta durante la fase di cardatura, a seconda del grado di compattezza, dal 10% al 50%. Inoltre, maggiore è la lunghezza iniziale della fibra, maggiore sarà la riduzione durante la lavorazione [49].

Dopo aver confermato che le caratteristiche meccaniche della lana vergine e della lana riciclata sono identiche, come riportato anche nel report di Textile Exchange, il valore commerciale della lana riciclata dipende principalmente dalla sua omogeneità e dalla capacità di preservare la lunghezza delle fibre durante il riciclo meccanico. La lunghezza della lana rappresenta un elemento chiave nella classificazione della lana, influenzandone la lavorabilità. Circa l'80% delle variazioni di lunghezza si verifica all'interno di un singolo fiocco di lana. La crescita della lana non è uniforme durante l'anno a causa di vari fattori come alimentazione, allevamento e salute delle pecore; tuttavia, i responsabili della qualità cercano di minimizzare queste variazioni per mantenere la fibra il più uniforme possibile [50].

Le fibre naturali a fiocco, come quelle della lana, vengono classificate in base alla tipica lunghezza della fibra. Si parla di fibre a fiocco corte quando hanno una lunghezza compresa tra 25 e 60 mm e di fibre lunghe quando superano i 60-150 mm. Queste categorie sono associate rispettivamente alle tecniche di cardatura e pettinatura [51]. Pertanto, le tre principali tecnologie di filatura della fibra a fiocco (*staple fiber*), menzionate precedentemente al Sottoparagrafo 4.1.2., vengono selezionate in base alla lunghezza della fibra:

- la tecnologia di pettinatura è la scelta migliore per l'utilizzo delle fibre lunghe di qualità;
- la tecnologia di cardatura raccoglie principalmente le fibre corte mediante un processo di riciclo più delicato;
- la tecnologia open-end recupera gli scarti dei processi precedenti, generando un materiale finale di basso valore aggiunto, associato al *downcycling* per la produzione di materiali isolanti.

Un aspetto rilevante sulla qualità della fibra a fiocco è che l'importanza non sta tanto nell'origine della materia vergine, quanto nella bontà del processo di riciclo. Tuttavia, prima di analizzare la fase di riciclo, è necessario focalizzarsi sul primo ciclo di lavorazione del prodotto, che comprende la trasformazione del materiale vergine, o già sottoposto a riciclo, in materiale secondario.

I meccanismi che influenzano la lunghezza delle fibre nel riciclo meccanico dei tessuti includono il processo di strappo, l'uso di lubrificanti e le ripetute estensioni durante il condizionamento meccanico. In particolare, il processo di strappo e il condizionamento meccanico causano un'alterazione, ovvero una riduzione della lunghezza della fibra modificandone le proprietà. Sempre secondo la letteratura, maggiore è la lunghezza iniziale, maggiore sarà la riduzione conseguente al ciclo di riciclo [52].

Osservando i grafici riportati al Sottoparagrafo 4.2.2. che mostrano l'impatto rispetto ai due fattori di qualità, si nota che questi tendono ad aumentare con l'incremento di $Q_{\text{sin}}/Q_{\text{p}}$ o la diminuzione di $Q_{\text{sout}}/Q_{\text{p}}$, indipendentemente dal fattore A e dalla tipologia di ciclo. In particolare, l'effetto legato alla variazione del fattore di qualità in uscita è meno significativo, soprattutto nel caso di analisi di un ciclo *open-loop* di MWool® (Figura 30), in cui l'impatto sembra rimanere sostanzialmente costante. Di conseguenza, è essenziale definire il fattore principale $Q_{\text{sin}}/Q_{\text{p}}$ attraverso valori sperimentali calcolabili per il caso studio specifico, al fine di ottenere un quadro più obiettivo e specifico per il prodotto in analisi.

4.2.4. Applicazione dell'approccio iterativo per valutare il fattore di qualità

In prima ipotesi, è stato descritto un fattore prova di qualità in entrata ($Q_{sin}/Q_p=1$, secondo la guida PEF) della materia prima, ovvero la fibra a fiocco, attraverso un andamento di tipo a potenza decrescente seguente la funzione iterativa (Equazione 11) con $i=1, 2, \dots, n$ dove n è il numero di cicli di riciclo massimo:

$$\left(\frac{Q_{sin}}{Q_p}\right)_{i+1} = \left(\frac{Q_{sin}}{Q_p}\right)_i - \left(\frac{1}{3}\right)^i = \left(\frac{Q_{sout}}{Q_p}\right)_i \quad (11)$$

Questo approccio mira ad ottenere una riduzione graduale e progressiva del fattore di qualità correlata a ciascun ciclo di riciclo. Il modello segue bene l'andamento osservato con l'applicazione dell'approccio linearmente digressivo (LDA), l'unico che incorpora il numero di cicli di riciclo nella formulazione, con un aumento di tali cicli. A supporto di questa ipotesi, l'analisi sperimentale condotta su fibre Manteco® sottoposte ad un massimo di cinque cicli di riciclo ($n=5$) ha rivelato un progressivo cambiamento nella lunghezza della fibra. In particolare, è stata osservata una maggiore modifica tra il primo e il secondo ciclo, una diminuzione meno marcata tra il secondo e il terzo ciclo, seguita da una sostanziale stabilità fino alla fine dell'esperimento.

Con queste premesse, sono ora illustrati gli andamenti di due rapporti di qualità confrontati mediante curve di fitting basate su un modello di potenza. Questo è finalizzato a verificare l'accuratezza dell'approssimazione del sistema, la quale è debitamente confermata dal coefficiente di determinazione $R^2 > 0.9$. Emerge una differenza evidente tra le due situazioni: il coefficiente di pendenza in Figura 38 è significativamente inferiore rispetto a quello presente in Figura 37. Questa disparità può essere attribuita sia alla formulazione dei due fattori sia all'indicazione che il rapporto Q_{sout}/Q_p è costantemente inferiore rispetto a Q_{sin}/Q_p .

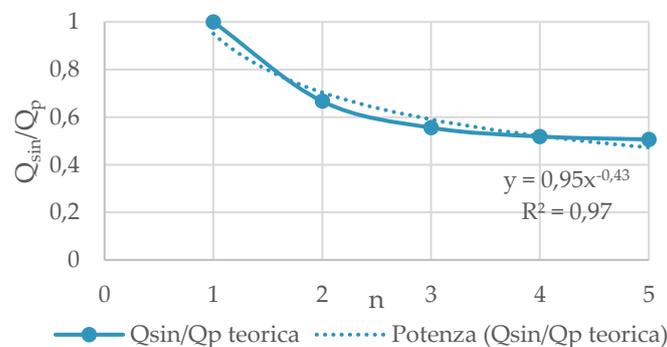


Figura 37 Andamento del fattore di qualità in entrata vs numero di cicli di riciclo.

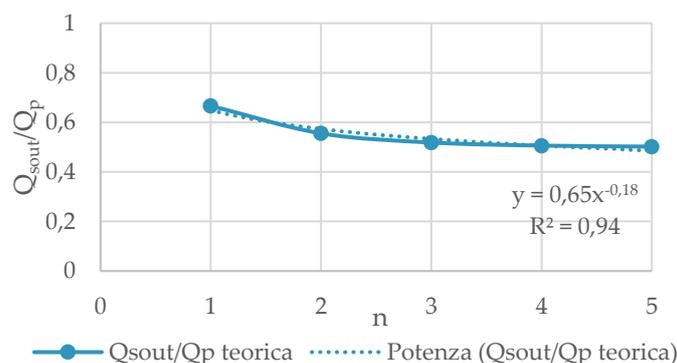


Figura 38 Andamento del fattore di qualità in uscita vs numero di cicli di riciclo.

Dopo aver confermato l'andamento per entrambi i fattori di qualità, si è esaminato il loro impatto sul valore di E_{CFF} in relazione al numero di cicli nei casi fino ad ora analizzati di M Wool® yarn e ReviWool® fabric. In Figura 39, si evidenzia come l'impatto di M Wool® decresca moderatamente da 1.953 a 1.913 kg CO₂-eq/kg all'aumentare del numero di cicli, con una riduzione significativamente inferiore rispetto al caso di Figura 40. Infatti, in quest'ultimo si registra una diminuzione di circa l'80%, passando da 1.15 a 0.230 kg CO₂-eq/kg.

Per entrambi i casi, è stata inclusa una curva di fitting basata su un modello a potenza, con un coefficiente di determinazione superiore a 0.9 indicante l'adeguatezza del modello statistico selezionato. Le barre di errore sono state aggiunte ai grafici per rappresentare l'incertezza associata ai dati rispetto a una curva ideale, evidenziando quanto i dati si discostino dal valore medio e migliorando la comprensione complessiva dei risultati.

Nel caso di M Wool® yarn (Figura 39), nonostante l'andamento generale sia positivo, si osserva un allineamento parziale, ma comunque buono, con i dati ottenuti dalla formulazione proposta nei punti di inizio, fine e metà della curva. A seguire, nel caso di ReviWool® fabric (Figura 40), si osserva una buona corrispondenza tra l'andamento dei dati e la curva di fitting, particolarmente evidente nel tratto conclusivo della curva.

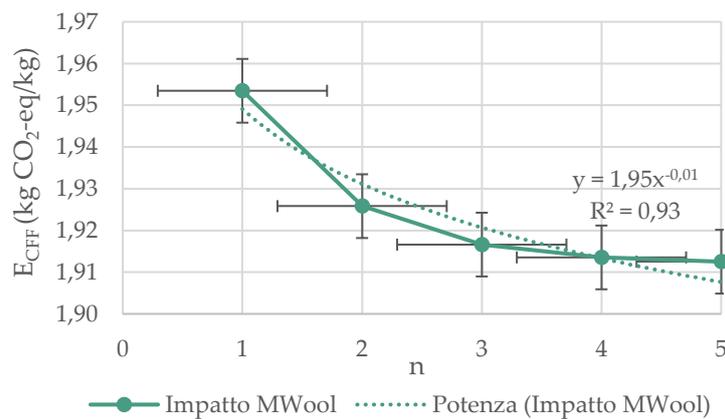


Figura 39 Andamento dell'impatto di M Wool® yarn (assunti A=0.8, R₁=R₂=1) vs numero di cicli di riciclo.

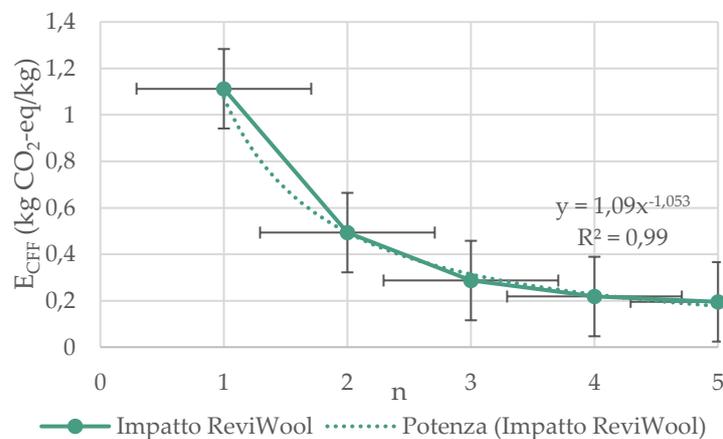


Figura 40 Andamento dell'impatto di ReviWool® fabric (assunti A=0.8, R₁=1, R₂=0.97 e R₃=0.105) vs numero di cicli di riciclo.

La presente nuova proposta per la descrizione del fattore di qualità tiene conto della progressiva perdita di qualità che si verifica nel prodotto a seguito del processo di riciclo. Nell'analisi, sono stati considerati casi di tipo closed-loop, escludendo l'introduzione di nuovo materiale, il che avrebbe alterato il parametro di nostro interesse. Affrontata questa problematica, non considerata in origine nella guida PEF, si ipotizza la creazione di un prodotto composto dai singoli fattori di qualità dei prodotti i-esimi. Per illustrare l'applicazione di questa proposta, si procederà con un'analisi indirizzata al prodotto ReviWool® fabric. Questo articolo è stato scelto per la presenza di differenti materiali (lana e poliammide) con relative composizioni, la migliore adattabilità al modello ipotizzato e la sua idoneità come prodotto finito vendibile, rendendolo quindi applicabile alla metodologia PEF, a differenza del caso di M Wool® yarn, associato ad un prodotto ancora intermedio.

Come precedentemente accennato nel Sottoparagrafo 4.2.3., la lunghezza della fibra di lana, ovvero della materia prima del prodotto finale, è il parametro chiave per la definizione del fattore di qualità. Il valore iniziale di Q_{sin}/Q_p al ciclo 1 è stato proposto basandosi sulla proporzione tra la lunghezza media della fibra di lana (L_w) e la lunghezza massima della categoria di fibra (L_{max}), secondo classificazione interna all'azienda o esterna, come indicato nell'Equazione 12:

$$\left(\frac{Q_{sin}}{Q_p}\right)_{1,w} = \frac{L_w \cdot 1}{L_{max}} \quad (12)$$

Il prodotto ReviWool® fabric standard è composto da lana riciclata e poliammide (80% e 20% rispettivamente). Per la poliammide, vergine o riciclata, è stato assunto un valore di $Q_{sin}/Q_p=1$, come suggerito dalla guida PEF per i prodotti sintetici. Questo contributo è stato incorporato nell'Equazione 13 (che può essere ulteriormente generalizzata) per calcolare Q_{sin}/Q_p al ciclo 1, considerando tutti i materiali presenti nel prodotto finito nelle rispettive percentuali:

$$\left(\frac{Q_{sin}}{Q_p}\right)_{1,tot} = \frac{\% \text{ lana}}{100} \cdot \left(\frac{Q_{sin}}{Q_p}\right)_{1,w} + \frac{\% \text{ PA}}{100} \cdot \left(\frac{Q_{sin}}{Q_p}\right)_{1,PA} = \left(\frac{\% \text{ lana}}{100} \cdot \frac{L_w \cdot 1}{L_{max}}\right) + \left(\frac{\% \text{ PA}}{100} \cdot 1\right) \quad (13)$$

In conclusione, si riporta un esempio applicativo con una categoria di fibre a fiocco lunghe, con $L_w=125$ mm e $L_{max}=150$ mm. Per un caso specifico di ReviWool® fabric standard sottoposto a $n=5$ cicli di riciclo, sono stati ottenuti i seguenti valori di Q_{sin}/Q_p al ciclo 1: 0.833 per la lana, 1 per la poliammide e 0.866 per il totale. In Tabella 7 sono quindi riportati i risultati dei fattori di qualità in entrata e in uscita per ciascuno dei cinque cicli di riciclo, i quali si osservano rientranti nei limiti definiti dalla PEFCR A&F.

Tabella 7 Risultati relativi al fattore di qualità al variare del numero di cicli di riciclo per il caso d'esempio.

Nr. ciclo	Q_{sin}/Q_p	Q_{sout}/Q_p
1	0.866	0.533
2	0.533	0.422
3	0.422	0.385
4	0.385	0.373
5	0.373	0.369

4.3. Integrazione tra gli strumenti di misura della circolarità per uno sviluppo futuro

4.3.1. Introduzione al Material Circularity Indicator (MCI)

La valutazione della circolarità di un sistema può essere integrata con l'analisi della sostenibilità ambientale di prodotti, servizi e organizzazioni. Nonostante la metodologia LCA segua regole generali, le scelte metodologiche possono variare, rendendo difficile il confronto diretto tra i risultati degli studi. La metodologia LCA è un efficace strumento consolidato per valutare gli impatti ambientali di un prodotto, ma la sua origine nel modello di economia lineare limita la considerazione dei modelli circolari. Per affrontare questa sfida, l'Unione Europea propone l'uso dello schema PEF, basata sull'LCA ma con regole specifiche per ciascuna categoria di prodotto. Questa è risultata l'iniziativa più ambiziosa per armonizzare i calcoli via LCA e migliorare la compatibilità dei risultati. La formula dell'impronta circolare viene impiegata per attribuire crediti a pratiche come il riciclo, l'utilizzo di materiali riciclati e il recupero energetico, concentrando l'attenzione sul destino dei materiali. Tuttavia, aspetti cruciali della circolarità, come la durata del servizio di un prodotto (ad esempio, l'usura di un indumento), sono considerati al di fuori della formulazione nello studio PEF, ed attributi materiali come la rinnovabilità delle materie prime non sono espressamente inclusi [53]. Nello specifico della guida PEF, la CFF consente di valutare gli scenari di fine vita di un prodotto e viene usata per attribuire correttamente i crediti al riciclo, utilizzo di materiale riciclato e recupero energetico. In breve, essa permette la valutazione dell'impronta circolare sotto l'aspetto materiale, energetico e di smaltimento.

Gli indicatori di circolarità, sebbene non possano essere utilizzati da soli per selezionare la migliore opzione in progetti di economia circolare, offrono una visione parziale delle prestazioni ambientali di un sistema. In particolare, la loro facilità di comunicazione potrebbe contribuire a costruire relazioni positive con i clienti e migliorare la reputazione, facilitando anche l'accesso ai finanziamenti. La mancanza di un quadro standardizzato ha portato allo sviluppo di numerosi indicatori di circolarità, con un gruppo ISO che attualmente lavora a un quadro normativo per includere principi, linee guida e strumenti di misurazione. La valutazione della circolarità può avvenire a diversi livelli, tra cui micro (prodotti, aziende e consumatori), meso (parchi ecoindustriali) e macro (città, regione, nazione e oltre), e gli indicatori possono essere utilizzati sia per valutare singoli prodotti o sistemi che l'efficacia di un'azienda nel passare a modelli circolari.

L'analisi del ciclo di vita via LCA presenta difficoltà nell'individuare il grado di circolarità di un sistema, con problemi legati alla mancanza di modellizzazione dei cicli di riciclo aperti e di linee guida per gli usi di materiali che perdono in qualità. La circolarità non può essere ignorata durante il processo decisionale, poiché influisce su politiche e programmi di sostegno. Subordinare quindi gli indicatori di circolarità all'LCA potrebbe aiutare a gestire i compromessi tra sostenibilità e circolarità e garantire prestazioni ambientali accettabili.

Riconosciuta l'interconnessione con l'LCA, si potrebbe suggerire un impiego di questi indicatori insieme a certi parametri nell'ecoprogettazione. L'indicatore di circolarità si differenzia dalle metodologie di valutazione del ciclo di vita in quanto esso si focalizza sul flusso di materiali durante l'utilizzo del

prodotto. Di fatto, esso incoraggia l'uso di materiale riciclato o riutilizzato associandovi una maggiore utilità di prodotto, intesa a livello di durabilità. Alcuni autori hanno cercato di integrare l'LCA e indicatori di circolarità per ottenere una valutazione più completa. Tuttavia, è necessario sviluppare un metodo condiviso per garantire un'interpretazione chiara e coerente dei risultati degli studi congiunti su LCA e circolarità [54].

L'integrazione è complessa ma essenziale, considerando i *trade-off* tra benefici ambientali e aspetti economici, sociali e di salute. Sviluppare un metodo condiviso per incorporare l'aspetto di sostenibilità nelle iniziative di economia circolare è auspicabile, ma richiede competenze specifiche e risorse significative. A questo proposito, la Ellen MacArthur Foundation, fondata nel 2010, ha svolto un ruolo chiave nell'accelerare la transizione verso un'economia circolare, con criteri che riflettono i principi di eliminazione dei rifiuti e miglioramento ambientale (Figura 41)

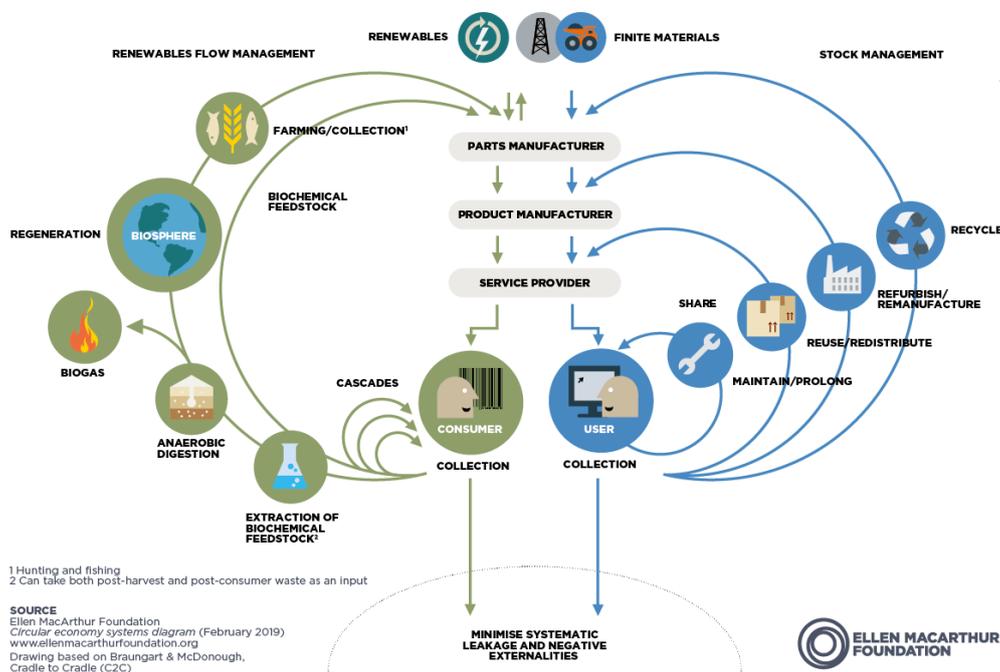


Figura 41 Schema dell'economia circolare: il "diagramma farfalla" [55].

In modo complementare, il tool *Material Circularity Indicator* (MCI) sviluppato dalla collaborazione tra Ellen MacArthur Foundation e Granta Design, diffusamente utilizzato dalle aziende per misurare il grado di circolarità del flusso di materiali per i prodotti selezionati, trova punti in comune con, nel senso più ampio del termine, la metodologia LCA. Lo strumento offre alle aziende la possibilità di identificare e valorizzare aspetti circolari nei loro materiali e prodotti, contribuendo a gestire i rischi legati alla volatilità dei prezzi e alla disponibilità di materiali. L'uso dell'indicatore consente poi di valutare in modo accurato la circolarità dei flussi di materiali per i loro prodotti, sia individualmente che a livello aziendale. Questa metodologia supporta le decisioni aziendali considerando i compromessi tra circolarità e obiettivi economici, ambientali e sociali, influenzando la progettazione del prodotto e l'approvvigionamento dei materiali.

Il Circularity Indicators Project contribuisce sviluppando indicatori, come l'MCI appunto, che valutano la circolarità di un prodotto o di un'azienda, utilizzati quindi per decisioni di progettazione, reporting interno, disposizioni sugli appalti e valutazione delle aziende.

La metodologia proposta valuta la circolarità dei flussi di prodotti e materiali delle aziende, consentendo loro di capire il progresso nel passaggio da modelli lineari a circolari. A livello di prodotto, essa offre una valutazione della circolarità e può essere utilizzata per la progettazione di nuovi prodotti, il reporting interno e il confronto tra prodotti. A livello aziendale, gli indicatori possono essere utilizzati internamente per confrontare la circolarità tra diverse gamme di prodotti e reparti. Mentre esternamente, possono essere utilizzati da *stakeholder* terzi per valutare la circolarità di diverse aziende.

Nello specifico, l'MCI si concentra sul ripristino dei flussi di materiali a livello di prodotto e azienda, basandosi sui principi fondamentali di: approvvigionamento di materiali biologici da fonti sostenibili; utilizzo di materie prime da fonti riutilizzate o riciclate; mantenimento dei prodotti in uso più a lungo attraverso riutilizzo, redistribuzione e aumento della durabilità; riutilizzo di componenti o riciclo dei materiali dopo l'uso del prodotto; utilizzo più intensivo dei prodotti mediante modelli di servizio, condivisione o prestazioni e garanzia che i materiali biologici rimangano incontaminati e biologicamente accessibili.

Il modello di economia circolare distingue tra cicli biologici e cicli tecnici: i primi coinvolgono materiali e prodotti organici che ritornano alla bioeconomia per rigenerare i sistemi naturali, mentre i secondi coinvolgono prodotti, componenti e materiali mantenuti sul mercato attraverso riparazione, riutilizzo, rinnovamento e riciclo. L'introduzione di materiali biologici comporta due principi aggiuntivi: garantire che l'estrazione di materiali rinnovabili non superi la capacità di rinnovamento e assicurare il ritorno dei nutrienti all'ambiente naturale al termine dell'uso, rendendo i materiali biologici considerati circolari.

Va notato che migliorare l'MCI di un singolo prodotto o azienda non necessariamente migliora la circolarità dell'intero sistema, ma l'adozione diffusa di questa metodologia può contribuire al miglioramento complessivo dello stesso.

L'economia circolare coinvolge iniziative che impattano significativamente sull'uso dei materiali. Studi di casi dimostrano che una maggiore durata utile o intensità di utilizzo porti a notevoli risparmi di materiali. La vita più lunga dei prodotti favorisce attività di riparazione, riutilizzo e rivendita, allineandosi all'idea di maggiore circolarità [55].

4.3.2. Valutazione dell'MCI nel modello dell'economia circolare

Il confronto tra le principali cinque economie d'Europa mostra come l'Italia abbia raggiunto nell'ultimo anno la miglior performance di circolarità totalizzando 19 punti sulla base di sette indicatori chiave di interesse per misurare il tasso di circolarità (tasso di riciclo complessivo dei rifiuti, urbani e speciali; tasso di utilizzo di materia proveniente dal riciclo; produttività delle risorse; rapporto fra la produzione dei rifiuti e il consumo di materiali; quota di energia da fonti rinnovabili sul consumo totale lordo di energia; attività di riparazione e consumo di suolo).

Nello specifico, selezionando il primo indicatore che analizza il trend del tasso di riciclo complessivo (Figura 42) in aumento del 4.58% per l'Italia nel periodo 2014-2018, si percepisce come il paese continui a dedicarsi all'incremento della propria performance in termini di circolarità [56].

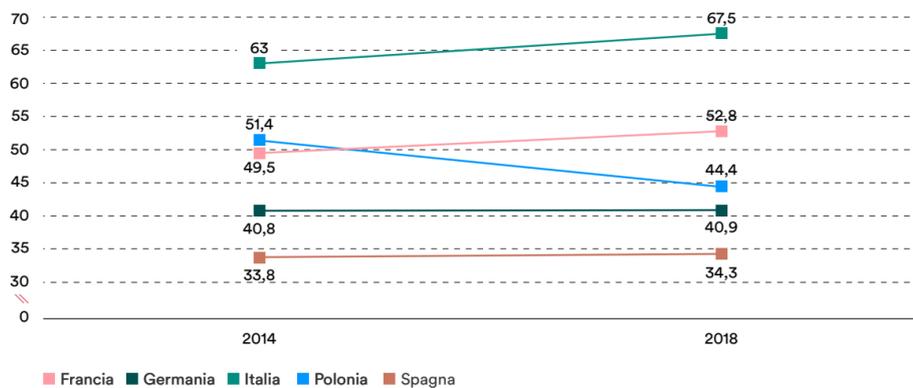


Figura 42 Trend del tasso di riciclo complessivo nelle principali cinque economie dell'UE [56].

Il recente aumento del tasso di riciclo complessivo in Italia, evidenziato nel confronto con le principali economie europee, costituisce un solido punto di partenza per esplorare ulteriormente la circolarità nell'ambito delle pratiche economiche. Questo risultato positivo, come appena illustrato fornisce un contesto rilevante per comprendere come la metodologia dell'MCI possa contribuire a valutare in modo più approfondito il flusso di materiali e la circolarità dei prodotti nell'ambito nazionale.

L'indicatore MCI valuta la proporzione di materiale rigenerato all'interno del flusso di materia di un prodotto (Figura 43), considerando sia il materiale proveniente dal riciclo che quello destinato al riuso. Questo indice si basa sull'indice di flusso lineare del prodotto (LFI), il quale misura la quantità di materiale che segue una traiettoria lineare, ossia proveniente da risorse non rinnovabili e destinato a diventare rifiuto senza possibilità di recupero di materia. Nello sviluppo dell'indicatore, la percentuale del prodotto ripristinato (attraverso riutilizzo e riciclo) e proveniente da fonti riutilizzate o riciclate è descritta come la parte riparativa del flusso (*restorative flow*), mentre la parte lineare del flusso (*linear flow*) indica la percentuale proveniente da materiali vergini che finiscono in discarica o al recupero energetico. Pertanto, l'MCI valuta quanto il flusso lineare di materiali è ridotto e quanto è massimizzato il flusso riparativo in un prodotto rispetto alla media del settore.

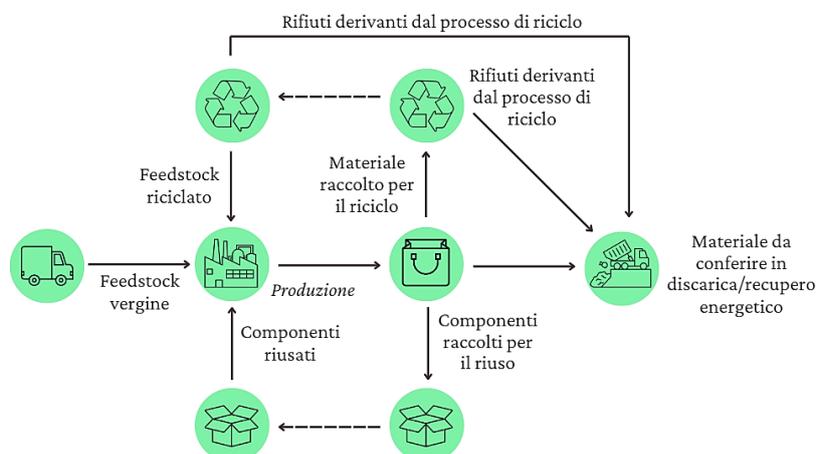


Figura 43 Rappresentazione schematica dei flussi di materiali tecnici [55].

Esso considera la linearità o circolarità dei materiali e la durata (o intensità d'uso) del prodotto rispetto a prodotti simili fornendo anche indicazioni sulla quantità di materiali in circolazione, ma senza tenere conto della loro composizione né fornendo informazioni sugli altri impatti del prodotto. Pertanto, è consigliato l'utilizzo dell'MCI insieme ad indicatori complementari, ma facoltativi, che offriranno una panoramica più ampia alla gestione del business, in relazione ai prodotti. Questi sono divisi in:

- indicatori di rischio che mostrano indicazioni ulteriori sui potenziali rischi del business aziendale evidenziando le possibili pratiche circolari, come ad esempio, la variazione del prezzo dei materiali, la loro scarsità o tossicità;
- indicatori di impatto che forniscono informazioni aggiuntive sull'influenza dei modelli circolari in tema di interessi dell'azienda e degli *stakeholder*, come ad esempio il consumo di energia o le emissioni di CO₂.

La valutazione dell'indicatore richiede l'analisi di diverse variabili legate al ciclo di vita del prodotto. Queste includono il processo di produzione (uso di materiali vergini, riciclati o componenti riutilizzati), la fase di utilizzo del prodotto (durata e intensità di utilizzo), la gestione al fine della vita del prodotto (smaltimento, riciclo, riutilizzo) e l'efficienza del processo di riciclo. Si valutano quindi gli input del prodotto, come la composizione dei materiali utilizzati e la loro sostenibilità. Inoltre, si considerano gli output, concentrandosi sullo scenario di fine vita del prodotto e valutando il riciclo effettivo dei materiali.

L'indicatore materiale di circolarità applicato a livello micro (prodotti, aziende e consumatori) valuta i prodotti considerando tre principali caratteristiche: la massa di materia prima vergine, la massa di rifiuti non recuperabili ed il fattore di utilità (X) che riflette due componenti, ovvero la durata (L) e l'intensità d'uso (U).

I prodotti possono essere classificati come lineari (con solo materie prime vergini e smaltimento) o circolari (senza materie prime vergini o completamente riciclati). Questa misura ponderata tiene quindi in considerazione la presenza di materiali riciclati, la riciclabilità dei materiali e la durata prevista del prodotto. L'MCI si basa sui quattro indicatori riportati in Tabella 8 che esaminano in modo specifico e diretto la circolarità del prodotto [55], [57].

Tabella 8 Indicatori che misurano la circolarità di un prodotto [58].

Indicatori	Descrizione
Materia prima vergine	Calcolata a partire dalla percentuale di materia da riciclo, riuso e materia prima da cicli biologici (da fonti sostenibili)
Scarti non recuperabili	Calcolati a partire dalla percentuale di scarti riutilizzati, riciclati, biologici che vengono compostati e/o inceneriti con recupero energetico. Gli scarti non recuperabili sono quelli avviati a smaltimento in discarica o a incenerimento
Indice di flusso lineare	Percentuale di materiale che ha un andamento lineare nel processo (materiale vergine in entrata, scarti non riciclabili in uscita)
Indice di utilizzo	Vita utile del prodotto sia da un punto di vista temporale che di intensità di utilizzo

Il tool fornisce un numero compreso tra 0 e 1, per cui a valutazioni più alte corrisponderà un maggiore grado di circolarità. Come la guida PEF, esso si concentra sulla valutazione del prodotto finito e consente alle aziende di realizzare una scheda dettagliata dei prodotti analizzati. Questo era uno degli obiettivi inizialmente prefissati al fine di poter descrivere il prodotto finale attraverso un valore che ne permetta la comparabilità ed una facile comprensione. Altro obiettivo in comune sta nella realizzazione di un supporto per le aziende nella fase di *decision making* riguardante il design dei futuri prodotti e l'approvvigionamento delle materie prime, punto centrato dall'indicatore. Di fatto, se l'utilizzo dell'MCI consente il confronto della circolarità tra prodotti diversi e la valutazione dei progressi raggiunti nel tempo della circolarità di un particolare prodotto, d'altra parte la CFF può essere utilizzata per confrontare l'impatto ambientale di prodotti diversi o per misurare i progressi della circolarità di un prodotto nel tempo.

Nonostante la facilità di accesso e di utilizzo dell'indicatore in analisi, unita ad un'applicazione rapida e pratica qualora si ottengano tutti i dati di input, è possibile incorrere nella mancanza dei dati riguardanti la destinazione del prodotto dopo l'utilizzo e l'efficienza del processo di riciclo, che limita in parte l'analisi dettagliata delle fasi di riciclo e riutilizzo del prodotto [59].

L'MCI è al momento l'unica opzione disponibile che tenta di introdurre il parametro di durabilità del prodotto tramite il calcolo dell'indice dei flussi di utilità in relazione al processo di riciclo del prodotto, seppur vi sono limiti ancora da superare connessi alla misurazione dei tassi di riciclo e riutilizzo dei singoli componenti materiali [60].

L'indicatore, calcolato idealmente con dati dettagliati, può utilizzare dati settoriali o approssimazioni. Inoltre, esso incoraggia la progettazione e l'uso dei materiali in modo che possano essere riutilizzati o riciclati in modo efficiente, contribuendo così a ridurre l'impatto ambientale e promuovendo pratiche sostenibili. Esso guida la progettazione del prodotto impostando obiettivi circolari, ma i dati di progettazione non dovrebbero sostituire i dati reali nell'MCI di un prodotto reale. Ad esempio, un prodotto progettato per il 100% di riciclabilità dovrebbe basare il calcolo sull'effettivo tasso di riciclo, e la durata effettiva, non quella di progettazione, dovrebbe essere utilizzata nei calcoli.

Nel contesto dello sviluppo di un modello di economia circolare, è auspicabile che l'MCI si avvicini al valore 1, indicando un elevato utilizzo di materiali rigenerati, con il valore di LFI tendente a 0 che suggerisce una riduzione dell'utilizzo di materie prime non rinnovabili. Inoltre, il parametro di efficienza del processo industriale di riciclo (E) è rilevante, indicando quanto della materia preparata per il riciclo effettivamente sostituisca una quantità equivalente di materia prima, evidenziando le differenze tra le varie modalità di riciclo che non dovrebbero essere sottovalutate [55].

Per calcolare l'indicatore materiale di circolarità è essenziale avere una conoscenza approfondita dei vari componenti e materiali che costituiscono il prodotto in esame. L'approccio definito al prodotto completo considera il prodotto nel suo insieme senza tenere conto delle distinzioni tra i diversi componenti e materiali. Tuttavia, nella realtà pratica, la maggior parte dei prodotti è assemblata utilizzando una

gamma diversificata di componenti. Pertanto, mediante l'utilizzo di una distinta base, è possibile costruire l'indicatore sommando ciascun sottoinsieme, parte o materiale (individuato dal pedice χ) seguendo un approccio di tipo comprensivo.

Di conseguenza, a partire dai valori di input riportati in Tabella 9, si applicano in successione le formulazioni riportate nella successiva Tabella 10 al fine di calcolare il valore finale dell'indicatore.

Tabella 9 Definizione delle principali variabili [55].

Simbolo	Definizione
M	Massa di un prodotto finito
F_R	Frazione della massa di materia prima del prodotto derivata da fonti riciclate
F_U	Frazione della massa di materia prima del prodotto proveniente da fonti riutilizzate
F_S	Frazione della massa dei materiali biologici del prodotto utilizzati che provengono da produzione sostenibile
C_C	Frazione della massa del prodotto destinata al compostaggio
C_E	Frazione della massa del prodotto destinata al recupero energetico
C_R	Frazione della massa del prodotto raccolta per essere immessa in un processo di riciclo
C_U	Frazione della massa del prodotto destinata al riutilizzo dei componenti
E_C	Efficienza del processo di riciclo utilizzato per la porzione di prodotto destinata al riciclo
E_F	Efficienza del processo di riciclo utilizzato per produrre materia prima riciclata per un prodotto
L	Durata media effettiva in anni di un prodotto
L_{av}	Durata media in anni di un prodotto medio nel settore dello stesso tipo
U	Numero di unità funzionali raggiunto durante la fase d'uso di un prodotto
U_{av}	Numero di unità funzionali raggiunte durante l'uso di un prodotto medio nel settore dello stesso tipo

Tabella 10 Schema riassuntivo delle formule da applicare per il calcolo finale dell'MCI [55].

Definizione	Approccio al prodotto completo	Approccio comprensivo
Massa della materia prima vergine	$V = M(1 - F_R - F_U - F_S)$	$V_{(\chi)} = M_{(\chi)}(1 - F_{R(\chi)} - F_{U(\chi)} - F_{S(\chi)})$ $V = \sum_{\chi} V_{(\chi)}$
Massa di rifiuti non recuperabili destinati alla discarica o al recupero energetico	$W_0 = M(1 - C_R - C_U - C_C - C_E)$	$W_{0(\chi)} = M_{(\chi)}(1 - C_{R(\chi)} - C_{U(\chi)} - C_{C(\chi)} - C_{E(\chi)})$
Massa di rifiuti non recuperabili generati nel processo di riciclo di un prodotto	$W_C = M(1 - E_C) \cdot C_R$	$W_{C(\chi)} = M_{(\chi)}(1 - E_{C(\chi)}) \cdot C_{R(\chi)}$
Massa di rifiuti non recuperabili generati durante la produzione di materia prima riciclata per un prodotto	$W_F = M \frac{(1 - E_F) \cdot F_R}{E_F}$	$W_{F(\chi)} = M_{(\chi)} \frac{(1 - E_{F(\chi)}) \cdot F_{R(\chi)}}{E_{F(\chi)}}$

Massa di rifiuti non recuperabili connessa a tutti i cicli di vita di un prodotto	$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2}$	$W = \sum_x \left(W_{0(x)} + \frac{W_{F(x)} + W_{C(x)}}{2} \right)$
Indice di flusso lineare	$LFI = \frac{V + M}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}}$	$LFI = \frac{V + M}{2M + \sum_x \frac{W_{F(x)} - W_{C(x)}}{2}}$
Utilità di un prodotto	$X = \left(\frac{L}{L_{au}} \right) \cdot \left(\frac{U}{U_{au}} \right)$	
Fattore di utilità	$F(X) = \frac{0.9}{X}$	

L'Equazione 14 per il calcolo dell'MCI di un prodotto (MCI_P) mostra la dipendenza dall'indice di flusso lineare e dal fattore di utilità, che influenza solo la parte lineare del flusso:

$$MCI_P^* = 1 - LFI \cdot F(X) \quad (14)$$

Tuttavia, questo valore può risultare negativo per prodotti con flussi prevalentemente lineari ($LFI \approx 1$) e con un'utilità peggiore di un prodotto medio ($X < 1$). Di conseguenza, l'indicatore materiale di circolarità è stato definito dall'Equazione 15:

$$MCI_P = \max(0, MCI_P^*) \quad (15)$$

In aggiunta, tramite l'Equazione 16 è possibile determinare l'MCI di un'azienda (MCI_C) a partire dall' MCI_P dopo aver definito il fattore di normalizzazione, determinato dal fattore $N_{R(i)}$ dei prodotti di riferimento per la gamma di prodotti $P(i)$, ed assunto per semplicità come la somma delle masse dei prodotti i -esimi [55], [61]:

$$MCI_C = \frac{1}{\sum N_{R(i)}} \sum (N_{R(i)} \cdot MCI_{P(i)}) \quad (16)$$

4.3.3. Applicazione della misura della circolarità al caso studio Manteco®

Finora, non sono stati identificati studi in letteratura relativi all'impiego dell'indicatore materiale di circolarità nel settore tessile. La presente applicazione, verificata in condizioni specifiche, si propone di dimostrare come l'analisi di un punteggio di circolarità possa affrontare la questione del riciclo in modo più completo ed integrativo con quanto introdotto con la formulazione dell'impronta circolare.

L'analisi è stata condotta su cinque prodotti Manteco®, composti da filati e tessuti, con le informazioni di prodotto recuperate dagli EPD corrispondenti [41], [42], [62], [63], [64]. Quattro di questi (Pure MWool® fabric, ReviWool® fabric, MWool® fabric e Woolten® fabric), escludendo l'articolo MWool® yarn, sono stati confrontati modificando il contenuto di materiale riciclato. Nello specifico, sono stati ipotizzati due scenari (Scenario 1 e Scenario 2) che rappresentano rispettivamente la minore e la maggiore quantità possibile di frazione di materia prima derivata da fonti riciclate presente nel prodotto finito in analisi.

I dati relativi alle composizioni dei vari prodotti a livello di materiali utilizzati, recuperati dalle EPD, sono riportati in Tabella 11.

Tabella 11 Specifiche tecniche dei prodotti Manteco® in analisi.

Prodotto	Massa prodotto finito (kg)	Scenario 1	Scenario 2
MWool® yarn	0.930	100% Lana riciclata	
Pure MWool® fabric	0.655	85% MWool® 15% Lana vergine	100% MWool® (fibre di lana riciclata)
MWool® fabric	0.641	55% MWool® 15% Lana vergine 18% Poliammide vergine 12% Poliammide riciclata	70% MWool® 30% Poliammide riciclata
ReviWool® fabric	0.435	80% ReviWool® 20% Poliammide vergine	80% ReviWool® 20% Poliammide riciclata
Woolten® fabric	0.448	30% MWool® 10% Lana vergine 30% Lyocell 18% Poliammide vergine 12% Poliammide riciclata	40% MWool® 30% Lyocell 30% Poliammide riciclata

Escludendo il prodotto MWool® yarn e Pure MWool® fabric (Scenario 2), realizzati esclusivamente con lana riciclata e sviluppati con un approccio al prodotto completo, per gli altri articoli si è scelto di adottare un approccio comprensivo a causa della combinazione di materiali diversi (Tabella 11).

Tra le assunzioni fatte, il lavoro è stato impostato adottando un sistema closed-loop con $E_C=E_F=E=0.9$, assumendo quindi l'efficienza del processo di riciclo utilizzato per la porzione di prodotto destinata al riciclo pari all'efficienza del processo di riciclo utilizzato per produrre materia prima riciclata per un prodotto. Il valore di 0.9 è stato selezionato in modo del tutto conservativo come parametro di progettazione ottimale, poiché non è stata rinvenuta in letteratura una specifica cifra di riferimento. Infatti, nel caso in cui si rendesse necessaria una precisione di calcolo superiore, sarebbe opportuno determinare l'efficienza E attraverso l'Equazione 17 mostrante il rapporto tra la massa dei componenti riciclati utili e la massa della materia entrante nel processo di riciclo:

$$E = \frac{\sum m_{i,out}}{\sum m_{i,in}} \cdot 100\% \quad (17)$$

Nell'impostazione dei dati di input riportati in Tabella 9, si osserva che, qualora non sia possibile garantire una stima affidabile della durata della vita (L_{av}) e del numero di unità funzionali (U_{av}), questi parametri si riconoscono come uguali mantenendo un rapporto costante ad 1, come fatto in questo studio. Altri parametri, F_U , F_S , C_C , C_E e C_U , sono stati impostati pari a zero per ragioni di semplicità e a causa della mancanza di ulteriori informazioni. Inoltre, per tutti i materiali, è stato assunto il valore di $C_R=0.71$ in linea con quanto comunicato dall'azienda riguardo al progetto Zero-Waste di Manteco®, il quale reintegra il 71.5% degli scarti industriali nel ciclo di produzione.

Seguendo il procedimento riportato al Sottoparagrafo 4.3.2., sono stati riportati in Figura 44 i risultati dei calcoli. Il grafico riporta l'indicatore materiale di circolarità del prodotto (o dell'azienda) rispetto la massa del prodotto (o dei prodotti totali).

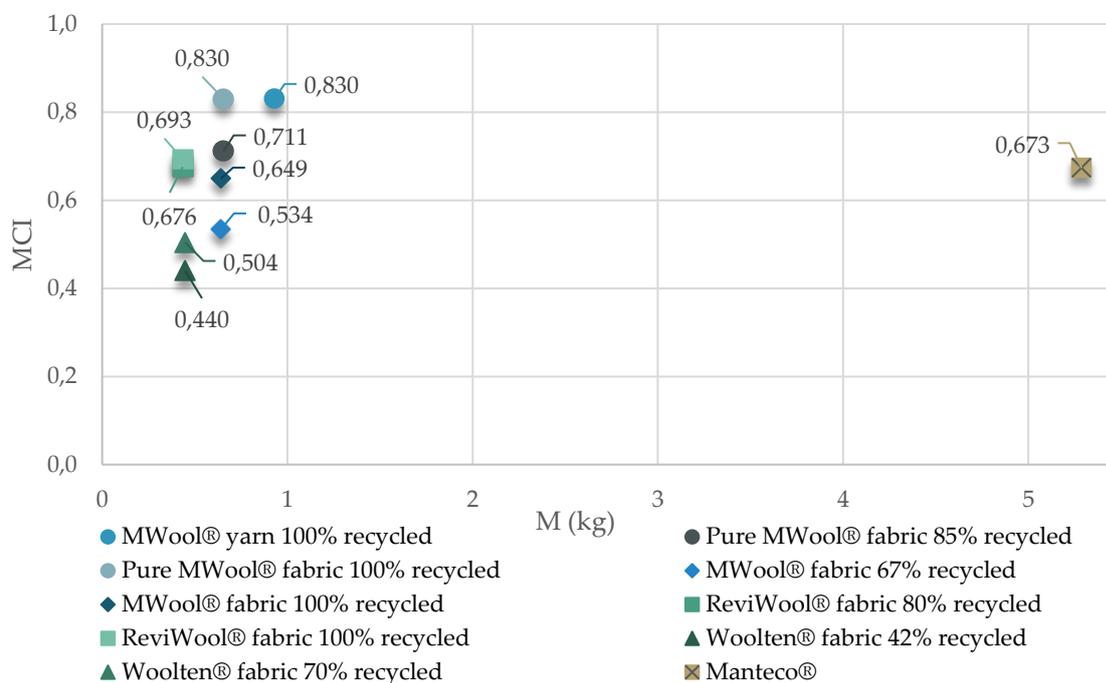


Figura 44 Confronto tra l'indicatore materiale di circolarità dell'azienda e dei prodotti.

Lo Scenario 1 assume che il materiale riciclato contenuto nel prodotto sia inferiore rispetto allo Scenario 2 e che abbia un impatto ambientale maggiore. Confrontando i prodotti, si può osservare in primo luogo che i prodotti con una percentuale maggiore di materiale riciclato avranno un valore di MCI più alto nello Scenario 2 che nello Scenario 1, poichè si assume che il materiale riciclato abbia un impatto ambientale minore del materiale vergine contrapposto.

Il valore più elevato di MCI è associato ai prodotti MWool® yarn 100% recycled e a Pure MWool® fabric 100% recycled, registrando un valore di 0.830, indicati quindi come i più circolari e sostenibili tra tutti gli articoli messi a confronto. Al contrario, il prodotto Woolten® fabric 42% recycled presenta il valore più basso (0.448), volto ad indicare un prodotto che soddisfa più un modello di tipo lineare che circolare. Anche incrementando la percentuale di materiale riciclato al 70%, il valore MCI_P rimane relativamente basso a 0.504 per questo articolo. Escludendo quest'ultimo articolo, complessivamente l' MCI_P minimo risultante è 0.534, associato a MWool® fabric nello Scenario 1. Questo valore superiore a 0.5 suggerisce che il materiale è prevalentemente circolare e sostenibile.

Complessivamente, come riassunto in Tabella 12, questi risultati indicano che più della metà del merito dell'alto MCI_c è attribuibile all'implementazione efficace e continua dell'economia circolare da parte dell'azienda, rendendola competitiva nel mercato della sostenibilità tessile. Infatti, con un MCI_c pari a 0.673, superiore a 0.5, ottenuto considerando un fattore di normalizzazione totale pari a 5.29 kg, si evidenzia come l'azienda adotta complessivamente un modello di business prevalentemente circolare, ma con potenzialità di miglioramento futuro.

Tabella 12 Risultati dell'MCI per i prodotti di riferimento.

Prodotto	Massa prodotto finito (kg)	MCI _P	
		Scenario 1	Scenario 2
MWool® yarn	0.930	0.830	
Pure MWool® fabric	0.655	0.711	0.830
MWool® fabric	0.641	0.534	0.649
ReviWool® fabric	0.435	0.676	0.693
Woolten® fabric	0.448	0.440	0.504
Azienda	Massa totale (kg)	MCI _C	
Manteco®	5.29	0.673	

Avendo principalmente considerato come variabile la sola frazione della massa di materia prima del prodotto derivata da fonti riciclate (F_R), gli altri parametri sono stati in parte trascurati mantenendoli costanti. Tuttavia, è possibile formulare alcune considerazioni in merito.

Al fine di identificare le variabili che hanno un maggiore impatto sull'MCI_P, si è passati al calcolo dell'indicatore considerando un prodotto ipotetico composto da un singolo componente. Come già assunto nel caso applicativo, si è deciso di escludere la frazione di prodotto proveniente da fonti riutilizzate ($F_U=0$) e la frazione della massa del prodotto destinata al riutilizzo dei componenti ($C_U=0$), mantenendo i tassi di efficienza di riciclo $E_C=E_F=E$ in condizione di circuito chiuso. Pertanto, modificando i parametri di input come la frazione di prodotto derivata da fonti riciclate (F_R), la frazione di prodotto destinata al riciclo alla fine della fase di utilizzo (C_R), l'efficienza del processo di riciclo (E) e l'utilità del prodotto (X), sono state esaminate differenti combinazioni, mostrando come l'MCI_P dipenda strettamente da queste variabili mediante una correlazione positiva.

Partendo da Figura 45a in cui si è assunta una condizione di prodotto a flusso completamente riparativo ($F_R=1, C_R=1, E=1$), indipendentemente dall'utilità del prodotto, i risultati indicano che l'MCI_P riceverebbe il valore massimo, pari a 1. Paragonando con una condizione meno totalmente riparativa a $F_R=C_R=0.8$ (Figura 45b), più conservativa, si osserva come gli andamenti sono comunque inizialmente crescenti con l'utilità del prodotto (X) per poi tendere a plateau qualora si incrementi ulteriormente questo fattore. Pertanto, modificando F_R e C_R , le differenze tra i valori risultanti dell'indicatore diventano più contenute all'aumentare del fattore di utilità.

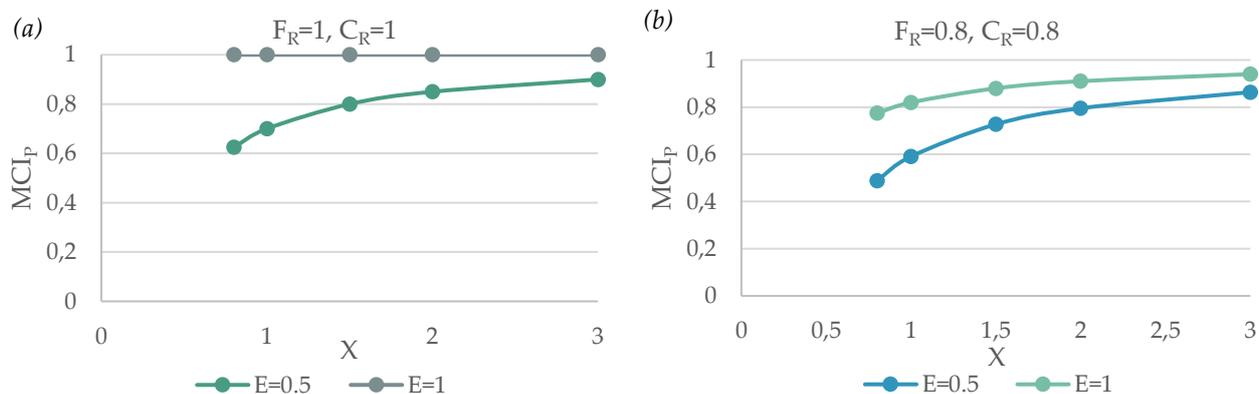


Figura 45 Andamenti dell'MCI_P al variare di F_R e C_R rispetto a X , con $E=0.5$ e $E=1$.

Inoltre, il fattore di utilità, sebbene sia stata considerato pari a 1 nell'applicazione precedente per insufficienza di dati reali, gioca un ruolo significativo nel determinare il valore finale dell'indicatore. Infatti, un aumento del valore di X , associato quindi a un prodotto con una durata superiore rispetto alla media del settore, a parità degli altri parametri, comporta un aumento globale dell' MCI_P rispetto a F_R con una diminuzione della pendenza dell'andamento (Figura 46a e Figura 46b). Inoltre, qualora si sostituisse C_R a F_R sull'asse x mantenendo $F_R=0.8$, l'andamento risultante sarebbe simile, tenendo invariati i punti finali del tratto rettilineo (a $C_R=1$).

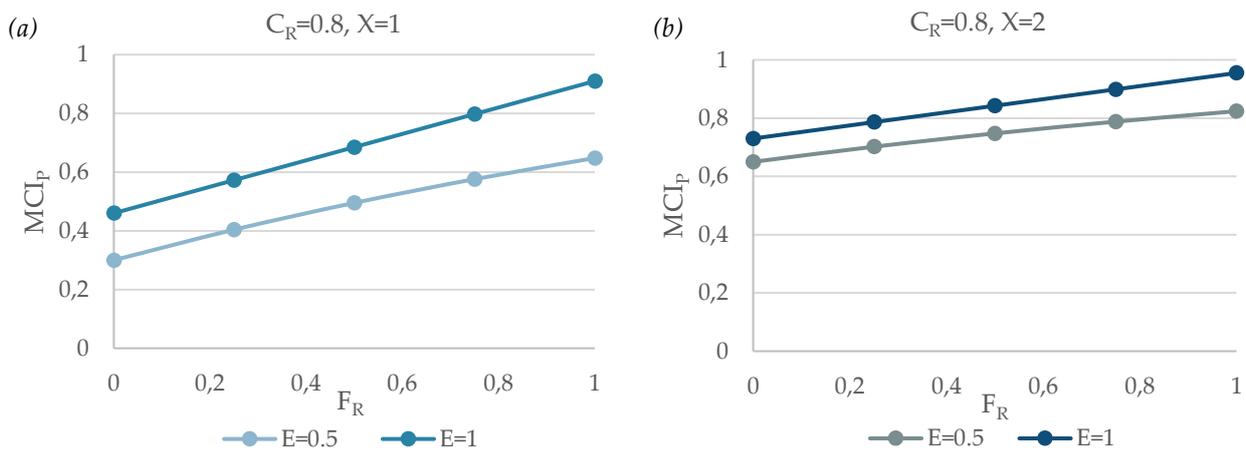


Figura 46 Andamenti dell' MCI_P al variare di X rispetto a F_R , con $E=0.5$ e $E=1$.

Per quanto riguarda la frazione di prodotto derivata da fonti riciclate (F_R) e la frazione di prodotto raccolta per il riciclo al termine dell'utilizzo (C_R), entrambi hanno un impatto simile sull' MCI_P com'è possibile osservare in Figura 47a. Tuttavia, è importante notare come un aumento dell'efficienza del processo di riciclo contribuisce a un miglior risultato per l' MCI_P , soprattutto quando si verificano i casi per cui $F_R=1$ e/o $C_R=1$ (Figura 47b).

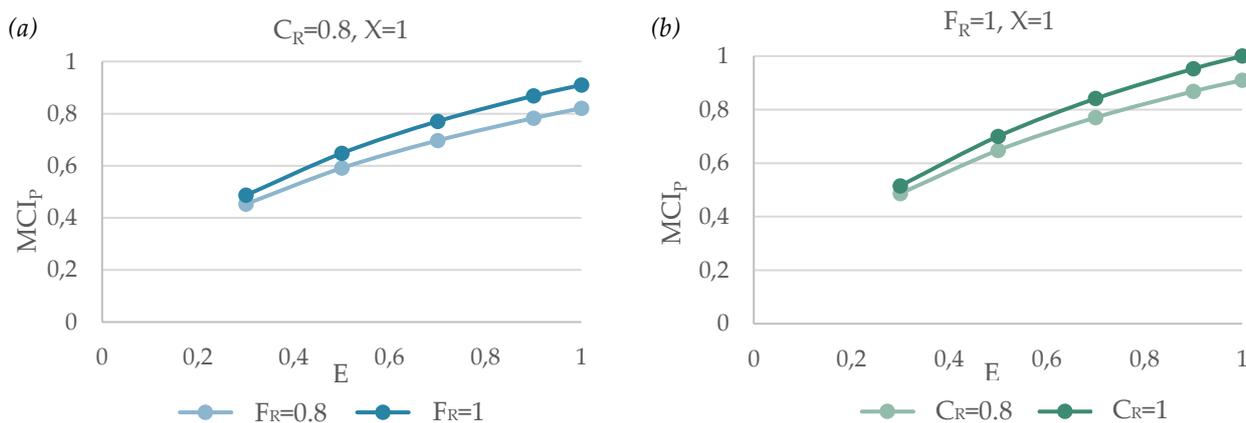


Figura 47 Andamenti dell' MCI_P al variare di F_R e C_R rispetto a E .

4.3.4. Collaborazione tra un tool e una formula

La necessità di una gestione razionale delle risorse naturali, dovuta alla loro esaurimento, dovrebbe ispirare la ricerca di soluzioni che consentano una transizione da un'economia con flusso lineare di materiali a un'economia circolare. In questo contesto, l'uso dell'indicatore materiale di circolarità (MCI),

applicabile sia a livello di prodotto che aziendale, fornisce importanti informazioni sulla circolarità del prodotto, sia durante la progettazione che durante il miglioramento dello stesso. Essenziale per la circolarità del prodotto è la sua realizzazione con una crescente quantità di materiali riciclati, senza comprometterne la qualità. Inoltre, è importante garantire il massimo riutilizzo o riciclo dei suoi componenti alla fine del suo ciclo di vita. In particolare, l'utilità del prodotto, influenzata sia dalla sua durata che dall'intensità d'uso, può aumentare attraverso la promozione di un'idea di condivisione. La circolarità di un prodotto spesso richiede la considerazione di complesse catene di approvvigionamento, poiché i componenti o i materiali recuperati possono essere utilizzati in altri processi produttivi. Lo sviluppo di soluzioni adeguate in questo ambito potrebbe quindi richiedere forme adeguate di cooperazione e l'utilizzo di strumenti complessi per supportare una corretta implementazione ed innovazione degli strumenti disponibili.

L'MCI potrebbe essere perfezionato includendo linee guida per dimostrare l'estrazione sostenibile di materiali biologici, considerando il *downcycling* e introducendo livelli di recupero più dettagliati. Estendere la metodologia a modelli di business diversi e condurre un'analisi a livello aziendale sono idee opportune per una valutazione completa. Infatti, affrontando la complessità dei cicli di vita multipli, la metodologia estende i confini tradizionali dell'analisi del ciclo di vita e calcola gli impatti previsti per ogni ciclo di vita successivo. Nel contesto dei diversi cicli di vita di un prodotto, l'MCI si distingue tra l'intento progettuale di un sistema circolare e le prestazioni effettive, considerando gli utenti e le parti interessate nel mondo reale. In sintesi, esso fornisce una guida per valutare l'impatto economico e ambientale complessivo del passaggio a modelli di business più circolari.

Come mostrato, la CFF prima e l'MCI poi, sono strumenti importanti per misurare la circolarità dei prodotti. Oltre a questo, essi considerano la presenza di materiali riciclati, la riciclabilità dei materiali e la durata dei prodotti (Figura 48), quest'ultimo parametro nello specifico viene poco valorizzato, ad esempio, nella guida PEF. In aggiunta, l'MCI non tiene conto di quali siano i materiali e non fornisce indicazioni su altri impatti, aspetto compensato e racchiuso via applicazione della CFF.

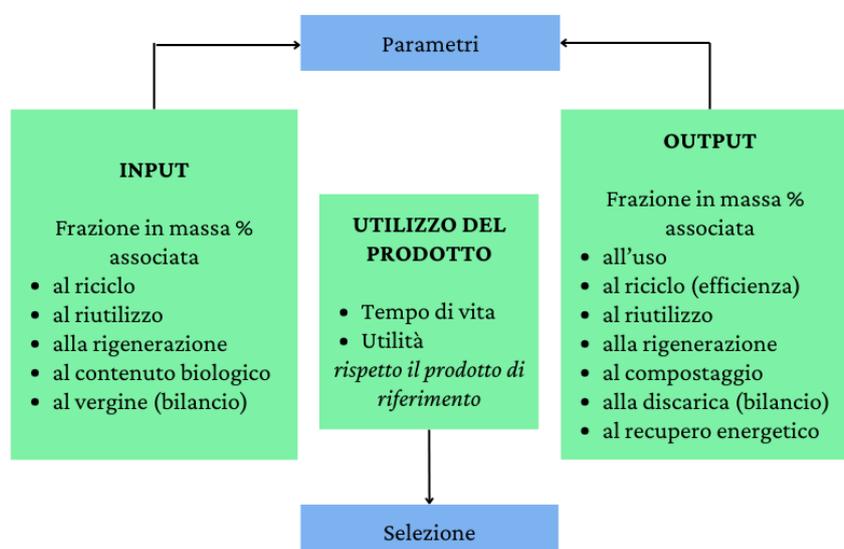


Figura 48 Dati richiesti per il calcolo dell'MCI.

La metodologia incoraggia quindi l'uso di dati rappresentativi del mercato e sottolinea l'importanza di monitorare le prestazioni effettive del sistema, apportando correzioni se necessario. In aggiunta, essa è flessibile e può essere adattata per includere diversi modelli di business e confronti aziendali.

L'integrazione dell'MCI con la parte materiale della CFF contribuirebbe a valutare in modo più completo la sostenibilità di un prodotto in quanto l'MCI si focalizza sull'efficienza circolare dei materiali utilizzati nel prodotto, mentre la CFF valuta l'impatto ambientale complessivo del ciclo di vita dello stesso. Infatti, entrambi seguono un approccio olistico che considera l'intero ciclo di vita del prodotto, dalla fase di produzione alla fine della vita, e si impegnano nella promozione della sostenibilità ambientale fornendo informazioni sulla circolarità dei materiali e sull'impatto ambientale complessivo di un prodotto.

Ad esempio, un prodotto con una buona efficienza circolare (valutata attraverso l'MCI) ma un'impronta ambientale complessiva elevata (valutata attraverso la CFF) potrebbe essere soggetto ad ulteriori miglioramenti, nonché sostenibili, per ridurre l'impatto ambientale complessivo.

Integrarli può fornire un quadro più dettagliato, anche se richiede un'elaborazione e un'analisi dei dati più complesse per garantire un'indicazione accurata dell'efficienza circolare del prodotto. Inoltre, ci può essere bisogno di definire un sistema di indicatori specifici per la tipologia di prodotto considerato.

Così facendo, l'MCI può essere utilizzato per aumentare il grado di precisione della CFF fornendo informazioni più dettagliate sulla trasparenza dell'impatto ambientale dei materiali utilizzati per la realizzazione del prodotto, sulla presenza di materiali riciclati e la loro riciclabilità. Ad esempio, il limite dell'MCI di non tenere conto di tutti i fattori che possono influenzare l'impatto ambientale dei materiali, come la provenienza dei materiali e i processi di riciclo, verrebbe assistito dall'applicazione della CFF.

Nonostante l'evidente complessità e la definizione accurata delle formule, l'integrazione dell'MCI con la CFF rappresenta una possibilità interessante per migliorare la precisione nella valutazione dell'impatto ambientale dei prodotti, guidando così i progressi verso una maggiore circolarità nell'industria.

CONCLUSIONI

Il presente elaborato aveva l'obiettivo di focalizzarsi su una prospettiva pratica e concreta per misurare la sostenibilità nel settore tessile, attraverso l'analisi e l'ottimizzazione di strumenti come la guida PEF e la *Circular Footprint Formula* (CFF), contribuendo così alla transizione verso un'economia circolare. Questo è stato fatto evidenziando l'inadeguatezza del modello di economia lineare nel contesto della transizione ecologica. Nello specifico, le strategie di riduzione, riutilizzo e riciclo sono risultate fondamentali per supportare questa transizione, con l'Unione Europea e la Commissione Europea che promuovono piani d'azione e obiettivi specifici attraverso documenti come il *Green Deal* e l'Agenda 2030.

Punto chiave della ricerca è stata l'analisi della CFF presentata come strumento di valutazione degli scenari di fine vita di un prodotto all'interno dello schema PEF, concentrandosi sulle lacune delle regole di categoria dell'abbigliamento e delle calzature. Lo scopo era apportare modifiche specifiche per adattare la formulazione al numero di cicli di riciclo dei materiali all'interno della richiesta di un'applicazione nel settore tessile.

Il caso studio su Manteco® ha evidenziato chiaramente come i metodi di valutazione del ciclo di vita oltre ad offrire un'analisi dettagliata delle fasi chiave, dalla produzione all'uso e alla fine del ciclo di vita, siano strumenti essenziali per comprendere e valutare l'impatto ambientale dei materiali tessili, in particolare dei prodotti in lana riciclata. I dati discussi, ottenuti confrontando diverse formule di allocazione e parametri, evidenziano l'importanza di considerare attentamente differenti variabili per conseguire valutazioni accurate della sostenibilità. Nel dettaglio, i risultati applicativi offrono una chiara visione dell'impegno aziendale verso la sostenibilità. Ciò è evidente dal recente *Climate Action Award* ottenuto per la significativa riduzione dei consumi nel settore tessile con i marchi ReviWool® e MWool® elogiati per la notevole diminuzione delle emissioni di gas climalteranti rispetto ai capi in lana vergine. Questo sottolinea la necessità di riconoscere e premiare le pratiche sostenibili nell'industria, incoraggiando anche altre aziende a seguirne l'esempio.

Le applicazioni pratiche di questi risultati, in particolare attraverso l'uso della guida PEF e della CFF emergono come strumenti chiave nella valutazione dell'impatto ambientale dei prodotti tessili, fornendo linee guida standardizzate e trasparenza nel processo decisionale. Queste applicazioni hanno il potenziale di guidare la selezione di materiali sostenibili nell'industria tessile, spingendo i produttori a decisioni informate che riducano la loro impronta ecologica, riflettendo un cambiamento verso una produzione più consapevole e mirata alla sostenibilità.

Il confronto degli impatti ottenuti attraverso diversi metodi di allocazione ha evidenziato la mancanza di una scelta universale, poiché essa dipende da circostanze specifiche che possono essere più accuratamente descritte mediante una combinazione di valutazioni. In particolare, è emerso che la CFF confrontata con lo schema *Made Green in Italy* o il metodo di *cut-off*, adotta un approccio più complesso che compromette la comparabilità, ma risulta più completo in quanto tiene conto di variabili cruciali come le dinamiche di mercato e la qualità del prodotto in analisi, sebbene anch'esso presenti alcune

limitazioni. Inoltre, l'importanza delle misure di circolarità, come il riciclo e il riutilizzo dei tessuti, è stata sottolineata come un efficace strumento per ridurre l'impatto ambientale e promuovere un'economia circolare. Questi concetti possono essere applicati concretamente attraverso iniziative di economia circolare, contribuendo a ridurre la dipendenza da materiali vergini e ad affrontare la questione dello spreco di risorse. Il settore tessile, rappresentante una significativa quota del consumo globale e dell'impatto ambientale, affronta la sfida di una transizione verso pratiche più sostenibili. Il riciclo dei materiali, come evidenziato dalla CFF, emerge come un elemento cruciale per ridurre l'estrazione di risorse primarie e mitigare i rifiuti. Tuttavia, sfide come la definizione di confini chiari nel ciclo di vita e la gestione della qualità dei materiali riciclati richiedono attenzione.

Le informazioni derivanti dallo studio possono essere applicate anche al processo di sviluppo del prodotto, facilitando la progettazione di abbigliamento e prodotti tessili più sostenibili ed ecologici con un impatto ambientale ridotto durante il loro ciclo di vita. Inoltre, i risultati recuperati possono influenzare lo sviluppo di standard e regolamenti nel settore tessile, contribuendo alla definizione di linee guida per valutazioni di impatto ambientale e misure di circolarità. Per raggiungere questo obiettivo, sono necessari ulteriori contributi applicativi che si concentrino principalmente su un prodotto finito, utilizzando una formulazione completa e richiedendo informazioni più dettagliate lungo l'intera catena produttiva. Nello specifico, questo approccio è stato implementato solo in modo parziale per quanto riguarda il tessuto ReviWool®. L'attenzione è stata focalizzata esclusivamente sulla parte materiale e di smaltimento della formulazione, senza poi introdurre le fasi finali di normalizzazione e ponderazione del risultato. Di conseguenza, non è stato ottenuto un valore effettivo di *PEF score* e l'analisi è stata vincolata a un ciclo chiuso a causa della mancanza di dati supplementari. È stato effettuato un confronto con le fibre MWool®, inizialmente considerate come un prodotto finito, ma che in realtà avrebbero dovuto essere interpretate come un prodotto intermedio fin dall'inizio.

L'elaborato, per rispondere alla richiesta iniziale, ha evidenziato anche le sfide legate alla qualità della fibra di lana riciclata, sottolineando la necessità di considerare la lunghezza delle fibre e l'effetto dei cicli di riciclo. L'analisi dell'impatto ambientale dei prodotti Manteco®, come ReviWool® e MWool®, mostra che l'utilizzo di una percentuale più elevata di lana riciclata contribuisce a impatti inferiori. In particolare, la descrizione dettagliata del riciclo nell'industria tessile ha messo in luce la sua rilevanza nella riduzione dell'impatto. In aggiunta, il caso studio su Manteco® ha altresì evidenziato le sfide connesse alla perdita di qualità del prodotto durante i cicli di lavorazione, sottolineando la necessità di un approccio equilibrato tra sostenibilità e prestazioni.

La ricerca ha sottolineato l'importanza cruciale di considerare attentamente la qualità delle fibre di lana riciclata coinvolte in iniziative a rifiuti zero. La lunghezza delle fibre e l'effetto dei cicli di riciclo emergono come elementi critici per garantire che il riciclo non comprometta la qualità e le prestazioni dei tessuti. La metodologia di valutazione dell'impatto ambientale ha infatti indicato che un aumento nella percentuale di lana riciclata contribuisce a impatti inferiori, ma l'attenzione deve essere posta sulla definizione della qualità del prodotto e sulla bontà del processo di riciclo. L'analisi della efficacia del

riciclo meccanico delle fibre di lana ha orientato la ricerca verso questo aspetto specifico, il quale mantiene le prestazioni ma introduce modifiche nella qualità del prodotto laniero.

Di conseguenza, la presente ricerca, per rispondere all'obiettivo iniziale, ha proposto un'idea originale per la valutazione del fattore di qualità utilizzato nella CFF al fine di dare un contributo ulteriore allo sviluppo della PEFCE A&F in attuale revisione. Il metodo nel suo complesso è stato validato come accurato, ma resta limitato a due prodotti analizzati all'interno di un circuito chiuso se pur son stati ottenuti valori finali di qualità simili a quelli proposti.

Un'osservazione rilevante riguarda l'assunzione del valore della qualità del materiale in ingresso al processo di lavorazione. Oltre a dipendere dalla scelta della classificazione a cui si decide di aderire e al fatto di essere un processo laborioso, occorre considerare la possibilità di ottenere valori negativi del fattore di qualità per cicli superiori a uno ($n > 1$). Questo poichè la formulazione è strettamente legata al numero di cicli di riciclo e alla composizione del prodotto finito. Pertanto, per una migliore analisi, sarebbe stato opportuno esplorare ulteriori contributi al fine di determinare se esista una soglia oltre la quale non è possibile andare e se questa sia effettivamente correlata a questioni pratiche di inefficienza nel processo di riciclo. Inoltre, l'analisi dettagliata sul riciclo della lana ha rivelato la sostenibilità intrinseca di questo materiale, posizionandosi favorevolmente nella rappresentazione della realizzazione di pratiche più responsabili e sostenibili nell'industria tessile. La sua natura rinnovabile, biodegradabile e riciclabile senza avere perdita in performance la rende una scelta ecologica, mentre le sue proprietà di durata, traspirabilità e resistenza agli odori contribuiscono alla sua longevità, riducendo la necessità di sostituzioni frequenti e conferendo alla lana un notevole valore come investimento.

La transizione verso un'economia circolare nell'industria tessile richiede un approccio sistemico, coinvolgendo catene del valore collaborative, innovazione, digitalizzazione e aggiornamenti nei modelli di business. La definizione di linee guida da parte dell'UE per valutazioni di impatto ambientale e misure di circolarità può avere un impatto significativo sulla responsabilità delle aziende e sulla direzione complessiva dell'industria tessile.

Guardando al futuro, gli sviluppi nell'industria tessile e nella ricerca sulla sostenibilità dovrebbero concentrarsi su metodi di valutazione avanzati, casi di studio ampliati, misure innovative di circolarità come indicatori migliorati e modelli di analisi più sofisticati, nonché su integrazione delle tecnologie digitali e sviluppo di politiche e standard. Riflettendo sull'industria tessile nel suo complesso, si riconoscono le sfide legate all'alto impatto ambientale, alla cultura del *fast fashion* e alla complessità delle catene di approvvigionamento. Tuttavia, emergono anche opportunità attraverso l'innovazione dei materiali, la promozione di pratiche di economia circolare e l'aumento della consapevolezza dei consumatori. Proprio l'innovazione nelle misure di circolarità è un punto chiave per il futuro. Concentrarsi su tecnologie di riciclo innovative, principi di progettazione circolare e strategie per migliorare le fasi di *end-of-life* dei materiali tessili può ridurre significativamente i rifiuti e promuovere un'economia circolare più sostenibile.

L'integrazione delle tecnologie digitali può svolgere poi un ruolo significativo nel monitorare e ottimizzare le pratiche di sostenibilità. L'uso di strumenti digitali per garantire la trasparenza nella catena di approvvigionamento, monitorare le prestazioni ambientali e implementare modelli di business circolari rappresenta un'opportunità per migliorare l'efficienza e la responsabilità lungo l'intera catena. Questo coinvolge la gestione dei quadri normativi, l'implementazione di certificazioni di settore e la promozione delle migliori pratiche per ridurre l'impatto ambientale. La trasparenza e la tracciabilità lungo la *supply chain* sono fondamentali per identificare e affrontare le questioni ambientali ed etiche. Educare i consumatori e coinvolgerli nel passaggio a un consumo responsabile è cruciale. Espandendo gli ambiti di studio su una vasta gamma di materiali e prodotti, le ricerche future possono apportare un contributo significativo alla comprensione mirata della sostenibilità.

Questi progressi possono avere un impatto non indifferente sull'industria tessile, considerando l'aumento della consapevolezza dei consumatori e la crescente richiesta di prodotti sostenibili ed etici. Tale spinta può favorire una trasformazione del settore, orientando la domanda verso pratiche più sostenibili. L'obiettivo è quindi ottenere una comprensione più completa e precisa degli impatti ambientali nell'industria tessile.

A questo proposito, il *Material Circularity Indicator* (MCI) emerge come uno strumento cruciale per valutare la circolarità dei materiali, con l'indicazione che un'elevata percentuale di materiali riciclati contribuisce a valori più alti di questo indicatore. L'aspetto di circolarità del prodotto viene enfatizzato attraverso l'utilizzo dell'MCI, focalizzando l'attenzione su elementi spesso trascurati dalla CFF, come la durata di vita del prodotto e la rinnovabilità delle materie prime. L'integrazione dell'MCI con la CFF apre prospettive promettenti per migliorare la valutazione dell'impatto del singolo prodotto e dell'azienda. Come evidenziato nel presente caso studio, la valutazione finale ottenuta indica che esiste ancora spazio per migliorare gli aspetti legati alla sostenibilità e alla circolarità dei prodotti commercializzati.

In un contesto più ampio, questo sottolinea la necessità di strategie e tecnologie innovative nel campo del riciclo tessile, garantendo che la sostenibilità non comprometta la qualità del prodotto. Affrontare questa sfida richiede un approccio bilanciato, dove le pratiche di riciclo sono integrate con standard qualitativi rigorosi per garantire che il settore tessile possa compiere progressi significativi verso produzione e modelli più sostenibili senza sacrificare l'eccellenza del prodotto finale.

La strada verso un'industria tessile più sostenibile è aperta, e con la collaborazione di tutte le parti interessate, è possibile realizzare progressi significativi verso un futuro più attento all'ambiente. L'industria tessile ha il potenziale di fare progressi significativi verso la sostenibilità affrontando le sfide ambientali e sociali, integrando l'innovazione e promuovendo la collaborazione lungo tutta la catena del valore. L'analisi dettagliata e i risultati ottenuti sono favorevoli per guidare questo processo di trasformazione, fornendo un quadro robusto per l'adozione di pratiche di riciclo più sostenibili.

Pertanto, solo attraverso l'unità e la sinergia di tutte le parti coinvolte sarà possibile guidare progressi significativi verso un futuro nel tessile più etico e rispettoso dell'ambiente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Koszewska, "Circular Economy - Challenges for the Textile and Clothing Industry," *Autex Res. J.*, vol. 18, no. 4, pp. 337–347, 2018, doi: 10.1515/aut-2018-0023.
- [2] T. Kazak, "European Green Deal," *Yearb. Law Dep.*, vol. 9, no. 10, pp. 304–315, 2022, doi: 10.33919/yldnbu.20.9.12.
- [3] Eunomia Research & Consulting Ltd, "Understanding the PEFCR for Apparel and Footwear," no. October, 2022.
- [4] A. L. Consiglio, A. L. Comitato, and E. E. Sociale, "IT Commissione Europea Bruxelles, 30.3.2022 com(2022) 140 final comunicazione della commissione al parlamento europeo, al consiglio, al comitato economico e sociale europeo e al comitato delle regioni Prodotti sostenibili: dall'eccezione alla regola," 2022, [Online]. Available: <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook>.
- [5] Sustainable apparel coalition, "Draft Product Environmental Footprint Category Rules: Apparel and Footwear," no. July, p. 176, 2021.
- [6] I. Bianco, R. Gerboni, G. Picerno, and G. A. Blengini, "Life Cycle Assessment (LCA) of MWool® Recycled Wool Fibers," *Resources*, vol. 11, no. 5, 2022, doi: 10.3390/resources11050041.
- [7] Euratex and Economic and Statistics, "Facts & Key Figures 2022 of The European Textile and Clothing Industry," pp. 1–33, 2022, [Online]. Available: https://euratex.eu/wp-content/uploads/EURATEX_FactsKey_Figures_2022rev-1.pdf.
- [8] T. Duhoux, K. Le Blévenec, S. Manshoven, F. Grossi, and M. Arnold, "ETC/CE Report 2/2022: Textiles and the Environment - The role of design in Europe's circular economy – Eionet Portal," no. February, 2022, [Online]. Available: <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-ce/products/etc-ce-products/etc-ce-report-2-2022-textiles-and-the-environment-the-role-of-design-in-europes-circular-economy>.
- [9] T. Approvati, "Parlamento europeo," no. 2023, 2024.
- [10] Textile Exchange, "Preferred Fiber & Materials: Market Report 2022," *Text. Exch.*, no. October, pp. 1–118, 2022.
- [11] S. G. Wiedemann *et al.*, "Environmental impacts associated with the production, use, and end-of-life of a woollen garment," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 25, no. 8, pp. 1486–1499, 2020, doi: 10.1007/s11367-020-01766-0.
- [12] K. Laitala, S. Profile, and B. K. Henry, *Use phase of apparel: A literature review for Life Cycle Assessment with focus on wool. Consumption Research Norway - SIFO. Oslo, Norway.*, no. March. 2017.
- [13] B. Henry, S. Ledgard, B. Nebel, and S. Wiedemann, "Guidelines for conducting a life cycle assessment of the environmental performance of wool textiles," no. April 2016, p. 69, 2016, [Online]. Available: <http://cml.leiden.edu/research/industrialecology%0Ahttps://www.iwto.org/>.
- [14] Society, "The impact of textile production and waste on the environment (infographics)," *Eur. Parliam.*, pp. 1–7, 2020, [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20201208STO93327/the-impact-of-textile-production-and-waste-on-the-environment-infographics>.
- [15] S. Ahuja, *Water quality worldwide*. 2021.
- [16] B. K. Henry *et al.*, *LCA of wool textiles and clothing*, vol. 2012. Elsevier Ltd, 2015.

- [17] S. H. Eryuruk, *Life cycle assessment method for environmental impact evaluation and certification systems for textiles and clothing*. Elsevier Ltd, 2015.
- [18] A. K. Roy Choudhury, *Environmental Impacts of the Textile Industry and Its Assessment Through Life Cycle Assessment*. 2014.
- [19] L. Keßler, S. A. Matlin, and K. Kümmerer, “The contribution of material circularity to sustainability — Recycling and reuse of textiles,” *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 32, p. 100535, 2021, doi: 10.1016/j.cogsc.2021.100535.
- [20] A. Payne, *Open-and closed-loop recycling of textile and apparel products*. Elsevier Ltd, 2015.
- [21] S. Hedrich, J. Janmark, M. Strand, N. Langguth, and K.-H. Magnus, “Circular fashion in Europe: Turning waste into value,” *McKinsey Co.*, p. 76, 2022, [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/industries/retail/our-insights/scaling-textile-recycling-in-europe-turning-waste-into-value>.
- [22] S. G. Wiedemann, Q. V. Nguyen, and S. J. Clarke, “Using LCA and Circularity Indicators to Measure the Sustainability of Textiles—Examples of Renewable and Non-Renewable Fibres,” *Sustain.*, vol. 14, no. 24, 2022, doi: 10.3390/su142416683.
- [23] A. Beton *et al.*, *Environmental Improvement Potential of textiles (IMPRO Textiles)*, no. January. 2014.
- [24] European Commission, “Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods,” pp. 1–31, 2021, [Online]. Available: https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/EF_simple_guide_v7_clen.pdf.
- [25] M. Lidfeldt, M. Nellström, G. S. Albertsson, and L. Hallberg, *Siptex WP5 report: Life cycle assessment of textile recycling products*, no. October. 2022.
- [26] T. Ekvall, A. Björklund, G. Sandin, K. Jelse, J. Lage, and M. Rydberg, *Modeling recycling in life cycle assessment*, no. May. 2020.
- [27] I. Bianco, G. Picerno, and G. A. Blengini, “Life Cycle Assessment (LCA) of Worsted and Woollen processing in wool production: ReviWool® noils and other wool co-products,” *J. Clean. Prod.*, vol. 415, no. February, p. 137877, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137877.
- [28] A. Boyano, “Hannes Partl Product Environmental Footprint (PEF) and PEF Category Rules (PEFCR) for Apparel and footwear Baptiste-Carriere Pradal for the Sustainable Apparel Coalition (SAC),” no. June, 2022, [Online]. Available: https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/ef_trainings.htm.
- [29] T. Ekvall, M. Gottfridsson, M. Nellström, J. Nilsson, M. Rydberg, and T. Rydberg, “Modelling incineration for more accurate comparisons to recycling in PEF and LCA,” *Waste Manag.*, vol. 136, no. October, pp. 153–161, 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.09.036.
- [30] V. Bach, A. Lehmann, M. Görmer, and M. Finkbeiner, “Product environmental footprint (PEF) pilot phase-comparability over flexibility?,” *Sustain.*, vol. 10, no. 8, 2018, doi: 10.3390/su10082898.
- [31] L. Thellier, A. Boyano, and M.-A. Wolf, “Hannes Partl PEF (Product Environmental Footprint)-What It Is, and Benefits for SME’s,” no. December, 2020.
- [32] C. Europea, “Raccomandazione (ue) 2021/2279 della Commissione del 15 dicembre 2021 sull’uso dei metodi dell’impronta ambientale per misurare e comunicare le prestazioni ambientali del ciclo di vita dei prodotti e delle organizzazioni,” *Gazz. Uff. Dell’Unione Eur.*, no. 2, pp. 1–421, 2021.
- [33] L. C. M. Eberhardt, A. van Stijn, F. N. Rasmussen, M. Birkved, and H. Birgisdottir, “Development of a

- life cycle assessment allocation approach for circular economy in the built environment," *Sustain.*, vol. 12, no. 22, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/su12229579.
- [34] K. Allacker, F. Mathieux, D. Pennington, and R. Pant, "The search for an appropriate end-of-life formula for the purpose of the European Commission Environmental Footprint initiative," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 9, pp. 1441–1458, 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1244-0.
- [35] K. Allacker *et al.*, "Allocation solutions for secondary material production and end of life recovery: Proposals for product policy initiatives," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 88, pp. 1–12, 2014, doi: 10.1016/j.resconrec.2014.03.016.
- [36] J. Rickert, A. Ciroth, and G. Gmbh, "Application of the circular footprint formula (CFF) in product environmental footprint (PEF) Illustrated through a case study on intermediate paper products 2 . The CFF for intermediate products (modelling recycled content)," vol. 4, no. October, pp. 1–9, 2020, [Online]. Available: <https://www.greendelta.com/wp-content/uploads/2020/10/2020-10-PEF-application-of-CFF.pdf>.
- [37] L. Zampori and R. Pant, *Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method*. 2019.
- [38] D. L. Schrijvers, P. Loubet, and B. P. Weidema, "To what extent is the Circular Footprint Formula of the Product Environmental Footprint Guide consequential?," *J. Clean. Prod.*, vol. 320, no. September 2020, p. 128800, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128800.
- [39] E. Kakkos and R. Hischier, "Paving the way towards circularity in the building sector. Empa's Sprint Unit as a beacon of swift and circular construction," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1078, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1078/1/012009.
- [40] <https://manteco.com/>.
- [41] T. I. Epd, "Environmental Product Declaration ReviWool® Fabric by Manteco®," 2023.
- [42] T. I. Epd, "Environmental Product Declaration MWool® Yarn by Manteco®," 2022, doi: 10.4324/9780203889565.ch4.
- [43] I. Bianco, R. Gerboni, G. Picerno, and G. A. Blengini, "Life Cycle Assessment (LCA) of MWool® Recycled Wool Fibers," *Resources*, vol. 11, no. 5, pp. 1–16, 2022, doi: 10.3390/resources11050041.
- [44] IWTO, "02 Wool Notes," p. 21, 2020.
- [45] R. Furferi, Y. Volpe, and F. Mantellassi, "Circular Economy Guidelines for the Textile Industry," *Sustain.*, vol. 14, no. 17, pp. 1–20, 2022, doi: 10.3390/su141711111.
- [46] M. Wolf, "The Circular Footprint Formula (CFF) and its practical application," no. November, p. 62, 2020.
- [47] D. Civancik-Uslu, R. Puig, L. Ferrer, and P. Fullana-i-Palmer, "Influence of end-of-life allocation, credits and other methodological issues in LCA of compounds: An in-company circular economy case study on packaging," *J. Clean. Prod.*, vol. 212, pp. 925–940, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.076.
- [48] S. Keiser and P. G. Tortora, "Recycled Wool," *Fairchild Books Dict. Fashion*, pp. 128–128, 2022, doi: 10.5040/9781501365287.2221.
- [49] E. Wood, "21 . Value and Use of Wool Lecture 1 : Textile properties of wool and other fibres Learning objectives," pp. 1–48, 2012.
- [50] S. Macpherson, "5. Wool Classing Key terms and concepts," *WOOL422/522 Wool Mark. Clip Prep.*, p. 42, 2012.

- [51] I. A. Elhawary, *Fibre to Yarn: Staple-Yarn Spinning*. Elsevier Ltd, 2015.
- [52] K. Lindström, T. Sjöblom, A. Persson, and N. Kadi, "Improving mechanical textile recycling by lubricant pre-treatment to mitigate length loss of fibers," *Sustain.*, vol. 12, no. 20, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3390/su12208706.
- [53] S. G. Wiedemann, Q. V. Nguyen, and S. J. Clarke, "Using LCA and Circularity Indicators to Measure the Sustainability of Textiles—Examples of Renewable and Non-Renewable Fibres," *Sustain.*, vol. 14, no. 24, pp. 1–22, 2022, doi: 10.3390/su142416683.
- [54] L. Rigamonti and E. Mancini, "Life cycle assessment and circularity indicators," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 26, no. 10, pp. 1937–1942, 2021, doi: 10.1007/s11367-021-01966-2.
- [55] Ellen MacArthur Foundation, "Ellen MacArthur Foundation Project Team (in alphabetical order)," pp. 1–64, 2019, [Online]. Available: <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/circularity-indicators/>.
- [56] Circular Economy Network (CEN), "4° Rapporto sull'economia circolare in Italia," p. 130, 2022.
- [57] Gruppo di Lavoro 3 di ICESP, "Strumenti per la misurazione dell'economia circolare," 2020, doi: 10.12910/DOC2020-009.
- [58] S. S. p. a. Nicola Papi, "Misurare la sostenibilità in azienda."
- [59] E. Rossi, A. C. Bertassini, C. dos S. Ferreira, W. A. Neves do Amaral, and A. R. Ometto, "Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electro-electronic cases," *J. Clean. Prod.*, vol. 247, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119137.
- [60] L. Rocchi, L. Paolotti, C. Cortina, F. F. Fagioli, and A. Boggia, "Measuring circularity: an application of modified Material Circularity Indicator to agricultural systems," *Agric. Food Econ.*, vol. 9, no. 1, 2021, doi: 10.1186/s40100-021-00182-8.
- [61] A. Pavlović, G. Bošković, N. Jovičić, S. Nestić, N. Sliusar, and N. Stanisavljević, "Determination of circularity indicators: A case study of MB International Company," *Reciklaza i Odrziv. Razvoj*, vol. 13, no. 1, pp. 9–21, 2020, doi: 10.5937/ror2001009p.
- [62] T. I. Epd, "Environmental Product Declaration MWOol® Fabric by Manteco®," 2023.
- [63] T. I. Epd, "Environmental Product Declaration Pure MWOol® Fabric by Manteco®," 2023.
- [64] T. I. Epd, "Environmental Product Declaration Woolten® Fabric by Manteco®," 2023.