



REFRESH: Filiera circolare per pale eoliche a fine vita. Tecnologie e benefici ambientali

◆ **Daniel Grisenti**, RINA Consulting S.p.A.

DOI: [10.63111/QES-2026.1.0013](https://doi.org/10.63111/QES-2026.1.0013)

ABSTRACT

Il progetto REFRESH (Horizon Europe, GA n. 101096858), avviato il 1° gennaio 2023, con una durata di 48 mesi fino al 31 dicembre 2026 e un finanziamento complessivo dall'unione europea di circa 8 M€, sviluppa una filiera circolare per il riciclo dei compositi rinforzati con fibre di vetro provenienti da pale eoliche a fine vita, affrontando criticità tecniche e ambientali legate alle opzioni tradizionali di smaltimento. L'approccio integra smontaggio e pre-taglio in campo, triturazione e selezione, riciclo meccanico e termico, e una piattaforma di tracciabilità digitale basata su blockchain. Ad oggi, dopo 36 mesi, REFRESH ha completato la prototipazione degli impianti e l'upscaling dei processi, validando tecnologie pilota e realizzando dimostratori industriali (profili pultrusi, pannelli cassero, laminati per infusione) con contenuto riciclato certificato. Le analisi LCA preliminari evidenziano una riduzione significativa delle emissioni di CO₂ equivalente (fino a 3.180 kg per tonnellata di materiale trattato)

rispetto a scenari di discarica/incenerimento, grazie alla sostituzione di materie prime vergini e alla valorizzazione dei flussi residui. Il progetto contribuisce agli obiettivi europei di decarbonizzazione ed economia circolare, proponendo standard tecnologici e digitali replicabili nel settore eolico e in altri contesti ad alto contenuto di compositi.

1. Introduzione e contesto

Nel 2025, l'Europa ha raggiunto una capacità eolica installata di circa 291 GW, coprendo il 16% della domanda elettrica complessiva, con una produzione annua superiore a 480 TWh¹. L'eolico si conferma una delle principali fonti di generazione, ma la rapida espansione del parco impone una gestione strutturata e sostenibile delle pale a fine vita. Tali componenti, prevalentemente in GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer), presentano resistenze meccaniche elevate, stratigrafie complesse e una matrice polimerica che rende inefficiente il ricorso alle tradizionali opzioni di smaltimento (discarica/incenerimento). Il tema non è soltanto tecnico: impatta costi industriali, accettabilità sociale e obiettivi di neutralità climatica. REFRESH adotta un approccio sistemico, dimostrativo e scalabile, in cui l'intera filiera - dalla preparazione in campo fino al reimpiego in prodotti - è progettata per massimizzare recupero, sicurezza e qualità, riducendo al contempo l'impronta ambientale.

2. Stato dell'arte e gap

Le pratiche correnti si concentrano su soluzioni parziali (triturazioni grossolane per recupero energetico; riusi puntuali a basso valore), con scarse certezze su qualità e tracciabilità dei materiali. In assenza di standard condivisi e di un sistema di data governance affidabile, il mercato fatica ad accettare frazioni riciclate nei prodotti, specie in edilizia e infrastrutture, per mancanza di dichiarazioni prestazionali e indicatori ambientali robusti. Il gap è dunque metodologico e operativo: serve una filiera integrata che unisca tecnologie di campo, processi di separazione/riciclo e strumenti digitali di tracciabilità, culminando in prodotti dimostrativi con proprietà verificate e benefici LCA quantificabili.

Oggi, alcune soluzioni industriali stanno colmando questo vuoto. Il co-processing nel cemento è già operativo su scala europea: i produttori di cemento impiegano pale eoliche a fine vita come sostituti di materie prime e combustibili,

garantendo un recupero totale dei compositi e riducendo l'uso di risorse naturali. Questo approccio, riconosciuto da associazioni come WindEurope e CEMBUREAU, consente di abbattere le emissioni di CO₂ e di evitare la discarica, pur richiedendo una gestione accurata della granulometria e della composizione chimica².

Infine, iniziative come quelle di Exel Composites, dimostrano l'applicazione di tecniche open-loop per trasformare rifiuti compositi in clinker per cemento, con benefici ambientali e costi competitivi rispetto allo smaltimento tradizionale³.

Questi esempi evidenziano che la transizione verso una filiera circolare richiede non solo tecnologie di riciclo avanzate, ma anche standard di tracciabilità e dichiarazioni ambientali per creare fiducia nel mercato e abilitare modelli di business sostenibili.

3. Obiettivi del progetto

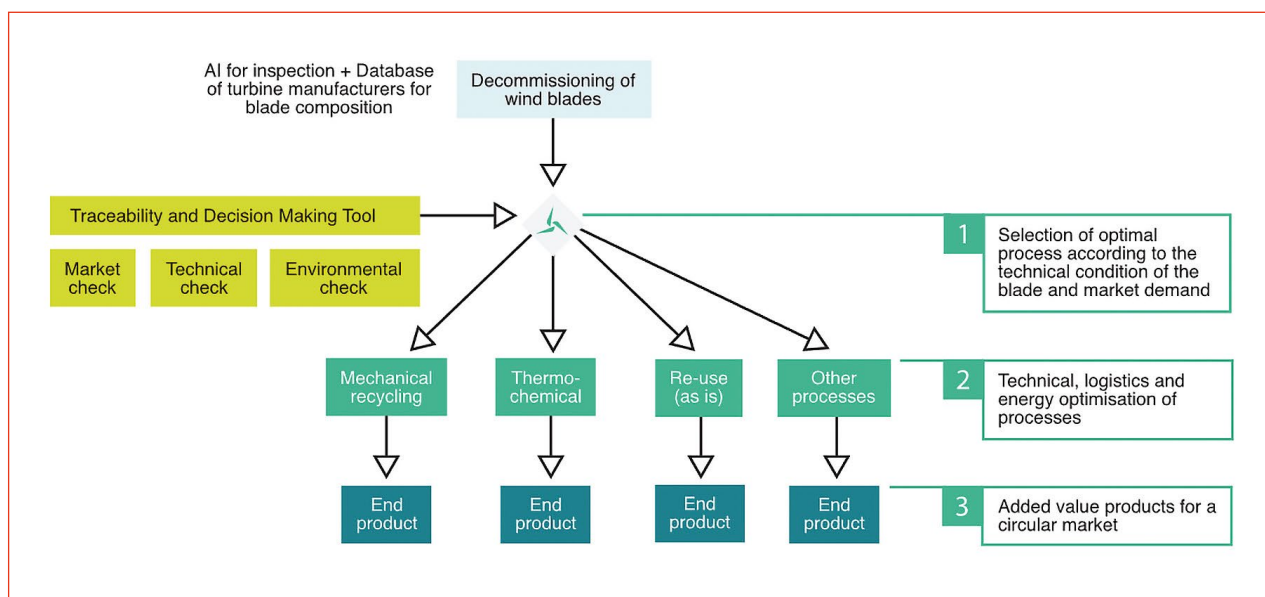
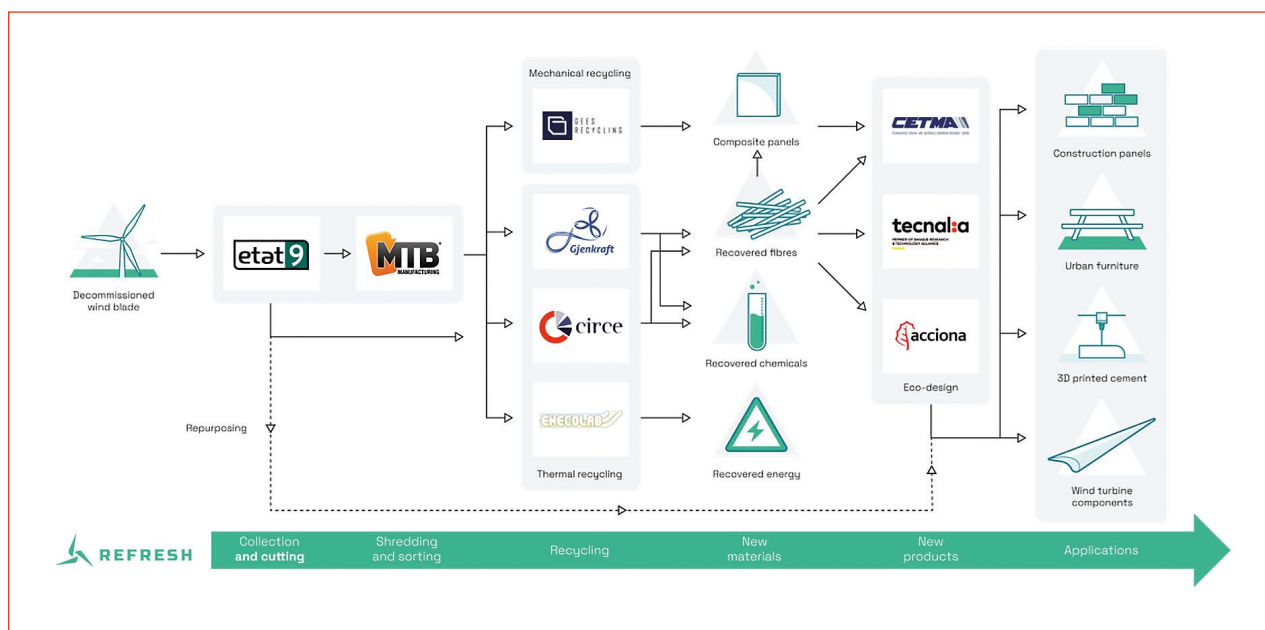
REFRESH si propone di:

- Creare una filiera integrata per il trattamento delle pale eoliche a fine vita, dalla preparazione in campo al reimpiego in prodotti.
- Sviluppare tecnologie di pre-taglio e triturazione per ridurre volumi e ottimizzare la logistica.
- Implementare processi di riciclo meccanico e termico per valorizzare tutte le frazioni, incluse quelle più difficili.
- Progettare dimostratori industriali (profili pultrusi, laminati per infusione, sistemi di casseri) con contenuto riciclato certificato.
- Integrare una piattaforma di tracciabilità digitale basata su blockchain per garantire trasparenza, qualità e conformità.
- Quantificare i benefici ambientali attraverso analisi LCA, dimostrando la riduzione di CO₂ eq rispetto agli scenari tradizionali.
- Definire linee guida per la replicabilità in altri settori e contesti geografici.

¹ WindEurope – Latest wind energy data for Europe, Autumn 2025 (<https://www.connaissancedesenergies.org/sites/connaissancedesenergies.org/files/pdf-actualites/WindEurope-H1-Data-2025-report.pdf>)

² Cement co-processing is a sustainable solution for recycling end-of-life composite materials. (<https://www.cementeurope.eu/media/kgmphek2/230623-joint-position-co-processing-composites.pdf>)

³ Cementing a sustainable future with composite recycling (<https://exelcomposites.com/composite-recycling/>)



4. Processi tecnologici

4.1 Smontaggio e pre-taglio

Il pretrattamento in campo rappresenta il fondamento dell'intera filiera: il pre-taglio consente di trasformare un componente monolitico e ingombrante in moduli trasportabili, conformi ai vincoli logistici e alle prescrizioni Health & Safety.

Questo passaggio ha obiettivi chiari: ridurre i costi di trasporto e stoccaggio, mitigare i rischi operativi e pre-classificare le porzioni in base alla loro destinazione d'uso, distinguendo tra riciclo meccanico e termico. Il processo si articola in diverse fasi. Si parte dalla pianificazione dei tagli, che prevede la definizione di un reticolo di sezionamento basato su geometrie, spessori e rinforzi, la stima di volumi e pesi delle sezioni e la scelta del metodo più idoneo, come la sega circolare o il taglio a filo, in funzione della stratigrafia e dell'accessibilità.



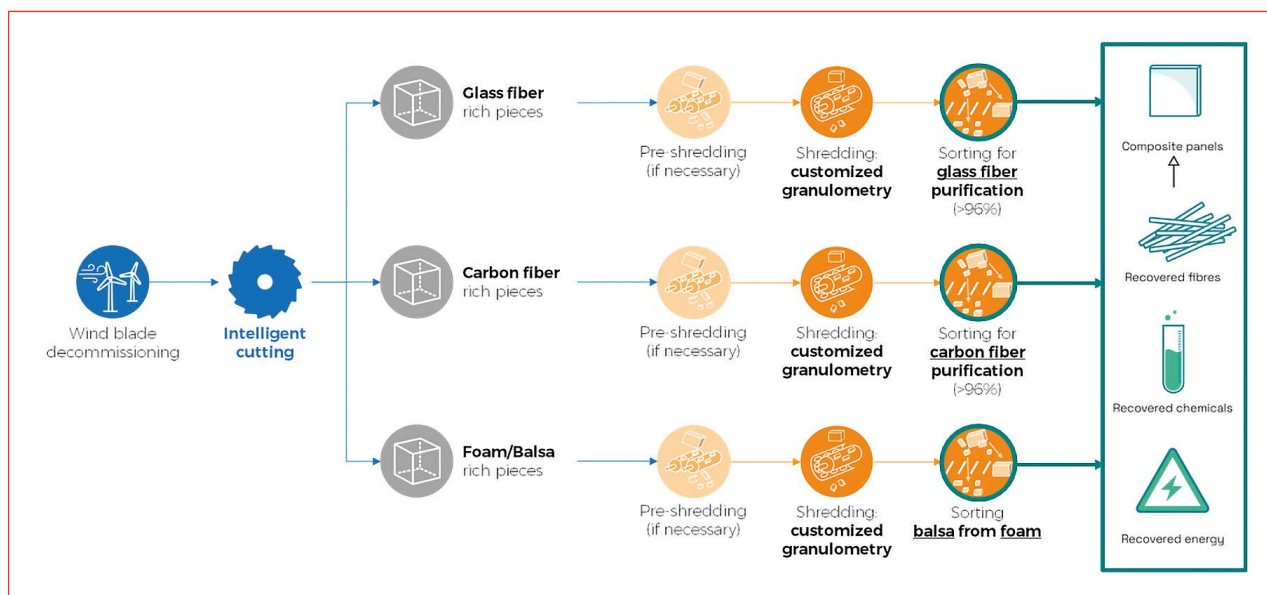
Segue il controllo delle emissioni di processo, con sistemi di aspirazione localizzata e filtrazione per contenere le polveri, il confinamento dell'area di taglio e l'adozione di DPI e procedure di sicurezza. Un aspetto cruciale è l'identificazione

dei lotti, attraverso marcatura univoca delle sezioni e associazione di metadati relativi a provenienza, storia d'esercizio e macro-caratteristiche del laminato. Infine, la pre-classificazione consente di separare preliminarmente i segmenti con differente contenuto di anime, pitture o rivestimenti, ottimizzando così le fasi successive di riduzione dimensionale e sorting. L'output atteso è costituito da sezioni omogenee, tracciate e pronte per l'ingresso nel processo industriale, con un profilo di rischio gestito e una qualità controllata. Questa attività, all'interno del progetto REFRESH, è curata dal partner ETAT9, che garantisce l'applicazione delle migliori pratiche operative e di sicurezza.

4.2 Triturazione e selezione

L'obiettivo di questa fase è ottenere frazioni con specifiche costanti, idonee alle diverse rotte di riciclo. La linea di shredding e sorting deve ridurre al minimo la generazione di fini non utilizzabili, stabilizzare la granulometria e incrementare la purezza rispetto a impurezze o contaminanti.

Il processo si basa su un'architettura articolata. Si parte dallo shredding multistadio, che realizza una riduzione dimensionale progressiva, controllando coppia e velocità per contenere la produzione di polveri e preservare fibre corte utili. Segue il sorting fisico e sensoriale, che sfrutta criteri di densità, geometria e risposta a segnali, ad esempio ottici, per distinguere frazioni polimeriche, fibre e materiali di core. A supporto, il controllo qualità in linea monitora parametri come umidità, granulometria e contenuto di fibra, riducendo scarti e ricircoli grazie a soglie operative ben definite.



Le interfacce logistiche prevedono buffer di stoccaggio in silos o big bags e una mappa dei flussi verso riciclo meccanico o termico, basata su proprietà misurate.

Il risultato è la produzione di frazioni stabili e tracciate, pronte ad alimentare i dimostratori di prodotto e le piattaforme termiche, massimizzando il tasso di recupero e la predici-bilità del processo. All'interno del progetto REFRESH, questa attività è curata dal partner MTB Recycling, che garantisce l'efficienza delle operazioni e la conformità agli standard di qualità.

4.3 Riciclo meccanico

Le frazioni solide ottenute dal processo (polveri, granuli e fibre corte) sono candidate alla realizzazione di formulazioni per pannelli, casseri e profili pultrusi. La sfida principale è conciliare la processabilità, legata alla reologia del materiale, con le prestazioni meccaniche, in particolare l'adesione all'interfaccia fibra-matrice e i valori di modulo e resistenza.

Il percorso metodologico parte dalla compatibilizzazione, che implica la selezione di leganti, primer e additivi per migliorare adesione e bagnabilità, oltre al controllo dell'umidità residua e della distribuzione delle particelle. Segue la fase di ottimizzazione reologica e di processo, dove si tarano viscosità e tissotropia per evitare difetti come vuoti o segregazioni, e si impostano parametri di pultrusione (tiraggio, temperatura e pressione) coerenti con i carichi di riciclato.

Sul fronte delle proprietà meccaniche, la progettazione punta a garantire modulo elastico e resistenza flessionale, con target applicativi in edilizia e infrastrutture leggere, includendo valutazioni su tenacità e resistenza ai cicli ambientali (bagnato/asciutto, variazioni termiche). La fase di validazione d'uso prevede prove su elementi a scala reale, come pannelli e profili, per verificare durabilità e ripetibilità della qualità. L'output atteso consiste in prodotti meccanici con contenuto riciclato e prestazioni verificabili, idonei a capitolati prestazionali. All'interno del progetto REFRESH, questa attività è curata dal partner GEES Recycling, che sviluppa le formulazioni e ne garantisce la conformità ai requisiti tecnici e ambientali.



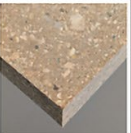
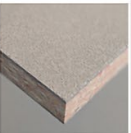
4.4 Riciclo termico

Le frazioni non idonee al riciclo meccanico, come polveri e fini, vengono valorizzate tramite riciclo termico con un duplice obiettivo: recuperare fibre dalle frazioni laminari e convertire la componente organica in vettori energetici e inerti. È importante sottolineare che il processo termico non si applica esclusivamente alle polveri e ai fini, ma viene utilizzato anche sul materiale in maniera complementare al processo meccanico, consentendo di ottenere altri prodotti come fibre e oli di pirolisi.

La metodologia si articola in più approcci. La pirolisi, gestita su scala impiantistica dal partner Gjenkraft, prevede la scissione termica per separare fibre e frazioni organiche, con un controllo accurato di temperatura e tempi di residenza per ridurre residui carboniosi e preservare le proprietà meccaniche delle fibre. La gestione dei condensabili e del syngas è parte integrante del processo. Il partner CIRCE si occupa della sperimentazione di tecniche innovative, come la pirolisi mediante microonde e la solvolisi, che utilizza solventi e reagenti per depolimerizzare la matrice, seguita da risciacqui e finiture per ripristinare la qualità superficiale delle fibre. Infine, Enecolab cura la

fase di gassificazione delle polveri, attraverso pirolisi ad alta temperatura che converte i residui in syngas ad elevato potere calorifico e inerti granulari, garantendo continuità operativa, riduzione delle emissioni e recupero energetico integrabile.

L'integrazione tra linee meccaniche e termiche è progettata per evitare colli di bottiglia: ciò che non rientra nelle

Product	RFM Basic 850	RFM «wind blades»	D'ecò 1000	Replies
				
Nominal density (kg/m ³)	850	850	1000	FG sandwich
Nominal thickness (mm)	18	18	24	18

formulazioni di prodotto viene valorizzato energeticamente o come inerte utile, consolidando la chiusura del ciclo e massimizzando il recupero complessivo.

4.5 Tracciabilità digitale

Garantire trasparenza, integrità e conformità dei materiali riciclati lungo la filiera è un obiettivo strategico, perché abilita dichiarazioni ambientali e audit e riduce l'incertezza del mercato. Questo risultato sarà conseguito grazie allo sviluppo del Decision Making Tool, uno strumento digitale progettato per supportare la scelta del percorso di riciclo più appropriato per le pale eoliche a fine vita, considerando parametri tecnici, ambientali e finanziari. L'obiettivo è assicurare decisioni basate su dati affidabili e trasparenti lungo tutta la catena del valore.

Il tool integra funzioni chiave. La prima è l'identità del lotto, attraverso registri digitali che consolidano informazioni su origine dei materiali, processi subiti, risultati dei test e destinazioni d'uso, garantendo tracciabilità completa. La seconda riguarda l'accesso controllato, con gestione di ruoli e permessi differenziati per produttori, riciclatori, clienti e autorità, tutelando la riservatezza dei dati e assicurando trasparenza e ispezionabilità. Infine, l'interoperabilità: l'architettura dati è progettata per integrarsi con futuri Digital Product Passport, evitando lock-in tecnologici e favorendo standard aperti.

Il valore di questa soluzione è evidente: la tracciabilità diventa un abilitatore di mercato, accelera le verifiche normative e consente un procurement basato su specifiche prestazionali e indicatori ambientali, favorendo scelte più sostenibili e competitive. All'interno del progetto REFRESH, lo sviluppo di questo strumento è curato dal partner Tecnia, che garantisce l'implementazione delle funzionalità digitali e la conformità agli standard europei.

5. Prototipazione e dimostratori

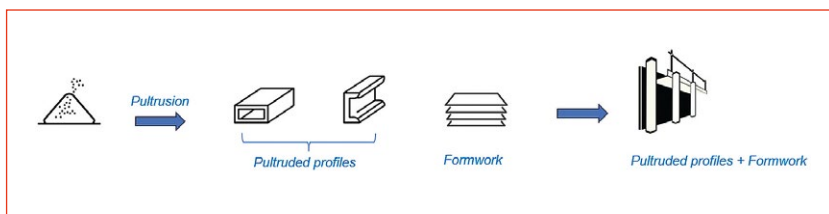
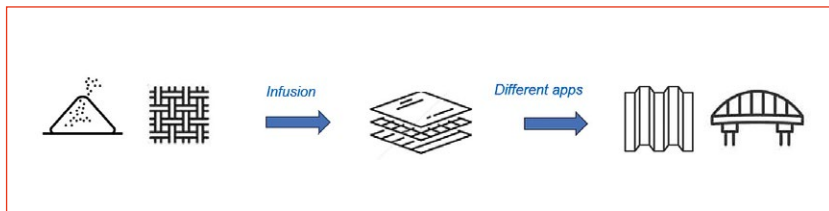
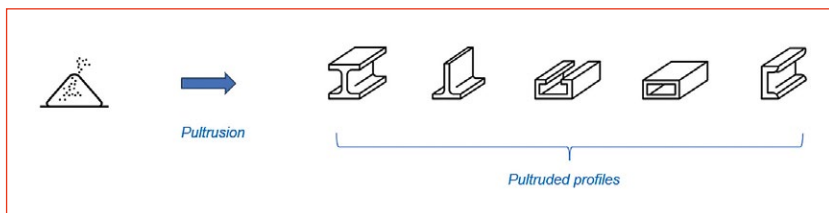
La fase di trasformazione delle frazioni riciclate in prodotti finiti si articola su tre linee principali. La Linea 1 – Pultrusione è dedicata alla realizzazione di profili a sezione costante con carichi di polveri riciclate. Il focus è sull'im-

pregnazione uniforme, sulla bagnabilità e sulla costanza di alimentazione. La taratura del processo – temperature, tensioni di tiro e velocità – è studiata per bilanciare produttività e qualità superficiale.

La Linea 2 – Infusione si concentra su laminati realizzati con mat non woven da fibre riciclate e/o filler provenienti da frazioni meccaniche. La progettazione reologica è fondamentale per minimizzare vuoti e segregazioni, mentre l'adesione interlaminare viene verificata attraverso prove standard.

Infine, la Linea 3 – Casseri modulari sviluppa pannelli compositi per sistemi di cassero riutilizzabili. La progettazione considera resistenza ai cicli bagnato/asciutto, stabilità dimensionale, compatibilità con dispositivi di disarmo e numero di riutilizzi attesi.

La metodologia di validazione segue un percorso rigoroso: definizione dei requisiti prestazionali (meccanici e ambientali), selezione delle frazioni e delle formulazioni, test meccanici (trazione, flessione, impatto), ambientali (cicli termici e igrometrici) e d'uso (montaggio, disarmo, permeabilità), fino alla valutazione di replicabilità e scarti di processo. All'interno del progetto REFRESH, queste attività sono curate dal partner ACCIONA, che sviluppa e ottimizza i processi produttivi in stretta collaborazione con gli altri partner, garantendo la conformità ai requisiti di qualità e sostenibilità.



6. Valutazione ambientale (LCA)

Le analisi LCA preliminari condotte nel progetto quantificano i benefici ambientali derivanti dall'integrazione delle rotte di riciclo rispetto agli scenari di smaltimento tradizionali. I risultati, espressi in termini di riduzione di CO₂ equivalente, evidenziano contributi significativi per ciascun processo.

Per il riciclo meccanico, gestito dal partner GEES Recycling, il recupero di materiali da pale eoliche impiegati come sostituti di resine epossidiche consente un beneficio ambientale pari a 3.180 kg di CO₂eq per tonnellata di materiale trattato. Nel riciclo termico mediante pirolisi elettrica, curato da Gjenkraft, la valorizzazione di fibre di vetro e carbonio come sostituti di fibre vergini genera un beneficio di 1.128 kg di CO₂eq. Per la pirolisi assistita da microonde, sperimentata da CIRCE, il beneficio ambientale si attesta a 1.154 kg di CO₂eq, sempre riferito alla sostituzione di fibre vergini.

Questi valori confermano che la filiera REFRESH non solo riduce l'impatto climatico rispetto a incenerimento e discarica, ma abilita un effetto leva sulla decarbonizzazione grazie alla sostituzione di materie prime ad alta intensità energetica. L'integrazione di più rotte di riciclo, supportata da tracciabilità e controlli di qualità, amplifica il potenziale di mitigazione, rendendo il modello replicabile in altri settori ad alto contenuto di compositi.

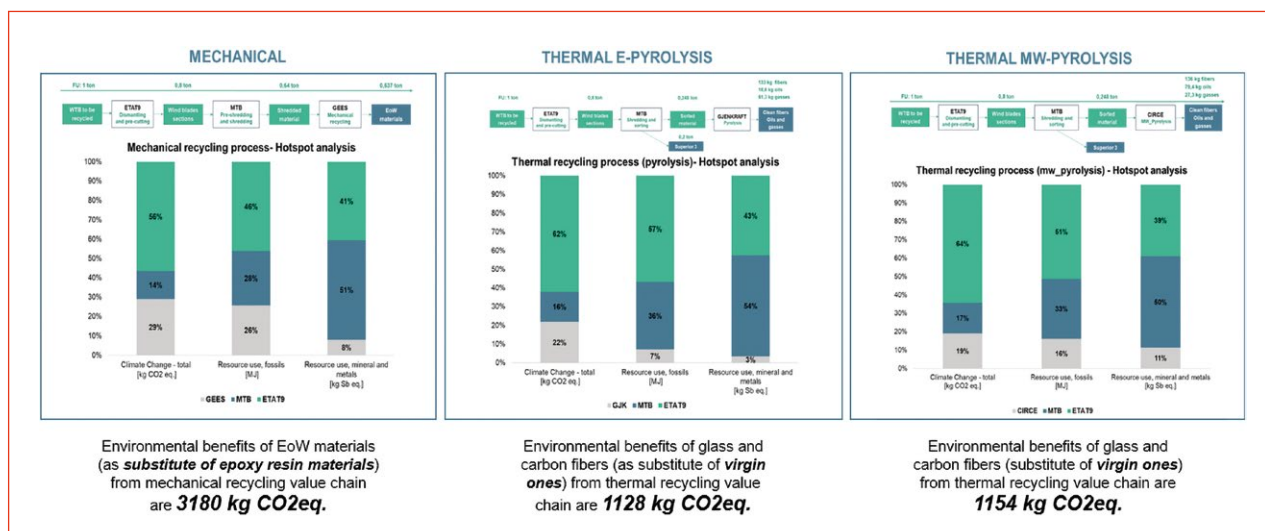
Sono attualmente in corso le valutazioni LCA basate sui dati reali dei dimostratori industriali, e i risultati preliminari indicano una coerenza con le stime iniziali, confermando la solidità del modello e la capacità di generare benefici ambientali significativi anche in condizioni operative reali. Questa attività è coordinata dal partner RINA Consulting, che garantisce la robustezza metodologica e la conformità agli standard internazionali.

CONCLUSIONI

REFRESH dimostra la fattibilità industriale di una filiera circolare per pale eoliche a fine vita, integrando tecnologie di riciclo e tracciabilità digitale con benefici ambientali misurabili. Il progetto colma il gap di standardizzazione e propone un modello scalabile e replicabile in altri settori ad alto contenuto di compositi. Questa convergenza tra tecnologia, digitale e mercato riduce l'impronta climatica e abilita prodotti con contenuto riciclato certificato. I dimostratori industriali validati indicano una traiettoria chiara verso l'adozione su larga scala, accelerando l'accettazione di standard tecnici e digitali.

Il progetto REFRESH dimostra la fattibilità industriale di una filiera circolare per le pale eoliche a fine vita, integrando con successo tecnologie di riciclo meccanico e termico, sistemi avanzati di triturazione e selezione, e una piattaforma digitale di tracciabilità. I risultati tecnici più rilevanti includono la validazione di processi di pre-taglio e triturazione efficienti, la produzione di frazioni riciclate con specifiche costanti e tracciate, e la realizzazione di prodotti dimostratori con contenuto riciclato certificato e prestazioni verificate. Le analisi LCA preliminari hanno quantificato benefici ambientali significativi, con riduzioni di CO₂ equivalente fino a 3.180 kg per tonnellata di materiale trattato, grazie alla sostituzione di materie prime vergini e alla valorizzazione dei flussi residui. L'integrazione di più percorsi di riciclo, supportata da sistemi di tracciabilità digitale e controlli di qualità, ha permesso di massimizzare il recupero e la predicibilità dei processi, rendendo il modello replicabile anche in altri settori ad alto contenuto di compositi.

Tra gli aspetti più promettenti emersi dal progetto si evidenziano la possibilità di adattare le tecnologie sviluppate a diverse tipologie di compositi e di ampliare la gamma di



prodotti ottenibili, nonché la capacità della piattaforma digitale di abilitare dichiarazioni ambientali e audit, facilitando l'accettazione di materiali riciclati sul mercato. I dimostratori industriali validati rappresentano una traiettoria chiara verso l'adozione su larga scala, accelerando la diffusione di standard tecnici e digitali condivisi.

I prossimi sviluppi prevedono l'ottimizzazione dei processi su scala industriale, l'estensione delle tecnologie a nuovi flussi di rifiuto composito (ad esempio dal settore nautico, automotive o aerospaziale) e l'integrazione con sistemi di digital

product passport per una tracciabilità ancora più completa. Sarà inoltre fondamentale consolidare le collaborazioni con i settori utilizzatori finali, promuovere la standardizzazione normativa e approfondire le valutazioni LCA su dati reali di esercizio. In prospettiva, il modello REFRESH potrà fungere da riferimento per la transizione circolare di altri comparti industriali, contribuendo in modo concreto agli obiettivi europei di decarbonizzazione e sostenibilità. ♦

Tutte le immagini sono generate dal consorzio del progetto REFRESH