

Verso una gestione sostenibile e circolare per il fine vita delle pale eoliche

Luglio 2021

Sommario

1. Scopo e contenuto del documento	3
2. Executive Summary	4
3. L'ambizione di un'intera filiera industriale	6
3.2. Il punto di vista dei produttori di turbine eoliche	9
4. Contesto normativo in Europa	11
4.1. End of waste	11
4.2. Rifiuti	12
5. Innovazione e Circular Economy per gestire la fine vita delle pale eoliche 15	
5.1. Prevenzione.....	16
5.2. Life-time Extension	17
5.3. Riuso	17
5.4. Riciclo.....	19
5.5. Recupero energetico / Smaltimento.....	21
6. Barriere e nuove opportunità verso un approccio circolare	22
6.1. Criticità	22
6.2. Proposte	23
7. Conclusioni - Creazione di un ecosistema complesso	24
Appendice 1: approfondimenti sulle tecnologie di riciclo	25
1. Principali tipi di processo	25
2. Aspetti energetici, industriali ed ambientali dei diversi processi di riciclo.....	28

1. Scopo e contenuto del documento

Il settore energetico deve oggi confrontarsi con ambiziose sfide che riguardano, tra l'altro, la trasformazione dei modelli di produzione e consumo in coerenza con i principi dell'economia circolare.

In questo contesto assume particolare rilevanza il recupero e riutilizzo dei prodotti a fine vita in diversi settori e processi industriali: l'abbandono del concetto di rifiuto o scarto a favore del riutilizzo rappresenta il cardine per l'obiettivo di un uso efficiente delle risorse.

Sulla base di queste premesse, le aziende del settore energetico intendono illustrare attraverso il presente documento le attività che hanno intrapreso e che propongono a livello di sistema per un approccio "circolare" nella gestione delle componenti degli impianti eolici dismessi.

Come meglio descritto nel seguito, la maggior parte delle componenti degli impianti eolici presentano caratteristiche già compatibili con un approccio tecnico-economico di tipo circolare.

Alcuni componenti, in particolare le **pale delle turbine eoliche**, hanno invece caratteristiche dimensionali e costruttive che implicano, allo stato attuale, una **gestione di tipo lineare** del loro ciclo di vita.

Anche in considerazione dell'obsolescenza del parco eolico italiano, i cui primi impianti sono stati costruiti a cavallo tra la fine del secondo e l'inizio del terzo millennio, le aziende operanti nel settore eolico intendono affrontare tale problema, allo scopo di individuare meccanismi e strumenti che consentano di chiudere il ciclo di vita delle pale eoliche in maniera ambientalmente, economicamente e socialmente accettabile.

Il documento è articolato in capitoli attraverso i quali, dopo una descrizione del contesto di riferimento, vengono illustrate le prospettive di dismissione degli impianti eolici più vetusti e le sfide da affrontare oggi per gestire la fine vita delle pale, quando il tema diverrà dimensionalmente rilevante.

Dopo un breve inquadramento normativo nazionale ed europeo sulla gestione dei rifiuti e sui programmi di abbandono della qualifica di rifiuto (End of Waste), vengono descritti gli approcci che le aziende del settore adottano o si prefiggono di adottare per rendere più innovativo e circolare la fine vita delle pale eoliche, anche attraverso la promozione e l'attivazione di *call for ideas* e sperimentazioni sul trattamento delle pale dismesse.

Vengono infine suggeriti i passi che gli operatori ritengono necessari per la gestione organica del tema, che non può prescindere da un approccio sinergico tra aziende, associazioni ed istituzioni accomunate dall'obiettivo di "chiudere il ciclo" dei materiali compositi e delle grandi pale eoliche in particolare.

2. Executive Summary

Gli impianti eolici sono oggi riciclabili per il 90 % del loro peso; alcuni componenti, in particolare le pale, presentano invece caratteristiche dimensionali e costruttive che implicano, allo stato attuale, una gestione di tipo lineare del loro ciclo di vita.

Ferma restando la priorità di privilegiare il riuso degli aerogeneratori dismessi - dopo un'attenta fase di ispezione e ricondizionamento -, è prevedibile che per il prossimo decennio crescenti quantità di pale eoliche dovranno essere dismesse, anche per fare spazio agli investimenti di repowering dei parchi eolici esistenti resi indispensabili dai nuovi e più sfidanti obiettivi di generazione elettrica da fonti rinnovabili.

Emerge pertanto l'esigenza e l'opportunità che il settore si prepari, al fianco degli altri attori della filiera e degli stakeholders istituzionali, ad affrontare con congruo anticipo il tema della circolarità dei materiali compositi provenienti dalle pale eoliche.

È infatti necessaria una visione multidisciplinare e multisetoriale della tematica, in quanto coinvolge diversi aspetti come l'innovazione nello sviluppo della tecnologia, la creazione di modelli di business, lo sviluppo del quadro normativo e la definizione di nuovi standard.

Affinché i nuovi modelli di business possano essere adottati efficacemente lungo l'intera catena del valore non è sufficiente conseguire determinati livelli di maturità tecnologica e commerciale; l'intero processo deve essere supportato da un impianto normativo che semplifichi e, ove necessario, supporti la gestione virtuosa dei materiali.

Seppure il settore del riciclaggio delle pale eoliche appaia ancora poco consolidato rispetto a quanto già disponibile per altri materiali, si stanno affacciando sul mercato i primi *recyclers* di materiali compositi che hanno dimostrato la validità della tecnologia adottata. A questo proposito sono state individuate e valutate le principali opzioni tecnologiche disponibili, ciascuna caratterizzata da diversi livelli di maturità, costi operativi, impronta carbonica e tipologia di materiali in uscita.

Per proseguire nel percorso di maturazione della filiera del riciclaggio delle pale eoliche in materiale composito, sono stati individuati i seguenti principali ambiti di azione:

- per la fase di consolidamento della sperimentazione delle tecnologie più opportune e promettenti, valutazione dell'opportunità di ottenimento di un'autorizzazione a condurre la fase sperimentale su pale ancora funzionanti (sacrificabili), ovvero su altre definitivamente qualificate come rifiuto;
- per queste ultime, individuazione dei codici rifiuto EER più idonei per classificare le pale eoliche a fine vita (oggi prevalentemente con fibre di vetro, ma in futuro con fibra di carbonio), in modo da orientare i player industriali all'ottenimento delle specifiche autorizzazioni per il loro recupero;

- individuazione dei criteri normativi - sia in termini di regolamenti che di eventuali provvedimenti di rango primario - atti a qualificare il processo inerente alla cessazione della qualifica di rifiuto (*end of waste*) per le pale eoliche ovvero dei materiali compositi;
- costituzione di una filiera del trattamento / ridimensionamento, riciclo e soprattutto riuso economicamente sostenibile dei materiali derivanti dalle pale eoliche, al fine del riconoscimento di eventuali strumenti di sostegno economico per tecnologie e materia prima riciclata, in ottica di “gap filling” rispetto alle materie prime vergini.

Tali iniziative, finalizzate a tutelare gli interessi e le specificità del settore eolico, devono essere condotte senza creare alcun ostacolo o vincolo a percorsi normativi già intrapresi, programmi di investimento o processi in corso di sviluppo da parte degli associati, in particolare per le iniziative di *repowering*, *reblading* e di *life-time extension*.

3. L'ambizione di un'intera filiera industriale

3.1. Il punto di vista degli operatori delle rinnovabili elettriche

Gli operatori delle fonti rinnovabili hanno assunto da molti anni impegni per contribuire a mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici adottando, nello stesso tempo, iniziative coerenti con lo sviluppo sostenibile e la transizione energetica.

In questa direzione il settore elettrico sta concentrandosi verso l'incremento della capacità di generazione elettrica da fonti rinnovabili, accelerando il processo di decarbonizzazione rispetto ad altri comparti industriali.

Oltre ad investimenti in installazioni *green field*, diverse aziende stanno adottando un ambizioso piano di rinnovamento del parco di generazione eolica attraverso interventi di *Repowering* degli impianti esistenti, sostituendo gli aerogeneratori ormai obsoleti con altri più performanti e in numero drasticamente inferiore.

In linea con tale approccio, sta emergendo l'esigenza di individuare soluzioni che pongano la sostenibilità e la circolarità al centro coinvolgendo tutta la catena del valore (da business development, ad ingegneria e costruzione, all'esercizio e la manutenzione degli impianti) spingendo sull'innovazione come strumento per raggiungere obiettivi sempre più sfidanti.

Uno dei temi rilevanti che, come associazioni del settore eolico, intendiamo affrontare oggi in tale ambito è la fine vita degli impianti eolici.

La tecnologia eolica ha sperimentato una crescita esponenziale negli ultimi decenni con migliaia di aerogeneratori installati ogni anno in tutto il mondo. Le previsioni indicano che questa tendenza continuerà per molti altri anni (le installazioni annuali dovrebbero raggiungere circa 175 GW nel 2030¹).

La vita utile media delle turbine eoliche è di circa 20 anni; dopo questo periodo, alcune delle proprietà meccaniche e strutturali dei loro componenti maggiormente sollecitati potrebbero decadere, rendendo necessari interventi manutentivi per allungarne la vita utile, oppure, laddove sia più opportuno o necessario, procedendo alla completa sostituzione con macchine di ultima generazione.

Gli obiettivi di diffusione degli impianti eolici definiti dal PNIEC per il 2030 suggeriscono peraltro di operare quanto prima il *repowering* degli impianti più datati, spesso installati sui siti caratterizzati dalla migliore ventosità. Attraverso il *repowering*, che prevede la sostituzione integrale degli aerogeneratori esistenti con altri di ultima generazione, è infatti possibile incrementare notevolmente la potenza eolica installata senza occupare nuovi spazi, sfruttando l'enorme progresso tecnologico compiuto in due decenni nel settore eolico.

¹ Source: IRENA, GWEC, AWEA, EWEA, IEA

A seguito delle attività di sostituzione della prima generazione di aerogeneratori sopra descritte, il quantitativo di pale eoliche in dismissione in Italia nel prossimo decennio è stimabile nell'intervallo tra le 30.000 e le 40.000 tonnellate (glass fiber, carbon fiber e resine), con un profilo di distribuzione nel periodo riportato in fig. 1.

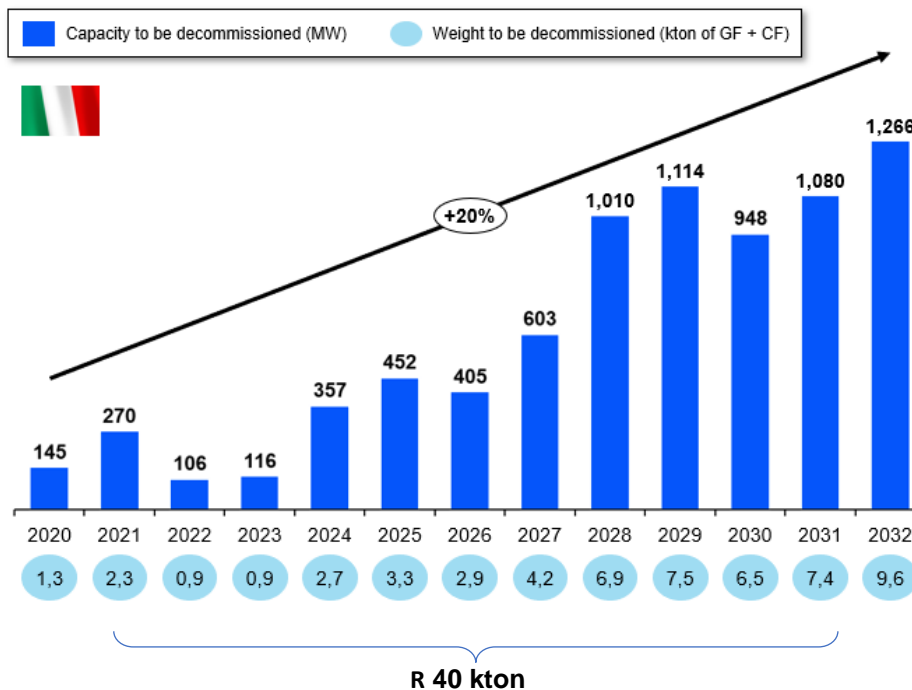


Fig. 1: Profilo di dismissione di pale eoliche in Italia in materiale composito nel periodo 2020-2032.²

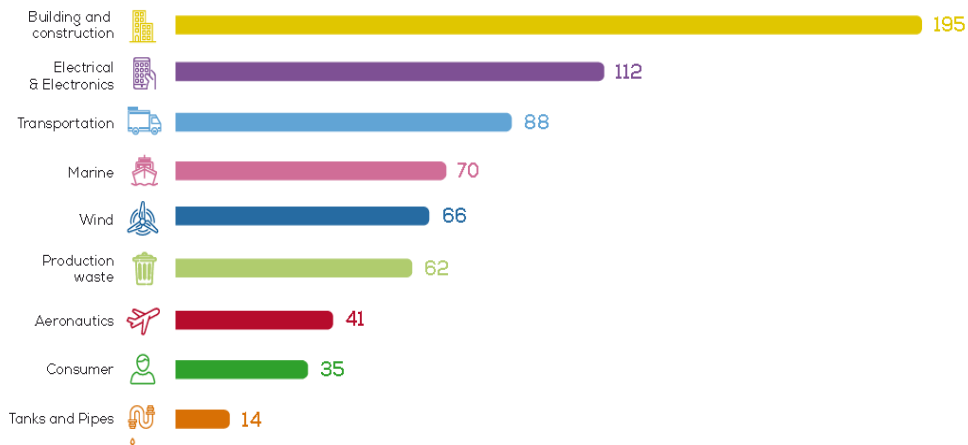
La maggior parte di un aerogeneratore è costituita da materiale metallico, quindi facilmente riciclabile; fanno eccezione le pale che sono costituite per l'80-90% in peso di materiali compositi (resine epossidiche arricchite con fibre di vetro e, in alcuni casi, anche fibra di carbonio), oltre ad altri materiali minori (ad es. colla, vernici, schiuma di polistirene, schiuma poliuretana e legno di balsa). Il recupero delle materie costituenti le pale risulta molto difficile allo stato attuale per la mancanza di una filiera consolidata sia nella valorizzazione della specie di rifiuto in questione che nel successivo riutilizzo delle materie da esso potenzialmente recuperabili. Ciò si traduce in un onere non indifferente per le aziende che scelgono di investire in questa tecnologia verde ed in un onere per la comunità, allorché tali rifiuti vengano gestiti secondo le altre opzioni disponibili:

² Source: GWEC, EWEA, EUROBSERV'ER, IRENA, IEA, WindEurope, PwC Strategy& analysis

discarica ed incenerimento. Tali operazioni sono ulteriormente complicate dalla notevole dimensione delle pale stesse (si consideri che la pala di un aerogeneratore di taglia “kilowatt” è più lunga dell’ala di un aereo di linea). Per tali ragioni, la scelta obbligata per buona parte dei casi è costituita dal conferimento in discarica o dall’incenerimento.

Come si vede dai grafici riportati in fig.2, il problema della gestione dei materiali compositi a fine vita non riguarda solo il settore eolico, ma coinvolge anche altri settori industriali che utilizzano questo materiale nella loro catena produttiva.

Estimated composite waste per sector in thousands of tonnes in 2025



Composite waste generation – sector trends (ktons/year)

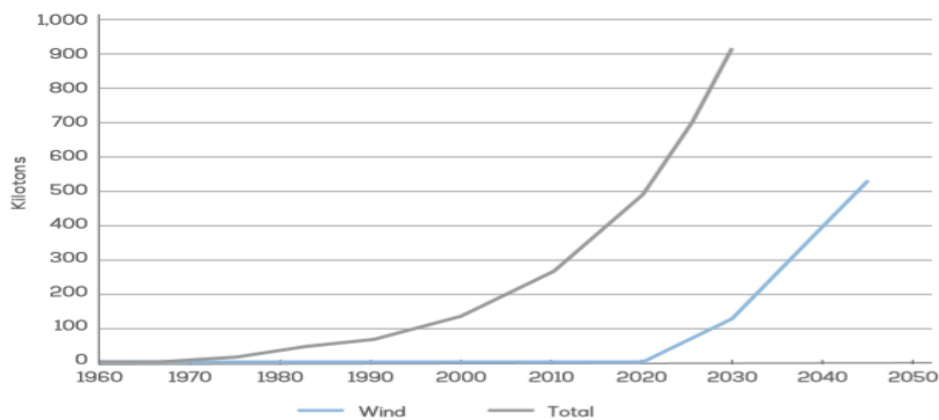


Fig. 2: Previsione di produzione rifiuti in materiale composito cross-settoriale al 2025 (kton)³ e trend di generazione di rifiuti compositi (kton/y)⁴.

Anche alla luce dei quantitativi prevedibili per il prossimo decennio appena illustrati, risulta fondamentale promuovere approcci sostenibili nel lungo termine per l'intera catena del valore del settore eolico, identificando già oggi soluzioni efficaci per la gestione delle pale eoliche in dismissione secondo logiche di circolarità, favorendo le soluzioni più efficienti sul piano ambientale ed economico.

3.2. Il punto di vista dei produttori di turbine eoliche

Il decommissioning degli aerogeneratori viene effettuato adottando tecniche analoghe a quelle impiegate per l'installazione e il commissioning. Gli aerogeneratori in buone condizioni vengono rivenduti sul mercato dell'usato previa verifica ed eventuale ricondizionamento, specialmente sui mercati extraeuropei; nei mercati europei è più complesso, dal momento che i sistemi di interfaccia con la rete di trasmissione elettrica non sono più in grado di rispettare i requisiti di connessione richiesti dall'evoluzione regolatoria in materia.

I singoli componenti della turbina, in base alle loro condizioni, possono essere ricondizionati, dopo un accurato processo di controllo di qualità, conservati e impiegati come componenti di ricambio per le stesse tipologie di turbine che sono ancora in operazione.

Nel caso in cui le proprietà meccaniche e strutturali residue dei componenti dell'aerogeneratore non permettano il ricondizionamento, si procede con il riciclo e lo smaltimento.

In Germania, secondo Enercon, uno dei produttori leader di aerogeneratori, il materiale composito GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), segue solitamente uno smaltimento con recupero termico oppure viene impiegato come materiale grezzo secondario nelle fabbriche di cemento.

Gli scarti di produzione in GFRP vengono principalmente usati come combustibile alternativo o nell'industria del cemento a valle di un opportuno processo chimico-fisico. La termovalorizzazione del GFRP⁵ è una pratica consolidata in Germania e praticata da molte aziende.

Ad oggi l'eolico contribuisce solo in piccola parte rispetto all'ammontare totale di rifiuti: in Germania si installano in media 40.000 t all'anno di GFRP nel settore eolico, che dopo circa 20

³ Source: How wind is going circular, ETIP Wind

⁴ Source: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf>

⁵ Il potere calorifico inferiore delle pale si attesta tra i 18.000 e i 25.000 kJ/kg, a seconda della composizione. Come confronto, si consideri che quello del legno arriva a 15.000 kJ/kg.

anni giungeranno a fine vita. In base alla potenza eolica incrementale prevista dai piani energetici del paese (Renewable Energy Act – EEG, noto come Energiewende), ciò garantirà una disponibilità quasi costante di GFPR da dismettere nel medio termine.

Sempre in Germania, diverse aziende operano nel settore del riciclo del GFPR: Neocomp GmbH, attiva in questo settore, ha anche vinto il GreenTec Award nel 2017 per il riciclo degli scarti delle fibre di vetro rinforzata e plastica. Altre Aziende di riciclo hanno ora adattato i loro dispositivi di termovalorizzazione al trattamento delle pale eoliche in GFPR.

4. Contesto normativo in Europa

4.1. End of waste

Da diversi anni è in atto una chiara spinta a livello europeo verso una maggiore circolarità, come da ultimo dimostrato dal nuovo Piano d'azione UE per l'economia circolare (2020)⁶.

Finora l'attenzione dell'economia circolare si è concentrata su plastica monouso, microplastiche, oxo-plastiche ed imballaggi in plastica, ma non sui materiali compositi.

Attraverso il pacchetto europeo di misure sull'economia circolare approvato nel maggio 2018 sono state modificate diverse direttive in materia di rifiuti e discariche, in particolare la direttiva quadro sui rifiuti (2008/98/CE, aggiornata nella direttiva 2018/851/UE) e le direttive "speciali":

- rifiuti di imballaggio (1994/62/CE), aggiornata nella direttiva 2018/852/UE,
- discariche (1999/31/CE), aggiornata nella direttiva 2018/850/UE
- rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche, cosiddetti RAEE (2012/19/UE),
- veicoli fuori uso (2000/53/CE),
- pile e accumulatori (2006/66/CE).

I principali obiettivi introdotti riguardano:

- il riciclaggio entro il 2025 per almeno il 55% dei rifiuti urbani (60% entro il 2030 e 65% entro il 2035);
- la riduzione dello smaltimento in discarica, che dovrà scendere al 10% entro il 2035;
- il riciclaggio del 65% degli imballaggi entro il 2025 e il 70% entro il 2030;
- la raccolta separata dei rifiuti organici (entro il 2023) e dei rifiuti tessili (entro il 2025).

In Italia la cessazione della qualifica di rifiuto (end of waste) è disciplinata, in termini generali, dall'art. 184-ter del D.Lgs. 152/2006 ove si prevede, tra l'altro, che i criteri di end of waste "sono adottati in conformità a quanto stabilito dalla disciplina comunitaria ovvero, in mancanza di criteri comunitari, caso per caso per specifiche tipologie di rifiuto attraverso uno o più decreti del Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare".

La riforma della disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto, in attuazione delle disposizioni dell'articolo 6 della direttiva 2008/98/CE, rappresenta uno dei criteri previsti dall' art. 16 della legge 4 ottobre 2019, n. 117 (legge di delegazione europea 2018), nell'ambito della delega concessa al Governo per il recepimento delle citate nuove direttive su rifiuti e imballaggi.

⁶ European Commission (2020) Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/>

In attuazione della disposizione attualmente vigente sono stati emanati quattro regolamenti *end of waste*:

- D.M. 14 febbraio 2013, n. 22 (che disciplina la cessazione della qualifica di rifiuto di determinate tipologie di combustibili solidi secondari),
- D.M. 28 marzo 2018, n. 69 (che disciplina il conglomerato bituminoso),
- D.M. 15 maggio 2019, n. 62 (prodotti assorbenti per la persona (PAP)),
- D.M. 31 marzo 2020, n. 78 (gomma vulcanizzata derivante da pneumatici fuori uso).
- D.M. 22 settembre 2020, n. 188 (carta e cartone).

Al momento sono ancora in via di definizione o in programma i provvedimenti relativi ad altre tipologie di rifiuti, tra cui la vetroresina⁷.

4.2. Rifiuti

Secondo la legislazione europea ed italiana, un bene una sostanza od oggetto cessa di essere tale e deve essere considerato un rifiuto, qualora l'operatore che le detiene presso i propri impianti se ne disfi, abbia l'intenzione o la necessità di disfarsene.

Ai sensi dell'art. 184 c.3) del DLgs 152/2006 e ss.mm.ii sono qualificati come rifiuti speciali:

- a) i rifiuti prodotti nell'ambito delle attività agricole, agro-industriali e della silvicoltura, ai sensi e per gli effetti dell'articolo 2135 del Codice civile, e della pesca;
- b) i rifiuti prodotti dalle attività di costruzione e demolizione, nonché i rifiuti che derivano dalle attività di scavo, fermo restando quanto disposto dall'articolo 184-bis;
- c) i rifiuti prodotti nell'ambito delle lavorazioni industriali se diversi da quelli di cui al comma 2;
- d) i rifiuti prodotti nell'ambito delle lavorazioni artigianali se diversi da quelli di cui al comma 2;
- e) i rifiuti prodotti nell'ambito delle attività commerciali se diversi da quelli di cui al comma 2;
- f) i rifiuti prodotti nell'ambito delle attività di servizio se diversi da quelli di cui al comma 2;
- g) i rifiuti derivanti dall'attività di recupero e smaltimento di rifiuti, i fanghi prodotti dalla potabilizzazione e da altri trattamenti delle acque e dalla depurazione delle acque reflue, nonché i rifiuti da abbattimento di fumi, dalle fosse settiche e dalle reti fognarie;

⁷ Ministero dell'Ambiente: "Stato di attuazione dei Decreti di cui all'art. 184-ter del dlgs 152/06 "cessazione dalla qualifica di rifiuto" e relativa programmazione", febbraio 2021.

- h) i rifiuti derivanti da attività sanitarie se diversi da quelli all'articolo 183, comma 1, lettera b-ter);
- i) i veicoli fuori uso.

In qualità di rifiuto speciale, le pale eoliche sono soggette alle disposizioni sul recupero e smaltimento dello stesso DLgs 152/2006.

Secondo il Decreto, lo smaltimento finale (conferimento in discarica) è una **legittima destinazione** delle pale eoliche, benché da perseguire una volta verificata l'impossibilità tecnica ed economica di procedere con il recupero secondo **tecniche economicamente e tecnicamente sostenibili**.

I rifiuti da avviare allo smaltimento finale devono essere il più possibile **ridotti sia in massa che in volume**, presso idonei impianti di smaltimento situati il più vicino possibile ai luoghi di produzione o raccolta, anche in sito al momento della dismissione - ove fattibile - al fine di ridurre i costi di trasporto e di salvaguardare l'ambiente e le persone.

Fatte salve le iniziative sull'End of waste già descritte, ad oggi non esistono specifici riferimenti normativi per il settore dei rifiuti di materiale composito.

Come già accennato, le pale eoliche sono costituite da materiale composito in fibra di vetro e misto fibra di vetro / fibra di carbonio, poliuretano, ed in percentuale minore legno, metallo, conduttori in rame e rivestimenti.

La novità di questa prossima produzione di rifiuti speciali si riflette altresì nella molteplicità dei codici EER applicabili in accordo con la classificazione Europea, ovvero nella **mancanza di un singolo codice specifico per le pale eoliche**. Attualmente il codice più spesso utilizzato è il **17.02.03**: rifiuti dalle attività di costruzione e demolizione – plastica.

Anche i seguenti codici sono spesso utilizzati a livello nazionale⁸:

- 07.02.13 rifiuti da processi chimici organici – rifiuti della produzione, formulazione, fornitura ed uso PFFU) di plastiche, gomme sintetiche e fibre artificiali - rifiuti plastici
- 10.11.03 rifiuti provenienti da processi termici - rifiuti della fabbricazione del vetro e di prodotti di vetro - scarti di materiali in fibra a base di vetro
- 10.11.12 rifiuti provenienti da processi termici - rifiuti della fabbricazione del vetro e di prodotti di vetro - rifiuti di vetro diversi da quelli di cui alla voce 10 11 11

⁸ <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf>

- 10.11.99 rifiuti provenienti da processi termici - rifiuti della fabbricazione del vetro e di prodotti di vetro - rifiuti non specificati altrimenti
- 12.01.05 rifiuti prodotti dalla lavorazione e dal trattamento fisico e meccanico superficiale di metalli e plastica - rifiuti prodotti dalla lavorazione e dal trattamento fisico e meccanico superficiale di metalli e plastiche - limatura e trucioli di materiali plastici

In virtù della composizione delle pale eoliche, talvolta sono stati utilizzati anche il codice 16.02.14: “Rifiuti provenienti da apparecchiature elettriche ed elettroniche - apparecchiature fuori uso, diverse da quelle di cui alle voci da 16 02 09 a 16 02 13” e il 04.02.09: “Rifiuti dell’industria tessile - Rifiuti da materiali compositi (fibre impregnate, elastomeri, plastomeri)”.

In alcuni casi è stato proposto anche il codice EER 16.01.99: “Rifiuti non specificati altrimenti provenienti da veicoli fuori uso appartenenti a diversi modi di trasporto”, in ragione dell’utilizzo prevalente della vetroresina.

5. Innovazione e Circular Economy per gestire la fine vita delle pale eoliche

Come è noto, approcciare il fine vita dei materiali secondo i principi della Circular Economy significa prediligere strategie sostenibili atte a valorizzare i materiali e le caratteristiche tecniche degli stessi rispetto al conferimento in discarica o alla valorizzazione termica, il tutto in un'ottica di minimizzazione dell'utilizzo di materie prime per i cicli produttivi. In tale ottica, nell'ultimo decennio, la maggioranza dei membri dell'Unione Europea ha votato a favore delle leggi che vietano lo smaltimento in discarica di tali materiali, per cui diventa urgente identificare e promuovere soluzioni sostenibili per la gestione del fine vita.

Per alcune categorie merceologiche che consentono una gestione più agevole della fase di riciclo, è stato applicato il principio dell'*Extended Producer Responsibility (EPR)*. Sulla base di tale approccio, per i comparti delle apparecchiature elettriche ed elettroniche, inclusi i pannelli fotovoltaici, è stata predisposta a livello europeo ed implementata dagli Stati membri la *Waste Electrical and Electronic Equipment Directive (2012/19/EU)*.

Si riporta di seguito la scala dei possibili approcci di gestione del rifiuto inquadrati rispetto al grado di sostenibilità:



Fig. 3: Possibili approcci di gestione del rifiuto.

Diverse aziende operanti nel settore eolico stanno sviluppando nuovi modelli ed approcci sostenibili per la filiera eolica: Prevenzione, Life Extension, Riuso e Riciclo. Per ciascuno di essi oltre a condurre studi tecnico-economici, stanno avviando collaborazioni con start-up, aziende,

centri di ricerca, Università, etc. al fine di andare a definire l'intera filiera del valore. Di seguito si riporta una breve sintesi delle azioni intraprese.

5.1. Prevenzione

Lo studio di nuovi materiali e di nuovi processi di costruzione per la produzione di turbine eoliche è l'approccio più sostenibile e rappresenta sicuramente la sfida più futuristica ed innovativa. Le utilities stanno osservando questo settore con molta attenzione, auspicando in un futuro prossimo di poter acquistare aerogeneratori costruiti con materiali innovativi e sostenibili.

La danese Vestas, uno dei principali produttori europei di aerogeneratori, intende raggiungere l'obiettivo "zero waste turbine" entro il 2040⁹, seguendo un processo di graduale avvicinamento a tale risultato.

Come primo passo si concentreranno sul miglioramento della riciclabilità dei rotori delle turbine (intesi come gruppo rotante che include le pale eoliche).

Avrebbero quindi introdotto obiettivi incrementali per aumentare il tasso di riciclabilità di questi componenti, portandolo dall'attuale 42% al 50% entro il 2025 e al 55% entro il 2030.

Per conseguire tali risultati, entro due anni intendono sviluppare ed implementare una nuova strategia di gestione dei rifiuti, secondo i principi dell'economia circolare applicati alle diverse fasi della catena del valore (approvvigionamento, progettazione, produzione, assistenza e fine vita).

In parallelo, starebbero implementando diverse iniziative progettate per affrontare la gestione del fine vita delle pale, come l'esplorazione di nuove tecnologie di riciclaggio, collaborando con gli altri attori della catena del valore dei materiali e sviluppando linee guida per lo smantellamento delle turbine eoliche. Ne è un esempio il progetto finanziato danese Decomblades, che vede tra i partecipanti alcuni dei principali produttori di pale eoliche, come la stessa Vestas, Siemens-Gamesa e LM Wind Power.

Nel campo dei materiali compositi stanno emergendo alcune soluzioni interessanti, ad esempio i composti polimerici rinforzati con fibre naturali su cui sta iniziando a crescere l'interesse di alcuni settori (automobilistico, navale, edile) grazie alla loro bassa densità, i materiali compositi termoplastici, o termoindurenti con processo di crosslinking reversibile, che sono più facilmente riciclabili. Affinché questa transizione verso materiali innovativi sia realizzabile, sono state avviate interlocuzioni con i principali produttori stimolandoli ed indirizzando tutta la catena del valore verso scelte tecnologiche più sostenibili.

⁹ https://www.vestas.com/en/about/sustainability#!grid_0_content_3_Container

5.2. Life-time Extension

L'estensione della vita utile consiste nel mettere in atto, dopo opportune valutazioni tecnico-economiche, tutte le azioni possibili in ambito di esercizio e manutenzione di un componente, affinché la sua capacità di adempiere la propria funzione venga mantenuta per il maggior tempo possibile.

In questo ambito gli operatori eolici stanno studiando ed implementando soluzioni innovative per il settore eolico come sensori di nuova generazione che forniscono informazioni sullo stato di salute delle turbine e sulla vita residua delle macchine che compongono l'aerogeneratore. Di seguito si riportano alcuni esempi di soluzioni attualmente in fase di studio/utilizzo:

- sensori per la rilevazione delle vibrazioni, utili sia per determinare lo stato di usura dei cuscinetti dei componenti rotanti (e.g. gearbox, albero primario, generatore) che per monitorare lo stato della turbina e del suo ancoraggio con le fondamenta;
- soluzioni con sensori sulle pale per misurare vibrazioni e deformazioni al fine di monitorarne lo stato;
- misure della conduttività dei lubrificanti;
- sensori di rilevazione del ghiaccio, utili nelle aree geografiche in cui la frequente formazione di lastre di ghiaccio, oltre a determinare perdite di produzione e problemi di sicurezza, causa un sovraccarico meccanico sulle pale e relativo indebolimento strutturale;
- robot / droni in grado di avvicinarsi alla pala e accoppiarsi per poter condurre attività di ispezione, riparazione, rivestimento, misure di conduttività.

A questi si aggiungono altri studi di procedure di esercizio e manutenzione volte a preservare il più a lungo possibile le funzionalità dei componenti.

Un esempio di estensione della vita utile degli impianti oltre i 20 anni stabiliti dalla IEC è il programma di Siemens Gamesa Renewable Energy, la cui ingegneria ha creato i modelli agli elementi finiti delle turbine eoliche che costituiscono la flotta in esercizio con priorità alle piattaforme che hanno mediamente tra i 10 e i 20 anni. Alimentando questi modelli con i dati reali del sito e grazie alle informazioni sul sistema di controllo della turbina si è potuto calcolare la vita residuale a fatica dei principali componenti della turbina comparandoli con i 20 anni convenzionali e generare strategie manutentive ad hoc per frequenza delle ispezioni, tempistica delle sostituzioni e aggiornamenti tecnici necessari, finalizzate a raggiungere 25 o 30 anni di esercizio.

5.3. Riuso

La soluzione di riuso da perseguire prioritariamente è il riutilizzo dell'aerogeneratore nel suo complesso, opportunamente ricondizionato al fine di ristabilirne la vita utile e l'efficienza.

Negli ultimi anni è stata osservata una maggiore difficoltà nel trovare pale sostitutive per i modelli più vetusti o per pale ormai fuori mercato. È pertanto ipotizzabile che un selezionato numero di pale verrà conservato e/o venduto come *spare part*.

Pur trattandosi di un mercato secondario dimensionalmente piuttosto limitato e subordinato valutazioni di fattibilità sito-specifiche, è talvolta percorribile l'opzione di rilocalizzazione degli aerogeneratori in altri siti contraddistinti da ventosità molto alte, infrastrutturazione di rete / stradale non ottimale, eventualmente appartenenti a Paesi che si trovano in una fase iniziale del loro percorso di decarbonizzazione/elettrificazione, come ad esempio in alcune zone del Centro e Sud America.

Quando invece un componente non è più in grado di adempiere alla propria funzione nel contesto in cui sta operando, la soluzione più sostenibile è utilizzarlo in un contesto diverso, nel quale possa mantenere il suo valore, a fronte di limitate modifiche. Le pale eoliche, essendo realizzate con materiali compositi, risultano particolarmente adatte a questo scopo in quanto il materiale è durevole, resistente al danneggiamento e all'aggressione ambientale e facile da riparare. In Figura 4 sono mostrate, a titolo di esempio, alcune applicazioni sperimentali legate al riutilizzo delle pale eoliche.



**Willemsplein
Rotterdam (NL)**



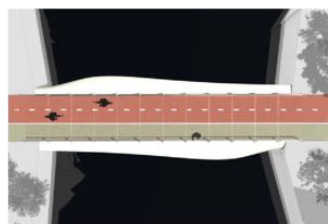
**Parco Giochi Wikado
Rotterdam (NL)**



**Fermata Autobus
Almere (NL)**



**Progetto Blade Pole
USA**



**Progetto Blade Bridge
Irlanda**



**Progetto Emer-Shelters
USA**

Fig. 4: Esempi di riutilizzo di pale eoliche (Fonte: Assocompositi).

Attualmente in Italia la valutazione dell'opzione riuso è in fase preliminare, a causa della particolare geometria ed ingombro sterico del componente, della limitata presenza di pale giunte finora a fine vita e del mercato ancora embrionale di prodotti ottenuti direttamente dalle pale.

Alcune aziende hanno deciso di esplorare le opportunità esistenti e di condurre approfondimenti e verifiche di fattibilità tecnico-economica, anche coinvolgendo aziende già presenti sul mercato con prodotti costruiti a partire da pale eoliche (es. complementi d'arredo civile ed urbano).

5.4. Riciclo

I processi di riciclo ad oggi consentono di recuperare i materiali che compongono la pala (in modo indistinto oppure separando le fibre dalla resina) per riprocessarli al fine di generare un nuovo prodotto che ha caratteristiche e finalità diverse dal componente di partenza.

Alcune aziende ad oggi si trovano ad un buon livello di approfondimento tecnologico dei vari processi di riciclo; seppure sia un settore ancora poco consolidato rispetto al riciclo di altri materiali, si stanno affacciando sul mercato i primi recyclers di materiali compositi che hanno dimostrato la loro tecnologia passando da attività di laboratorio a primi dimostratori.

Di seguito sono schematizzati i principali processi di riciclo in via di sviluppo^{10 11}, brevemente descritti immediatamente sotto:

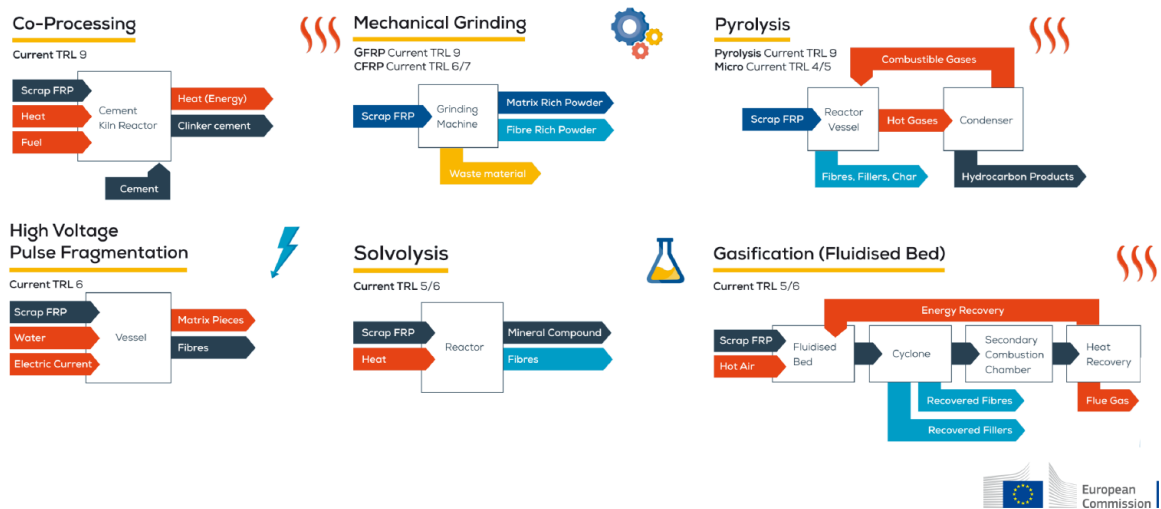


Fig. 5: Descrizione schematica dei principali processi di riciclo in via di sviluppo

¹⁰ Nell'Appendice sono riportati ulteriori approfondimenti

¹¹ EU Outlook on Wind Energy Research: A Case for Circularity – European Commission, atti ETIPWind 4 mag 2021

- Riciclo meccanico: è uno dei processi più comuni grazie al potenziale di riutilizzo del macinato per alcune applicazioni, principalmente nei seguenti settori:
 - o produzione di plastica,
 - o costruzioni edili/civili,
 - o formazione di sottofondi stradali, ovvero additivazione per asfalti ad alta resistenza all'usura per uso autostradale o aeroportuale,
 - o produzione di pannelli per isolamento termico, acustico,
 - o realizzazione di mobili, manufatti per arredo e oggetti di design.

Garantisce un alto tasso di produttività, diminuisce il valore del materiale riciclato e consente di ottenere prodotti contenenti fino al 40% di materiale di scarto.

- Co-processing per la produzione di cemento: si tratta di una delle principali tecnologie oggi disponibili ad un elevato livello di sviluppo industriale nella quale avviene, oltre al recupero di energia dato dalla combustione della resina, anche un recupero di materia derivante dall'inclusione della fibra di vetro nella componente cementizia.
- Solvolis: il processo è incentrato su una reazione chimica di un solvente con il materiale composito in un reattore pressurizzato ad alta temperatura. Garantisce un recupero completo di fibre e resine pulite ma è un processo che necessita ulteriori ottimizzazioni per aumentarne l'efficienza, oltre a richiedere l'utilizzo di solventi, in taluni casi a basso impatto ambientale e completamente riutilizzabili. In tale categoria rientra il processo di Idrolisi a temperatura ultra-elevata (UHTH), che prevede la gassificazione ad alta temperatura della frazione organica per successiva cogenerazione di elettricità e calore.
- Pirolisi: il processo prevede la decomposizione termica della parte organica dei compositi in ambiente inerte. È altamente scalabile ma le fibre risultano generalmente degradate alla fine del processo in termini di caratteristiche meccaniche. Tale processo risulta molto promettente, anche se ancora lontano dalla sostenibilità economica.
- High voltage pulse fragmentation: il processo elettromeccanico prevede la separazione delle fibre di vetro dalla matrice tramite l'uso di elettricità. Consente di ottenere una buona qualità di fibre, ma richiede molta energia ed attualmente risulta ad uno stadio poco avanzato di sviluppo tecnologico.
- Letto fluido: processo termico che consente di separare le fibre dalla matrice ottenendo però un basso livello di qualità delle prime.

Da alcuni anni si stanno sviluppando le prime collaborazioni tra aziende e centri di ricerca italiani ed europei per sviluppare e validare i processi di recupero analizzando anche la qualità delle materie prime secondarie e dei prodotti che si ottengono.

In parallelo alcune aziende si stanno muovendo anche sul fronte industriale verso la creazione di un modello di business che coinvolga vari operatori in un impianto dimostratore su scala commerciale. La filiera sarà composta da produttori ed operatori energetici che forniranno il materiale composito da recuperare, dagli operatori che effettuano il pretrattamento ed il processo di riciclo, e dagli utilizzatori finali che potranno acquistare il materiale secondo per integrarlo nel loro processo produttivo.

5.5. Recupero energetico / Smaltimento

Il recupero energetico delle pale eoliche rappresenta la trasformazione di questi rifiuti in un combustibile o energia termica dopo aver rimosso tutti i singoli componenti che possono essere riutilizzati. Si tratta di un'opzione che sarebbe meglio evitare prediligendo approcci più circolari.

Come già evidenziato, lo smaltimento rappresenta l'unica alternativa ad oggi esistente per gestire le pale eoliche a fine vita, ma risulta essere ampiamente impattante sia per le aziende che per la comunità.

A livello nazionale, quattro paesi europei fanno un chiaro riferimento ai materiali compositi nella loro legislazione sui rifiuti: Germania, Austria, Paesi Bassi e Finlandia. Questi paesi vietano che i compositi vengano conferiti in discarica o inceneriti. La Francia sta valutando la possibilità di introdurre un obiettivo di riciclo per le turbine eoliche nel suo quadro normativo.

In Germania, il divieto di collocare direttamente in discarica rifiuti con contenuto organico totale superiore al 5% è entrato in vigore nel 2009. Considerando il contenuto organico costituito dalla resina, le pale non possono essere smaltite in discarica.

Nei Paesi Bassi, il vigente Piano Nazionale di Gestione dei Rifiuti in discarica dei rifiuti compositi vieta "in linea di principio" il conferimento del composito in discarica. È però concessa un'esenzione qualora il costo del trattamento alternativo sia superiore a 200 €/t.

Essendo il costo di riciclo meccanico delle pale in Olanda compreso tra 500-1.000 €/t compreso il taglio in spezzoni in situ (di cui 150-300 €/t per il solo grinding), di fatto il conferimento in discarica resta ancora la pratica standard.

6. Barriere e nuove opportunità verso un approccio circolare

A fronte delle esperienze maturate da alcune aziende operanti nel settore eolico, è possibile evidenziare alcune barriere che al momento rendono complessa la gestione circolare delle pale eoliche a fine vita in Italia.

Di seguito si riportano le criticità emerse durante i primi casi applicativi, già parzialmente descritti nei paragrafi precedenti e le possibili proposte per promuovere un approccio circolare per il recupero delle pale eoliche dismesse e, contestualmente, favorire lo sviluppo di una specifica filiera industriale.

Tali iniziative dovranno essere condotte senza ostacolare i percorsi normativi già intrapresi, né i programmi di investimento o processi in corso di sviluppo da parte degli operatori, spesso funzionali al raggiungimento dei target di decarbonizzazione adottati dal nostro Paese.

6.1. Criticità

- Eterogeneità dei codici EER attualmente utilizzati per classificare le pale eoliche in materiale composito in fibra di vetro;
- limitato numero in Italia di operatori che dispongono di un processo di riciclo idoneo ed autorizzato, sia per il pretrattamento (taglio e macinazione), che per il trattamento (processo di riciclo). Tali operatori possiedono autorizzazioni al recupero dei rifiuti non sempre compatibili con i codici EER assegnati alle pale;
- presenza di aziende ad oggi individuate come potenziali utilizzatori del materiale riciclato o pretrattato che non dispongono di un'autorizzazione alla gestione di rifiuti all'interno del proprio processo produttivo;
- a causa della scarsità di operatori in Italia e del limitato numero di pale eoliche a fine vita finora disponibili per eseguire i test di riciclo, è stata valutata la possibilità di un trasporto transfrontaliero con notifica della pala dismessa verso operatori esteri, opzione spesso esclusa per la complessità degli aspetti logistici ed autorizzativi;
- necessità di una regolamentazione di settore che introduca il principio dell'EPR – Extended Producer Responsibility - a carico dei produttori;
- assenza di un decreto End of Waste specifico per la vetroresina;
- basso grado di maturità (TRL) per soluzioni di recupero con basso down-cycling;
- assenza di standard di accettabilità specifici per i materiali risultanti dal processo di riciclo al riutilizzo in altri processi produttivi;

- difficoltà nel rendere conveniente e competitiva la scelta di questi materiali rispetto a quelli vergini;
- assenza di un consolidato mercato di sbocco per i materiali provenienti dalle operazioni di trattamento e recupero;
- basso valore intrinseco del materiale recuperabile.

6.2. Proposte

Nell'interesse comune si ritiene opportuno accelerare le azioni per individuare criteri e implementare meccanismi che consentano di facilitare la dismissione a fine vita delle pale eoliche. A questo proposito sarebbe auspicabile in particolare:

- valutare ed eventualmente promuovere l'ottenimento di un'autorizzazione a condurre eventuali fasi sperimentali per lo sviluppo di processi di riciclo su pale sacrificabili a cui non applicare la classificazione di rifiuto, nei casi in cui si rendesse necessaria, entro quantità e tempistiche limitate. In parallelo, promuovere attività di ricerca per creare nuovi mercati di sbocco per le materie prime seconde provenienti dalle operazioni di trattamento e recupero;
- definire linee guida e best practices che, qualora si dovesse ricorrere al sezionamento "in campo" delle pale, garantiscano il minor impatto sull'ambiente e sulla salute/sicurezza;
- accelerare il processo di definizione del **regolamento/DM sull'End Of Waste** per i materiali compositi, valutandone altresì la sua applicabilità al caso delle pale eoliche;
- individuare i codici EER considerati più idonei per classificare le pale eoliche a fine vita (oggi prevalentemente con fibre di vetro, ma nei prossimi anni anche con fibra di carbonio), in modo da orientare i player industriali all'ottenimento delle specifiche autorizzazioni per il loro recupero;
- definire nuovi standard di accettabilità per i materiali ottenuti dai processi di riciclo esistenti;
- promuovere la costituzione di una filiera del trattamento / ridimensionamento, riciclo e soprattutto riuso economicamente sostenibile dei materiali derivanti dalle pale eoliche, al fine del riconoscimento di eventuali **strumenti di sostegno economico** per tecnologie e materia prima riciclata, in ottica di "gap filling" rispetto alle materie prime vergini;

Come già accennato, per non ostacolare il perseguimento degli obiettivi di decarbonizzazione già in atto, tali iniziative dovranno essere condotte senza creare alcun pregiudizio o ulteriore vincolo ai programmi di investimento già autorizzati / in corso di sviluppo da parte degli associati, in particolare per le iniziative di repowering, reblading e di life-time extension.

7. Conclusioni - Creazione di un ecosistema complesso

La gestione della fine vita delle pale eoliche (ed in generale dei materiali compositi arricchiti con fibre di vetro o carbonio) richiede un approccio multidisciplinare e multisettoriale, in quanto coinvolge diversi aspetti come l'innovazione nello sviluppo della tecnologia e la creazione di modelli di business, lo sviluppo del quadro normativo e la definizione di nuovi standard.

Una singola azienda non può risolvere il problema, per questo alcuni operatori insieme alle associazioni del settore eolico hanno iniziato a coinvolgere ed attivare altri attori come Università, istituti di ricerca e sviluppo, altre associazioni ed aziende. In tale contesto sono stati selezionati partner che propongono approcci innovativi (dalle società di logistica, agli OEMs, dai recyclers, agli utilizzatori finali del materiale riciclato appartenenti a diversi settori) al fine di supportarli nello sviluppo e nella valutazione di scalabilità dei loro processi fino al livello industriale.

Affinché i nuovi modelli di business possano essere adottati efficacemente lungo l'intera catena del valore non basta raggiungere la maturità tecnologica e commerciale; l'intero processo deve essere supportato da normative e disposizioni legislative, che semplifichino e, al limite, incentivino la gestione virtuosa dei materiali. I già citati decreti di recepimento delle direttive Europee su discariche ed economia circolare, pur focalizzati sulla gestione dei rifiuti urbani, delineano correttamente a livello nazionale la volontà di ridurre il ricorso al conferimento in discarica dei rifiuti. In tal senso lo sforzo industriale degli operatori del settore è finalizzato a favorire lo sviluppo di un percorso virtuoso per i notevoli quantitativi di questi materiali compositi che saranno prodotti nei prossimi anni, quindi ad evitare conferimenti in discarica in territorio nazionale e/o la ricerca di impianto di recupero all'estero quando non presenti in Italia, anche (e soprattutto) quando il processo sarà consolidato ed applicato massivamente a tutti i parchi eolici nazionali e globali.

A fronte di questo scenario è opportuno aprire un dialogo aperto tra aziende, associazioni dell'intera filiera del riciclo ed istituzioni con l'obiettivo comune di favorire l'economia circolare dei materiali compositi – ed in particolare delle pale eoliche - attraverso una serie di soluzioni efficaci.

Appendice 1: approfondimenti sulle tecnologie di riciclo

1. Principali tipi di processo

1.1. Riciclo meccanico

Il processo di riciclo meccanico, ovvero di macinazione, prevede un primo stadio, opzionale a seconda della destinazione d'uso del macinato, di separazione e rimozione dei materiali presenti nel corpo pala, che possono essere riciclati separatamente e che sono tipicamente indesiderati nel prodotto riciclato finale, come acciaio, legno di balsa e poliuretano espanso. Il secondo passo prevede una triturazione (o riduzione volumetrica) primaria dei conci di pala eolica precedentemente tagliati presso l'impianto eolico per facilitarne il trasporto, utilizzando frantoi o mulini per arrivare a pezzi di lunghezza di circa 5-20 cm.

Segue poi la triturazione secondaria con successiva vagliatura, che utilizza macchinari differenti che permettono via via di ridurre la granulometria fino a quella desiderata per l'applicazione specifica. Ad esempio, per raggiungere una granulometria <1mm, sono necessari circa 3 fasi di macinazione.

Qualora richiesto dalla destinazione finale del macinato, durante le fasi di vagliatura è ancora possibile effettuare una separazione gravimetrica dei materiali tramite separatori ad aria, a vibrazione o tramite cicloni.

Il macinato che si ottiene è composto da una miscela di frammenti di fibre di vetro e resina; a seconda della destinazione d'uso, tale materiale viene lavorato attraverso diverse tecniche, quali la laminazione e la pultrusione. I principali utilizzi ad oggi identificati, ed in corso di validazione, sono i seguenti:

- produzione di pannelli per isolamento termico e pannelli fonoassorbenti,
- produzione di pannelli per edilizia e piastrelle,
- realizzazione di prodotti di arredamento e design,
- BMC (Bulk Moulding Compounds) per produzione di componentistica elettrica e automobilistica,
- produzione di tubazioni in filament winding o centrifugate,
- realizzazione di profilati in materia plastica tramite pultrusione,
- produzione di modelli e stampi,
- additivazione di asfalti ad alta resistenza all'usura,
- feedstock per il processo di produzione di cemento (v. successivo par. 1.2).

1.2. Co-processing per la produzione di cemento

Si tratta di una delle principali tecnologie oggi disponibili ad un elevato livello di sviluppo industriale nella quale avviene, oltre al recupero di energia dato dalla combustione della resina, anche un recupero di materia in quanto la composizione della fibra di vetro è

perfettamente compatibile con quella della pozzolana o delle ceneri volanti, che sono additivi comunemente utilizzati per produrre cementi di miscela (Figura 6). La materia prima del cemento è parzialmente sostituita dalla porzione di fibre di vetro e cariche inorganiche presente nei materiali compositi, mentre la componente di resina sostituisce i combustibili primari (principalmente pet-coke) attualmente utilizzati nel processo di produzione del clinker come combustibile (Figura 7). Il procedimento, noto come co-processing è altamente efficiente, veloce e scalabile; inoltre, grazie alla parziale sostituzione del pet-coke, consente anche un beneficio in termini di impronta di carbonio¹².

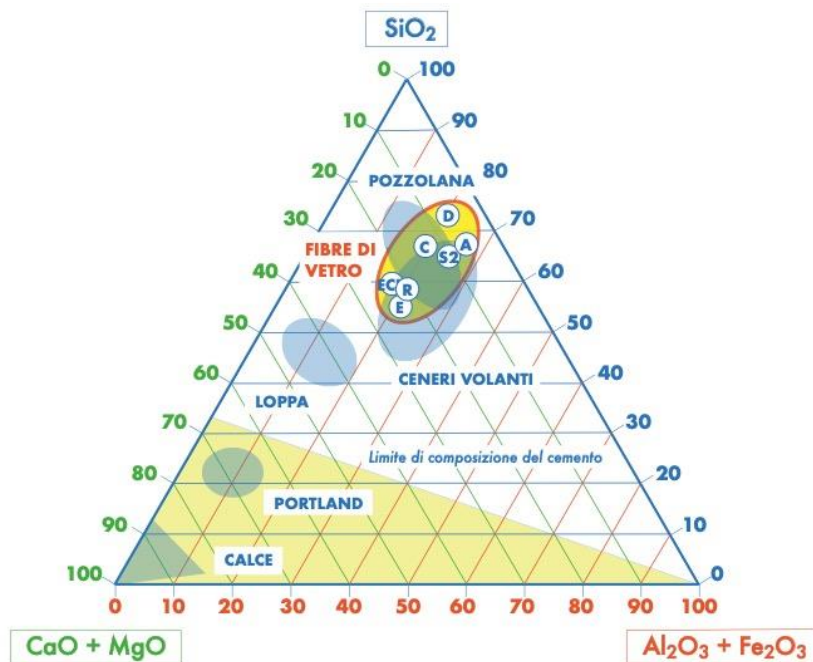


Figura 6: Confronto tra la composizione del cemento e quella delle fibre di vetro (Fonte: Assocompositi)

¹² A.A. van Oudheusden "Recycling of composite materials " TU Delft Master Thesis (2019)



Figura 7: impianto della Nehlsen (D) per il trattamento dei rifiuti in vetroresina e la loro riformulazione con residui della lavorazione della carta da usare come materia prima per la produzione di cemento (fonte: Bremeninvest, 2018)

1.3. Pirolisi

Il processo di pirolisi consiste essenzialmente in una degradazione termica della matrice che produce una miscela di sostanze organiche liquide (ad esempio etilacetato e pentano con frazioni minori di metanolo, benzene, ecc.) e gassose (principalmente CO₂, CO, idrogeno e idrocarburi leggeri) che possono essere utilizzate come combustibili e un residuo solido costituito da fibre, cariche minerali e residui carboniosi solidi. Le fibre possono essere in seguito “ripulite” dai residui carboniosi mediante trattamenti fisici o di ossidazione chimica e riutilizzate per produrre altri materiali compositi; nel caso delle fibre di vetro, tuttavia, le caratteristiche meccaniche – in particolare la resistenza – risultano significativamente inferiori (fino a oltre il 50%) rispetto alle fibre vergini.

1.4. Solvolisi

Questo processo utilizza solventi come acqua, acetone, alcool o acidi per depolimerizzare la resina, che viene convertita in composti organici liquidi a basso peso molecolare. Le condizioni di conduzione della reazione di polimerizzazione sono meno severe di quelle della macinazione meccanica e richiedono temperature più basse rispetto alla pirolisi; ci si può quindi attendere che l’effetto di degradazione delle proprietà delle fibre – in particolare per

quelle di vetro – sia meno severo, anche se la qualità delle fibre ottenute può dipendere da molti fattori quali ad esempio il tipo di solvente, le condizioni di temperatura e pressione nel reattore, l'eventuale presenza di catalizzatori nonché le condizioni di agitazione e il tempo di residenza. A seconda delle condizioni di temperatura e pressione questi processi vengono classificati come sub-critici, quasi-critici o super-critici.

Un particolare tipo di processo di solvolisi è quello denominato "idrolisi a temperatura ultra-elevata (UHTH): si tratta di un processo per il recupero termico-energetico da rifiuti organici nel quale i materiali da trattare vengono gassificati in una camera stagna a temperatura ultra-elevata (1.000-1300°C) tramite un processo di idrolisi (ad alimentazione elettrica) come mostrato in Figura 8. Il risultato finale è la produzione di un combustibile gassoso sintetico - "Syngas" - e materiale inorganico inerte, vetrificato e non percolante. I principali componenti del Syngas sono CO, CO₂, H₂ e CH₄. Il Syngas prodotto alimenta un motore a ciclo otto oppure turbine a syngas con annesso generatore elettrico e scambiatore di calore. L'impianto di cogenerazione è costituito da un modulo di produzione elettrica, predisposto per funzionamento in parallelo alla rete, con recupero termico. Il calore del processo di cogenerazione può essere usato per scopi industriali e/o civili in aree limitrofe all'insediamento dell'impianto.

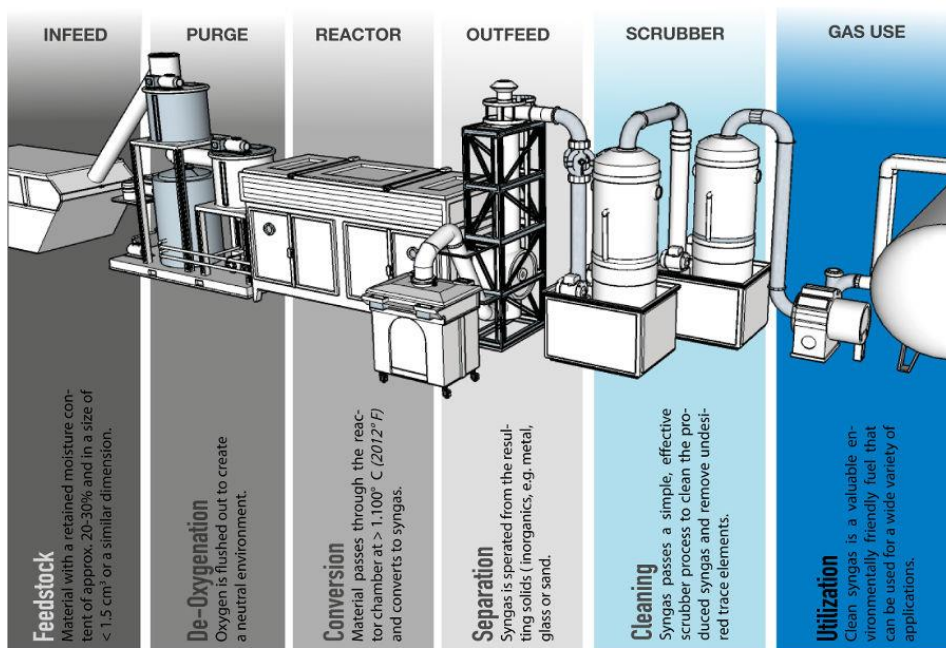


Figura 8: Descrizione del processo UHTH – fonte: CleanCarbonConversion Italia

2. Aspetti energetici, industriali ed ambientali dei diversi processi di riciclo

Le differenze principali tra i vari processi termici al variare del tipo di alimentazione e dei prodotti sono mostrate in Figura 9 mentre una sintesi degli input e degli output dei diversi metodi di riciclo è mostrata in Figura 10.

ALIMENTAZIONE	Assenza di ossigeno ← Poco ossigeno — Aria —→ Eccesso di ossigeno			
PROCESSO	PIROLISI		COMBUSTIONE INCENERIMENTO	
	LETTO FLUIDO (gassificazione)			
PRODOTTI	Catrami, idrocarburi Residui carboniosi Fibre, cariche inorganiche		H ₂ O e CO ₂ Tracce di fibre e cariche inorganiche	
	H ₂ , CO e CO ₂ Residui carboniosi Fibre, cariche inorganiche		H ₂ O, CO ₂ e gas di combustione Ceneri e residui solidi	

Figura 9: Differenza tra pirolisi, gassificazione a letto fluido e combustione/incenerimento (Rielaborazione da Williams, P. T. (2005). Waste Treatment and Disposal. (J. W. & S. Ltd, Ed.). 66 <https://doi.org/10.1002/0470012668>)

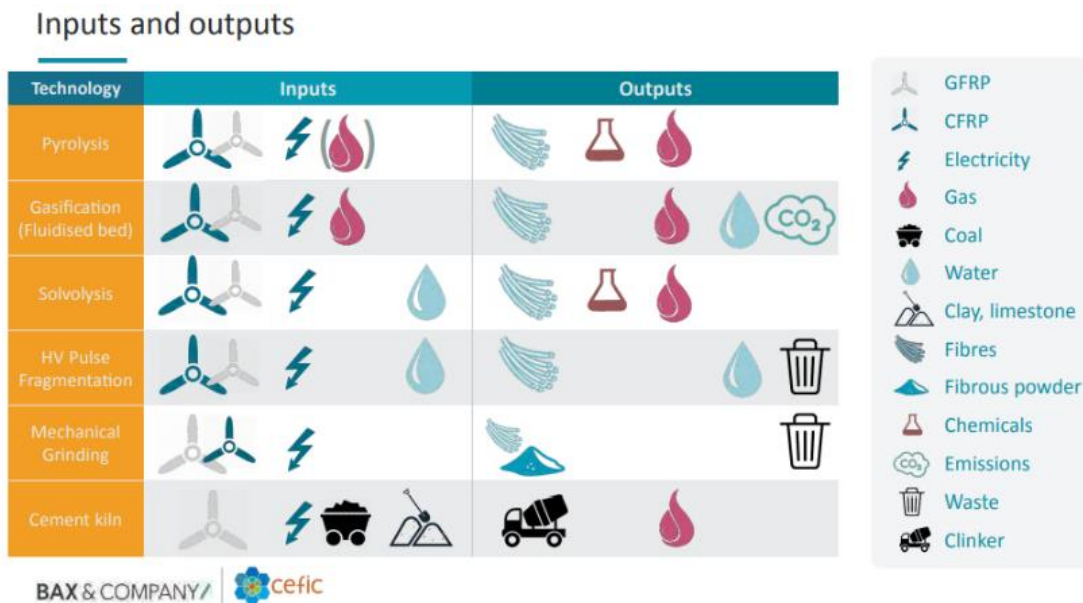


Figura 10: Confronto tra input e output dei principali processi di riciclo per i materiali compositi (Fonte: WindEurope, EuCIA – Accelerating Wind Turbine Blade Circularity, 2020)

Una valutazione sull'implementazione dei diversi processi deve anche necessariamente tenere conto dei costi del processo e del livello di maturità tecnologia (TRL) che attualmente molto

diverso, come è diversa la resa qualitativa in dipendenza del tipo di fibra di rinforzo – vetro o carbonio – contenuta nel composito da trattare (Figura 11). L'esame della figura mostra che i tre processi attualmente più maturi dal punto di vista industriale sono la macinazione, il co-processing nei cementifici e la pirolisi; anche il livello di mantenimento delle proprietà del riciclato è diverso, in particolare tra i processi di trattamento delle fibre di vetro e quelli delle fibre di carbonio.

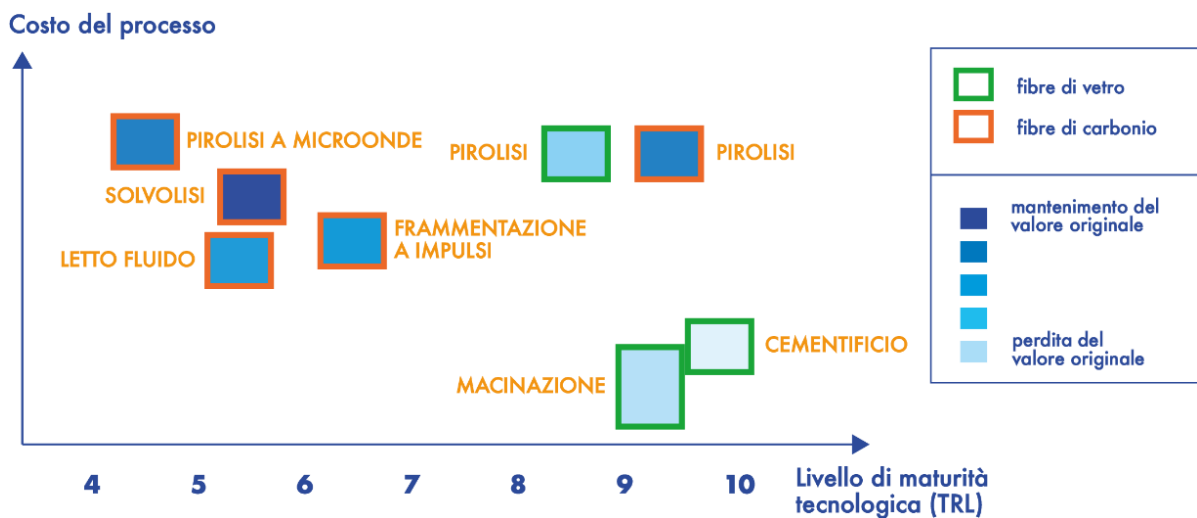


Figura 11: Confronto indicativo del livello di maturità tecnologica dei diversi processi di riciclo dei materiali compositi (rielaborazione da fonti WindEurope e Bax & Company - 2019)

I diversi processi hanno però anche un diverso impatto ambientale: uno studio di Bax & Company sulla circolarità delle turbine eoliche ha mostrato che le emissioni di gas serra (espressa in CO₂ eq) dei processi di riciclo chimico o termico è superiore a quella macinazione e del riciclo nei cementifici (Figura 12).

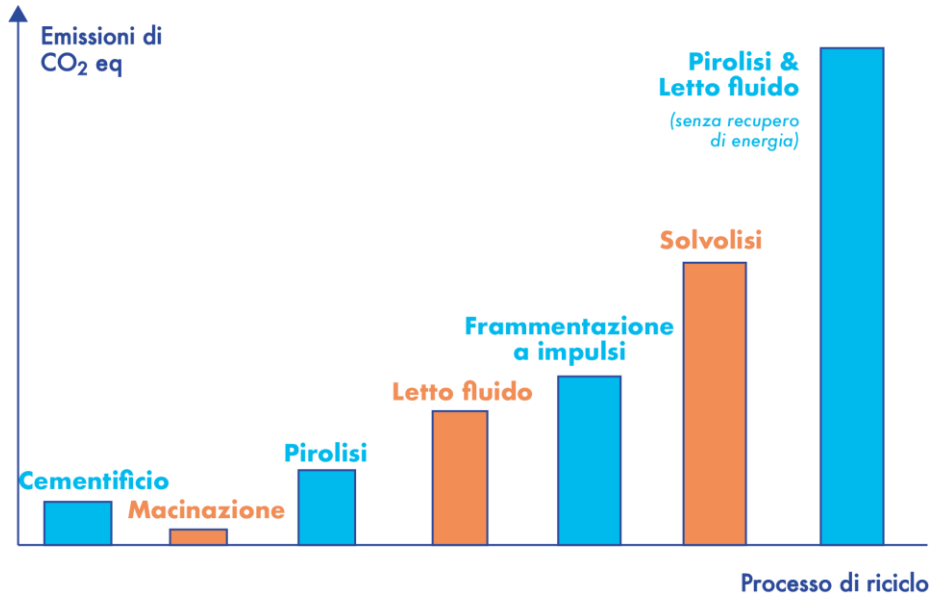


Figura 12: Impronta di carbonio dei diversi processi di riciclo dei materiali compositi (Fonte: Bax & Company, 2019)

A titolo di riferimento, è possibile indicare i seguenti valori di emissione per i principali processi individuati¹³:

- macinazione meccanica: presenta basse emissioni di gas a effetto serra (GHG), certamente inferiore di almeno un ordine di grandezza rispetto alle emissioni specifiche cradle-to-gate relative alla produzione di componenti in materiale composito in fibra di vetro (GFRP, tipicamente comprese tra 2 e 5 kg CO_{2eq}/kg) e soprattutto in fibra di carbonio (CFRP, superiori a 20 CO_{2eq}/kg). Essa non comporta inoltre nessun altro tipo di inquinamento atmosferico a parte l'uso di energia elettrica.
- pirolisi: ha un impatto sull'emissione di gas a effetto serra (GHG) più elevato, pari a circa 3 kg CO_{2eq}/kg, dovuta principalmente al consumo di elettricità e gas naturale;
- co-processing in cementificio: ha un basso impatto sull'emissione di gas a effetto serra (GHG) e contribuisce a ridurre le emissioni per la produzione di cemento del 16% per la già citata sostituzione pro-quota dell'usuale combustibile;

¹³ European Composites Industry Association - Eco Impact Calculator for calculating the environmental impact of composite products from cradle-to-gate (website: ecocalculator.eucia.eu).

- solvolisi: presenta le emissioni di gas a effetto serra (GHG) più elevate rispetto alle precedenti tecnologie, pari a circa 6 kg CO₂ eq/kg.

Il confronto del profilo caratteristico dei diversi processi sulla base dei tre parametri fondamentali (emissioni, redditività del processo e mantenimento del valore del prodotto) per i due tipi di fibre di rinforzo è mostrato nei diagrammi di Figura 13.

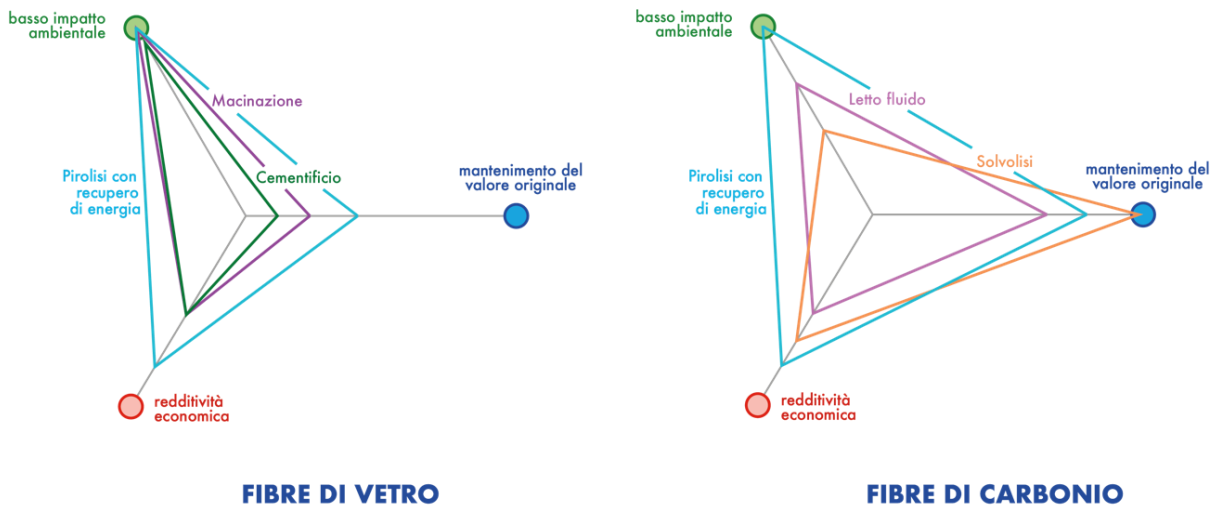


Figura 13: Profilo ambientale ed economico dei processi di riciclo dei materiali compositi
(rielaborazione da fonte Bax & Company - 2019)

Poiché le potenzialità di mantenimento delle caratteristiche originali delle fibre di carbonio riciclate sono mediamente superiori rispetto a quelle per le fibre di vetro e il valore commerciale del prodotto è decisamente superiore, i processi di riciclo hanno in questo caso un buon potenziale di sostenibilità economica, anche se quella ambientale rimane da verificare. Nel caso delle fibre di vetro, invece, il co-processing nei cementifici e la macinazione sono competitivi con la pirolisi con recupero di energia anche se questi ultimi processi – a parità di basso impatto ambientale – non forniscono come output fibre riciclate. Una sintesi delle considerazioni svolte in questa Appendice è infine mostrata nel diagramma a cascata di Figura 14.

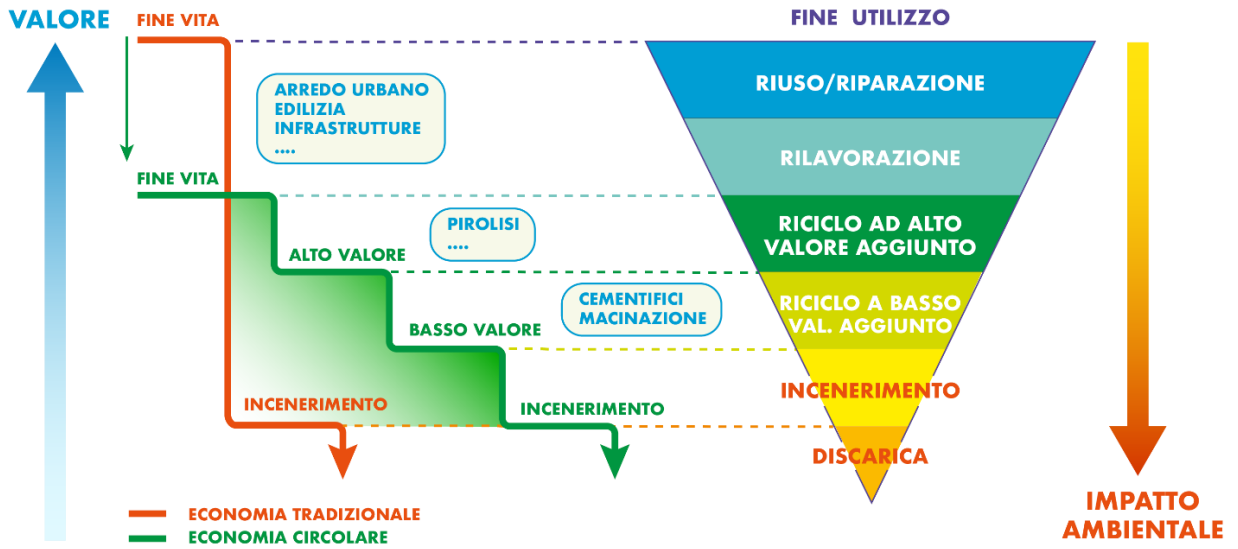


Figura 14: Diagramma a cascata delle possibili strategie di riuso e riciclo dei materiali compositi

