



ASSOCOMPOSITI

Associazione Italiana Compositi & Affini

Circularità dei materiali compositi

una guida per neofiti

Questo rapporto tecnico è stato redatto allo scopo di comunicare informazioni generali. Il suo contenuto è fornito in massima buona fede e si basa sulle migliori informazioni disponibili al momento della stesura.

Il lettore che voglia utilizzare i contenuti del presente rapporto per scopi diversi da quelli espressamente dichiarati lo fa sotto la sua esclusiva responsabilità.

Nessuna dichiarazione o garanzia è espressa per quanto riguarda la sua completezza o accuratezza e nessuna responsabilità sarà accettata dagli autori.

Data di pubblicazione: marzo 2022

I. Scopo e contenuto del documento

Il settore dei materiali compositi deve oggi confrontarsi con sfide ambiziose che riguardano, tra l'altro, la trasformazione dei modelli di produzione e di 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 materiali compositi intendono illustrare attraverso il presente documento le attività che propongono a livello di sistema per un approccio "circolare" nella gestione dei sottoprodotti o dei prodotti dismessi. Come meglio descritto nel seguito, infatti, la maggior parte dei componenti in materiale composito presentano caratteristiche già perfettamente compatibili con l'economia circolare.

Il presente documento, dopo una descrizione del contesto di riferimento, illustra le prospettive legate al riciclo dei materiali e alla progettazione dei sistemi. Vengono poi descritti gli approcci che le aziende del settore possono adottare per rendere più efficace il fine vita dei prodotti in materiale composito e i passi che gli operatori ritengono opportuni per avviare la gestione organica della tematica della circolarità dei materiali compositi, che non può prescindere da un approccio sinergico tra aziende, associazioni ed istituzioni accomunate dall'obiettivo di "chiudere il ciclo". In Appendice è infine presentata una sintesi delle normative nazionali ed europee sulla gestione dei rifiuti e sulle possibilità di cessazione della qualifica di rifiuto (*End of Waste*).

2. Circolarità dei materiali compositi

I materiali compositi – che sono ottenuti combinando tra loro fibre di rinforzo di vario tipo e resine polimeriche – si differenziano dagli altri materiali strutturali per la loro straordinaria combinazione di rigidità, resistenza e leggerezza, che permette di ridurre la massa facilitando le operazioni di trasporto e movimentazione, il montaggio, l'installazione e - nel caso di componenti in movimento come le turbine eoliche o le parti di veicoli - anche la richiesta di energia legata al funzionamento. Tutti questi vantaggi, uniti alla superiore durabilità del materiale nelle condizioni operative più comuni, permettono di concludere che i vantaggi ambientali legati all'uso dei compositi sono indiscutibili: minor consumo energetico e minori emissioni di gas serra, maggiore durata dei componenti anche in assenza di manutenzione, migliori prestazioni e maggiore sicurezza.

Quando un componente in materiale composito arriva al termine della sua fase di utilizzo è necessario prendere una decisione riguardo al suo smaltimento. L'approccio che oggi domina le strategie economiche europee e mondiali è quello della cosiddetta "economia circolare", in cui la tradizionale concezione "lineare" basata sul tipico schema estrarre/produrre/usare/smaltire - che dipende dalla disponibilità di grandi quantità di materiali ed energia facilmente reperibili a basso prezzo - viene modificata in un ciclo che si chiude su se stesso (*Figura 1*); il modello di produzione e consumo si trasforma quindi radicalmente, implicando la condivisione, il prestito, la riparazione, il ricondizionamento, il riuso e il riciclo dei

materiali e dei prodotti esistenti in modo da mantenerli all'interno del ciclo il più a lungo possibile.

Lo schema dell'economia circolare si adatta particolarmente bene ai materiali compositi: per quanto riguarda l'impatto ambientale, infatti, i processi di produzione delle materie prime hanno un impatto predominante in termini di consumo energetico ed emissioni di gas serra (vedi *"Eco Impact Calculator for Beginners: Fundamentals and Case Histories"* pubblicazione EuCIA, maggio 2021). Un uso più razionale delle materie prime può quindi contribuire, da un lato, a limitare questi fattori e, dall'altro, a dare più continuità e sicurezza alla catena di approvvigionamento delle materie prime.

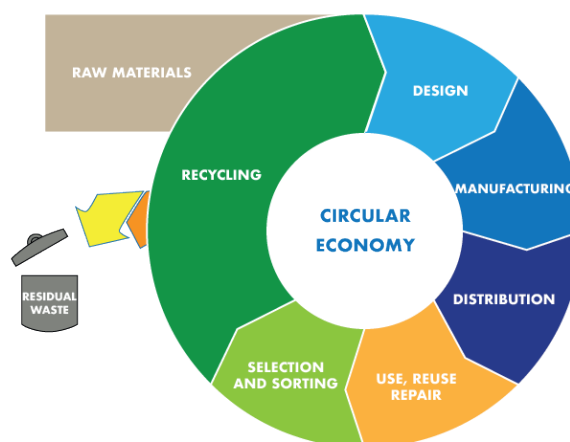


Figura 1: Schema di flusso dell'economia circolare

Per raggiungere questo obiettivo, è stata introdotta una gerarchia nel trattamento del fine vita che - prima di arrivare al riciclo vero e proprio - promuove strategie di riparazione e riutilizzo dei prodotti che ne prolunghino la vita utile, mantenendoli così all'interno della fase di utilizzo. Da questo punto di vista, i materiali compositi sono particolarmente adatti, in quanto durevoli, resistenti ai danni e alle aggressioni ambientali e facili da riparare. Alcuni esempi di riutilizzo di pale eoliche dismesse sono mostrati in Figura 2.



**Willemsplein
Rotterdam (NL)**



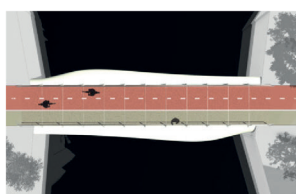
**Playground Wikado
Rotterdam (NL)**



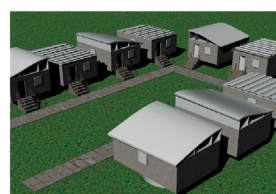
**Bus stop
Almere (NL)**



**Blade Pole Project
USA**



**Blade Bridge Project
Ireland**



**Emer-Shelters Project
USA**

Figura 2: Esempi di sviluppi concettuali per il riutilizzo delle pale eoliche dismesse

In sintesi, è possibile affermare che, poiché la vita utile di un componente in materiale composito è generalmente una frazione relativamente piccola della vita utile del materiale di cui è fatto, questi materiali sono ideali per l'economia circolare in quanto si prestano bene ad essere sia riparati (qualora fosse necessario) che riutilizzati in altre applicazioni strutturali.

3. Riciclo dei materiali compositi

Laddove il reimpiego non sia possibile, le opzioni successive sono il riciclo, il recupero o lo smaltimento. Riciclare significa che il componente a fine vita (*End of Life, EoL*) o lo scarto di produzione diventa un nuovo prodotto o materiale con un diverso uso funzionale. Ciò richiede energia e altre risorse per convertire i rifiuti in qualcos'altro. Recuperare significa trasformare i rifiuti in combustibile o in energia termica dopo aver rimosso tutti i singoli componenti che possono essere riutilizzati. Lo smaltimento dei rifiuti in discarica o l'incenerimento senza recupero di energia sono infine i metodi di trattamento dei rifiuti meno preferiti perché non c'è recupero di materiale o di energia.

Con i materiali compositi è in linea di principio possibile, in una prospettiva di circolarità, riottenere i precursori originali - che possono essere di origine minerale o da biomassa - senza perdita di prestazioni. Questo approccio può consentire, sempre in linea di principio, di chiudere il ciclo vita del componente producendone un altro per la stessa applicazione. Ciò comporta l'ulteriore vantaggio, intrinseco all'approccio economico dell'economia circolare, di non richiedere l'apporto di nuove materie prime mantenendo invariato l'equilibrio della domanda e dell'offerta. In senso più ampio, una circolarità del materiale con ciclo chiuso al 100% (riciclo "*Cradle To Cradle*") è certamente un obiettivo possibile con i materiali compositi, anche se allo stato attuale delle conoscenze rimane da verificare la fattibilità economica e l'impatto ambientale di questi processi di recupero dei precursori.

Ad oggi, la tecnologia principale per il riciclo dei materiali compositi è attraverso i forni per la produzione del cemento (nota anche come *co-processing*) in cui il rifiuto in parte entra nella composizione del cemento stesso e in parte funge da combustibile contribuendo a ridurre le emissioni di CO₂. I materiali compositi possono anche essere riciclati attraverso riciclo meccanico e elettromeccanico (frammentazione a impulsi ad alta tensione) oppure attraverso riciclo con processi termici (pirolisi, letto fluido e depolimerizzazione) o termochimici (solvolisi) come mostrato nel diagramma schematico di *Figura 3*.

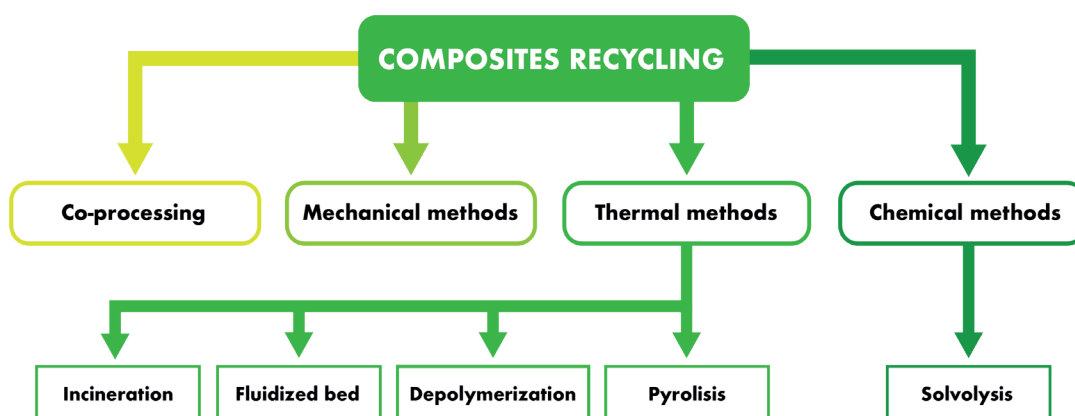


Figura 3: I processi di riciclo dei materiali compositi

Queste tecnologie sono disponibili a diversi livelli di maturità tecnologica (Figura 4) e non tutte sono disponibili su scala industriale.

La valutazione dell'implementazione dei diversi processi deve necessariamente considerare:

- il costo del processo, che può essere molto variabile;
- la resa qualitativa, che dipende dal tipo di fibra di rinforzo - vetro o carbonio - e dalla matrice che li contiene;
- il formato e il livello di mantenimento delle proprietà delle fibre rigenerate;
- l'impatto ambientale del processo.

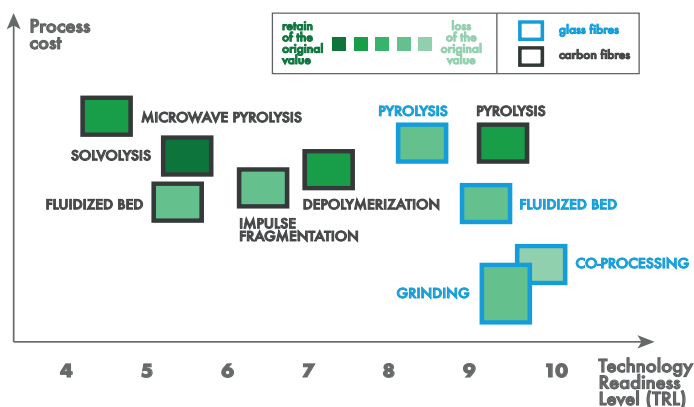


Figura 4: Costo del processo e TRL per le principali tecnologie di riciclo dei compositi

Per maggiore chiarezza, le tecnologie di riciclo sono state classificate nel seguito in due categorie:

1. Tecnologie già disponibili su scala industriale (co-processing, riciclo meccanico e pirolisi);
2. Tecnologie in fase di sviluppo (solvolisi, pirolisi a microonde, depolimerizzazione, frammentazione a impulsi e letto fluido).

3.1 Tecnologie di riciclo disponibili su scala industriale

Il *co-processing nei cementifici* (Figura 5) è un processo adatto solamente per il riciclo della cosiddetta “vetroresina” (composito a base di fibre di vetro) mentre è inadatto, ad esempio, per il riciclo di compositi a base di fibre di carbonio. La sua applicabilità a compositi con altre fibre di rinforzo non è stata ancora sufficientemente esplorata. In questo processo, la materia prima per la produzione del cemento è in parte sostituita dalla porzione

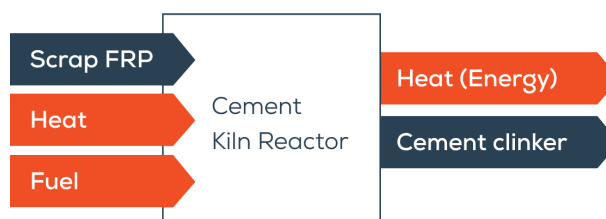


Figura 5: Schema a blocchi del co-processing nei cementifici (fonte: Wind Europe “Accelerating Wind Turbine Blade Circularity” 2020)

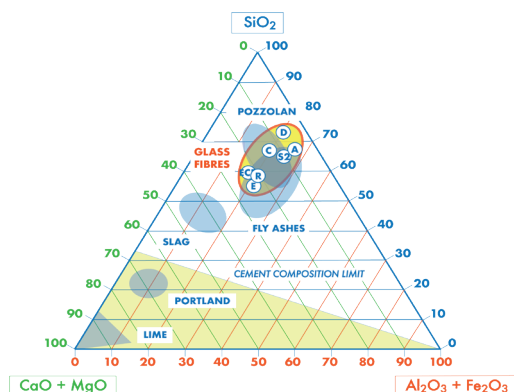


Figura 6: Confronto tra la composizione delle fibre di vetro (identificate secondo ASTM D-578) e quella del cemento.

di fibre di vetro e riempitivi inorganici che si trovano nei materiali compositi (Figura 6) mentre la componente resina sostituisce i combustibili primari (principalmente pet-coke) attualmente utilizzati nel processo di produzione del clinker. Ciò rende il co-processing altamente efficiente, veloce, scalabile e permette di ridurre di circa il 20% l'impronta di carbonio della produzione del cemento sia grazie all'impiego di materie prime decarbonizzate (l'ossido di calcio contenuto nelle fibre di vetro anziché il carbonato di calcio minerale) sia grazie all'intima dispersione tra la resina e la carica minerale che aumenta in modo considerevole l'efficienza di combustione e quindi il rendimento energetico del processo.

Il riciclo per macinazione meccanica controllata (Figura 7) è un processo efficace, di basso costo e a ridotto fabbisogno energetico il quale tuttavia diminuisce drasticamente il valore dei materiali riciclati. Le fibre corte e la matrice macinata (polvere) così ottenuti possono essere utilizzati rispettivamente come rinforzi o riempitivi. Si tratta di un processo efficiente dal punto di vista energetico e flessibile per flussi di materiale e sue tipologie. Si può ottenere anche un parziale recupero delle proprietà fisico-mecchaniche dei compositi di partenza: le applicazioni sono già molto numerose e vanno dai prodotti di arredo ai prodotti industriali nelle quali il materiale riciclato può svolgere anche una funzione di rinforzo con benefici in termini di costi e impatto ambientale.

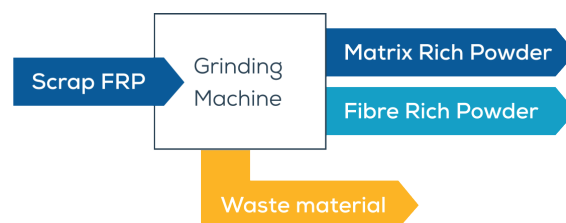


Figura 7: Schema a blocchi del riciclo meccanico (fonte: Wind Europe "Accelerating Wind Turbine Blade Circularity" 2020)

La pirolisi (Figura 8) è un processo di recupero termico che permette di recuperare sia le fibre che i prodotti idrocarburici derivati dalla decomposizione termica della matrice, di solito impiegati per ridurre il consumo energetico del processo. Anche se il valore del riciclato è in questo caso più elevato che nel caso dei processi visti in precedenza, si verifica comunque una perdita di valore rispetto al prodotto originale, soprattutto per le fibre di vetro: la superficie della fibra viene infatti privata dell'appretto utilizzato per promuovere l'adesione con la matrice e in molti casi si danneggia per esposizione alle alte temperature, con conseguente diminuzione della resistenza. La pirolisi richiede anche investimenti maggiori e costi di gestione più elevati. Ad oggi, questa tecnologia di recupero è economicamente sostenibile solo per le fibre di carbonio ma non è ancora implementata su larga scala a causa dei volumi da riciclare relativamente bassi.

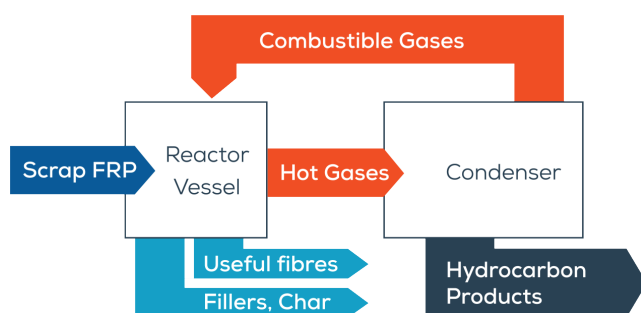


Figura 8: Schema a blocchi del processo di pirolisi (fonte: Wind Europe "Accelerating Wind Turbine Blade Circularity" 2020)

La pirolisi richiede anche investimenti maggiori e costi di gestione più elevati. Ad oggi, questa tecnologia di recupero è economicamente sostenibile solo per le fibre di carbonio ma non è ancora implementata su larga scala a causa dei volumi da riciclare relativamente bassi.

3.2 Tecnologie di riciclo in fase di sviluppo

La **solvolisi** (Figura 9) è un trattamento chimico in cui i solventi (acqua, alcool e/o altre sostanze chimiche) sono utilizzati per decomporre la matrice a temperature e pressioni specifiche. Rispetto alla pirolisi, la solvolisi richiede temperature più basse per degradare la resina, il che comporta anche una minore degradazione delle fibre. La solvolisi con acqua subcritica, così come altri tipi di solvolisi avanzate, sembrano essere le tecnologie più promettenti poiché le fibre mantengono gran parte delle loro proprietà meccaniche; è anche possibile recuperare dalla decomposizione della matrice alcune sostanze chimiche in forma liquida che sono riutilizzabili all'interno della formulazione delle medesime resine per compositi. La solvolisi è facilmente scalabile ma gli investimenti, i costi di gestione e l'impatto ambientale possono essere elevati.

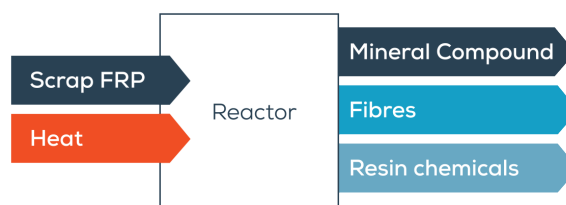


Figure 9: Schema a blocchi del processo di solvolisi
(fonte: Wind Europe "Accelerating Wind Turbine Blade Circularity" 2020)

Il **letto fluido** (detto anche **gassificazione**) è un processo di decomposizione termica simile alla pirolisi che utilizza però un'alimentazione diversa e produce prodotti diversi: la differenza tra i due processi è mostrata schematicamente in Figura 10.

FEEDING	NO OXYGEN	LACK OF OXYGEN	AIR	EXCESS OF OXYGEN
PROCESS	PYROLYSIS	FLUIDIZED BED (gasification)	COMBUSTION	INCINERATION
PRODUCTS	Tar, hydrocarbons Char Fibres, fillers	H ₂ , CO and CO ₂ Char Fibres, fillers	H ₂ O and CO ₂ Traces of fibres and fillers	H ₂ O, CO ₂ and combustion gases Ashes and solid residuals

Figura 10: Differenze tra pirolisi, letto fluido e combustione/incenerimento
(adattato da P.T. Williams, Waste Treatment and Disposal, Wiley, 2005)

La gassificazione può rendere più difficile rispetto alla solvolisi recuperare componenti chimici da riutilizzare all'interno della matrice polimerica a causa del fatto che la maggior parte di essa viene decomposta in prodotti gassosi, che sono solitamente impiegati per il recupero di energia all'interno del processo stesso. La gassificazione possiede però la caratteristica unica di essere in grado di trattare anche materiali misti (per esempio laminati in composito con superfici verniciate o anime di schiuma) e quindi potrebbe rivelarsi particolarmente adatta per trattare componenti strutturali anche molto complessi. Il diagramma a blocchi schematico della gassificazione è mostrato nella Figura 11.

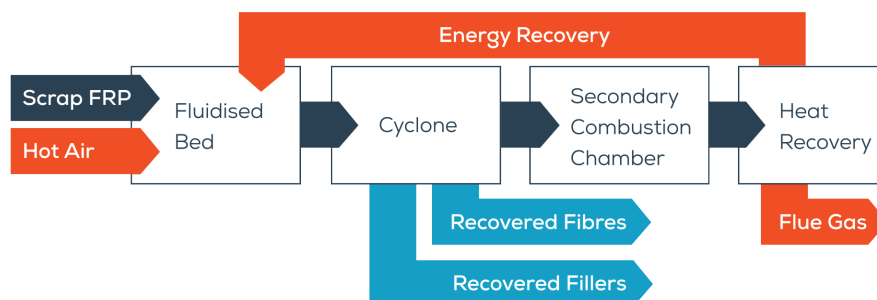


Figura 11: Schema a blocchi del processo a letto fluido (gassificazione)
(fonte: Wind Europe "Accelerating Wind Turbine Blade Circularity" 2020)

La frammentazione con impulsi ad alta tensione (Figura 12) è un processo elettromeccanico che separa efficacemente le matrici dalle fibre tramite l'impiego di elettricità invece che di calore. Benché possano essere richiesti elevati livelli di energia – e quindi i costi dell'impianto e del processo possano essere anche rilevanti – la qualità delle fibre ottenute è molto buona con fibre più lunghe rispetto alla macinazione meccanica che risultano anche decisamente più pulite.

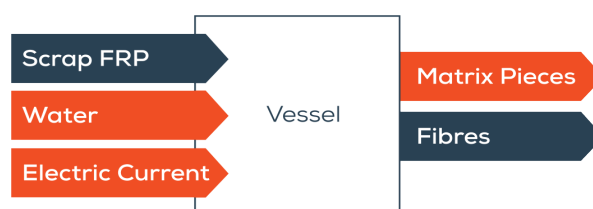


Figura 12: Schema a blocchi del processo di frammentazione a impulsi
(fonte: Wind Europe "Accelerating Wind Turbine Blade Circularity" 2020)

La depolimerizzazione termochimica (Figura 13) avviene infine tramite trattamento termico in atmosfera di anidride carbonica e permette di recuperare sia le fibre di rinforzo che la resina, quest'ultima impiegabile in miscela con resina vergine, sia poliestere insatura che resina vinilestere o resina epossidica, per la produzione di nuovi compositi. La tecnica può essere applicata anche in presenza di materiali d'anima di diversa natura polimerica (PS, PU, PET, ecc.) di inserti metallici oppure di legno (balsa). Gli stadi principali del processo sono due: 1) la depolimerizzazione della matrice e 2) la calcinazione del residuo solido. Nel primo stadio, che avviene con l'utilizzo di anidride carbonica e senza reagenti chimici, il peso molecolare del polimero si riduce producendo vapori che, dopo le fasi di condensazione e purificazione, generano un liquido organico che mostra un'eccellente miscibilità e compatibilità con la resina vergine e polimerizza in miscela con essa; il processo è anche in grado di separare e recuperare l'anidride ftalica (se presente). Nel secondo stadio vengono invece rimossi i residui organici e recuperate le fibre di rinforzo e le eventuali cariche. Il processo è finalizzato a massimizzare la resa in prodotto liquido organico che può essere riutilizzato nel ciclo produttivo dei compositi termoindurenti e, per tale motivo, risulta economicamente più sostenibile degli altri processi termici.

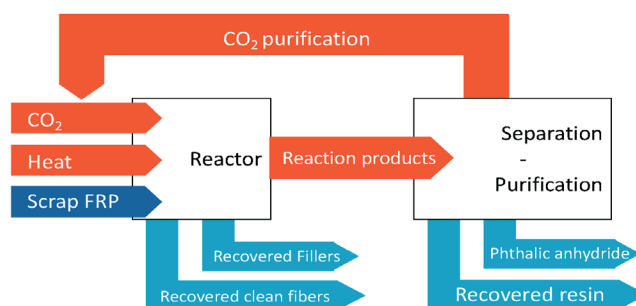


Figura 13: Schema a blocchi del primo stadio del processo di depolimerizzazione termochimica

4. Fibre da riciclo: i processi di rilavorazione

Indipendentemente dal processo di riciclo, le fibre ottenute hanno una lunghezza relativamente ridotta e sono orientate in modo casuale; esse si presentano come una massa soffice e con bassa densità a causa della sminuzzatura e del conseguente disordine nell'orientazione spaziale indotta dalla manipolazione, lavorazione e triturazione subita durante il processo. Spesso, tali trattamenti privano anche le fibre della loro apprettatura, che è essenziale per sviluppare una buona adesione con la matrice.

Le fibre recuperate possono essere rilavorate con alcune tecniche tradizionali di stampaggio a compressione dei compositi – ad esempio stampaggio a iniezione, SMC o BMC – ma il risultato finale dipenderà dalla capacità di controllare l'orientazione delle fibre che in ultima analisi determina la frazione in volume di fibra nel materiale composito. Anche i tessuti non tessuti di fibre rigenerate, ottenuti con tecniche derivate dall'industria tessile e cartaria come la cardatura, possono essere utilizzati per produrre compositi con queste tecniche. Diversi tipi di veli, mat o stuoie ottenuti da fibre di carbonio rigenerate sono già disponibili sul mercato. Le fibre cardate possono anche, in linea di principio, essere pettinate e filate per ottenere filati; queste tecniche, tuttavia, sono attualmente in fase di sviluppo pre-industriale. Altre tecniche di rigenerazione, volte a ottenere compositi riciclati con un alto livello di allineamento delle fibre, sono attualmente studiate in varie istituzioni accademiche e di ricerca europee e internazionali.

Poiché il potenziale di mantenimento delle caratteristiche originarie delle fibre di carbonio rigenerate è mediamente superiore rispetto a quello delle fibre di vetro - e il valore commerciale del prodotto è decisamente superiore - i processi di riciclo e rigenerazione delle fibre di carbonio hanno un migliore potenziale di sostenibilità economica. Nel caso delle fibre di vetro, invece, la strategia attualmente più impiegata è quella del co-processing nei cementifici o la macinazione meccanica (a volte chiamati anche “downcycling”) che rinuncia a recuperare le fibre per la produzione di nuovi compositi.

5. Circolarità e impatto ambientale

Lo studio dell'impatto ambientale dei prodotti di consumo ha una storia che risale agli anni '60 e '70 durante i quali, specialmente in un contesto comparativo (“Il prodotto A è migliore del prodotto B?”) si sono generati comprensibilmente lunghi e talvolta feroci dibattiti. La fase iniziale ha avuto però certamente il merito di mettere a fuoco il fatto che per una parte di prodotti l'impatto sull'ambiente non è nella fase d'uso ma nella produzione, trasporto o smaltimento. Questo è certamente vero per la maggior parte delle applicazioni dei compositi, in quanto questi materiali – leggeri, rigidi, resistenti e durevoli – sono meglio di altri in grado di ottimizzare l'impiego delle risorse durante la loro fase d'uso.

Oggi la metodologia LCA (*Life Cycle Assessment*) è univocamente definita dalle norme ISO della serie 14040 e nel corso degli anni è stata progressivamente incorporata nella politica europea a partire dal regolamento Ecolabel del 1992 fino al Green Deal del 2019 che ha segnato l'evoluzione dai soli obiettivi di protezione dell'ambiente al più ampio concetto di economia circolare. E' evidente che i due approcci

non possono essere in antitesi tra loro ma si integrano in uno schema armonico in cui il monitoraggio della transizione verso un'economia circolare si basa anche su indicatori che possono essere utilizzati per l'analisi e il monitoraggio della sostenibilità.

A quest'ultimo riguardo, il quadro di monitoraggio dell'UE per l'economia circolare che è stato rilasciato nel 2018* comprende 10 indicatori chiave che coprono non solo tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto ma anche i principali aspetti legati alla competitività. Di questi, ben 8 sono tra gli indicatori di monitoraggio della sostenibilità, a dimostrazione che l'implementazione della circolarità e il suo sistema di indicatori ha come uno dei suoi pilastri la riduzione dell'impatto ambientale delle attività umane.

I materiali compositi offrono diverse tecnologie e soluzioni, già affermate o in via di sviluppo, che consentono loro di raggiungere valori elevati degli indici di circolarità. L'Associazione europea dell'industria dei materiali compositi (EuCIA) ha da alcuni anni messo a disposizione, a titolo assolutamente gratuito, uno strumento molto evoluto in grado di effettuare l'analisi LCA dei materiali compositi all'interno del perimetro "dalla culla alla consegna" (*cradle to gate*). Lo strumento, denominato *EcoCalculator*, è accessibile direttamente dal sito web di EuCIA (<https://ecocalculator.eucia.eu>) ed è inoltre disponibile gratuitamente sul sito Assocompositi** una guida all'uso in lingua italiana.

E' infine attualmente in fase di sviluppo da parte di EuCIA un nuovo strumento per effettuare l'analisi LCA anche per la fase di smaltimento, riuso e riciclo dei materiali compositi, che sarà presumibilmente disponibile entro il 2023. Come mostrato in *Figura 14*, infatti, i diversi processi di riciclo sono caratterizzati da una diversa domanda cumulativa di energia (CED) e si collocano diversamente rispetto alla produzione delle fibre di rinforzo vergini (vetro e carbonio).

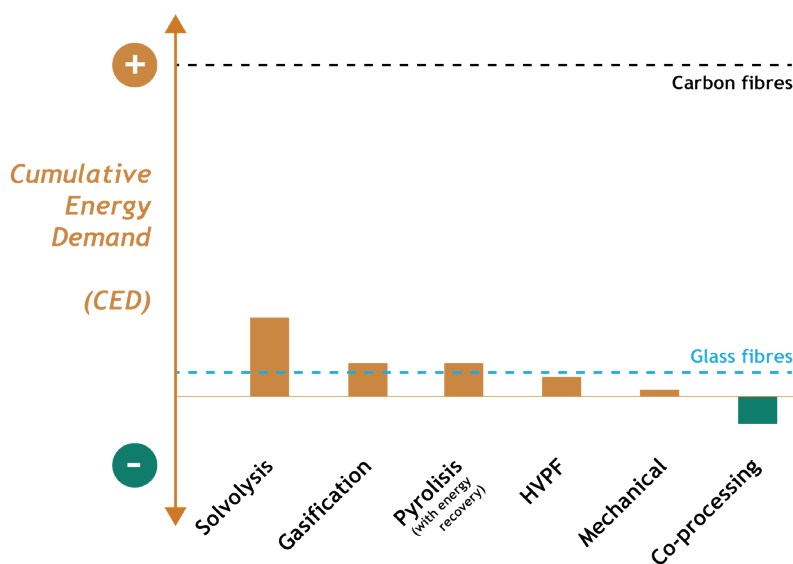


Figura 14: Domanda cumulativa di energia dei diversi processi di riciclo a confronto con l'energia richiesta per produrre fibre vergini (adattato da: A.K. Poulsen, Proc. of the "Delivering Circularity through Innovative Materials and Recycling Technologies" Conference, ETIPWind 2021)

* European Commission "A monitoring framework for the circular economy" COM/2018/29 Final 2018, 29, 1–11

** Manuale Assocompositi per l'EcoCalculator: <https://assocompositi.it/materiali-compositi-e-impatto-ambientale/>

6. Progettazione e circolarità

Il quadro discusso fin qui tiene conto delle esigenze di riciclo di quanto viene prodotto secondo le metodologie progettuali e le tecnologie in uso attualmente; tuttavia, l'accresciuta sensibilità generale alle problematiche ambientali e al cambiamento climatico impone e rende urgente una rivisitazione in chiave circolare e sostenibile della progettazione e della produzione dei beni di consumo. Questo si traduce nella necessità di:

- *fare un uso sempre più ampio di materie prime e fibre con incrementata riciclabilità o riutilizzabilità, in modo da poter riutilizzare pienamente questi precursori in applicazioni il più possibile vicine a quelle originarie;*
- *progettare i manufatti e il loro assemblaggio tenendo conto della necessità di una separazione per un trattamento differenziato a fine vita.*

Riguardo al primo punto, esempi di soluzioni oggi allo studio comprendono sia resine *cleavable* che fibre di rinforzo derivate da biomassa, oppure fibre finalizzate alla rifusione a fine vita. Per raggiungere l'obiettivo di cui al secondo punto, invece, è essenziale ottimizzare forme e geometrie dei manufatti in modo da garantire un facile disassemblaggio a fine vita, ad esempio utilizzando adesivi a comportamento reversibile.

Il raggiungimento di questi obiettivi richiede un approccio ampio e multidisciplinare, in cui le varie soluzioni siano confrontate in modo rigoroso ricorrendo anche ad indicatori di valutazione dell'impatto ambientale; questi possono essere ad esempio il Life Cycle Assessment, LCA, o meglio il Life Cycle Sustainability Assessment, LCSA che comprende più ad ampio spettro le variabili rilevanti per la sostenibilità di una certa soluzione. Anche se una trattazione analitica delle varie soluzioni non rientra negli obiettivi di questo documento, vengono di seguito brevemente richiamati i principali driver di sviluppo. Una scelta più consapevole delle materie prime, per la quale già diverse soluzioni sono presenti in commercio, fa riferimento a solventi e precursori derivati da biomassa e altre fonti rinnovabili che sono equivalenti in termini chimici o funzionali ai corrispondenti precursori derivati dal petrolio. In alternativa alle biomasse, anche la riciclabilità/riparabilità dei prodotti può garantire un miglioramento del livello di sostenibilità. Alcuni esempi sono le resine termoplastiche reattive (ovvero ottenute miscelando due o più precursori liquidi), i vitrimeri (riprocessabili e riparabili a una temperatura che non comporta la loro degradazione chimica), le resine epossidiche "separabili" (*cleavable*) oppure infine le resine ri-termoformabili per un secondo ciclo di vita del composito.

Con le resine epossidiche *cleavable*, ad esempio, l'indurente della resina può essere "aperto" a fine vita del prodotto con l'uso di opportune sostanze chimiche, mentre nel caso dei vitrimeri si possono applicare processi di solvolisi avanzata che consentono di recuperare il vitrimero vergine, senza alcuna perdita di prestazione.

Per garantire il mantenimento di specifiche prestazioni (ad esempio la reazione al fuoco) senza interferire con la riciclabilità, spesso vengono sviluppate soluzioni multimateriale in modo che il riciclo del singolo materiale faccia riferimento a tecnologie note mentre la separazione fra i diversi materiali è ottimizzata in funzione della specifica applicazione. Questa strategia viene ad esempio utilizzata per il

riciclo dei “battery case” o per la progettazione di recipienti in pressione innovativi per l’idrogeno compresso in cui l’utilizzo di carboni attivi funzionalizzati potrà consentire di ridurre le pressioni riducendo così l’impatto ambientale e i costi.

Una strategia possibile riguarda anche la transizione a compositi a matrice termoplastica in sostituzione di quelli a matrice termoindurente, che in linea di principio potrebbe rendere più agevole il recupero delle fibre e della resina stessa. Questi materiali presentano alcuni vantaggi anche di tipo tecnologico (ad esempio termoformabilità, saldabilità ed elevata tenacità) ma possono richiedere temperature e pressioni di lavorazione più elevate. Quest’ultimo problema può però essere eliminato o quantomeno attenuato utilizzando processi di infusione reattiva che fanno uso di un pre-polimero liquido a bassa viscosità anche a temperatura ambiente; le resine per questo tipo di applicazioni sono ad esempio la PA6 o il PMMA, già presenti in commercio con diverse formulazioni.

7. In conclusione ...

Oltre ad avere gli indubbi vantaggi sopra elencati in termini di durabilità ed efficienza dei prodotti nella loro fase d’uso, i materiali compositi dispongono anche di numerose possibilità per una gestione circolare della fase di dismissione (*End of Life*). La gerarchia promossa dall’Unione Europea per il trattamento del fine vita dei prodotti promuove infatti - prima di arrivare al riciclo vero e proprio - strategie di prevenzione, riparazione e riutilizzo che sono ideali per questi materiali: essi sono infatti riparabili, durevoli e mantengono a lungo le loro proprietà anche in presenza di ambienti aggressivi. Infine, qualora queste strategie non siano giudicate praticabili o convenienti, esistono comunque numerose tecnologie di riciclo.

Al fine di integrare pienamente il riciclo dei materiali compositi nel quadro dell’economia circolare, tuttavia, è assolutamente necessario anche valutare l’impatto ambientale e la sostenibilità dei processi. Emerge pertanto l’esigenza e l’opportunità che il settore si prepari, al fianco degli altri attori della filiera e degli stakeholder istituzionali, ad affrontare con congruo anticipo il tema della circolarità dei materiali compositi con la necessità di una visione multidisciplinare e multisettoriale. Questi temi, infatti, coinvolgono 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 riciclo dei compositi appaia ancora poco consolidato rispetto a quanto già disponibile per altri materiali, si stanno affacciando sul mercato i primi *recyclers* di compositi che testimoniano la solidità non solo tecnica ma anche economica delle soluzioni individuate.

Per stimolare il percorso di maturazione dell'approccio tecnico-economico di tipo circolare alla gestione dei compositi possono essere identificati i seguenti ambiti di azione principali:

- *innovazione, sviluppo e sperimentazione delle tecnologie più opportune e promettenti per la riparazione, il riuso e il riciclo;*
- *individuazione dei codici rifiuto EER più idonei per classificare i componenti in composito a fine vita (fibre di vetro e 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);*
- *costituzione di una filiera del trattamento/ridimensionamento, riciclo e soprattutto riuso economicamente sostenibile dei materiali compositi 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, dovranno essere condotte senza creare alcun ostacolo o vincolo a percorsi normativi già intrapresi e programmi di investimento o processi in corso di sviluppo da parte degli nostri Soci, favorendo la creazione di *cluster* che possano attivare le economie di scala necessarie per sviluppare concretamente le iniziative delineate in questo documento.

In estrema sintesi, si può affermare che il fatto che i materiali compositi siano durevoli e resistenti li rende i materiali ideali per l'economia circolare: essi infatti si prestano altrettanto bene sia alla riparazione (se necessario) che al riutilizzo in altre applicazioni strutturali oppure, in ultima analisi, anche al riciclo per produrre nuovi materiali e componenti.



APPENDICE I: QUADRO NORMATIVO ESISTENTE

GENERALITA'

Ad oggi, esistono relativamente pochi requisiti normativi per il settore dei rifiuti compositi. La “Strategia europea per la plastica in un’economia circolare” (2018) sottolinea che i bassi tassi di riutilizzo e riciclaggio (meno del 30%) della plastica a fine vita sono una sfida fondamentale da affrontare. La dichiarazione è stata seguita dalla creazione della cosiddetta “Circular Plastics Alliance”, un impegno volontario di stakeholder privati e pubblici coinvolti nelle catene del valore della plastica sostenuti dalla Commissione europea, che attualmente conta più di 270 firmatari e si impegna a contribuire ad aumentare il mercato UE della plastica riciclata a 10 milioni di tonnellate entro il 2025. Anche se il focus del CPA è principalmente sulla plastica monouso per l’agricoltura e le applicazioni di imballaggio, sono stati coinvolti anche altri settori come l’automotive, l’edilizia e l’IEEE. I compositi non sono direttamente coinvolti negli obiettivi di CPA, ma certamente beneficerebbero dell’approccio dell’economia circolare sulla base della loro impronta positiva dell’impatto ambientale e delle molte opzioni disponibili per il riciclaggio. Secondo la classificazione europea dei rifiuti, i compositi sono classificati come rifiuti plastici da costruzione e demolizione con il codice 17 02 03. I seguenti altri codici sono utilizzati anche a livello nazionale:

- 07 02 13 rifiuti di plastica da processi chimici organici
- 10 11 03 rifiuti di materiali fibrosi a base di vetro derivanti da processi termici
- 10 11 12 rifiuti di vetro diversi da quelli di cui alla voce 10 11 11 derivanti da processi termici
- 10 11 99 rifiuti non specificati altrimenti derivanti da processi termici
- 12 01 05 trucioli e ritagli di plastica derivanti dalla lavorazione e dal trattamento fisico meccanico superficiale di metalli e plastiche

La classificazione dei rifiuti è necessaria per garantire un’efficiente raccolta differenziata e selezione e per identificare un’opzione di trattamento dei rifiuti adeguatamente autorizzata. Avere un flusso di rifiuti che può fornire plastica pulita di un unico tipo in grandi quantità aumenta l’efficienza dell’opzione di trattamento dei rifiuti scelta. Tuttavia, come mostrato sopra, i rifiuti compositi sono spesso classificati come rifiuti plastici e possono quindi mescolarsi con altri tipi di plastica. Avere una diversa classificazione dei rifiuti può anche limitare il potenziale di un mercato paneuropeo per i compositi riciclati. Può essere difficile utilizzare i metodi di riciclaggio esistenti, come la via dei forni da cemento, che è disponibile solo in un numero limitato di paesi.

A livello nazionale, solo quattro paesi fanno un chiaro riferimento ai rifiuti compositi nella loro legislazione: Germania, Austria, Paesi Bassi e Finlandia. Questi paesi vietano la messa in discarica o l’incenerimento dei compositi (vedi i casi studio dei paesi qui sotto). In Francia, la “Tabella di marcia per l’energia fino al 2028” del governo afferma che il riciclaggio di tutti i materiali delle turbine eoliche dovrebbe essere reso obbligatorio a partire dal 2023.

Wind Europe ha, per esempio, emesso un comunicato stampa nel giugno 2021 per chiedere un divieto di smaltimento in discarica a livello europeo delle pale delle turbine eoliche in disuso entro il 2025. Questo arriva dopo che diverse aziende leader del settore hanno annunciato piani ambiziosi per il riciclaggio e il recupero delle pale. Un divieto di discarica accelererebbe ulteriormente lo sviluppo di tecnologie di riciclaggio sostenibili per i materiali compositi.

LA DIRETTIVA EUROPEA SUI RIFIUTI

La Direttiva quadro europea sui rifiuti (2008/98/CE) definisce i concetti di base relativi alla gestione dei rifiuti. Sottolinea la necessità di aumentare il riciclaggio ed evidenzia la ridotta disponibilità di discariche e stabilisce la gerarchia dei rifiuti. 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.

Grazie al 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" siano adottati in conformità a quanto stabilito dalla disciplina comunitaria ovvero, in mancanza di criteri comunitari, siano stabiliti 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.

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 vetroresina.

DEFINIZIONI

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;
- 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, la vetroresina è soggetta alle disposizioni sul recupero e smaltimento dello stesso DLgs 152/2006. Secondo il Decreto, lo smaltimento finale (conferimento in discarica) è una legittima destinazione del composito, 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. 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 nazionale:

- 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
- 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

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.

CRITICITA’

A fronte delle esperienze maturate finora dalle aziende del settore, è possibile evidenziare alcune barriere che al momento rendono complessa la gestione circolare dei compositi a fine vita in Italia:

- 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);
- 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 materiale finora disponibile 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.

Si ringrazia ANEV per avere autorizzato la riproduzione della presente Appendice
