



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Iliara Rossitti, PhD
Dipartimento di Ingegneria
Chimica Materiali Ambiente
(DICMA)

e-mail: iliana.rossitti@uniroma1.it

Telefono: +39 3492797845

SUSTAINABILITY

Executive Summary

L'impiego crescente dei compositi in fibra di carbonio pone sfide critiche per il loro smaltimento (vedi Figura 1). Questo caso studio presenta un sistema **bio**-epossidico riciclabile tramite Recyclamine[®], che consente il recupero di rinforzi e matrici con alte prestazioni e basso impatto ambientale. Una soluzione concreta e scalabile per un'economia circolare nei settori *automotive*, sport ed energetico.

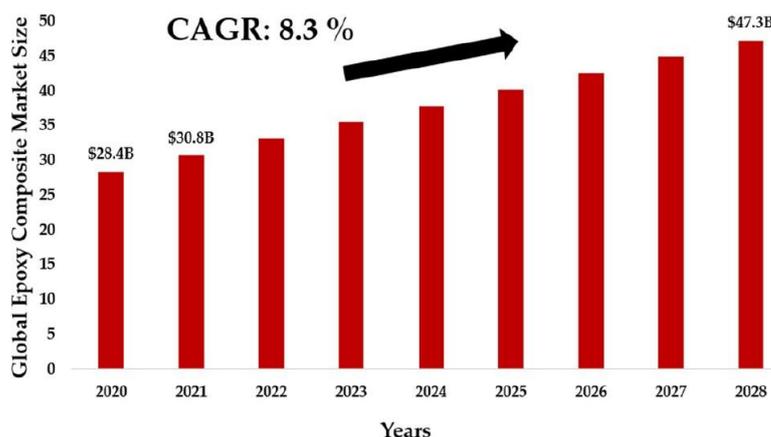


Figura 1 Entità e previsioni del mercato dei compositi epossidici [1]

Il problema ambientale ed economico dei compositi

Le fibre di carbonio (FC) trovano oggi ampia. Tuttavia, l'aumento della produzione di materiali compositi comporta un incremento dei rifiuti, provenienti sia dalla produzione che dai prodotti a fine vita. I metodi attuali di smaltimento, discarica e incenerimento, non permettono un recupero sostenibile e non sono considerati riciclo vero e proprio. Inoltre, la normativa europea non prevede ancora regolamenti specifici per il trattamento dei CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) a fine vita [2].

La soluzione: resine *bio-based* e Recyclamine[®]

L'industria e la ricerca stanno esplorando soluzioni innovative come il riciclo chimico e l'impiego di nuovi sistemi termoindurenti. In particolare, la tecnologia Recyclamine[®] consente il recupero della matrice termoindurente sotto forma di termoplastico, grazie a un legame scindibile all'interno della struttura chimica attivabile con calore e pH acido. Questo sistema opera a basse temperature (70–100 °C), consente il recupero delle fibre senza danneggiarle e riduce notevolmente l'impatto ambientale.

Risultati sperimentali

In primo luogo, è stata effettuata una caratterizzazione termica della resina *bio-based* per valutare l'influenza delle diverse condizioni di post-polimerizzazione sulla stabilità termica e sulla temperatura di transizione vetrosa. Successivamente, sono stati realizzati laminati compositi in fibra di vetro e carbonio, indagando le proprietà meccaniche, microstrutturali e termiche in funzione dei regimi di *curing* selezionati. Infine, è stata testata una procedura di riciclo (brevettata dall'azienda Connora Technologies) per verificare la possibilità di recuperare sia la matrice termoindurente sottoforma di polimero termoplastico riciclato che il rinforzo, rendendole riutilizzabili per nuove applicazioni. Sono elencati i principali risultati:

- Matrice bio-epossidica: la condizione più vantaggiosa si è rivelata l'assenza di post-polimerizzazione, che ha portato a una temperatura di transizione vetrosa (T_g) pari a 76,6°C.
- Laminati compositi: il post-*curing* a 100°C ha migliorato la reticolazione delle catene polimeriche, determinando un incremento della resistenza meccanica. Rispetto ai laminati non sottoposti a post-polimerizzazione, la resistenza a flessione è aumentata del 3% nei compositi a base di carbonio e del 12% in quelli a base di vetro.
- Influenza dei difetti microstrutturali: le analisi SEM e DMA hanno evidenziato che, sebbene i compositi in fibra di carbonio offrano prestazioni meccaniche superiori, il loro incremento della T_g è stato limitato a solo 1°C rispetto alla sola resina. Ciò è dovuto a difetti microstrutturali e a una scarsa impregnazione delle fibre. Al contrario, i compositi in fibra di vetro hanno mostrato un aumento più significativo della T_g (+4°C), attribuibile a una migliore adesione fibra-matrice e ad un'impregnazione più uniforme. In sintesi: migliore compatibilità con le fibre di vetro.
- Riciclo chimico: è stata sviluppata con successo una procedura di riciclo chimico con rese di recupero fino al 98,8% (vedi Figura 2). Il materiale termoplastico recuperato ha mostrato proprietà termiche rilevanti per nuove applicazioni ingegneristiche, con una stabilità termica fino a 400°C e una T_g di 59,4°C, degna di altri termoplastici già industrializzati. Fondamentale: le fibre recuperate sono risultate prive di contaminazioni evidenti e senza danni significativi (vedi Figura 3).



Figura 2 Schematizzazione del processo di recupero

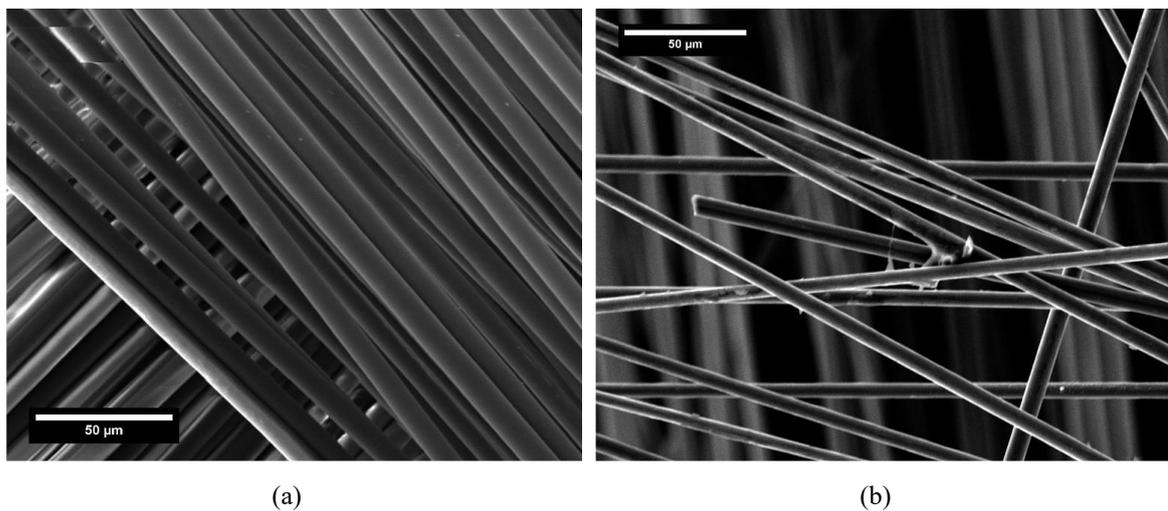


Figura 3 Analisi SEM su fibre riciclate: (a) fibre di vetro e (b) fibre di carbonio

Analisi LCA (*Life Cycle Assessment*) e impatti ambientali

Per dimostrare sotto un ulteriore aspetto l'efficacia ed il ridotto consumo che comporta l'utilizzo di indurenti come la Recyclamine[®], si riporta alla lettura di un recente studio LCA di La Rosa et al [3]. In primo luogo, è fondamentale evidenziare che la metodologia LCA è considerata la tecnica più diffusa per valutare gli impatti ambientali associati ai materiali, poiché permette di analizzare l'impatto di un prodotto lungo l'intero ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento dei rifiuti dei suoi vari componenti. Nello specifico, un'analisi LCA si articola in diverse fasi principali: estrazione dei materiali, produzione e gestione dei rifiuti, imballaggio, trasporto, utilizzo e smaltimento del prodotto. Inoltre, viene compilato un inventario del ciclo di vita (LCI) per registrare le

emissioni e le risorse consumate attribuibili a un determinato prodotto. L'LCA è regolata da standard ISO e il processo di valutazione del ciclo di vita comprende la definizione dell'ambito e dell'obiettivo, l'analisi dell'inventario, la valutazione dell'impatto e l'interpretazione dei dati. L'obiettivo e lo scopo di questa ricerca risiedono nella valutazione degli impatti ambientali del processo di riciclo chimico sviluppato e brevettato dalla Connora Technologies, ovvero lo stesso riciclo chimico analizzato in questo caso studio, ma applicato a livello di impianto pilota. L'innovativa tecnologia di riciclo della Connora Technologies e della Recyclamine® risulta essere estremamente promettente per il raggiungimento di un'economia dei materiali termoindurenti circolare ed ecosostenibile. Va considerato, inoltre, che nello studio di LCA visto fino adesso la resina epossidica considerata è *bio-based*. Ciò garantisce un minore impatto ambientale, in quanto almeno in parte non deriva da fonti fossili. L'acido acetico può essere recuperato ed utilizzato per un ulteriore riciclo chimico o utilizzato in altri processi come reagente chimico per la produzione di polietilentereftalato (PET), acetato di cellulosa per le pellicole fotografiche e acetato di polivinile per le colle, nonché come additivo alimentare. L'acetato di sodio (sottoprodotto del processo chimico), invece, potrebbe essere recuperato ed impiegato nell'industria tessile come neutralizzante dell'acido solforico e nell'industria della gomma sintetica per ritardare la vulcanizzazione del cloroprene. Tali fattori comporterebbero un ulteriore avvicinamento all'obiettivo di una produzione e smaltimento totalmente ecosostenibile dei materiali compositi a matrice termoindurente. Infine, l'utilizzo di rinforzi in carbonio vergine provenienti da scarti di produzione delle fibre o di carbonio riciclato, insieme alla tecnologia della Recyclamine®, ridurrebbe ancora di più gli impatti ambientali e i costi dovuti alla produzione e allo smaltimento dei materiali compositi a matrice termoindurente in fibre di carbonio.

Applicazioni industriali

Il settore in cui questo innovativo tipo di materiali compositi termoindurenti viene, al momento, preso maggiormente in considerazione è quello delle pale eoliche. Secondo recenti studi [4], infatti, l'85% dei componenti di una turbina eolica può essere riciclato e riutilizzato. L'unica parte che in genere viene persa è rappresentata proprio dalle pale eoliche, che risultano difficili da recuperare per la natura termoindurente della resina con cui vengono realizzate. Inoltre, si stima che almeno il 10% degli scarti provenienti dal processo di produzione delle pale eoliche sia non riciclabile. In questo senso la tecnologia Recyclamine® offre la grande opportunità di una soluzione innovativa e duratura, in quanto

permette la realizzazione di termoindurenti epossidici recuperabili e riutilizzabili sotto forma di termoplastici.

Prospettive future

È un fatto che, quando si considerano fattori quali il cambiamento climatico, il riscaldamento globale, la sostenibilità ambientale e l'economia circolare, il conferimento in discarica e inceneritore dei rifiuti in CFRP debba essere evitato. Sebbene i termoindurenti siano stati criticati per la loro scarsa sostenibilità, grazie all'intelligente reazione e lavoro di ricerca da parte di diversi gruppi in tutto il mondo il futuro appare luminoso per le nuove possibilità offerte dall'utilizzo di nuovi prodotti chimici che potrebbero trasformare i termoindurenti in prodotti utilizzabili indefinitamente. Tuttavia, è certo che sia necessaria un'ulteriore attività di ricerca, e si deve prestare attenzione al crescente uso di nuovi materiali da fonti rinnovabili e sostenibili ma, come la storia insegna, aziende e ricercatori nel campo dei compositi e della chimica hanno l'energia e lo slancio per reagire e sviluppare nuove strategie e prodotti.

- [1] M. Valente, I. Rossitti, and M. Sambucci, "Different Production Processes for Thermoplastic Composite Materials: Sustainability versus Mechanical Properties and Processes Parameter," Jan. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/polym15010242.
- [2] L. Giorgini, T. Benelli, G. Brancolini, and L. Mazzochetti, "Recycling of carbon fiber reinforced composite waste to close their life cycle in a cradle-to-cradle approach," Dec. 01, 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.cogsc.2020.100368.
- [3] A. D. La Rosa, I. Blanco, D. R. Banatao, S. J. Pastine, A. Björklund, and G. Cicala, "Innovative chemical process for recycling thermosets cured with recyclamines® by converting bio-epoxy composites in reusable thermoplastic-an LCA study," *Materials*, vol. 11, no. 3, Feb. 2018, doi: 10.3390/ma11030353.
- [4] P. K. Dubey, S. K. Mahanth, A. Dixit, and S. Changmongkol, "Recyclable epoxy systems for rotor blades," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Oct. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/942/1/012014.