

~95% dei compositi epossidici finisce nelle discariche

73% dei consumatori è disposto a pagare un prezzo maggiore per materiali sostenibili.

41% dei materiali di origine biologica proviene da rifiuti biologici

Impatto ambientale del puntale composito delle scarpe di sicurezza

Questo documento valuta i materiali dei puntali compositi non sulla biodegradabilità—che è limitata in tutti i materiali strutturali—ma sull'origine del carbonio, l'energia del processo, la riciclabilità e la conformità normativa.

La politica ambientale dell'Europa punta alla neutralità climatica entro il 2035, con un' enfasi su energia rinnovabile, riduzione dei rifiuti, riciclo e utilizzo di materiali sostenibili tramite normative rigorose e impegni nazionali di riduzione delle emissioni.

I puntali di sicurezza convenzionali sono tipicamente realizzati in fibra di vetro rinforzata con resina epossidica. Pur essendo efficaci dal punto di vista meccanico, questi compositi a base di epossidica non sono riciclabili, non si decompongono e comportano un elevato consumo energetico e significative emissioni di anidride carbonica lungo l'intero ciclo di vita.

Per superare queste limitazioni, viene introdotto Bio-Toe come alternativa sostenibile. Realizzato con una formulazione in poliammide contenente il 41% di nylon di origine biologica derivato da biomassa non destinata all'alimentazione, Bio-Toe offre emissioni di carbonio inferiori lungo il ciclo di vita, riciclabilità meccanica e il potenziale di ottenere prestazioni carbon-negative in condizioni definite di produzione e riciclo.

I comuni compositi a base di epossidica utilizzati oggi includono:

- **fibra di vetro**
- **fibra di carbonio**

Materiali innovativi Kessin:

- **miscele polimeriche a base biologica PA56**



BIO-TOE

Sfide ambientali dei compositi a base di epossidica

Difficoltà nel riciclo e nella circolarità

Le resine epossidiche utilizzate nei tradizionali compositi in fibra di vetro e fibra di carbonio formano strutture termoindurenti irreversibili una volta polimerizzate. Queste reti reticolate non possono essere fuse o rimodellate come i termoplastici. La maggior parte dei compositi epossidici a fine vita viene destinata a discarica o incenerimento, poiché i metodi di riciclo convenzionali non permettono un recupero economico dei materiali.

Il riciclo meccanico (ad esempio la macinazione per ottenere filler) degrada significativamente le proprietà meccaniche, rendendo il materiale riciclato di limitato valore riutilizzabile.

Esistono tecnologie di riciclo chimico in fase di ricerca, ma al momento sono ad alta intensità energetica, costose e non ampiamente implementate in maniera sostenibile.

Impronta di produzione ed emissioni di COV

La produzione di fibra di vetro e la fabbricazione della resina epossidica sono processi ad alta intensità energetica che richiedono elevate temperature e materie prime petrolchimiche. In particolare, la produzione della resina può emettere composti organici volatili (COV) e gas serra.

Ciò contribuisce a un'elevata impronta ambientale complessiva se valutata lungo l'intero ciclo di vita, dalla produzione dei materiali fino alla fine del loro utilizzo.

I compositi in fibra di vetro non sono biodegradabili e possono persistere in discarica per decenni o secoli. La separazione della fibra di vetro dalla resina è tecnicamente possibile, ma costosa e poco efficiente dal punto di vista energetico.

Caratteristiche ambientali del nylon PA56 a base biologica

Il PA56 a base biologica incorpora carbonio proveniente da fonti di biomassa rinnovabile nella sua materia prima. Ciò significa che parte dell'impronta di carbonio del polimero deriva dal CO₂ atmosferico sequestrato anziché dai combustibili fossili, riducendo le emissioni di gas serra dal cradle-to-gate rispetto ai polimeri completamente petrolchimici.

A differenza delle epossidiche termoindurenti, le poliammidi termoplastiche come il PA56 possono essere rimodellate e rifuse a fine vita, supportando la circolarità dei materiali anziché lo smaltimento o il riciclo meccanico in nuovi prodotti, senza degradare le prestazioni così gravemente come nei compositi epossidici.

Questo comportamento termoplastico conferisce al PA56 un chiaro vantaggio ambientale rispetto alle resine epossidiche, che oggi non hanno alcun metodo industriale di riciclo praticabile.

Le ricerche indicano che le fibre di poliammide a base biologica (come il PA56) mostrano una biodegradabilità significativa in determinate condizioni, mentre molti polimeri derivati dal petrolio persistono molto più a lungo nell'ambiente.

Tabella 1 – Recuperabilità a fine vita dei puntali composti a base di resina epossidica

Confronto tra i percorsi di recupero della matrice epossidica e delle fibre, la scalabilità e il livello di maturità industriale

Metodo	Può Recuperare l'Epossidica?	Può Recuperare le Fibre?	Scalabile?	Osservazioni
Chimico	X (l'epossidica è degradata)	✓ (necessita di "resizing")	! (costoso, tossico)	Utilizzato in laboratorio/ impianti pilota; richiede solventi specifici e produce rifiuti chimici.
Termico	X (l'epossidica è bruciata)	! (fibre indebolite)	✓ (industriale)	Utilizzato nei forni per cemento; recupero energetico ma la qualità delle fibre è ridotta.
Macinazione Meccanica	X (l'epossidica è persa)	X (fibre triturate)	✓	Economico ma trasforma il materiale in filler di basso valore; non recupera fibre intatte.

Tabella 2 – Confronto delle prestazioni di riciclo e dell'impatto ambientale: puntali in PA56 bio-based vs puntali composti epossidici

Resa di recupero del materiale, fabbisogno energetico, costi, mantenimento della qualità e potenziale di circolarità

Criterio / Parametro	41 % bio-PA56 / 59 % petro-PA (Coppa termoplastica)	Coppa in composito termoindurente a base epossidica
Famiglia polimerica	Una singola famiglia polimerica (PA)	Composito epossidico reticolato + tessuto in fibra di vetro/carbonio
Via primaria di riciclo	Triturazione → Rifusione → Stampaggio a iniezione per nuove coppe (ciclo chiuso)	Solo le fibre sono recuperabili
Resa tipica di recupero	80–90 % della massa polimerica riutilizzata in parti della stessa qualità	50–60 % della massa della fibra; 0% della matrice epossidica
Fabbisogno energetico per kg recuperato	≈ 15 MJ (rifusione)	35–55 MJ (solvolisi / pirolisi)
Perdita di qualità dopo 1 ciclo	< 10 % nell'impatto Izod	Le fibre necessitano di un nuovo trattamento di finitura ("sizing")
Numero di cicli ad alto valore	5–7 volte (dati del settore per il PA)	1 volta (le fibre devono essere nuovamente trattate)
Opzione di down-cycling	PA → clip automobilistiche, fascette per cavi	Epossidica macinata → filler per calcestruzzo / asfalto
Sensibilità alla contaminazione	Bassa – la filtrazione a fusione rimuove pigmenti e impurità	Alta – deve separare resina, fibra, eventuali metalli
Infrastruttura necessaria	Linee standard di riciclo del PA (esistenti a livello globale)	Impianti specializzati per termoindurenti (< 10 a livello globale)
Costo del recupero	Circa 0.3 €/kg (compounding + energia)	1.5–3 €/kg (prodotti chimici + alte temperature)
Credito ambientale (GWP)	Circa –1.8 kg CO ₂ -eq/kg rispetto al PA vergine	Circa –0.4 kg CO ₂ -eq/kg (solo per le fibre recuperate)

Tabella 3 – Vantaggi funzionali e di sostenibilità del PA56 bio-based nelle applicazioni di puntali di sicurezza

Implicazioni per l'impronta dei gas serra, l'energia di processo, la sicurezza dei lavoratori e la conformità normativa

Vantaggio della Coppa in bio-PA56	Spiegazione / Importanza
~40% in meno di carbonio fossile nel granulo	Riduzione diretta dell'impronta di gas serra della resina stessa.
Materia prima rinnovabile	Scudo dalla volatilità del prezzo del petrolio e dalle pressioni di reporting Scope 3.
Ciclo di stampaggio a iniezione di ~65s vs 30 min di reticolazione epossidica	Energia 9 volte inferiore nella fase di formatura; maggior contribuente al divario di GWP.
Rifusibile (termoplastica)	Riciclo meccanico possibile; l'epossidica è reticolata irreversibilmente.
Nessun VOC (stirene/ammina) durante la lavorazione	Migliori parametri per la qualità dell'aria interna e l'esposizione dei lavoratori.
Soddisfa i prossimi obblighi di contenuto bio (UE, governo federale USA)	Future-proof del prodotto contro le tariffe di responsabilità estesa del produttore.

Tabella 4 – Fabbisogno energetico primario indicativo per i materiali dei puntali (dalla culla al cancello)

I valori rappresentano intervalli tipici del settore per la produzione di materiali vergini; i valori effettivi dipendono dal fornitore, dall'area geografica e dal mix energetico. I valori sono destinati a un confronto preliminare e non a una LCA precisa a livello di singolo prodotto.

Categoria del Materiale	Materiale Tipico per i Paraurti delle Scarpe	Fabbisogno Energetico Primario (MJ/kg)	Principali Fattori Energetici	Note per l'Applicazione nel Calzaturiero
Fibra di Vetro	Vetro E + epossidica	45–65 (fibra di vetro) + 70–90 (resina epossidica)	Fusione della fibra (~1500 °C), sintesi della resina petrolchimica	La matrice epossidica impedisce il riciclaggio a ciclo chiuso
Fibra di Carbonio	Fibra di carbonio a base di PAN + epossidica	250–300 (fibra di carbonio) + 70–90 (resina epossidica)	Stabilizzazione del PAN e carbonizzazione	Energia incorporata più elevata; riutilizzo limitato
Biobased	PA56 (41% biobased)	60–80	Fermentazione + polimerizzazione	Minore apporto di energia fossile; riciclabilità termoplastica

Tabella 5 – Confronto della recuperabilità

Criterio	Composito epossidico	Metalli	Bio-PA56
Riciclo a ciclo chiuso	No	Raro	Sì
Riutilizzo multi-ciclo	No	Limitato	Sì (5–7×)
Infrastruttura	Specializzata	Industria pesante	Linee PA esistenti
Mantenimento del valore	Basso	Medio	Alto

Recuperabilità dei materiali e prestazioni di circolarità:

- **Puntali in PA56 a base biologica**

Il materiale PA56 a base biologica consente il riciclo meccanico con elevato recupero del materiale, tipicamente recuperando oltre l'80% della massa del polimero, supportando il riciclo multi-loop (5–7 cicli) con una degradazione limitata delle proprietà meccaniche.

Il riciclo è economicamente sostenibile (utilizzando linee standard di riciclo della poliammide disponibili a livello globale) mantenendo un alto valore del materiale. I componenti riciclati possono essere riutilizzati nelle calzature di sicurezza o impiegati in applicazioni industriali di minore livello.

- **Puntali compositi a base di epossidica**

Solo le fibre di rinforzo possono essere parzialmente recuperate, generalmente una sola volta, e con una perdita significativa di resistenza. La matrice epossidica stessa non è recuperabile e viene distrutta durante il riciclo.

I processi di riciclo richiedono un alto apporto energetico, infrastrutture specializzate e gestione chimica, con costi elevati e scalabilità limitata.

La circolarità complessiva è bassa, con la maggior parte del materiale destinata allo smaltimento.

- **Considerazioni su salute, sicurezza e regolamentazione**

Il principale rischio occupazionale dei sistemi a base di epossidica si verifica durante la produzione e la riparazione, richiedendo dispositivi di protezione individuale rigorosi, ventilazione e controlli sull'esposizione.

Gran parte della produzione di puntali epossidici avviene al di fuori dell'UE, dove l'applicazione delle normative e gli standard occupazionali variano, pur rimanendo i prodotti soggetti alle restrizioni del mercato UE. Gli sviluppi normativi in corso nell'UE potrebbero ulteriormente limitare alcune chimiche epossidiche, aumentando il rischio a lungo termine per i componenti delle calzature a base di epossidica.

Principali riscontri e osservazioni

- **Contesto di mercato e normativo**

Circa il 73% dei consumatori è disposto a pagare un prezzo maggiore per materiali sostenibili, indicando una crescente domanda di soluzioni per calzature di sicurezza a basso impatto ambientale.

La roadmap normativa dell'UE (dal 2026 in poi) continua a rafforzare le restrizioni sulle sostanze pericolose, inclusi alcuni indurenti epossidici e sostanze chimiche classificate CMR, aumentando il rischio di conformità a lungo termine per i sistemi a base di epossidica.

- **Limitazioni a fine vita dei compositi a base di epossidica**

Circa il 95% dei prodotti in composito epossidico viene attualmente destinato a discarica o incenerimento a causa della reticolazione irreversibile delle matrici termoindurenti.

Metodi avanzati di riciclo esistono a livello di laboratorio o pilota, ma rimangono ad alta intensità energetica, costosi e non economicamente sostenibili per l'industria calzaturiera. In pratica, la riciclabilità dei componenti epossidici (fibra di carbonio, fibra di vetro) ha un impatto ambientale minimo su scala industriale.

- **Complessità a livello di sistema dei puntali epossidici**

Le resine epossidiche sono generalmente utilizzate in combinazione con rinforzi in fibra di vetro o fibra di carbonio, creando strutture multi-materiale. Anche quando vengono impiegate varianti "bio-epossidiche", la struttura composita stessa impedisce un'efficiente separazione e recupero, rendendo il riciclo a circuito chiuso poco praticabile nelle calzature.

- **Vantaggio ambientale dei puntali in PA56 a base biologica**

I puntali in PA56 a base biologica contengono il 41% del polimero derivante da biomassa di scarto, riducendo la dipendenza dal carbonio fossile e, a differenza dei compositi epossidici, appartengono a una singola famiglia di polimeri termoplastici, riducendo significativamente la complessità di smontaggio e riciclo.

Le infrastrutture esistenti per il riciclo delle poliammidi permettono un riciclo pratico a circuito chiuso all'interno del settore calzaturiero e in industrie correlate.

- **Chiarimento sulla biodegradabilità**

Il PA56 a base biologica non è biodegradabile nelle condizioni di smaltimento reali.

Il vantaggio ambientale rispetto ai compositi epossidici non è quindi legato alla degradazione in discarica, ma all'origine del carbonio, all'energia del processo, alla sicurezza dei lavoratori, alla riciclabilità e alla resilienza normativa.

Valutazione complessiva e principali risultati

Quando valutati in termini di impronta di carbonio, energia di processo, sicurezza dei lavoratori, resilienza normativa, prestazioni meccaniche e recuperabilità a fine vita, gli inserti di sicurezza in PA56 di origine biologica offrono l'equilibrio più favorevole attualmente raggiungibile tra i materiali per puntali disponibili sul mercato, senza compromettere le prestazioni di sicurezza certificate.

Piuttosto che sacrificare la sicurezza a favore della sostenibilità, i puntali in PA56 bio-based ottimizzano il rapporto protezione/impatto combinando prestazioni meccaniche certificate con un ridotto utilizzo di carbonio fossile, una minore richiesta energetica in fase produttiva, un miglioramento della sicurezza occupazionale durante la lavorazione e una riciclabilità pratica in ciclo chiuso — vantaggi che i sistemi metallici e i compositi a base di resina epossidica non offrono simultaneamente.



<https://www.kessin.eu>

contact@kessin.eu

+49 (0) 151 262 35 428

Berlin, Germany, 11 Dicembre 2025

Sources:

<https://eureka.patsnap.com/report-how-recyclable-epoxy-composites-are-redefining-material-science>

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10889868.2025.2565253?af=R>

<https://www.vertecbiosolvents.com/traditional-vs-bio-based-resin-comparing-the-alternatives>

https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2003/87-7972-683-6/html/helepubl_eng.htm

<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.iecr.4c03321>

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-09240-x>