

**Borse di dottorato di ricerca finanziate da Regione Lombardia nell'ambito dell'Accordo di collaborazione con ENEA/Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo sostenibile (DGR n. 7792 del 17/01/2018 e 5321 del 4/10/2021).**

## **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BERGAMO**

Dottorato in: Technology Innovation and Management-

**Beatrice Colombo:** Sviluppo di architetture tessili innovative a base di fibre di carbonio di riciclo per il settore dei materiali compositi-

### **Abstract**

Il crescente utilizzo di materiali compositi plastici rinforzati con fibra di carbonio in diverse applicazioni industriali riguardanti, ad esempio, i trasporti, le costruzioni e le attrezzature sportive di lusso ha portato a un aumento dei rifiuti generati, che vengono principalmente inceneriti o smaltiti in discarica, causando notevoli problemi ambientali. Il motivo principale risiede nell'incapacità di utilizzare efficacemente le fibre di carbonio riciclate che attualmente possono essere utilizzate solo per la produzione di materiali di seconda qualità come tessuti non tessuti e compositi stampati ad iniezione che possiedono scarse proprietà meccaniche. Poiché i filati sono caratterizzati da un elevato orientamento delle fibre e da una buona compattezza, possono essere sfruttati per produrre rinforzi più orientati, migliorando potenzialmente le prestazioni dei materiali compositi finali. Pertanto, la filatura potrebbe rappresentare un modo per espandere l'uso della fibra di carbonio riciclata a componenti più strutturali. In tale contesto, questo progetto di dottorato mira a sviluppare un innovativo processo di filatura per ottenere filati con proprietà fisiche, termiche e meccaniche ripetibili adatti alla produzione di compositi plastici rinforzati con fibra di carbonio per applicazioni strutturali. Per raggiungere questo obiettivo, è stato seguito un approccio in sei fasi. I risultati raggiunti mostrano diverse evidenze. In primo luogo, le fibre di carbonio riciclate provenienti dagli scarti di produzione possono essere gestite dall'innovativo processo di filatura proposto, ma devono essere miscelate con una fibra termoplastica. In secondo luogo, i filati ibridi lavorati hanno buone proprietà di trazione e una buona quantità di fibra di carbonio riciclata, sebbene le diverse fasi che compongono l'innovativo processo di filatura proposto riducano la quantità teorica inserita, pertanto, potrebbero essere adottati per la fabbricazione di materiali compositi di buona qualità. I CFRP costituiti da filati ibridi prodotti con il 70% di fibre di carbonio riciclate sembrano essere i più promettenti dal punto di vista meccanico. In terzo luogo, è stata analizzata la sostenibilità dell'innovativo processo di filatura. Infine, vale la pena notare che questa tesi ha implicazioni sia teoriche che pratiche. Da un lato, migliora la conoscenza del rapporto tra materiali compositi ed economia circolare ampliando le conoscenze sulla filatura dei rifiuti di fibre di carbonio dagli scarti di produzione e fornendo future direzioni di ricerca nel campo delle tecnologie di riciclo dei materiali compositi plastici rinforzati con fibre. Dall'altro, offre un forte arricchimento pratico all'industria dei materiali compositi portando importanti risparmi economici alle aziende, che possono ridurre sia i costi di acquisto delle materie prime che i costi di smaltimento dei rifiuti. Inoltre, i risultati portano a una significativa riduzione dell'impatto ambientale, poiché il riciclo delle fibre di carbonio dagli scarti di produzione consente di ridurre l'uso di materie prime vergini e l'inquinamento dovuto all'incenerimento e allo smaltimento in discarica, nonché il recupero dell'energia incorporata nelle fibre di carbonio durante la loro produzione.

### **Pubblicazioni**

- B. Colombo, P. Gaiardelli, S. Dotti, and F. Caretto, "An innovative spinning process for production and characterisation of ring-spun hybrid yarns from recycled carbon fibre," *J. Clean. Prod.*, vol. 406, 137069, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137069.
- B. Colombo, P. Gaiardelli, S. Dotti, and F. Caretto, "Recycling technologies for fibre-reinforced plastic composite materials : A bibliometric analysis using a systematic approach," *J. Compos. Mater.*, pp. 1–18, 2022, doi: 10.1177/00219983221109877.

- B. Colombo, P. Gaiardelli, S. Dotti, F. Caretto, and G. Coletta, “Recycling of Waste Fiber-Reinforced Plastic Composites: A Patent-Based Analysis,” *Recycl.* 2021, Vol. 6, Page 72, vol. 6, no. 4, p. 72, Nov. 2021, doi: 10.3390/RECYCLING6040072.

#### **Contributi under review**

- B. Colombo, P. Gaiardelli, S. Dotti, and F. Caretto, “Environmental assessment of a spinning process for the production of ring-spun hybrid yarns from recycled carbon fiber: a cradle-to-gate approach” (under review on *Journal of Cleaner Production*).
- B. Colombo, P. Gaiardelli, S. Dotti, and F. Caretto, “Tensile properties of Università degli studi di Bergamo – Dipartimento di Ingegneria Gestionale, dell’Informazione e della Produzione – viale Marconi 5, 24044 Dalmine (Bg) – Tel:035 2052 077- 300 – Fax:035 2052 308 Email: ingegneria@unibg.it – Pec: ingegneria@unibg.legalmail.it – P.iva:IT01612800167 – C.f.:80004350163 – Codice Amministrazione Destinataria: TN0NX2
- unidirectional thermosetting composites reinforced with ring-spun hybrid yarns from recycled carbon fibers” (submitted to *The Journal of The Textile Institute*).

#### **Conference Proceedings:**

- B. Colombo, P. Gaiardelli, S. Dotti, and F. Caretto, “Analysis of hybrid yarns properties for good-quality recycled carbon fibre-reinforced plastic composites,” *Proc. Summer Sch. Fr. Turco, 2022. IDI-Italian Assoc. Ind. Oper. Profr. 2022., 2022*
- B. Colombo, A. Abdoos, P. Gaiardelli, S. Dotti, and F. Caretto, “A technical feasibility study of an innovative spinning process for recycled carbon fibres,” *26th Summer Sch. Fr. Turco, 2021. AIDI-Italian Assoc. Ind. Oper. Profr. 2021., 2021.*

#### **Convegni/Conferenze**

- APMS 2022 - Smart Manufacturing and Logistic Systems: Turning Ideas into Action – PhD Workshop, Gyeongju, 25th September 2022 Presentazione del Dottorato e dei relativi risultati
- APMS 2021 - Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems - PhD Workshop, Nantes, 5th September 2021 Presentazione del Dottorato e dei relativi risultati
- XXVII Summer School Francesco Turco - “Unconventional Plants: Technologies, Tools and Methodologies for emerging domains”, Sanremo, 7th-9th September 2022 → Presentazione dell’articolo [6]
- IX PhD on the Go “Marco Garetti” – University of Sannio, 16th -17th June 2022→ Presentazione del Dottorato e dei relativi risultati
- XXVI Summer School Francesco Turco – “Industrial systems engineering amid change and uncertainty in the next normal”, Bergamo, 8th-10th September 2021 → Presentazione dell’articolo [7]
- VIII PhD on the Go “Marco Garetti” – University of Sannio, 24th -25th June 2021 → Presentazione del Dottorato e dei relativi risultati

#### **Doctoral workshop**

- Presentazione attività di ricerca dei dottorandi, 22nd September 2021.
- Presentazione attività di ricerca dei dottorandi, 24th September 2020.