

NANOCOMPOSITI RINFORZATI: UN APPROCCIO INTEGRATO TRA ESPERIMENTI, TEORIE E SIMULAZIONI

Luigi Egiziano¹, Patrizia Lamberti¹, Giovanni Spinelli^{2,3}, Vincenzo Tucci¹

¹ Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione ed Elettrica e Matematica applicata (DIEM)
Università degli Studi di Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132 - 84084 - Fisciano (SA)

² Università Telematica Giustino Fortunato
Via Raffaele Delcogliano 12, 82100 Benevento

³ Open Laboratory on Experimental Micro and Nano Mechanics, Institute of Mechanics,
Bulgarian Academy of Sciences, Acad. G. Bonchev Str., Block 4, 1113 Sofia, Bulgaria.

Negli ultimi anni, i nanocompositi polimerici caricati con particelle a base di carbonio — quali nanotubi, fibre, grafene e suoi derivati — hanno attirato un crescente interesse nella comunità scientifica grazie alle loro eccezionali proprietà meccaniche, elettriche e termiche. Tali particelle, grazie al loro elevato rapporto d'aspetto, sono in grado di trasferire in modo efficace le loro proprietà intrinseche alla matrice polimerica ospite. Tra le applicazioni emergenti di questi materiali, oltre alla sensoristica e all'attuazione, vi è anche la gestione termica avanzata, particolarmente rilevante nei settori aerospaziale, automobilistico, elettronico e biomedicale. In quest'ottica e soprattutto nell'ambito di programmi di finanziamento della ricerca e dell'innovazione dell'UE, l'Unità di Salerno prosegue attivamente la sua attività di ricerca, con una stretta interazione di diverse discipline e colleghi internazionali, finalizzata alla progettazione, alla caratterizzata sperimentale e alla modellistica di materiali nanocompositi avanzati ed innovativi con proprietà fisiche ad-hoc ottimizzate in base all'applicazione ingegneristica.

I ricercatori del gruppo studiano materiali compositi arricchiti con particelle di carbonio, focalizzandosi sull'influenza della concentrazione del filler (Fig.1a) nella transizione percolativa e sull'impatto che questa ha sulle proprietà fisiche emergenti, con particolare attenzione alla conducibilità elettrica, alla risposta termica indotta da effetto Joule e al comportamento meccanico. Questo comportamento transitorio è cruciale per indirizzare l'utilizzo dei materiali compositi verso applicazioni specifiche. In prossimità della soglia di percolazione, la struttura interna si configura come una rete conduttiva scarsamente connessa ma altamente sensibile a deformazioni meccaniche, rendendola adatta per sistemi di rilevamento basati sulla variazione di resistenza (piezoresistività, Fig.1b). Con concentrazioni di carica più elevate, la rete si densifica, favorendo un'elevata conducibilità elettrica e una migliorata conducibilità termica, condizioni ideali per applicazioni di riscaldamento attivo tramite effetto Joule (Fig. 1c). In questo contesto, l'energia elettrica convertita in calore permette il controllo termico diretto del materiale composito, con distribuzioni di temperatura che possono essere attentamente studiate e ottimizzate per applicazioni pratiche.

A integrazione delle attività sperimentali, si adotta un approccio statistico basato sulla metodologia del Design of Experiments (DoE, Fig. 2a) e sull'analisi delle superfici di risposta (Response Surface Methodology, RSM, Fig. 2b). Il DoE è utilizzato per valutare in modo sistematico l'influenza dei principali parametri di processo e delle proprietà intrinseche dei materiali compositi — quali la conducibilità termica ed elettrica, la morfologia e la geometria del filler — sulle prestazioni finali dei materiali compositi risultanti. L'impiego della RSM consente invece di esprimere analiticamente la relazione tra la funzione obiettivo (ad esempio, la temperatura massima raggiunta, la conducibilità elettrica o altro) e le variabili progettuali o

fisiche del materiale. Questo approccio consente di ottimizzare i materiali sviluppati, riducendo al contempo il numero di prove necessarie, secondo una logica di efficienza sperimentale.

Parallelamente alle attività sperimentali, viene condotta un'attività di modellazione numerica multi-fisica per simulare il comportamento dei materiali compositi in termini elettrici, termici e meccanici (Fig. 2c). La validazione dei modelli con i dati sperimentali ha confermato l'affidabilità delle simulazioni, rendendole uno strumento utile per previsioni accurate. Una volta verificato il modello, è possibile analizzare condizioni difficilmente replicabili in laboratorio e studiare fenomeni complessi come l'anisotropia delle proprietà. In questo contesto, la modellazione numerica si conferma un pilastro strategico della progettazione dei materiali, consentendo di anticipare il comportamento del sistema, guidare le scelte progettuali e ottimizzare la microstruttura dei compositi in funzione delle prestazioni attese.

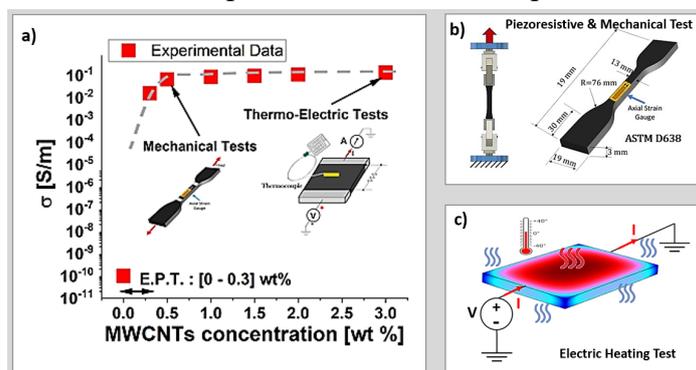


FIGURA 1. Curva di percolazione elettrica in (a), utile per identificare la concentrazione ottimale di filler per l'analisi delle proprietà piezoresistive/meccaniche (b) e per le applicazioni di riscaldamento elettrico (c).

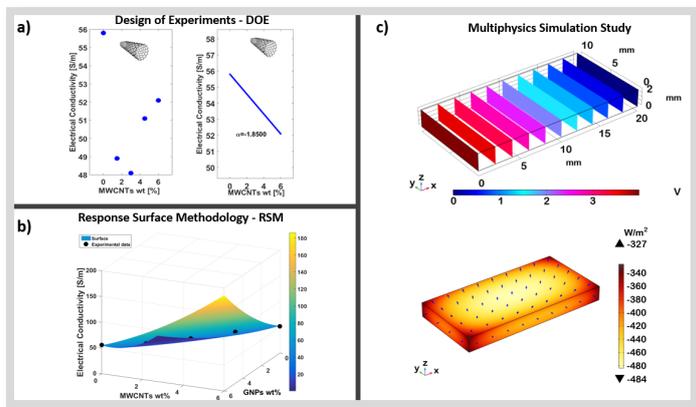


FIGURA 2. Approcci teorici e numerici per lo studio dei materiali compositi: Design degli Esperimenti in (a), Response Surface Methodology in (b) e simulazioni multifisiche in (c).

Principali pubblicazioni sul tema nel corso del 2024:

- [1] Spinelli, G. et al. Nanoindentation Response of Structural Self-Healing Epoxy Resin: A Hybrid Experimental-Simulation Approach. *Polymers* 2024, 16, 1849. doi: 10.3390/polym16131849
- [2] Spinelli, G. et al. Thermo-Mechanical and Thermo-Electric Properties of a Carbon-Based Epoxy Resin: An Experimental, Statistical, and Numerical Investigation. *Materials* 2024, 17, 3596. doi: 10.3390/ma17143596
- [3] Spinelli, G. et al. Testing, Experimental Design, and Numerical Analysis of Nanomechanical Properties in Epoxy Hybrid Systems Reinforced with Carbon Nanotubes and Graphene Nanoparticles. *Polymers* 2024, 16, 3420. doi: 10.3390/polym16233420
- [4] V. Tucci et al. Nanocomposites for Load-Bearing Structures Heatable Through Joule Heating, *Macromolecular Symposia*, 2024, Vol. 413, No. 4, p. 2300256.
- [5] Spinelli, G. et al. Simulation and Experimental Comparison of Joule-Heating Effect in Carbon-Based Epoxy Resin, *Macromolecular Symposia*, 2024, Vol. 413, No. 4, p. 2400034, DOI:10.1002/masy.202400034
- [6] Spinelli, G. et al. Investigation of Frequency-Dependent Electrical Properties of Nanocomposites Based on Epoxy Resin Reinforced with Multi-Walled Carbon Nanotubes, pubblicato su IEEE, 2024 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, DOI: 10.1109/EMCEurope59828.2024.10722472