

**M. A. TAGLIENTE, A. DONATELLI, F. CARETTO**

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali  
Divisione Tecnologie e Processi dei Materiali  
per la Sostenibilità  
Laboratorio Materiali Funzionali e Tecnologie  
per Applicazioni Sostenibili  
Centro Ricerche Brindisi

## **MATERIALI PER TESSUTI INTELLIGENTI**

Dallo stato dell'arte alle fibre di Carbonio  
per il progetto TEX-STYLE

RT/2023/13/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

M. A. TAGLIENTE, A. DONATELLI, F. CARETTO

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali  
Divisione Tecnologie e Processi dei Materiali  
per la Sostenibilità  
Laboratorio Materiali Funzionali e Tecnologie  
per Applicazioni Sostenibili  
Centro Ricerche Brindisi

## MATERIALI PER TESSUTI INTELLIGENTI

Dallo stato dell'arte alle fibre di Carbonio  
per il progetto TEX-STYLE

RT/2023/13/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina [www.enea.it](http://www.enea.it)

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

## **MATERIALI PER TESSUTI INTELLIGENTI**

Dallo stato dell'arte alle fibre di Carbonio per il progetto TEX-STYLE

Maria Antonia Tagliente, Antonio Donatelli, Flavio Caretto

### **Riassunto**

Nell'ambito del progetto TEX-STYLE– Nuovi tessuti intelligenti e sostenibili multi-settoriali per design creativo e stile made-in-Italy, finanziato nell'ambito dei Programmi Operativi Nazionali (PON 2014-2020) FESR (Fondo Europeo di Sviluppo Regionale), è stato condotto uno studio focalizzato a delineare lo stato dell'arte esistente nel campo dei materiali impiegati come tessuti intelligenti, ovvero tessuti elettronici, e successivamente finalizzato alla selezione e definizione delle proprietà richieste a filati conduttivi da impiegare per la realizzazione di tessuti e rivestimenti intelligenti multifunzionali, integrati in prodotti innovativi che ampliano le opportunità di design creativo, massimizzando i concetti del Made in Italy. In particolare, i filati conduttivi selezionati sono state le fibre di carbonio proveniente da riciclo di materiali compositi a fine vita e/o da scarti di lavorazione, al fine di coniugare criteri di funzionalità dei materiali con il criterio di sostenibilità ambientale, promuovendo così l'impiego di materie prime seconde altrimenti destinati al confinamento in discarica. Il prodotto finale è un filato ibrido in cui la fibra di carbonio, in grado di assicurare proprietà di conduzione elettrica, affianca una fibra tradizionalmente impiegata nella realizzazione di tessuti (poliammide 6). Tale studio ha consentito di stabilire i target prestazionali da conseguire nel proseguo della sperimentazione in laboratorio, in termini di conducibilità elettrica dei filati ibridi, di densità lineare e di tenore della fibra nel filato/tessuto finale.

**Parole chiave:** tessuti intelligenti, tessuti multifunzionali, tessuti elettronici, filati conduttivi, fibra di carbonio, riciclabilità, sostenibilità.

**Keywords:** *smart textiles, multifunctional textiles, e-textiles, conductive textiles, carbon fiber, recyclability, sustainability.*



## INDICE

SOMMARIO.....	3
INTRODUZIONE .....	4
1. DEFINIZIONE ATTIVITÀ.....	7
2. TESSUTI INTELLIGENTI .....	10
2.1. Stato dell'arte.....	10
2.2. Materiali e metodi .....	12
3. TESSUTI ELETTRONICI A BASE DI FIBRE DI CARBONIO .....	19
4. CONCLUSIONI .....	27
5. BIBLIOGRAFIA .....	29

## INTRODUZIONE

Questo documento illustra uno studio finalizzato alla selezione e definizione delle proprietà termoelettriche di filati conduttivi da impiegare per la realizzazione di tessuti e rivestimenti intelligenti multifunzionali, integrati in prodotti innovativi che ampliano le opportunità di design creativo massimizzando i concetti del Made in Italy.

Le attività svolte si inseriscono all'interno del progetto TEX-STYLE– *Nuovi tessuti intelligenti e sostenibili multi-settoriali per design creativo e stile made-in-Italy*, finanziato nell'ambito dei Programmi Operativi Nazionali (PON 2014-2020) FESR (Fondo Europeo di Sviluppo Regionale).

Più nello specifico, il progetto TEX-STYLE si è posto quale obiettivo ambizioso la produzione su larga scala di tessuti e rivestimenti intelligenti realizzati con materiali sostenibili in grado di combinare effetti estetici e funzionali (basso gloss, soft touch, effetto naturale) ed elettronica integrata (sensori, illuminazione e connettività) per offrire agli stilisti nuove possibilità di design creativo e stile Made in Italy.

Gli ambiziosi obiettivi hanno potuto contare su un solido e ben strutturato partenariato che ha previsto la partecipazione di 4 PMI, 4 grandi imprese e 5 organismi di ricerca e costruito sulla base del concetto di filiera, in grado cioè di coprire tutte le fasi della catena del valore: dal design, allo sviluppo di materiali, produzione di tessuti intelligenti e utilizzatori finali per diverse applicazioni, supportati da associazioni nazionali di settore nel campo della moda e arredamento. Il contributo di qualificati enti di ricerca, tra cui l'ENEA, garantisce un'ampia ricaduta tecnologica per le PMI e grandi imprese in particolare per le aree di convergenza e di transizione.

I concetti di sostenibilità e di funzionalità sono integrati in soluzioni innovative per la produzione industriale in diversi settori, tra i più esigenti di nuovi materiali per la rapida evoluzione del prodotto per qualità, stile, rispetto dell'ambiente e prestazioni tecniche: *Trasporti, Tessuti tecnici, Moda e Arredamento*.

Già in fase di stesura della proposta progettuale, da una preliminare analisi di mercato tecnica e cercando di anticipare esigenze future dei potenziali clienti, il partenariato del progetto ha individuato quattro potenziali applicazioni:

- 1) Tessuti intelligenti per interni auto (sedili, pannelli porta, bracciolo) con migliore qualità estetica e integrazione di interruttori, sensori di pressione e elementi di illuminazione realizzati a partire da fibre e materiali a basso impatto ambientale.

- 2) Tessuti tecnici intelligenti per nuovi articoli di abbigliamento e complementi tecnici per il mondo della salute, dello sport, del lavoro dinamico/usurante e del trasporto integrati con sensoristica per il monitoraggio dei parametri bio-vitali e di movimento.
- 3) Tessuti intelligenti per la moda e per accessori in materiali naturali con all'interno fibre ottiche per illuminazione. Ricami con fibra ottica e sensori per la comunicazione con ambienti circostanti.
- 4) Rivestimenti intelligenti per arredamento sostenibili con integrazione di sensori per interazione uomo-prodotto, illuminazione, ricarica wireless e comunicazione per migliorare comfort e qualità percepita.

Le applicazioni target di tessili intelligenti a basso impatto ambientale hanno richiesto diversi approcci, tra cui l'utilizzo di supporti flessibili con elettronica integrata, fili conduttori, film funzionali su tessuti e fibre ottiche per aumentare la libertà di forma e adattare l'elettronica alle superfici curve.

In qualità di partner del progetto, ENEA ha focalizzato l'attenzione sullo studio dei materiali che costituiscono i tessuti da realizzare e delle relative caratteristiche prestazionali, al fine di individuare quale dei dimostratori selezionati possiede target raggiungibili. In virtù delle potenzialità presentate, del grado di conoscenza ed esperienza acquisito nel corso degli anni e della possibilità di coniugare la fruibilità, la flessibilità e la comodità nell'impiego in tessuti con la capacità di integrazione di funzioni elettro-ottiche, la scelta è ricaduta sulla realizzazione di filati conduttivi.

Ancora più in dettaglio, seguendo criteri di sostenibilità e funzionalità dei materiali, l'interesse è ricaduto sull'impiego di fibre di carbonio proveniente da riciclo di materiali compositi a fine vita e/o da scarti di lavorazione, promuovendo così l'impiego di materie prime seconde altrimenti destinati a confinamento in discarica.

Il presente documento illustra dapprima lo stato dell'arte sulla tipologia di materiali e metodologie per la realizzazione di tessuti intelligenti, la cui conoscenza è propedeutica alla definizione delle caratteristiche prestazionali richieste ai materiali impiegati nel corso delle attività di progetto. Si procede quindi focalizzando l'attenzione sull'impiego delle fibre di carbonio e sulla definizione delle caratteristiche prestazionali richieste a quest'ultime.

Ulteriore elemento da mettere in evidenza è la consapevolezza che il progetto TEX-

STYLE risponde perfettamente al piano strategico per il Made in Italy per gli anni successivi al 2017. L'export mondiale continua a crescere anche se a ritmi più contenuti rispetto a quelli degli anni passati a causa del rallentamento della crescita. Tuttavia, le aziende italiane nell'ultimo triennio relativo alla stesura del progetto hanno mantenuto costante la propria quota di export, stimata pari al 2,8% confermando il posizionamento in Europa. Le imprese italiane hanno fatto bene sui mercati maturi e sofisticati di Nord America ed Europa con un margine notevole di miglioramento nei mercati emergenti, soprattutto in Asia. Per poter mantenere questo livello il piano prevede l'investimento in digitalizzazione delle imprese, nel renderle internazionali, nel supporto della meccanica strumentale e della tecnologia industriale. In linea con questi obiettivi, TEX-STYLE si propone la realizzazione Made in Italy di tessuti all'avanguardia adatti a trovare applicazione in diversi settori molto forti nel nostro paese quali la moda, l'arredamento e i trasporti. Sfruttando questi prodotti ad alto valore aggiunto, tutta la filiera tessile potrà beneficiarne e trovare nuovi mercati a partire dal filo base per arrivare al tessuto finale con integrate funzionalità elettroniche ed un forte contenuto di sostenibilità grazie all'uso di fibre naturali, bio e riciclate. Inoltre, la produzione di tessuti funzionalizzati richiede uno sforzo tecnologico importante che permetterà alle aziende di settore di accrescere il know-how e le capacità tecnologiche per competere con aziende a livello internazionale. Per massimizzare l'impatto economico e favorire la internazionalizzazione fin dall'inizio, nell'ambito di TEX-STYLE sono state previste strategie di trasferimento tecnologico basate sul concetto di "*Contamination Lab*" che mira a promuovere iniziative imprenditoriali basate sulla contaminazione creativa e sulle collaborazioni interdisciplinari. I prodotti tessili (tessuti o filati) sviluppati nel progetto saranno messi a disposizione di gruppi selezionati di studenti appartenenti alle Università coinvolte nel progetto interessati all'imprenditorialità e all'innovazione che saranno liberi di sviluppare le proprie idee e trasformarle in prodotti mediante l'avvio di start-up supportate dagli opportuni canali di valutazione e finanziamento.

## 1. DEFINIZIONE ATTIVITÀ

Il progetto TEX-STYLE - *Nuovi tessuti intelligenti e sostenibili multi-settoriali per design creativo e stile made-in-Italy* è caratterizzato dal seguente quadro sinottico (Tabella 1):

<b>OR1</b>	<b>Specifiche e design componenti</b>	
Att.1.1	Definizione specifiche dimostratori	RI
Att.1.2	Design di stile e definizione architettura dimostratori	RI
<b>OR2</b>	<b>Studio di materiali sostenibili e multifunzionali smart</b>	
Att.2.1	Studio fibre sostenibili e multifunzionali	RI
Att.2.2	Studio di film multifunzionali	RI
Att.2.3	Realizzazione tessuti e rivestimenti sostenibili	RI
Att.2.4	Validazione materiali sostenibili e normazione	SS
<b>OR3</b>	<b>Studio tessuti e rivestimenti intelligenti</b>	
Att.3.1	Tessuti intelligenti mediante filamenti conduttivi	RI
Att.3.2	Tessuti e rivestimenti con integrazione di fibre ottiche	RI
Att.3.3	Tessuti e rivestimenti intelligenti mediante deposizione film funzionali	RI
Att.3.4	Validazione tessuti e rivestimenti intelligenti e normazione	SS
<b>OR4</b>	<b>Tecnologie di integrazione e scale up tessuti e rivestimenti innovativi</b>	
Att.4.1	Tecnologie eterogenee per integrazione elettronica	RI
Att.4.2	Tecnologie di co-integrazione per la fabbricazione tessuti e rivestimenti	RI

Att.4.3	Scale up assemblaggio tessuti e rivestimenti innovativi	SS
<b>OR5</b>	<b>Realizzazione dimostratori e loro validazione</b>	
Att.5.1	Tessuti e rivestimenti funzionali per applicazioni automotive	SS
Att.5.2	Tessuti e rivestimenti interattivi per arredamento	SS
Att.5.3	Tessuti attivi per abbigliamento tecnico e moda	SS
Att.5.4	Studio di ambienti interattivi	RI

**Tabella 1.** Quadro sinottico del Progetto TEX-STYLE.

Una delle attività principali del progetto (Att. 1.1) ha avuto come obiettivo la definizione dettagliata dei dimostratori finali, ovvero l'individuazione delle dimensioni, delle condizioni di utilizzo, dei materiali e dei test da eseguire e da sviluppare durante il progetto.

I target prestazionali definiti dai diversi settori applicativi sono tradotti in specifiche tecniche che costituiscono le linee guida di sviluppo dei materiali e delle tecnologie per tutto il progetto.

Già in fase di stesura del progetto, sulla base delle attuali richieste di mercato e cercando di anticipare esigenze future dei potenziali clienti, è stata stilata una preliminare selezione dei potenziali dimostratori, di seguito elencati e suddivisi per area applicativa:

- Automotive - Fodera con 30% materiali eco con funzionalità integrate NO parti discrete: Loghi illuminati (300x300 mm<sup>2</sup>), Interruttori (200x100 mm<sup>2</sup>), Sensori di pressione integrati su rivestimento (ON/OFF 10000 cicli), riscaldamento integrato nel tessuto (70±2°C), cablaggi integrati e sistema di comunicazione;
- Tessuti tecnici con sensoristica evoluta (200x200 mm<sup>2</sup>) per il monitoraggio dei parametri fisiologici e di movimento (ECG, Pressione, Elettrochimici, Postura e Movimento) e integrazione di circuiti integrati (spessore <0,8 mm);
- Moda – capi ed accessori con fibre ottiche per illuminazione (> 50% eco) con

microterminali da 0,2 mm, alimentazione MiniBattery 20x30 mm<sup>2</sup> e sensoristica integrata;

- Arredo – tendaggi e imbottiti (> 50% eco), interruttori integrati (200x200 mm<sup>2</sup>), sensori per interfaccia uomo-prodotto (ON/OFF 5000 cicli) e sorgenti luminose (300x300 mm<sup>2</sup>).

Considerando questa tipologia di dimostratori, l'ENEA ha focalizzato l'attenzione sullo studio dei materiali che costituiranno i tessuti da realizzare e delle relative caratteristiche prestazionali, convergendo più nello specifico sullo sviluppo, realizzazione e caratterizzazione di filati conduttivi al fine di individuare quale dei dimostratori selezionati possiede target raggiungibili. La scelta è stata eseguita sulla base delle potenzialità tecniche (fruibilità, flessibilità e comodità nell'impiego in tessuti) e applicative (capacità di integrazione di funzioni elettro-ottiche) del suddetto filato e del know-how acquisito nel corso degli anni.

Al fine di comprendere il contesto tecnico-scientifico all'interno del quale è organizzata questa fase del progetto, nei paragrafi che seguono è innanzitutto illustrato lo stato dell'arte sulla tipologia di materiali e tecniche di produzione dei tessuti intelligenti. Si procede quindi focalizzando l'attenzione sulla tipologia di materiale scelto per le attività svolte nei laboratori del Centro di Ricerche ENEA di Brindisi, cioè la *fibra di carbonio*, e infine con l'individuazione delle caratteristiche prestazionali richieste a quest'ultima.

## 2. TESSUTI INTELLIGENTI

### 2.1. Stato dell'arte

Il termine “Tessuti Intelligenti” (*Smart Textiles*) si riferisce ad un'ampia gamma di prodotti che estendono la funzionalità e l'utilità dei tessuti comuni. I Tessuti Intelligenti sono definiti come prodotti tessili quali fibre e filamenti, filati insieme a strutture tessute, lavorate a maglia o non tessute, che possono interagire con l'ambiente e con l'utente. Essi sono detti anche Tessuti Elettronici (*e-textiles*) in quanto frutto di una convergenza dei tessili con l'elettronica, cioè prodotti attraverso l'integrazione di vari dispositivi elettronici, come sensori, attuatori, dispositivi di comunicazione, dispositivi per la raccolta di energia (*energy harvesting*) e di archiviazione (*storage*), con i tessuti [1].

Ciò porta allo sviluppo di materiali intelligenti in grado di svolgere un ampio spettro di funzioni come rilevare, calcolare, comunicare e attivare, che fino a pochi anni fa si trovavano soltanto nei prodotti elettronici rigidi e non flessibili. Una prima suddivisione dei Tessuti Intelligenti avviene secondo i tre seguenti gruppi [2]:

- Tessuti intelligenti passivi: in grado solo di percepire i cambiamenti o gli stimoli nell' ambiente/utente ma non possono adattarsi ad essi;
- Tessuti intelligenti attivi: in grado non solo di rilevare gli stimoli dall'ambiente, ma anche rispondere di conseguenza ad essi;
- Tessuti altamente intelligenti: in grado di percepire, reagire e adattare il loro comportamento all'ambiente esterno.

I sensori forniscono un sistema nervoso per rilevare i segnali; quindi, in un materiale intelligente passivo l'esistenza di sensori è essenziale. Gli attuatori agiscono sul segnale rilevato in modo autonomo o da un'unità centrale di controllo; insieme ai sensori, sono l'elemento essenziale per i materiali intelligenti attivi. Nei tessuti altamente intelligenti ci sono anche unità di controllo, dispositivi di comunicazione e di alimentazione elettrica (*power supply*) per adattarsi all'ambiente esterno autoregolandosi [3]. La rappresentazione schematica di un sistema completo di Smart textile è mostrata nella figura seguente [4]:

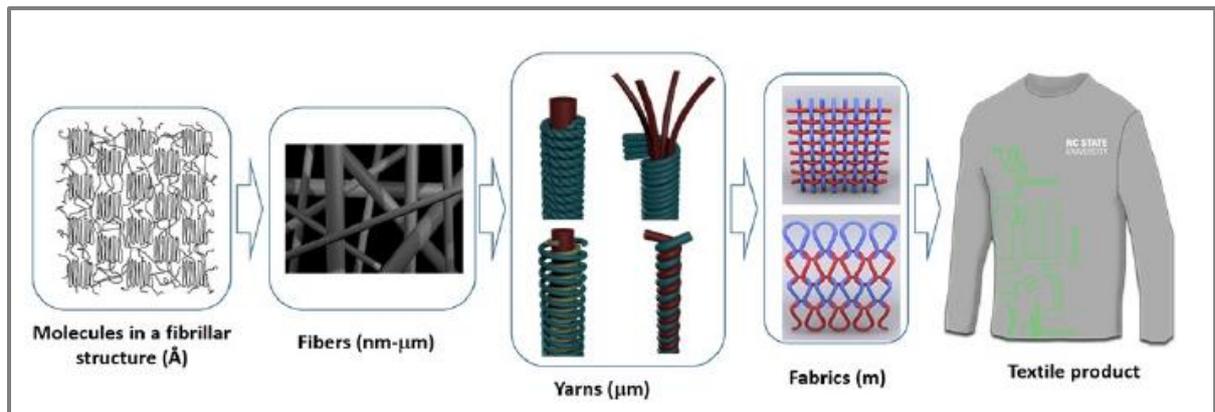


**Figura 1.** Componenti fondamentali di un sistema Smart Textile. Riprodotto con permesso da Tseghai et al., *Sensors*; pubblicato da MDPI, 2020 [4].

Oggi giorno i tessuti intelligenti rappresentano una sfida in diversi campi di applicazione come la medicina, lo sport, la sicurezza e la difesa militare, la moda, l'Automotive e l'aerospazio.

Più nel dettaglio, i tessuti sono costituiti da materiali fibrosi strutturati gerarchicamente. Le unità più piccole, o primo livello di integrazione, sono costituite dalle fibre che si caratterizzano per avere un elevato rapporto tra lunghezza e spessore; queste unità si intrecciano per formare il filo. Il filo viene ritorto per formare il filato, considerato come il secondo livello di integrazione. Il filato viene infine trasformato in ciò che chiamiamo tessuto, il terzo livello di integrazione, utilizzando diverse tecniche come la tessitura e il lavoro a maglia. Scale più grandi di livelli gerarchici (dal quarto livello in su) comportano unità di tessuto composito o composto [5]. La Figura 2 mostra la gerarchia delle strutture del tessuto; dalla fibra al tessuto, al prodotto finito. Come struttura gerarchica, i tessuti offrono opportunità uniche per integrare le funzionalità elettriche

ai vari livelli: dalle fibre ai filati, al prodotto finito.



**Figura 2.** La gerarchia delle strutture tessili andando dalle lunghe catene polimeriche al prodotto tessile finale. Riprodotto con permesso da Chatterjee et al., *Fibers*; pubblicato da MDPI, 2019 [5].

Uno studio sull'impiego di tessuti intelligenti in una prima fase si riconduce a uno studio sulla tipologia di materiali intelligenti, per poi passare in una seconda fase a considerare in che modo questi materiali possono essere trasformati in un materiale tessile. Le tecnologie di incorporazione in una struttura tessile sono diverse e tra queste possiamo elencare il ricamo, il cucito, il tessuto non tessuto, il lavoro a maglia, la tessitura, la filatura, l'intrecciatura, il rivestimento/laminazione, la stampa e i trattamenti chimici che forniscono caratteristiche specifiche come il comportamento idrofobico controllato.

## 2.2. Materiali e metodi

Negli ultimi anni, molte tecniche e materiali sono stati utilizzati per realizzare i tessuti intelligenti. Le caratteristiche essenziali che tali materiali e metodi devono soddisfare sono la conducibilità, la flessibilità, la biocompatibilità, la resistenza meccanica e lavabilità. Tuttavia, non tutti gli approcci sono in grado di soddisfare tutti questi requisiti allo stesso tempo.

I primi materiali ad essere usati sono state le **fibre conduttive/metalliche**, utilizzate soprattutto nelle aree tecniche: indumenti per camere bianche, abbigliamento militare, applicazioni mediche e produzione di componenti elettronici [1]. Il processo convenzionale per produrre le fibre metalliche è la trafilatura, un processo di produzione meccanica caratterizzato da varie fasi chiamate treno grossolano, medio,

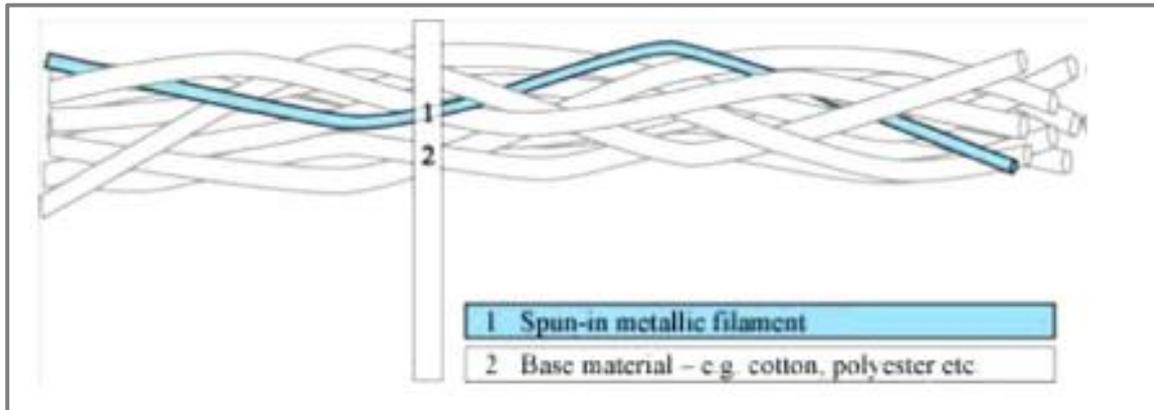
fine e cardatura. Attualmente ci sono in commercio diversi prodotti a base di monofili metallici che possono essere miscelati in tutti i tipi di fibre o che possono essere utilizzati direttamente nella tessitura e nella maglieria. I prodotti spaziano dai filamenti di rame e rame argentato ai filamenti di ottone e ottone argentato, dai filamenti di alluminio a quelli di alluminio rivestito. Naturalmente, a seconda del materiale utilizzato, ci sono diverse proprietà elettriche, come mostrato in Tabella 2:

<b>Metallo</b>	<b>Conducibilità elettrica [S·m/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Resistività elettrica [Ω·mm<sup>2</sup>/m]</b>
Cu	58,5	1,71E-02
Cu/Ag	58,5	1,71E-02
Ag 99%	62,5	0,160E-02
Ms*70	16,0	6,25E-02
Ms/Ag	16,0	6,25E-02
AgCu	57,5	1,74E-02
Bronze	7,5	1,33E-01
Steel 304	1,4	7,3E-01
Steel 316L	1,3	7,5 E-01

\* German Milbe denomination, where “Ms” is accompanied by a number stating the composition in %Cu with respect to a Zn complement to 100%

**Tabella 2.** Proprietà elettriche di fibre metalliche monofili [2].

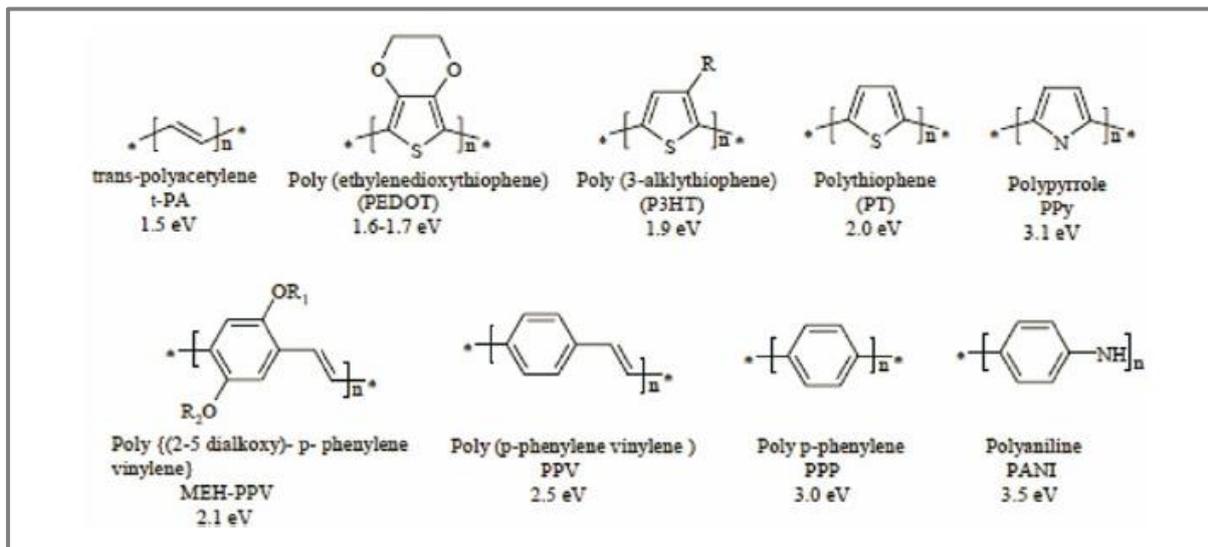
Alcune aziende producono monofilamenti metallici incorporati in filati di base come cotone, poliestere, poliammidi e aramidi. I monofili metallici sono realizzati ad esempio in rame, ottone, bronzo, argento, oro, alluminio. La conduttività di questi fili conduttivi è compresa tra 10 e 500 Ω·m [2]. La Figura 3 seguente mostra un tipico filato conduttivo con fibre di base e un monofilo metallico attorcigliato attorno ad esse.



**Figura 3.** Schema di una fibra conduttiva attorcigliata intorno ad una normale fibra tessile. Riprodotto con permesso da Stoppa e Chiolerio, Sensors (Basel); pubblicato da PMC, 2014 [2].

L'impiego di fili metallici presenta ad ogni modo alcune criticità di seguito esposte. Soprattutto se usate nel campo dell'abbigliamento, i tessuti devono avere proprietà tattili come l'elasticità, recupero, drappeggio, taglio e manovrabilità. Per questo motivo le fibre utilizzate devono essere fini e i tessuti devono avere un peso ridotto per unità di superficie (non superiore a 300 gr/m<sup>2</sup>). Queste richieste non sono coerenti con i materiali e le geometrie necessari per una ragionevole conduttività elettrica, perché l'incorporazione di elementi come fili metallici all'interno dei tessuti aumenta la rigidità e riduce l'elasticità. I vantaggi delle fibre metalliche sono la loro resistenza, composizione, inerzia biologica, e pronta disponibilità in forma tessile a costi contenuti. Rilevante è anche la bassa sensibilità a lavaggi o a sudorazione. Tuttavia, non riescono a fornire un riscaldamento uniforme e le loro caratteristiche di fragilità possono danneggiare le macchine di filatura nel tempo. Inoltre, sono più pesanti della maggior parte delle fibre tessili, rendendo difficile la produzione di miscele omogenee.

La conduttività elettrica a livello di fibra può essere raggiunta usando un polimero intrinsecamente conduttivo (ICP) come precursore nel formare la fibra [5-6]. La Figura 4 mostra differenti tipologie di vari ICP che possono essere utilizzati come e-textiles insieme ai loro valori di bandgap:



**Figura 4.** Strutture chimiche di vari polimeri intrinsecamente conduttivi (ICP) insieme ai loro valori di bandgap. Riprodotto con permesso da Chatterjee et al., *Fibers*; pubblicato da MDPI, 2019 [5].

Gli ICP sono generalmente semiconduttori nel loro stato originario, ma possono diventare più conduttivi mediante il drogaggio con materiali sia di tipo n che p. Poiché gli ICP possono essere sintetizzati in maniera controllata con una conducibilità che può essere regolata grazie al drogaggio, e possono avere una varietà di proprietà elettriche, strutturali ed ottiche, essi sono materiali molto promettenti per applicazioni nel campo dell'elettronica flessibile. Tuttavia, a causa della loro struttura rigida che inibisce la loro solubilità nonché la loro tendenza a decomporsi a temperature più basse dei loro punti di fusione, la maggior parte degli ICP non possono essere processati da fuso attraverso i metodi tessili convenzionali e pertanto non sono molto adatti a fabbricare smart textiles [5].

Un altro importante metodo per fabbricare e-textiles è rivestire le fibre e i filati usati convenzionalmente con materiali elettricamente conduttivi: questo processo può impartire molto facilmente delle capacità elettroniche al materiale di base. Il rivestimento può essere fatto a qualsiasi livello della struttura gerarchica, cioè a livello di fibra, filato o di tessuto. L'integrazione delle capacità elettriche a livello di fibra aumenta la probabilità che le proprietà intrinseche dei tessuti, come resistenza, flessibilità, durabilità e comfort, siano conservate, migliorando la funzionalità, consentendo la comunicazione, nonché il percepimento e la risposta all'ambiente esterno. Si parla in questo caso di tessuti intelligenti a base di **fibre conduttive trattate**: in pratica invece di attaccare l'elettronica ai substrati tessili, i filati del tessuto possono essere funzionalizzati con l'elettronica [2-7].

Diverse tipologie di materiali conduttori possono essere impiegate per rivestire le fibre convenzionali generalmente isolanti: i metalli o sostanze galvaniche o sali metallici, gli ICP, compositi polimerici conducenti, materiali basati sul carbonio come nanotubi di carbonio, nanopolveri di carbonio e grafene [8]. Questi materiali possono essere applicati sulla fibra usando diversi processi di rivestimento come l'elettrodeposizione, la placcatura senza corrente, il dip coating, la deposizione da vapore chimico (CVD) e lo sputtering, che consentono di avere i rivestimenti elettricamente conduttivi per e-textiles.

I metalli sono i rivestimenti che per eccellenza impartiscono alle fibre ed ai filati una buona conducibilità elettrica. I due metodi più comuni e versatili di metallizzazione di materiali polimerici sono l'elettrodeposizione e la placcatura senza corrente (*plating electroless*). Tuttavia, se da una parte i rivestimenti metallici hanno sicuramente molti vantaggi, dall'altro presentano anche molti limiti in termini di durabilità dei rivestimenti stessi a causa della transizione che c'è all'interfaccia tra la fibra soft e il rivestimento metallico rigido. Inoltre, spesso le tecniche usate per rivestimenti metallici sono costose come anche i materiali impiegati. Infine, le tecniche di metallizzazione a volte non consentono la formazione di un rivestimento che sia uniforme, spesso e robusto. Il vantaggio dei rivestimenti metallici è che sono adatti a molti tipi di fibre e producono una buona conduttività senza alterare in modo significativo le proprietà chiave del substrato esistenti come densità, flessibilità e manovrabilità. Tuttavia, l'adesione tra il metallo e le fibre e la resistenza alla corrosione possono causare problemi [9].

L'uso degli ICP come rivestimenti per gli e-textiles è una ulteriore tecnica praticabile che combina le proprietà uniche di questi materiali con la flessibilità, la resistenza, e la drappeggiabilità dei tessuti. Il dip-coating è il metodo più semplice per rivestire le fibre tessili con gli ICP senza danneggiarle, anche se può dare problemi di uniformità del rivestimento, di rugosità e creare agglomerati di particelle conduttive sui filati che possono impedire la conduzione elettrica e addirittura dare scariche elettriche. Un metodo alternativo per rivestire con gli ICP è la polimerizzazione in-situ. Infine, le tecniche di deposizione fisica (PVD) e chimica (CVD) da vapore possono combinare la sintesi degli ICP con la deposizione sul substrato tessile in un singolo step senza influenzare le proprietà intrinseche della fibra tessile [9].

Tuttavia, i coatings a base di ICP spesso devono sopportare stress esterni molto elevati che non riescono a sopportare e la maggior parte dei polimeri più usati

comunemente sono materiali isolanti. Per questo spesso è più conveniente convertire i polimeri in materiali che siano contemporaneamente dei buoni conduttori elettrici ma anche dei robusti materiali. Questo recentemente viene fatto inserendo nel polimero dei filler conduttivi elettricamente come polveri metalliche, fibre, carbon black, nanotubi di carbonio, e grafene alla matrice polimerica [6]. In particolare, il grafene a singolo strato è un eccellente candidato per essere incorporato negli e-textile grazie alla sua elevata conducibilità termica a temperatura ambiente ( $\sim 5000 \text{ W/m K}$ ), elevato modulo di Young ( $\sim 1100 \text{ GPa}$ ) e mobilità dei portatori di carica ( $200.000 \text{ cm}^2/\text{V s}$ ) [5]. Inoltre, il grafene può essere sintetizzato con metodi più economici rispetto ai nanotubi di carbonio.

Mentre i rivestimenti a base di Carbonio sono flessibili, leggeri e possono essere facilmente applicati alla struttura della fibra o del filato, essi però spesso falliscono nel conferire un'eccellente conducibilità elettrica, bassa resistenza di contatto e simultanea stabilità strutturale.

I tessuti elettronici intelligenti possono anche essere prodotti utilizzando gli **inchiostri conduttivi** [4]. Innanzitutto, gli inchiostri conduttivi devono contenere un precursore di metallo altamente conduttivo appropriato come Ag, Cu e Au sotto forma di nanoparticelle e un veicolo di trasporto. La maggior parte di essi sono a base di acqua: l'acqua è il componente principale dell'inchiostro e per limitare i contaminanti deve essere il più puro possibile. Questi inchiostri specializzati possono essere stampati su vari materiali, tra cui i tessuti, per creare modelli elettricamente attivi. La serigrafia rende anche l'integrazione con l'elettronica planare più semplice rispetto ai sistemi di filati conduttivi. Esistono diverse tecnologie in grado di stampare materiale conduttivo su diversi substrati. La stampa a getto d'inchiostro e la stampa serigrafica su foglio sono le migliori per il lavoro a basso volume ed alta precisione. La stampa diretta di tracce conduttive su un tessuto è una tecnica versatile ma a volte mostra i suoi limiti. La maggior parte degli inchiostri e delle paste conduttive si basa su un riempitivo d'argento e soffre di fragilità. Durante la stampa, uno dei limiti della pasta d'argento è lo spessore. Ad esempio, sono necessarie diverse passate per ottenere uno strato spesso  $40 \mu\text{m}$  e la resistenza elettrica dipende dal numero di passate applicate.

Infine, tra i materiali più promettenti per produrre e-textiles ci sono le **fibre di carbonio**. Ormai i tessuti in fibra di carbonio sono una realtà consolidata perché capaci di garantire diversi comfort e di soddisfare in pieno la domanda di mercato. Le fibre di

carbonio sono materiali con eccezionali caratteristiche utilizzati per elevare le prestazioni dei prodotti grazie ad una elevata resistenza meccanica, ad una particolare leggerezza e ad un buon isolamento termico. L'elevata resistenza meccanica consente di realizzare prodotti con le medesime caratteristiche dell'acciaio a parità di formato, ma decisamente più leggeri e resistenti. Essendo i tessuti a fibra di carbonio l'oggetto dell'attività di ricerca svolta in questa linea di progetto, rimandiamo i dettagli su questo materiale al paragrafo successivo.

### 3. TESSUTI ELETTRONICI A BASE DI FIBRE DI CARBONIO

Un modo per creare tessuti elettronici interattivi è l'utilizzo di materiali intrinsecamente conduttivi. Tra questi ci sono anche le fibre di carbonio che a tutti gli effetti sono da considerarsi dei materiali conduttori, presentando una resistività media dell'ordine di  $10^{-6} - 10^{-5} \Omega \cdot m$  (equivalente a una conducibilità elettrica di  $10^5 - 10^6 S \cdot m^{-1}$ ).

Al pari delle fibre metalliche, le fibre di carbonio possono essere integrate con fibre non conduttive tradizionalmente impiegati nella realizzazione di tessuti (cotone, poliestere, poliammidi e aramidi), conferendo al filato finale delle proprietà di conduzione elettrica.

L'ampio intervallo di conducibilità raggiunto dalle fibre si deve al fatto che essa dipende da numerosi fattori, di seguito elencati. In relazione alla loro capacità di condurre elettricità si posizionano accanto ai materiali metallici, non raggiungendo ad ogni modo i valori generalmente raggiunti dal rame, il quale ha resistività di  $1,71E-02 \Omega \cdot mm^2/m$  (equivalente a  $5,85E+07 S \cdot m^{-1}$ ) o dall'argento ( $6,3E+07 S \cdot m^{-1}$ ) [10] (Tabella 3). In virtù di tali proprietà, l'impiego di fibra di carbonio per la realizzazione di tessuti conduttivi è già oggetto di studio da diversi anni.

<i>Materiali</i>	$\rho [\Omega \cdot m]$	$k [S \cdot m^{-1}]$
Isolanti	1,00E+16	1,00E-16
conduttori metallici	1,00E-06	1,00E+06
<b>Fibra di carbonio (min)</b>	1,00E-05	1,00E+05
<b>Fibra di carbonio (max)</b>	1,00E-06	1,00E+06
Acciaio inossidabile	6,89E-07	1,45E+06
Rame	1,71E-08	5,85E+07
Argento	1,59E-08	6,30E+07

**Tabella 3.** Confronto tra la conducibilità elettrica della fibra di carbonio e quella di altri materiali.

La ragione della loro elevata conducibilità elettrica risiede nel fatto che le particelle di "carbon black" hanno una tendenza molto grande a formare una rete conduttiva a causa delle loro strutture aggregate simili a catene rispetto ad altri additivi conduttori come la polvere metallica. Mentre le fibre di carbonio possono essere considerate come aggregati simili a catene di particelle di carbonio aventi una catena molto lunga. Per tale motivo le fibre di carbonio sono tra i componenti conduttivi più comunemente

impiegati nella realizzazione di compositi conduttivi.

Come accennato, numerosi sono i fattori che influenzano la conducibilità elettrica raggiunta dalle fibre di carbonio:

1. il **precursore** da cui le fibre di carbonio sono prodotte; in tal senso si distinguono fibre di carbonio PAN-based, Pitch-based, Mesophase pitch-based, Isotropic pitch-based, Rayon-based, Gas-phase-grown carbon fibers. Le fibre di carbonio mesophase pitch-based hanno una maggiore conducibilità elettrica, che li rende idonei in applicazioni quali schermatura elettromagnetica ed elettrostatica [11];
2. la **temperatura finale di trattamento della fibra** (HTT), sulla base della quale si distinguono tre principali classi di fibre di carbonio: *fibre parzialmente carbonizzate* (HTT 500°C, contenuto di carbonio fino a 90% in peso), *fibre carbonizzate* (HTT 500 – 1500°C, contenuto di carbonio nel range 91 - 99% in peso), e *fibre grafitizzate* (HTT 2000 – 3000°C contenuto di carbonio superiore al 99% in peso) [12];
3. la conducibilità elettrica delle fibre di carbonio varia con il **diametro della fibra**: uno studio su tale variabilità è stato condotto da Conor e Owston nelle prime fasi di studio delle fibre di carbonio [13], evidenziando dei valori di resistività elettrica di 8,6E-01; 1,1E+00; 2,5E+00 mΩ.cm (equivalente ad una conducibilità elettrica di 1,2E+05; 8,7E+04; 4,0E+04 S·m<sup>-1</sup>) per diametri rispettivamente pari a 8.5; 9 e 10 μm. Se ne deduce quindi una proporzionalità inversa tra diametro della fibra e il valore di conducibilità elettrica.
4. la **lunghezza della fibra** all'interno di materiali compositi non dovrebbe essere troppo elevata, per evitare di agire contro una corretta dispersione a causa degli aggrovigliamenti delle fibre stesse; al contempo fibre molto corte possono influire negativamente sulle proprietà elettriche portando alla formazione di interruzioni nella continuità necessaria ad assicurare sufficiente conduttività elettrica [10].

Esiste una dipendenza tra la conducibilità elettrica della fibra di carbonio e il suo **modulo elastico**: a più elevati valori del modulo di elasticità si associa una resistività elettrica minore nelle fibre pitch-based [12]. Lund et al. [14] hanno riportato in un grafico di Ashby la conducibilità elettrica e il modulo di Young di diversi tipi di fibre, mostrando che tra le diverse tipologie di fibre il modulo può variare di oltre quattro ordini di grandezza, che vanno dall'ordine di decine di MPa in caso di fibre elastiche e quindi

flessibili, a centinaia di GPa. Allo stesso modo, la conducibilità elettrica può variare da valori di circa  $10^{-3} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$  (o meno se la quantità di materiale conduttore viene ulteriormente ridotta) per fibre poco conduttive a valori di  $1\text{E}+03 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$  per fibre altamente conduttive. Anche in tal caso è stato evidenziato che, nel complesso, le fibre più conduttive tendono anche a mostrare un modulo più elevato. Questa tendenza si verifica perché sia il trasporto di cariche elettriche che la trasmissione della forza meccanica lungo l'asse lungo della fibra traggono vantaggio dall'allineamento del materiale che forma la fibra. Le fibre più conduttive e allo stesso tempo più rigide si trovano nell'angolo in alto a destra del diagramma di Ashby: in particolare le fibre di carbonio possono raggiungere valori dell'ordine di  $1\text{E}+04 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$  e  $1\text{E}+03 \text{ GPa}$ .

La resistività elettrica si riduce, e quindi la conducibilità elettrica aumenta, con l'aumento della **densità** della fibra stessa [12].

Non trascurabile è inoltre la **densità lineare** della fibra, vale a dire i grammi di fibra presenti in un km. Da un punto di vista teorico, la resistenza di un conduttore elettrico, misurata in  $\Omega$ , è esprimibile attraverso la relazione:

$$R = \rho \cdot D \cdot \frac{L}{N \cdot T} \cdot 10^4 \quad [1]$$

in cui:

- $\rho$ : resistività elettrica del conduttore [ $\Omega\cdot\text{m}$ ];
- $D$ : densità del conduttore [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ];
- $L$ : lunghezza del conduttore [ $\text{cm}$ ];
- $N$ : numero di fibre che costituiscono il conduttore;
- $T$ : densità lineare (o *tex*) del conduttore, in [ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ]

Ne segue che maggiore è la densità lineare  $T$  e minore sarà la resistività del conduttore.

L'influenza di così tanti fattori comporta un ampio intervallo di possibili valori di conducibilità elettrica conferita dalle fibre di carbonio ai tessuti conduttivi. Dai risultati emersi da un lavoro di ricerca bibliografica effettuato, si evince una variabilità della conducibilità elettrica compresa tra  $2,4\text{E}+04$  e  $2,0\text{E}+05$ , dove i valori più elevati sono raggiunti dalle fibre di carbonio derivanti da pitch (Tabella 4).

<b>Composizione</b>	<b>Precursore</b>	<b>Resistività elettrica [mΩ.cm]</b>	<b>Conducibilità elettrica [S·m<sup>-1</sup>]</b>	<b>Densità lineare</b>	<b>Riferimento (Anno)</b>
single carbon fibre	unknown	8,6E-01	1,2E+05	-	[13] (1969)
single carbon fibre	unknown	1,1E+00	8,7E+04	-	[13] (1969)
single carbon fibre	unknown	2,5E+00	4,0E+04	-	[13] (1969)
CF continuous tow (IMS)	PAN	1,5E+00	6,9E+04	830	[12] (2010)
CF continuous tow (UTS)	PAN	2,1E+00	4,9E+04	800	[12] (2010)
CF continuous tow (CELION 3000)	PAN	1,8E+00	5,5E+04	200	[12] (2010)
CF continuous tow (CELION 6000)	PAN	1,8E+00	5,5E+04	400	[12] (2010)
CF continuous tow (K637)	Pitch	6,6E-01	1,5E+05	2000	[12] (2010)
CF continuous tow (CN180)	Pitch	5,0E-01	2,0E+05	890	[12] (2010)
CF continuous tow (Panex)	PAN	1,6E+00	6,5E+04	1500	[12] (2010)
CF continuous tow (T700)	PAN	1,6E+00	6,3E+04	800	[12] (2010)
VACNF	unknown	4,2E+00	2,4E+04		[15] (2011)

**Tabella 4.** Valori di resistività e conducibilità elettrica di differenti tipologie di fibre di carbonio.

Sulla base delle evidenze scientifiche osservate da questa ricerca preliminare effettuato tra i lavori presenti in letteratura, uno degli obiettivi da conseguire all'interno del progetto TEX-STYLE è la realizzazione di dimostratori che impieghino tessuti con un tenore di fibre da riciclo nel range 20—30% in massa, la restante parte costituita da fibre sintetiche le quali rappresentano lo stato dell'arte nella realizzazione di tessuti

attualmente in commercio. In particolare, seguendo i criteri di sostenibilità e funzionalità dei materiali, l'interesse è ricaduto sull'impiego di fibre di carbonio proveniente da riciclo di materiali compositi a fine vita e/o da scarti di lavorazione, indicate di seguito come rCF, promuovendo così l'impiego di materie prime seconde altrimenti destinati a confinamento in discarica.

La possibilità di utilizzare fibre di carbonio riciclate e/o proveniente da scarti di lavorazione è di interesse attuale, in considerazione delle previsioni che vedono il riciclo di rifiuti a base di fibre di carbonio CF un elemento chiave dal punto di vista ambientale ed economico.

Difatti, il costo delle fibre di carbonio vergini è elevato (dell'ordine di 20-40 £·kg<sup>-1</sup>, a seconda del grado), per via dell'elevato consumo di energia necessario per la sua fabbricazione; quindi, il recupero e il riciclaggio dei compositi a base di fibre di carbonio a fine vita o di scarti di lavorazione offrono solidi vantaggi tecnologici per la produzione di nuovi compositi rinforzati con la stessa tipologia di fibra. D'altra parte, il volume mondiale dell'utilizzo di compositi in fibra di carbonio è in costante crescita ed è ampiamente prevedibile che la quantità di rifiuti a fine vita raggiungerà rapidamente livelli significativi. Pertanto, negli ultimi anni, l'uso di fibre di carbonio riciclate per la produzione di nuovi compositi ha guadagnato un crescente interesse in molti campi di applicazione [16].

Relativamente all'impiego di fibre di carbonio da riciclo per conferire a nuovi materiali proprietà di conduzione elettrica, il panorama scientifico è ancora in uno stato embrionale. Difatti, una ricerca in tal senso ha evidenziato pochi risultati sperimentali.

Recentemente, la Technical Fibers Products Ltd (<http://www.tfpglobal.com>) ha impiegato delle fibre di carbonio da riciclo di lunghezza massima 12 mm, ricavate da veli *wet-laid*, per lo sviluppo di fogli CF conduttivi. Il composito realizzato con il velo e della resina acrilica ha mostrato una conduttività elettrica moderata di  $2,8 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ . Al contempo è stato osservato un incremento della conducibilità elettrica del materiale con l'aumento della lunghezza CF, poiché fibre più lunghe tendono a creare un numero maggiore di punti di contatto aumentando quindi la continuità elettrica [16].

Akonda et al. [16] hanno studiato gli effetti della presenza di fibre di carbonio da riciclo o da scarti di lavorazione sulla conducibilità elettrica conferita ad un composito in matrice di polipropilene (PP). In particolare, sono stati realizzati due compositi: uno con fibre di carbonio proveniente da post-processing (scarti di lavorazione) e uno con

fibre da riciclo, che rappresentano le stesse tipologie di fibra impiegate nel corso del progetto TEX-STYLE:

C1 = fibre PP + 25,5% fibre di CFs da riciclo

C2 = fibre PP + 30,5% fibre di CFs da post-processing

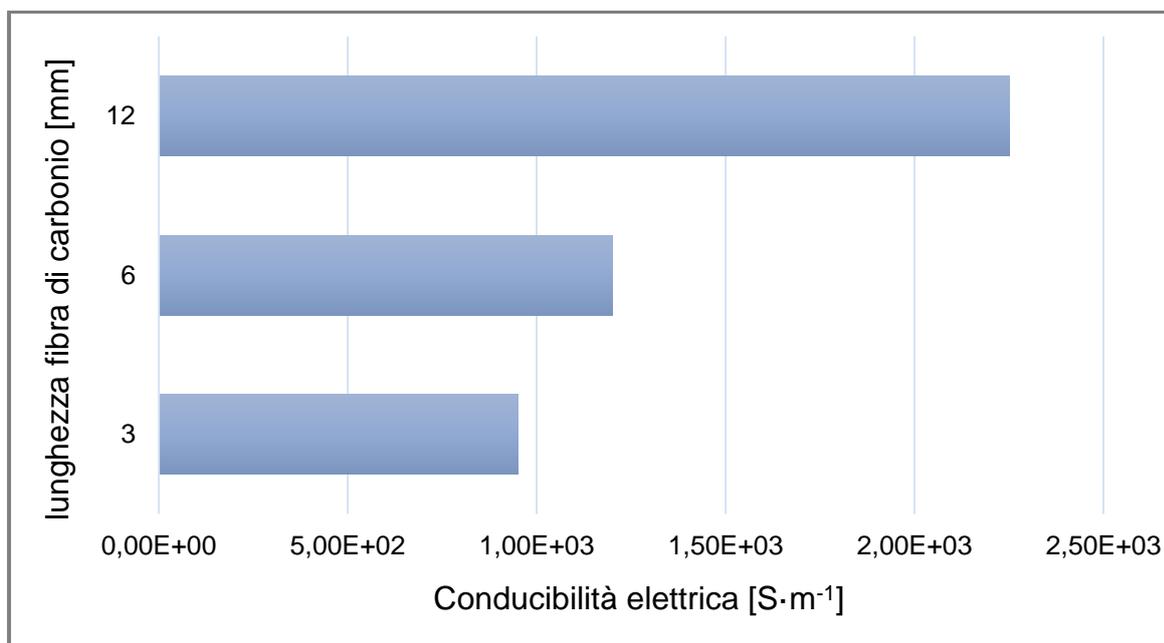
Successive misure di conducibilità elettrica sui compositi hanno evidenziato i valori riportati nella seguente tabella:

Composito	diametro [ $\mu\text{m}$ ]	fibre	Lunghezza CF [mm]	Resistività [ $\Omega\cdot\text{m}$ ]	Conducibilità [ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
C1	8,0 $\pm$ 0,01		20	(3,5 $\pm$ 0,05)E-04	2,86E+03
C2	7,6 $\pm$ 0,01		40	(0,93 $\pm$ 0,05)E-04	10,75E+03

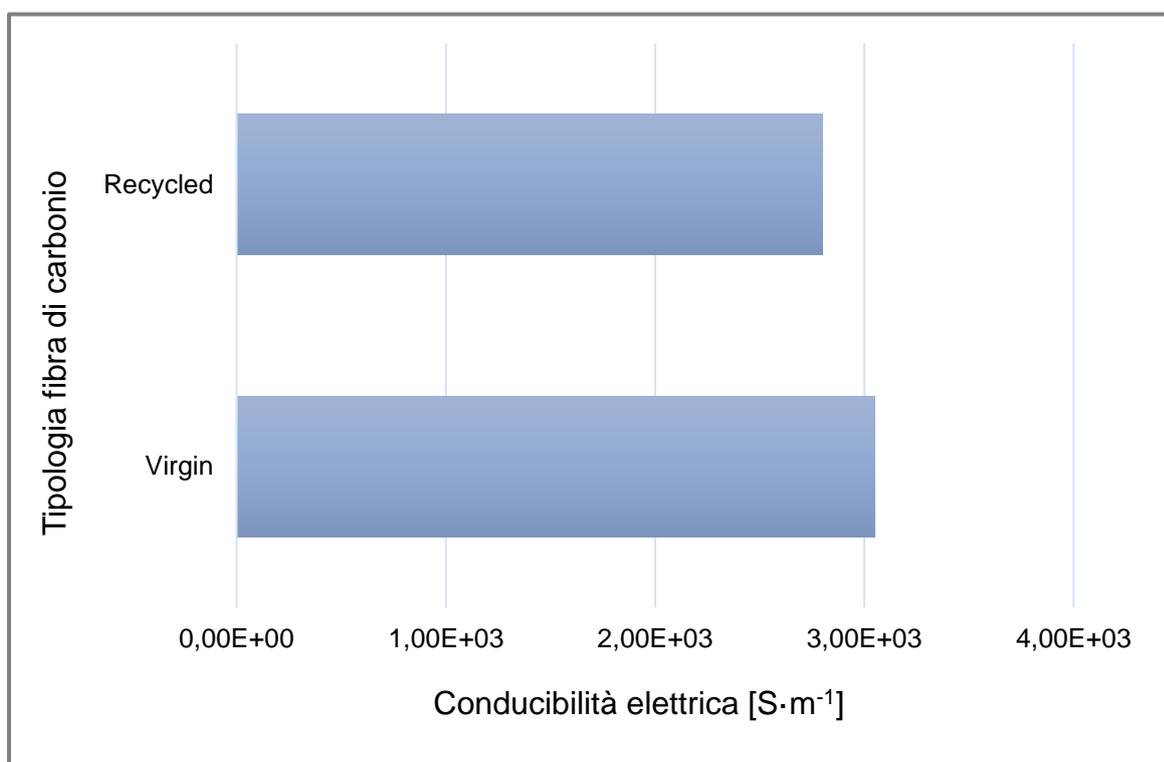
**Tabella 5.** Effetto della presenza di fibra di carbonio sulla conducibilità elettrica del composito (tratto da [16]).

La migliore conducibilità di C2 si deve ad una maggiore lunghezza delle fibre, maggiore tenore di fibre di carbonio e migliore allineamento delle fibre.

Un ulteriore studio sull'impiego di fibre di carbonio da riciclo come elemento scaldante è stato condotto da Pang et al. [17]. In questo lavoro, la fibra di carbonio da riciclo è stata impiegata per realizzare un foglio non tessuto mediante procedura wet-paper, successivamente impregnata con una resina acrilica termoindurente (Resin HF-05 A), ed è stata studiata l'influenza di fattori quali la lunghezza della fibra e la sua grammatura ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Si è evinto anche in questo lavoro che la lunghezza della fibra influenza in maniera sensibile il valore di conducibilità elettrica: le fibre più lunghe tendono infatti a creare più punti di contatto tra loro, aumentando così la quantità di percorso di conduzione diretta (Figura 5). Un confronto, inoltre, con la fibra di carbonio vergine evidenzia una lieve riduzione del valore di conducibilità elettrica, ma che è da imputare esclusivamente al fatto che il processo di riciclo comporta una riduzione della lunghezza della fibra di carbonio (Figura 6). Contrariamente, non è stata osservata alcuna dipendenza della conducibilità elettrica dalla grammatura del foglio realizzato, ma ciò non sorprende poiché la conducibilità elettrica è indipendente dallo spessore del foglio stesso.



**Figura 5.** Influenza della lunghezza delle fibre di carbonio sulla conducibilità elettrica (liberamente tratta da [17]).



**Figura 6.** Confronto tra conducibilità elettrica di fibre di carbonio vergini e riciclate (liberamente tratta da [17]).

Pang et al. [17] hanno quindi valutato la capacità di riscaldamento di un foglio di carbonio da riciclo così realizzato per effetto Joule, valutando l'andamento della

temperatura raggiunta dallo stesso quando attraversato da corrente elettrica. I risultati della sperimentazione si sono mostrati incoraggianti, con un incremento della temperatura da circa 20 °C a 94 °C quando attraversato da una corrente pari a 1,88 Ampere.

In definitiva, ciò che scaturisce da queste prime evidenze sperimentali è che l'impiego di fibre di carbonio da riciclo consente di conferire ad un tessuto dei valori di conducibilità elettrica dell'ordine di  $2 \cdot 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ . All'interno del progetto l'ENEA quindi svolgerà uno studio sulla processabilità di fibre di carbonio da riciclo o proveniente da scarti di lavorazione, al fine di verificare la possibilità di ottenere dei filati conduttivi. Particolare attenzione sarà posta sulle caratteristiche prestazionali dei filati ottenuti, al fine di verificare la possibilità di impiegarle nella realizzazione di tessuti per la prototipazione dei dimostratori individuati.

Alla luce dello studio effettuato, al fine di allineare i valori a quelli comunemente assunti dallo stato dell'arte dei materiali conduttori a base di fibra di carbonio, di seguito si riassumono le caratteristiche prestazionali da conseguire per i filati da realizzare nel progetto TEX-STYLE:

- *conducibilità elettrica* =  $2 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$
- *lunghezza fibra* = 20 – 40 mm
- *densità lineare* = 500 – 1000 tex
- *Tenore di fibra nel tessuto finale* = 20 – 30% in peso

La conducibilità elettrica sarà determinata attraverso misurazioni con la tecnica a 4 punti. Il riscaldamento dei filati, per effetto del passaggio di corrente elettrica e in dipendenza della resistenza del materiale, sarà monitorato per valutare la congruità tra i valori ottenuti e le applicazioni proposte.

#### 4. CONCLUSIONI

Questo documento riporta i risultati di uno studio, svolto nell'ambito del progetto TEX-STYLE, rivolto a delineare lo stato dell'arte esistente nel campo dei materiali impiegati come tessuti intelligenti (smart textiles) ovvero tessuti elettronici (e-textiles) e quindi focalizzando l'attenzione sull'impiego delle fibre di carbonio e sulla definizione delle caratteristiche prestazionali richieste a quest'ultime per poter essere utilizzate come tessuti intelligenti.

L'obiettivo ambizioso del progetto TEX-STYLE è la produzione su larga scala di tessuti e rivestimenti intelligenti realizzati con materiali sostenibili in grado di combinare effetti estetici e funzionali (basso gloss, soft touch, effetto naturale) con elettronica integrata (sensori, illuminazione e connettività) per offrire agli stilisti nuove possibilità di design creativo e stile made in Italy. In virtù delle potenzialità presentate, del grado di conoscenza ed esperienza che ENEA ha acquisito nel corso degli anni presso il C.R. di Brindisi e della possibilità di coniugare la fruibilità, la flessibilità e la comodità nell'impiego in tessuti con la capacità di integrazione di funzioni elettro-ottiche, la scelta è ricaduta sulla realizzazione di filati conduttivi. In particolare, al fine di coniugare criteri di funzionalità dei materiali con il criterio di sostenibilità ambientale, l'interesse è ricaduto sull'impiego di fibre di carbonio proveniente da riciclo di materiali compositi a fine vita e/o da scarti di lavorazione, promuovendo così l'impiego di materie prime seconde altrimenti destinati al confinamento in discarica. Il prodotto finale è un filato ibrido in cui la fibra di carbonio, in grado di assicurare proprietà di conduzione elettrica, affianca una fibra tradizionalmente impiegata nella realizzazione di tessuti (poliammide 6).

Tra le caratteristiche della fibra di carbonio, quale materiale intrinsecamente conduttivo, si evidenzia come i valori di conducibilità elettrica ricadano in un intervallo piuttosto ampio ( $1,00E+05 - 1,00E+06 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ ) per via dei numerosi parametri che ne influenzano le prestazioni: tipologia di precursore, temperatura finale di trattamento della fibra, diametro e lunghezza della fibra. In particolare, l'obiettivo del progetto TEX-STYLE è quello di utilizzare fibre di carbonio provenienti da percorsi di riciclo di compositi a fine vita, o derivanti da scarti di lavorazione di processi di produzione. Uno studio focalizzato sullo stato dell'arte nel vasto panorama della letteratura scientifica ha evidenziato pochi lavori sull'impiego di fibre di carbonio ottenute da riciclo per la realizzazione di materiali elettricamente conduttivi, dai quali comunque si intuiscono le

buone potenzialità e si sottolineano i limiti delle stesse, e hanno consentito di stabilire dei target prestazionali da conseguire nel proseguo della sperimentazione in laboratorio, in termini di conducibilità elettrica dei filati ibridi, di densità lineare e di tenore della fibra nel filato/tessuto finale.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Hughes-Riley T., Dias T., Cork C., *A Historical review of the Development of Electronic Textiles*, *Fibers*; 2018; 6, 34.
- [2] Stoppa M., Chiolerio A., *Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review*, *Sensors*, 2014;14: 11957-11992.
- [3] Castano L.M., Flatau A.B., *Smart fabric sensors and e-textile technologies: a review*, *Smart Materials and Structures*, (2014); 23: 053001.
- [4] Tseghai G.B., Malengier B., Fante K.A., Nigusse A.B., Van Langenhove L., *Integration of Conductive Materials with Textile Structures, an Overview*, *Sensors*, 2020; 20 6910.
- [5] Chatterjee K., Tabor J., Ghosh T.K., *Electrically Conductive Coatings for Fiber-Based E-Textiles*, *Fibers*, 2019; 7, 51.
- [6] Zeng W., Shu L., Li Q., Chen S., Wang F., Tao X-M., *Fiber-Based Wearable Electronics: A Review of Materials, Fabrication, Devices, and Applications*, *Advanced Materials*, 2014; 26: 5310-5336.
- [7] Cherenack K., Van Pieterse L., *Smart textiles: Challenges and opportunities*, *Applied Physics Review*, 2012; 112: 091301.
- [8] Heo J.S., Eom J., Kim Y-H., Park S.K., *Recent progress of Textile-Based Wearable Electronics: A comprehensive review of materials, devices, and applications*, *Small* 2018; 14: 1703034.
- [9] Agcayazi T., Chatterjee K., Bozkurt A., Ghosh T.K., *Flexible Interconnects for Electronic Textiles*, *Advanced Material and Technologies*, 2018; 3(10).
- [10] Varnaitė-Žuravliova S., Baltušnikaitė-Guzaitienė J., Valasevičiūtė L., Verbienė R., Abraitienė A., *Assessment of Electrical Characteristics of Conductive Woven Fabrics*, *AJMIE*, 2016; 1(3): 38-49.
- [11] Alarifi I. M., *Investigation the conductivity of carbon fiber composites focusing on measurement techniques under dynamic and static loads*, *JMR&T*, 2019; 8 (5): 4863-4893.

- [12] Šafářová V., Grégr R., *Electrical conductivity measurement of fibers and yarns*, 7<sup>th</sup> International Conference - TEXSCI 2010, Liberec, Czech Republic.
- [13] Conor P.C., Owston C.N., *Electrical resistance of single carbon fibers*, *Nature*, 1969; 23: 1146-1147.
- [14] Lund A., Van der Velden N., Persson N. K., Hamedi M., Müller C., *Electrically Conducting Fibres for e-Textiles: An Open Playground for Conjugated Polymers and Carbon Nanomaterials*, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2018; 126: 1-29.
- [15] Rebouillat S., Lyoins M.E.G., *Measuring the electrical conductivity of single fibers*, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2011; 6: 5731 – 5740.
- [16] Akonda M.H., Lawrence C.A., El-Dessouky H.M., *Electrically conductive recycled carbon fiber-reinforced thermoplastic composites*, *JTCM*, 2015; 28(11): 1550-1563.
- [17] Pang E., Pickering S.J., Chan A., Wong K.H., *Use of recycled carbon fibre as a heating element*, *Journal of Composite Materials*, 2013; 47(16): 2039-2050.

ENEA  
Servizio Promozione e Comunicazione  
[www.enea.it](http://www.enea.it)

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati  
giugno 2023