



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# Trattamenti chimici superficiali per trasformare i tessuti da convenzionali a smart

**Convegno:**

**TRATTAMENTI INNOVATIVI  
SU TESSUTI**

RELATORI

Dott. ssa Valentina Trovato

SEDE

Biella – Unione Industriale Biellese

DATA

12-11-2019

# SOMMARIO

## ➤ Introduzione

- Substrati Tessili: applicazioni convenzionali e *smart*
- *Smart Textiles*

## ➤ Tessuti: da convenzionali a *smart*

- Approcci chimici per la modifica superficiale dei tessuti: Tecnologia sol-gel e tecnica di *grafting*
- *Smart textiles*: sensori colorimetrici, tessuti a rilascio controllato ed E-Textiles
- Prototipi di *Smart Textiles* realizzati in laboratorio

## ➤ Conclusioni



# IL TESSILE CONVENZIONALE

## PROPRIETA'



### Interessanti proprietà intrinseche

- resistenza meccanica
- flessibilità
- traspirabilità
- biocompatibilità (polimeri naturali)
- semplicità di lavorazione
- possibilità di essere sottoposti a cicli di lavaggio

# IL TESSILE CONVENZIONALE

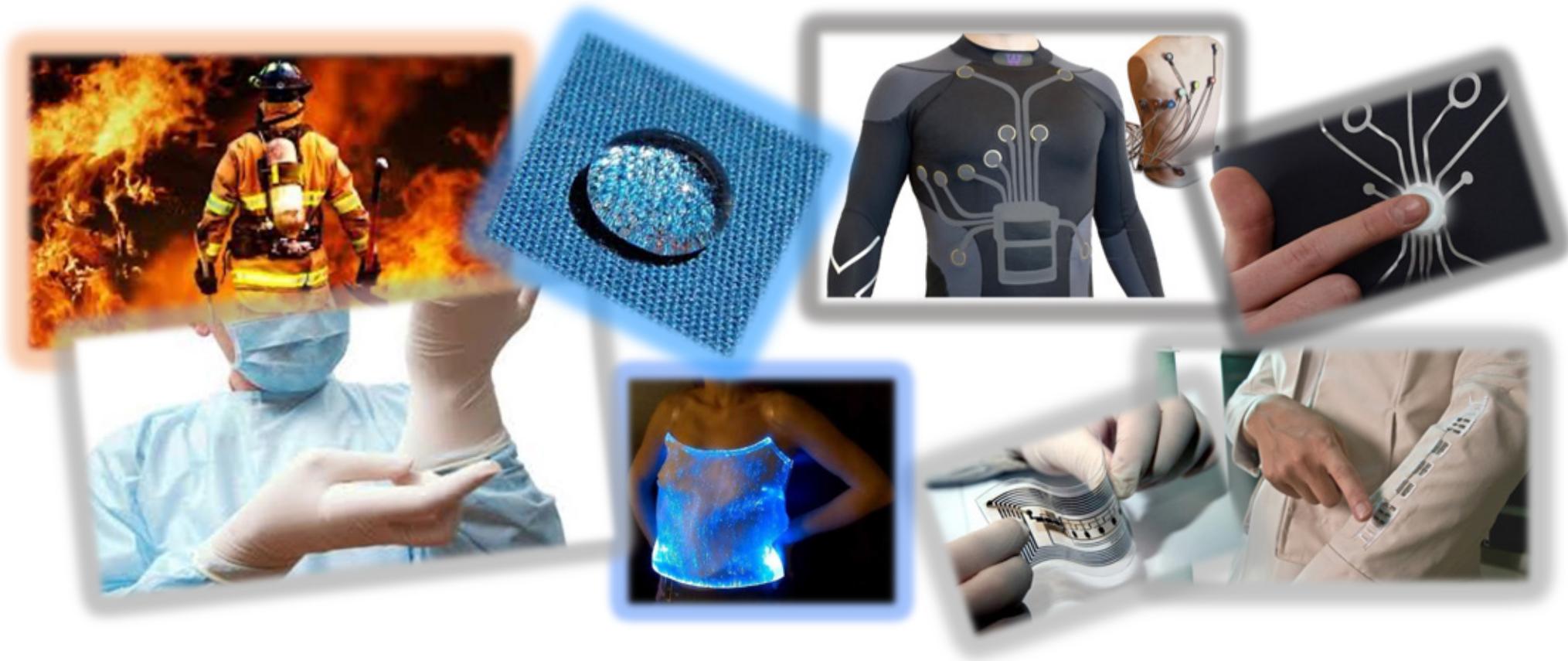
## PROPRIETA'



I tessuti rappresentano dei substrati interessanti per lo sviluppo di materiali tessili con specifiche **funzionalità**, nonché di **sensori miniaturizzati** caratterizzati da:

- Leggerezza
- Flessibilità
- Indossabilità
- Elasticità

# TESSILE TECNICO E SMART



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# SMART TEXTILES

Gli *smart textiles* (tessuti intelligenti) sono definiti tessuti in grado di **percepire** stimoli dall'ambiente esterno, **reagire** e a loro **adattarsi** grazie all'integrazione nel materiale tessile di specifiche funzionalità

- prodotti elettronici portatili e indossabili sviluppati dall'incorporazione di piezoelettrici, celle solari organiche e dispositivi termoelettrici nei tessuti;
- materiali con elevate prestazioni elettrochimiche, utilizzabili principalmente come sistemi di alimentazione flessibili;
- dispositivi cromatici e attuatori integrati nei tessuti, con lo scopo di sviluppare sensori indossabili.

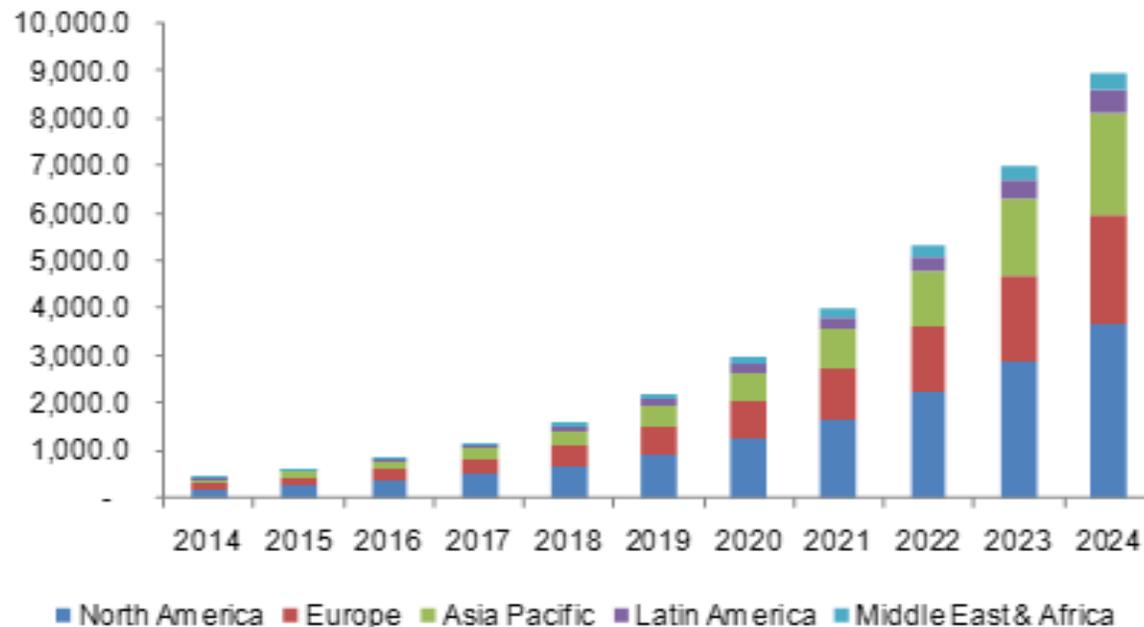
*K. Cherenack, L. van Pieteron, Smart textiles: Challenges and opportunities, J. Appl. Phys. 112 (2012) 091301. doi:10.1063/1.4742728.*  
*L. Van Langenhove, C. Hertleer, Smart clothing: a new life, Int. J. Cloth. Sci. Technol. 16 (2004) 63–72. doi:10.1108/09556220410520360.*



# SMART TEXTILES

## MERCATO

Global Smart Textiles Market, By Region, 2014 - 2024 (USD Million)



Si stima che il mercato globale degli Smart Textiles raggiungerà i 9 miliardi di dollari entro il 2024, con un tasso di crescita composto (CAGR) superiore al 33% dal 2017 al 2024.

Smart Textiles Market. Size, Analysis, Share, Growth. Report 2024.

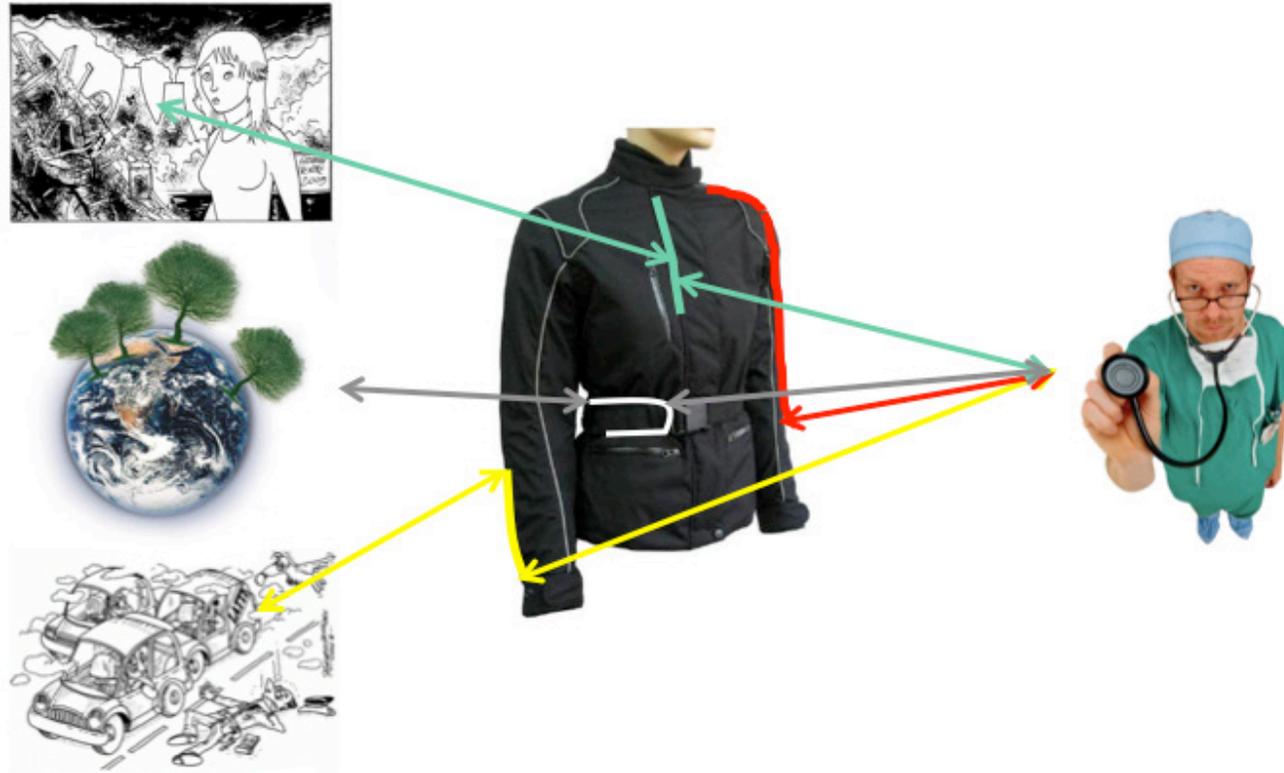


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# NANOTECNOLOGIE PER IL TESSILE

## SENSORI PER LO SPORT ED IL MEDICALE



*L. Van der Schueren, K. De Clerck, G. Brancatelli, G. Rosace, E. Van Damme, W. De Vos, Sensors and Actuators B 162 (2012) 27-34  
E. Guido, C. Colleoni, K. De Clerck, M.R. Plutino, G. Rosace, Sensors and Actuators B 203 (2014) 213-222*



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# SMART TEXTILES

## CLASSIFICAZIONE

**Azione**



**Reazione**

**Smart Textiles Passivi**

**sensibile**

**Smart Textiles Attivi**

**variabile**

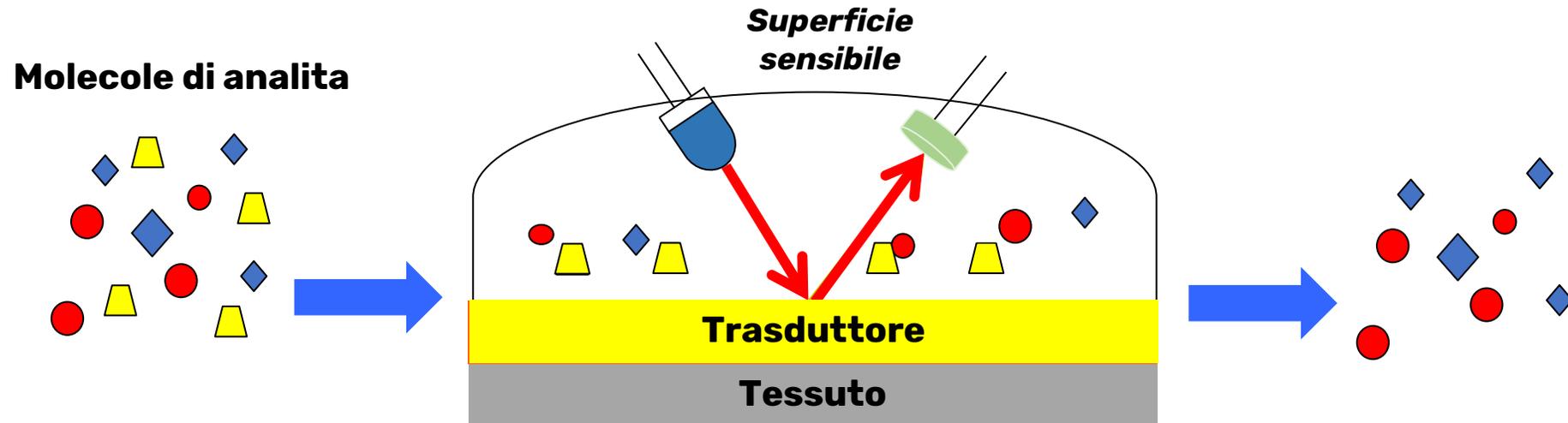
**Smart Textiles Proattivi**

**reattiva**

I tessuti possono essere utilizzati come superficie intelligente per ottenere determinate reazioni (es. cambiamento di colore) in presenza di specifici analiti.



# SMART TEXTILES



Quando uno specifico analita interagisce con un film sottile, la superficie cambia colore, di conseguenza cambia la luce riflessa e quindi la differenza di potenziale che può essere misurata.

# SMART TEXTILES

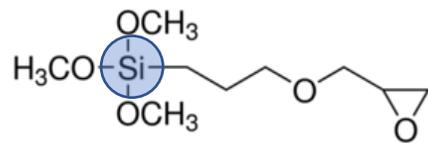
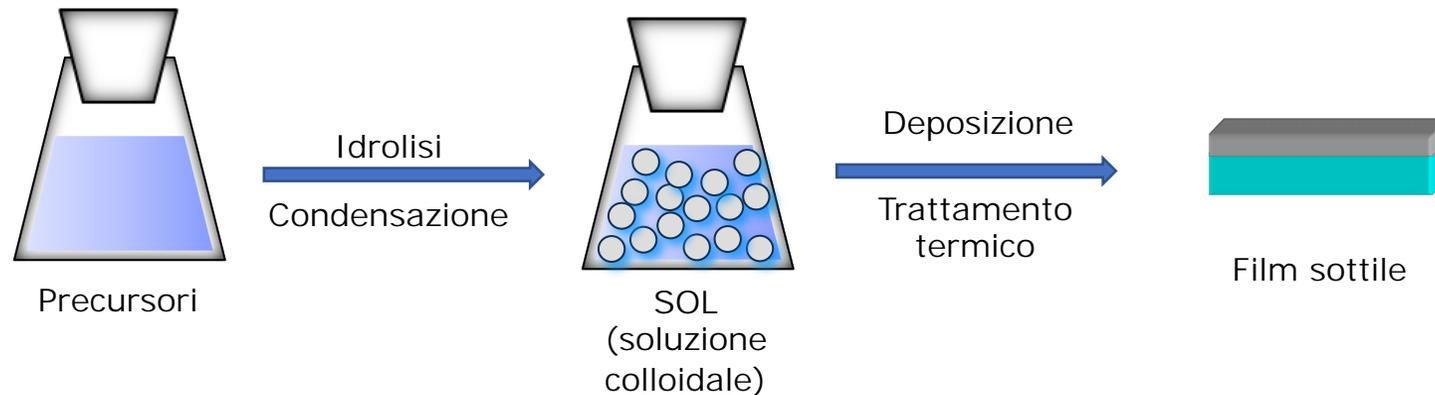
<b>ACCURATEZZA</b>	Limitare falsi-positivi e falsi-negativi
<b>SOLIDITA'</b>	Resistere a variazioni delle condizioni di misurazione
<b>VELOCITA'</b>	Risposta in tempo reale
<b>AFFIDABILITA'</b>	Produrre risultati riproducibili
<b>SENSIBILITA'</b>	Rilevare bassi livelli di analiti
<b>SPECIFICITA'</b>	Rilevare solo analiti di interesse



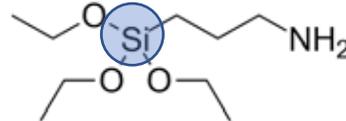
# MODIFICA SUPERFICIALE DEI TESSUTI

## TECNICA SOL-GEL

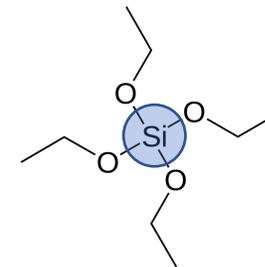
Strategia sintetica che permette di realizzare compositi ceramici



GPTMS



APTES

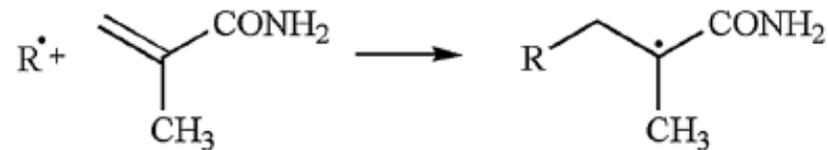
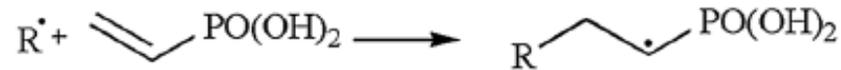
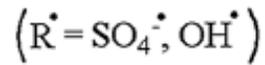
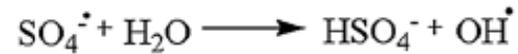
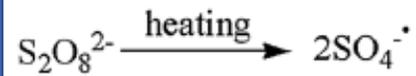


TEOS

# MODIFICA SUPERFICIALE DEI TESSUTI

## TECNICA GRAFTING

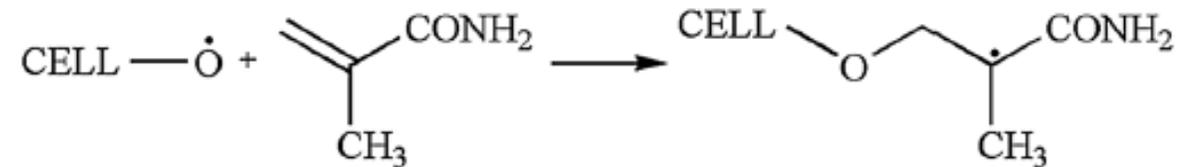
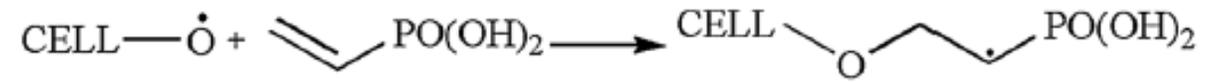
Graft initiation in solution



# MODIFICA SUPERFICIALE DEI TESSUTI

## TECNICA GRAFTING

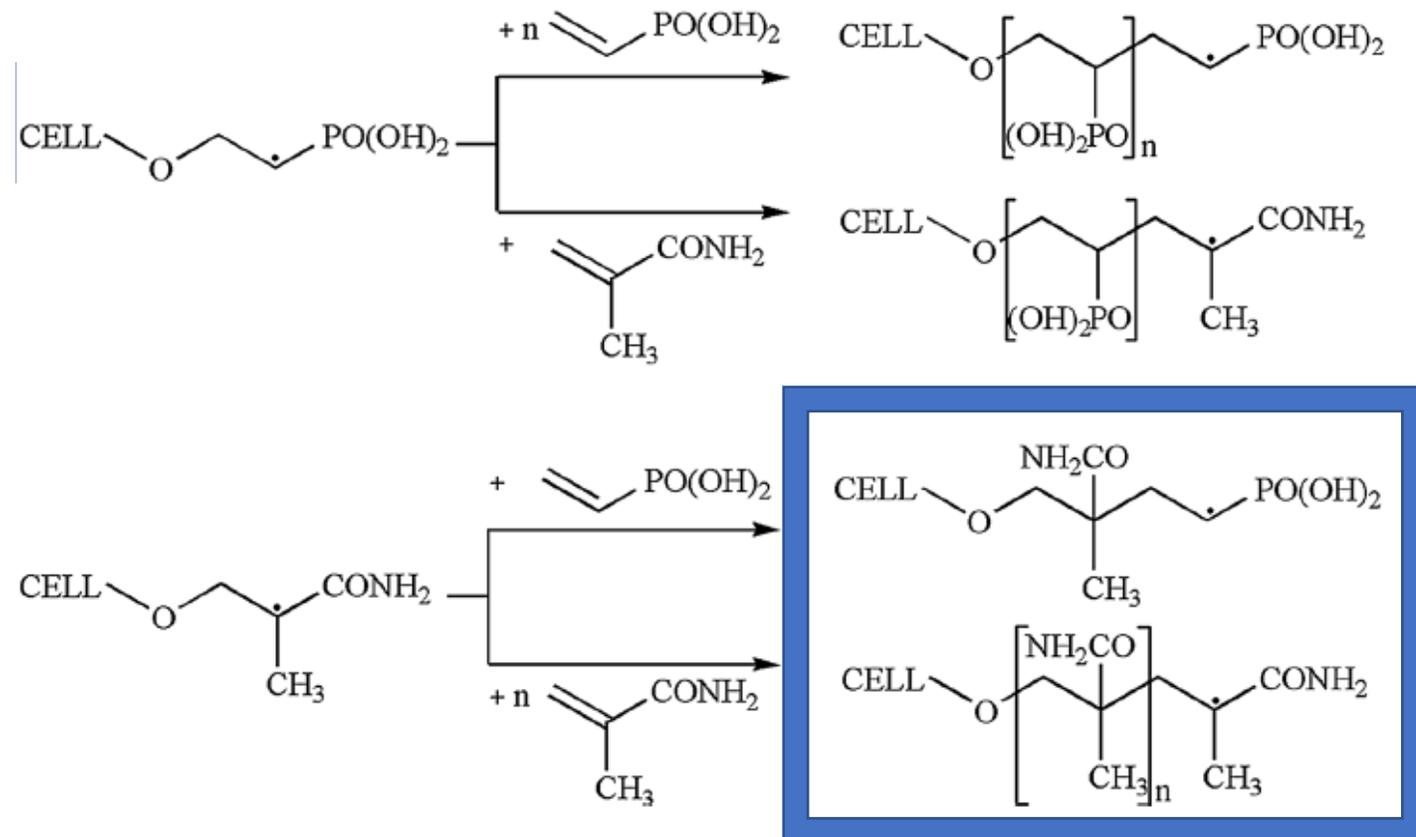
Graft initiation on cotton fabric



# MODIFICA SUPERFICIALE DEI TESSUTI

## TECNICA GRAFTING

Graft propagation on cotton fabric



G. Rosace, C. Colleoni, V. Trovato, G. Iacono and G. Malucelli, "Vinylphosphonic acid/methacrylamide system as a durable intumescent flame retardant for cotton fabric", *Cellulose* 24 (2017) 3095–3108. DOI 10.1007/s10570-017-1294-x.



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# SMART TEXTILES

**PASSIVI**

**Sensori  
colorimetrici**

**Rilascio  
controllato**

**ATTIVI**

***E-Textiles***



# SMART TEXTILES

## PASSIVI

### Sensori colorimetrici

- Determinazione colorimetrica del glucosio nel sudore, per la diagnosi e il monitoraggio del diabete.
- Determinazione colorimetrica del pH del sudore per definire lo stato di salute dell'individuo.
- Prototipo Health Belt



# SENSORI COLORIMETRICI

## ANALISI DEL SUDORE

Fluido biologico trasparente, il cui valore medio di pH è intorno a 5.3 e contenente circa 61 componenti a diversa concentrazione:

- Acqua (~99%);
- Elettroliti (fra i quali  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{K}^+$ );
- Sostanze organiche (amminoacidi, vitamine, glucosio, proteine, peptidi, ecc..).



*C.J. Harvey et al. / Toxicology in Vitro 24 (2010) 1790–1796*



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# SENSORI COLORIMETRICI

## ANALISI DEL SUDORE

### Concentrazione degli analiti correlata a quella del sangue

«MY SWEAT MY HEALTH»



#### Analisi cliniche per definire:

- Stato di salute dell'organismo umano (es. disidratazione);
- Malattie della pelle (es. dermatiti, acne);
- Diagnosi di malattie (es. diabete e fibrosi cistica);
- Farmacocinetica.

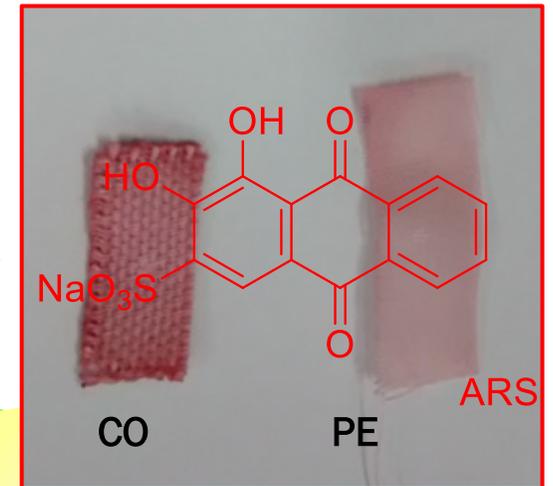
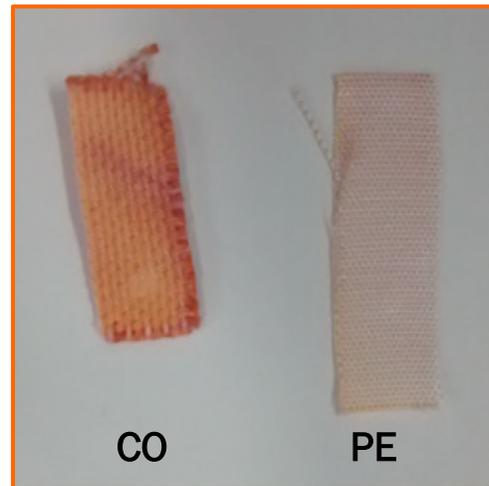
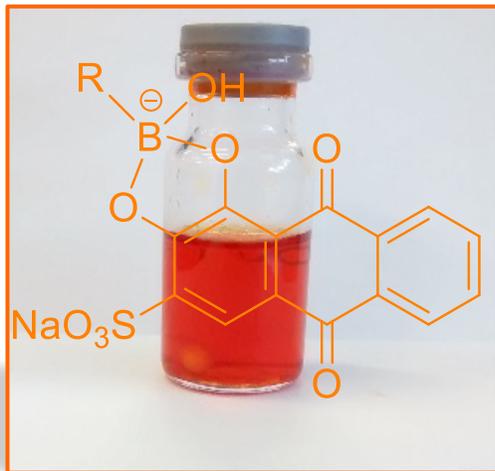
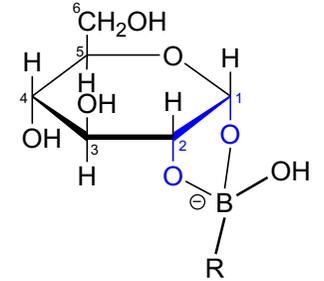
*C.J. Harvey et al. / Toxicology in Vitro 24 (2010) 1790–1796*



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

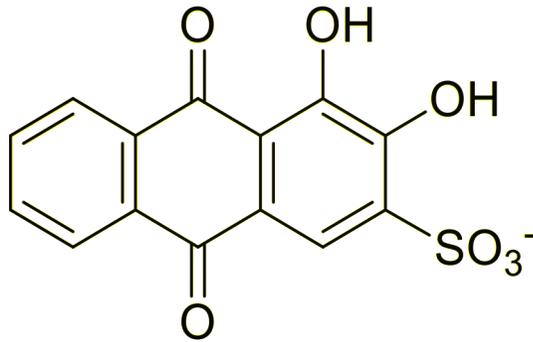
# DETERMINAZIONE COLORIMETRICA DEL GLUCOSIO NEL SUDORE, PER LA DIAGNOSI E IL MONITORAGGIO DEL DIABETE



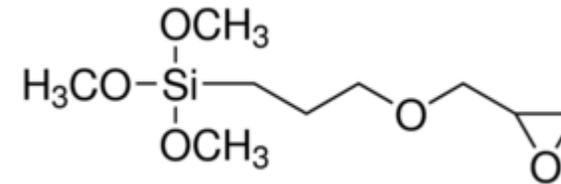
**...WORK IN  
PROGRESS**

# DETERMINAZIONE COLORIMETRICA DEL PH DEL SUDORE PER DEFINIRE LO STATO DI SALUTE DELL'INDIVIDUO

TECNICA SOL-GEL



**ARS**

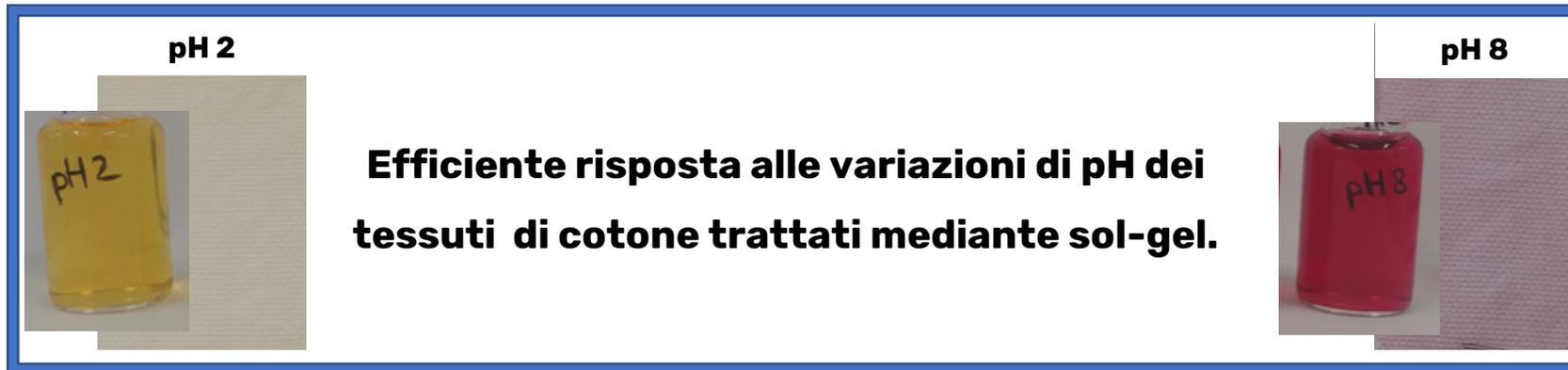


**GPTMS**

# DETERMINAZIONE COLORIMETRICA DEL PH DEL SUDORE PER DEFINIRE LO STATO DI SALUTE DELL'INDIVIDUO

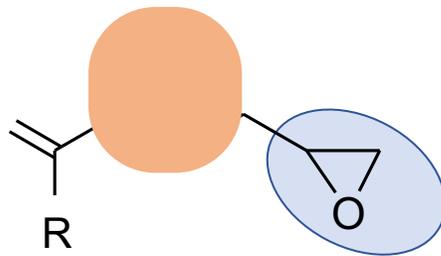
- ✓ Bassa efficienza della tintura convenzionale a causa della lisciviazione del colorante;
- ✓ Efficacia dell'immobilizzazione su tessuto del colorante mediante tecnologia sol-gel.

Sample	Add-on (%)	WLW %
CO_ARS	0.35	1W -
CO_G-ARS	7.15	1W 1.06 5W 1.05

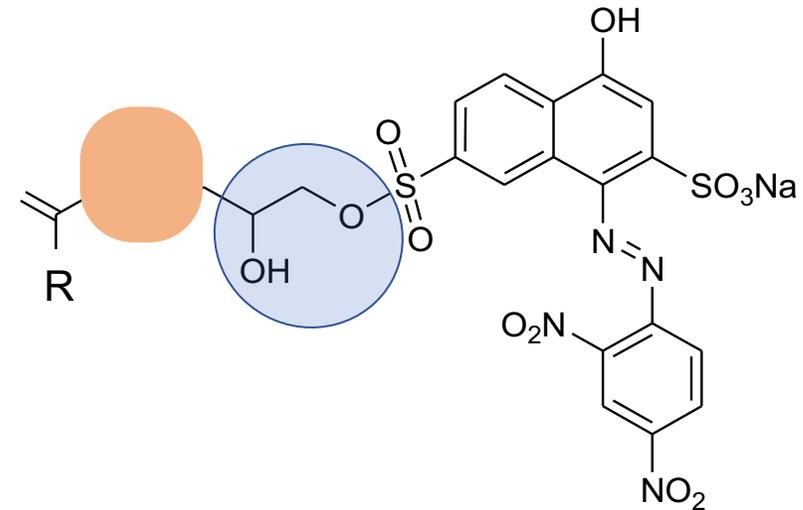


# DETERMINAZIONE COLORIMETRICA DEL PH DEL SUDORE PER DEFINIRE LO STATO DI SALUTE DELL'INDIVIDUO

## TECNICA GRAFTING



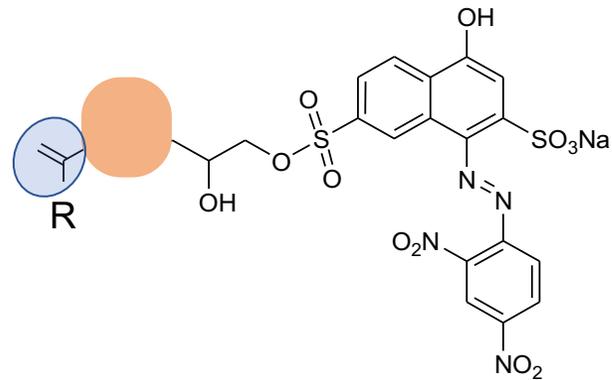
**M**



**M-NY**

# DETERMINAZIONE COLORIMETRICA DEL PH DEL SUDORE PER DEFINIRE LO STATO DI SALUTE DELL'INDIVIDUO

## GRAFTING SU COTONE



**M-NY**



# DETERMINAZIONE COLORIMETRICA DEL PH DEL SUDORE PER DEFINIRE LO STATO DI SALUTE DELL'INDIVIDUO

Sample	Add-on (%)	WLW %
CO_NY	1.02	1W -
		5W -
CO_M-NY	6.82	1W 3.92
		5W 4.64

- ✓ Efficacia del metodo di *grafting* per l'immobilizzazione del colorante su cotone rispetto la tecnica di tintura convenzionale.

**pH 4**



**Reversibilità e ripetibilità della risposta colorimetrica in funzione del pH dei tessuti realizzati mediante tecnica di *grafting*.**

**pH 8**

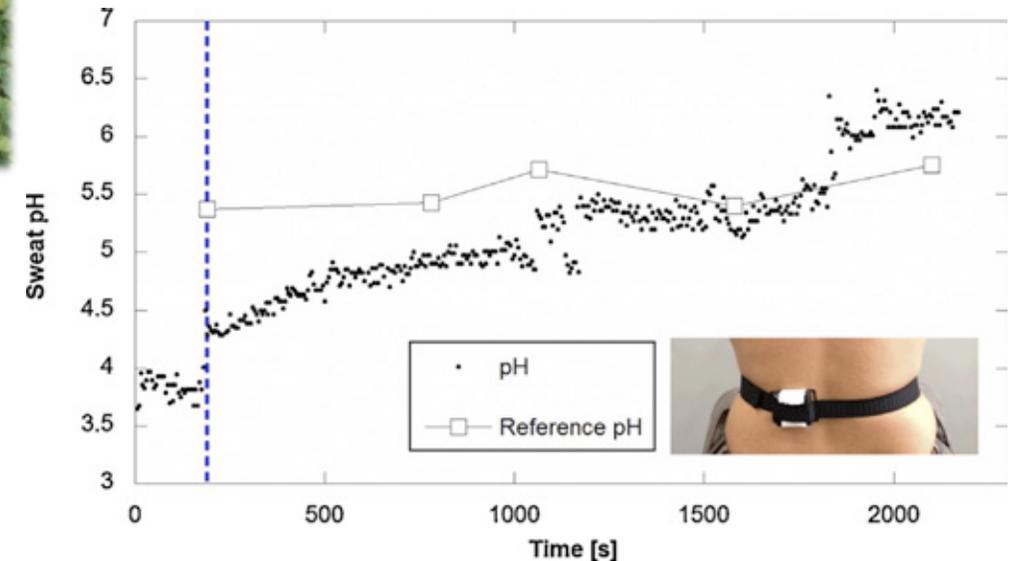
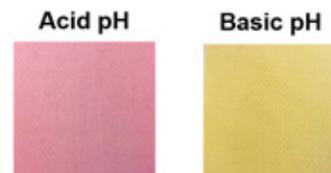


# HEALTH BELT

Health Belt comprende:

- un **tessuto** il cui colore è **sensibile alle variazioni di pH**;
- un **device elettronico** per rilevazione e trasmissione dati.

Utilizzando "Health Belt" è possibile monitorare il pH del sudore per ricavare, in **tempo reale** e in maniera **non invasiva**, informazioni riguardanti lo **stato di idratazione** di un atleta, la **concentrazione** di determinati **ioni**, ma anche dati relativi ad alcune **patologie della pelle**.



M. Caldara, C. Colleoni, E. Guido, V. Re, G. Rosace, "Optical monitoring of sweat pH by a textile fabric wearable sensor based on covalently bonded litmus-3-glycidoxypropyltrimethoxysilane coating", *Sensors and Actuators B* 222 (2016) 213–220. DOI: 10.1016/j.snb.2015.08.073.



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# SMART TEXTILES

**PASSIVI**

**Sensori  
colorimetrici**

**Rilascio  
controllato**

**ATTIVI**

***E-Textiles***



# SMART TEXTILES

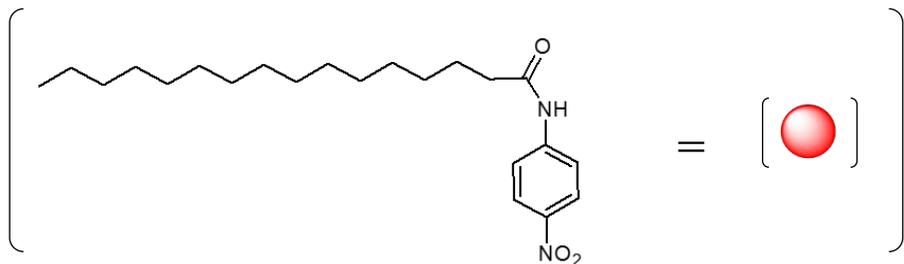
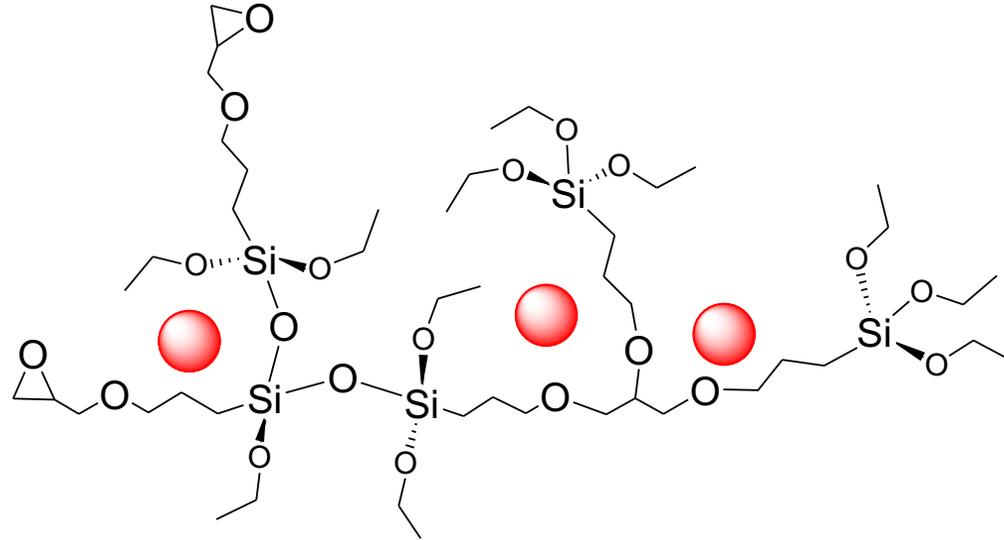
## PASSIVI

### Rilascio controllato

Incapsulamento in *coating* sol-gel di molecole ad azione anti-infiammatoria/anti-ossidante per tessuti a rilascio controllato.



# TESSUTI A RILASCIO CONTROLLATO DI MOLECOLE AD AZIONE ANTI- INFIAMMATORIA/ANTIOSSIDANTE



**G-PEA**

✓ N-Palmitoyl-ethanolamine (PEA): proprietà anti-infiammatorie e antiossidanti

F. Puoci, C. Saturnino, V. Trovato, D. Iacopetta, E. Piperopolous, C. Triolo, M. G. Bonomo, D. Drommi, O. I. Parisi, C. Milone, M. S. Sinicropi, G. Rosace, M. R. Plutino, "Sol-gel treatment of textiles for the entrapping of an antioxidant/anti-inflammatory molecule: functional coating morphological characterization and drug release evaluation", *Applied Sciences* 10 (2020) 2287. Doi:10.3390/app10072287



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

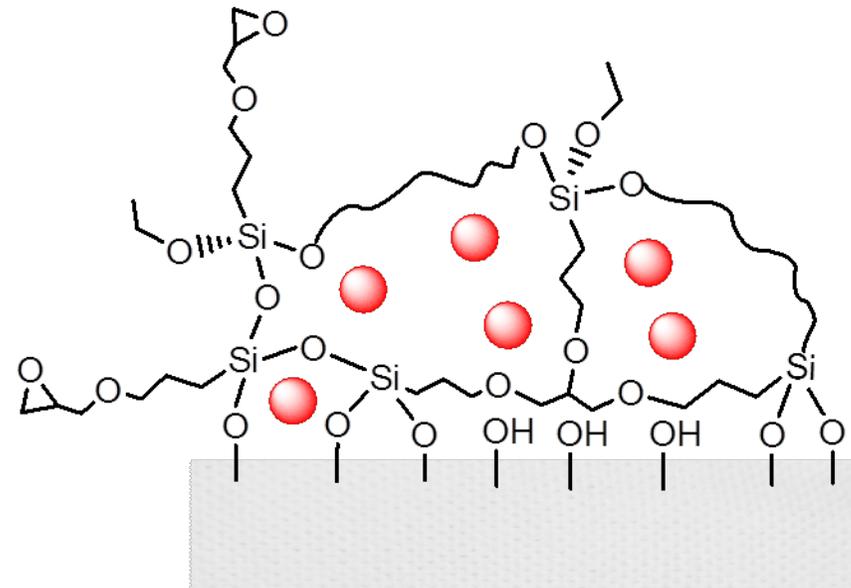
Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# TESSUTI A RILASCIO CONTROLLATO DI MOLECOLE AD AZIONE ANTI- INFIAMMATORIA/ANTIOSSIDANTE

## IMMOBILIZZAZIONE SU COTONE

CO<sub>L</sub> (119 g/m<sup>2</sup>)

CO<sub>H</sub> (331 g/m<sup>2</sup>)



F. Puoci, C. Saturnino, V. Trovato, D. Iacopetta, E. Piperopolous, C. Triolo, M. G. Bonomo, D. Drommi, O. I. Parisi, C. Milone, M. S. Sinicropi, G. Rosace, M. R. Plutino, "Sol-gel treatment of textiles for the entrapping of an antioxidant/anti-inflammatory molecule: functional coating morphological characterization and drug release evaluation", *Applied Sciences* 10 (2020) 2287. Doi:10.3390/app10072287

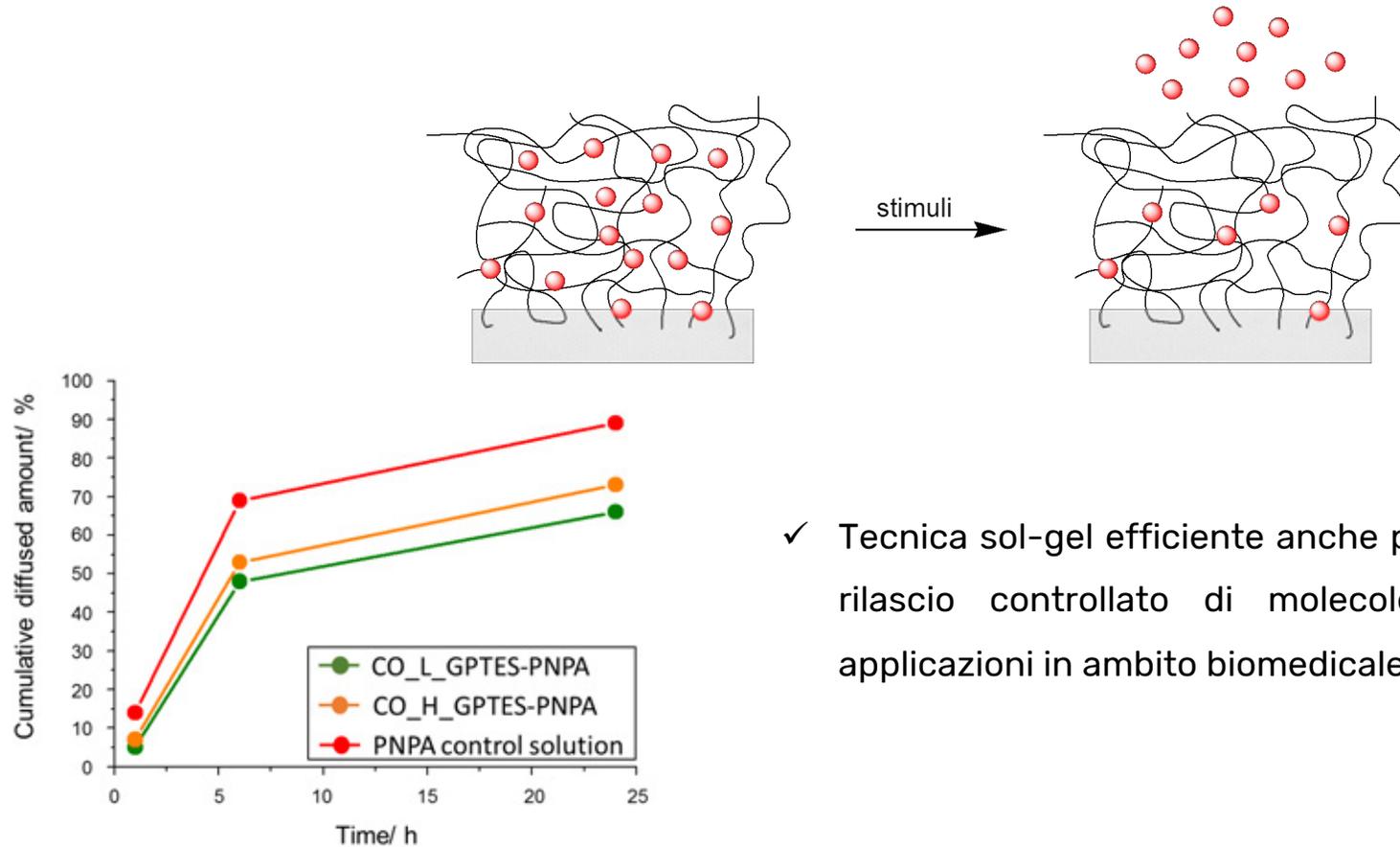


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# TESSUTI A RILASCIO CONTROLLATO DI MOLECOLE AD AZIONE ANTI- INFIAMMATORIA/ANTIOSSIDANTE

## TEST RILASCIO CONTROLLATO



- ✓ Tecnica sol-gel efficiente anche per lo sviluppo di sistemi ibridi per il rilascio controllato di molecole ad azione farmacologica per applicazioni in ambito biomedicale.

F. Puoci, C. Saturnino, V. Trovato, D. Iacopetta, E. Piperopolous, C. Triolo, M. G. Bonomo, D. Drommi, O. I. Parisi, C. Milone, M. S. Sinicropi, G. Rosace, M. R. Plutino, "Sol-gel treatment of textiles for the entrapping of an antioxidant/anti-inflammatory molecule: functional coating morphological characterization and drug release evaluation", *Applied Sciences* 10 (2020) 2287. Doi:10.3390/app10072287



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# SMART TEXTILES

**PASSIVI**

**Sensori  
colorimetrici**

**Rilascio  
controllato**

**ATTIVI**

***E-Textiles***



# SMART TEXTILES

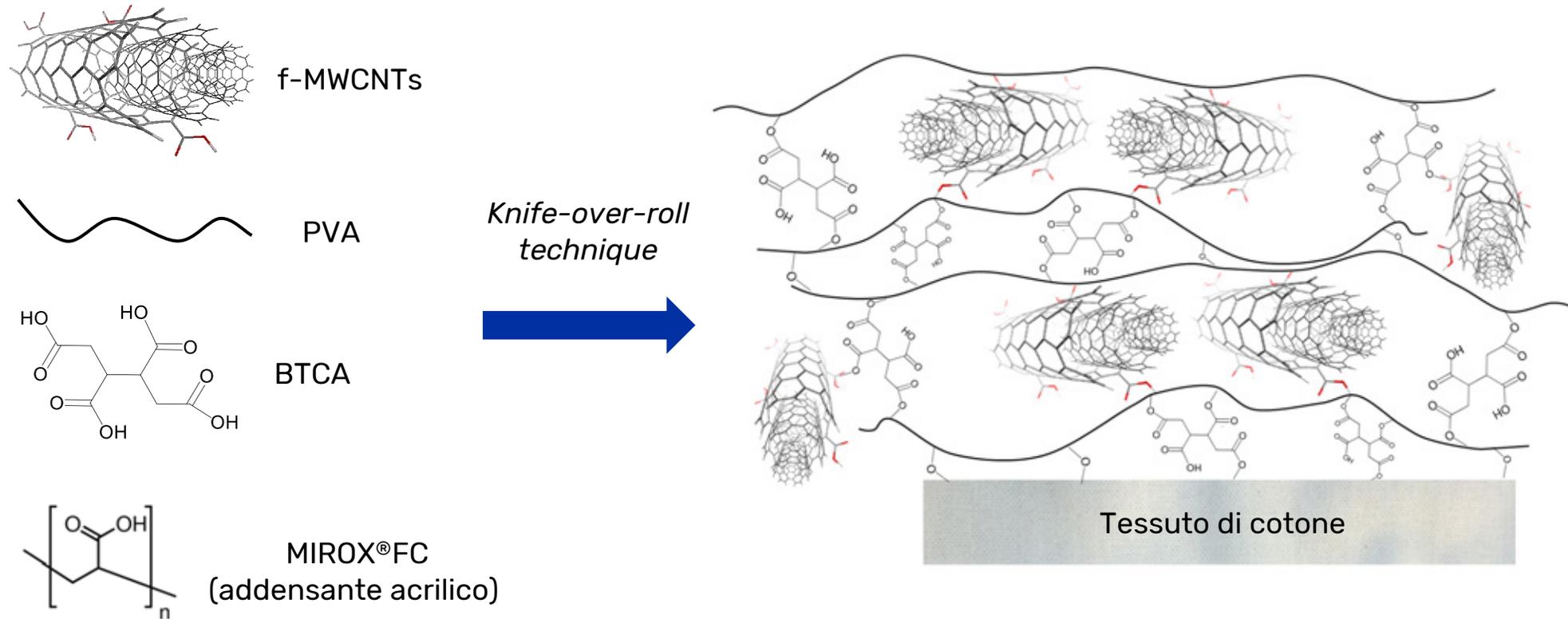
## ATTIVI

### *E-Textiles*

- Immobilizzazione di nanotubi di carbonio (CNTs) su cotone come elemento conduttivo per il monitoraggio ambientale.
- Immobilizzazione di nanotubi di carbonio (CNTs) in *coating* sol-gel come elemento conduttivo per sensori medicali.
- Prototipo ELECT



# E-TEXTILES: IMMOLIZZAZIONE DI CNTs SU COTONE COME ELEMENTO CONDUTTIVO PER IL MONITORAGGIO AMBIENTALE



G. Rosace, V. Trovato, C. Colleoni, M. Caldara, V. Re, M. Brucale, E. Piperopoulos, E. Mastronardo, C. Milone, G. De Luca and M. R. Plutino, "Structural and morphological characterizations of MWCNTs hybrid coating onto cotton fabric as potential humidity and temperature wearable sensor", *Sensors and Actuators B* 252 (2017) 428–439. DOI: 10.1016/j.snb.2017.05.175.

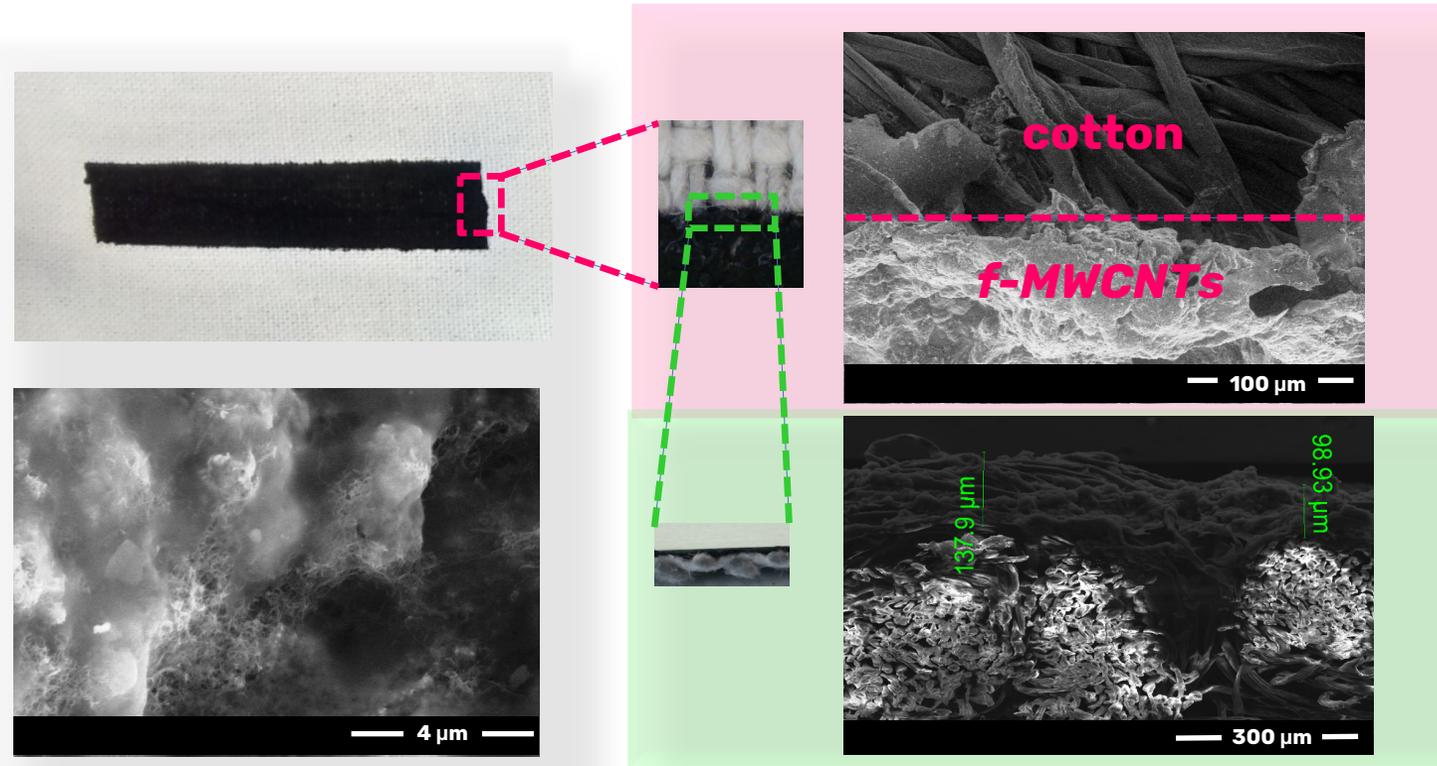


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# E-TEXTILES: IMMOLIZZAZIONE DI CNTs SU COTONE COME ELEMENTO CONDUTTIVO PER IL MONITORAGGIO AMBIENTALE

## CARATTERIZZAZIONE SEM



G. Rosace, V. Trovato, C. Colleoni, M. Caldara, V. Re, M. Brucale, E. Piperopoulos, E. Mastronardo, C. Milone, G. De Luca and M. R. Plutino, "Structural and morphological characterizations of MWCNTs hybrid coating onto cotton fabric as potential humidity and temperature wearable sensor", *Sensors and Actuators B* 252 (2017) 428–439. DOI: 10.1016/j.snb.2017.05.175.

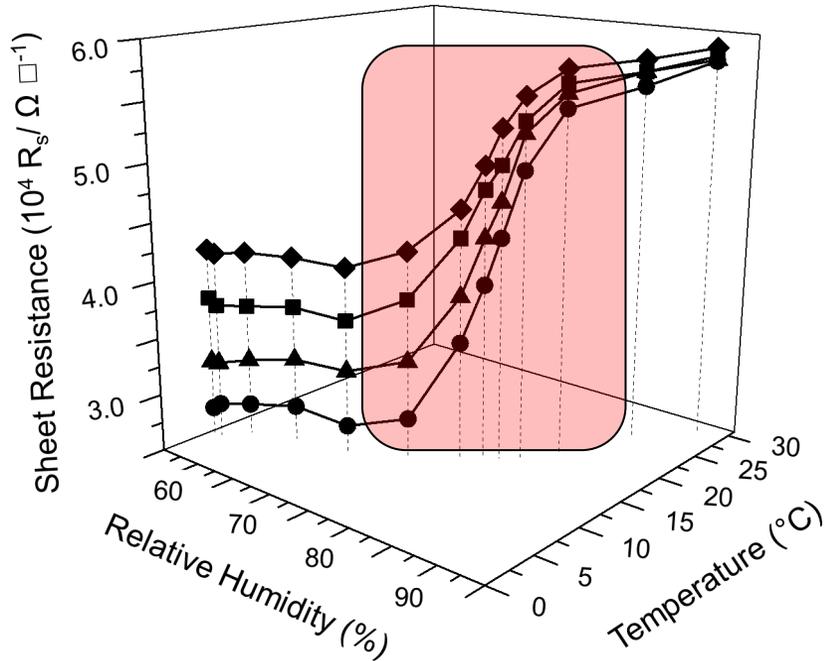


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

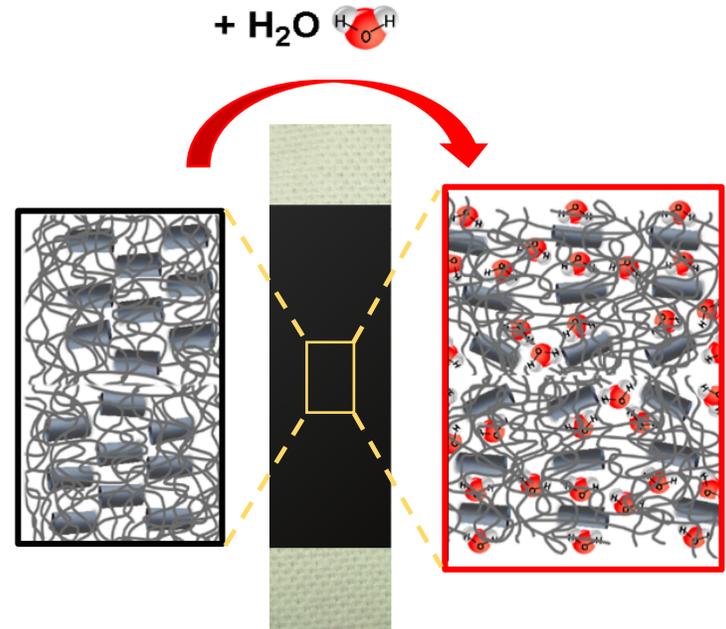
Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# E-TEXTILES: IMMOLIZZAZIONE DI CNTs SU COTONE COME ELEMENTO CONDUTTIVO PER IL MONITORAGGIO AMBIENTALE

## PROPRIETA' CONDUTTIVE



$75\% < \text{RH} < 90\%$   
 $10^{\circ}\text{C} < T < 20^{\circ}\text{C}$

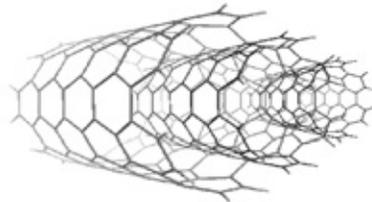


**Aumento di % RH**  
↓  
**swelling del coating**  
↓  
**Incremento di  $R_s$  del coating**

G. Rosace, V. Trovato, C. Colleoni, M. Caldara, V. Re, M. Brucale, E. Piperopoulos, E. Mastronardo, C. Milone, G. De Luca and M. R. Plutino, "Structural and morphological characterizations of MWCNTs hybrid coating onto cotton fabric as potential humidity and temperature wearable sensor", *Sensors and Actuators B* 252 (2017) 428–439. DOI: 10.1016/j.snb.2017.05.175.

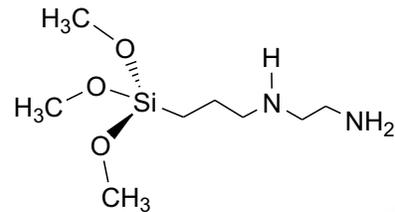


# E-TEXTILES: IMMOLIZZAZIONE DI CNTs SU COTONE COME ELEMENTO CONDUTTIVO PER SENSORI MEDICALI



**MWCNTs**

Tensioattivo  
termolabile



**EDAES**



Addensante  
poliuretano



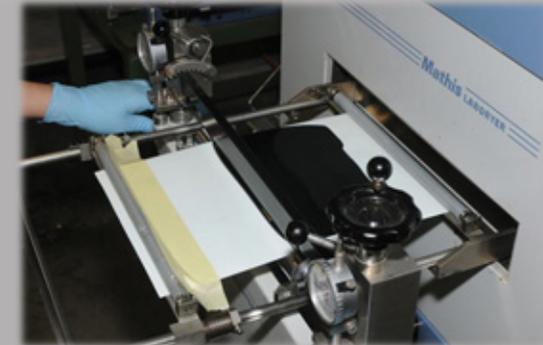
**A**

L = 1,5 mm

**B**

L = 3,0 mm

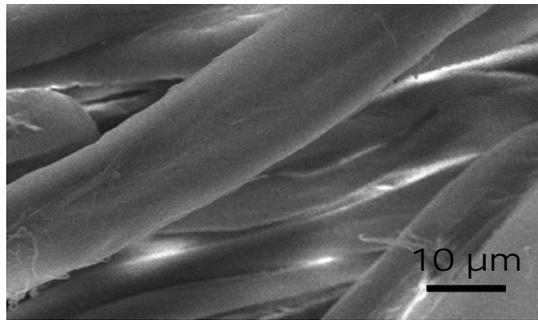
**Knife-over-roll  
technique**



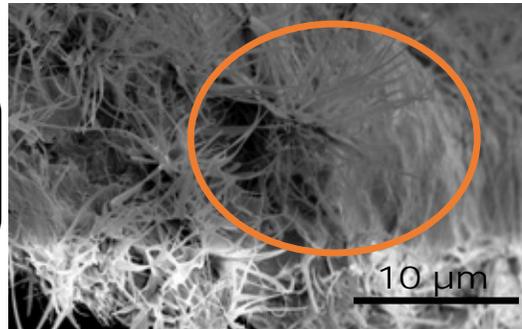
# E-TEXTILES: IMMOLIZZAZIONE DI CNTs SU COTONE COME ELEMENTO CONDUTTIVO PER SENSORI MEDICALI

## CARATTERIZZAZIONE SEM

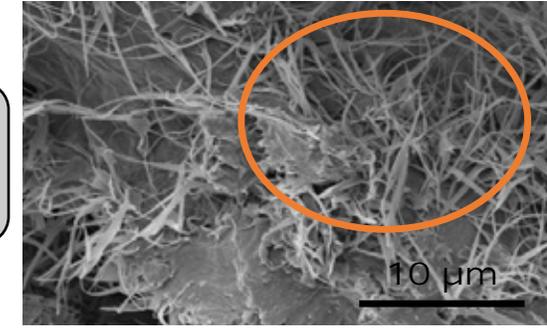
### Cotone non trattato



**A**  
L = 1.5 mm



**B**  
L = 3.0 mm



- Coating rugoso che copre completamente la superficie liscia del cotone;
- Presenza di “microfibre” associabili ai CNTs;
- CNTs distribuiti omogeneamente sulla superficie del cotone;
- Elevata grado di interconnessione tra CNTs.

V. Trovato, E. Teblum, Y. Kostikov, A. Pedrana, V. Re, G. D. Nessim and G. Rosace, “Sol-gel approach to incorporate millimeter-long carbon nanotubes into fabrics for the development of electrical-conductive textiles”, *Materials Chemistry and Physics* 240 (2020) 122218. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.122218.

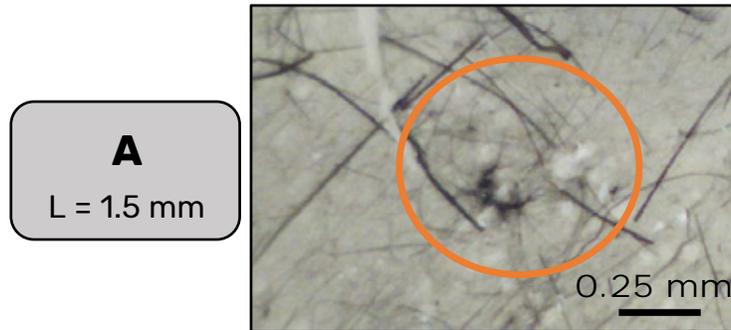


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

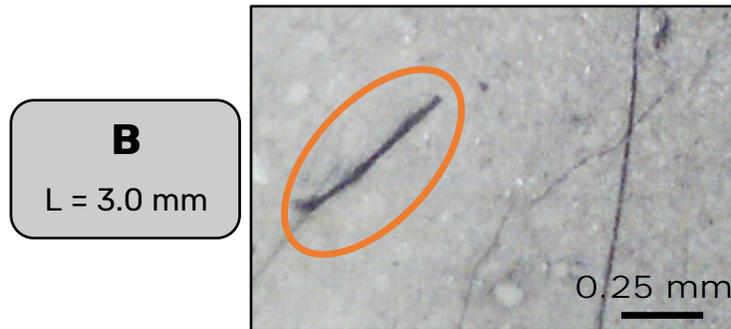
Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# E-TEXTILES: IMMOLIZZAZIONE DI CNTs SU COTONE COME ELEMENTO CONDUTTIVO PER SENSORI MEDICALI

## DISPERSIONE DEI CNTs NEL COATING



- ✓ Distribuzione uniforme di CNTs
- ✓ Alto numero di contatti elettrici



- ✓ Distribuzione non uniforme dei CNTs con formazione di aggregati
- ✓ Alto numero di punti di resistenza elettrica

V. Trovato, E. Teblum, Y. Kostikov, A. Pedrana, V. Re, G. D. Nessim and G. Rosace, "Sol-gel approach to incorporate millimeter-long carbon nanotubes into fabrics for the development of electrical-conductive textiles", *Materials Chemistry and Physics* 240 (2020) 122218. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.122218.

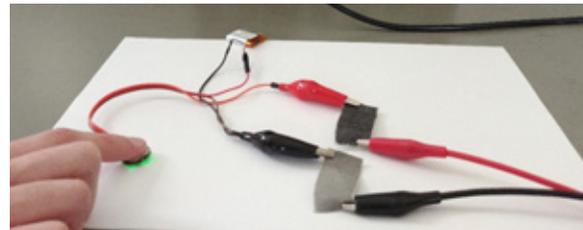


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

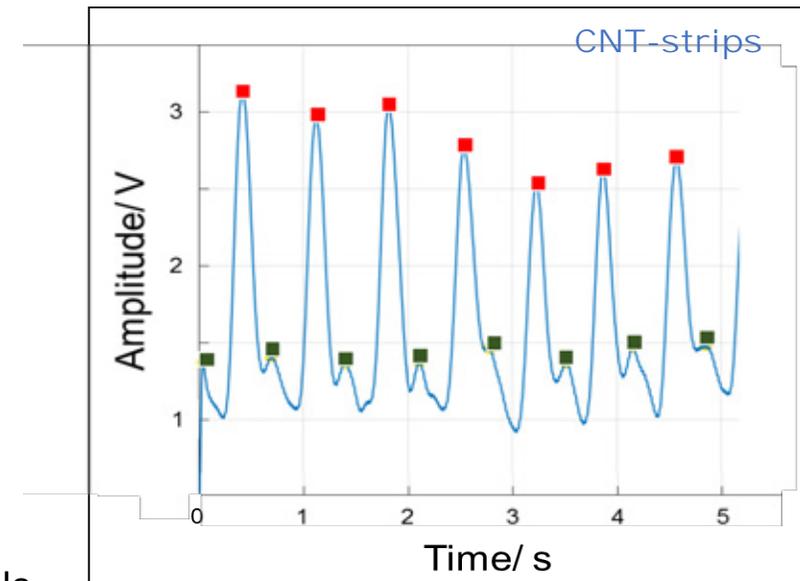
# E-TEXTILES: IMMOLIZZAZIONE DI CNTs SU COTONE COME ELEMENTO CONDUTTIVO PER SENSORI MEDICALI

## Fotopletismografia (PPG)



- ✓ Le strisce conduttive a base di CNTs risultano affidabili nella trasmissione dei segnali biomedici in sistemi PPG per lo sviluppo di *smart textiles* in applicazioni sportive, sanitarie e militari.

## Battito cardiaco in condizioni normali



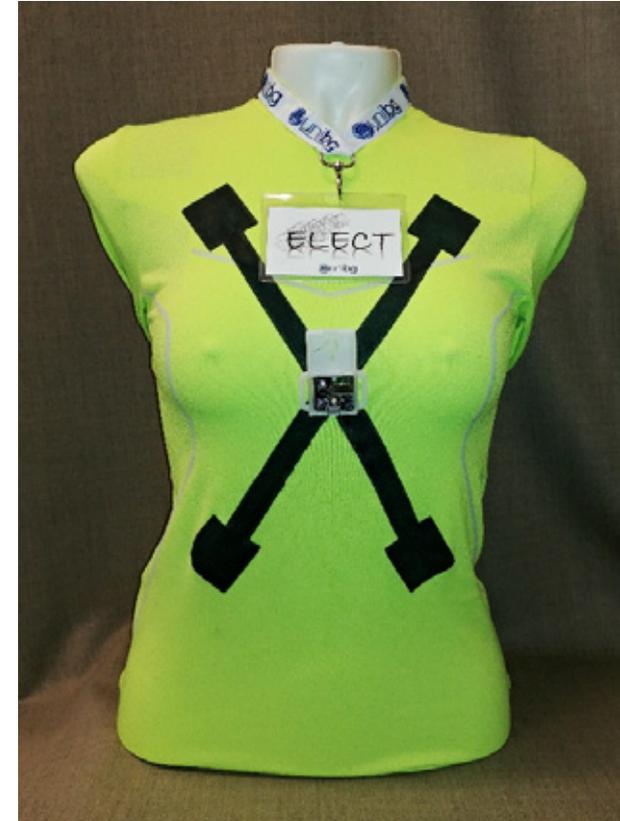
■ Systolic peaks

■ Diastolic peaks

# ELECT

Smart textile ottenuto integrando **piste conduttive** a base di nanotubi di carbonio con un **device elettronico**, utilizzabile per il monitoraggio dei **battiti cardiaci** (ECG-Elettrocardiogramma).

Utilizzo in maniera semplice e confortevole in campi applicativi quali: wellness, sanitario, medicale e fitness per il monitoraggio cardiaco remoto **non invasivo**.



# CONCLUSIONI

- ✓ Tecniche sol-gel e di *grafting* efficienti per la stabile deposizione di *coating stimuli-responsive* (sensibili alla variazione di pH o contenenti molecole ad azione farmacologica) e conduttivi (contenenti CNTs) su substrati tessili per applicazioni sensoristiche;
- ✓ La sinergia tra diversi settori scientifici si traduce nello sviluppo di nuove applicazioni: l'integrazione di *device* elettronici in materiali tessili permette lo sviluppo di sensori flessibili ed indossabili per il monitoraggio in tempo reale ed in maniera non-invasiva di parametri ambientali o legati allo stato di salute dell'individuo;
- ✓ Interessanti sfide future potrebbero interessare l'integrazione totale dell'elettronica nella strutture tessili e incentrate in campi applicativi avanzati, come il monitoraggio e la guarigione delle ferite o la chirurgia.





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO

Dipartimento  
di Ingegneria  
e Scienze Applicate

# GRAZIE PER L'ATTENZIONE

CONTATTI

[valentina.trovato@unibg.it](mailto:valentina.trovato@unibg.it)