

Output di Progetto IO2: eBook

SVILUPPO DI TESSUTI MEDICALI, SENSORIALI E PROTETTIVI NEL CONTESTO DELL'ECONOMIA EUROPEA E DELLA DIGITALIZZAZIONE

A cura di:

Daiva Mikučionienė (KTU)

Ginta Laureckienė (KTU)

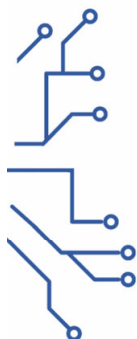
Il supporto della Commissione Europea per la produzione di questo ebook non costituisce un'approvazione dei contenuti che riflettono solo il punto di vista degli autori, e la Commissione non può essere ritenuta responsabile per qualsiasi uso che possa essere fatto delle informazioni in esso contenute.



CC BY 4.0; Partner del Consorzio DIGITEX.

Il riferimento dovrebbe includere; "Capitolo del manuale", autori, "MEDICAL, SENSORIAL AND PROTECTIVE TEXTILES DEVELOPMENT IN THE CONTEST OF THE EUROPEAN ECONOMY AND DIGITALIZATION", Daiva Mikučionienė, Ginta Laureckienė eds., DIGITEX Erasmus+ Project (2020-1-RO01-KA226-HE-095335), 2021-2023, pp.

Tutti i marchi e gli altri diritti su prodotti di terzi citati o presentati in questo documento sono riconosciuti e di proprietà dei rispettivi titolari.

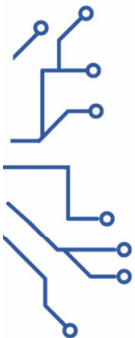




ABSTRACT

Il progetto DigiTEX mira a supportare approcci innovativi e tecnologie di apprendimento digitale per accelerare l'innovazione, l'insegnamento e l'apprendimento nel campo della progettazione, test e produzione di tessuti 3D medici, protettivi, sensoriali e intelligenti di prodotti avanzati innovativi per l'assistenza medica (dispositivi di protezione, dispositivi di monitoraggio indossabili) nel contesto dell'economia digitale.

Questo manuale fornisce una visione globale dei dispositivi indossabili integrati nel tessuto, dal punto di vista del ricercatore e dell'utente finale. L'obiettivo è fornire un giudizio su tutti gli aspetti riguardanti l'integrazione e l'efficienza dei tessuti basati su dispositivi indossabili per l'assistenza sanitaria e la protezione. Il design e l'affidabilità dei sistemi indossabili sono presentati dal punto di vista dell'approvazione e dell'usabilità da parte dell'utente finale. Inoltre, viene presentato il ruolo degli algoritmi di intelligenza artificiale utilizzati per equipollenti digitali per l'assistenza sanitaria e la protezione. L'eco-design delle tecnologie indossabili viene presentato in forte relazione con gli aspetti del comfort e la possibilità di riutilizzare o riciclare i componenti nel rispetto delle necessità dell'economia circolare. I dispositivi indossabili integrati nel tessuto per la creazione di attrezzature di protezione e di assistenza sanitaria potrebbero essere una risorsa eccellente per le ricerche in fase iniziale o di livello più elevato, per designer e accademici interessati allo sviluppo di tecnologie indossabile integrate nei tessuti.

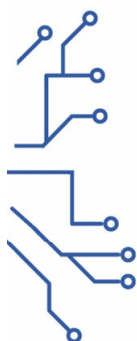


kauno
technologijos
universitetas



CONTENUTI

Capitolo 1. STORIA	5
<i>Md. Reazuddin Repon e Daiva Mikucioniene, Kaunas University of Technology, Lituania</i>	
Capitolo 2. DEFINIZIONI E CLASSIFICAZIONE	10
<i>Md. Reazuddin Repon e Daiva Mikucioniene, Kaunas University of Technology, Lituania</i>	
Capitolo 3. MATERIALI AVANZATI PER L'ASSISTENZA SANITARIA	14
<i>Md. Reazuddin Repon, Rimvydas Milašius e Daiva Mikučioniene, Kaunas University of Technology, Lituania</i>	
Capitolo 4. MATERIALI AVANZATI PER DISPOSITIVI DI PROTEZIONE	19
<i>David Gómez, AEI Tèxtils, Sviluppo aziendale, Terrassa, Barcellona, Spagna</i>	
Capitolo 5. MATERIALI AVANZATI PER LA PROTEZIONE TERMICA	23
<i>Michail Delagrammatikas, Sviluppo del pensiero creativo, Ntrafi Rafinas, Grecia</i>	
Capitolo 6. MATERIALI AVANZATI PER L'ENERGIA	28
<i>Michail Delagrammatikas, Sviluppo del pensiero creativo, Ntrafi Rafinas, Grecia</i>	
Capitolo 7. MATERIALI AVANZATI PER L'ATTENUAZIONE ELETTROMAGNETICA	32
<i>Razvan Radulescu e Raluca Aileni, INCDTP, Bucarest, Romania</i>	
Capitolo 8. MATERIALI AVANZATI PER SENSORI DI DEFORMAZIONE	37
<i>Farima Daniela, Iovan Dragomir Alina e Bodoga Alexandra, Università Tecnica "Gheorghe Asachi", Romania</i>	
Capitolo 9. MATERIALI AVANZATI PER SENSORI DI PRESSIONE	41
<i>Aileni Raluca Maria, Stroe Cristina e Radulescu Razvan, INCDTP, Romania</i>	
Capitolo 10. MATERIALI AVANZATI PER ATTUATORI	46
<i>Aileni Raluca Maria e Cristina Stroe, INCDTP, Romania</i>	
Capitolo 11. DEFINIZIONI, SVILUPPO E APPLICAZIONI DEI MATERIALI SENSORIALI	51
<i>Athanasios Panagiotopoulos, Georgios Priniotakis e Ioannis Chronis, Università dell'Attica occidentale, Grecia</i>	
Capitolo 12. VALUTAZIONE DEL COMFORT SENSORIALE	56
<i>David Gómez, AEI Tèxtils, Sviluppo aziendale, Barcellona, Spagna</i>	
Capitolo 13. MATERIALI FOTONICI PER APPLICAZIONI SENSORIALI	61



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Athanasios Panagiotopoulos, Georgios Priniotakis e Ioannis Chronis, Università dell'Attica occidentale

Capitolo 14. DANNI SUGLI E-TEXTILES 66

Farima Daniela, Iovan Dragomir Alina e Bodoga Alexandra, Università Tecnica "Gheorghe Asachi", Romania

Capitolo 15. LAVABILITÀ DEGLI E-TEXTILES, STANDARD E NORME 71

David Gómez, AEI Tèxtils, Sviluppo aziendale, Barcellona, Spagna

Capitolo 16. ECO-DESIGN PER LO SVILUPPO TESSILE INTELLIGENTE 76

Veronica Guagliumi, Ciape, Italia

Capitolo 17. MATERIALI TESSILI INTELLIGENTI ORGANICI E INORGANICI 82

Veronica Guagliumi, Ciape, Italia

Capitolo 18. COME GESTIRE I RIFIUTI TESSILI INTELLIGENTI 90

Veronica Guagliumi, Ciape, Italia

Capitolo 19. CONSERVAZIONE DELLE RISORSE TESSILI INTELLIGENTI ATTRAVERSO IL CONCETTO DELLE 3R 103

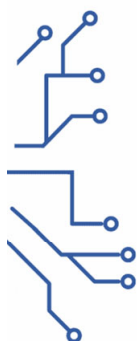
Alexandra Bodoga, Daniela Farima e Alina Dragomir Iovan, Università tecnica "Gheorghe Asachi" di Iasi, Romania

capitolo 20. SVILUPPO SOSTENIBILE DI TESSUTI INTELLIGENTI 108

Athanasios Panagiotopoulos e Georgios Priniotakis, UNIWA, Grecia

Capitolo 21. TOSSICITÀ DEI TESSUTI INTELLIGENTI 114

Olga Papadopoulou, Sviluppo del pensiero creativo, Solonos 8 & Empedokleous, Grecia



kauno technologijos universitetas



AEI



cre thi dev





Capitolo 1. STORIA

Md. Reazuddin Repon e Daiva Mikucioniene, Dipartimento di Ingegneria della Produzione, Facoltà di Ingegneria Meccanica e Design, Kaunas University of Technology, Lituania

Abstract. La ricerca sui tessuti intelligenti rappresenta un nuovo modello per lo sviluppo di soluzioni innovative e creative per l'integrazione dell'elettronica in ambienti atipici e porterà a nuove scoperte scientifiche. La capacità di combinare tecnologie di fabbricazione tessile ed elettronica per funzionalizzare superfici di grandi dimensioni a ritmi rapidi è un obiettivo fondamentale per la ricerca sui tessuti intelligenti. In questo capitolo, esamineremo la storia dello sviluppo del tessile intelligente e introdurremo le principali tendenze in questo campo. Infine, forniremo le nostre aspettative per il settore e una previsione per il futuro.

1.1 Storia dello sviluppo del tessile intelligente

Questa panoramica storica dei tessuti intelligenti fornirà al lettore una migliore comprensione della loro evoluzione. L'innovazione tessile di 27.000 anni fa potrebbe essere costatata come la prima invenzione materiale dell'umanità [1]. Il telaio per maglieria, inventato da William Lee nel 1589 [2], la navetta volante, inventata da John Kay nel 1733, e la giannetta, inventata da James Hargreaves intorno al 1765 [3], furono le principali invenzioni che trasformarono la società e posero le basi per la prima rivoluzione industriale. L'uso di cerchietti illuminati nel balletto La Farandole nel 1883 fu uno dei primi esempi di tessuti intelligenti [4]. I tessuti elettronici sono divisi in tre generazioni a seconda dell'integrazione dell'elettronica nei tessuti: mettere l'elettronica o i circuiti su un indumento (prima generazione), tessuti funzionali come sensori e interruttori (seconda generazione) e filati funzionali (terza generazione) [5]. La Figura 1.1 rappresenta l'evoluzione degli E-textiles in una linea temporale.

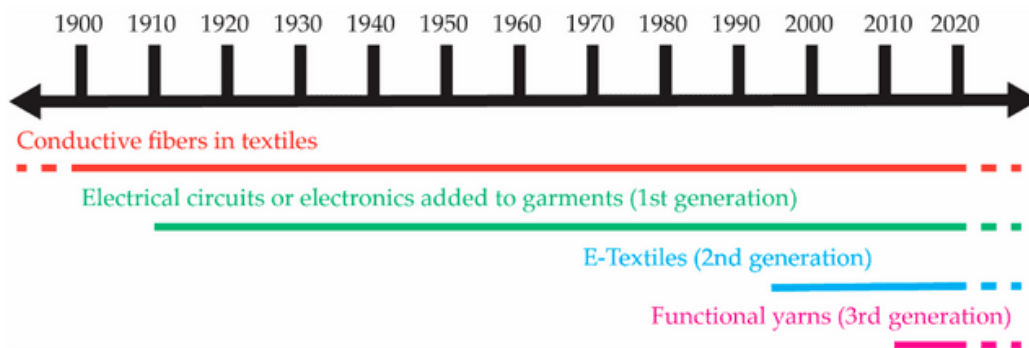
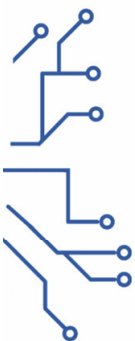


Figura 1.1 Evoluzione dei tessuti elettronici nel tempo [5]

Sebbene le applicazioni mediche dell'elettricità in abiti come corsetti e cinture siano state studiate dal 1850, il mondo scientifico si è interessato solo di recente alle applicazioni elettriche indossabili (in particolare il computer indossabile) [6]. Edward Thorpe e Claude



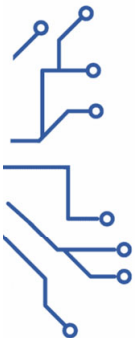


2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Shannon crearono il primo computer indossabile nel 1955 [7]. I computer indossabili sono caratterizzati dalla mancanza di connessione tra le apparecchiature elettroniche di chi li indossa e i loro indumenti. Il computer indossabile si è evoluto in tessuti intelligenti all'inizio del 1990, con funzionalità elettroniche incorporate più strettamente nei tessuti. Il livello di integrazione dei componenti "intelligenti" con la struttura tessile sarà illustrato gradualmente in questa sezione.

Prima fase. Il tessuto intelligente è stato bloccato e dedicato al concetto di computer indossabile creando una piattaforma di elaborazione del tessuto. Un obiettivo significativo era creare tecnologie di interconnessione facilmente riconfigurabili all'interno dei tessuti. Furono impiegate fibre e filati e la dimensione della funzione era limitata. La singola funzionalità come la conduttività elettrica o ottica è stata osservata per i materiali tessili integrati. Per ottenere le prestazioni di sistema desiderate, queste interconnessioni sono state abbinate a normali componenti standard in serie. La Georgia Tech Wearable Motherboard (GTWM) è stata, ad esempio, un primo tessuto intelligente creato dal 1996 in poi (Figura 1.2 (a)) [8].

Seconda fase. In questa fase, il tessuto intelligente era prodotto combinando diverse nuove tecnologie di fabbricazione tessile. Il ricamo è stato utilizzato per creare tessuti ibridi intelligenti. Il tessuto era solitamente parte integrante del dispositivo o circuito tessile in questi tessuti intelligenti. Si trattava di più di un semplice trasportatore di filati e circuiti tessili. Il design tessile intelligente era ancora gestito dal punto di vista del design tradizionale del sistema elettronico, ma il tessuto stesso iniziò a svolgere sempre più funzioni. Anche i tradizionali processi di fabbricazione tessile (come tessitura o ricamo) sono stati combinati con metodi tradizionali di fabbricazione di circuiti elettronici come la progettazione di circuiti stampati [9]. I tastierini trapuntati e ricamati, così come l'abito lucciola s (Figura 1.2 (b)) sviluppato dal MIT Media Lab nel 1997 e nel 1998 sono i primi esempi di questa fase.



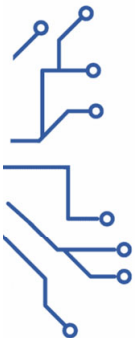


2020-1-RO01-KA226-HE-095335



Figura 1.2 Vari tessuti intelligenti ;(a) GTWM. Riprodotto con autorizzazione [8]. Copyright © 2002, ACM. (b) Abito lucciola. Riprodotto con autorizzazione [10]. Copyright© 2000, International Business Machines Corporation. (c) Sensore di pressione tessile con 16 elementi sensibili ricamati con filo conduttivo. Riprodotto con autorizzazione [11]. Copyright© 2006, procedimento IEEE. (d) Tastiera in tessuto Eleksen per rim blackberry [12]. Rilasciato sotto la licenza Creative Commons BY-NCSA 2.0. (e) Sensore di ominidia Textronic [13]. (f) un microcontrollore Lillypad Arduino integrato in un tessuto [14]. Rilasciato sotto la licenza Creative Commons BY-NC-SA 2.0

Tabella 1. Cronologia e progressi dei tessuti intelligenti [16, 17]



kauno technologijos universitetas



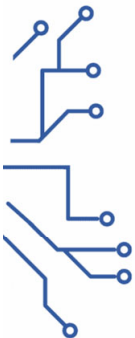
cre thi dev





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

1600	Gold threads were weaved into garments for a shining accent during the Elizabethan era.
1990s	MIT students started researching smart apparel for military use.
1996	The conductive fabric superstore launches for EMF blocking purposes.
1998	Sabine Seymour launches Moondial.
2000-2009	E-textile Lounge launches as a resource for e-textile craft.
2000	i) E-broidery design and fabrication of textile based computing. ii) Plug and wear launches, selling conductive materials for knitting and sewing.
2003	Georgia Tech Motherboard shirt appears in press.
2007	Leah Buechley develops the Lilypad, a microcontroller made specifically for textiles.
2009	Forster Rohner launches the Climate Dress using their innovative embroidered techniques.
2011	MICA Fiber department begins to explore conductive thread and electronics, creating the Midi Puppet Glove.
2012	Drexel launches their Haute Tech Lab exploring smart fabrics and additive manufacturing for textiles.
2013	Machina Launches the Midi Controller Jacket on Kickstarter.
2014	Dupont presents their stretchable, conductive ink at printed electronics and bebop sensors launches wearable tech and textile circuits.
2015	Polotech Shirt developed; Google's Project Jacquard directs tech eyes to e-textiles at Google I/O and ZSK embroidery reveals conductive thread and sequin LEDs.
2016	\$302 million DoD and M.I.T collaboration and the U.S Commerce Department's first ever smart-fabrics gathering.
2017	Harnessing the power of enzymatic oxygen activation (OXYTRAIN); Smart Clothing Gamification to promote Energy-related Behaviours among Adolescents (SmartLife).
2018	Design and integration of graphene fibre based antennas for smart textiles (GFSMART).



Terza fase. All'inizio degli anni 2000 sono comparsi i primi tentativi di sviluppare un'elettronica a livello di fibra più complessa. Fibertronics è un altro nome per questo



kauno
technologijos
universitetas





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

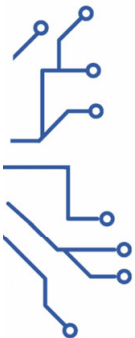
campo di studio. L'obiettivo di questi studi era sviluppare dispositivi e circuiti logici "al di sotto del livello del dispositivo", ovvero ottenere operazioni elettroniche di ordine superiore a livello di fibra e produrre tessuti intelligenti più sofisticati da singole fibre. Questi studi sono in genere più focalizzati sullo sviluppo tecnologico e i sistemi sono costruiti dalla fibra verso l'alto. Strisce flessibili con circuiti TFT (Thin Film Transistor) di base sono state utilizzate per introdurre tessuti intelligenti a livello di fibra nei circuiti inverter tessili [15]. Sebbene esista una tendenza generale in questo settore a integrare gradualmente sempre più sistemi di componenti nelle fibre tessili, la maggior parte degli approcci combina questi concetti. L'approccio più appropriato sarà determinato dall'uso finale di tessuti intelligenti nei prodotti commerciali, e i futuri tessuti intelligenti potrebbero apparire radicalmente diversi da quelli che esistono oggi. La Figura 1.2 mostra vari sistemi tessili intelligenti dalla prima alla terza fase e la tabella 1 indica la cronologia e il progresso dei tessuti intelligenti.

1.2 Conclusioni e prospettive

Nonostante il fatto che la ricerca sui tessuti intelligenti vada avanti da oltre 30 anni, ci sono poche soluzioni commerciali sul mercato. I tessuti intelligenti hanno recentemente compiuto progressi significativi e questo argomento di studio gode di un ampio sostegno sia dal settore della ricerca che da quello commerciale. Per garantire che i tessuti intelligenti migrino con successo dalle strutture di ricerca alle applicazioni industriali, è necessario affrontare una serie di preoccupazioni. La mancanza di standardizzazione, la mancanza di legislazione per i nuovi prodotti, la mancanza di coordinamento e collaborazione tra i partecipanti alla catena del valore e i limiti finanziari tra le imprese per sostenere le spese di sviluppo sono stati tutti citati come ostacoli. La sicurezza, così come le considerazioni etiche e sociali, devono essere affrontate. Per consentire la prossima ondata di prodotti tessili intelligenti, è necessaria un'ulteriore ricerca di base. In un ambiente tessile intelligente, siamo ancora lontani dallo sfruttare appieno le capacità disponibili nel settore tessile. I tessuti 3D, in particolare, offrono possibilità precedentemente non sfruttate.

Riferimenti

1. Adovasio, J.M., Soffer, O, Klíma, B. Upper palaeolithic fibre technology: Interlaced woven finds from Pavlov I, Czech Republic, c. 26,000 years ago. *Antiquity*, 1996, 70(5), 26–34. <https://doi.org/10.1017/S0003598X0008368X>.
2. Lewis, P. W. Lee's stocking frame: technical evolution and economic viability 1589-1750. *Text Hist.*, 1986, 17, 29–47. <https://doi.org/10.1179/004049686793700890>.
3. Thackeray, F.W., Findling, J.E. *Events that Changed Great Britain Since 1689*. Annotated. Westport, CT, USA: Greenwood Publishing Group, 2002.
4. Guler, S.D., Gannon, M., Sicchio, K.A. *Brief History of Wearables*. *Crafting Wearables*, Apress, Berkeley, CA, 2016, p. 3–10. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4842-1808-2_1.
5. Hughes-Riley, T., Dias, T., Cork, C.A. *A historical review of the development of electronic textiles*. *Fibers*, 2018, 6. <https://doi.org/10.3390/fib6020034>.



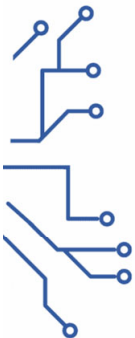
kauno
technologijos
universitetas





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

6. Fishlock, D. Doctor volts. *Electrotherapy*, 2001, 47(2), 3–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1049/ir:20010304>.
7. Thorp, E.O. The invention of the first wearable computer. *2nd Int. Symp. Wearable Comput.*, 1998, 4–8. <https://doi.org/10.1109/ISWC.1998.729523>.
8. Park, S., Mackenzie, K., Jayaraman, S. The wearable motherboard: A framework for personalized mobile information processing (PMIP). *Proc - Des Autom Conf*, 2002, 170(4). <https://doi.org/10.1145/513918.513961>.
9. Eichinger, G.F., Baumann, K., Martin, T., Jones, M. Using a PCB layout tool to create embroidered circuits. *Proc - Int Symp Wearable Comput ISWC*, 2007, 105(6). <https://doi.org/10.1109/ISWC.2007.4373789>.
10. Post ER, Orth M, Gershenfeld N, Russo PR. E-broidery: Design and fabrication of textile-based computing. *IBM Syst J* 2000;39:840–60.
11. Meyer, J., Lukowicz, P., Tröster, G. Textile pressure sensor for muscle activity and motion detection. *Proc - Int Symp Wearable Comput ISWC*, 2006, 69–74. <https://doi.org/10.1109/ISWC.2006.286346>.
12. Eleksen Developing Fabric Keyboard for RIM BlackBerry, 2006. <https://www.geekzone.co.nz/content.asp?contentid=6303>.
13. Jakubas, A., Lada-Tondyra, E., Nowak, M. Textile sensors used in smart clothing to monitor the vital functions of young children. *Prog Appl Electr Eng*, 2017, 5–8. <https://doi.org/10.1109/PAEE.2017.8008989>.
14. Llyypad Embroidery, 2008. <https://www.flickr.com/photos/bekathwia/2426457410/in/photostream/>.
15. Bonderover, E., Wagner, S. A woven inverter circuit for e-textile applications. *IEEE Electron Device Lett*, 2004, 25(5), 295 - 297. <https://doi.org/10.1109/LED.2004.826537>.
16. A History of Smart Fabric, 2016. <https://medium.com/@LoomiaCo/tale-2-a-history-of-e-textiles-and-conductive-fabrics-dbe9c4a0cb03>.
17. H2020 projects about “textiles”, 2020. <https://www.fabiodisconzi.com/open-h2020/per-topic/textiles/list/index.html>.



kauno
technologijos
universitetas





Capitolo 2. DEFINIZIONI E CLASSIFICAZIONE

Md. Reazuddin Repon e Daiva Mikucioniene, Dipartimento di Ingegneria della Produzione, Facoltà di Ingegneria Meccanica e Design, Kaunas University of Technology, Lituania

Abstract. Fibre, filati e tessuti che sono stati progettati e realizzati per contenere tecnologie che danno all'utente una maggiore funzionalità sono noti come tessuti intelligenti. In questo capitolo, esamineremo le definizioni e le classificazioni dei tessuti intelligenti sulla base di diverse prospettive.

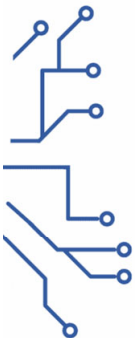
2.1 Definizioni di tessuti intelligenti

I materiali intelligenti o smart sono all'origine del termine "tessuti intelligenti". Nel 1989, il Giappone è stato il primo paese a definire il termine "materiale intelligente". Il filo di seta con memoria di forma è stato il primo materiale tessile ad essere etichettato come "tessuto intelligente" in retrospettiva. I tessuti intelligenti, noti anche come tessuti elettronici (e-textiles) sono materiali intelligenti che rilevano e rispondono a stimoli esterni. I tessuti funzionali più semplici sono talvolta inclusi nella definizione di tessuti intelligenti [1, 2].

La prima definizione formale è “ i tessuti intelligenti sono composti da materiali o strutture che percepiscono e reagiscono agli stimoli ambientali, come quelli di natura meccanica, termica, chimica, magnetica o altro” [3].

Secondo il comitato europeo di normazione (CEN), la definizione di un sistema di tessuto intelligente è: “Assemblaggio di tessuti e non tessili integrati in un prodotto che conserva le sue proprietà tessili e interagisce con il suo ambiente” [4].

Il CEN fornisce ulteriori definizioni sui livelli di integrazione:





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

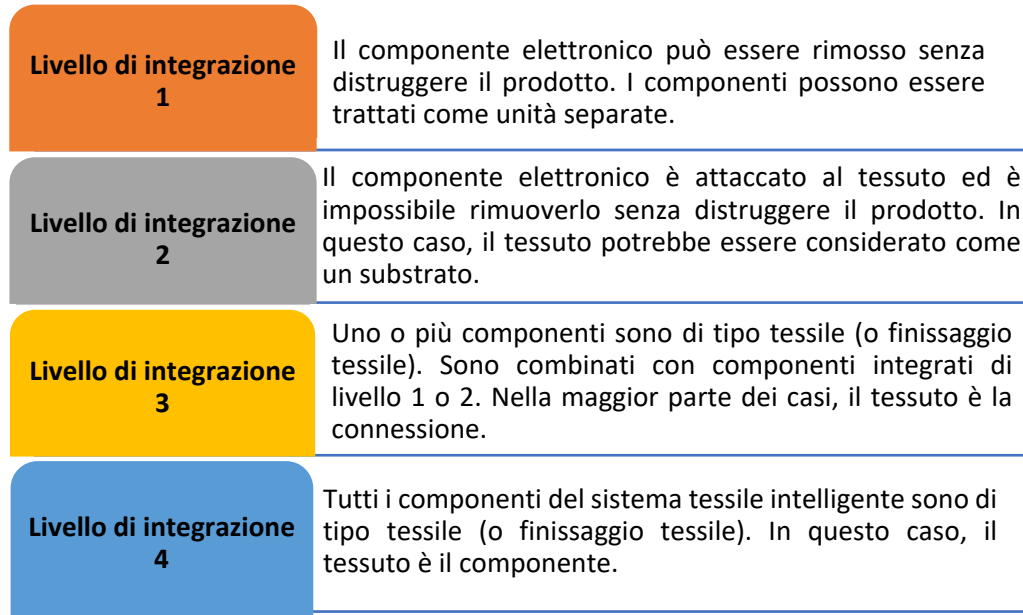


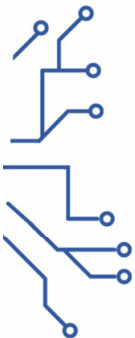
Figura 2.1 Definizione del livello di integrazione 1-4

2.2 Classificazioni dei tessuti intelligenti

Non esistono classificazioni chiaramente stabilite di tessuti intelligenti. In questo capitolo vengono semplicemente forniti e spiegati esempi di classificazioni utilizzate.

Una prima classificazione è possibile dalla definizione di 'tessuti intelligenti' data dal Comitato Europeo di Normazione [4].

Questa classificazione suddivide "Tessuti intelligenti" e "Sistemi tessili intelligenti":



kauno
technologijos
universitetas



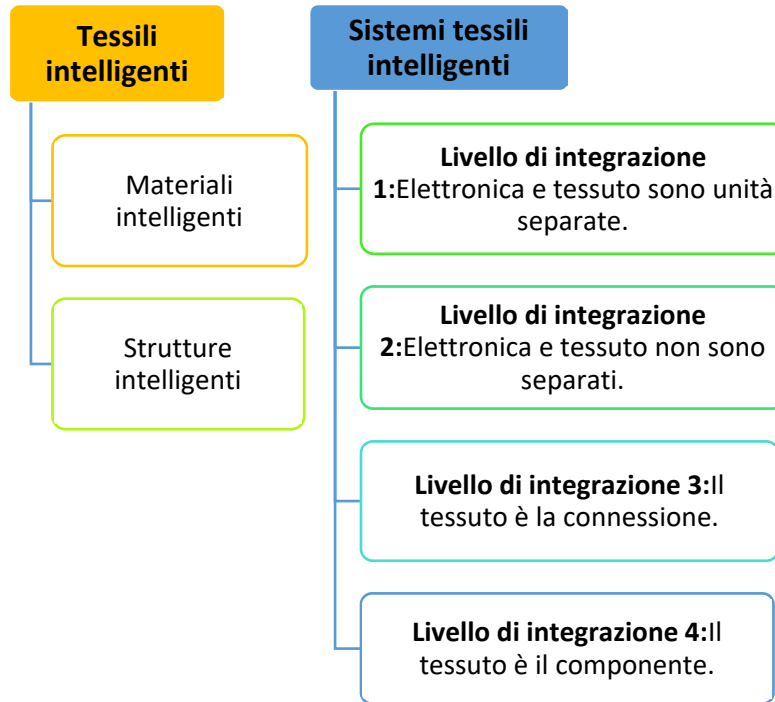
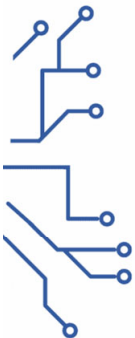


Figura 2.2 Classificazione basata sulla definizione CEN

I tessuti intelligenti possono essere suddivisi in tre sottogruppi [3, 5–8]:

- **Tessuti intelligenti passivi.** I tessuti intelligenti passivi sono solo in grado di percepire l'ambiente o l'utente. Vengono chiamati anche prima generazione di tessuti intelligenti. Questi tessuti intelligenti sono considerati solo come sensori. Un buon esempio è una sonda di temperatura incorporata nel tessuto. Hanno un'ampia gamma di funzionalità, tra cui antimicrobico, anti odore, antistatico, antiproiettile.
- **Tessuti intelligenti attivi.** I tessuti intelligenti attivi sono in grado di percepire gli stimoli dall'ambiente e agire. Vengono chiamati anche seconda generazione di tessuti intelligenti. Contengono una parte sensibile e una funzione di recitazione. Questa risposta è considerata come predeterminata. I tessuti intelligenti attivi sono tessuti a memoria di forma, camaleontici, resistenti all'acqua e permeabili al vapore (idrofili/non porosi), accumulatori di calore, termoregolati, che assorbono il vapore e che sviluppano calore e tute riscaldate elettricamente.
- **Tessuti intelligenti avanzati.** I tessuti intelligenti avanzati sono in grado di percepire, reagire e adattare il loro comportamento alle circostanze date. Questa classificazione è valida per i tessili intelligenti con e senza elettronica anche se la categoria "tessuti intelligenti avanzati" sembra essere riservata agli "e-textiles" (tessuti elettronici). Viene chiamata anche la terza generazione di tessuti intelligenti o tessuti ultra-intelligenti. Un tessuto intelligente avanzato o intelligente consiste essenzialmente in un'unità, che funziona come il cervello, con capacità di cognizione, ragionamento e attivazione. La produzione di tessuti molto intelligenti è ora una realtà dopo



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

un'integrazione riuscita della tecnologia tessile e dell'abbigliamento tradizionale con altri rami della scienza come la scienza dei materiali, la meccanica strutturale, la tecnologia dei sensori e degli attuatori, la tecnologia di elaborazione avanzata, la comunicazione, l'intelligenza artificiale, la biologia ecc.

Gli e-textiles possono anche essere sotto classificati come:

- ❖ **NoReact**: La famiglia NoReact contiene tessuti elettronici con una sola funzione, come rilevare, agire, trasmettere.
- ❖ **React**: La famiglia React è più intelligente e contiene e-textiles tessuti elettronici con almeno due funzioni, come il rilevamento e l'azione.

I tessuti intelligenti possono essere classificati anche in base al tipo di stimolo/risposta. Ma questa classificazione è molto meno universale. La Figura 2.3 presenta elenchi di stimoli e risposte di tessuti intelligenti.

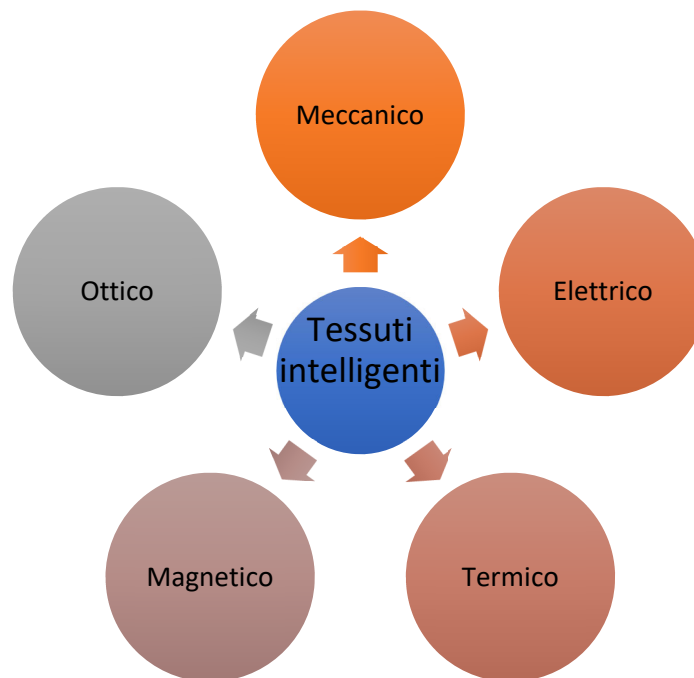
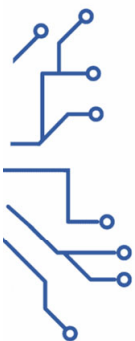


Figura 2.3 Classificazione del tessuto intelligente in base a diversi stimoli/risposte

Ecco un altro esempio di classificazione un po' più limitante. Consiste nel separare le attività di comunicazione ed energia. La 'comunicazione' va interpretata in senso ampio e comprende non solo l'emissione di onde ma anche, ad esempio, la diffusione di un messaggio visivo (attraverso lo schermo) e la vibrazione. La creazione e lo stoccaggio di energia elettrica sono inclusi nella funzione "energia". La figura 2.4 indica la classificazione del tessuto intelligente in base alla comunicazione e al rifornimento energetico.



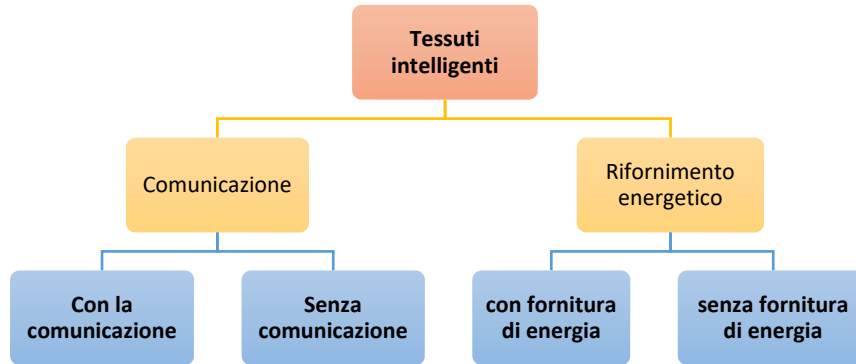


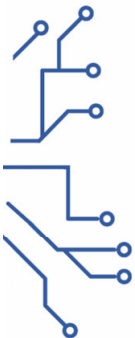
Figura 2.4 Classificazione del tessuto intelligente in base alla comunicazione e al rifornimento energetico

2.3 Conclusione

Negli ultimi tre decenni, lo sviluppo di nuovi tipi di tessuti, tessuti intelligenti e interattivi, è continuato senza sosta. I materiali tessili intelligenti e le loro applicazioni sono destinati a crescere drasticamente poiché la domanda di questi tessuti è aumentata con l'emergere di nuove fibre, nuovi tessuti e tecnologie di lavorazione innovative. La domanda del mercato dei tessuti intelligenti è in aumento con funzioni avanzate e miniaturizzazione dei componenti elettronici. Pertanto, non esistono definizioni e classificazioni chiaramente stabilite di tessuti intelligenti. In questa lezione, le definizioni e le classificazioni utilizzate sono state semplicemente fornite e spiegate.

Riferimenti

1. Van Langenhove, L., Hertleer, C. Smart clothing: A new life. *Int J Cloth Sci Technol*, 2004, 16, 63–72. <https://doi.org/10.1108/09556220410520360>.
2. Tao, X. Handbook of smart textiles. Hung Hom, Hong Kong: Springer Singapore, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-981-4451-45-1>.
3. Tao, X. Smart Fibres, Fabrics and Clothing: Fundamentals and Applications. Woodhead Publishing Limited, 2001.
4. European committee for standardization (CEN), Technical report, PDCEN/TR 16298:2011, 2011.
5. Stoppa, M., Chiolerio, A. Wearable electronics and smart textiles: A critical review. *Sensors (Switzerland)*, 2014, 14, 11957–11992. <https://doi.org/10.3390/s140711957>.
6. Zhang, X.X., Tao, X. Smart textiles: Passive smart. *Text Asia*, 2001, 32, 45–48.
7. Zhang, X.X., Tao, X. Smart textiles: Active smart. *Text Asia*, 2001, 32, 49–52.
8. Zhang, X.X., Tao, X. Smart textiles: Very smart. *Text Asia* 2001, 32, 35–37.





Capitolo 3. MATERIALI AVANZATI PER L'ASSISTENZA SANITARIA

Md. Reazuddin Repon, Rimvydas Milašius e Daiva Mikučionienė, Dipartimento di Ingegneria della Produzione, Facoltà di Ingegneria Meccanica e Design, Kaunas University of Technology, Lituania

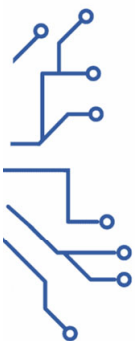
3.1 Introduzione

I tessuti intelligenti e interattivi hanno un alto potenziale nella ricerca biomedica e sono un oggetto di apprendimento relativamente nuovo. I materiali tessili intelligenti sono un esempio in cui l'incorporazione di dispositivi intelligenti può riconoscere, registrare e trasmettere dati di base all'autorità di destinazione. Questi dispositivi possono essere utilizzati per l'osservazione e la registrazione dei dati relativi all'attività cardiaca, alla temperatura corporea, alla frequenza respiratoria, ecc., che successivamente possono essere trasferiti tramite Internet, dispositivi mobili o qualsiasi altro supporto accessibile al centro di emergenza/ di assistenza sanitaria [1]. L'abbigliamento può prevedere il sovraccarico muscolare e le meditazioni che aiutano nella prevenzione delle lesioni da sforzo, monitorano i battiti cardiaci dei bambini e valutano i segnali biochimici dei fluidi generati nelle attività quotidiane o quando sono coinvolti nell'esercizio fisico [2]. La capacità dei tessuti intelligenti di interagire con il corpo fornisce una tecnica per determinare la fisiologia di chi li indossa e adattarsi alle sue esigenze. L'abbigliamento intelligente può fornire una soluzione personalizzata aumentando la consapevolezza dello stato di salute individuale e incoraggiando le persone ad assumere un ruolo più efficace nella loro assistenza sanitaria individuale. L'abbigliamento intelligente può aiutare i medici a fare diagnosi più accurate conservando una registrazione digitale. Al giorno d'oggi, per soddisfare vari scopi sanitari, i dispositivi medici indossabili possono essere avvolti in un tessuto [3]. L'ingegneria medica include l'esperienza di ingegneri, scienziati e medici [4, 5].

3.2 Tessuti antimicrobici

I materiali tessili antimicrobici vengono utilizzati per ridurre al minimo l'accumulo microbiologico pericoloso. Vari agenti antimicrobici, come ioni metallici, chitosano, tannini, triclosano, composti di ammonio quaternario, poliesametilene biguanidi, n-alamine e polipirroli, vengono utilizzati non solo per sconfiggere gli attacchi microbici ma anche per ridurre l'odore e conferire resistenza meccanica agli indumenti. Lo sviluppo di tessuti sensibili agli stimoli con umidità e gestione microbiologica facilita l'applicazione regolamentata e la disponibilità a lungo termine di sostanze chimiche antimicrobiche rivestite su tessuti tessili. Il tessuto basato su sensori è uno dei progressi nei tessuti antimicrobici intelligenti. Diversi prodotti chimici antimicrobici vengono utilizzati per creare tessuti antimicrobici intelligenti.

Il chitosano ha una vasta gamma di applicazioni nel settore tessile. Il chitosano è attivo contro specifici tipi di microrganismi da solo [6]. La proprietà di repulsione verso l'acqua del chitosano trattato con fluorocarburi o polisilossano riduce l'energia superficiale, consente agli inquinanti di aderire e quindi aiuta a proteggere gli individui dall'atmosfera





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

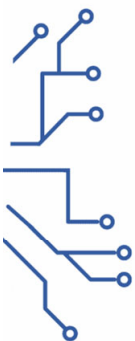
microbiologica. Il tessuto ricoperto di chitosano protegge chi opera nel settore clinico e non. Al pH della pelle, la forma ionizzata del chitosano interagisce con la parete cellulare microbica, provocando un'alterazione della permeabilità cellulare e infine la morte microbica [7].

I tessuti antimicrobici funzionalizzati con metalli si stanno rapidamente espandendo a livello globale. A dosi basse/non tossiche, la combinazione di metalli, tra cui Ag, Cu, Ni, Zn, Co e Cd, ha migliorato l'azione antibatterica nelle cellule dei cheratinociti umani [8]. Il composito non tessuto funzionalizzato CuO₃Si soffiato a fusione ha capacità antibatteriche estremamente elevate contro i batteri *S. aureus* ed *E. coli*. Tuttavia, l'aggiunta di vari polimeri, ad esempio (C₃H₄O₂)_n, (R)-3-idrossiacido grasso, al silicato di rame riduce la capacità di degradazione biologica della miscela alterando i processi di fusione/cristallizzazione [9]. Le nanoparticelle bimetalliche Ag/Cu possono potenziare l'attività antibatterica dei tessuti in cotone/poliuretano [10]. Grazie alle efficaci proprietà antibatteriche e di rilevamento, il grafene sta svolgendo un ruolo attivo nelle applicazioni mediche ed elettroniche [11]. I sensori di grafene possono rilevare virus, sintomi allergici, frequenza respiratoria, quantità di glucosio nel sangue, interazioni tra piccole molecole e proteine, pressione sanguigna e temperatura corporea [12]. È stato creato un immunosensore elettrochimico per l'identificazione del virus dell'influenza utilizzando fiocchi di ossido di grafene ridotto (rGO) termicamente derivati dalla gommalacca. Questi sensori termicamente basati su rGO hanno una grande stabilità e ripetibilità, grazie al fatto che possono essere utilizzati per creare una gamma di sensori immunitari.

I comuni polimeri conduttivi utilizzati per l'attività antibatterica sono polipirrolo (PPy), polianilina (PANI), politiofene (PTh), poliacetilene (IUPAC), ecc., e questi sono tutti polimeri coniugati. I tessuti antimicrobici sostenibili possono essere sviluppati rivestendoli con polimeri π -coniugati. Le cariche positive dei polimeri conduttori si attaccano alle cariche negative della membrana batterica, impedendo l'attività batterica [13]. Il PTh mostra una robusta attività antimicrobica contro i batteri *B. cereus*, *E. aerogenes*, *E. aureus* ed *E. coli*; PANI ha una forte attività antimicrobica contro i patogeni a causa delle unità amminiche, della bassa catena polimerica, dell'interazione elettrostatica; IUPAC mostra attività antimicrobica causata da tre parti coniugate. Le microcelle sono principalmente danneggiate a causa dell'interfaccia elettrostatica [14].

3.3 Tessuti a rilascio di farmaci

Quando i metodi di trattamento tradizionali non sono accettabili, un tessuto caricato con farmaci può essere un'opzione praticabile. I farmaci vengono assorbiti nell'addome superiore o nel sistema intestinale in modi di deglutizione come capsule e compresse. Tuttavia, alcuni farmaci possono perdere la loro efficacia in quanto vengono distrutti nell'ambiente acido dello stomaco o metabolizzati nel fegato. I tessuti intelligenti possono essere rivestiti con specifici vettori di farmaci e consegnati a uno stimolo specifico. Varie procedure di rivestimento possono essere seguite per formulare tessuti che rilasciano farmaci. Questi tessuti possono essere degradabili o non degradabili; può essere utilizzato per fibre a rilascio di farmaco, tessuti e non tessuti. I non tessuti sono comunemente usati



kauno
technologijos
universitetas





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

nelle applicazioni mediche a causa della loro elevata flessibilità, cicli di produzione rapidi e basso costo di produzione. All'interno del non tessuto, i fili contenenti farmaci sono aggrovigliati e si sono rivelati altamente adatti per sistemi di rilascio di farmaci controllati e prolungati. Il comportamento di rilascio del farmaco desiderato può essere modificato in base ai requisiti dell'applicazione. L'elettrofilatura è una tecnologia efficace e versatile per la produzione di fibre a rilascio di farmaci, in quanto consente l'incorporazione di farmaci attrattivi e idrorepellenti, proteine o particelle metalliche ultra fini all'interno della fase di massa delle fibre [14]. I prodotti farmaceutici e gli agenti che hanno effetti biologici possono essere inseriti nella guaina esterna riassorbibile e rilasciati a velocità controllate a seconda dello spessore del polimero, del peso molecolare e della forma.

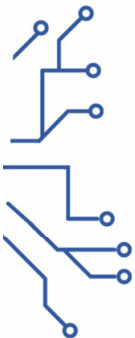
Uno stent in polidiossano a trama intrecciata è stato sviluppato per i farmaci contenenti 5-fluorouracile per il cancro del colon o del retto [15]. I tessuti cellulósici a maglia piatta, rivestiti con chitosano, alginato di sodio e alginato di calcio, sono risultati adatti come bendaggio, adatto alla guarigione delle ferite [16]. Per aumentare le caratteristiche antibatteriche e di cicatrizzazione delle ferite, ai polimeri rivestiti sono stati aggiunti i farmaci cloramfenicolo e tetraciclina cloridrato. Quando il farmaco sulla superficie del tessuto svanisce, il rivestimento polimerico sulla superficie crea una nuova barriera contro i germi, secondo lo studio.

I sistemi tessuti sono utilizzati in alcune applicazioni mediche per assemblare tessuti incapsulati con farmaci o sostanze funzionali. Le medicazioni antimicrobiche possono essere realizzate con garze di cotone intrecciate bioattive; ad esempio, la garza medica è stata adornata con particelle ultrafini di Ag (argento) e medicata con gomma di acacia [17]. Le nanoparticelle di caffeina sono state collocate in cotone tessuto micromodal e tessuti di viscosa per cerotti antiossidanti transdermici. Se indossato vicino alla pelle, il dispositivo può fornire caffeina per alcuni periodi senza che il paziente debba fare altro [18].

3.4 Tessili per il monitoraggio della salute

I dispositivi indossabili possono ora essere integrati nell'abbigliamento per una serie di motivi, incluso il monitoraggio degli indicatori fisiologici. L'elettromiografia (EMG) è una tecnologia che aiuta i medici a misurare l'attività muscolare elettrica per monitorare le condizioni di nervi e muscoli. Tre elettrodi posizionati direttamente sulla pelle sono i più comunemente usati per registrare l'attività muscolare. Elettrodi tessili integrati con pantaloncini sono stati utilizzati per creare questa configurazione a tre elettrodi di tre elettrodi [19]. La possibilità di registrare elettromiogrammi senza contatto è stata studiata nel progetto ConText, finanziato dall'UE. Per eseguire le misurazioni, due elettrodi EMG ricamati sono stati incorporati all'interno di una maglietta e di un giubbotto utilizzando anche un filo conduttivo per inviare segnali dal sensore senza contatto al registratore di dati [20].

L'elettrocardiogramma (ECG) è una valutazione della superficie cutanea dell'attività elettrica del muscolo cardiaco. Gli ioni fluiscono attraverso il muscolo cardiaco ad ogni battito, formando gradienti di carica. Diversi vettori ECG derivano da misurazioni



kauno
technologijos
universitetas





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

differenziali del potenziale elettrico sulla superficie corporea in siti diversi. Diverse tecnologie tessili sono state studiate negli ultimi anni per creare e sviluppare elettrodi tessili che possono essere integrati nei vestiti e fornire un ECG. La tecnologia del ricamo può essere utilizzata per migliorare l'interazione tra gli elettrodi e la pelle, poiché la sezione ricamata viene sollevata dalla superficie del tessuto, consentendo un migliore contatto [21]. I fogli di tessuto possono essere utilizzati per registrare un ECG trattato con polimero piezoelettrico [22].

L'elettroencefalogramma (EEG) è uno strumento per monitorare l'attività elettrica dei muscoli cerebrali. Utilizzando tessuti conduttivi morbidi, un dispositivo basato su tessuto EEG può essere utilizzato per monitorare l'attività del cervello del neonato [23]. Poiché la pelle del neonato è estremamente sensibile al dolore, i ricercatori hanno ideato elettrodi unici per consentire il monitoraggio a lungo termine. I cambiamenti di tensione tra i siti del cuoio capelluto creati dalle strutture cerebrali vengono registrati da elettrodi EEG che sono tipicamente minuscole piastre metalliche collegate al cuoio capelluto. Gli elettrodi sono solitamente fissati su un cappuccio in tessuto elastico, come suggerito dallo standard internazionale [24].

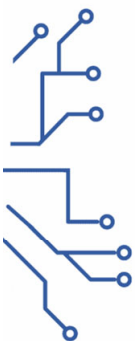
I tessuti intelligenti hanno il potenziale per svolgere un ruolo importante nella prevenzione e nel trattamento del diabete. I livelli di glucosio nel sangue possono essere rilevati utilizzando sensori a reticolo in fibra di Bragg [25]. In un altro studio, è emerso che i calzini intelligenti, utilizzati dai pazienti diabetici per monitorare i principali parametri di salute, hanno confermato che i loro calzini con un sistema per rilevare la temperatura e la pressione del piede avevano un'associazione sostanziale [22].

La frequenza respiratoria media è compresa tra 12 e 25. Si tratta di una cintura che misura il ciclo respiratorio e rileva gli attacchi di apnea/ipopnea [26]. Il volume del torace e la frequenza respiratoria possono essere misurati utilizzando un sensore flessibile attaccato alla maglietta [27]. Inoltre, sono state sviluppate magliette intelligenti con sensori tessili per misurare i tempi e le fasi della respirazione, la frequenza di inalazione e le dimensioni del torace [28]. Diversi altri ricercatori hanno anche costruito dispositivi tessili per rilevare la frequenza respiratoria, rendendo questo tipo di monitoraggio della salute più diffuso nel mondo dei tessuti intelligenti.

Uno dei criteri più essenziali per la valutazione clinica e il monitoraggio della salute è la temperatura corporea. Compositi che comprendono strumenti conduttivi e polimeri che reagiscono alla temperatura possono essere usati per la costruzione di sensori di temperatura.

3.5 Sommario

La maggior parte dei disturbi medici viene trattata in fasi che comportano inibizione, cure acute, riabilitazione e supporto continuo. I tessuti intelligenti hanno una responsabilità in ciascuna di queste fasi della cura e della prevenzione delle malattie. I sensori di tessuto possono essere facilmente inseriti in vestiario e collegati utilizzando fili conduttivi attraverso processi di ricamo, lavorazione a maglia o tessitura. In caso di malattia,



kauno technologijos universitetas

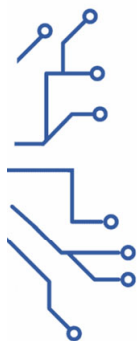


2020-1-RO01-KA226-HE-095335

l'abbigliamento intelligente può aiutare la società medica offrendo un'immagine più completa della salute dei propri pazienti e consentendo il monitoraggio remoto per ridurre al minimo le chiamate cliniche. Un indumento intelligente in riabilitazione può aiutare il paziente ad assumere un ruolo attivo nella sua guarigione e prevenire future ricadute. I tessuti intelligenti potrebbero avere funzioni terapeutiche in futuro, fornendo un modo di trattamento variabile e regolabile. Tuttavia, ci sono diverse difficoltà che devono essere risolte prima che i dispositivi indossabili possano essere ampiamente adottati. Per soddisfare le richieste del vestiario tipico, la tecnologia indossabile dovrebbe essere morbida, flessibile e lavabile. Il lavaggio è un aspetto cruciale nel ciclo di vita di un prodotto.

Riferimenti

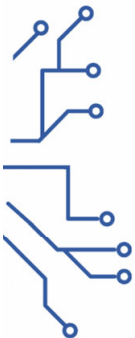
1. Lymberis, A., Olsson, S. Intelligent Biomedical Clothing for Personal Health and Disease Management: State of the Art and Future Vision. *Telemedicine Journal and e-health*, 2003, 9(4), 379-386.
2. Milenković, A., Otto, C., Jovanov, E. Wireless sensor networks for personal health monitoring: Issues and an implementation. *Computer Communications*. 2006, 29(13-14), 2521-2533.
3. Esfahani, M.I.M. Smart textiles in healthcare: a summary of history, types, applications, challenges, and future trends. *Nanosensors and Nanodevices for Smart Multifunctional Textiles*, Matthew Deans, 2021.
4. Fagette, P. Tracking the Historical Development of Biomedical Engineering: The 1960s and 1970s. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 1997, 16(5), 164-173.
5. Jatoi, A.S., et al. Current applications of smart nanotextiles and future trends. *Nanosensors and Nanodevices for Smart Multifunctional Textiles*. Woodhead Publishing Ltd., 2021.
6. Nalankilli, G. Crosslinking of Chitosan with Cotton using Polycarboxylic Acids. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2014, 3(4), 1769–1774.
7. Alonso, D., et al. Cross-linking chitosan into UV-irradiated cellulose fibers for the preparation of antimicrobial-finished textiles. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 77(3), 536-543.
8. Garza-Cervantes, J.A., et al. Synergistic antimicrobial effects of silver/transition-metal combinatorial treatments. *Scientific reports*, 2017, 7(1), 1-16.
9. Sójka-Ledakowicz, J., et al. Antimicrobial functionalization of textile materials with copper silicate. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2016, 24(5), 151-156.
10. Paszkiewicz, M., et al. The antibacterial and antifungal textile properties functionalized by bimetallic nanoparticles of Ag/Cu with different structures. *Journal of Nanomaterials*, 2016, 1-13.
11. Ye, S., et al. Antiviral Activity of Graphene Oxide: How Sharp Edged Structure and Charge Matter. *ACS applied materials & interfaces*, 2015, 7(38), 21571-21579.
12. Seshadri, D.T., Bhat, N.V. Synthesis and properties of cotton fabrics modified with polypyrrole. *Journal of Fiber Science and Technology*, 2005, 61(4), 103-108.
13. Chundawat, N.S., Chauhan, N.P.S. Conducting polymers with antimicrobial activity. *Biocidal Polymers*. De Gruyter, 2019.
14. Pornsopone, V., et al. Electrospun methacrylate-based copolymer/indomethacin fibers and their release characteristics of indomethacin. *Journal of Polymer Research*, 2007, 14(1), 53-59.
15. Li, G., et al. A 5-fluorouracil-loaded polydioxanone weft-knitted stent for the treatment of colorectal cancer. *Biomaterials*, 2013, 34(37), 9451-9461.
16. Hanmugasundaram, O.L., Mahendra, Gowda, R.V. Development and characterization of cotton, organic cotton flat knit fabrics coated with chitosan, sodium alginate, calcium alginate polymers,





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

- and antibiotic drugs for wound healing. *Journal of Industrial Textiles*, 2012, 42(2), 156-175.
17. El-Naggar, M.E., et al. Bioactive Wound Dressing Gauze Loaded with Silver Nanoparticles Mediated by Acacia Gum. *Journal of Cluster Science*, 2020, 31(6), 1349-1362.
 18. Massella, D., et al. Preparation of bio-functional textiles by surface functionalization of cellulose fabrics with caffeine loaded nanoparticles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.
 19. Finni, T., et al. Measurement of EMG activity with textile electrodes embedded into clothing. *Physiological Measurement*, 2007, 28(11), 1405-1419.
 20. Linz, T., Gourmelon, L., Langereis, G. Contactless EMG sensors embroidered onto textile. *IFMBE Proceedings*, 2007.
 21. Marozas, V., et al. A comparison of conductive textile-based and silver/silver chloride gel electrodes in exercise electrocardiogram recordings. *Journal of electrocardiology*, 2011, 44(2), 189-194.
 22. Najafi, B., et al. An Optical-Fiber-Based Smart Textile (Smart Socks) to Manage Biomechanical Risk Factors Associated with Diabetic Foot Amputation. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 2017, 11(4), 668-677.
 23. Adnane, M., et al. Detecting specific health-related events using an integrated sensor system for vital sign monitoring. *Sensors*, 2009, 9(9), 6897-6912.
 24. Löfhede, J., Seoane, F., Thordstein M. Textile electrodes for EEG recording - a pilot study. *Sensors*, 2012, 12(12), 16907-16919.
 25. Kurasawa, S., et al. Development of smart textiles for self-monitoring blood glucose by using optical fiber sensor. *Journal of Fiber Science and Technology*, 2020, 76(3), 104-112.
 26. Wang, H., et al. The regulatory role of the SIRT1 / FoxO1 pathway in the prevention of insulin resistance in skeletal muscle by aerobic exercise in mice. *Research Square*, 2022, 1-17.
 27. Mokhlespour, Esfahani, M.I., et al. A wearable respiratory plethysmography using flexible sensor. *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*, 2013, 11(4), 364-380.
 28. Massaroni, C., et al. Smart textile for respiratory monitoring and thoraco-abdominal motion pattern evaluation. *Journal of Biophotonics*, 2018, 11(5), 1-12.



kauno
technologijos
universitetas



Capitolo 4. MATERIALI AVANZATI PER DISPOSITIVI DI PROTEZIONE

David Gómez, AEI Tèxtils, Sviluppo aziendale, Terrassa, Barcellona, Spagna

4.1 Introduzione

I luoghi di lavoro non sono sempre sicuri. In realtà, alcuni degli impieghi esistenti al giorno d'oggi prevedono diversi compiti rischiosi che i dipendenti devono affrontare. Ecco perché la sicurezza è diventata una priorità nell'industria in modo trasversale, in particolare in alcuni settori come le miniere di superficie e sotterranee, i cantieri, le centrali elettriche, le fabbriche, ecc. [1].

Per questo, è importante proteggere i lavoratori da possibili pericoli che possono finire per generare diversi tipi di lesioni come quelle termiche, biologiche, elettriche, meccaniche o chimiche, che possono agire contemporaneamente [2] in diverse parti del corpo umano corpo (occhio e viso, testa, piede e gamba, mano e braccio, corpo e udito [3]). I dispositivi di protezione individuale (DPI) aiutano a prevenire tali lesioni proteggendo chi li indossa.

In sintesi, i DPI possono e devono essere migliorati, affinché i suoi obiettivi siano raggiunti in modo più efficace ed efficiente mediante lo sviluppo e l'integrazione delle tecnologie dei sensori nell'abbigliamento dei lavoratori. Questo aggiornamento fornirebbe un monitoraggio della salute dei lavoratori, dell'esposizione a elementi nocivi, della loro vicinanza a zone pericolose, tra gli altri [4].

I DPI Smart possono essere organizzati in quattro diverse categorie a seconda della tecnologia ad essi applicata. Da un lato, la presenza o meno dell'elettronica e, dall'altro, in base alle loro caratteristiche di raccolta dati (vedi Figura 4.1).

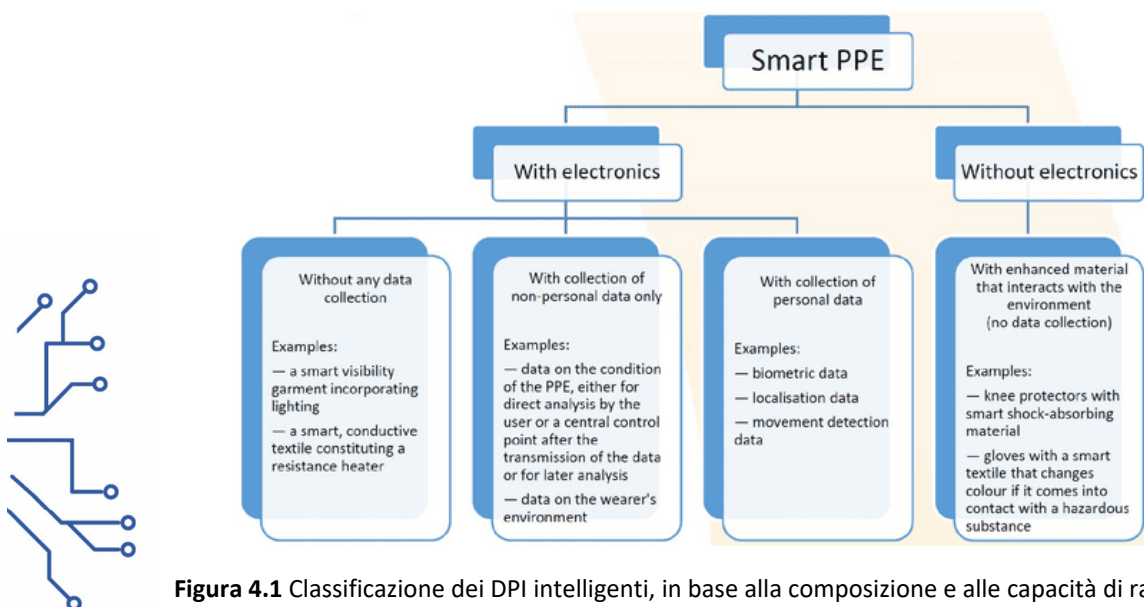


Figura 4.1 Classificazione dei DPI intelligenti, in base alla composizione e alle capacità di raccolta dati



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Alcuni esempi di DPI con elettronica integrata o materiali intelligenti [5] sono i seguenti: Innanzitutto, protezioni intelligenti per le ginocchia. Possono essere morbide e flessibili, e facilitare i normali movimenti come la camminata e, allo stesso tempo, garantire le proprietà del materiale intelligente di assorbimento degli urti nel momento di un eventuale urto.

Successivamente, i tessuti intelligenti e conduttivi che costituiscono un riscaldatore a resistenza. I tessuti intelligenti possono integrare la conduttività elettrica. Con la fornitura di un'alimentazione elettrica costante e l'integrazione di sensori, questi prodotti tessili intelligenti possono generare e mantenere una temperatura costante attorno al riscaldatore.

Inoltre, gli indumenti con illuminazione intelligente possono emettere luce attraverso l'integrazione di fibre ottiche nel materiale dell'indumento. Le fibre ottiche integrate nei tessuti e collegate a una sorgente luminosa controllabile possono essere utilizzate come parte di indumenti intelligenti. Possono persino determinare il tipo di illuminazione mediante l'integrazione di un sensore.

Inoltre, i guanti intelligenti in grado di identificare le sostanze pericolose sono anche un prodotto innovativo per i DPI progettati grazie ai progressi dei tessuti intelligenti. Si trasformano in un colore diverso a seconda del contatto con potenziali sostanze pericolose.

E infine, alcuni DPI intelligenti possono anche raccogliere dati sul proprio utilizzo. Se dotato di sensori, può raccogliere diversi tipi di dati sulla durata o quantità di utilizzo... e comunicarli a un database centrale.

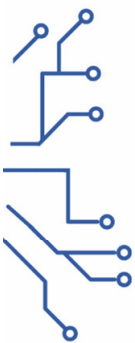
Come detto, questi sono solo alcuni esempi dell'ampia gamma di possibilità che i tessuti intelligenti possono offrire.

4.2 Applicazioni DPI

Le applicazioni dei tessuti intelligenti nei DPI sono molteplici e diversificate. E ogni volta che le indagini in questo campo aumentano, le loro potenzialità si espandono [6].

Al giorno d'oggi, possiamo trovare tre categorie, tre percorsi di sviluppo del prodotto. Riguardano, fondamentalmente, le esigenze pratiche degli utenti, i sistemi globali e le reazioni agli stimoli esterni e alle condizioni ambientali.

Ad esempio, alcuni modi specifici trovati per approfondire lo sviluppo di DPI attraverso tessuti intelligenti [7] e i loro diversi campi di indagine (condizioni fisiologiche, sensori di temperatura e umidità, trasmettitori di potenza e dati e indicatori di fine vita, materiali intelligenti...) potrebbero essere i seguenti: membrane con permeabilità reattiva, anche al vapore acqueo, possono essere prodotte utilizzando polimeri a memoria di forma, gel polimerici, polimeri superassorbenti, spazzole polimeriche innestate e liquidi ionici polimerici. Queste membrane barriera possono anche essere rese auto-decontaminanti con N-alamine, gruppi di ammonio quaternario, enzimi bioingegnerizzati, metalli e ossidi



kauno
technologijos
universitetas





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

metallici, nanomateriali e composti attivati dalla luce. Il comfort termico può anche essere migliorato con materiali a cambiamento di fase che possono fornire ulteriore calore o freschezza in caso di necessità. Anche, fluidi addensanti che si solidificano e diventano ammortizzatori in caso di impatto ad alta velocità.

4.3 Ulteriori orizzonti sui DPI

Non tutti i potenziali rischi sono visibili o percepibili dai sensi umani. La protezione da gas, polvere, rumore e/o fumo è essenziale. La connettività è un campo chiave che offre un'ampia gamma di nuove utilità per i DPI ottenute attraverso materiali specifici come i tessuti intelligenti. Una volta interconnessi con l'Internet of Things, gli smartphone e qualsiasi dispositivo intelligente, possono fornire applicazioni come le seguenti per aumentare la protezione della persona che indossa il DPI in diverse condizioni [1]. Per esempio:

I DPI connessi possono rilevare rischi invisibili come le alte temperature. Un sensore di temperatura può seguire l'ambiente esterno e avvisare l'utente in tempo sugli ambienti pericolosi e avvisare i supervisori se i lavoratori si trovano in condizioni non sicure.

Inoltre, la geolocalizzazione, integrata in un DPI connesso, può monitorare e determinare in tempo reale la posizione dell'utente e fornire informazioni su quale sia l'itinerario più sicuro, dove proseguire o se sia più sicuro tornare indietro la zona. Quindi, la possibilità di generare e trasferire analisi dei dati in tempo reale consentirebbe di avvisare immediatamente l'utente quando entra o è in contatto con un ambiente pericoloso o qualche altro aspetto esterno che ha la possibilità di danneggiare l'integrità dell'utente.

Anche in relazione ai sistemi di comunicazione, i DPI possono facilitare canali di comunicazione integrati rapidi ed efficaci in condizioni di forte o scarsa visibilità.

Infine, ma non per questo meno importante, il monitoraggio delle costanti di salute degli utenti come il battito cardiaco diventa fondamentale per garantire la sicurezza di chi indossa il DPI.

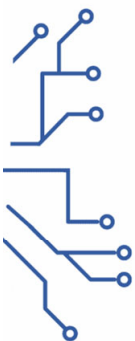
4.4 Sommario

La proiezione dei materiali avanzati e dei tessuti intelligenti come dinamizzatori per DPI è chiara, lunga e degna di essere mantenuta. La maggior parte delle applicazioni sono attualmente in fase di test pilota, devono essere migliorate o sono solo in fase di prototipazione. Ma alcuni di quelli già applicati stanno solo mostrando prestazioni impressionanti e un alto potenziale.

Tuttavia, alcuni rischi e la legislazione devono essere superati e dovrebbero essere fissati standard per questi nuovi prodotti.

Riferimenti

1. Adjiski, V., Despodov, Z., Mirakovski, D., Serafimovski, D., System architecture to bring smart personal protective equipment wearables and sensors to transform safety at work in the



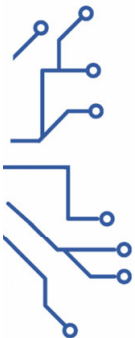
kauno
technologijos
universitetas





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

- underground mining industry, In: The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin, 2019, 34, 1, 37-44.
2. Dolez, P.I., Vu-Khanh, T. Recent Developments and Needs in Materials Used for Personal Protective Equipment and Their Testing. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2009, 15(4), 347-362, DOI: 10.1080/10803548.2009.11076815
 3. Berry, C., McNeely, A., Beauregard, K., Haritos, S. A guide to personal protective equipment. Raleigh, NC, USA: N.C. Department of Labor, 2008. Retrieved December 16, 2008, from: <http://www.nclabor.com/osha/etta/indguide/ig25.pdf>
 4. Cao, H., Smart technology for personal protective equipment and clothing, Chapter of Smart textiles for protection, Woodhead Publishing Limited, 2013, 229-241
 5. CEN/TR 16298:2011 'Smart textiles – Definitions, categorisation, applications and standardization needs', 2011.
 6. Dolez, P.I., Mlynarek, J., Smart materials for personal protective equipment, Chapter of Smart Textiles and their Applications, Editor Chapman R., Woodhead Publishing, 2016 Gómez, D. *R&D Alfredo Grassi SPA*, 2022. <https://www.grassi.it/en/research-and-development>



kauno
technologijos
universitetas





Capitolo 5. MATERIALI AVANZATI PER LA PROTEZIONE TERMICA

Michail Delagrammatikas, Sviluppo del pensiero creativo, Ntrafi Rafinas, Grecia

5.1 Introduzione

I tessuti per la protezione termica possono essere utilizzati contro l'esposizione a temperature estremamente alte o basse, per mitigare i rischi per la salute dovuti all'esposizione a lungo termine a temperature al di fuori dei limiti di temperatura termofisiologici umani o per evitare disagi, solitamente durante un'intensa attività fisica. I principali meccanismi per i tessuti di protezione termica sono l'isolamento termico e la regolazione del trasferimento di calore. Materiali avanzati e intelligenti possono incorporare sensori di temperatura così come strutture e proprietà 3D che modificano i tessuti rispondendo a condizioni diverse. I dispositivi indossabili per la protezione da temperature estreme si basano principalmente su proprietà isolanti, che mirano a mantenere il calore corporeo, prodotto dall'attività metabolica, dalla fuoriuscita nell'ambiente o evitare che il calore ambientale raggiunga il corpo.

Il corpo umano genera calore attraverso l'attività metabolica e ha bisogno di mantenere una temperatura quasi costante di $36,6 \pm 5$ °C. A seconda delle condizioni ambientali, l'uomo ha bisogno di trattenere o scaricare il calore corporeo. La zona di comfort per gli esseri umani si trova a temperature comprese tra 22 °C e 27 °C e umidità relativa (RH) tra il 40% e il 60% [1]. L'evoluzione ha privato il corpo umano della pelliccia, che funge da regolatore del trasferimento di calore per la maggior parte dei mammiferi. Questa funzione è più o meno sostituita dall'uso di indumenti per intrappolare il calore corporeo e sudare per scaricare il calore in eccesso.

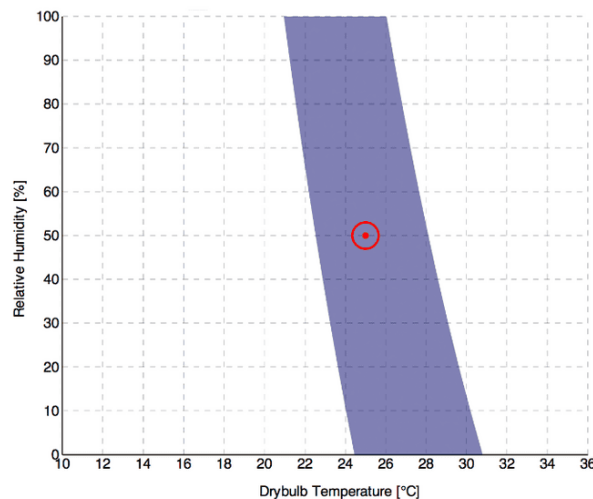
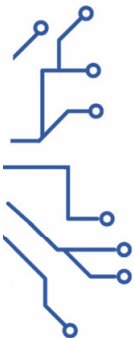


Figura 5.1 Zona di comfort del corpo umano. Centro per l'ambiente, Università della California Berkeley, CC BY-SA 3.0, tramite Wikimedia Commons



Il trasferimento di calore può avvenire principalmente attraverso tre meccanismi: conduzione termica, convezione termica e irraggiamento termico. La conduzione termica avviene tra corpi solidi o fluidi intrappolati che rimangono fermi. Il tasso di calore che può essere trasferito per conduzione dipende fortemente dalla natura dei materiali. I metalli hanno una conduttività termica molto elevata, mentre la maggior parte dei materiali utilizzati per i tessuti ha una conduttività termica bassa. L'aria intrappolata presenta una conduttività termica molto bassa; quindi la maggior parte dei materiali isolanti utilizza l'aria intrappolata nelle bolle o tra le fibre come meccanismo principale per impedire il trasferimento di calore. L'acqua presenta un'elevata conducibilità termica; quindi, un panno bagnato non proteggerà dalle basse temperature. La convezione termica si verifica quando il calore viene trasferito dal flusso di un fluido. Il trasferimento di calore per convezione può essere molto efficace, come si può sapere per esperienza quando si è investiti da una brezza fredda o quando si entra in un edificio che utilizza il riscaldamento centralizzato. La radiazione termica si verifica quando la differenza di temperatura tra il corpo radiante e l'ambiente è elevata. Il calore del sole raggiunge la terra per irraggiamento, lo stesso è il meccanismo del calore che sentiamo di fronte a un fuoco o a un metallo rovente. Un modo diverso per il trasferimento di calore è la transizione di fase e il ruolo chiave nella regolazione della temperatura del corpo umano è svolto dall'evaporazione dell'acqua. Quando l'acqua, acqua dolce o sudore, evapora, le molecole passano dallo stato liquido a quello gassoso e questo abbassa la temperatura dell'acqua residua che è ancora a contatto con il corpo, fungendo così da meccanismo di raffreddamento.

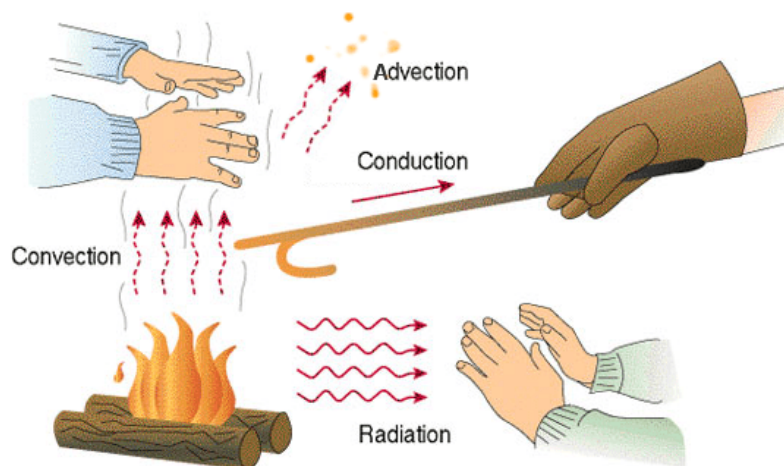


Figura 5.2 Meccanismi di trasferimento del calore. Kmecfiunit, cmglee, CC BY-SA 4.0, tramite Wikimedia Commons

L'equilibrio termico del corpo umano dipende dall'equilibrio tra il calore che viene generato dal metabolismo e il calore che viene scambiato con l'ambiente. Il calore nella maggior parte dei casi non viene trasferito da un singolo meccanismo, ma da una combinazione di



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

meccanismi che funzionano in serie o in parallelo. La progettazione di tessuti e dispositivi indossabili per la protezione termica richiede la comprensione sia dei meccanismi di trasferimento del calore che del meccanismo di regolazione del calore del corpo umano, al fine di ottenere le proprietà desiderate, in relazione alle condizioni ambientali per le quali verranno utilizzati i dispositivi indossabili.

Oltre a regolare i flussi di calore, i tessuti avanzati possono anche incorporare componenti di generazione o raffreddamento del calore che interagiscono attivamente con l'equilibrio di trasferimento del calore al fine di raggiungere la temperatura desiderata per il corpo umano. Queste tecnologie saranno discusse nel prossimo capitolo.

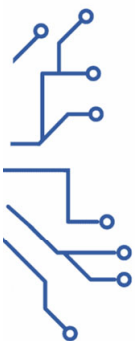
Un'altra importante categoria di materiale tessile termo-protettivo sono i materiali non indossabili, come pannelli isolanti e tappezzeria.

5.2 Tessuti avanzati per l'isolamento termico e la regolazione del calore corporeo

I tessuti per l'isolamento termico mirano a ridurre al minimo il trasferimento di calore dal corpo umano a un ambiente freddo o a diminuire il trasferimento di calore da un ambiente caldo verso il corpo, consentendo al tempo stesso il trasferimento di calore dal corpo all'ambiente.

Nel primo caso i principali meccanismi di protezione dal freddo consistono nell'utilizzo di materiali a bassa conducibilità termica (di solito facendo uso di aria intrappolata tra le fibre), impedendo all'acqua di bagnare il tessuto e impedendo ai flussi d'aria di raggiungere gli strati interni, dove potrebbero indurre l'evaporazione dell'acqua da vicino al corpo o sostituire caldo intrappolato. In quest'ultimo caso, per la protezione dal calore, si desiderano anche proprietà isolanti, ma -soprattutto in caso di termoregolazione corporea- si ricerca una rapida evaporazione dell'acqua da vicino al corpo.

Questi risultati possono essere raggiunti utilizzando materiali e tecniche di fabbricazione, sia nella produzione di filati che in quella tessile, per creare nuovi prodotti. La bibliografia recente è ricca di pubblicazioni scientifiche che propongono soluzioni utilizzando diversi approcci. N. Khadse et al. [2] sfruttano la differenza del coefficiente di dilatazione termica tra due materiali, Hytrel® e Crastin®, per produrre una fibra bicomponente che si curva a basse temperature intrappolando l'aria. La fibra è stata prodotta mediante co-estrusione/filatura a fusione ed è stata originariamente valutata per la produzione di imbottiture non tessute. Y.Chen et al. [3] hanno sviluppato una membrana indossabile, basata su polimero PET riciclato, per regolare il trasferimento del sudore e migliorare l'isolamento termico. A tal fine hanno utilizzato la filtrazione sottovuoto e la polverizzazione catodica del magnetron per creare una membrana multistrato che incorpora nanotubi di carbonio/nanofili di ossido di manganese (nanofili CNTs-MnO₂) per la regolazione del trasferimento del sudore e nanoparticelle d'argento (Ag) per maggiori proprietà antibatteriche. Y.Xu et al. [4], ispirato al pelo e alle piume degli animali polari, ha utilizzato la filatura a umido in una miscela di etanolo/acqua/ammoniaca per sviluppare fibre biomimetiche con nano-porosi interni nascosti (HNPF) utilizzando acido algamico/chitosano quaternario come precursori. In questo modo sono riusciti a produrre



kauno
technologijos
universitetas



AEI



cre thi dev





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

una fibra con un coefficiente di conduzione termica molto basso e proprietà biomimetiche di raccolta dell'energia solare per tessuti per la resistenza al freddo. L.Wang et al. [5], ispirato allo stesso pelo animale, ha prodotto fibre cave porose composte da poliuretano termoplastico (TPU)/poliacrilonitrile (PAN) mediante filatura a umido in acqua.

5.3 Tessili avanzati per la protezione antincendio

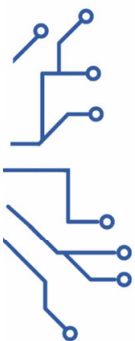
La protezione antincendio è un caso a sé stante nei dispositivi di protezione termica per le caratteristiche specifiche del fuoco che può erogare una quantità molto elevata di energia termica, produrre temperature molto elevate e indurre rapide reazioni ossidanti, quando un oggetto viene "incendiato". Pertanto, i tessuti di protezione antincendio dovrebbero mantenere determinate proprietà come eccellente isolamento termico, resilienza agli shock termici e rapido trasferimento di calore, stabilità alle alte temperature, ovvero il materiale non dovrebbe sciogliersi, perdere funzionalità o prendere fuoco quando vengono a contatto con fiamme, oggetti in fiamme (ad es. liquidi infiammabili) o quando la temperatura aumenta a causa di flussi di fluidi caldi o per irraggiamento termico. Inoltre, i tessuti di protezione antincendio non dovrebbero sostenere il fuoco e, nel caso in cui dovessero prendere fuoco, il fuoco dovrebbe essere estinto da solo.

Tradizionalmente i tessuti di protezione antincendio erano fabbricati con fibre di amianto intrecciate e quando fu compresa la natura cancerogena dell'amianto vennero sostituiti da altre fibre inorganiche, come la fibra di vetro e la lana di roccia, anch'esse tossiche.

J.Sullivan et al. [5] utilizza l'anisotropia della conduzione termica dei nanotubi di carbonio per modellare un tessuto che sarebbe resistente alla fiamma e altamente isolante nei confronti del calore proveniente da una direzione perpendicolare, ma allo stesso tempo corretto allineamento dei nanotubi di carbonio, dirigendo il calore proveniente dal fuoco lontano dal corpo e verso l'ambiente, riducendo la temperatura del tessuto protettivo.

G.M. González et al. [6] ha creato fogli di fibre para-aramide non tessute semi strutturate, che presentano proprietà di protezione sia meccanica che termica, grazie all'uso di fibre para-aramide ultrasottili continue che raggiungono una bassa compattezza simile a un aerogel. Questo nuovo materiale può essere utilizzato per dispositivi di protezione contro ambienti esplosivi. La necessità di combinare proprietà di protezione termica e schermatura elettromagnetica in un unico tessuto, piombo M. Li et al. [7] per produrre nanofibre aramidiche composite conduttive per creare tessuti aerogel ultraleggeri, flessibili ma robusti. Ciò è stato ottenuto aggiungendo nanotubi di carbonio e miscelando mediante agitazione meccanica e ultrasuoni della miscela precursore per la filatura a umido e la liofilizzazione. È stato così prodotto un filato microporoso composto da aerogel di nanofibre.

I tessuti sensoriali mostrano spesso scarsa elasticità, limitando le loro potenziali applicazioni. S.Zou et al. [8] ha creato un filato gerarchico estensibile resistente alla fiamma per applicazioni di monitoraggio della temperatura e sensori di deformazione. Il filato è composto da tre parti: un'anima flessibile in spandex ricoperta da due strati di fibre aramidiche. Lo strato interno è uno strato conduttivo di fibre complesse di nanotubi di aramide/carbonio e lo strato esterno è semplice aramide. Entrambi gli strati di fibre aramidiche vengono prodotti avvolgendo la fibra attorno al nucleo mediante rulli di attrito. La direzione perpendicolare degli strati di fibre aramidiche, rispetto all'anima in spandex,



kauco
technologijos
universitetas



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

consente al filato di essere elastico, mentre l'aria intrappolata tra le fibre diminuisce il trasferimento di calore e fornisce isolamento.

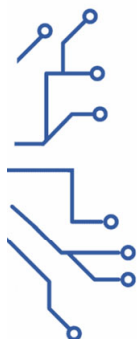
Un approccio diverso è stato seguito da L. Wang et al. [9] che ha creato un sistema di tessuto intelligente tessendo un filamento a memoria di forma in tessuto para-aramidico. Il filamento a memoria di forma (lega di nichel/titanio) può essere "addestrato" per passare da una forma lineare a una sinusoidale (ondulata) a una data temperatura. Il tessuto a memoria di forma può essere introdotto in un sistema di tessuto intelligente multistrato 2D. Quando viene raggiunta la temperatura di trasformazione della forma, il filamento si piegherà e si curverà, creando una struttura 3D con ampie aree d'aria e fungendo efficacemente da barriera per il trasferimento del calore.

5.4 Sommario

La tecnologia all'avanguardia viene utilizzata per progettare nuove fibre, filati e tessuti che possono essere utilizzati per la protezione termica e il comfort. L'eco-design, l'uso di materiali riciclati e riciclabili, così come la sostituzione di materiali tossici e cancerogeni è un'altra questione chiave nella ricerca e produzione di prodotti innovativi. Gli esempi tratti dalla bibliografia recente presentati in questo capitolo forniscono una panoramica delle tendenze nell'uso dei materiali, delle tecnologie di produzione e del design. Sia il design 2D che 3D possono essere utilizzati per creare dispositivi indossabili avanzati su misura per ambienti specifici che forniscono protezione e comfort.

Riferimenti

1. ASHRAE Standard 55-2004. "Thermal environmental conditions for human occupancy". American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, 2004.
2. Khadse, N., et al. Temperature Responsive PBT Bicomponent Fibers for Dynamic Thermal Insulation. *Polymers (MDPI)*, 2022, 14, 2757.
3. Chen, Y., et al. Laminated PET-based membranes with sweat transportation and dual thermal insulation properties. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450, 138177.
4. Xu, Y., et al. Gradient assembly of alginic acid/quaternary chitosan into biomimetic hidden nanoporous textiles for thermal management. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 300, 120236.
5. Wang, L., et al. Large-scalable polar bear hair-like cellular hollow fibers with excellent thermal insulation and ductility. *J Appl Polym Sci.*, 2022, 139, e53018
6. Gonzalez, G. M., et al. Para-Aramid Fiber Sheets for Simultaneous Mechanical and Thermal Protection in Extreme Environments. *Matter*, 2020, 3, 742–758.
7. Li, M., et al. Ultralight aerogel textiles based on aramid nanofibers composites with excellent thermal insulation and electromagnetic shielding properties. *Composites Communications*, 2022, 35, 101346.
8. Zou, S., et al. Facile and scalable fabrication of stretchable flame-resistant yarn for temperature monitoring and strain sensing. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450, 13846.
9. Wang, L., et al. Developing smart fabric systems with shape memory layer for improved thermal protection and thermal comfort. *Materials & Design*, 2022, 221, 110922.





Capitolo 6. MATERIALI AVANZATI PER L'ENERGIA

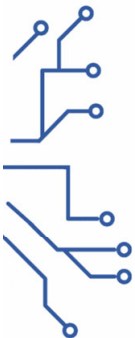
Michail Delagrammatikas, Sviluppo del pensiero creativo, Ntrafi Rafinas, Grecia

6.1 Introduzione

I tessuti intelligenti utilizzano spesso piccole quantità di elettricità necessarie per il funzionamento dei sensori attivi o per il funzionamento degli attuatori. La fonte di energia elettrica può provenire da batterie collegate al dispositivo indossabile, ma l'energia può anche essere raccolta dall'ambiente e immagazzinata in dispositivi flessibili di accumulo di energia (batterie e supercondensatori) incorporati nei tessuti. Pertanto, ci sono due argomenti principali nella gestione dell'energia indossabile: raccolta di energia e accumulo di energia.

Piccole quantità di energia possono essere derivate dall'ambiente e diventare disponibili per il deposito e l'uso. Questo processo è spesso chiamato raccolta di energia. Le fonti di energia ambientale per i dispositivi indossabili possono essere la radiazione solare, i campi elettromagnetici, l'energia cinetica attraverso il movimento di una persona che indossa il tessuto intelligente o l'energia potenziale generata dalla pressione e molti altri. Di solito tutte queste fonti di energia vengono utilizzate per generare elettricità. Mentre la produzione di energia elettrica su scala industriale è possibile solo utilizzando poche tecnologie scalabili, la produzione di elettricità su piccola scala può trarre vantaggio da molti più fenomeni e tecnologie di conversione dell'energia. Di seguito sono elencate alcune fonti di energia che possono essere utilizzate per la raccolta di energia su piccola scala e le tecnologie associate:

- Energia solare raccolta dal fotovoltaico flessibile (PV). L'energia solare può anche essere utilizzata per la raccolta di energia termica.
- Energia potenziale raccolta di fibre piezoelettriche e generatori piezoelettrici (PEG) che sfruttano la flessione e l'allungamento del tessuto, la pressione applicata durante l'uso o le vibrazioni.
- I generatori termoelettrici (TEG) generano elettricità sfruttando i gradienti di temperatura che possono derivare da calore corporeo, fonti radianti ecc.
- L'energia cinetica può essere raccolta da magneti per indurre elettricità o da nano generatori triboelettrici (TENG).
- I campi elettromagnetici possono anche interagire con antenne speciali e indurre elettricità.



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

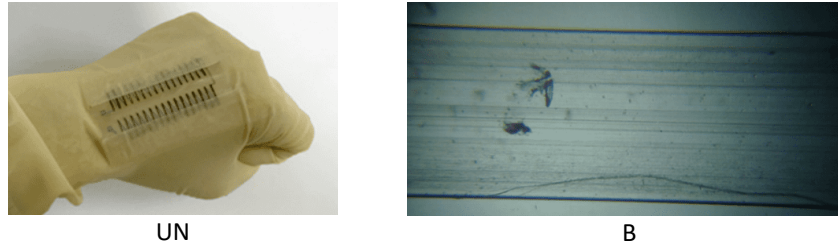


Figura 6.1 a – PEDOT: Generatore termoelettrico PSS incorporato in un guanto per la generazione di elettricità dal calore del corpo umano. Eun Jin Bae et al., CC BY 4.0, tramite Wikimedia Commons; b – Filato a nastro piezoelettrico PVDF (2,5x). Ptosky, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons

Una volta raccolta e convertita in elettricità, l'energia dovrebbe essere utilizzata da dispositivi come sensori e attuatori o immagazzinata per un uso futuro. Per i tessuti e gli oggetti indossabili intelligenti, ciò è possibile grazie a dispositivi di accumulo elettrico come batterie e supercondensatori. Le batterie e alcuni tipi di supercondensatori vengono caricati convertendo l'energia elettrica in energia chimica, che diventa nuovamente disponibile come energia elettrica attraverso reazioni elettrochimiche. Le reazioni elettrochimiche sono trasformazioni chimiche che comportano lo scambio di ioni tra due materiali, l'anodo e il catodo, attraverso un mezzo conduttivo chiamato elettrolita. Quando i due poli, l'anodo e il catodo sono collegati attraverso un materiale conduttore di elettroni (ad esempio un filo metallico, fibre di nanotubi di carbonio, un filo conduttivo) allora, per effetto della reazione elettrochimica, il materiale conduttore è percorso da corrente elettrica. Quando il circuito conduttore di elettroni viene interrotto, la reazione elettrochimica si interrompe e l'energia rimane immagazzinata. Altri tipi di supercondensatori immagazzinano energia sotto forma di energia potenziale elettrostatica o sfruttano meccanismi sia elettrostatici che elettrochimici. Una revisione completa delle tecnologie delle batterie e dei supercondensatori può essere trovata in [1].

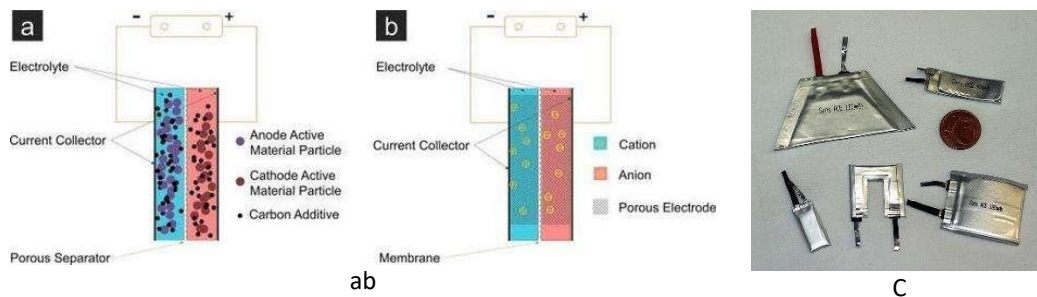
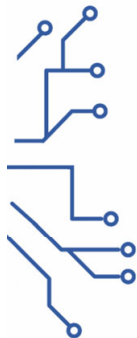


Figura 6.2 ab - Illustrazione schematica di (a) una batteria agli ioni di litio e (b) un supercondensatore. Zhaoxiang Qi, Gary M. Koenig Jr [1], CC-BY 4.0; c – Diversi Gens ACE LiPo-Batterypacks in diverse dimensioni, design e capacità, considerati per alimentare dispositivi informatici indossabili, prodotti da GREPOW Battery Co., Ltd. Thomas Springer, CC0, tramite Wikimedia Commons





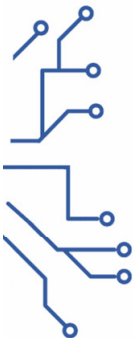
2020-1-RO01-KA226-HE-095335

In alcuni casi l'energia non viene immagazzinata o utilizzata sotto forma di elettricità, ma sotto forma di energia chimica ed energia termica. Le reazioni chimiche esotermiche o endotermiche vengono utilizzate rispettivamente per il riscaldamento o il raffreddamento, senza coinvolgere reazioni elettrochimiche come nei dispositivi di accumulo di energia elettrica. Le prossime due sessioni mirano a presentare un caso esemplare dalla recente bibliografia sui progressi del materiale per la raccolta di energia tessile e l'accumulo di energia nei dispositivi indossabili.

6.2 Tessili per la raccolta di energia

Diverse tecnologie sono state utilizzate per aggiungere il fotovoltaico sui dispositivi indossabili. La soluzione più semplice è quella di aggiungere comuni pannelli fotovoltaici staccabili (e batterie) sui tessuti e utilizzare l'energia per generare calore o per produrre luce. Sebbene tali applicazioni possano essere una soluzione quando sono necessarie maggiori quantità di energia, presentano alcuni svantaggi in quanto aggiungono peso al tessuto, sono rigide e scomode, possono essere facilmente danneggiate e non possono essere lavate come normali indumenti. La ricerca recente si concentra sul fotovoltaico flessibile che viene aderito ai tessuti o addirittura allo sviluppo di fibre con proprietà fotovoltaiche. Vengono presentati tre diversi esempi tratti dalla bibliografia recente. TM Bandara, JM Hansadi e F. Bella [2] hanno recentemente pubblicato un articolo di revisione sulle celle solari sensibilizzate con colorante tessile (DSSC) per l'elettronica indossabile. I DSSC di solito comprendono un anodo trasparente fatto di vetro di ossido di stagno indio/fluoro (ITO/FTO), un mezzo poroso contenente il colorante a trasferimento di carica e un catodo conduttivo per la raccolta di elettroni [3] che può includere nanotubi di carbonio. I tessuti DSSC sono leggeri, flessibili, comodi e scalabili per la produzione industriale. I DSSC tessili possono essere prodotti come filati o sviluppati su tessuti. IT Güler et al. fanno uso di un diverso tipo di fotovoltaico flessibile, il fotovoltaico organico (OPV) [4]. OPV fornisce una soluzione di raccolta di energia altamente flessibile e molto efficiente (come rapporto potenza generata per massa) per i tessuti che hanno come inconveniente che tendono ad ossidarsi sotto l'esposizione ambientale (la radiazione UV solare, l'esposizione al sudore sono due ambienti ossidanti comuni). Questo lavoro si concentra sul deposito dei diversi strati che compongono il sistema OPV direttamente su uno strato barriera, evitando l'incapsulamento a sandwich che viene utilizzato principalmente per proteggere l'OPV dall'ossidazione. I. Borazan, AC Bedeloglu e A. Demir, propone una soluzione basata su un tessuto a rete in acciaio inossidabile [5], utilizzando tecniche comuni all'industria tessile, come rivestimento per immersione. Questo prodotto può essere utilizzato per indossabili ma anche come tessuto su strutture dalla geometria complessa.

Soluzioni innovative che utilizzano le tecnologie PEG, TEG e TENG per la raccolta di energia sono proposte anche dalla ricerca all'avanguardia. L.Veramuthu et al. [6] hanno sviluppato un generatore nano piezoelettrico basato su fibre conduttive rinforzate elettrofilate (ERCF) che è poco costoso e non tossico. La raccolta di energia è resa possibile grazie al raggiungimento di un elevato ordine di allineamento per le nanofibre durante la produzione, che consente agli elettroni di essere raccolti dall'anodo e dal catodo del generatore. U. Zubair [7] propone di alimentare i sensori attivi raccogliendo energia da un



kauno
technologijos
universitetas





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

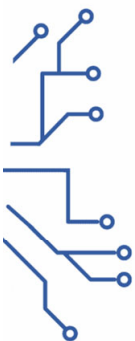
rivestimento nanocomposito piezoelettrico costituito da nanoparticelle di ossido di zinco disperse in un legante di polivinilidene fluoruro (PVDF) applicato su tessuti. R. Bagherzadeh et al. [8] riassumono i progressi nei nano generatori PENG e TENG per l'uso in dispositivi indossabili intelligenti e sensoriali.

6.3 Stoccaggio di energia nei tessuti

Le tecniche di stampa 3D sono state utilizzate da K. Jain et al. [9] per modificare le fibre di cellulosa usando l'inchiostro poli(3,4-etilene diossitiofene) poli(stirene solfonato) (PEDOT:PPS). Gli autori hanno dimostrato che queste stampe 3D facili da fabbricare dimostrano proprietà di supercondensatori. Y.Liang et al. [10] hanno sviluppato supercondensatori flessibili incorporando una struttura di imidazolato zeolitico su filati polimerici modificati da nanotubi di carbonio sviluppati mediante deposizione chimica da vapore (CVD) e lavorati a maglia. La litografia è stata utilizzata da Y. Rao et al. [11] per creare micro-supercondensatori a base di grafene mediante incisione laser su tessuto di Kevlar. Questo metodo consente lo sviluppo di dispositivi elettronici complessi su tessuti. Il progresso tecnologico nel campo dell'accumulo di energia per la microelettronica indossabile è riassunto in un recente articolo di rassegna di X. Xiao et al. [12]. Questa revisione evidenzia anche lo stato dell'arte, i limiti esistenti nella tecnologia e le tendenze future. AH Khadem et al. [13] si concentrano sulla loro revisione delle applicazioni del grafene per lo sviluppo di tessuti per applicazioni di supercondensatori, poiché la tecnologia del carbonio 2D può aumentare l'efficienza dei dispositivi flessibili di accumulo di energia.

Un modo diverso per immagazzinare energia è sfruttare la conversione diretta di energia chimica in energia termica (e viceversa) attraverso reazioni chimiche esotermiche ed endotermiche o fenomeni di cambiamento di fase. I tappetini di raffreddamento sono un'applicazione diffusa che sfrutta le reazioni endotermiche legate all'acqua rilasciata dai sali idrati, che si verificano a temperature ambiente elevate. L'uso di materiale a cambiamento di fase in filati o tessuti per applicazioni di riscaldamento e raffreddamento nell'industria tessile è discusso come un campo di applicazione distinto in KAR Ismail et al. rivedere l'articolo [14]

6.4 Sommario



I progressi nella tecnologia dei materiali relativi a vari meccanismi di raccolta e immagazzinamento di energia, consentono lo sviluppo di tessuti intelligenti e sensoriali che incorporano dispositivi che consumano energia. Il collegamento di fonti di alimentazione a dispositivi indossabili mediante apparecchiature staccabili che sono semplicemente aderenti a un tessuto altrimenti convenzionale sta rapidamente cedendo allo sviluppo di dispositivi di raccolta e accumulo di energia flessibili, durevoli ed efficaci che sono intrinsecamente incorporati nei o sui tessuti o persino nei filati che può essere lavorato a maglia o tessuto.



kauno
technologijos
universitetas



AEi



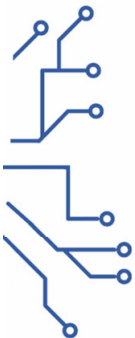
cre thi dev





Riferimenti

1. Zhaoxiang, Q., Gary, M., Koenig, J. Review Article: Flow battery systems with solid electroactive materials. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2017, B 35, 040801.
2. Bandara, T.M., Hansadi, J.M., Bella, F. A review of textile dye-sensitized solar cells for wearable electronics. *Ionics*, 2022, 28, p.p. 2563-2583.
3. Sharma, S., et al. Dye sensitized solar cells: From genesis to recent drifts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 70, p. p. 529-537.
4. Güler, E.N., et al. Fully solution-processed, light-weight, and ultraflexible organic solar cells. *Flexible and Printed Electronics*, 2022, 7, 025003.
5. Borazan, I., Bedeloglu, A.C., Demir, A. A photovoltaic textile design with a stainless steel mesh fabric. *Journal of Industrial Textiles*, 2022, 51(10), p.p. 1527-1538.
6. Veeramuthu, L., et al. Muscle fibers inspired electrospun nanostructures reinforced conductive fibers for smart wearable optoelectronics and energy generators. *Nano Energy*, 2022, 107592.
7. Zubair, U., et al. Multifunctional knit fabrics for self-powered sensing through nanocomposites coatings. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 293, 126951.
8. Bagherzadeh, R., et al. Wearable and flexible electrodes in nanogenerators for energy harvesting, tactile sensors, and electronic textiles: novel materials, recent advances, and future perspectives. *Materials Today Sustainability*, 2022, 20, 100233.
9. Jain, K., et al. 3D printable composites of modified cellulose fibers and conductive polymers and their use in wearable electronics. *Applied Materials Today*, 2023, 30, 101703.
10. Liang, Y., et al. Deposition of ZIF-67 and polypyrrole on current collector knitted from carbon nanotube-wrapped polymer yarns as a high-performance electrode for flexible supercapacitors. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 631, p.p. 77-85.
11. Rao, Y., et al. Laser-scribed phosphorus-doped graphene derived from Kevlar textile for enhanced wearable micro-supercapacitor. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 630, p.p. 586-594.
12. Xiao, X., et al. Advances in solid-state fiber batteries for wearable bioelectronics. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2022, 26, 101042.
13. Khadem, A.H., et al. Fabrication, properties, and performance of graphene-based textile fabrics for supercapacitor applications: A review. *Journal of energy storage*, 2022, 56, 105988.
14. Ismail, K.A.R., et al. New potential applications of phase change materials: A review. *Journal of energy storage*, 2022, 53, 105202.





Capitolo 7. MATERIALI AVANZATI PER L'ATTENUAZIONE ELETTROMAGNETICA

Razvan Radulescu e Raluca Aileni, INCDTP, Bucarest, Romania

7.1 Introduzione

Questo modulo ha lo scopo di descrivere la produzione e l'uso di tessuti tessili per la schermatura elettromagnetica (EM). Una prima importante proprietà di questi tessuti è la conducibilità elettrica [1]. Tuttavia, studi recenti sono associati alla schermatura EM e anche ad altre proprietà, come: traspirabilità, carattere antimicrobico, resistenza meccanica, lavabilità [2-6].

Come applicazione principale, tessuti con elettroconduttività possono schermare la radiazione EM secondo il principio della gabbia di Faraday, inducendo correnti parassite con direzione opposta al campo EM incidente e quindi con un effetto di attenuazione [7]. La protezione contro le radiazioni EM è importante al giorno d'oggi, a causa delle varie fonti di inquinamento EM: GSM, WiFi, linee di trasmissione di energia, trasmissioni ecc. Tali radiazioni possono causare gravi problemi di salute agli esseri umani, secondo diversi studi [8-9] e anche interferenze con altre apparecchiature elettroniche, che dovrebbero essere evitate secondo i principi di protezione della compatibilità elettromagnetica [7]. I tessuti tessili presentano diversi vantaggi rispetto ai classici scudi metallici, come mostrato in Figura 7.1.

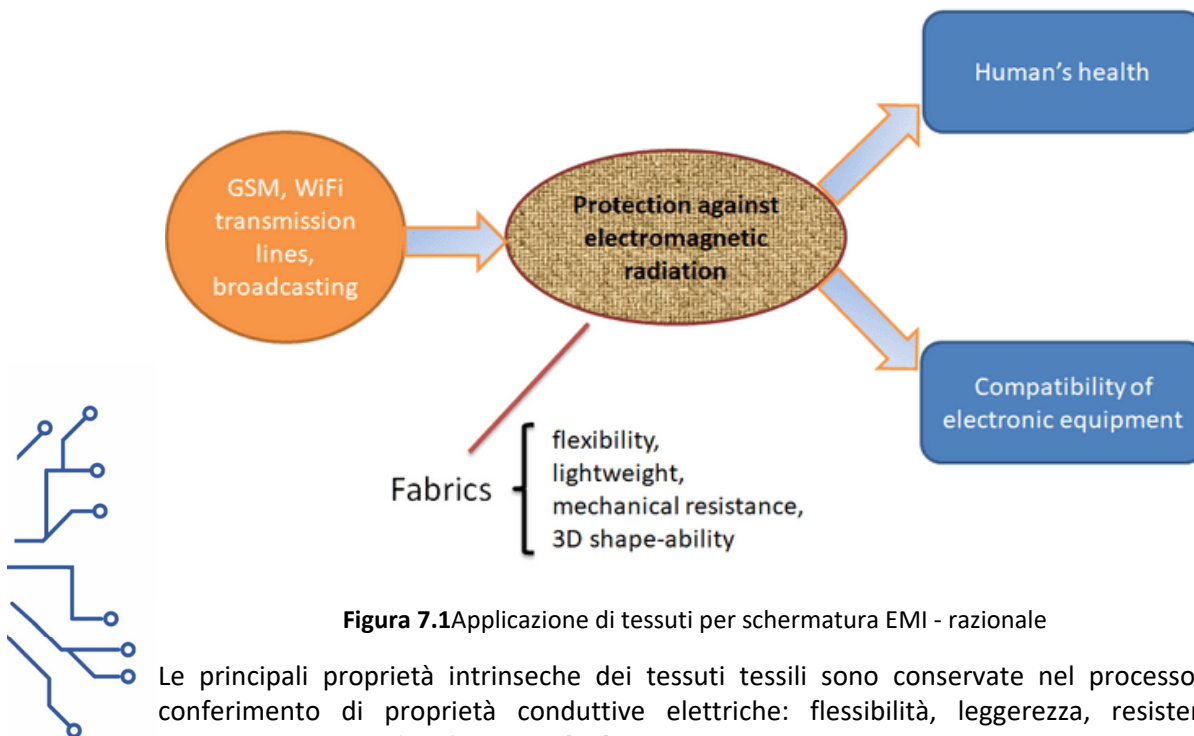


Figura 7.1 Applicazione di tessuti per schermatura EMI - razionale

Le principali proprietà intrinseche dei tessuti tessili sono conservate nel processo di conferimento di proprietà conduttive elettriche: flessibilità, leggerezza, resistenza meccanica e capacità di forma 3D [10].



kauno technologijos universitetas



7.2 Produzione di tessuti elettrici conduttivi per la schermatura EMI

Si possono distinguere due tecnologie principali nella produzione di tessuti elettroconduttivi, come mostrato nella Figura 7.2.

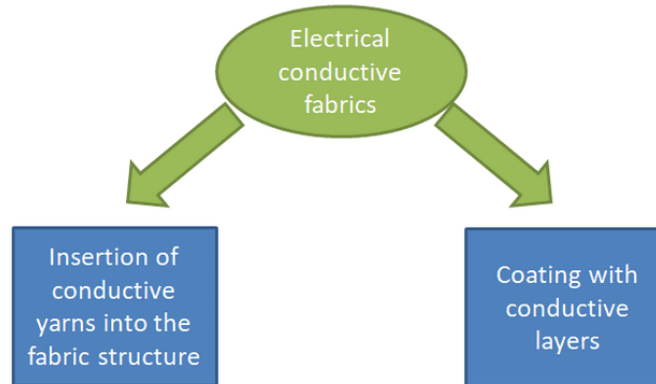


Figura 7.2 Principali tecnologie per conferire proprietà conduttive ai tessuti

I due metodi principali includono:

- Inserimento di fili elettricamente conduttivi nella struttura del tessuto (tessuto, maglia, tessuto non tessuto) – Le figure 7.3 e 7.4 presentano il telaio di tessitura e il subbio di ordito per la preparazione di tessuti a navetta con fili metallici;

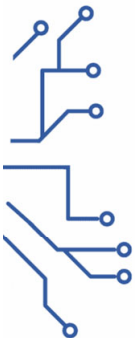


Figura 7.3 Telaio per tessitura SOMET per l'inserimento di filati metallici SC Majutex SRL



Figura 7.4 Subbio di ordito per l'inserimento di fili metallici nella struttura dell'ordito

- Rivestimento con strati elettricamente conduttivi (PECVD, magnetron, spruzzatura ecc.) – Le figure 7.5 e 7.6 presentano apparecchiature al plasma per il rivestimento dei tessuti con sottili strati metallici.





2020-1-RO01-KA226-HE-095335



Figura 7.5 Apparecchiature al plasma a bassa pressione di INCDTP

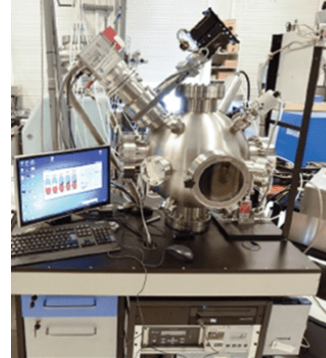


Figura 7.6 Magnetron polverizzazione catodica apparecchiature al plasma di INFLPR

In primo luogo, dobbiamo produrre i tessuti di schermatura EM, quindi dobbiamo misurare la loro funzionalità principale in base all'applicazione: l'efficacia della schermatura.

7.3 Metodi per misurare l'efficacia della schermatura EM degli schermi tessili

L'efficacia della schermatura elettromagnetica (EMSE) è definita dal rapporto tra la potenza del segnale incidente e del segnale trasmesso ed è espressa in Decibel [dB]. EMSE è definito come:

$$EMSE = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{potenza del segnale incidente}}{\text{potenza del segnale trasmesso}} \right) \text{ [dB]} \quad (1)$$

Uno dei metodi più convenienti per misurare EMSE è tramite la Cella elettromagnetica trasversale, o la cella TEM. Il principio del test è misurare il segnale elettrico con e senza campione e calcolare il rapporto secondo la relazione (1). La cella TEM ha secondo lo standard ASTM-ES07 la seguente costruzione – Figura 7.7 [11]. Un generatore di corrente crea il segnale elettrico e un amplificatore rafforza il segnale che viene introdotto in una connessione della cella TEM. Il campione di tessuto ha un effetto schermante sul segnale, che viene misurato da un analizzatore di rete o da un oscilloscopio all'altra connessione della cella TEM. Il campione di tessuto per il test ha un formato a forma di rondella, per adattarsi al diametro interno ed esterno della cella TEM (d = 30 mm; D = 100 mm).

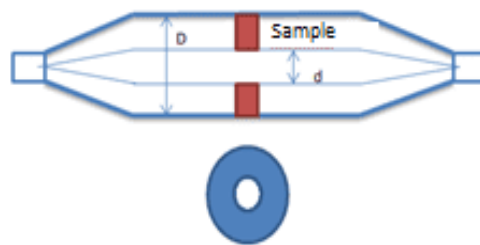
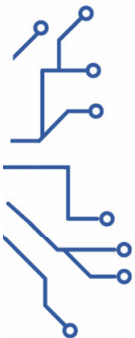


Figura 7.7 Cella TEM secondo lo standard ASTM-ES07

Nel nostro modulo educativo vengono presentati due tipi di campioni tessili. Il primo campione è un tessuto a navetta con fili d'argento inseriti in ordito e trama su un supporto



kauno technologijos universitetas



cre thi dev





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

di cotone. La distanza tra i fili d'argento è 5mm e il tessuto ha una massa specifica di 118 g/m² (Figura 7.8). Lo stesso tessuto è stato rivestito di plasma magnetron con uno strato di 1200 nm di rame su entrambi i lati (Figura 7.9). Come accennato nel paragrafo precedente, entrambi i campioni sono stati preparati in formato a forma di rondella per la misurazione tramite cella TEM.

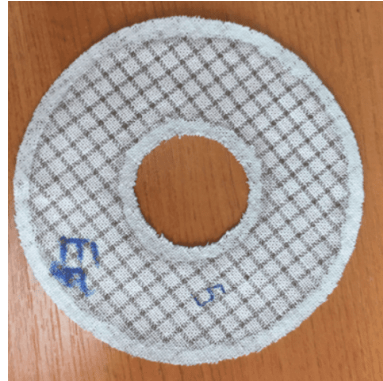
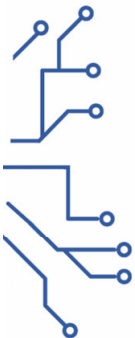


Figura 7.8 Campione F1 per cella TEM:
tessuto intrecciato con inseriti fili
conduttivi di argento



Figura 7.9 Campione F2 per cella TEM:
tessuto intrecciato con fili conduttivi
inseriti di argento e rivestimento al
plasma con rame.

EMSE è stato misurato in dB secondo (1) sulla gamma di frequenza 0,1-1000MHz. La Figura 7.10 presenta i valori EMSE su scala logaritmica per la frequenza in MHz. EMSE ha valori di 44-45 dB per il tessuto con fili d'argento e di 50-53 dB per il tessuto con fili d'argento e spalmatura di rame, per la gamma di frequenze 0,1-100 MHz. È stata misurata una leggera diminuzione dei valori EMSE per l'intervallo di frequenza di 100-1000 MHz, a causa del materiale elettrico spesso, dove lo spessore del campione \gg profondità della pelle e la comparsa di modalità di trasmissione più elevate nella cella TEM coassiale. Queste modalità di trasmissione superiori si sovrappongono alla modalità di trasmissione principale e possono influenzare il risultato della misurazione [12].



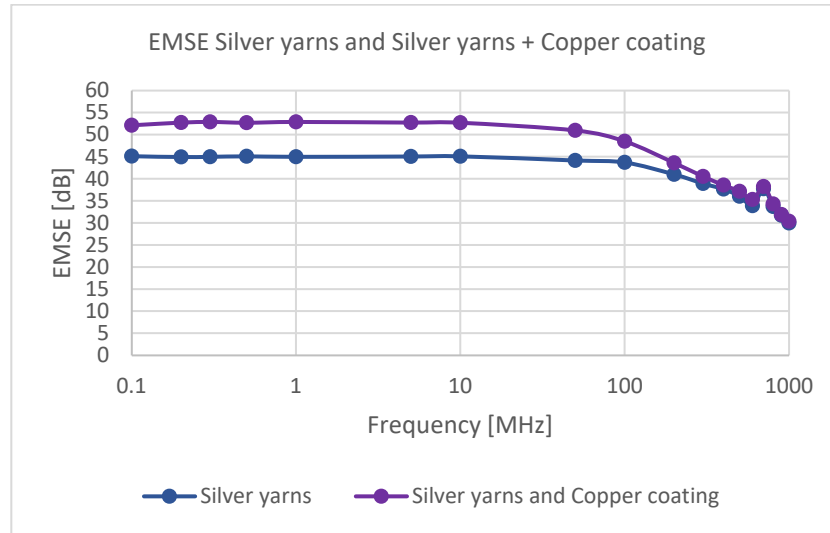


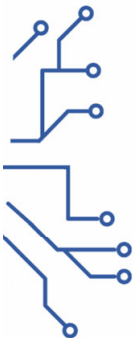
Figura 7.10 Risultati EMSE di entrambi i campioni di tessuto

7.4 Conclusioni

I tessuti tessili hanno raggiunto negli ultimi 20 anni ulteriori applicazioni ai prodotti di abbigliamento, denominati tessuti tecnici. Una di queste applicazioni è la schermatura della radiazione EM, secondo i principi della compatibilità elettromagnetica (EMC). Principale proprietà dei tessuti schermanti è l'elettroconduttività, che consente la generazione di correnti parassite con effetto schermante secondo il principio della gabbia di Faraday. Le moderne tecnologie di filatura e spalmatura hanno permesso la lavorazione di filati metallici e la spalmatura con strati metallici. Queste nuove tecnologie hanno portato alla produzione di tessuti tessili con fili metallici inseriti nella struttura (tessuti, a maglia e non tessuti) o al rivestimento dei tessuti con strati metallici (PECVD, magnetron, spruzzatura). Dopo la produzione dei tessuti elettroconduttivi, una successiva considerazione è relativa alla misura della loro funzionalità principale, l'efficacia della schermatura EM (EMSE). Uno dei metodi di prova più semplici è tramite la cella elettromagnetica trasversale (TEM) secondo lo standard ASTM ES-07. I risultati EMSE mostrano un aumento di 5-8 dB per il tessuto rivestito al plasma nell'intervallo di frequenza di 0,1-1000 MHz.

Riferimenti

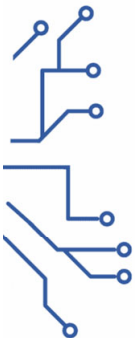
1. Ziája, J., Jaroszewski, M. EMI shielding using composite materials with plasma layers. In *Electromagnetic Waves*. InTechOpen: London, UK, 2011.
2. Mengwei, D., et al. A green approach to preparing hydrophobic, electrically conductive textiles based on waterborne polyurethane for electromagnetic interference shielding with low reflectivity. *Chemical Engineering Journal*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127749>
3. Qiongzhen, L., et al. Flexible, breathable, and highly environmental-stable Ni/PPy/PET conductive fabrics for efficient electromagnetic interference shielding and wearable textile





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

- antennas. *Composites Part B*, 2021, 215, 108752.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108752>
4. Zhang, X., Qingwen, Li, et al. Developing thermal regulating and electromagnetic shielding textiles using ultra-thin carbon nanotube films. *Composites Communications* 21, 2020, 100409.
<https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100409>
 5. Pakdel, E., Xungai, W., et al. Advances in photocatalytic self-cleaning, superhydrophobic and electromagnetic interference shielding textile treatments. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, 277, 102116. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102116>
 6. Cortez, J., et al. Sintering of nanoscale silver coated textiles, a new approach to attain conductive fabrics for electromagnetic shielding. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, 147, 815e822.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.06.025>
 7. Schwab, A., Kuerner, W. Electromagnetic compatibility. AGIR publishing house, 2013.
 8. Community research: Health and electromagnetic fields, EU-funded research into the impact of electromagnetic fields and mobile telephones on health, 2005
 9. World Health Organization (WHO): Radiation: Electromagnetic fields - Questions and Answers. <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-electromagnetic-fields>, 2015, Accessed 19.04.2022
 10. The Handbook of the Textile Engineer, AGIR publishing house, 2005
 11. Standard ASTM ES-07, https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/astm-es-7-1983-154532_saig_astm_astm_371798/, Accessed 19.04.2022
 12. Bădic, M., Marinescu, M-J. The Failure of Coaxial TEM Cells ASTM Standards Methods in H.F. Range. *IEEE Xplore*, 2002, DOI: 10.1109/ISEMC.2002.1032442





Capitolo 8. MATERIALI AVANZATI PER SENSORI DI DEFORMAZIONE

Farima Daniela, Iovan Dragomir Alina e Bodoga Alexandra, Università Tecnica "Gheorghe Asachi", Romania

8.1 Introduzione

Quando una struttura tessile è in grado di percepire gli stimoli, reagire e adattarsi ad essi, allora diventa un tessuto avanzato. I materiali avanzati possono modificare o adattare le loro proprietà in risposta a fattori esterni (ad es. materiali elettroconduttivi, materiali in grado di cambiare colore (Figura 8.1) [1], materiali che possono memorizzare la forma, materiali che possono tornare alla forma precedente sotto l'azione di fattori termici, materiali costituiti da tessuti con trattamenti ritardanti o idrofobici).

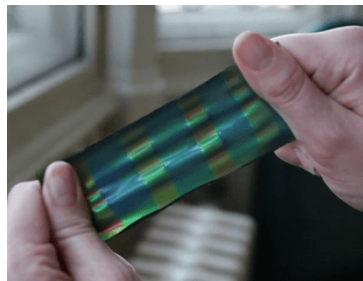


Figura 8.1 Materiali intelligenti che cambiano colore [1]

Una nuova generazione di dispositivi che combinano la capacità di rilevamento della deformazione con una vestibilità unica e che hanno un'elevata capacità di estensibilità [2], sono i sensori tessili di deformazione.

8.2 Classificazione dei sensori

Nella figura 8.2 [2] sono presentati molti tipi di sensori di deformazione su base tessile.

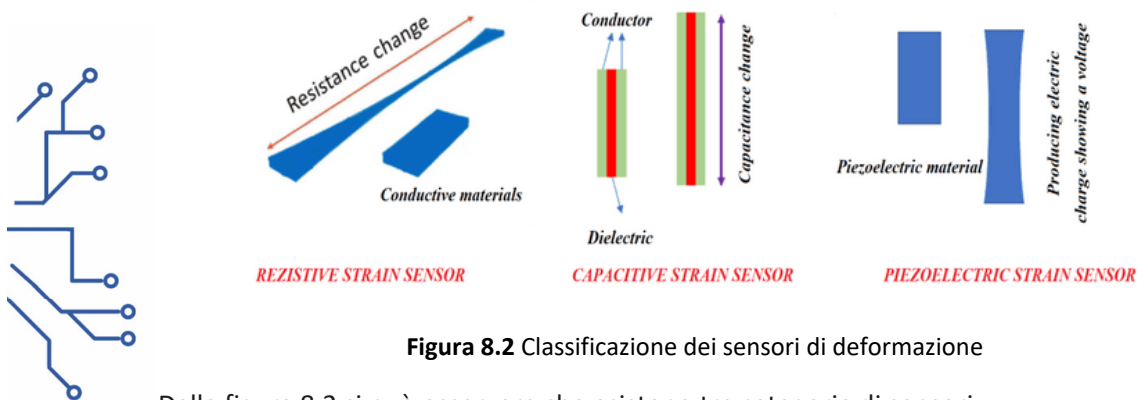


Figura 8.2 Classificazione dei sensori di deformazione

Dalla figura 8.2 si può osservare che esistono tre categorie di sensori:

2020-1-RO01-KA226-HE-095335

- **Sensori di deformazione resistivi** (sono composti da materiali attivi e un substrato flessibile [6]) che, in caso di deformazione applicata, determinano una variazione di resistenza elettrica nel sensore [3, 4, 5]. La resistenza elettrica del sensore si ripristina man mano che i materiali conduttivi ristabiliscono gli stati o le strutture originali, quando la tensione viene rilasciata. I sensori di deformazione resistivi basati su tessuto hanno un processo di fabbricazione semplice e segnali di lettura accessibili [3]. I sensori di deformazione resistivi basati su tessuti sono caratterizzati attraverso uno strato di elettrodo tessile di materiali attivi che funziona come un resistore quando viene applicata una tensione e la resistenza cambia in base all'entità della deformazione applicata (Figura 8.3) [15].

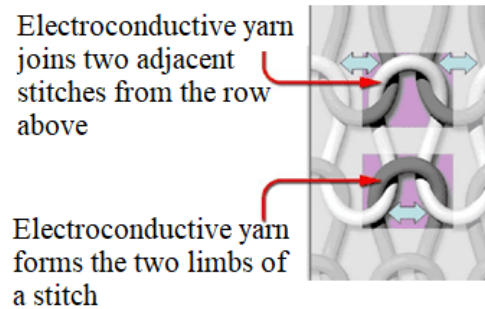


Figura 8.3 Struttura del sensore di deformazione resistivo

Nella figura 8.3 osserva le frecce che segnano le regioni in cui avviene il contatto elettrico mentre la struttura di base si rilassa dopo lo stiramento.

- **Sensori capacitivi** (Figura 8.4) sono composti da due elettrodi opposti di materiali attivi e che sono separati da uno strato dielettrico di materiali isolanti in mezzo [7,8,9,10,14].

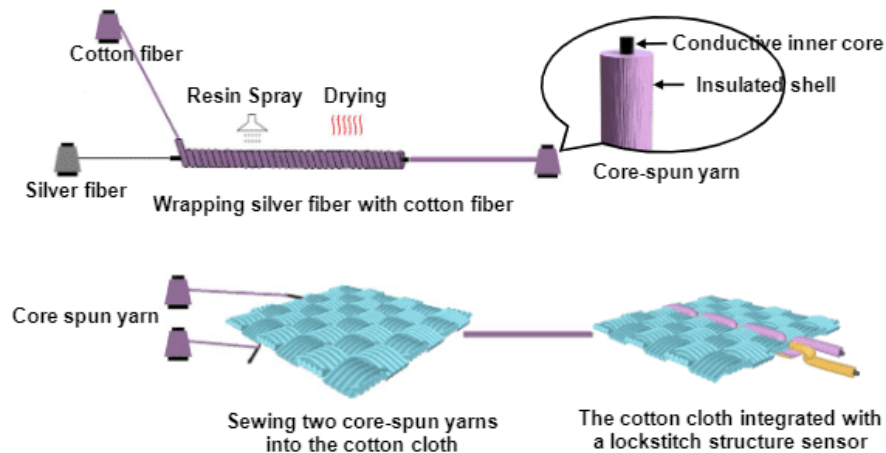
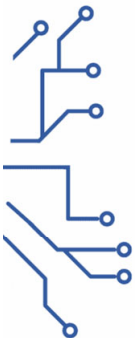


Figura 8.4 Un sensore capacitivo



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

- **Sensore di deformazione piezoelettrico** è un materiale piezoelettrico che trasforma la deformazione in energia elettrica [11, 12]. In questi sensori, quando viene applicato uno stimolo esterno (pressione, forze di trazione, forze di compressione e torsione) viene generata una differenza di tensione (Figura 8.5).

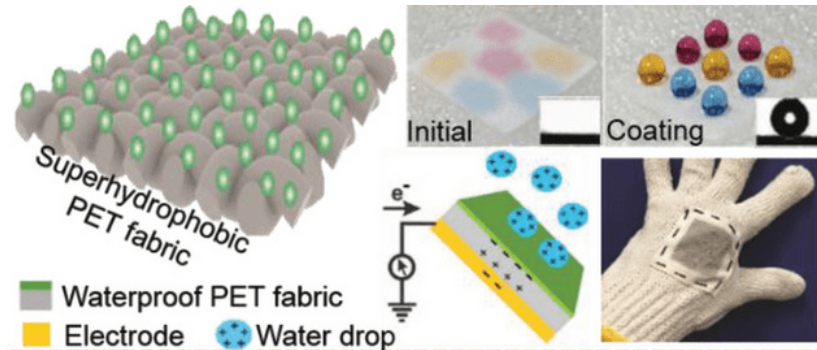


Figura 8.5 Sensore di deformazione piezoelettrico

Materiali tessili conduttivi vengono utilizzati per ottenere tessuti intelligenti (sensori, tessuti riscaldanti, indumenti a scarica elettrostatica, comunicazione).

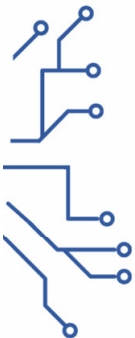
I tessuti conduttivi possono essere ottenuti attraverso tre metodi:

1. Utilizzo di polimeri intrinsecamente conduttivi.
2. Aggiunta di carbonio o metalli in diverse forme come fili, fibre o particelle.
3. Rivestimento con sostanze conduttive [13].

Classificazione dei tessuti conduttivi

UN. Tessuti antistatici che può accumulare carica elettrica sulla superficie degli oggetti.

B. Elettromagnetico tessuti schermanti (EM) che possono limitare la diffusione dei campi elettromagnetici in uno spazio (tessuti, tessuti a maglia e non tessuti) (Figura 8.6) [16].



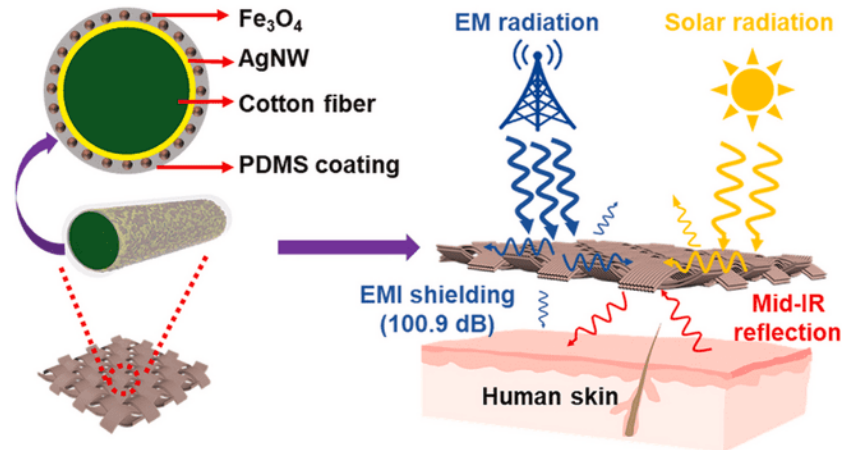


Figura 8.6 Tessuti schermanti elettromagnetici

I fili della figura 8.6 sono elettricamente conduttivi per effetto elettromagnetico.

C. Tessuti elettrici, fibre e filati elettricamente conduttivi, hanno caratteristiche come ragionevole conduttività elettrica, flessibilità, scariche elettrostatiche e protezione dalle interferenze elettromagnetiche.

Il componente principale per i tessuti intelligenti indossabili sono le fibre tessili conduttive utilizzate nei sensori, la schermatura delle interferenze elettromagnetiche, le scariche elettrostatiche e il trasferimento dei dati negli indumenti [13].

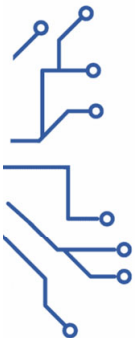
D. Rivestimenti funzionali possono essere interfacce o superfici materiali e sono una possibilità per modificare tessuti con proprietà conduttive [16].

8.4 Conclusioni

I sensori di deformazione sono resistivi, capacitivi e piezoelettrici. I sensori di deformazione reagiscono riducendo o aumentando la resistenza elettrica quando vengono applicati stimoli (deformazione, pressione, forze di trazione, forze di compressione e torsione).

Riferimenti

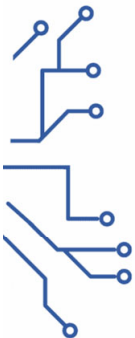
1. <https://materialdistrict.com/article/colour-changing-smart-material/>, 2012.
2. Jilong, W., Chunhong, L. and Kun, Z. Textile-Based Strain Sensor for Human Motion Detection. *Energy & Environmental Materials*, Wiley
3. Amjadi, M., Kyung, K.U., Park, I., Sitti, M. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26, 1678.





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

4. Jian, M., Wang, C., Wang, Q., Wang, H., Xia, K., Yin, Z., Zhang, M., Liang, X., Zhang, Y. *Sci. China Mater.*, 2017, 60, 1026.
5. Yamada, T., Hayamizu, Y., Yamamoto, Y., Yomogida, Y., Izadi-Najafabadi, A., Futaba, D.N., Hata, K. *Nat. Nanotechnol.*, 2011, 6, 296.
6. Huang, C.T., Shen, C.L., Tang, C.F., Chang, S.H. *Sens. Actuators a Phys.*, 2008, 141, 396.
7. Lipomi, D.J., Vosgueritchian, M., Tee, B.C.K., Hellstrom, S.L., Lee, J.A., Fox, C.H., Bao, Z. *Nat. Nanotechnol.*, 2011, 6, 788.
8. Cai, L., Song, L., Luan, P., Zhang, Q., Zhang, N., Gao, Q., Zhao, D., Zhang, X., Tu, M., Yang, F., Zhou, W., Fan, Q., Luo, J., Zhou, W., Ajayan, P.M., Xie, S. *Sci. Rep.*, 2013, 3, 3048.
9. Yao, S., Zhu, Y. *Nanoscale*, 2014, 6, 2345.
10. Cai, L., Song, L., Luan, P.S., Zhang, Q., Zhang N., Gao, Q.Q., Zhao, D., Zhang, X., Tu, M., Yang, F., Zhou, W.B., Fan, Q.X., Luo, J., Zhou, W.Y., Ajayan, P.M., Xie, S.S. *Sci. Rep.*, 2013, 43, 3048.
11. Sun, Q., Seung, W., Kim, B.J., Seo, S., Kim, S.-W., Cho, J.H. *Adv. Mater.*, 2015, 27, 3411.
12. Zhou, Y., Gu, Fei, P., Mai, W., Gao, Y., Yang, R., Bao, G., Wang, Z.L. *Nano Lett.* 2008, 8, 3035.
13. <https://www.textileblog.com/conductive-textiles-types-properties-and-applications/>
14. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssensors.0c00210>
15. https://www.google.com/search?q=Resistive+strain+sensors+in+textile+images&tbm=isch&ved=2ahUKEwjw_PGBx8n4AhWfwwIHHQ4kBAAQ2-cCegQIABAA&oeq
16. Zong, J.Y., Zhou, X.J., Hu, Y.F., Yang, T.B., Xiang, Y.D., Hao, L., Lei, J., Li, Z.M. A wearable multifunctional fabric with excellent electromagnetic interference shielding and passive radiation heating performance. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 225 (15).



kauno
technologijos
universitetas





Capitolo 9. MATERIALI AVANZATI PER SENSORI DI PRESSIONE

Aileni Raluca Maria, Stroe Cristina e Radulescu Razvan, INCOTP, Romania

Abstract. Lo sviluppo del sensore di pressione tessile è una sfida per i ricercatori che cercano di generare progressi scientifici nel monitoraggio biomedico (movimento, polso, cancello e respirazione) o robotica (pelle elettronica artificiale per robot). Il versatile ricamo di materiali tessili, le tecnologie con i polimeri, i compositi avanzati micro/nanostrutturati e la digitalizzazione (software e microelettronica) generano innovativi prodotti indossabili. In questo capitolo vengono presentati gli aspetti principali dei materiali utilizzati e delle tecnologie per lo sviluppo di sensori resistivi e capacitivi.

9.1 Introduzione

I sensori di pressione vengono utilizzati per rilevare la pressione e convertirla in un segnale elettrico in cui il valore del segnale dipende dal livello e dalla variazione della pressione applicata. Un sensore di pressione è costituito da elementi sensibili alla pressione (piezoresistivi, capacitivi ed elettricamente resistivi) per valutare la pressione applicata e da alcuni componenti per convertire questa informazione in un segnale elettrico. La pressione rappresenta la forza applicata da un liquido o gas su una superficie (elementi sensibili). I sensori di pressione rilevano il movimento, il cancello, il polso, la frequenza respiratoria o la pelle elettronica (Figura 9.1). Gli elementi sensibili più utilizzati sono materiali piezoresistivi o capacitivi.



Figura 9.1 Applicazioni dei sensori di pressione



9.2 Materiali utilizzati per i sensori di pressione

La materia prima utilizzata per la produzione dei sensori di pressione è costituita da polimeri non conduttivi (NCP), prodotti chimici (nanotubi di carbonio o CNT, grafene, nanotubo a parete singola o SWCNT, nanotubo a parete multipla o MWCNT), polimeri conduttivi (CP=NCP+CNT), polimeri intrinsecamente conduttivi (PEDOT: PSS, PANI).

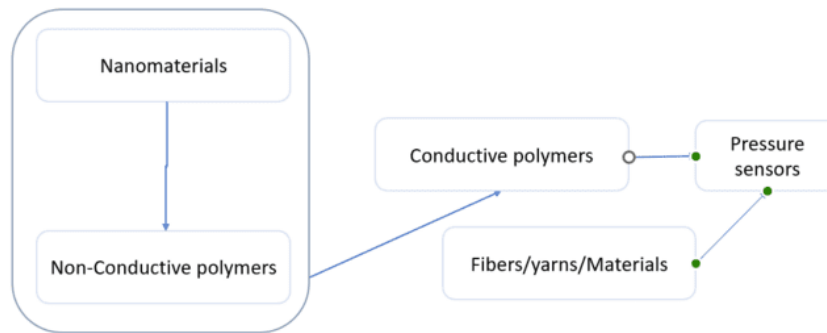


Figura 9.2 Materiali per sensori di pressione

- *Polimeri conduttivi*

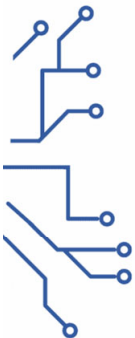
Il poli (3,4-etilenediossitiotofene) -poli (stirenesulfonato) PEDOT: PSS è un polimero conduttivo che può essere depositato su substrati tessili per formare compositi con proprietà elettrochimiche per applicazioni come l'elettronica stampata. La polianilina (PANI) è un polimero e semiconduttore intrinsecamente conduttivo con sensori e applicazioni di produzione di circuiti stampati.

- *Polimeri non conduttivi -Elastomeri*

Il difluoruro di polivinilidene (PVDF) è un fluoropolimero termoplastico utilizzato nella stampa 3D e nella produzione di sensori (array di sensori tattili), batterie e supercondensatori. Solitamente, il silicone polimerico viene utilizzato per l'isolamento elettrico mediante integrazione nella matrice polimerica dei nanotubi di grafene o CNT (nanotubi di carbonio) per diventare silicone conduttivo ideale da utilizzare nei sensori di pressione.

- *Nanomateriali*

I nanotubi di carbonio (CNT) presentano eccellenti proprietà elettriche per i sensori di pressione piezoresistivi. In generale, i sensori di pressione piezoresistivi sono fabbricati utilizzando una varietà di elementi come fili d'oro, nanofili ZnO, nanofili d'argento, grafene, nanoparticelle di oro/argento e nanotubi di carbonio integrati in silicani.



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

9.3 Classificazione e produzione dei sensori di pressione

A. Sensori di pressione capacitivi

I sensori di pressione capacitivi (Figure 9.3, 9.4) sono realizzati con materiali conduttivi come piastre separate da dielettrici (schiume sintetiche, distanziatori in tessuto o polimeri morbidi non conduttivi). Questi sensori possono essere fabbricati utilizzando diverse tecnologie come la tessitura, la cucitura, la lavorazione a maglia 3D (Figura 9.3), il ricamo con filamenti/filati conduttivi, seguito dalla stampa 3D (Figura 9.4), che viene depositata tramite polverizzazione catodica o la serigrafia con inchiostri conduttivi/ colla a base di polimeri conduttivi.

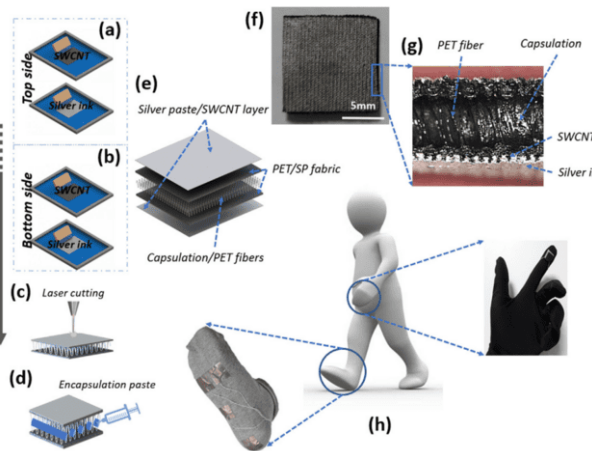
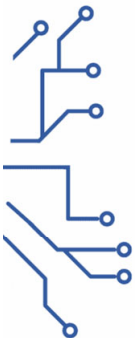


Figura 9.3 Processo di fabbricazione del sensore di pressione capacitivo costituito da tessuto distanziatore e stampa SWCNT/argento [6]



Figura 9.4 Fabbricazione di sensori capacitivi flessibili [6] sensori di pressione basati su CB/CNT/PDMS [7]



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Utilizzando polimeri conduttivi (ad esempio, PEDOT: PSS (Figura 9.5), PANI (Figura 9.6)) possono essere sviluppati come sensori tattili per applicazioni come tastiere, sensori di pressione integrati in letti, divani o solette mediche [8] o rilevamento del movimento, sensori tattili 3D per il rilevamento del movimento robotico [8]. Il sensore di pressione è realizzato intrecciando i fili rivestiti con il polimero conduttivo PEDOT: PSS e film polimerico dielettrico perfluoro (Cytop) [8].

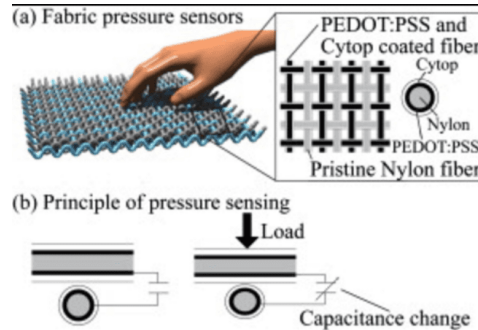


Figura 9.5 Array di sensori di pressione del tessuto [8]

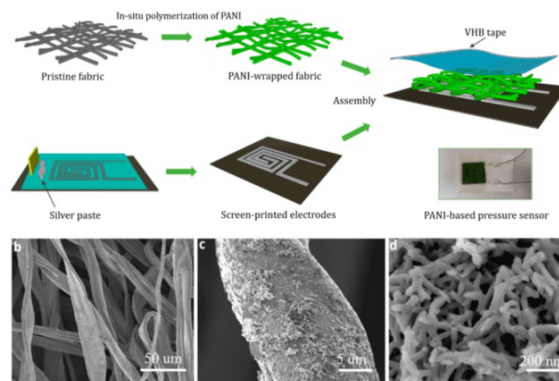
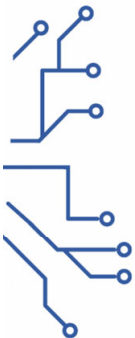
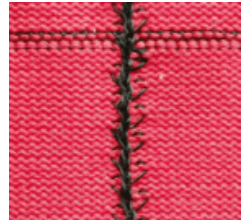


Figura 9.6 Fabbricazione di sensori capacitivi flessibili basati su nanofibre PANI ed elettrodi d'argento [9]

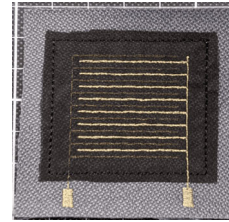
B. Sensori di pressione resistivi

I sensori di pressione resistivi possono essere realizzati utilizzando materiali elettricamente resistivi/conduktivi come filati/filamenti lavorati a maglia, incollati, tessuti o ricamati in varie strutture mediante diverse tecniche di fabbricazione (tessitura, ricamo, lavorazione a maglia, cucitura). Il principio di funzionamento si basa sull'aumento della resistenza elettrica quando il tessuto (tessuto, maglia) viene stirato o compresso. I sensori possono generare variazioni di tensione mediante stiramento (Figura 9.7 a) o compressione (Figura 9.7 b).





UN



B

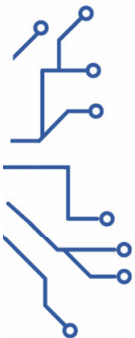
Figura 9.7 Sensori di pressione resistivi: a – fili piezoresistivi basati su sensori di pressione a maglia [10]; b – sensore di pressione resistivo ricamato [11]

9.4 Conclusioni

I sensori di pressione utilizzati per rilevare la pressione sono costituiti da elementi sensibili di polimeri conduttivi, elastomeri e nanomateriali. I sensori di pressione sono classificati come capacitivi e resistivi. I sensori capacitivi possono essere realizzati utilizzando la stampa 3D, la cucitura, la stampa 3D, il rivestimento (sputtering magnetronico, serigrafia) e la tessitura. I sensori resistivi possono essere realizzati mediante tecnologie tessili (tessitura, maglieria e ricamo) e modificano la loro resistenza elettrica quando vengono stirati o compressi. Possono essere realizzati tramite tessitura, maglieria e ricamo.

Riferimenti

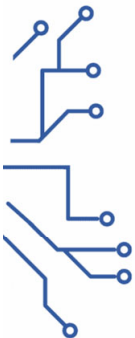
1. Textile pressure sensors can be washed online available, 2015, 10. www.electronicweekly.com/news/research-news/textile-pressure-sensors-can-be-washed-
2. Pyka, W., Jedrzejowski, M., Chudy, M., Krafczyk, W., Tokarczyk, O., Dziezok, M., Bzymek, A., Bysko, S., Blachowicz, T. and Ehrmann, A. On the use of textile materials in robotics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2020, 15, 1558925020910725
3. Analyze Foot Function with Pressure Mapping, online available: www.tekscan.com/products-solutions/pressure-offloading-foot-function
4. Zhao, B., Dong, Z. and Cong, H. A wearable and fully-textile capacitive sensor based on flat-knitted spacing fabric for human motions detection. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 340, 113558.
5. Kumar, A. Recent progress in the fabrication and applications of flexible capacitive and resistive pressure sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 113770.
6. Vu, C.C. and Kim, J. Highly elastic capacitive pressure sensor based on smart textiles for full-range human motion monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 314, 112029.
7. Shi, Y., Lü, X., Zhao, J., Wang, W., Meng, X., Wang, P. and Li, F. Flexible Capacitive Pressure Sensor Based on Microstructured Composite Dielectric Layer for Broad Linear Range Pressure Sensing Applications. *Micromachines*, 2022, 13(2), 223.
8. Takamatsu, S., Kobayashi, T., Shibayama, N., Miyake, K. and Itoh, T. Fabric pressure sensor array fabricated with die-coating and weaving techniques. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 184, 57-63.





2020-1-RO01-KA226-HE-095335

9. Liu, K., Zhou, Z., Yan, X., Meng, X., Tang, H., Qu, K., Gao, Y., Li, Y., Yu, J. and Li, L. Polyaniline nanofiber wrapped fabric for high-performance flexible pressure sensors. *Polymers*, 2019, 11(7), 1120.
10. Pointner, A., Preindl, T., Mlakar, S., Aigner, R. and Haller, M. Knitted resi: A highly flexible, force-sensitive knitted textile based on resistive yarns. In *ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies*, 2020, 1-2.
11. Aigner, R., Pointner, A., Preindl, T., Parzer, P. and Haller, M. Embroidered resistive pressure sensors: A novel approach for textile interfaces. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2020, 1-13.



kauno
technologijos
universitetas



cre thi dev
center for textile development





Capitolo 10. MATERIALI AVANZATI PER ATTUATORI

Aileni Raluca Maria e Cristina Stroe, INCDTP, Romania

Abstract. La progettazione di attuatori tessili (textuator) rappresenta una sfida per i ricercatori che cercano di migliorare la soluzione integrando materiali leggeri, flessibili e confortevoli per attuatori indossabili (guanti VR, muscoli artificiali, esoscheletri, dispositivi di elettrostimolazione, articoli di moda) o robotici (pelle elettronica artificiali per robot). Lo sviluppo di attuatori morbidi/flessibili comporta l'utilizzo di tecnologie classiche (maglia, cucito, tessitura, ricamo) e avanzate (plasma, polverizzazione catodica, stampa 3D). Inoltre, integrando polimeri elettroattivi o elettroconduttivi, le micro/nanostrutture e la digitalizzazione (software, componenti elettronici) possono essere fabbricate come innovativi attuatori basati su prodotti indossabili. Questo capitolo presenta gli aspetti principali riguardanti il tipo di attuatore, i materiali utilizzati e le tecnologie per lo sviluppo dell'attuatore flessibile.

10.1 Introduzione

Le attuali ricerche nel campo degli attuatori flessibili/morbidi mostrano un crescente interesse nel risolvere le sfide attuali integrando materiali flessibili con ruoli attuatori nei sistemi indossabili.

Gli attuatori agiscono meccanicamente, chimicamente, magneticamente, elettricamente e termicamente sull'azione di uno stimolo (ad esempio, termico, elettrico, meccanico, ottico o magnetico). Per sviluppare attuatori, vengono utilizzati diversi materiali intelligenti come materiali piezoelettrici, elettrostrittivi, magnetostrittivi, reologici, a memoria di forma (termicamente sensibili), sensibili al pH ed elettrocromici [1].

Gli attuatori convertono gli stimoli in ingresso (energia elettrica, meccanica, termica, ottica o chimica, campo magnetico) in un'azione. A seconda della conversione di energia dagli stimoli in ingresso all'azione in uscita, nella Tabella 1.1 sono presentati diversi attuatori.

Principalmente, gli attuatori integrano materiali piezoelettrici [2, 3], elettrostrittivi [4], elettrocromici [5], magnetostrittivi [6, 7], a memoria di forma [8] aventi conducibilità termica, bassa resistenza superficiale, sensibilità al pH, proprietà reologiche e magnetiche. Gli attuatori reagiscono agli stimoli in ingresso (energia elettrica, meccanica, ottica, chimica o termica) e generano un'azione o una conversione di un tipo di energia in un altro (Tabella 1.1). Ad esempio, è noto che i muscoli artificiali (Figura 10.1) si basano su polimeri elettroattivi [9, 10]. Per sviluppare attuatori tessili vengono utilizzate tecnologie classiche (maglia, tessitura, cucito) combinate con tecnologie avanzate come plasma RF, polverizzazione catodica, stampa 3D e microonda.

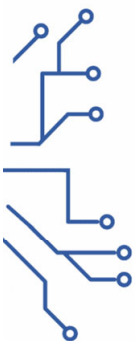
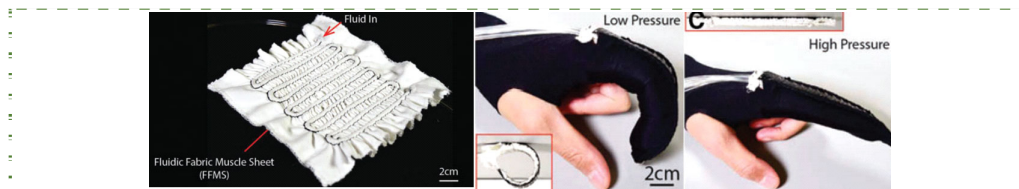




Figura 10.1 Polimeri elettroattivi a base di muscoli artificiali [11]

10.2 Tipologie e produzione degli attuatori

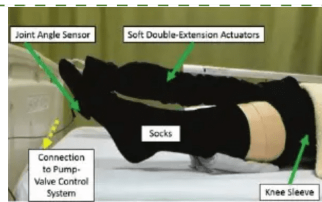
Gli attuatori possono essere morbidi o duri, a seconda della flessibilità del materiale. Gli attuatori morbidi sono materiali flessibili ed estensibili con proprietà variabili e reversibili. Gli attuatori morbidi (Figura 10.2) sono utilizzati per dispositivi indossabili, fogli muscolari in tessuto fluidico (FFMS - Figura 10.2 a), muscoli artificiali (muscoli artificiali pneumatici (PAM) realizzati con tecnologie di intreccio o maglieria - Figura 10.2 b), esocalze lavorate a maglia per riabilitazione (Figura 10.2 c), guanto per riabilitazione (Figura 10.2 d), guanto aptico per VR (Figura 10.2 e), attuttore dielettrico in elastomero (DEA - Figura 10.2 f) e soft grip. D'altra parte, gli attuatori rigidi realizzati con materiali rigidi con proprietà invarianti non sono adatti per dispositivi portatili perché sono scomodi.



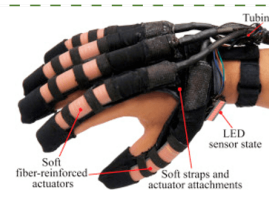
a. Attuatore tessile - fogli muscolari del tessuto fluidico (FFMS) [12]



B. Ortesi assistita elettrica per PAM basati sul gomito [13]



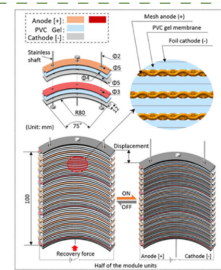
c. Exosocks per la riabilitazione [14]



D. Dispositivo robotico assistito dalla mano [15]



e. Attuatore EM per guanto tattile [16]



F. Attuatore in elastomero dielettrico (DEA) per la riabilitazione dell'articolazione dell'anca [17]

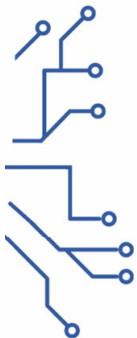


Figura 10.2 Applicazioni di textuator (attuatori morbidi).

La Figura 10.3 presenta il principio di azione per i textuator realizzati mediante tessitura o lavorazione a maglia.

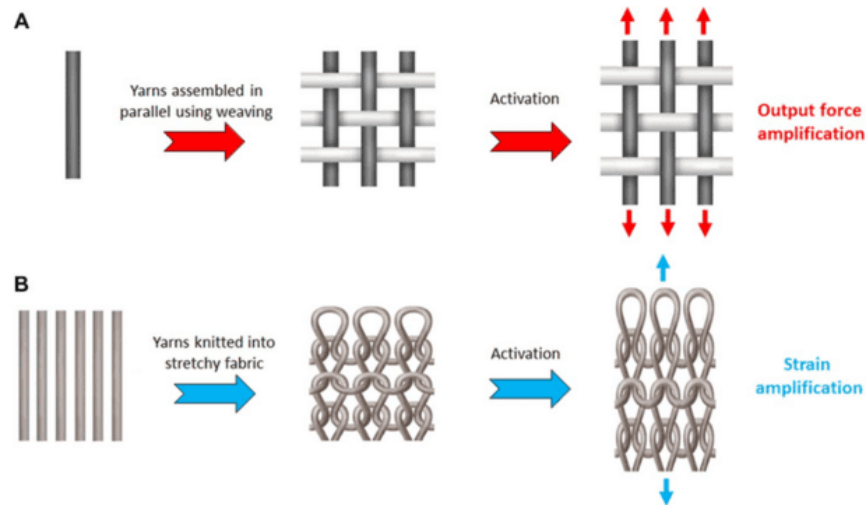


Figura 10.3 Textuator: A – la tessitura dei fili ha amplificato la forza in parallelo; B – la deformazione è stata amplificata dalla lavorazione a maglia di filati in una struttura a maglia di trama [18]

La Figura 10.4 presenta diversi materiali avanzati utilizzati per gli attuatori morbidi.

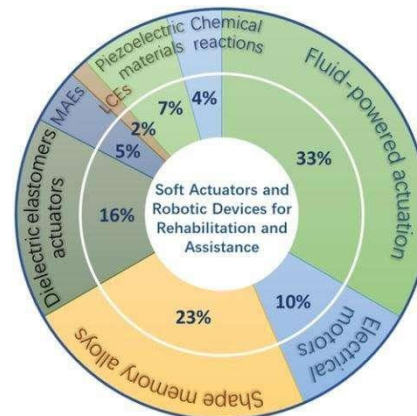
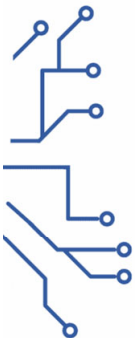


Figura 10.4 Attuatori morbidi basati su elastomeri dielettrici, SMA, MAE, LCE e materiali piezoelettrici [19]



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Tabella 10.1 Tipo di attuatori

Tipo di attuatore	Stimolo di ingresso	Risposta in uscita	Azione	tipo di materiale	Esempio
Termico	Energia termica	Energia meccanica [19] (cinetico/movimento)	Termomeccanico (contrazione/espansione)	Energia termica	Tessuti intelligenti ad attuazione termica
Termoelettrico	Energia termica	Elettrico	Termoelettrico	Termoelettrico	Trasformare il calore in elettricità
Elettromagnetico	Energia elettrica	Meccanico	Elettromeccanico	Elettromagnetico	Attuatori elettromagnetici per il rendering dell'optica in VR
Piezoelettrico	Energia meccanica	Elettrico	Piezoelettrico	Piezoelettrico	Fibra piezoelettrica per tessuti sensibili al movimento
Optoelettronico	Energia ottica	Elettrico	Optoelettronico	Fotoelettrico	Energia fotovoltaica dal tessile
Elettro-fotonico	Energia elettrica	Ottico	Elettro-fotonico	Elettrofotonico	LED in Tessile per Abbigliamento Intelligente
Fototermico	Energia luminosa	Termico	Fototermico	Fototermico	tessuto fototermico a cambiamento di fase
Magnetoreologico	Campo magnetico	Effetto magnetoelastico (deformazione)	Meccanico (deformazione elastica)	Magnetoelastico	Fibre magnetoelastiche
Elettrochimico	Energia elettrica	Chimico	Elettrochimico	Elettrochimico	Attuatore a filo ritorto
Fotochimico	Energia luminosa	Chimico	Fotochimico	Fotochimico	FET di tipo fibra





10.3 Conclusioni

Gli attuatori convertono gli stimoli in ingresso in azioni in uscita (meccaniche, chimiche, magnetiche, elettriche e termiche) e sono principalmente utilizzati per la robotica (arto protesico, esoscheletro) e la riabilitazione dei muscoli artificiali. Gli attuatori morbidi possono essere ottenuti in base alle tecnologie tessili (tessitura, maglieria, intrecciatura).

Riferimenti

1. Aileni, R.M., Project 3D Electrotex.
2. Sorayani, B., Sadeghi, M.S., Latifi, A.H. and Bagherzadeh, R. Design and fabrication of a piezoelectric out-put evaluation system for sensitivity measurements of fibrous sensors and actuators. *Journal of Industrial Textiles*, 2021, 50(10), 1643-1659.
3. Dagdeviren, C., Joe, P., Tuzman, O.L., Park, K.I., Lee, K.J., Shi, Y., Huang, Y. and Rogers, J.A. Recent progress in flexible and stretchable piezoelectric devices for mechanical energy harvesting, sensing and actuation. *Extreme mechanics letters*, 2016, 9, 269-281.
4. Cottinet, P.J., Guyomar, D., Guiffard, B., Lebrun, L. and Putson, C. Electrostrictive polymer composite for energy harvesters and actuators, 2011.
5. Moretti, C., Tao, X., Koehl, L. and Koncar, V. Electrochromic textile displays for personal communication. In *Smart textiles and their applications*. Woodhead Publishing, 2016.
6. Zhao, X., Zhou, Y., Xu, J., Chen, G., Fang, Y., Tat, T., Xiao, X., Song, Y., Li, S. and Chen, J. Soft fibers with magnetoelasticity for wearable electronics. *Nature communications*, 2021, 12(1), 1-11.
7. Spizzo, F., Greco, G., Del Bianco, L., et al. Magnetostrictive and Electroconductive Stress-Sensitive Functional Spider Silk. *Advanced Functional Materials*, 2022, 2207382.
8. Chan Vili, Y.Y. Investigating smart textiles based on shape memory materials. *Textile Research Journal*, 2007, 77(5), 290-300.
9. Bar-Cohen, Y. Electroactive polymers as artificial muscles: a review. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2002, 39(6), 822-827.
10. Carpi, F. and De Rossi, D. Electroactive polymer-based devices for e-textiles in biomedicine. *IEEE Transactions on Information Technology in biomedicine*, 2005, 9(3), 295-318.
11. Jager, E.W., Martinez, J.G., Zhong, Y. and Persson, N.K. Soft actuator materials for textile muscles and wearable bioelectronics. In *Wearable Bioelectronics*, 2020, 201-218.
12. Zhu, M., Do, T.N., Hawkes, E. and Visell, Y. Fluidic fabric muscle sheets for wearable and soft robotics. *Soft robotics*, 2020, 7(2), 179-197.
13. Pneumatic artificial muscles for orthosis, online available: atlasofthefuture.org/project/pneumatic-artificial-muscles-for-orthosis
14. Low, F.Z., Yeow, R.C., Yap, H.K. and Lim, J.H. Study on the use of soft ankle-foot exoskeleton for alternative mechanical prophylaxis of deep vein thrombosis. *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, 2015, 589-593.
15. Polygerinos, P., Wang, Z., Galloway, et al. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 73, 135-143.
16. Vechev, V., Zarate, J., Lindlbauer, D., Hinchet, R., Shea, H. and Hilliges, O. March. Tactiles: Dual-mode low-power electromagnetic actuators for rendering continuous contact and spatial haptic patterns in VR. *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2019, 312-320.



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

17. Li, Y. and Hashimoto, M. PVC gel soft actuator-based wearable assist wear for hip joint support during walking. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(12), 125003.
18. Maziz, A., Concas, A., Khaldi, A., Stålhund, J., Persson, N.K. and Jager, E.W. Knitting and weaving artificial muscles. *Science advances*, 2017, 3(1), e1600327.
19. Pan, M., Yuan, C., Liang, X., Dong, T., Liu, T., Zhang, J., Zou, J., Yang, H. and Bowen, C. Soft Actuators and Robotic Devices for Rehabilitation and Assistance. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 4(4), 2100140.
20. Yang, Y., Wu, Y., Li, C., Yang, X. and Chen, W. Flexible actuators for soft robotics. *Advanced Intelligent Systems*, 2020, 2(1), 1900077.



Capitolo 11. DEFINIZIONI, SVILUPPO E APPLICAZIONI DEI MATERIALI SENSORIALI

Athanasios Panagiotopoulos, Georgios Priniotakis e Ioannis Chronis, Università dell'Attica occidentale, Grecia

11.1 Introduzione

I sensori sono una parte essenziale delle innovazioni attuali. Sono il fulcro della cosiddetta 4° rivoluzione industriale e della prossima generazione di Internet, o Internet delle cose come è comunemente noto. Quando ci riferiamo a un sensore, potremmo descriverlo come un dispositivo, un modulo, una macchina o anche un sottosistema, in grado di rilevare o misurare uno o più parametri dell'ambiente circostante. I sensori misurano questi parametri (input) e forniscono (trasmettono) i risultati (valori) secondo la struttura del dispositivo di misurazione di cui fanno parte.

I sensori vengono utilizzati in un'ampia varietà di applicazioni, dalla medicina alle scienze ambientali. I recenti sviluppi nella progettazione dei sensori hanno diversificato le loro applicazioni e i materiali in cui possono essere incorporati. Diventano più piccoli, più economici e più efficienti. Sono anche in grado di operare in ambienti difficili e durare più a lungo. I materiali in micro e nano scala hanno fornito questi miglioramenti, così come le tecnologie digitali. Anche le tecniche utilizzate per la fabbricazione dei sensori sono qualcosa di fondamentale da considerare. Nuovi metodi, come la stampa di circuiti elettronici, sono stati utilizzati con risultati impressionanti.

I sensori vengono trasportati nelle attività quotidiane, spesso senza essere esplicitamente realizzati dall'utente. Ad esempio, gli smartphone hanno molti sensori diversi che vengono utilizzati in varie attività e applicazioni come bussola, accelerometro, sensori di prossimità, sensori di orientamento e dispositivi luminosi, solo per citarne alcuni. I sensori nella scienza medica sono vitali per il rilevamento, il monitoraggio, il trattamento e la cura delle malattie. Non è un'esagerazione dire che la civiltà attuale sia immersa nelle tecnologie relative ai sensori.

I dispositivi indossabili dipendono dai sensori per segnalare parametri come la distanza percorsa, la frequenza cardiaca e la saturazione di ossigeno nel sangue, tra gli altri. La temperatura del corpo umano e dell'ambiente può essere misurata anche tramite sensori miniaturizzati per la relativa applicazione.

11.2 Sensori indossabili per il monitoraggio della salute

I sensori indossabili possono essere fabbricati con numerosi metodi di trasduzione diversi che includono resistivo, capacitivo, piezoelettrico e triboelettrico. Tutti questi approcci riportano segnali che utilizzano elettroni.

I sensori indossabili possono essere suddivisi in tre categorie principali in base ai segnali biologici misurati, ovvero sensori elettrofisiologici, fisici e chimici [1]



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

11.3 Sensori elettrofisiologici

Nei sensori elettrofisiologici è fondamentale progettare elettrodi epidermici sottili, conformi e biocompatibili per ridurre l'impedenza di contatto pelle-elettrodo. La costante vicinanza del contatto è la chiave per ridurre l'impedenza di contatto pelle-elettrodo. I sensori elettrofisiologici rilevano la differenza di potenziale elettrico tra gli elettrodi in tessuti specializzati come il cuore (elettrocardiografo (ECG)), il cervello (elettroencefalografia (EEG)) e il muscolo (EMG).

Questi portano a una varietà di prodotti finali che includono EEG epidermico, ECG adesivo, ECG epidermico, Grafene EEG e EMG a base di seta. [2]

Sensori fisici

I sensori fisici rilevano i segnali fisici del corpo umano. Esistono diversi segnali fisici relativi alla salute umana, come la pressione sanguigna, la temperatura corporea e l'allungamento muscolare o cutaneo. Nella progettazione di sensori di pressione conformi alla pelle sono stati sfruttati materiali come nanofili d'argento, nanofili d'oro, nanotubi di carbonio, grafene, polimeri conduttori, liquidi ionici e metalli liquidi.

I parametri chiave esaminati per questi sono la sensibilità, l'isteresi e la durata.

I sensori fisici misurano pressione, temperatura, luce, tensione e suono. Le applicazioni di tali sensori possono essere trovate sui sensori di temperatura del tatuaggio, rilevamento dei gesti, grado di flessione, movimento degli arti e allenamento muscolare.

Sensori chimici

Nei sensori chimici, nella loro produzione potrebbero essere utilizzati materiali come ioni di potassio e sodio, ioni di cloruro, acido lattico e glucosio. Alcuni di questi sensori sono rilevatori di glucosio nel sangue, rilevatori microfluidici di sudore, sensori di idratazione e sensori tessili multi-ione che vengono utilizzati nella diagnosi della fibrosi cistica.

Proprietà del sensore

Gli obiettivi principali di un sensore utile sono la fornitura di risultati accurati, durata, basso costo e innocuità per le persone e l'ambiente.

Per fornire le suddette caratteristiche sono necessarie una serie di proprietà desiderate, vale a dire l'elasticità, modularità, scalabilità, proprietà autorigeneranti e trasparenza, tra le altre. Per ottenere tutto ciò è importante l'utilizzo di materiali nanostrutturati, conduttori ionici a base di gel, elettronica stampata, elettrodi estensibili e l'utilizzo di elettronica biorisorbibile.

Inoltre, il biorisorbimento, la biocompatibilità, il consumo energetico e la permeabilità potrebbero essere raggiunti attraverso il rilevamento dell'esposizione ambientale, il rilevamento di fattori di salute e lo sviluppo di sistemi autoalimentati.



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Inoltre, la conducibilità, sensibilità, campo di rilevamento, affidabilità, selettività e idrorepellenza sono fondamentali per sensori di temperatura, sensori di deformazione e pressione, sensori elettrofisiologici, sensori ottici ed elettrochimici. [3]

Elasticità

Un sensore che verrebbe utilizzato in un dispositivo indossabile o fissato al corpo umano deve essere estensibile. I modi per ottenere l'elasticità includono il ridimensionamento della dimensione dei materiali usati come elettrodi [4], l'uso di polimeri elastici, idrogel e liquidi ionici [5].

Fattore di forma

Per quanto riguarda il fattore di forma, l'obiettivo è creare sensori flessibili, indossabili, sottili e asciutti che siano trasparenti, leggeri e confortevoli [6].

Trasparenza

Per l'utilizzo del sensore nel corpo umano è richiesta la trasparenza. I film polimerici trasparenti e la limitazione della larghezza delle linee degli elettrodi metallici sono alcuni dei modi per ottenerlo. Altri includono l'uso di pellicole elastiche trasparenti di nanotubi di carbonio, nanofili di silicio e nanofili metallici [7, 8].

Biocompatibilità

La bassa tossicità è vitale per l'uso a lungo termine dei sensori sulla pelle umana. Per questo si potrebbe utilizzare l'incapsulamento o la composizione con materiali biocompatibili. Un altro modo è utilizzare adesivi secchi senza gel [9, 10].

11.4 Materiali utilizzati nei sensori

Ogni tipo di sensore include materiali specifici che sono stati utilizzati, esaminati o sono in fase di ricerca ed esame per il potenziale da utilizzare. Il tipo di materiali dipende fortemente dalla potenziale applicazione.

Per i sensori di temperatura sono stati segnalati Cr e Au su patch in silicone [11].

Per i sensori elettrofisiologici vengono utilizzati Au-Ag NW, CNT e AgNW [12, 13].

I sensori di pressione e deformazione sono costituiti da nanofibre AgNW/poliammide, microparticelle ZnO a forma di riccio di mare e reti di matrici estensibili e conformabili su substrati PVA o PDMS [14, 15]

I sensori elettrochimici utilizzano PEDOT: PSS su substrato SEBS e cortisolo basato su OECT.



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Materiali intelligenti per sensori

A causa dello scoppio della pandemia di COVID-19, gli sviluppi nei materiali intelligenti utilizzati per i sensori sono stati accelerati e hanno mostrato una crescita significativa.

I materiali intelligenti si intersecano in più discipline che vanno dalla scienza dei materiali, alla chimica, alla fisica, all'ingegneria e alla nanotecnologia [16].

I materiali più comuni di questo tipo sono nanomateriali, grafene, nanoparticelle di carbonio, materiali inorganici, nanoparticelle organiche, polimeri conduttivi e isolanti e materiali ibridi.

11.5 Conclusione

I sensori intercettano le vite umane in innumerevoli modi diversi. È essenziale sviluppare sensori migliori con capacità più elevate per integrarli con successo in più aspetti della nostra società. Sensori per il monitoraggio della salute e dello sport, sensori per monitorare le metriche ambientali, il tempo, il mare, gli animali sono solo alcuni dei campi importanti che dipendono da questi sviluppi.

La ricerca sui materiali che hanno il potenziale per portare a sensori più complessi e sofisticati è in corso e avviene in tutto il mondo nei laboratori di ricerca e nelle università.

Riferimenti

1. Ling, Y., Tiance, A., Lim Wei, Y., Zhu, B., Gong, S., Wenlong, Ch. Disruptive, Soft, Wearable Sensors. *Advanced Materials*, 2019. doi:10.1002/adma.201904664
2. Ha, M., Lim, S., Ko, H. Wearable and flexible sensors for user-interactive health-monitoring devices. *Journal of Materials Chemistry B*, 2018. doi:10.1039/C8TB01063C
3. Lim, H.R., Kim, H.S., Qazi, R., Kwon, Y.T., Jeong, J.W., Yeo, W.H. Advanced Soft Materials, Sensor Integrations, and Applications of Wearable Flexible Hybrid Electronics in Healthcare, Energy, and Environment. *Advanced Materials*, 2019. doi:10.1002/adma.201901924
4. Koo, J.H., Kim, D.C., Shim, H.J., Kim, T.H., Kim, D.H. Flexible and Stretchable Smart Display: Materials, Fabrication, Device Design, and System Integration. *Advanced Functional Materials*, 2018. doi:10.1002/adfm.201801834
5. Trung, T.Q., Lee, N.-E. *Advanced Materials*, 2017, 29, 1603167.
6. Wen, Z., Yang, Y., Sun, N., Li, G., Liu, Y., Chen, C., Shi, J., Xie, L., Jiang, H., Bao, D., Zhuo, Q., Sun, X., *Advanced Functional Materials*, 2018, 28. <https://doi.org/10.1002/adfm.201803684>
7. Lipomi, D.J., Vosgueritchian, M., Tee, B.C., Hellstrom, S.L., Lee, J.A., Fox, CH., Bao, Z. Skin-like pressure, and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes. *Nat Nanotechnology*, 2011, 6(12), 788-792. Doi: 10.1038/nano.2011.184. PMID: 22020121.
8. Miyamoto, A., Lee, S., Cooray, N.F., Lee, S., Mori, M., Matsuhisa, N., Jin, H., Yoda, L., Yokota, T., Itoh, A., Sekino, M., Kawasaki, H., Ebihara, T., Amagai, M., Someya, T. Inflammation-free, gas-permeable, lightweight, stretchable on-skin electronics with nano meshes. *Nat Nanotechnology*, 2017, 12(9), 907-913. doi: 10.1038/nnano.2017.125. Epub 2017 Jul 17. PMID: 28737748.
9. Wang, C.Y., Xia, K.L., Wang, H.M., Liang, X.P., Yin, Z., Zhang, Y. *Advanced Materials*, 2019, 31, <https://doi.org/10.1002/adma.201801072>



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

10. Wang, C., Li, X., Hu, H., Zhang, L., Huang, Z., Lin, M., Zhang, Z., Yin, Z., Huang, B., Gong, H., Bhaskaran, S., Gu, Y., Makihata, M., Guo, Y., Lei, Y., Chen, Y., Wang, C., Li, Y., Zhang, T., Chen, Z., Pisano, A.P., Zhang, L., Zhou, Q., Xu, S. Monitoring of the central blood pressure waveform via a conformal ultrasonic device. *Nat Biomed Eng.*, 2018, 2(9), 687-695. doi: 10.1038/s41551-018-0287-x. Epub 2018 Sep 11. PMID: 30906648; PMCID: PMC6428206.
11. Krishnan, S.R., Su, C.-J., Xie, Z., Patel, M., Madhvapathy, S.R., Xu, Y., Freudman, J., Ng, B., Heo, S.Y., Wang, H., Ray, T.R., Leshock, J., Stankiewicz, I., Feng, X., Huang, Y., Gutruf, P., Rogers, J.A. *Small*, 2018, 14. <https://doi.org/10.1002/sml.201803192>
12. Son, D., et al. An integrated self-healable electronic skin system fabricated via dynamic reconstruction of a nanostructured conducting network. *Nature nanotechnology*, 2018, 13(11), 1057-1065.
13. Choi, S., Han, S.I., Jung, D., et al. Highly conductive, stretchable, and biocompatible Ag–Au core–sheath nanowire composite for wearable and implantable bioelectronics. *Nature Nanotech*, 2018, 13, 1048–1056. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0226-8>
14. Fan, Y.J., Li, X., et al. *ACS Nano*, 2018, 12, 9326.
15. Yin, B., Liu, X., et al. *Nat. Commun*, 2018, 9, 5161
16. Özgecan, E., Esmâ, D., Kutay, S., Eylül, G.Y., Fatih, I. Smart materials-integrated sensor technologies for COVID-19 diagnosis. *Emergent Materials*, 2021. doi:10.1007/s42247-020-00150-w



Capitolo 12. VALUTAZIONE DEL COMFORT SENSORIALE

David Gómez, AEI Tèxtils, Sviluppo aziendale, Barcellona, Spagna

12.1 Introduzione

Il comfort sensoriale gioca un ruolo determinante nella valutazione del tessuto. Questo concetto è solitamente usato per descrivere la sensazione del tessuto riguardo al suo contatto con la pelle umana rispetto alla levigatezza, setosità o altre qualità qualitative che aggiungono vestibilità al tessuto. Può anche essere chiamato mano di tessuto o tatto di tessuto per via delle allusioni dirette al grado di sensibilità e comodità del corpo quando è a contatto con la fibra [1]. È importante ricordare che a seconda delle preferenze della persona che indossa il tessuto in questione, le variabili che ne determinerebbero la qualità e la comodità varieranno, poiché questo tipo di valutazione è del tutto soggettiva [2].

Il contatto meccanico del tessuto con la pelle è ciò che provoca la presenza o la mancanza della sensazione di comfort. Può essere aderente ad una pelle bagnata di sudore, graffiante o troppo rigida, che comunemente viene avvertita come una sensazione sgradevole, oppure può essere morbida e liscia, sensazioni attribuite alla comodità e alla piacevolezza. Inoltre, alcuni tessuti possono persino produrre irritazioni quando entrano in contatto con la pelle per contatto meccanico. Quello sarebbe classificato come tessuto scomodo. [3] È molto probabile che i tessuti intelligenti producano questo tipo di effetto a causa dei fili conduttivi che potrebbero avere nella loro struttura.

Anche l'attrito e la rugosità del tessuto e il modo in cui si comportano sulla pelle umana sono fattori chiave per valutare il comfort del tessuto. Questo contatto e/o sfregamento, insieme alla rugosità o levigatezza del tessuto, sono ciò che genera la sensazione che viene valutata in seguito. In generale, la scorrevolezza è associata alla merce e viene data una buona valutazione[4].

12.2 Fattori chiave per la valutazione del comfort

Le sensazioni più specifiche del tessuto che possono essere considerate nella valutazione della comodità di una fibra, stoffa o tessuto, sono le seguenti [5]:

In primo luogo, possiamo parlare delle sensazioni tattili più genetiche: pungente, solletico, ruvido, liscio, scosceso, graffiante, pruriginoso, fastidioso, appiccicoso.

Come già accennato, la forza di attrito gioca un ruolo importante nella valutazione fisica di una fibra o di un tessuto: una superficie irregolare o ruvida della fibra genererà sempre più attrito di una superficie liscia [6]. Quindi, la forza richiesta per muovere il tessuto lungo la pelle durante il contatto tessuto-pelle è contrastata dalla forza di attrito creata da tale contatto. Quando la forza applicata supera la forza di attrito, si verifica il movimento del tessuto contro la pelle. Le caratteristiche di attrito delle superfici di scorrimento sono spesso descritte dal coefficiente di attrito che è definito come il rapporto tra la forza di



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

trascinamento (parallela a una superficie) e la forza normale che preme sulla superficie di contatto [7, 8].

In secondo luogo, le sensazioni che la presenza o l'assenza di umidità può generare nella fibra, ad esempio se è appiccicosa, umida, bagnata, appiccicosa, pesante, non assorbente, appiccicosa.

Alcuni studi suggeriscono che la presenza di umidità aumenta l'attrito tra il tessuto e la pelle; quindi, la sensazione umana al tessuto in queste condizioni è più ruvida che in un ambiente secco. In altre parole, maggiore è la presenza di umidità maggiore è la percezione di attrito e di non comfort. Quindi, la reazione all'umidità diventa una chiave importante per la valutazione del comfort sensoriale [9].

Il numero di filamenti di un filato cambia anche la sensazione al tatto di un tessuto: maggiore è il numero di filamenti, più morbido sarà il tessuto. Per questo i microfilamenti vengono utilizzati in alcune applicazioni specifiche che devono generare una piacevole sensazione a contatto con la pelle. Quando si parla di tessuti intelligenti, i filati conduttivi hanno proprietà diverse rispetto ai filati del tessuto, e il concetto di microfilamento non viene utilizzato. Anche la rigidità dei fili conduttivi può giocare un ruolo importante nella scorrevolezza del tessuto.

Alcune di queste proprietà sono facilmente modificabili nei tessuti sintetici piuttosto che nelle fibre naturali (specialmente quelle vegetali).

Quindi, la vestibilità o l'adattamento al corpo e come ci si sente, come aderente, lento, leggero, pesante, morbido, rigido.

E, infine, una variabile importante sono le e sensazioni termiche: freddo, fresco, tiepido, caldo.

12.3 Innovazione e comfort

Un campo che richiede un'elevata performance dei tessuti e una sensazione di comfort così accurata è essenziale è il mercato dell'abbigliamento sportivo. In questo campo di applicazione, gli atleti non hanno solo bisogno di sentirsi a proprio agio in condizioni normali, ma per attività specifiche significa movimenti ripetuti per lunghi periodi che mettono alla prova l'attrito del tessuto con la pelle, come il tessuto reagisce all'umidità e al sudore, la sua resistenza e protezione alle condizioni climatiche avverse (ambienti sia ad alta che a bassa temperatura),... Quindi, in effetti, questo è il motivo per cui il mondo dello sport esemplifica correttamente la valutazione del comfort dei tessuti. Inoltre, il connubio tra innovazione, sport e comfort è attualmente sotto i riflettori [10]. In tal senso, un'interessante raccolta di esempi è rappresentata di seguito [10]:



2020-1-RO01-KA226-HE-095335



Figura 12.1 Prodotti intelligenti Sensoria (t-shirt senza maniche, reggiseno sportivo, calzini e scarpe da corsa)

Il marchio Sensoria ha sviluppato diverse linee di prodotti intelligenti legati all'abbigliamento sportivo. La gamma comprende vestiti, da scarpe da ginnastica e calze a t-shirt. La particolarità di questi prodotti innovativi è che sono in grado di monitorare la frequenza cardiaca, velocità, calorie e distanza, tra gli altri.

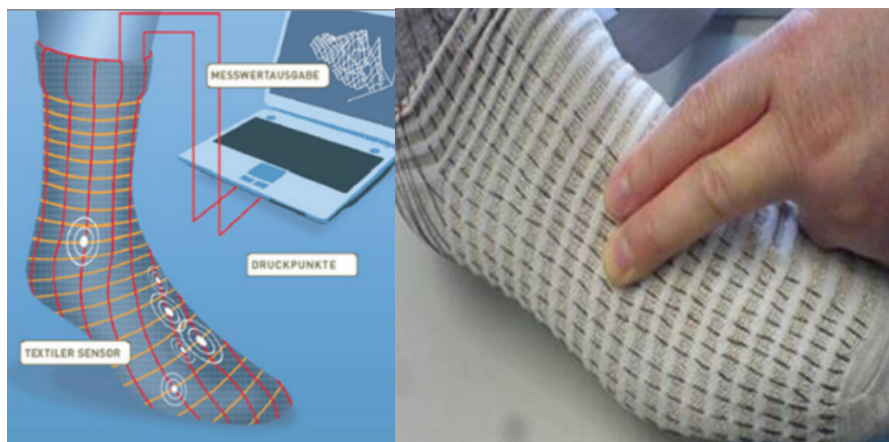


Figura 12.2 SmartSock di Alphafit per misurare la vestibilità

SmartSock è un prodotto con proprietà e funzioni interessanti. Dà la possibilità di valutare la calzata del piede all'interno della scarpa.



2020-1-RO01-KA226-HE-095335



Figura 12.3 Fascia antisudore e cuffia da nuoto Moov HR

MOV HR è una fascia antisudore in grado di monitorare le costanti umane come la frequenza cardiaca o fornire ingressi più personalizzati, in quanto può essere collegato e sincronizzato agli auricolari. Inoltre, può essere utilizzato sotto una cuffia da nuoto.



Figura 12.4 Fodera per giacca riscaldata Venture Heat Deluxe

La fodera per giacca riscaldata Venture Heat Deluxe fornisce alla persona che la indossa una sensazione di calore che allevierebbe il freddo esterno. È particolarmente utile per piloti di moto.

Tutti questi articoli necessitano di un elevato livello di comfort per funzionare correttamente e non disturbare l'attività dell'atleta.

12.4 Sommario

A questo punto dell'analisi, alcune affermazioni sono chiare. Da un lato, la comodità nei tessuti e nell'abbigliamento può essere valutata da più angolazioni. E dall'altra parte, possiamo dedurre che le variabili più considerate sono le migliori, dato che il comfort è, in una percentuale determinante, una qualità soggettiva. Tuttavia, per il grande pubblico, le sensazioni tattili legate alla morbidezza e ad altre condizioni, legate all'umidità, sono



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

probabilmente considerate le variabili più importanti che modulano la presenza o l'assenza di comfort.

E, infine, circa l'applicazione specifica di questa comodità nella nuova generazione di tessuti, è evidente che anche se l'innovazione dota i nuovi prodotti di nuove e molteplici applicazioni e miglioramenti, la sensazione di indossabilità non è mai un aspetto che dovrebbe essere dimenticato.

Riferimenti

1. Meinander, H., Luible, C., Magnenat-Thalmann, N. Influence of Physical Parameters on Fabric Hand. *Proceedings of the HAPTEX'05 Workshop on Haptic and Tactile Perception of Deformable Objects, Hanover, 2005*, 12.
2. Pan, N., Yen, K.C., Zhao, S.T., Yang, S.R. A New Approach to the Objective Evaluation of Fabric Handle from Mechanical Properties, Part I; Objective Measure for Total Handle. *Textile Research Journal*, 1988, 58, 438-444.
3. Bartels, V.T. Physiological comfort of bio functional textiles in Current problems in Dermatology. G. burg, Editor: Karger, Switzerland, 2006, 51-66.
4. LaMotte, R.H. Psychophysical and Neurophysiological Studies of Tactile Sensibility, in Clothing comfort. N.R.S. Hollies and R.F. Goldman, Editors: Michigan, 1977, 83-105.
5. Sundaresan, S., and Dasaradan, B.S. Comfort Properties of Apparels. *The Indian Textile Journal*, 2007, 32, 2-10.
6. Bhupender, E.M., and Gupta, S. Friction in Fibrous Materials. *Textile Research Journal*, 1991, 61(9), 547-554.
7. Gwosdow, A.R., and Steven, J.C. Skin friction and fabric sensations in neutral and warm environments. *Textile Research Journal*, 1986, 56(9), 574-580.
8. Nawaza, N., Troynikovb, N., Watsonc, C. Evaluation of Surface Characteristics of Fabrics Suitable for Skin Layer of Firefighters' Protective Clothing. *International conference on Physics Science and Technology*, 2011.
9. Li, Y., ed. The Science of clothing comfort. *The Textile Institute, Textile Progress*, Oxford, UK, 2001, 103
10. Kazani, I., Lutz, V., Malik, S., Mazari, A., Nierstrasz, V., Rodrigues, L., Tedesco, S. CONTEXT-COST, *Smart textiles for sportswear and wearables (WG5)*, 2021.



Capitolo 13. MATERIALI FOTONICI PER APPLICAZIONI SENSORIALI

Athanasios Panagiotopoulos, Georgios Priniotakis e Ioannis Chronis, Università dell'Attica occidentale

13.1 Introduzione

La fotonica è un campo di studio che coinvolge l'uso della radiazione nello spettro di frequenza della luce utilizzando l'elemento fondamentale della luce, che è il fotone. C'è rilevanza tra le applicazioni elettroniche e le applicazioni fotoniche: le applicazioni elettroniche usano gli elettroni e le applicazioni fotoniche usano il fotone in modo simile. La fotonica ha vantaggi specifici rispetto all'elettronica, e questo è il motivo per usarla.

Una varietà di componenti fotonici è già disponibile e utilizzata in applicazioni comuni, come laser, fibre ottiche, fotocamere e schermi di telefoni cellulari, pinzette ottiche, illuminazione di veicoli ed edifici, schermi di computer e TV e molti altri.

Con il termine "materiali fotonici" ci riferiamo a materiali che emettono, rilevano, manipolano o controllano la luce. I dispositivi fotonici emettono, trasferiscono e rilevano la luce e sono costruiti utilizzando componenti come diodi laser, diodi emettitori di luce, celle solari e fotovoltaiche, display e amplificatori ottici.

13.2 Uso di materiali fotonici nei sensori

Una famiglia comune di materiali utilizzati come elementi di rilevamento sono i cristalli colloidali autoassemblati. Sono cristalli in micro o addirittura nano scala che vengono adagiati su un substrato, in dispersione finissima. Di solito sono prodotti da una soluzione. La struttura e la natura dei materiali componenti determinano i gap di banda fotonica e il colore strutturale di questi e per questo motivo sono utili come elementi di rilevamento in varie applicazioni. [1].

I sensori fotonici presentano alcuni vantaggi rispetto ai sensori elettronici convenzionali. Si tratta di alta sensibilità, bassa isteresi, immunità ai disturbi elettromagnetici [2]

Materiali

Le tecnologie disponibili e l'uso dei sensori fotonici si sono sviluppati negli ultimi anni. Le principali categorie di questi materiali sono presentate nella Figura 13.1.

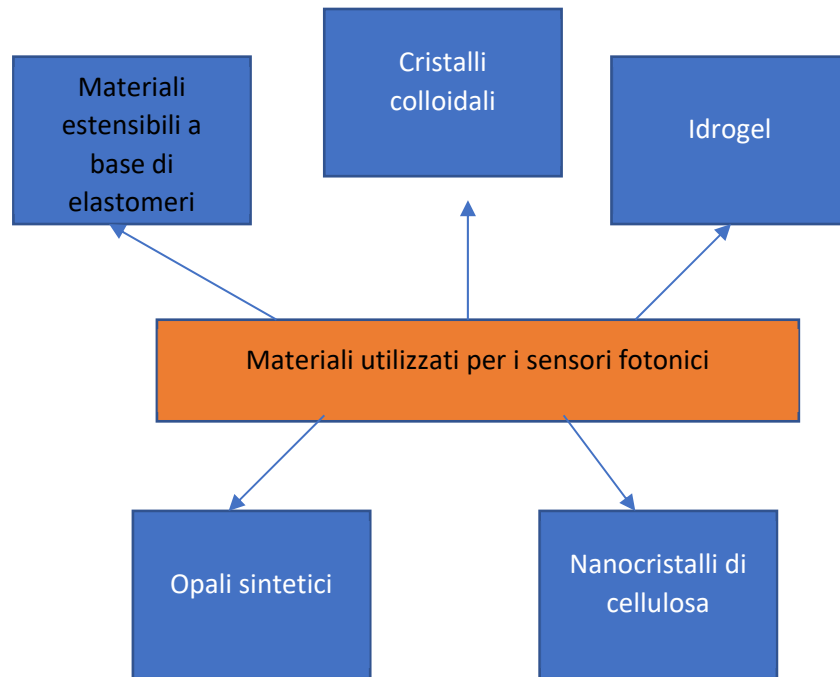


Figura 13.1Materiali utilizzati nelle applicazioni fotoniche

Materiali estensibili a base di elastomeri

Un componente comune dei tessuti intelligenti sono i materiali estensibili funzionali e molto spesso gli elementi conduttori estensibili. Il substrato è solitamente un elastomero che funziona sia come matrice per riempitivi e reti conduttive, sia come materiale di supporto per pellicole conduttive, tracce e dispositivi funzionali [3]. La caratteristica desiderata degli elastomeri è la loro natura flessibile, il che significa che resistono alle forze di deformazione e possono mantenere la loro forma originale ripetutamente dopo l'applicazione della deformazione, per migliaia di cicli di allungamento/rilascio. I sensori estensibili forniscono funzioni come la trasparenza ottica, che facilita le applicazioni ottiche in optoelettronica, fotorivelatori, dispositivi a emissione di luce, celle solari [4, 5].

Il polidimetilsilossano (PDMS) è il materiale elastomerico più utilizzato nelle relative applicazioni. È un polimero minerale-organico contenente Silicone ed è un prodotto commerciale maturo, poiché è già sul mercato da molto tempo [6].

Inoltre, i materiali elastomerici sono stati utilizzati per la fabbricazione di conduttori elettrici. I conduttori elettrici più comunemente usati sono costituiti da film metallici (sfusi), nanofili metallici, nanomateriali a base di carbonio, polimeri intrinsecamente conduttivi, metalli liquidi e liquidi ionici.



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Sono state fabbricate applicazioni basate su materiali a base di elastomeri per sensori, come estensimetri [7], sensori di pressione [8], sensori di temperatura [9], sensori di gas [10] e sensori UV [11].

Cristalli colloidali

I cristalli colloidali sono una struttura a matrice di sequenza composta da nanoparticelle monodisperse, inorganiche o organiche [12, 13]. Tutte le interessanti caratteristiche ottiche associate ai cristalli fotonici sono dovute all'esistenza di bande di energia [14].

I cristalli fotonici sono classificati in base alle loro dimensioni: unidimensionali (1D), bidimensionali (2D) e tridimensionali (3D) [15]. I cristalli colloidali sono classificati nella categoria dei cristalli fotonici tridimensionali.

È stato segnalato che i cristalli colloidali sono integrati nei sensori tempo-temperatura [16].

È stato prodotto un foglio fotonico a base di cristalli colloidali, mediante l'applicazione di polistirene monodisperso (PS), su un substrato di polidimetilsilossano (PDMS). A seconda della deformazione applicata al substrato elastomerico e della sua deformazione, il colore del foglio cambia [17].

Idrogel

Gli idrogel sono materiali a due fasi, costituiti da un liquido (che solitamente è acqua) e da una struttura polimerica solida porosa e permeabile all'acqua. Qualsiasi cambiamento nella loro sintesi chimica (es. cambiamento nella concentrazione dell'acqua), produce un cambiamento nelle loro proprietà meccaniche (es. elasticità, resistenza al taglio ecc.). Un effetto simile si verifica se cambiano la loro struttura a matrice polimerica. In questo modo, adattando le loro proprietà chimiche e la loro struttura fisica, diventano sensibili agli stimoli esterni e biocompatibili; possono essere modellati in varie strutture e integrati in microsistemi [18].

La sintesi di idrogel viene eseguita in soluzioni acquose mediante l'applicazione di radiazioni UV [19], polimerizzazione radicalica termo-iniziata [20], reazione di addizione [21], autoassemblaggio di motivi di riconoscimento come coiled-coils [22], peptidi [23], ponti idrogeno [24] o DNA [25].

Gli idrogel possono essere utilizzati per i sensori, ma possono anche fungere da sensori stessi. Un'altra applicazione degli idrogel è la possibilità di essere utilizzati come biosensori.

Opali sintetici

Gli opali sintetici sono opali artificiali, ovvero silice idrata SiO_2 . Hanno la stessa composizione chimica, struttura interna, proprietà fisiche e aspetto degli opali naturali. Sono anche chiamati opali creati in laboratorio, opali coltivati in laboratorio o opali coltivati per indicare la loro origine artificiale. Gli opali sono cristalli che possono guidare o



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

intrappolare la propagazione della luce, fornendo la localizzazione della luce, che è un effetto molto desiderabile nelle applicazioni fotoniche.

Ad esempio, un riferimento per opali sintetici composti da sfere di α -SiO₂ di uguale diametro strettamente impacchettate in reticoli cubici a faccia centrata 3D con periodi di circa 200 nm, indicava che possiedono bande di arresto fotonico in tutto lo spettro visibile (400-600 nm) [26].

Nanocristalli di cellulosa

La cellulosa in nano forma (nanoparticelle- (NP) è un altro nuovo materiale promettente nelle applicazioni fotoniche. Le proprietà delle NP di cellulosa sono molto diverse dalle proprietà della cellulosa in forma sfusa. Sono state scoperte capacità di rilevamento avanzate per film sottili compositi realizzati con nanocristalli di cellulosa [27].

Le applicazioni dei nanocristalli di cellulosa si estendono a una varietà di tipi di sensori come sensori di pressione, sensori di deformazione, sensori di prossimità, sensori di gas e vapore, biosensori, sensori ottici, sensori PH, sensori fluorescenti e sensori elettrochimici [27].

La sintesi dei nanocristalli di cellulosa viene solitamente eseguita con il metodo dell'idrolisi dell'acido solforico, un metodo ben definito e consolidato. Già in uso in alcuni prodotti medici, hanno sicuramente un potenziale per i sensori indossabili [28].

13.3 Conclusioni

Le applicazioni fotoniche presentano alcuni vantaggi rispetto alle applicazioni elettroniche, in particolare l'elevata sensibilità, la bassa isteresi e l'immunità alle interferenze elettromagnetiche. L'uso di fibre ottiche in tessuti intelligenti è in atto da molto tempo, ma si limita alla parte estetica del tessuto e non fornisce alcuna funzione. L'uso di dispositivi fotonici come sensori di luce o chimici nei tessuti si basa su cristalli micro- o nano-colloidali che vengono depositati sul substrato tessile. Questi cristalli si basano su minerali come il silicio, ad esempio polistirene monodisperso su substrato di polidimetilsilossano o microcristalli di α -SiO₂. Un materiale fotonico promettente, con un potenziale significativo per i sensori indossabili, sono i nanocristalli di cellulosa.

Riferimenti

1. Zheng, H., Ravaine, S. Bottom-Up Assembly and Applications of Photonic Materials. *Crystals*, 2016, 6(5). doi:10.3390/cryst6050054
2. Peng, W., Wu, H., Flexible and Stretchable Photonic Sensors Based on Modulation of Light Transmission. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7. <https://doi.org/10.1002/adom.201900329>
3. Yu, X., Mahajan, B., Shou, W., Pan, H. Materials, Mechanics, and Patterning Techniques for Elastomer-Based Stretchable Conductors. *Micromachines*, 2016, 8(1). doi:10.3390/mi8010007

2020-1-RO01-KA226-HE-095335

4. Yao, S., Zhu, Y. Nanomaterial-enabled stretchable conductors: Strategies, materials and devices. *Adv. Mater.*, 2015, 27, 1480–1511
5. McCoul, D., Hu, W., Gao, M., Mehta, V., Pei, Q. Recent advances in stretchable and transparent electronic materials. *Adv. Electron. Mater.*, 2016, 2, 1500407
6. Vohra, A.; Filiatrault, H.L.; Amyotte, S.D.; Carmichael, R.S.; Suhan, N.D.; Siegers, C.; Ferrari, L.; Davidson, G.J.E.; Carmichael, T.B. Reinventing butyl rubber for stretchable electronics. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26, 5222–5229
7. Amjadi, M.; Kyung, K.-U.; Park, I.; Sitti, M. Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: A review. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26, 1678–1698
8. Gong, S.; Schwalb, W.; Wang, Y.; Chen, Y.; Tang, Y.; Si, J.; Shirinzadeh, B.; Cheng, W. A wearable and highly sensitive pressure sensor with ultrathin gold nanowires. *Nat. Commun.*, 2014, 5, 3132
9. Yu, C.; Wang, Z.; Yu, H.; Jiang, H. A stretchable temperature sensor based on elastically buckled thin film devices on elastomeric substrates. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95, 141912
10. Yun, J.; Lim, Y.; Jang, G.N.; Kim, D.; Lee, S.-J.; Park, H.; Hong, S.Y.; Lee, G.; Zi, G.; Ha, J.S. Stretchable patterned graphene gas sensor driven by integrated micro-supercapacitor array. *Nano Energy*, 2016, 19, 401–414
11. Yoon, J.; Hong, S.Y.; Lim, Y.; Lee, S.-J.; Zi, G.; Ha, J.S. Design and fabrication of novel stretchable device arrays on a deformable polymer substrate with embedded liquid-metal interconnections. *Adv. Mater.*, 2014, 26, 6580–6586
12. Asher, S.A., Alexeev, V.L., Goponenko, A.V., Sharma, A.C., Lednev, I.K., Wilcox, C.D., Finegold, J. *Am. Chem. Soc.*, 2003, 125, 3322
13. Pratibha, R., Park, W., Smalyukh, I.I. *J. Appl. Phys.*, 2010, 107
14. Kittel, C. Introduction to Solid State Physics. John Wiley & Sons, New York, 1976
15. Furumi, S.; Fudouzi, H.; Sawada, T. Self-organized colloidal crystals for photonics and laser applications. 2010, 4(2), 205–220. doi:10.1002/lpor.200910005
16. Schöttle, M., Tran, T.; Feller, T.; Retsch, M. Time–Temperature Integrating Optical Sensors Based on Gradient Colloidal Crystals. *Advanced Materials*, 2021. doi:10.1002/adma.202101948
17. Fudouzi, H., Sawada, T. *Langmuir*, 2006, 22, 1365
18. Buenger, D.; Topuz, F.; Groll, J. Hydrogels in sensing applications. 2012, 37(12). doi:10.1016/j.progpolymsci.2012.09.001
19. Nguyen, K.T., West, J.L. Photopolymerizable hydrogels for tissue engineering applications. *Biomaterials*, 2002, 23, 4307–14.
20. Biswal, D., Hilt, J.Z. Microscale analysis of patterning reactions via FTIR imaging: application to intelligent hydrogel systems. *Polymer*, 2006, 47, 7355–60.
21. Dalton, P.D., Hostert, C., Albrecht, K., Moeller, M., Groll, J. Structure and properties of urea-crosslinked star poly (ethylene oxide)-ran- (propylene oxide) hydrogels. *Macromolecular Bioscience*, 2008, 8, 923–31.
22. Vandermeulen, G.W.M., Tziatzios, C., Duncan, R., Klok, H.A. PEG-based hybrid block copolymers containing alpha-helical coiled coil peptide sequences: control of self-assembly and preliminary biological evaluation. *Macromolecules*, 2005, 38, 761–9.
23. Galler, K.M., Aulisa, L., Regan, K.R., D'Souza, R.N., Hartgerink, J.D. Self-assembling multidomain peptide hydrogels: designed susceptibility to enzymatic cleavage allows enhanced cell migration and spreading. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132, 3217–23
24. Dankers, P.Y.W., Harmsen, M.C., Brouwer, L.A., Van Luyn, M.J.A., Meijer, E.W. A modular and supramolecular approach to bioactive scaffolds for tissue engineering. *Nature Materials*, 2005, 4, 568–74.



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

25. Topuz, F., Okay, O. Rheological behavior of responsive DNAhydrogels. *Macromolecules*, 2008, 41, 8847–54
26. Vlasov, Yu.A.; Astratov, V.N.; Karimov, O. .; Kaplyanskii, A. A.; Bogomolov, V. .; Prokofiev, A.V. Existence of a photonic pseudogap for visible light in synthetic opals. *Physical Review B*, 1997, 55(20), R13357–R13360. doi:10.1103/PhysRevB.55.R13357
27. Ansari, J.R. Nanocellulose Based Composites for Electronics. *Nanocellulose-based materials/composites for sensors*, 2021, 185–214. doi:10.1016/B978-0-12-822350-5.00008-4
28. Kelcilene, B.R.T; Rafaela, C.S.; Fernanda, L.M.; Pavinatto, A.; Murilo H.M.F. ; Correa, D.S. A Review on the Role and Performance of Cellulose Nanomaterials in Sensors. *ACS Sensors*, 2021. doi:10.1021/acssensors.1c00473



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Capitolo 14. DANNI SUGLI E-TEXTILES

Farima Daniela, Iovan Dragomir Alina e Bodoga Alexandra, Università Tecnica "Gheorghe Asachi", Romania

Definizione

Un tessuto intelligente attivo che contiene elementi elettronici nella sua composizione, si chiama E-textile (tessuto intelligente). I tessuti elettronici sono infatti computer indossabili, o dispositivi elettronici, introdotti nei modelli di abbigliamento. I tessuti intelligenti possono essere utilizzati nelle tecnologie di interior design. Ciò suppone che i componenti elettronici vengano introdotti nei tessuti o nelle fibre [1]. Inoltre, l'e-tessile può essere utilizzato nell'abbigliamento basato su micro/nanofibre, che hanno elettronica integrata e che tolgono le forme del corpo [3, 4].

14.1 Introduzione

Gli e-textile sono caratterizzati da: elasticità, flessibilità e comodità[2]. A seconda del campo di utilizzo, gli e-textiles sono anche noti come tessuti intelligenti, tessuti smart, tecno-tessili, computer indossabili, elettronica indossabile [5, 6].

Il carattere multidisciplinare degli e-textiles presuppone:

- tessile (tessuti intelligenti);
- elettronica digitale (elettronica indossabile);
- tecnologia dell'informazione (informatica indossabile) (Figura14.1) [5].

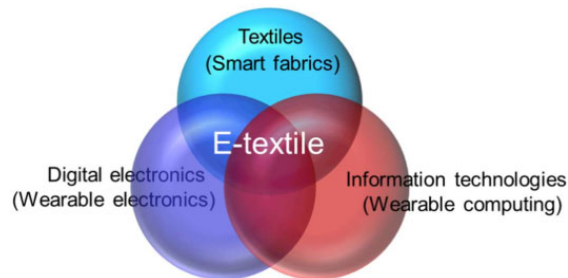


Figura 14.1 Carattere multidisciplinare degli e-textiles.

14.2 Classificazione degli e-Textiles

I tessuti elettronici possono essere classificati in 3 categorie [7]:

1. E-tessuti passivi che si basano su sensori in grado di rilevare l'ambiente.
2. Tessuto intelligente attivo che reagisce agli stimoli dall'ambiente, sulla base di una funzione attuatore e di un dispositivo di rilevamento. Un esempio di tessuto intelligente attivo è nella Figura 14.2 [8].

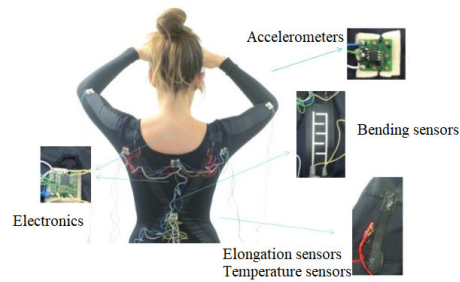


Figura 14.2 Tessuto intelligente attivo

3. Tessuti intelligenti avanzati, che percepiscono gli stimoli dell'ambiente, reagiscono e adattano il loro comportamento. Le funzioni degli e-textiles.
4. Tessuti intelligenti avanzati : in grado di percepire, reagire e adattare il proprio comportamento alle circostanze date

Le **funzioni** degli e-textiles sono presentati nella Figura 14.3.

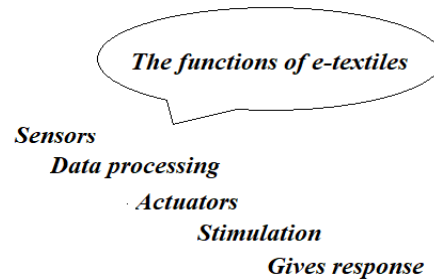


Figura 14.3 Le funzioni degli e-textiles

I sensori sono necessari per catturare i parametri dall'ambiente. L'elaborazione attiva è per l'elaborazione dei dati e per le risposte dalla funzione risultante del sensore (attuatori). La stimolazione è trovata dall'ambiente.

Le **applicazioni dei tessuti elettronici** sono per diversi campi di attività e sono presentati nella Figura 14.4 [7].

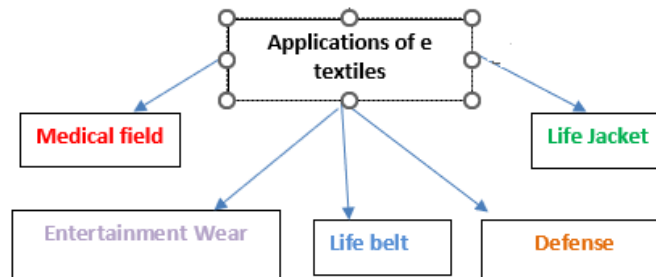


Figura 14.4 Applicazioni di e-textiles



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Materiali per tessuti elettronici

Esistono molti tipi di materiali (fibre o in qualsiasi altra forma appropriata, come circuiti di saldatura o come strato stampato) a seconda della conduttività elettrica:

- metalli;

- polimeri intrinsecamente conduttori;

compositi di particelle conduttrici/polimeri (micro o nano) [7].

-ambiente, integrando una funzione di attuatore e un dispositivo di rilevamento ambiente.

Danni dei tessuti elettronici

È molto importante che i tessuti elettronici possano essere lavati, ma questo rappresenta un grosso problema.

I fattori che influenzano il processo di lavaggio (fattori Sinners) sono:

- il tempo;

- la temperatura;

- l'azione meccanica;

- i fattori chimico/biologici [8, 9].

I problemi più comuni relativi al lavaggio degli e-textiles sono:

- Danni a rivestimenti conduttivi e strutture conduttive stampate (Figura 14.5) [10];

- Danni agli strati di metallizzazione (Figura 14.6) [15];

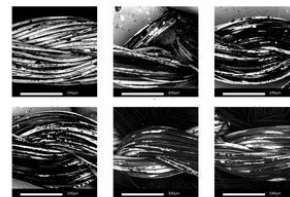
- Danni a cavi, piste conduttive e collegamenti (Figura 14.7) [16];

- Danni agli strati protettivi (Figura 14.8) [16];

- Modifiche tessili.



Figura 14.5 Danni ai rivestimenti conduttivi dovuti al lavaggio



Increased loss of metalization dependent on wash cycle: 5;10;20;40;50

Figura 14.6 La quantità di metallo dipende dal numero di cicli

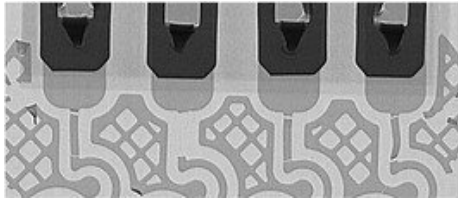


Figura 14.7 Crepe nei cingoli in rame al passaggio ai cuscinetti di contatto



Figura 14.8 Determinazione dello strato protettivo lungo le piste conduttive

Dopo diversi cicli di lavaggio, il contenuto di argento aumenta, ma la maggiore perdita di argento si ha durante i primi cicli di lavaggio [11] (Figura 14.6) [15]. La perdita di metallizzazione dipende dall'attrito tra i tessuti testati [12, 13]. Inoltre, le variazioni cicliche di temperatura durante il lavaggio determinano una discrepanza del coefficiente di dilatazione termica nei materiali coinvolti, che porta a danni [14]. Si possono osservare rotture nel metallo (nella transizione dall'area conduttiva alle piazzole di contatto) durante il lavaggio di strisce di circuiti stampati flessibili intrecciati in tessuti (Figura 14.7) [16].

I danni negli strati protettivi dipendono dalla durezza del programma di lavaggio (le forze di attrito che agiscono sui campioni porteranno all'assottigliamento e alle eventuali rotture dello strato di PU) (Figura 14.8) [17].

Altri danni durante il lavaggio sono:

- alterazioni e danneggiamenti del supporto tessile;
- raggrinzimento nei campioni di prova [18];
- pilling [17];
- aggrovigliamento delle fibre [19];
- la perdita del pre-trattamento del tessuto dopo il lavaggio [20];
- corrosione su alcuni fili conduttivi lavati;
- un oscuramento della superficie, indicativo dell'ossidazione del rivestimento d'argento [21].

14.3 Conclusioni

Il lavaggio può portare a numerosi problemi negli e-textiles. Questi guasti possono verificarsi in punti specifici del design o dappertutto, a seconda del tipo e della composizione dell'e-textile. I punti deboli sono i contatti tra diversi materiali e componenti, nonché le aree di transizione all'interno dello stesso materiale. In filati o tessuti conduttivi senza alcuna forma di protezione, possono verificarsi danni in tutta la struttura. Per ora è necessario condurre ricerche sui tipi di danno nell'e-textile sui singoli aspetti della lavabilità dell'e-textile.



Riferimenti

1. <https://www.techopedia.com/definition/29467/electronic-textile-e-textile>
2. Wang, Y.; Yu, W.; Wang, F. Structural design and physical characteristics of modified ring-spun yarns intended for e-textiles: A comparative study. *Text. Res. J.*, 2017, 004051751774115.
3. Coyle, S.; Diamond, D. Smart Nanotextiles: Materials and Their Application. Encyclopedia of Materials: Science and Technology; Elsevier: New York, NY, USA, 2010; pp. 1–5. ISBN 978-0-08-043152-9.
4. 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. *Adv. Mater.*, 2014, 26, 5310–5336.
5. Ghahremani Honarvar, M.; Latifi, M. Overview of wearable electronics and smart textiles. *J. Text. Inst.*, 2017, 108, 631–652.
6. Meoli, D. Interactive Electronic Textiles: Technologies, Applications, Opportunities, and Market Potential. North Carolina State University: Raleigh, NC, USA, 2002.
7. Sornamugi, V. E-Textile and its Applications. *IJSK*, 9(3), ISSN 2321 3361 2019
8. Wagner, G. Waschmittel. 5th ed., Wiley VCH: Weinheim, Germany, 2017.
9. Ellmer, K. Wäsche-Cluster in Konsumenten Haushalten. Ph.D. Thesis, Technische Universität Berlin, Germany, 2016.
10. <https://encyclopedia.pub/entry/10041>
11. Dhanawansa, K.B.; Senadeera, R.; Gunathilake, S.S.; Dassanayake, B.S. Silver nanowire-containing wearable thermogenic smart textiles with washing stability. *Adv. Nano Res.*, 2020, 9, 123–131.
12. Foerster, P. Untersuchungen zu Eigenschaften von Nanosilberschichten auf Polyamidfasern. Studienarbeit, Technische Universität Berlin, Germany, 2010.
13. Lee, J.C.; Lo, C.; Chen, C.C.; Liu, W. Laundering Reliability of Electrically Conductive Fabrics for E-Textile Applications. Proceedings of the 2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Las Vegas, NV, USA, 2019; 1826–1832.
14. Rotzler, S.; Kallmayer, C.; Dils, C.; von Krshiwoblozki, M.; Bauer, U.; Schneider-Ramelow, M. Improving the washability of smart textiles: Influence of different washing conditions on textile integrated conductor tracks. *J. Text. Inst.*, 2020, 111, 1766–1777.
15. Hardy, D.A.; Rahemtulla, Z.; Satharasinghe, A.; Shahidi, A.; Oliveira, C.; Anastopoulos, I.; Nashed, M.N.; Kgateke, M.; Komolafe, A.; Torah, R.; et al. Wash Testing of Electronic Yarn. *Materials*, 2020, 13, 1228.
16. Shahariar, H.; Kim, I.; Bhakta, R.; Jur, J.S. Direct-write Printing Process of Conductive Paste on Fiber Bulks for Wearable Textile Heaters. *Smart Mater. Struct.*, 2020.
17. Rotzler, S. Einfluss der Sinnerschen Faktoren Sowie der Textilen Substrate auf die Waschbarkeit Textilintegrierter Leiterbahnen. Master's Thesis, Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin, Germany, 2018.
18. Ojuroye, O.; Torah, R.; Beeby, S. Modified PDMS packaging of sensory e-textile circuit microsystems for improved robustness with washing. *Microsyst. Technol.*, 2019.
19. Quandt, B.M.; Braun, F.; Ferrario, D.; Rossi, R.M.; Scheel-Sailer, A.; Wolf, M.; Bona, G.L.; Hufenus, R.; Scherer, L.J.; Boesel, L.F. Body-monitoring with photonic textiles: A reflective heartbeat sensor based on polymer optical fibres. *Interface*, 2017, 14, 20170060.
20. Martinez-Estrada, M.; Moradi, B.; Fernández-García, R.; Gil, I. Impact of Manufacturing Variability and Washing on Embroidery Textile Sensors. *Sensors*, 2018, 18, 3824
21. Gaubert, V.; Gidik, H.; Bodart, N.; Koncar, V. Investigating the Impact of Washing Cycles on Silver-Plated Textile Electrodes: A Complete Study. *Sensors*, 2020, 20, 173.



Capitolo 15. LAVABILITÀ DEGLI E-TEXTILES, STANDARD E NORME

David Gómez, AEI Tèxtils, Sviluppo aziendale, Barcellona, Spagna.

15.1 Introduzione

Il lavaggio di tessuti elettronici (e-textiles) o tessuti con capacità conduttive è una delle sfide o dei punti deboli di questo tipo di prodotto innovativo.

Il motivo principale per cui i tessuti elettronici sono vulnerabili al lavaggio è la loro sensibilità all'acqua. Il contatto con questo elemento li espone alla perdita delle loro proprietà.

Al giorno d'oggi, esistono diverse procedure che valutano e convalidano che un e-textile abbia una qualità sufficiente per continuare a svolgere le sue funzioni dopo un certo numero di lavaggi.

Il fatto che esistano standard diversi per i processi di lavaggio e-textile e che nessuno di essi sia condiviso dalla comunità scientifica è una difficoltà per il settore tessile e per questo tipo di prodotto. Questa mancanza di consenso significa che non esiste una regolamentazione omogenea riconosciuta da tutti e, quindi, significa che uno stesso prodotto può essere idoneo e funzionante dopo un certo numero di lavaggi secondo una procedura, ma risultare insoddisfacente secondo un altro tipo di procedura o norma che richiede il rispetto di altri criteri [1].

L'unificazione o l'universalizzazione dei criteri utilizzati per certificare che un tessuto elettronico è adatto, non solo nel primo momento dopo la sua fabbricazione, ma per la vita quotidiana dell'utente (e questo implica un certo numero di lavaggi giornalieri) [1].

15.2 Deterioramento dei tessuti elettronici durante il processo di lavaggio

Durante il lavaggio di un e-textile, il tessuto può subire vari danni legati all'invecchiamento del pezzo, nonché cambiamenti nella sua forma o colore (oltre alla perdita delle proprietà già citata) [1].

A causa di uno o più dei danni già menzionati, un e-textile può subire i seguenti effetti secondari:

- Cambiamenti nelle sue proprietà elettriche, come la perdita di conduttività.
- Cambiamenti nella sua funzionalità, come uno o più dei suoi componenti (come i LED) che cessano di funzionare.
- Cambiamenti nelle sue caratteristiche, come, ad esempio, cambiamenti nei sensori.
- Cambiamenti nel suo aspetto, come scurimento della superficie, rughe o restringimento.

2020-1-RO01-KA226-HE-095335

La comparsa o meno di questi cambiamenti dopo un certo numero di lavaggi viene utilizzata come indicatore per valutare la redditività dei tessuti elettronici.

15.3 Caratteristiche di vulnerabilità dei tessuti elettronici

Il lavaggio degli e-textiles può causare errori e guasti e le loro caratteristiche precedenti definiranno quali vulnerabilità o resistenze avranno a uno o più processi di lavaggio.

Un elemento chiave è la tipologia e la composizione del prodotto, ovvero il materiale di cui è fatto e come il tessuto e il filo si rapportano ai componenti che compongono il capo. Ad esempio, un tessuto elettronico integrato da elementi conduttivi tra dispositivo e dispositivo (direttamente esposto all'acqua) sarà altamente suscettibile al degrado. Oppure, un conduttore che ha questa funzione, ma non è protetto, sarà anch'esso esposto a un rapido degrado.

Allo stesso tempo, vale la pena dire che i tessuti elettronici che integrano componenti protetti, in qualche modo incapsulati, sono molto più resistenti ai lavaggi ed evitano il degrado molto più spesso delle parti conduttive.

Inoltre, questi componenti sono abbastanza resistenti da evitare il distacco totale o parziale dal pezzo. Esempi di deterioramento di tessuti elettronici:

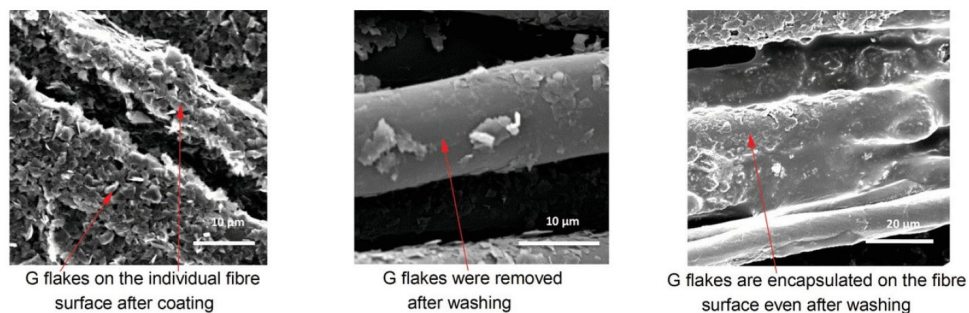


Figura 15.1 Esempio di danni ai rivestimenti tessili conduttivi dopo il lavaggio [2]

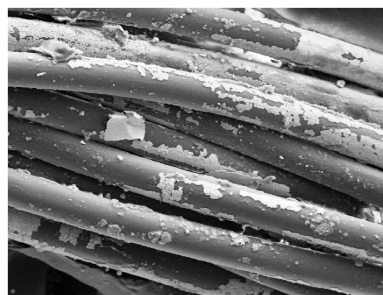


Figura 15.2 Strato d'argento impoverito su filamenti di nylon [3]



15.4 Situazione attuale della normazione

Come accennato, gli standard per la valutazione della lavabilità sono diversi e non esiste alcuna regola generale o indicazione per una standardizzazione globale [4].

Tuttavia, sono stati testati diversi standard e metodi che sono il riferimento per la valutazione di molti tessuti elettronici. Le voci principali che considerano per indicare il modo in cui il prodotto deve essere lavato e quindi preservarne le caratteristiche sono le seguenti [4]: il tipo di dispositivo di lavaggio, la durata del programma, la quantità di biancheria, la temperatura di lavaggio, il tipo di detersivo o il metodo di asciugatura [4].

Il numero di standard esistenti concepiti appositamente per i tessuti elettronici ibridi ad oggi è molto basso. Di quelli esistenti, la maggior parte copre terminologia e/o definizioni come ISO/PRF TR 23383 e ASTM D 8248:2020. Altri forniscono metodi di prova per la misurazione della resistenza dei prodotti tessili: AATCC 76 per i tessuti, AATCC 84 per i filati e CSN EN 16812 per le piste conduttive sui tessuti.

Lo standard più comunemente utilizzato dai campi adiacenti quando si testa la lavabilità degli e-textiles è ISO 6330 Textiles- procedure di lavaggio e asciugatura domestiche per i test sui tessuti. L'ambito di applicazione dello standard include non solo i tessuti, ma anche "altri articoli tessili" - un termine che può essere applicato a tessuti ibridi intelligenti o elettronici - consentendo di estendere lo standard ai loro test. Non sono incluse nella

2020-1-RO01-KA226-HE-095335

norma le linee guida o le raccomandazioni relative al numero di cicli di lavaggio da eseguire né i criteri su come valutare l'affidabilità del lavaggio dopo il test.

Figura 15.3 Test di lavaggio secondo ISO 6330 [4]

Source	Version	Tested product	Parameter ^b	Washing device ^c	Cycles	Load ^d	Temperature [°C]	Program/ duration [min] ^e	Detergent	Drying
Ankili et al. ¹²	2012	ECG electrodes	R, c	Datacolor Ahiba	50		40	30		
Baribina et al. ¹³	2012	Conductive yarn	R		10	Protective bag	30	3M/23		Air
Blecha et al. ¹⁴	2012	Fire-fighter suit	f	HH front	30		60			
Erdem et al. ¹⁵	2000	Knee pad	R		10		40	4M/25		Air
Foerster ¹⁶	2000	Conductive yarn	R	Wascator	20		40	4M/25	ECE-2	
Gerhold ¹⁷	2000	Textile circuit board, LED module	R	Wascator	16	Protective bag + 2 kg towels	40	4M/25	66 g ECE 105	Air
Hardy et al. ¹⁸	2012	Conductive yarn	f	Wascator?	25	Total 2 kg, +CO T-shirts	40	4N/31	20 g Persil	Air, dryer
Huang et al. ¹⁹	2012	Conductive paste and yarn	R	Datacolor Ahiba	10		30	30		Air
Kayacan et al. ²⁰	2012	Conductive yarn	R	HH	5		40		With	
Kazani et al. ²¹	2000	Conductive paste	R		20		40	4M/25	20 g ECE	Air, 50°C
Kazani et al. ²²	2000	Printed antenna	c	Reference	20		30	3G/16	20 g ECE	Air, 50°C
Kim and Lee ²³		Conductive ink	R, c	HH top	20		20	(11B)/15	5 g/l	
Kivanc and Bahadir ²⁴	2012	Conductive yarn	R	HH front	5	Total 3 kg	40	49	20 g reference	Air
Komolafe ²⁵	2000	Stretch sensor	R	HH front	5		40	58		Air, 100°C
Komolafe et al. ²⁶	2000	Functional filament	f	HH front	5	7 garments	40	58	DAZ	
Liang et al. ²⁶	2000	Stretch sensor	c	HH front	3		40			Air
Linz ²⁷	2000	Conductive yarn	R	Wascator	20	Total 2 kg CO	40	4M/24	ECE A	Air
Malm et al. ²⁸	2012	Conductive paste	R	Wascator	5	+ 1 kg	40	4G/18		Air, air 50°C
Martinez-Estrada et al. ²⁹	2012	Moisture sensor	c	HH front	2	+ 1 kg	40		10 g ECE 105	
Matsoula et al. ³⁰	2012	Textile electrodes	R	Datacolor Ahiba	50		40	30		Air
Ojuroye et al. ³¹	2012	Flexible sensors	f	HH front	20	+ 2 kg CO towels	30	15, 37, 42	37 ml, 37 ml softener	Air
Parkova et al. ³³		Conductive yarn	R, c	HH front	5		30	31	20 g	
Rotzler et al. ¹	2000	Conductive tracks	R	Wascator	10	Total 2 kg, CO and PES	20, 40, 60	28, 38, 48	30 g ECE 2	Air
Satharasinghe et al. ³⁴	2012	Solar cell	f	HH	25					Air
Schwarz ³⁵	2000	Conductive yarn	R	Wascator	25	Total 2 kg, CO	40	4M/25		
Tadesse et al. ³⁶	2012	Conductive coating	R	HH front	10		(30)	3N		
Tadesse et al. ³⁷	2012	Conductive coating	R	HH front	10	Protective bag, total 2 kg, PES	30	3N/23	20 ml	Air
Tao et al. ³⁸	2012	Conductive yarn, LED, flex PCB	R	Datacolor Ahiba	50		30	30		Air
uz Zaman et al. ³⁹		Conductive yarn	R	HH front	10		40	35	20 g	
uz Zaman et al. ⁴⁰		ECG electrodes	R	HH front	50	Total 2 kg	40	35	20 g Xtra Total	
Vervust et al. ⁴¹	2000	Stretchable circuit board	R, delamination	HH front	50	Protective bag	40	4N/30	ECE A	Air, dryer

^aBlank spaces indicate non-disclosed information. ^bR: change in resistance; c: change in characteristic; f: change in or loss of function. ^cHH: household washing machine (not further specified), HH front: horizontal axis front-loading household washing machine, HH top: vertical axis top-loading household washing machine. ^dCO: cotton; PES: polyester. ^eThe washing program only refers to ISO 6330 washing programs. The program labels from the 2000 version of the standard were transferred to their 2012 version counterparts to make for easier comparison.

Source	Standard	Tested product	Parameter ^b	Washing device ^c	Cycles	Load	Temperature [°C]	Duration [min]	Detergent	Drying
Frank and Bauch ⁴³	DIN EN 20105-C01-5 DIN 54015	Conductive coating	R				40, 50, 60, 95	20, 30, 45 h	5 g/l	
Jin et al. ⁵²	AATCC 135	Conductive tracks		HH top	10-50		40			
Lee et al. ⁵¹	AATCC M6	Conductive fabric	R	HH top	10	Total 1.8 kg	27	21	66 g reference	Dryer
Li and Tao ⁵³	AATCC 135	Conductive yarn	R	HH top	30	Total 1.8 kg, protective bag	40		66 g Castle	Dryer
Liu et al. ⁴⁶	AATCC 61	Incontinence monitoring pants	R		20					
Sala de Medeiros et al. ⁵⁴	AATCC 135	Tribo-electric nanogenerator	R, c	HH top	50	+ 2 kg garments	22	8	Without	Air
Quandt et al. ⁴⁴	EN ISO 105-C06	Heartbeat sensor	c	Color tester	10		40	45	4 g/l + bleach	Air
Shahariar et al. ⁴⁷	AATCC 61	Conductive ink	R	150 ml water + steel balls	5	Only test samples	49	45	0.24 g	
Shahariar et al. ⁴⁸	AATCC 61 2a	Conductive paste	R		5					
Trindade et al. ⁴⁵	ISO 105	ECG sensor	R, c		30		40	45	1 g/l	Air
Xu et al. ⁴⁹	AATCC 61 1b	Textile antenna	R, c	150 ml water + rubber balls	1			20	1 ml + softener	Air
Yokus et al. ⁵⁰	AATCC 61 2a	Conductive paste	R	Water + 50 steel balls	20		49		Powder	
Zhao et al. ⁵⁵	AATCC 135	Tribo-electric nanogenerator	R, c	HH top	20	+ 1.8 kg, protective bag	20	40		Air

^aBlank spaces indicate non-disclosed information. ^bR: change in resistance; c: change in characteristic; f: change in or loss of function. ^cHH: household washing machine (not further specified), HH front: horizontal axis front-loading household washing machine, HH top: vertical axis top-loading household washing machine.

Figura 15.4 Test di lavaggio secondo altri standard [4]

Nella figura seguente sono mostrati alcuni degli standard relativi agli e-textiles, classificati in base al loro stato attuale. Dal punto di vista europeo, è importante ricordare che attualmente non vengono utilizzati standard ISO per gli e-textiles.

Identification	Title	Year
Existing standards		
DS/CEN/TR 16298	Textiles and textile products—smart (intelligent) textiles—definitions, categorization, applications and standardization needs	2012
ASTM D 8248	Standard terminology for smart textiles	2020
AATCC 76	Test method for electrical surface resistivity of fabrics	2018
AATCC 84	Test method for electrical resistance of yarns	2018
CSN EN 16812	Textiles and textile products—electrically conductive textiles—determination of the linear electrical resistance of conductive tracks	2016
IPC-8921	Requirements for woven and knitted electronic textiles (e-textiles) integrated with conductive fibers, conductive yarns and/or wires	2019
Upcoming standards		
IEC 63203 204-1	Wearable electronic devices and technologies: electronic textile—washable durability test method for leisure and sportswear e-textile system	2022
IPC 8981	Quality and reliability of e-textiles wearables	2022
IPC 8952	Design standard for printed electronics on coated or treated textiles and e-textiles	?
IPC 8941	Guideline on connections for e-textiles	?
Standards from other fields used in e-textile wash testing		
ISO 6330	Textiles—domestic washing and drying procedures for textile testing	2012
ISO 105-C01	Textiles—tests for color fastness—Part C01: color fastness to washing	1989
ISO 15797	Textiles—industrial washing and finishing procedures for testing of workwear	2017
DIN 54015	Testing for colorfastness of textiles—determination of color fastness of dyeings and prints to washing in presence of peroxide	2017
AATCC 6	Colorfastness to acids and alkalis	2016
AATCC 61	Colorfastness to laundering: accelerated	2013
AATCC 135	Dimensional changes of fabrics after home laundering	2018

Figura 15.5 Stato della standardizzazione degli e-textiles

15.5 Conclusioni

La lavabilità è una delle questioni chiave per gli e-textiles. Ugualmente a quello che sono in grado di offrire quando la conduttività e i dispositivi vengono aggiunti al prodotto.

Un semplice lavaggio può distruggere l'intera tecnologia per cui il prodotto è stato approvato, quindi, il modo in cui il tessuto è confezionato e il modo in cui viene lavato giocheranno un ruolo rilevante nel successo della sua pulizia (il che significa nessuna perdita di proprietà).

Per questo, una standardizzazione comune è fondamentale. Le regole generali faciliterebbero lo sviluppo di questo tipo di prodotti, in quanto verrebbero sviluppati seguendo determinati standard fin dall'inizio e tutti i produttori giocherebbero con le stesse regole.

Il limite principale riscontrato fino ad ora riguarda i decisori politici. Anche le indagini fatte fino ad ora guidano una parte significativa dei produttori di e-textiles e si può dire che circa il 60% segue gli standard esistenti, le istituzioni che hanno competenze per regolamentare questi standard non li hanno fissati.



Riferimenti

1. Rotzler, S., Schneider-Ramelow, M. Washability of E-Textiles: Failure Modes and Influences on Washing Reliability. *MDPI. Textiles*, 2021, 1, 37–54. <https://doi.org/10.3390/textiles1010004>
2. Afroj, S.; Tan, S.; Abdelkader, A.M.; Novoselov, K.S.; Karim, N. Highly Conductive, Scalable, and MachineWashable Graphene-Based E-Textiles for Multifunctional Wearable Electronic Applications. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 2000293.
3. Rotzler, S. Einfluss der Sinnerschen Faktoren Sowie der Textilen Substrate auf die Waschbarkeit Textilintegrierter Leiterbahnen. Master's Thesis, Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin, Germany, 2018.
4. Rotzler, S., von Krshiwoblozki, Schneider-Ramelow, M. Washability of e-textiles: current testing practices and the need for standardization. *Textile Research Journal*, 2021, 0(0), 1–17.

Capitolo 16. ECO-DESIGN PER LO SVILUPPO TESSILE INTELLIGENTE

Veronica Guagliumi, Ciape, Italia

16.1 Tessuto elettrico e riciclaggio

Il processo di innovazione in atto nel settore dei tessuti intelligenti potrebbe scontrarsi con le finalità delle politiche in materia di ambiente e rifiuti. Ci si può aspettare, considerando gli esempi contemporanei di tessuti elettronici, che i sistemi esistenti per il ritiro e il riciclaggio di rifiuti elettronici o vecchi tessuti non siano progettati per trattare materie prime di questo tipo.

16.2 Tendenze recenti nel processo di innovazione

Gli e-textiles possono essere concepiti come precursori di tecnologie intelligenti che caratterizzeranno le nostre vite in futuro. Questi prodotti sono descritti come "tecnologia alla moda" le cui caratteristiche principali sono l'unicità e la funzionalità avanzata combinate con un senso per la moda e l'estetica. [1] Il computer indossabile evidenzia una visione di vasta portata dei dispositivi informatici incorporati negli indumenti in modo poco appariscente. I ricercatori e le imprese dei settori elettronico e tessile perseguono lo sviluppo di e-textiles. La figura sottostante (16.1) rappresenta l'innovazione tecnologica convergente in quanto materiali e dispositivi provenienti da domini tecnologici distinti sono mescolati nello stesso prodotto.

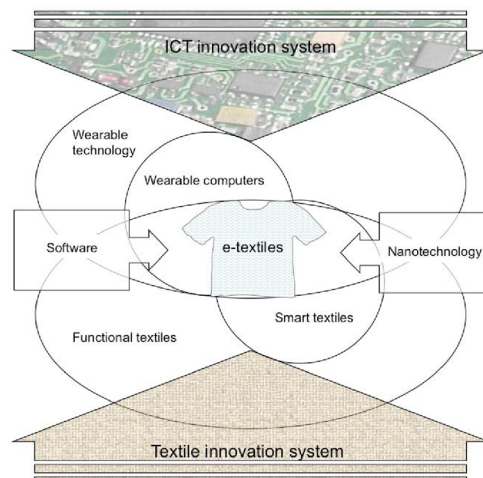


Figura 16.1 E-textiles nel sistema di innovazione del settore tessile ed elettronico [2]

L'organizzazione di nuovi concetti di design è richiesta dalla convergenza del tessile e dell'elettronica, in particolare per la composizione dei materiali e la configurazione dei componenti. Le caratteristiche principali dell'elettronica integrata nel tessile dovrebbero



essere la flessibilità, l'elasticità e la piegabilità. Gli e-textiles devono diventare comodi, alla moda e lavabili pur mantenendo la loro funzionalità intelligente per molti cicli di utilizzo per una migliore esperienza dell'utente. La riuscita realizzazione di e-textiles richiede quindi nuovi paradigmi di progettazione e configurazione, nonché nuovi materiali e tecnologie. Una comunità interdisciplinare di designer, artigiani e artisti della moda espande lo sviluppo di e-textiles mentre realizzano a mano componenti tessili-elettronici e rendono i loro concetti apertamente accessibili tramite blog, siti Web e workshop[3].

16.3 Impatti di fine vita degli e-textiles

Uno dei fenomeni che fa sì che i prodotti high-tech si trasformino in rifiuti è noto come obsolescenza progressiva: vengono sostituiti da modelli più recenti dopo un ciclo di vita relativamente breve. Gli e-textiles sono soggetti a questo tipo di obsolescenza in quanto combinano l'elettronica di breve durata con le fugaci tendenze della moda che governano il mercato dell'abbigliamento. I risultati di uno studio di valutazione della tecnologia suggeriscono che i vecchi tessuti elettronici emergeranno come una nuova categoria di rifiuti subito dopo la loro introduzione sui mercati di massa dei consumatori[4]. Questi prodotti potrebbero anche comportare un aumento del consumo delle batterie, che devono essere smaltite quando esaurite. In questo, assomigliano al problema contemporaneo dei rifiuti elettronici. Ma i tessuti elettronici scartati pongono anche nuovi problemi che derivano dalle loro proprietà uniche: la dispersione di materiali elettronici all'interno di grandi quantità di rifiuti tessili renderà difficile il recupero di materiali di valore da una materia prima di bassa qualità [5]. Inoltre, anche le sostanze potenzialmente pericolose vengono disperse e quindi difficili da separare per uno smaltimento sicuro. Dal punto di vista odierno, la gestione rispettosa dell'ambiente dei rifiuti di tessuti elettronici non è garantita per i seguenti motivi:

- (1) Ci si possono aspettare grandi flussi di massa di rifiuti di tessuti elettronici se quest'ultimi sperimenteranno una svolta nei mercati di massa [6].
- (2) Le emissioni di sostanze pericolose potrebbero essere una conseguenza di tessuti elettronici collocati in discarica o inceneriti, ma anche rischi per la salute sul lavoro quando i tessuti elettronici sono sottoposti a processi di riciclaggio.
- (3) I componenti elettronici incorporati nel tessuto contengono piccole quantità di materiali scarsi che sono sparsi su ampie superfici tessili e difficili da recuperare. Sembra difficilmente fattibile trattare tali materie prime miste per mezzo di impianti di riciclaggio esistenti. Il recupero di piccole quantità di materiali di valore da un grande flusso di massa di materiali tessili sfusi è tecnicamente ed economicamente difficile. Senza riciclaggio, esiste il rischio che l'applicazione di massa di tessuti elettronici acceleri l'esaurimento di risorse scarse, come i metalli tecnologici e le risorse per la produzione di fibre.



16.4 Eco-design degli e-textiles: le sfide

L'obiettivo degli sviluppatori di e-textile è integrare perfettamente l'elettronica nei tessuti; tuttavia, fino a quando tale obiettivo non sarà completamente raggiunto, le esatte qualità di e-textile sono ancora sconosciute.

Per questo motivo, è difficile prevedere potenziali problemi di fine vita e sviluppare raccomandazioni di progettazione per la minimizzazione dei rifiuti. Ad esempio, la raccomandazione fatta da Design for Recycling di utilizzare chiusure a scatto (invece di viti) per coperture di dispositivi elettrici in plastica è inutile se sono cucite o ricamate su tessuti [7]. Se i componenti elettronici devono essere incollati su tessuto, sarà anche difficile progettarli per un semplice smontaggio nel modo convenzionale. Il principio DfR, che limita l'uso di parti in plastica con metallizzazione superficiale, è in contraddizione con l'uso di filati rivestiti in metallo per e-textiles. Ciò significa che devono essere create idee di design innovative in combinazione con il processo di innovazione di e-textiles.

Le tabelle 16.1–16.2 mostrano i principi di progettazione ecocompatibile relativi alla prevenzione dei rifiuti e ai trattamenti di fine vita. Sono stati adottati dallo standard ECMA 341 [8] e dal Green Electronics Council [9].

Tabella 16.1 Sfide e opportunità per l'eco-design riferite all'efficienza dei materiali

Eco-design principle	Evaluation	Discussion
Reduce the diversity of materials in the product	!	The amalgamation of electronic and textile components increases the variety of materials found in a product.
	+	The use of conjugated polymers (conductive or semi-conductive plastics) can reduce the amount of metallic components. Innovations in organic electronics can stimulate the design of e-textiles free of metals and silicon.
Reduce the weight of the product	+	Trend towards flexible thin-layer electronic components can pave the way for to weight savings and increased resource efficiency,
	+	Lightweight textile materials can replace solids (plastic, metals) as casing or backing material in devices,
	!	Increasing number of devices used per person can outweigh savings.
Using renewable materials	+	Natural fibres (e.g. cotton, hemp, kenaf, bamboo) can replace plastics as casing or backing material. This helps in reducing the consumption of fossil resources and lowers the carbon footprint of products.
Using recycled materials	+	Textile materials can, by virtue of their flexibility, be easier refurbished or remanufactured into new products than those rigid materials typically found in electronics.

* Opportunity (+); Challenge (!)

Tabella 16.2 Sfide e opportunità per l'eco-design riferite all'obsolescenza dei prodotti



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Eco-design principle	Evaluation	Discussion
Timeless design	!	The apparel market is subject to rapidly changing design trends and renders textile products unfashionable at seasonal intervals.
	+	Smart textile materials may offer possibilities to adjust design features to new fashion trends (colours, shape, thickness) without replacing the product.
Easy to upgrade and repair	!	Fault detection and maintenance are difficult due to seamless integration of electronic components. Repair may damage reusable garments.
	!	Difficult to update wearable computing devices with regard to firmware, data formats, networking protocols, data safety requirements. Software obsolescence obstructs the availability of servicing information needed to preserve smart functions for a long use phase.
	+	Higher fault tolerance due to networked and redundant architecture of textile embedded electronics.
Understandable design for the user	!	The design trends of unobtrusiveness and seamless integration of e-textile components obstruct the user's comprehension of the product
Use of standardized parts (power supplies, batteries, connectors)	!	Standardisation of e-textiles components is lagging behind technological innovation and rapidly changing fashion trends.
	!	Standardisation is a complex task due to the vast heterogeneity of the converging technology and its parent industrial sectors (textile, electronics).
Allowing for the reuse and replacement of common parts or modules of the product	!	Difficulties to replace electronic components being tightly integrated in textiles. In particular, this concerns textile-embedded batteries.
	!	The trend towards low-cost components reduces economic incentives for reuse. User habits in regard to apparel products may discourage reuse.
Reuse/refurbishment of old products	!	The export of old e-textiles to foreign second-hand clothing markets (as part of charity or commercial trade of old garments) could conflict with legislation (The Basel Convention) because of waste electronics contained in them.

* Opportunity (+); Challenge (!)

16.5 Tecniche di progettazione ecocompatibile per la durabilità e il riciclaggio dei tessuti elettronici

I concetti di design sostenibile per i tessuti elettronici dovrebbero concentrarsi sulla prevenzione dei rifiuti. I designer dovrebbero cercare possibilità per prolungare la vita utile degli e-textiles. Ciò potrebbe essere ottenuto progettando prodotti per la riparazione, la ristrutturazione e il riutilizzo. Il settore couture ha portato esempi di upcycling di vecchi indumenti [10]. Queste esperienze possono ispirare il design dell'abbigliamento high-tech per essere futuri abiti vintage piuttosto che rifiuti. Se la moda cambia, è possibile



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

implementare materiali e tecnologie intelligenti per rendere i prodotti riconfigurabili in quanto adattano il loro aspetto. Ciò aiuterebbe a ritardare l'obsolescenza e prevenire gli sprechi. Il design per l'upcycling di e-textiles implica che i componenti elettronici difettosi possano essere sostituiti senza danneggiare il tessuto. . L'applicazione ecologica di tecnologie e materiali avanzati può accelerare il processo di innovazione in settori come l'elettronica dei polimeri.

Ci sono opportunità per ridurre il consumo di risorse primarie utilizzando fibre riciclate e per evitare l'uso di sostanze pericolose. I materiali tessili possono sostituire componenti problematici nei prodotti elettronici. L'uso di dispositivi ICT miniaturizzati può aprire la strada alla riduzione del consumo di risorse se i dispositivi piccoli sostituiscono le funzioni di quelli più grandi. Inoltre, esistono opportunità per ridurre il consumo di metalli scarsi se l'elettronica polimerica sostituirà l'elettronica a base di silicio.

Durante la fase di utilizzo, è fondamentale ridurre al minimo il consumo di batteria ed elettricità. Nell'alloggiamento e nell'imballaggio dell'elettronica, ad esempio, i materiali tessili ecologici potrebbero sostituire i materiali convenzionali. Pulsanti, strisce in velcro o buste cucite sono esempi di parti accessori tessili comuni che possono essere utilizzate per installare l'elettronica sui tessuti con metodi compatibili con DfR (con l'obiettivo di ridurre al minimo il tempo di smontaggio).

I materiali intelligenti e i principi di progettazione bio-ispirati possono raggiungere molti compiti desiderati senza l'uso di componenti elettronici [11]. I principi di progettazione biomimetica dei tessuti intelligenti, come il tessuto autorigenerante e la resistenza alle pieghe o allo strappo, sono discussi da Singh et al.

La nanotecnologia autorigenerante consente lo sviluppo di prodotti in grado di ripararsi da soli e che hanno meno probabilità di essere danneggiati. I materiali commutabili aprono nuove opzioni di progettazione per manufatti riciclabili poiché consentono metodi di auto-smontaggio [12]. Filati o adesivi distruttibili che si rompono se esposti a calore, microonde o campi magnetici potrebbero essere creati utilizzando polimeri sensibili agli stimoli [13]. Tali tecnologie potrebbero essere in grado di decostruire economicamente quantità significative di tessuti elettronici post-consumo sprecati se immessi in impianti di riciclaggio automatizzati.

16.6 Conclusioni

Ci sono ancora sfide concrete che ostacolano la diffusione di massa degli e-tessili. Tra queste, la necessità di nuovi paradigmi di progettazione e configurazione in grado di garantire comfort e lavabilità pur conservando le funzionalità intelligenti nel corso di molti cicli di utilizzo. Nuove tecnologie e tecniche innovative per il recupero del materiale una volta che i prodotti vengono smaltiti, per separare efficientemente i componenti e risparmiare grandi quantità di materiale e per evitare la dispersione di sostanze potenzialmente pericolose. Per fare ciò, sarebbe importante seguire specifici principi di



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

eco-design focalizzati sulla prevenzione dei rifiuti, progettando prodotti per riparazione, ricondizionamento e riutilizzo

Riferimenti

1. Seymour, S. Fashionable technology: the intersection of design. Fashion, Science and Technology, Springer, 2008.
2. Challenges for eco-design of emerging technologies: The case of electronic textiles. Material and Design, Elsevier Ltd., 2013, 51/60
3. Satomi, M., Perner-Wilson, H. Future Master craftsmanship: Where we want electronic textile crafts to go. In: international symposium on electronic Art – ISEA, 2011.
4. Köhler, A.R. End-of-life implications of electronic textiles. Assessment of a converging technology. Lund: Lund University, 2008.
5. Reuter, M.A. Limits of design for recycling and “sustainability”: a review. *Waste Biomass Valor*, 2011, 2, 183–208.
6. Köhler, A.R., Hilty, L.M., Bakker, C. Prospective impacts of electronic textiles on recycling and disposal. *J Ind Ecol*, 2011, 15, 496–511.
7. Masanet, E., Horvath, A. Assessing the benefits of design for recycling for plastics in electronics: a case study of computer enclosures. *Mater Des*, 2007, 28, 1801–11
8. ECMA International. Standard ECMA-341: Environmental design considerations for ICT & CE Products, 2008.
9. Rifer, W., Brody-Heine, P., Peters, A., Linnell, J. Closing the Loop – electronics design to enhance reuse/recycling value. Final Report. Green Electronics Council, 2009.
10. Gardiner, B. Upcycling evolves from recycling. The New York Times. Energy & Environment, 2010
11. Singh, A.V., Rahman, A., Kumar, N.V.G.S, Aditi, A.S., et al. Bio-inspired approaches to design smart fabrics. *Mater Des*, 2012, 36, 829–39.
12. Motornov, M., Roiter, Y., Tokarev, I., Minko, S. Stimuli-responsive nanoparticles, nanogels and capsules for integrated multifunctional intelligent systems. *Progr Polym Sci.*, 2010, 35, 174–211.
13. Bakker, C.A., Wever, R., Teoh, C., Clercq, S.D. Designing cradle-to-cradle products: a reality check. *Int J Sustain Eng*, 2010, 3, 2–8.



Capitolo 17. MATERIALI TESSILI INTELLIGENTI ORGANICI E INORGANICI

Veronica Guagliumi, Ciape, Italia

17.1 Materiali tessili intelligenti

La cosiddetta industria tessile intelligente e interattiva è cresciuta notevolmente negli ultimi trent'anni. Con l'introduzione di nuove fibre, nuovi tessuti e tecniche di lavorazione all'avanguardia, si prevede un aumento della domanda di materiali tessili intelligenti e delle loro applicazioni. Inoltre, i tessuti elettronici lavabili, flessibili, leggeri e resistenti sono molto richiesti. Queste caratteristiche sono influenzate dalle caratteristiche del materiale iniziale, dal post-trattamento e dalle modalità di integrazione.

Un tessuto elettronico può essere creato utilizzando varie tecniche di superficie per applicare un componente conduttivo alla superficie di un substrato tessile o creando un substrato tessile da metalli e polimeri naturalmente conduttivi e utilizzandoli per creare fibre, filati e tessuti. Inoltre, è possibile includere fibre o filati di filamenti conduttivi su substrati tessili tradizionali sia durante che dopo la creazione del tessuto tessile mediante ricamo. L'intero componente tessile intelligente può essere stampato in 3D, strato per strato, e l'idea del 4D potrebbe essere cruciale per elevare il prestigio dei tessuti intelligenti a un nuovo livello [1].

17.2 Classificazione dei tessuti intelligenti

I tessuti intelligenti sono materiali e strutture che percepiscono e reagiscono a condizioni o stimoli ambientali e possono reagire su sé stessi. Le espressioni di tessuti “smart” e “intelligenti” o di tessuti “elettronici indossabili” sono usate come sinonimi. Questo è il motivo per cui la definizione è determinata solo dal contesto; infatti, i materiali tessili smart o intelligenti sono materiali funzionali che interagiscono attivamente con il loro ambiente. D'altra parte, i sistemi tessili smart o intelligenti sono sistemi che esibiscono una risposta prevista e sfruttabile come reazione ai cambiamenti nell'ambiente circostante o ad un input esterno. La Figura 17.1 mostra un'illustrazione di un reggiseno bionico creato da Steele et al. che usa la tecnologia del muscolo artificiale e i sensori elettro-materiali per rilevare un aumento nel movimento del petto e successivamente rispondere fornendo un maggiore supporto per una vita attiva.

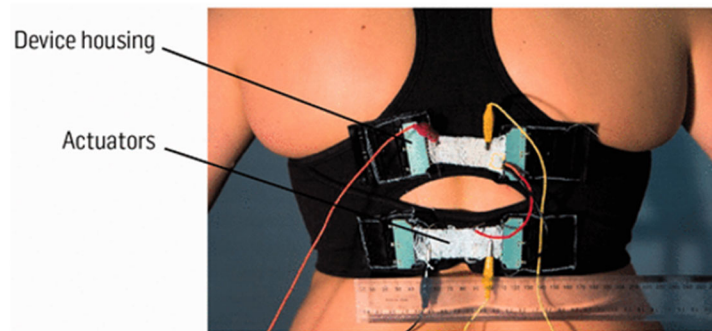


Figura 17.1 Reggiseno bionico

I tessuti intelligenti possono essere suddivisi in tre sottogruppi:

- Passivo
- Attivo
- Tessuti intelligenti avanzati o intelligenti.

I tessuti intelligenti possono essere suddivisi in tre categorie:

Componenti elettronici, polimeri conduttivi, materiali a cambiamento di fase incapsulati, materiali a memoria di forma e altri sensori elettronici e strumenti di comunicazione possono essere utilizzati per crearli. Secondo la ricerca di Dadi del 2010, questi materiali rispondono agli stimoli circostanti in base a come sono stati costruiti [3]. La prima generazione di schede madri indossabili è già stata creata. Queste schede madri contengono sensori integrati negli indumenti in grado di rilevare lesioni e informazioni sulla salute di chi le indossa e trasferire tali informazioni in remoto a un ospedale.

17.3 Componenti dei sistemi tessili intelligenti

I tessuti intelligenti con capacità di rilevamento e attivazione per l'uso desiderato sono stati prodotti come tessuti monouso. Tuttavia, l'intero sistema tessile intelligente potrebbe avere blocchi funzionali specifici come sensore, attuatore, interconnessione, unità di controllo, dispositivo di comunicazione e alimentazione. Nella Figura 17.2 possiamo vedere una rappresentazione schematica di un sistema tessile intelligente.



Figura 17.2 Funzione dei tessuti intelligenti [4]

Sensori: Un sensore è un componente elettronico che rileva una proprietà fisica e la registra o risponde ad essa. Tipici tipi di sensori integrati nel tessuto includono elettrodi tessili per la deformazione, l'umidità, la temperatura, la pressione, la luce, il rilevamento di molecole, l'elettrocardiografia, l'elettromiografia e l'elettroencefalografia.

Attuatore: Gli attuatori eseguono azioni tra cui spostare oggetti, rilasciare materiali e creare suoni agendo su un effetto fornito dal sensore, potenzialmente dopo aver prima inviato questo effetto attraverso un processore di informazioni. Esempi comuni di attuatori tessili introdotti sono diodi organici a emissione di luce, materiali a cambiamento di fase, tessuti che regolano la temperatura e tessuti che generano suoni [5].

Elaborazione dati: Nei tessuti intelligenti è necessario un processore appropriato per l'uso previsto per elaborare i parametri acquisiti dai sensori e fornire l'output necessario. Solo quando il tessuto sta elaborando attivamente le informazioni è necessario l'elemento di elaborazione delle informazioni.

Dispositivo di comunicazione: Si tratta di un'unità integrata per trasmettere e ricevere rispettivamente dati e/o informazioni elettroniche da e verso un altro sistema.

Immagazzinaggio: L'alimentatore è una parte utilizzata per alimentare il sistema. Grazie alla loro compattezza, le batterie litio-polimero (LiPo) sono spesso utilizzate per i tessuti intelligenti. Tuttavia, condensatori sviluppati di recente e sistemi di energy harvesting basati su tessuti potrebbero essere in grado di prendere il loro posto in alcune applicazioni [6].

17.4 Materiali conduttivi

I tessuti elettricamente conduttivi sono utilizzati in molte applicazioni di materiali tessili intelligenti, ma i materiali tessili convenzionali sono solitamente isolanti; quindi, non possono essere utilizzati direttamente per applicazioni tessili intelligenti che richiedono



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

conduttività elettrica. Tuttavia, è possibile ottenere tessuti elettricamente conduttivi integrando fili metallici, polimeri conduttivi o altri composti conduttivi nella struttura tessile. Per conferire conduttività, nella struttura tessile possono essere inseriti fili di filamenti metallici non tessili realizzati in argento, acciaio inossidabile, nichel, alluminio e rame. I metalli forniscono un'elevata conducibilità che è molto importante per alcune applicazioni tessili intelligenti, ma aumenta il peso del materiale e ne influenza la flessibilità. Inoltre, alcuni metalli sono soggetti a corrosione. I tessuti conduttivi a base di metallo possono anche essere prodotti rivestendo inchiostro metallico sulla superficie dei materiali tessili, ma questi hanno limitazioni nella stabilità al lavaggio. La ricerca di composti conduttivi alternativi è fondamentale per sapere come produrre tessuti conduttivi affidabili con una migliore flessibilità. I materiali conduttivi per i materiali tessili possono essere classificati come:

1. Inchiostri conduttivi.
2. Polimeri conduttivi a base di carbonio.
3. Polimeri intrinsecamente conduttivi.
4. Compositi polimerici conduttivi.

17.5 Inchiostri conduttivi

Lo sviluppo di inchiostri stampabili funzionali con varie dimensioni e architetture su scala nanometrica è considerato un fattore chiave per il successo della stampa a getto d'inchiostro per l'elettronica stampata. Gli inchiostri conduttivi possono avere l'aspetto di lastre, nanofili, nanotubi o altri materiali nanostrutturati tridimensionali. Sono disponibili molte opzioni per l'inchiostro stampabile, inclusi inchiostri conduttivi, semiconduttivi e dielettrici. Le nanoparticelle e le microparticelle di metalli conduttivi possono essere utilizzate per creare inchiostri conduttivi. Polimeri organici, semiconduttori inorganici e ossidi metallici possono essere tutti utilizzati per creare inchiostri semiconduttivi. Polimeri organici in solventi, polimeri organici termoindurenti o polimeri organici con ceramica sono gli inchiostri dielettrici. Metalli, ossidi metallici, polimeri conduttivi, inchiostri organometallici, grafene, nanotubi di carbonio, e miscele di vari inchiostri possono essere tutti utilizzati per creare inchiostri conduttivi utili.

17.6 Materiali conduttivi a base di carbonio

Lo sviluppo di tessuti elettricamente conduttivi è stato studiato utilizzando materiali a base di carbonio come grafene, nanotubi di carbonio (CNT), nerofumo, ossido di grafene e ossidi di grafene ridotti. Questi materiali in carbonio sono ideali per la realizzazione di tessuti conduttivi per le loro caratteristiche; flessibilità, resistenza alla corrosione e convenienza. È stato creato un tessuto di poliestere conduttivo in grafene, utilizzato per applicazioni di monitoraggio del potenziale biologico [8]. A seconda del contenuto del carico, questi materiali possono essere utilizzati per creare tessuti conduttivi con una varietà di intervalli di conduttanza. Zhu et al. ha utilizzato il rivestimento a immersione e il rivestimento a

2020-1-RO01-KA226-HE-095335

spruzzo per creare tessuti conduttivi lavabili in lavatrice realizzati con nanotubi di carbonio a parete singola [9]. I tessuti elettricamente conduttivi creati hanno un'elevata conducibilità fino a $7,4 \cdot 10^2$ S/m.

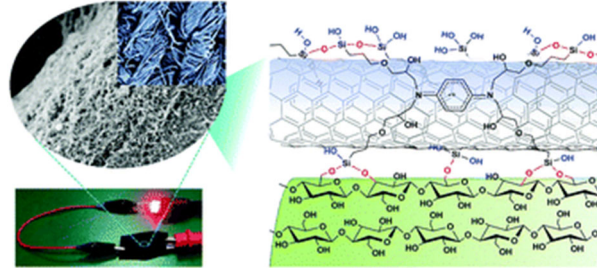


Figura 17.3 Composizione di nanomateriali a base di carbonio [10]

17.7 Polimeri intrinsecamente conduttivi

Attualmente, la creazione di tessuti elettroconduttivi fa ampio uso di polimeri intrinsecamente conduttivi. I polimeri con una struttura molecolare coniugata, che include legami singoli e doppi alternati tra atomi di carbonio, sono noti come polimeri conduttivi. Sono l'opzione perfetta per gli elettrodi a base tessile perché possono combinare le proprietà elettriche di metalli o semiconduttori con i vantaggi dei polimeri ordinari. I polimeri conduttivi più efficaci per la produzione di tessuti conduttivi sono il polipirrolo (PPy), la polianilina (PANI) e il politiofene derivato poli (3,4-etilene diossitofene): poli (stirene sulfonato) (PEDOT: PSS) [11]. Solventi organici noti come droganti possono essere aggiunti ai polimeri per aumentarne la conducibilità, ad esempio utilizzando solventi organici polari come glicole etilenico, dimetilsolfossido e glicerolo, la conducibilità di PEDOT:PSS può essere aumentata di un fattore da uno a tre [12]. Poiché è possibile ottenere una varietà di proprietà elettriche sperimentando l'aggiunta di polimero e la quantità di drogante, questi polimeri conduttivi possono quindi essere utilizzati per progettare tutti i componenti strutturali del sistema tessile intelligente. La composizione chimica di diversi polimeri conduttivi è mostrata nella Figura 17.4.

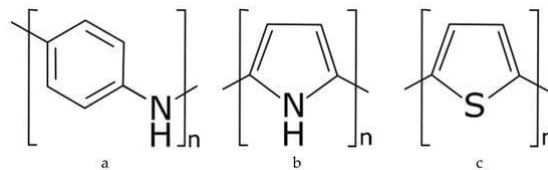


Figura 17.4. I polimeri conduttivi di maggior successo: a – polianilina; b – polipirrolo; c – politiofene [1]

17.8 Compositi polimerici conduttivi



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

La conducibilità più alta si trova nei tessuti conduttivi a base di metallo, sebbene siano spesso troppo rigidi. I polimeri conduttivi esistenti mostrano una conduttività incoraggiante, ma richiedono ancora miglioramenti delle loro proprietà meccaniche. Di conseguenza, i compositi polimerici conduttivi hanno una migliore stabilità meccanica e conduttività elettrica. I compositi costituiti da cariche carboniose, metalliche e polimeriche conduttrici, da sole o in combinazione, sono noti come compositi polimerici elettricamente conduttivi. Possono essere creati utilizzando un singolo polimero o una miscela multifase, a seconda delle qualità elettriche e meccaniche necessarie. L'uso di compositi polimerici conduttivi in ambienti accademici e professionali è in continuo aumento. Per creare tessuti conduttivi, numerosi compositi polimerici conduttivi sono stati sviluppati e utilizzati.

17.9 Conclusioni

I tessuti intelligenti sono materiali in grado di percepire e reagire alle condizioni ambientali o agli stimoli. Gli avanzamenti tecnologici, che consentono un miglioramento costante delle prestazioni di questi materiali, stanno stimolando la domanda di mercato per questi prodotti. La conducibilità elettrica è una proprietà importante per molte applicazioni dei materiali tessili intelligenti. Esistono diverse tecniche che possono essere applicate per ottenere tessuti conduttivi; quella più adatta dipende dalle funzioni che desideriamo ottenere e dal tipo di materiale utilizzato.

Riferimenti

1. Malengier, B., Fante, K.A., Nigusse, A.B., Van Langenhove, L. Integration of Conductive Materials with Textile Structures, an Overview Granch Berhe Tseghai, *MDP – Sensors*, 2020.
2. Steele, J.R., Gho, S.A., Campbell, T.E., Richards, C.J., Beirne, S., Spinks, G.M., Wallace, G.G. The Bionic Bra: Using electromaterials to sense and modify breast support to enhance active living. *J. Rehabil. Assist. Technol. Eng.*, 2018, 5, 205566831877590.
3. Dadi, H.H. Literature over View of Smart Textiles. Boras University: Boras, Sweden, 2010.
4. Çelikel, D.C. Intech Open Advanced Functional Materials - Smart E-Textile. Materials chapter, 2019
5. Tao, X. Handbook of Smart Textiles, 1st ed. Springer Science+Business Media: Singapore, 2014.
6. Giuri, A., Colella, S., Listorti, A., Rizzo, A., Mele, C., Esposito, C. GO/glucose/PEDOT:PSS ternary nanocomposites for flexible supercapacitors. *Compos. Part B*, 2018, 148, 149–155.
7. Thangakameshwaran, N., Santhoskumar, A.U. Cotton Fabric Dipped in Carbon Nano Tube Ink for Smart Textile Applications. *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.*, 2014, 63, 557–562.
8. Gamage, S.J.P., Yang, K., Braveenth, R., Raagulan, K., Kim, H.S., Kim, J.S., Yang, C.-M., Jung, M.J.; Chai, K.Y. MWCNT Coated Free-Standing Carbon Fiber Fabric for Enhanced Performance in EMI Shielding with a Higher Absolute EMI SE. *Materials*, 2017, 10, 1350.
9. Zhu, S., Wang, M., Qiang, Z., Song, J., Wang, Y., Fan, Y., You, Z., Liao, Y., Zhu, M., Ye, C. Multi-functional and Highly Conductive Textiles with Ultra-high Durability through 'Green' Fabrication Process. *Chem. Eng. J.*, 2020, 406, 127140.
10. Highly conductive and ultra-durable electronic textiles via covalent immobilization of carbon nanomaterials on cotton fabric. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019.



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

11. Maity, S., Chatterjee, A. Polypyrrole Based Electro-Conductive Cotton Yarn. *J. Text. Sci. Eng.*, 2014, 4, 171.
12. Achilli, A., Pani, D., Bonfiglio, A. Characterization of Screen-Printed Textile Electrodes Based on Conductive Polymer for ECG Acquisition. In Proceedings of the 2017 Computing in Cardiology Conference, Rennes, France, 24–27 September 2017.



Capitolo 18. COME AFFRONTARE I RIFIUTI TESSILI INTELLIGENTI

Veronica Guagliumi, Ciape, Italia

18.1 Le sfide

I rifiuti tessili sono riconosciuti come il flusso di rifiuti in più rapida crescita nei rifiuti solidi urbani (RSU). In tutto il mondo, l'aumento del consumo e della produzione di abbigliamento ha causato lo sviluppo di una produzione di rifiuti tessili che ha portato a molte sfide in molti paesi. Uno di questi è la raccolta dei rifiuti attraverso un'infrastruttura di smistamento economicamente sostenibile che è difficile da trovare. Un'altra sfida significativa è rappresentata dalle variazioni nelle miscele di fibre che rendono impegnativa e complicata la raccolta differenziata dei rifiuti tessili. Tuttavia, l'automazione per lo smistamento e le innovazioni nel riciclaggio dei tessuti sono campi di crescente interesse [1]. L'opzione preferita è il riutilizzo dei tessuti, ma soffre di un mercato in contrazione a causa del divieto di importazione di indumenti usati in alcuni paesi. La produzione di nuovi vestiti attraverso il riutilizzo e il riciclaggio dei tessuti dovrebbe essere guidata da incentivi economici per renderla fattibile per l'area interessata. Per ridurre l'impatto ambientale, è necessario utilizzare in modo innovativo materiali misti sostenibili realizzati con fibre riciclate. Inoltre, è fondamentale lavorare sulla caratterizzazione della struttura e delle proprietà delle fibre cellulosiche rigenerate da scarti a base di cotone. Un'ulteriore azione chiave potrebbe essere l'indagine sulle tecnologie di riciclaggio per gestire in modo sostenibile altri rifiuti tessili, come la fibra cellulosica artificiale (MMCF) e altre fibre come la poliammide. Dopo il poliestere e il cotone, gli MMCF sono una classe di fibre realizzate principalmente con legno e altri materiali contenenti cellulosa. Sono la terza fibra più utilizzata a livello globale. Rappresentano un equivalente di circa 7,1 tonnellate di fibra all'anno, ovvero circa il 6,4% di tutta la fibra prodotta [2]. La sostenibilità è inoltre incoraggiata dalla creazione di fibre non tradizionali e da un processo di legatura privo di sostanze chimiche. Rispetto alle tradizionali fibre vegetali, le fibre naturali possono offrire vantaggi sostanziali per il loro minore impatto ambientale. Tra le innovazioni che promuovono l'economia circolare e i sistemi di riciclo a circuito chiuso figurano le tecnologie di riciclo in grado di creare nuove fibre paragonabili alle fibre vergini. Il settore della moda guadagna molto dalla transizione dall'economia lineare esistente a un'economia circolare minimizzando le ripercussioni negative dell'aumento della popolazione mondiale che sta causando una maggiore domanda di abbigliamento [3].

18.2 Vantaggi del riciclaggio di tessuti intelligenti

Si prevede che gli e-textiles saranno ampiamente utilizzati e possono produrre significativi flussi di rifiuti. Sarà difficile raccogliere e riciclare vecchi tessuti elettronici senza schemi di raccolta e riciclaggio all'avanguardia. Gli e-textiles possono anche incidere sulla salute umana e sui problemi di giustizia sociale generalmente legati ai rifiuti elettronici. Possiamo



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

avere vantaggi illimitati riciclando i tessuti intelligenti nel modo corretto. Alcuni dati di fatto sono:

- I prodotti in fibra sintetica non si decompongono e le fibre naturali possono rilasciare gas serra; quindi, è necessario meno spazio in discarica.
- Uso evitato di fibre vergini.
- Consumi ridotti di energia e acqua.
- Evitare l'inquinamento.
- Diminuzione della domanda di coloranti.
- Riduzione delle emissioni di gas serra [4].

18.3 Possibilità di riciclaggio di tessuti intelligenti



Figura 18.1 Riciclaggio intelligente dei tessuti

Il destino dei vecchi e-textiles dipende dagli schemi di gestione dei rifiuti stabiliti nel luogo del loro smaltimento. Tuttavia, gli schemi di riciclaggio attualmente in uso non sono adatti alla raccolta e al trattamento di tessuti con componenti elettronici integrati. Secondo gli esperti di riciclaggio, è difficile riciclare i tessuti elettronici a causa di vari problemi tecnici. Ad esempio, i tessuti potrebbero inceppare trituratori come quelli attualmente utilizzati nel riciclaggio dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE)[5].

Si pensava che la separazione di materiali soffici e leggeri come fogli di plastica metallizzati e fili tessili andasse oltre le capacità dei separatori automatici. Sappiamo dalla tecnologia di riciclaggio RAEE esistente che la triturazione meccanica provoca perdite significative di metalli preziosi. Questi materiali vengono trasmessi in quantità sostanziali nelle frazioni di output, dove non possono essere recuperati. Inoltre, i metalli preziosi (come l'argento) verrebbero trasferiti nella frazione di polvere durante la distruzione dei tessuti elettronici. Gli esperti hanno previsto che lo smistamento e il trattamento manuale dei rifiuti tessili elettronici fosse fattibile, anche se impegnativo. Poiché i metalli ricchi non sono concentrati nei rifiuti tessili elettronici come nei tradizionali rifiuti elettrici, si prevedeva che i costi di lavorazione sarebbero stati insostenibili.

La soluzione per il riciclaggio intelligente dei tessuti deve ancora essere sviluppata. Questi i risultati di alcune ricerche:[6-9]



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

- La tecnologia dovrebbe essere utilizzata per produrre articoli con un ciclo di vita più lungo.
- Gli sviluppatori di tecnologia e progettisti di prodotti di tessuti elettronici non dovrebbero semplicemente assegnare all'industria del riciclaggio la responsabilità della fase di fine vita delle loro invenzioni.
- Trasformare le sfide in opportunità costruendo artefatti tecnologici al fine di ottenere benefici di sostenibilità a lungo termine durante l'intero ciclo di vita del prodotto.
- I benefici della sostenibilità devono essere ricercati e messi in pratica.
- I designer industriali possono svolgere un ruolo fondamentale creando vetrine di tessuti elettronici sostenibili per ispirare consumatori e responsabili delle decisioni a concentrare la loro attenzione su alternative sostenibili.
- L'eco-design del nuovo prodotto deve essere imposto da ogni istituto di ricerca.
- La prevenzione dei rifiuti dovrebbe diventare un obiettivo esplicito delle strategie di innovazione.
- Un maggiore utilizzo di tessuti intelligenti per sensori semplici e grossolani, come sensori resistivi o capacitivi, può aiutare a ottenere precisione attraverso l'uso di più sensori e l'estrapolazione dei dati.
- Maggiore utilizzo di tessuti di superficie attualmente esistenti per ridurre la necessità di minuscoli sensori e componenti elettronici.
- Assicurarsi che più percorsi dati e linee parallele garantiscano affidabilità e sicurezza dei circuiti di guasto.
- Considerare l'uso minimo di materiali, come i monomateriali.
- L'utilizzo di combustibili fossili può creare nuove possibilità per un futuro sostenibile.
- Smontaggio dei circuiti di controllo dal tessuto intelligente per una maggiore longevità e un utilizzo più lungo.
- Migliorare la durata dei prodotti puntando su qualità, usa e getta, usura, riparabilità e obsolescenza.

18.4 Conclusioni

Per migliorare la sostenibilità del mercato tessile e chiudere il ciclo circolare, è necessario aumentare il riciclaggio. L'uso di materiali misti e sintetici basati su sostanze chimiche ostacola le possibilità di riciclaggio. Il riciclaggio dei rifiuti di e-tessili è ancora più complicato; gli attuali schemi di riciclaggio sono inappropriati e una soluzione efficace deve ancora essere sviluppata. Per questi motivi, l'introduzione di nuove tecnologie dovrebbe essere sostenuta da incentivi economici, mentre si incoraggia l'eco-design, l'uso di monomateriali, fibre naturali e processi di legatura privi di sostanze chimiche.

Riferimenti



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

1. Bukhari, M.A., Carrasco-Gallego, R., Ponce-Cueto, E. Developing a national programme for textiles and clothing recovery. *Waste Manag. Res.*, 2018, 36, 321–331.
2. Textile Exchange. Preferred Fiber & Materials, Market Report, 2020.
3. GFA & BCG (Global Fashion Agenda and the Boston Consulting Group). Pulse of the Fashion Industry, 2021
4. Biswas, P. Smart Recycling of Smart Textiles – an Un-explored area in Textile Waste Management, Textile Focus. *Textile Engineer.*, 2021.
5. Shradhanjali, B. & Goutam, B. Sustainability in Smart Textile. National Institute of Fashion Technology, Bhubaneswar, India. – Textile Value Chain, Dec 04, 2020.
6. Çelikel, D.C. Smart E-Textile Materials. Intechopen, October 30th, 2020.
7. Leblanc, R. The Basics of Textile Recycling- Growth of Textile Recycling Promises to Divert More Material from Landfills. The Balance Small Business, December 30, 2020.
8. <https://www.environmentalleader.com/2011/11/study-smart-fabrics-pose-e-waste-threat/>
9. <https://www.360researchreports.com/global-electronic-textiles-sales-market-16615686>



Capitolo 19. CONSERVAZIONE DELLE RISORSE TESSILI INTELLIGENTI ATTRAVERSO IL CONCETTO DELLE 3R

Alexandra Bodoga, Daniela Farima e Alina Dragomir Iovan, Università tecnica "Gheorghe Asachi" di Iasi, Romania

La nostra vita è circondata dai tessuti e poiché siamo nell'era della tecnologia, non sorprende che anche i tessuti abbiano funzioni intelligenti. Al giorno d'oggi ci sono molti tessuti intelligenti e innovativi, tessuti intelligenti che possono essere utilizzati nell'industria della moda.

I tessuti intelligenti sono anche chiamati tessuti elettronici o e-textiles e sono tessuti con componenti elettronici per svolgere alcune funzioni. L'integrazione di componenti digitali non dovrebbe modificare le funzioni dell'abbigliamento come comfort, morbidezza, resistenza, durata.

Il mercato dei tessuti intelligenti è in crescita nei paesi in via di sviluppo e il mercato mondiale dei tessuti intelligenti crescerà da 943 milioni di dollari nel 2015 a 5369 milioni di dollari entro il 2022 [1].

La letteratura fornisce diversi tipi di tessuti intelligenti e la classificazione comune si basa sulle funzioni estetiche e prestazionali dell'abbigliamento. I tessuti estetici intelligenti sono usati nell'industria della moda, e possono cambiare colore, possono illuminarsi. Questi tessuti utilizzano materiali termocromici, solvatocromici, fotocromatici ed elettrocromici. Le funzioni prestazionali si riferiscono alla capacità del materiale di proteggere dalle radiazioni, di monitorare le funzioni corporee come la frequenza cardiaca, di controllare la temperatura corporea.

I tessuti intelligenti potrebbero trasformare gli stimoli in risposte che interagiscono con tutti e 5 i sensi: tattile, visivo, uditivo, olfattivo, tattile. Oltre all'industria dell'abbigliamento, i tessuti intelligenti hanno altre applicazioni come la medicina, le automobili, l'esercito, l'aviazione, la robotica.

I tessuti intelligenti non sono necessariamente più sostenibili di quelli ordinari e secondo la letteratura ci sono alcuni dubbi sulla sostenibilità dei tessuti intelligenti [2]. Entrambe le industrie, tessile e microelettronica, hanno alcuni problemi di sostenibilità.

Il termine "sostenibilità" è diventato sempre più popolare negli ultimi anni in tutti i settori e nel linguaggio dei consumatori. La sostenibilità ha diverse definizioni, ma la più comune è "Qualità di un'attività antropica da svolgere senza esaurire le risorse disponibili e senza distruggere l'ambiente, quindi senza compromettere le possibilità di soddisfare i bisogni delle generazioni future" [3]. La sostenibilità può essere descritto come l'intersezione dei "tre pilastri" che costituiscono le soluzioni ai problemi ambientali, sociali ed economici.



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Dal punto di vista ambientale, l'industria tessile non era molto amichevole, ma grazie a tecnologie avanzate e innovative, questo è cambiato negli ultimi anni. Il progresso tecnologico, il miglioramento dei processi, l'attenzione per l'ambiente, tutti mirano a portare l'industria verso uno sviluppo sostenibile.

Da un punto di vista economico, lo sviluppo sostenibile dell'industria europea può essere raggiunto attraverso la competitività, essendo un passo avanti rispetto alla concorrenza. A causa di restrizioni all'esportazione inique, i concorrenti di altri paesi terzi possono acquistare prodotti a basso prezzo, il che rende difficile mantenere un vantaggio competitivo sul mercato mondiale.

Dal punto di vista sociale vanno seguiti alcuni aspetti: garantire il benessere degli animali, migliorare l'immagine del settore, attrarre investimenti, sostenere l'istruzione e la formazione specialistica, nonché non sfruttare la forza lavoro.

Per un lungo periodo di tempo, la sostenibilità e l'economia circolare sono state affrontate attraverso il prisma del concetto delle 3 "R": Ridurre, Riutilizzare, Riciclare.

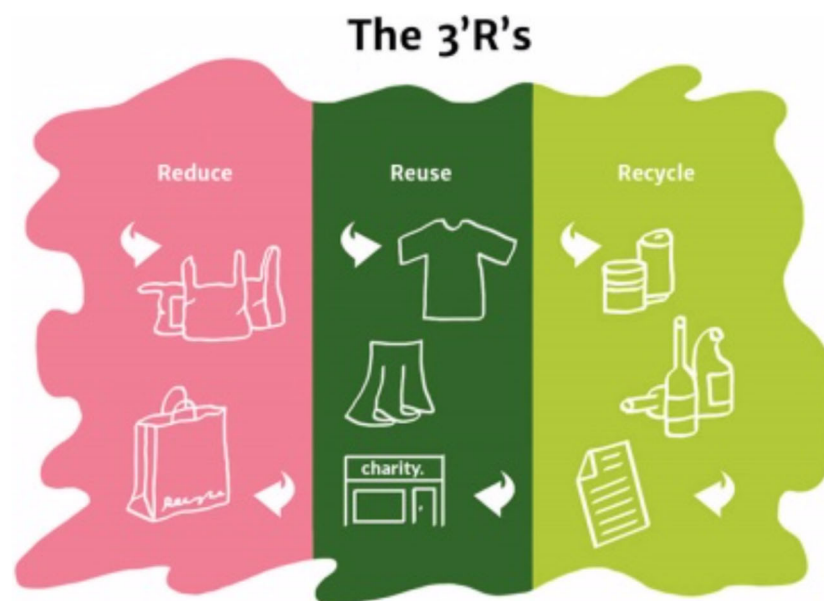


Figura 19.1 Concetto "Rs", fonte:<https://www.solarschools.net/knowledge-bank/sustainability/reduce-reuse-recycle>

Ridurre

Si riferisce a limitare il numero di acquisti al fine di ridurre la quantità di rifiuti generati. Questa è la componente più efficace della gerarchia dei rifiuti.



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Riutilizzo

La seconda "R" significa che i prodotti devono essere utilizzati il più possibile prima di sostituirli. I prodotti tessili vengono solitamente sostituiti perché non sono più di moda, anche se sono ancora funzionanti e non sono danneggiati.

Riciclare

La terza "R" si riferisce al dare un nuovo scopo al prodotto o ad alcune parti di esso.

L'obiettivo delle 3 "R" è ridurre al minimo la quantità di rifiuti prodotti, riutilizzando i prodotti il più possibile e riciclando qualsiasi materiale che possa essere utilizzato per un nuovo scopo.

McDonough e Braungart hanno proposto un nuovo approccio alla "R": ripensare o riprogettare. Questa nuova "R" si basa sul comportamento di riorganizzazione della società, incentrato su processi di eco-design e design strettamente correlati allo sviluppo sostenibile e all'emergere di un nuovo tipo di consumatore, ovvero il consumatore consapevole [1, 4].

L'ultimo concetto è il "6R" che costituisce la base per la produzione sostenibile (ridurre, riutilizzare, rifiutare, reinventare, riparare, riciclare) in quanto consente la trasformazione da un singolo ciclo di vita tradizionale aperto a uno chiuso [5].



Figura 19.2 Le 6"R", fonte:<https://reimagineco.ca/blogs/news/the-6-rs>



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Reimmaginare o ripensare

Si riferisce allo stile di vita del consumatore e alle sue abitudini di acquisto. Prima di acquistare qualcosa, dovrebbero chiedersi se hanno davvero bisogno di quel prodotto e ripensare le loro scelte quotidiane.

Riutilizzo

Invece di acquistare un nuovo prodotto, reinventa e trova un uso alternativo per quello esistente.

Ridurre

L'obiettivo è ridurre la quantità di rifiuti creati acquistando solo i prodotti importanti e limitare gli acquisti.

Riparazione

Prima di buttare via un prodotto dovrebbe prolungarne la vita riparandolo.

Rifiutare

Si riferisce al fatto che tu rifiuti di pagare un extra per qualcosa che finirebbe per generare più rifiuti, come un grande pacco pieno di carta.

Riciclare

Le materie prime dei prodotti tessili possono essere recuperate e riutilizzate per ottenere un altro prodotto, il che significa la conservazione delle risorse naturali e il contributo allo sviluppo sostenibile.

Ognuna di queste "R" descrive un'azione che può essere intrapresa per ridurre l'impatto ambientale dei prodotti.

La capacità di riciclare prodotti tessili intelligenti dipende dai materiali utilizzati e dal livello di integrazione tra le componenti tessili e tecnologiche [5]. Un altro aspetto è il modo in cui vengono posizionati i dispositivi elettronici: cuciti, abbottonati, con velcro, zippati. Non rimuovere i dispositivi elettronici al momento del riciclaggio rende il processo più difficile. Anche se l'hardware elettronico viene rimosso, sono difficili da riciclare. Il miglior metodo di smaltimento dei rifiuti tessili è il riciclo, ma in termini di tessuto intelligente il processo è molto complicato, difficile, costoso e talvolta impossibile.

19.4 Conclusioni

Integrando questi principi nella progettazione, produzione, utilizzo e smaltimento dei tessuti intelligenti, il concetto delle 3R promuove la conservazione delle risorse, la riduzione dei rifiuti e la sostenibilità ambientale. Contribuisce a massimizzare il valore derivato da questi materiali e a minimizzare il loro impatto sull'ambiente.



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

I tessuti intelligenti spesso incorporano componenti elettronici che richiedono energia per funzionare. Conservando le risorse e implementando progetti ad alta efficienza energetica, possiamo ridurre il consumo di energia e la dipendenza dai combustibili fossili, riducendo così le emissioni di gas serra e contrastando il cambiamento climatico.

La conservazione delle risorse promuove l'innovazione sostenibile nel campo dei tessuti intelligenti. Incentiva lo sviluppo di materiali eco-friendly, processi di produzione efficienti e tecnologie di riciclaggio. Concentrandosi sulla conservazione delle risorse, il settore può guidare progressi che si allineano con la tutela dell'ambiente e la responsabilità sociale.

Sottolineare la conservazione delle risorse nei tessuti intelligenti si allinea ai principi di un'economia circolare. Riducendo, riutilizzando e riciclando i materiali, possiamo creare un sistema a ciclo chiuso in cui le risorse vengono utilizzate in modo efficiente, i rifiuti vengono minimizzati e i materiali preziosi vengono continuamente riportati nel ciclo produttivo.

In definitiva, conservare le risorse nei tessuti intelligenti è essenziale per ridurre l'impatto ambientale, ridurre i rifiuti, promuovere la sostenibilità e stimolare progressi economici e tecnologici in modo responsabile ed efficiente.

Riferimenti

1. Çelike, D.C. Smart E-Textile Materials, 2013. DOI: 10.5772/intechopen.92439
2. Ossevoort, S. Improving the sustainability of smart textiles: Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers, 2013. DOI: 10.1533/9780857093530.3.399
3. Brundtland Commission. *Our Common Future*. Oxford, Oxford University Press, 1987.
4. McDonough, W. and Braungart, M. *Cradle-to-Cradle: Remaking the Way We Make Things*. New York, North Point Press, 2002
5. Jayal, A.D., Badurdeen, F., Dillon, O.W. Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process, and system levels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2010, 2(3), 144-152. DOI: 10.1016/j.cirpj.2010.03.006



Capitolo 20. SVILUPPO SOSTENIBILE DI TESSILI INTELLIGENTI

Athanasios Panagiotopoulos e Georgios Priniotakis, UNIWA, Grecia

Introduzione, definizioni

I tessuti intelligenti possono essere definiti come tessuti in grado di percepire e reagire alle condizioni ambientali e agli stimoli esterni (ad esempio, stimoli meccanici, termici e chimici) grazie a una serie di sensori incorporati nei tessuti.

Sostenibilità significa soddisfare i nostri bisogni attuali senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni. Oltre alle risorse naturali, lo sviluppo sostenibile necessita anche di risorse sociali ed economiche. La sostenibilità non è solo ambientalismo. Nella maggior parte delle definizioni di sostenibilità, troviamo preoccupazioni per l'equità sociale e lo sviluppo economico.

La combinazione dei termini smart textiles e sostenibilità, porta alla necessità di una nuova definizione: quella dello smart textiles sostenibile. In un aspetto ampio e generale, che verrebbe definito come tessuti intelligenti che soddisfano la domanda di sostenibilità in ogni aspetto delle loro funzioni e applicazioni e durante tutto il loro ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime fino alla fine della vita, comprese le fasi più importanti di fabbricazione e utilizzo. Ciò che è di massima importanza per soddisfare le esigenze di tessuti intelligenti sostenibili è che siano progettati e sviluppati come tali.

Di seguito, presenteremo gli aspetti più importanti dello sviluppo di tessuti intelligenti che possono essere considerati sostenibili. La ricerca della sostenibilità è un processo di sviluppo continuo che si ripete eternamente; pertanto, gli aspetti presentati di seguito non devono essere considerati gli unici, ma i più importanti e un buon punto di partenza per chiunque desideri uno sviluppo intelligente e sostenibile.

20.1 Consumo di energia

Il consumo di energia è uno degli aspetti più importanti legati alla sostenibilità, in particolare il consumo eccessivo di energia quando questa energia è basata su fonti non rinnovabili come i combustibili fossili. In termini di tessuti intelligenti, una caratteristica estremamente utile per evitare il consumo di energia è la capacità di autopulizia. Diverse soluzioni tecnologiche possono essere utilizzate per questo, come fotocatalizzatori, microonde, nanotubi di carbonio, ossido di metallo colloidale, nanoparticelle d'argento e alammina di cloro [1]. La realizzazione di proprietà autopulenti sulle superfici tessili utilizzando la nanotecnologia offre un vasto potenziale per lo sviluppo di nuovi materiali o nuovi prodotti e applicazioni per materiali noti [2]

Inoltre, l'autoriparazione può prolungare di diversi anni il ciclo di vita di un tessuto. Se riusciamo a ottenere l'autoguarigione, ciò significa che possiamo prolungare la sostituzione di un tessuto e ciò comporta una minore energia necessaria per produrne uno nuovo.



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

I tessuti autorigeneranti, noti come tessuti intelligenti con funzione di autoriparazione automatica, sono considerati un elemento essenziale promettente per la continua espansione dell'industria tessile. I tessuti autoriparanti sono stati convenzionalmente sviluppati con l'uso di finiture di rivestimento chimico in forma di microcapsule, idrogeli o altre matrici polimeriche [3].

Inoltre, la capacità di auto-termoregolazione dei tessuti è una vera e propria rivoluzione per i consumi energetici. Si possono immaginare abiti che abbiano la capacità di regolare la temperatura del corpo della persona che li indossa, quindi ci sarebbe meno o forse nessuna necessità di dispositivi di riscaldamento o raffreddamento che consumano una notevole quantità di energia. Le strategie per tale approccio includono tessuto di raffreddamento/riscaldamento, tessuto di raffreddamento/riscaldamento, tessuto colorato, tessuti dinamici, tessuto a base di fibre PCM, pellicole/tessuti ibridi a base di nanofibre metalliche, grafene e materiali a base di carbonio, dispositivo termoelettrico (TED) [4]



Figura 21.1 La sostenibilità porta a un futuro verde

20.2 Materiali

La sostenibilità dei tessuti intelligenti deve anche fare riferimento al tipo di materiali utilizzati per la fabbricazione del prodotto. I materiali troppo costosi o che richiedono risorse considerevoli dovrebbero essere evitati a favore di altri materiali e, idealmente, di materiali riciclati considerati sostenibili, ad esempio carbon neutral o riciclati o riciclabili.

È persino possibile pensare a una soluzione di materiali e componenti elettronici, che sono giunti alla fine della loro vita e potrebbero essere integrati su tessuti intelligenti. Un



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

esempio sono i microprocessori che sono considerati obsoleti per applicazioni ad alta tecnologia (informatica), ma possono funzionare in modo efficiente su applicazioni a bassa domanda in tessuti intelligenti, controllando un numero limitato o dispositivi di input/output come i sensori. In questo modo, quantità significative di rifiuti elettronici pericolosi vengono riciclate e rimangono in servizio invece di essere una fonte di contaminazione [5]. Lo stesso può valere per piccoli schermi di telefoni cellulari o apparecchiature di comunicazione radio.

La possibilità di componenti elettronici smontabili dallo smart textile, montando l'hardware elettronico sul textile in modo facilmente rimovibile, può prevedere l'aggiornamento dell'hardware e un ciclo di vita più lungo e conseguente riduzione dei rifiuti elettronici.

20.3 Produzione di energia

Abbiamo già fatto riferimento al consumo di energia con il significato di diminuire l'energia necessaria per il funzionamento del tessuto intelligente. Un passo avanti è la produzione di energia dal tessuto stesso.

Ciò potrebbe accadere con la raccolta di energia biomeccanica dai tessuti poiché il corpo umano è una ricca fonte di energia biomeccanica. Una soluzione tecnologica abbastanza matura per la raccolta di energia biomeccanica è l'effetto piezoelettrico che potrebbe essere integrato con i tessuti per la generazione di elettricità sul corpo. Rispetto all'energia biomeccanica intermittente che richiede i movimenti del corpo, un'altra fonte di energia è il calore corporeo, che esiste costantemente sul corpo umano anche in posture stazionarie, che ha origine da sottoprodotti metabolici ed è diventato una fonte di energia disponibile per la generazione continua di energia elettrica nel corso dei decenni scorsi. Oltre alla suddetta generazione di elettricità dai movimenti biomeccanici e dal calore corporeo, l'energia biochimica è un tipo di fonte di energia sul corpo che è generalmente disponibile ma solitamente ignorata, che si presenta in forme come fluidi del corpo, inclusi sudore, lacrime, sangue e saliva [6].

Fotovoltaico Tessile

I due settori principali per i tessuti fotovoltaici (FV) sono in primo luogo l'alimentazione di sensori e altri dispositivi elettronici integrati in un tessuto indossabile, quindi l'uso su larga scala dell'energia solare da tende da sole, ombrelloni, coperture e installazioni simili. Al momento non ci sono prodotti di energia solare puramente tessili, ma molte versioni su scala di laboratorio che stanno gareggiando per lo sviluppo in applicazioni commerciali.

La prima sfida nella fabbricazione di qualsiasi cella fotovoltaica è quella di fornire una base elettricamente conduttiva che non abbia una barriera resistiva al flusso di cariche dalla cella. Per le celle che erogano correnti significative vengono utilizzati solo metalli, mentre le celle a film sottile con prestazioni inferiori possono utilizzare ossidi trasparenti meno conduttivi (ad esempio, ossido di indio-stagno-ITO o ossido di alluminio-zinco-AZO). I polimeri conduttori non sono sufficientemente conduttori da soli [7]



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Utilizzo di fibre naturali

I compositi a base di fibre naturali sono oggetto di intensi studi a causa della loro natura ecologica e delle loro proprietà uniche. I suoi vantaggi sono la loro fornitura continua, la manipolazione facile e sicura e la natura biodegradabile. Sebbene le fibre naturali abbiano proprietà fisiche e meccaniche ammirevoli, variano a seconda della fonte vegetale, delle specie, della geografia, tra le altre [8].

Le categorie di fibre naturali sono:

- Fibre vegetali che includono rafia, foglie, stelo, frutta, semi e altro come il legno.
- Fibre animali che includono peli come lana, angora, mohair, cashmere e alpaca, oltre alla seta.
- Anche le fibre minerali come l'amianto [9] potrebbero essere utili, ma comportano problemi per la salute umana e questo è un fattore inibitorio.

La categoria più promettente e innovativa è quella delle fibre ottenute da frutta e semi. Ogni anno vengono sprecate tonnellate di frutta. Se diventa possibile produrre fibre da esse, ciò porterà a grandi risultati ambientali ed economici.

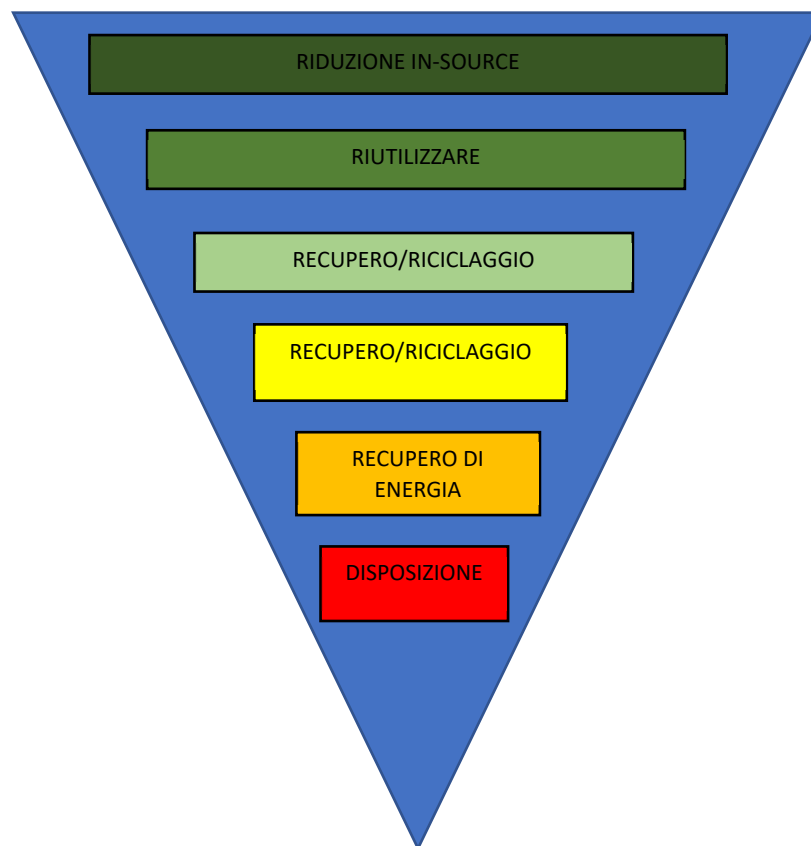


Figura 21.2 Gerarchia di riduzione dei rifiuti



20.3 Conclusioni

Sebbene i tessuti intelligenti non abbiano ancora un mercato maturo, devono comunque soddisfare la domanda di sostenibilità, come ogni altro prodotto. Per essere sostenibili, i tessuti intelligenti devono essere progettati e sviluppati come tali. Le modifiche e gli adattamenti pertinenti saranno applicati ad ogni singola parte del prodotto (filati e componenti elettronici), ma dovrebbero essere anche applicabili durante l'intero ciclo di vita. Ciò significa che gli aspetti come il consumo di energia durante la fase di utilizzo dovrebbero essere minimizzati e/o bilanciati, ad esempio mediante la produzione di energia da parte del tessile intelligente stesso.

Riferimenti

1. Saad, S.R., Mahmed, N., Abdullah, M.M.A.B., Sandu, A.V. Self-Cleaning Technology in Fabric: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 133. doi:10.1088/1757-899x/133/1/012028
2. Self Cleaning Textile <https://www.technicaltextile.net/articles/self-cleaning-textile-an-overview-2646>
3. Cheung, T.W., Li, L. Sustainable development of smart textiles: a review of self-functioning abilities which makes textiles alive. *J Textile Eng. Fashion Technol*, 2018, 4(2), 151-156. DOI: 10.15406/jteft.2018.04.00133
4. Hu, R.; Liu, Y.; Shin, S.; Huang, S.; Ren, X.; Shu, W.; Cheng, J.; Tao, G.; Xu, W.; Chen, R.; Luo, X. Emerging Materials and Strategies for Personal Thermal Management. *Advanced Energy Materials*, 2020. doi:10.1002/aenm.201903921
5. Veske, P.; Ilän, E. Review of the end-of-life solutions in electronics-based smart textiles. *Journal of Textile Institute*, 2020, 1–14. doi:10.1080/00405000.2020.1825176
6. Chen, G.; Li, Y.; Bick, M.; Chen, J. Smart Textiles for Electricity Generation. *Chemical Reviews*, 2020. doi:10.1021/acs.chemrev.9b00821
7. Wilson, J.I.B, and Mather, R.R. Photovoltaic solar textiles. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2019, 32, 1-4.
8. Asim, M.; Abdan, K.; Jawaid, M.; Nasir, M.; Dashtizadeh, Zahra; Ishak, M.R.; Hoque, M. E. A Review on Pineapple Leaves Fibre and Its Composites. *International Journal of Polymer Science*, 2015, 1–16. doi:10.1155/2015/950567
9. Daria, M.; Lejcuã, K.; Misiewicz, J. Characteristics of biodegradable textiles used in environmental engineering: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122129

21. TOSSICITÀ DEI TESSUTI INTELLIGENTI

Olga Papadopoulou, Sviluppo del pensiero creativo, Solonos 8 & Empedokleous, 19009, Ntrafi Rafinas, Grecia

21.1 Introduzione

L'industria tessile è un settore completamente sviluppato e tecnologicamente avanzato con un notevole impatto in termini di CO₂ ed inquinamento idrico, dovuto principalmente ai processi di tintura [1, 2]. Un'ampia gamma di agenti chimici è coinvolta nei processi di produzione tessile industriale per l'imbozzimatura e la sbozzimatura, il candeggio, la tintura, il finissaggio e l'ammorbidimento [3]. Da tenere in considerazione anche ritardanti di fiamma e trattamenti superficiali con nanomateriali ingegnerizzati [1]. La tossicità della maggior parte di queste sostanze chimiche impiegate nei processi di produzione dei tessuti tradizionali è ben documentata ed i limiti di esposizione sono stati determinati da studi sistematici negli ultimi decenni [1, 3].

Oltre ai tipi convenzionali di tessuti e ai relativi rischi, l'uso crescente di nanomateriali, sostanze chimiche per batterie e metalli pesanti integrati nei tessuti intelligenti, ha sollevato ulteriori preoccupazioni sui potenziali rischi per la salute legati al loro uso e manutenzione, nonché al loro trattamento al termine della loro vita. Alcuni studi recenti



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

evidenziano l'impatto ambientale dei nanomateriali e descrivono le procedure necessarie [4-6]. Gli aspetti di tossicità legati al ciclo di vita dei tessuti intelligenti hanno un enorme impatto sulla salute umana e sulla sicurezza, sull'ambiente e sull'efficienza delle attuali procedure di gestione dei rifiuti e riciclo [2, 6]. Esiste un profondo conflitto tra le funzionalità illimitate e la sostenibilità complessiva dei prodotti tessili intelligenti [2,6,7]. I paragrafi seguenti forniscono una panoramica delle conoscenze fondamentali sulla potenziale tossicità dei tessuti intelligenti con l'obiettivo di informare i centri di innovazione, i ricercatori, gli investitori, le PMI, i produttori industriali, gli utenti finali e i responsabili politici.

21.2 Rischi per la salute umana legati ai tessuti intelligenti

Secondo Rovir et al. [1] le categorie di sostanze chimiche di provata tossicità, largamente utilizzate nell'industria tessile, includono:

(a) Ammine aromatiche, utilizzate principalmente per la produzione di coloranti azoici. Molti di questi composti sono caratterizzati come allergeni e soprattutto come composti cancerogeni e genotossici.

(b) Metalli tossici come Co, Pb, Cr, Cu, Ni, Cd, Hg, AS, Zn (componenti di complessi organometallici o pigmenti inorganici nei coloranti), catalizzatori tossici come Sb₂O₃, nanoparticelle metalliche e di ossido aggiunte nei tessuti per ottenere proprietà su misura.

(c) Ftalati, frequentemente riscontrati sotto forma di stampe in PVC, che sono classificati come potenziali interferenti endocrini.

(d) Resine a base di formaldeide, utilizzate nel finissaggio dei tessuti, che sono irritanti per la pelle e potenzialmente cancerogene in caso di elevati livelli di formaldeide rilasciata.

(e) Additivi di eteri di difenile polibromurato (PBDE) ed esabromociclododecano (HBCD), impiegati come ritardanti di fiamma. Queste sostanze chimiche, sebbene non studiate in modo approfondito in termini di particolari meccanismi di intossicazione, si accumulano nei tessuti umani e sono state rilevate anche come inquinanti domestici con impatto sugli ecosistemi.

I nanomateriali ingegnerizzati entrano nel corpo umano, principalmente per inalazione, assorbimento cutaneo e ingestione, con i primi due percorsi più frequenti [3, 4].



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Nel caso di tessuti e dispositivi indossabili funzionalizzati, i tipi più comuni di nanoparticelle, nanofibre e nanorivestimenti impiegate per offrire un'ampia gamma di proprietà - come conduttività elettrica, prestazioni autopulenti e antibatteriche, maggiore forza meccanica e resistenza all'abrasione, blocco UV, resistenza al ritardo di fiamma, idrorepellenza e molti altri - sono particelle metalliche (Ag, Cu, Au), varie particelle a base di carbonio (CNT, nerofumo), nano-argille e ossidi inorganici (TiO₂, Al₂O₃, ZnO), ossido di grafene [2- 4, 9, 8, 9]. Alcuni tipici nano-dispositivi integrati e fibre flessibili utilizzate come batterie sono celle galvaniche Al-NaOCl e (LiFePO₄/Li₄Ti₅O₁₀/ossido di polietilene solido/PVDF), rispettivamente. Strati polimerici e copolimerici, fibre polimeriche fotoniche bandgap, film metallici depositati mediante sputtering e filati conduttivi multicomponente con funzione di supercondensatore sono anch'essi tipici componenti nanodimensionali dei tessuti intelligenti [2]. Tutti i suddetti prodotti chimici e materiali sono correlati a vari rischi di tossicità. La Figura 21.1 illustra la penetrazione dei CNT in una cellula polmonare.

Figura 21.1 Immagine al microscopio elettronico a scansione raffigurante nanotubi di carbonio (CNT) che penetrano in una cellula polmonare (Fonte: Robert R. Mercer, Ann F. Hubbs, James F. Scabilloni, Liying Wang, Lori A. Battelli, Diane Schwegler-Berry, Vincent Castranova e Dale W. Porter / NIOSH; dominio pubblico CC0).

I rischi per la salute e la sicurezza sono legati a tutte le fasi del ciclo di vita dei prodotti: la produzione di materie prime, l'integrazione di nanomateriali e delle componenti elettroniche con i tessuti durante la produzione, la fase di utilizzo e il trattamento e lo smaltimento dei rifiuti a fine vita. Il rischio di esposizione più elevato è quello a cui sono sottoposti i lavoratori dell'industria tessile durante la fase di produzione [3, 4]. I metodi più comuni per l'integrazione di componenti tessili intelligenti sono: (i) tessitura, lavorazione a maglia, laminazione o cucitura di fili conduttivi su tessuti, (ii) tessitura e lavorazione a maglia per la produzione di tessuti bidimensionali e tridimensionali, (iii) incorporazione delle componenti elettroniche nel substrato del tessuto mediante la creazione di contatti elettrici [10].

Il rilascio di costituenti potenzialmente tossici dai prodotti tessili intelligenti finali può essere generato da abrasione, sudore, sbalzi di temperatura, irradiazione, lavaggio durante l'uso [9]. L'assorbimento cutaneo è considerato il principale problema di salute per gli utenti finali di tessuti intelligenti, ma questi effetti non sono ben studiati [4]. Molti studi riportano possibili meccanismi di assorbimento e accumulo di nanoparticelle, nanoaggregati e nanoagglomerati negli organi umani [4]. Particelle di dimensioni inferiori a 100 nm penetrano nelle membrane cellulari e creano vari disturbi, tra cui stress ossidativo, infiammazione, apoptosi, disfunzione mitocondriale e lisosomiale e



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

genotossicità [15]. I pericoli specifici dipendono dalle proprietà fisico-chimiche delle particelle (dimensioni, composizione chimica, energia superficiale, carica ecc.) [4, 6] e le due principali conseguenze sono effetti tossici e danni al DNA responsabili di malattie neurologiche e cancro [4]. Periyasamy nella sua ampia rassegna sulle conseguenze del rilascio di microfibre tessili, include studi che hanno rilevato microfibre in campioni di placenta umana [3]. Lo stesso autore elenca tutti i metalli pesanti aggiunti nei tessuti polimerici, la loro funzionalità ed i relativi rischi per la salute dell'uomo, che vanno dalle allergie a vari tipi di cancro e insufficienza d'organo. Nella Figura 21.2 sono riassunti i problemi di salute e le malattie più comuni causati dall'esposizione umana intensa o prolungata ai nanomateriali.

Figura 21.2 Malattie e condizioni di salute legate all'esposizione e all'accumulo di nanoparticelle nel corpo umano (*Fonte: Cristina Buzea; CC0 Pubblico Dominio*).

Almeida et al. riportano le norme EN ISO che sono state aggiornate o adattate per la valutazione degli effetti del contatto cutaneo con i tipici nanomateriali contenuti nei tessuti. La maggior parte di questi metodi di prova sono concepiti come test di immersione in soluzioni di sudore artificiale [9]. L'elettronica integrata nei tessuti intelligenti richiede un approccio diverso.

21.3 Impatti ambientali delle componenti tossiche dei tessuti intelligenti

I rischi ambientali e gli impatti sull'ecotossicità dell'emissione di agenti tossici durante i processi di lavaggio e lo smaltimento a fine vita dei tessuti intelligenti costituiscono un campo separato che richiede monitoraggio e controllo, in modo che la futura produzione di massa di tessuti multicomponente, indumenti e dispositivi indossabili non provochi un inquinamento diffuso, come nel caso delle microplastiche [5, 7].

Forse i dati più frequentemente pubblicati sono i risultati dei test di lavaggio di tessuti con proprietà antiodore e/o antimicrobiche. Numerosi studi hanno segnalato un'estesa lisciviazione di nanoparticelle d'argento [2,4], un rischio probabilmente sottovalutato durante la progettazione di questi prodotti. Ad oggi, esiste solo una procedura standard disponibile per il lavaggio secondo la norma ISO 6330 e nessuna linea guida specifica per un corretto riciclaggio o regolamenti internazionali che minimizzino l'impatto ambientale [10]. Le pratiche di riciclo appropriate rappresentano un ulteriore problema da affrontare. L'efficacia del riciclo tessile tradizionale (che raggiunge il 100%) non è applicabile ai rifiuti tessili intelligenti [6, 8]. Doles et al. nel loro lavoro di revisione [11], citano alcuni miglioramenti sulla riciclabilità di particolari categorie di fibre utilizzate per la fabbricazione



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

di dispositivi di protezione individuale, quali fibre elastomeriche altamente estensibili, fibre a base di cellulosa e fibre sintetiche di base. Alcuni risultati positivi per quanto riguarda la riciclabilità parziale dei componenti metallici (dopo il recupero metallurgico o la separazione meccanica dai materiali polimerici) sono stati riportati anche nel caso di tessuti elettronici conduttivi [6]. Tuttavia, questa non è una tendenza generale e non sono disponibili pratiche sistematiche attraverso le quali la disintegrazione/distacco e la separazione dei tessuti di substrato da nanoparticelle, elettronica o altri componenti sarebbe possibile. Alcuni risultati positivi per quanto riguarda la riciclabilità parziale dei componenti metallici (dopo il recupero metallurgico o la separazione meccanica dai materiali polimerici) sono stati riportati anche nel caso di tessuti elettronici conduttivi [6]. Tuttavia, questa non è una tendenza generale e non sono disponibili pratiche sistematiche attraverso le quali la disintegrazione/distacco e la separazione dei tessuti di substrato da nanoparticelle, elettronica o altri componenti sarebbe possibile.

Come sottolineato da Köhler [7], i tessuti intelligenti con elettronica e sensori nella fase di fine vita dovrebbero essere raccolti e trattati come dispositivi elettronici. Fino ad ora, non esistono leggi e regolamenti specifici per la progettazione ecologica e la gestione dei rifiuti dei dispositivi indossabili [5]. La contaminazione sistematica dei sistemi di riciclaggio dei rifiuti solidi, delle discariche e dei siti di incenerimento, il trattamento delle acque reflue con nanoparticelle e altri agenti tossici e chimici porterebbe inevitabilmente all'inquinamento dell'ecosistema attraverso l'acqua, il suolo e l'aria [3, 7].

21.4 Metodi di valutazione della tossicità e dell'ecotossicità - Norme e politiche richieste

Gli studi incentrati sulla tossicità dei nanomateriali per l'uomo sono piuttosto limitati e si basano principalmente sull'estrapolazione di modelli di esposizione animale all'uomo. Per raggiungere questo obiettivo, i ricercatori hanno impiegato diverse specie animali e di microrganismi per esperimenti in vivo, al fine di valutare l'effetto di vari tipi di nanoparticelle. Tuttavia, non sono disponibili protocolli sistematici che correlano le proprietà fisico-chimiche di questi materiali e i meccanismi di intossicazione e, pertanto, i risultati sperimentali sono spesso inconcludenti [4]. Secondo l'articolo di recensione di Saleem et al. [4], l'ultima tendenza di ricerca degli studi tossicologici è principalmente l'uso di tecniche in vitro, impiegando linee cellulari epiteliali o in alternativa colture 3D. La valutazione di questo tipo di esperimenti potrebbe fornire informazioni su potenziali danni al DNA (distruzione o ossidazione), mutazioni su geni e distruzione di cromosomi [4]. In ogni caso la selezione del metodo di prova adatto dipende dalle proprietà uniche dei nanomateriali e dal fattore tossicocinetico del sistema biologico esaminato [12].



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

L'impatto ambientale viene affrontato principalmente mediante metodologie di valutazione del rischio (valutazioni del ciclo di vita progettate per prevedere il carico tossico derivante dai processi di lavaggio o smaltimento dei rifiuti), combinate con studi di casi di ecotossicità di fine vita [3-7]. Quest'ultima categoria comprende analisi dell'accumulo di contaminanti tossici in fonti acquatiche, sedimenti, piante, batteri del suolo e altri organismi viventi [4]. Ad esempio, le microfibre rilasciate da tessuti funzionalizzati sono state rilevate in campioni di verdura, frutta e pesce da diversi studi [3].

Valutare la tossicità e l'ecotossicità dei tessuti intelligenti e affrontare i problemi di lavabilità e riciclabilità sono sfide direttamente correlate alla sostenibilità complessiva di questi prodotti innovativi [2, 4, 7, 10]. Indagini mirate condotte nel 2011 da due esperti, che hanno intervistato ricercatori e dirigenti di diversi istituti di ricerca europei e PMI coinvolte nelle tecnologie tessili intelligenti, hanno rivelato l'ignoranza sugli effetti collaterali derivanti dallo smaltimento dei rifiuti a fine vita, la mancanza di adeguate valutazioni del ciclo di vita e la limitata adattamento delle strategie di prevenzione dei rifiuti secondo le politiche dell'UE [7].

Schischke et al [5] in uno studio pubblicato nel 2020, citano fonti letterarie molto scarse con dati di analisi del ciclo di vita sull'elettronica indossabile e sui tessuti intelligenti. Sebbene si prevedano progressi significativi nell'ultimo decennio, si può dedurre che la progettazione di standard specifici e regolamenti internazionali per la sicurezza e l'ingegneria ambientale è molto indietro rispetto al progresso tecnologico nella ricerca applicata e nell'innovazione, nella progettazione e fabbricazione di prodotti e nella produzione su scala industriale [5, 7, 10].

La serie di norme ISO pubblicata sulla nanotecnologia [13] e quelle in fase di sviluppo [14] rappresentano passi positivi verso una terminologia concisa, la caratterizzazione dei materiali, l'analisi dei rischi, i test di tossicità e molti altri campi. Alcune linee guida per la futura standardizzazione dei prodotti tessili intelligenti sono state incluse nella norma ISO/TR 23383:2020(en) [15].

Gli esperti del settore sottolineano la responsabilità degli investitori e dei produttori di rispettare le normative vigenti in materia di salute e sicurezza e ambientali, intraprendere analisi di valutazione del rischio in tutte le fasi del ciclo di vita dei prodotti tessili intelligenti e fornire informazioni chiare ai consumatori in merito all'uso sicuro e adeguato smaltimento dei prodotti di scarto [2, 5]. Glisovic et al. [6] riportano metodologie generiche per l'analisi del ciclo di vita dei nanomateriali ingegnerizzati applicabili all'industria dei tessuti intelligenti e dei dispositivi indossabili.



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

Un approccio interdisciplinare con la sinergia di esperti di vari campi - ingegneria, chimica, scienze dei materiali e tessili, design dell'abbigliamento, medicina, tossicologia, sicurezza, scienze ambientali - è considerato un prerequisito, non solo per la progettazione di tessuti intelligenti ma anche per la creazione dei sistemi, dei regolamenti e delle politiche internazionali in materia di salute e sicurezza e di controllo ambientale e della gestione sostenibile dei rifiuti a fine vita [6, 9, 11].

Conclusioni

Le sostanze chimiche tossiche più comuni riscontrate su tessuti e dispositivi indossabili intelligenti, nonché sui substrati di tessuto tradizionali, vengono presentate insieme ai rischi per la salute e alle malattie segnalate per gli esseri umani in varie fasi del ciclo di vita dei prodotti. Vengono brevemente discussi gli impatti ambientali e l'ecotossicità legati al fine vita. Il capitolo offre una panoramica generale delle metodologie di valutazione della tossicità e delle normative e politiche esistenti, evidenziando gli aspetti deboli relativi alla sostenibilità dei prodotti tessili intelligenti che devono essere affrontati nel prossimo futuro.

Riferimenti

1. J. Rovira, J. L. Domingo (2019), Human health risks due to exposure to inorganic and organic chemicals from textiles: A review, *Environmental Research*, 168, pp.62-69, doi:10.1016/j.envres.2018.09.027
2. M. A. Shah, B. M. Pirzada, G. Price, A. L. Shibiru, A. Qurashi (2022), Applications of nanotechnology in smart textile industry: A critical review, *Journal of Advanced Research*, 38, pp. 55-75, doi: 10.1016/j.jare.2022.01.008
3. P. Periyasamy (2023), Microfiber emissions from functionalized textiles: Potential threat for human health and environmental risks, *Toxics*, 11, 406, doi: 10.3390/toxics11050406.
4. H. Saleem, S. J. Zaidi (2020), Sustainable use of nanomaterials in textiles and their environmental impact, *Materials*, 13, 5134, doi:10.3390/ma13225134
5. K. Schischke, N. F. Nilsen, M. Schneider-Ramelow (2023), *MRS Communications*, 10(1), pp.69-82, doi: 10.1557/mrc.2019.157.
6. S. Glisovic, D. Pesic, E. Stojiljovic, T. Golubovic, D. Krstic, M. Prasevic, Z. Jankovic (2017), Emerging technologies and safety concerns: a condensed review of environmental life cycle risks in the nano-world, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14, pp.2301-2320, doi:10.1007/s13762-017-1367-2
7. A. R. Köhler, C. Som (2014), Risk preventive innovation strategies for emerging technologies the case of nano-textiles and smart textiles, *Technovation*, 34, pp. 420-430,
8. B.S. Hassan, G. M.N. Islam, A. N. M. A. Haque (2019), Applications of Nanotechnology in Textiles: A review, *Advance Research in Textile Engineering*, 4(2), 1038, ISSN: 2572-9373



2020-1-RO01-KA226-HE-095335

9. L. Almeida, D. Ramos (2017), Health and safety concerns of textiles with nanomaterials, 17th World Textile Conference AUTEX 2017- Textiles - Shaping the Future, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 254, 102002, doi:10.1088/1757-899X/254/10/102002.
10. H. L. O. Junior, R. M. Neves, F. M. Monticelli, L. Dall Agnol (2022), Smart fabric textiles: Recent advances and challenges, Textiles, 2, pp.582-605, doi:10.3390/textiles2040034.
11. P. I. Dolez, S. Marsha, R. H. McQueen (2022), Fibers and Textiles for personal protective equipment: Review of recent progress and perspectives on future developments, Textiles, 2, pp.349-381, doi:10.3390/textiles2020020.
12. https://www.oecd.org/env/ehs/testing/Draft_GD_nano_and_genotox_rev2.pdf
13. <https://www.iso.org/committee/381983/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>
14. <https://www.iso.org/committee/381983/x/catalogue/p/0/u/1/w/0/d/0>
15. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:23383:ed-1:v1:en>