



**Progetto TECHEA - Technologies for Health
WorkPackage WP3**

Attività A3.2: sistemi indossabili sensorizzati.

**DELIVERABLE D3.2.1: Rapporto tecnico su specifiche tecniche e prove per il prototipo di sensori
indossabili**

*Michele Arturo Caponero, Rosaria D'Amato, Valerio Orsetti, Andrea Polimadei, Gaetano
Terranova, Maria Aurora Vincenti*

15 Dicembre 2019

INDICE

<u>1. INTRODUZIONE</u>	<u>4</u>
<u>2. SENSORI INGLOBATI IN SAGOMATI POLIMERICI</u>	<u>4</u>
<u>3. SENSORI DI UMIDITÀ PER LA SUDORAZIONE</u>	<u>9</u>
<u>4. STUDIO FINALIZZATO DELLA TECNOLOGIA LPG</u>	<u>10</u>

INDICE DELLE TABELLE E DELLE FIGURE

Figura 1 - Principali specifiche tecniche dei prodotti della famiglia Dragon Skin (TM).....	5
Figura 2 - Inglobamento del sensore in stampo a cielo aperto	5
Figura 3 - Sensore FBG al termine della operazione di inglobamento nel sagomato	6
Figura 4 - Disegno concettuale del sensore inglobato in sagomato con piastrini	6
Figura 5 - Schematica rappresentazione del sistema di applicazione del sagomato	7
Figura 6 - Operazioni di casting (sx); disegno di uno degli stampi usati (centro); disegno dello stampo applicato sul supporto -in blu- e con la tramoggia -in rosso- in posizione (dx).	7
Figura 7 - Differenti versioni di stampo provate per la ottimizzazione della produzione del sagomato	8
Figura 8 - Prove in laboratorio di sensore installato su indossabile, per il monitoraggio della postura (immagini tratte da relazione proposta a 'I2MTC 2020 conference')	8
Figura 9 - Realizzazione dei sensori di umidità tramite deposito del chitosano	9
Figura 10 - Risposta dei due sensori FBG realizzati alle variazioni umidità. Nel grafico in basso è riportata la risposta di un sensore di riferimento capacitivo	10
Figura 11 - Foto del banco di lavoro per lo studio della risposta in trasmissione dei sensori LPG al variare dei parametri ambientali dell'ambiente a contatto con il cladding	11
Figura 12 - Spettri di trasmissione, in decibel, acquisiti per aria, acqua, etanolo puro e una soluzione satura di CaCl_2 ..	13
Figura 13 - Valori della lunghezza d'onda in corrispondenza del minimo degli spettri di trasmissione nella precedente figura, in funzione dell'indice di rifrazione delle soluzioni utilizzate	13
Figura 14 - Foto del set-up sperimentale per la misura della sensibilità termica	14
Figura 15 - Spettri di trasmissione acquisiti durante la misura (sinistra) e le variazioni di temperatura, lunghezza d'onda e valore di trasmissione, in corrispondenza del minimo della banda di attenuazione, in funzione del tempo di acquisizione (destra)	14

1. Introduzione

Obiettivo del workpackage TECHEA-WP3 A2 è lo sviluppo di un indossabile tipo “smart T-shirt” dotato prevalentemente di sensori basati su tecnologia in fibra ottica, per il monitoraggio di parametri biometrici nel corso di pratiche diagnostiche e di medicina sportiva; della condizione di stasi di pazienti sottoposti a trattamenti radiogeni.

Nel corso del primo anno di attività del progetto:

- si è svolta prevalentemente attività di studio e sperimentazione per inglobare sensori basati su tecnologia a reticolo di Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG) all'interno di lingotti sagomati polimerici idonei a consentirne semplice applicazione/rimozione su indossabili preformati (T-shirt, manicotti, guanti, fasce addominali) elasticizzati, è stata conseguita la realizzazione di prototipo di laboratorio;
- si è svolto studio e sperimentazione per lo sviluppo di sensore basato su tecnologia FBG per la misura di umidità con finalità di monitoraggio della sudorazione, è stata conseguita la realizzazione di prototipo di laboratorio;
- si è svolto studio della tecnologia dei sensori in fibra ottica LPG (Long Period Grating) allestendo banco per sperimentazione della stessa, sono state maturate conoscenze di base per la applicazione della tecnologia.

Tutte le attività sono state svolte in stretta collaborazione con l'Università Campus Bio-Medico di Roma in continuità con la collaborazione scientifica già in essere.

2. Sensori inglobati in sagomati polimerici

Per la produzione dei sensori è stato utilizzato un prodotto polimerico commerciale, di tipo siliconico bi-componente, che offre caratteristiche meccaniche ed elastiche valutate ottimali per la applicazione prevista. Il prodotto, della società Smooth-On Inc., è denominato Dragon Skin (TM) ed è disponibile con varie specifiche per densità e tempi di cura. La selezione del prodotto è il risultato di expertise frutto di precedente attività di sperimentazione svolta in collaborazione con l'Università Campus BioMedico di Roma e la Scuola Superiore Santa Anna di Pisa. In Fig. 1 sono riportate le principali specifiche tecniche dei prodotti della famiglia Dragon Skin (TM).

Figura 1 - Principali specifiche tecniche dei prodotti della famiglia Dragon Skin (TM)

	Mixed Viscosity (ASTM D-2393)	Specific Gravity (g/cc) (ASTM D-1475)	Specific Volume (cu. in./lb.) (ASTM D-1475)	Pot Life (ASTM D-2471)	Cure Time	Shore A Hardness (ASTM D-2240)	Tensile Strength (ASTM D-412)	100% Modulus (ASTM D-412)	Elongation at Break % (ASTM D-412)	Die B Tear Strength (ASTM D-624)	Shrinkage (in./in.) (ASTM D-2566)
Dragon Skin™ 10 Very Fast	23,000 cps	1.07	25.8	4 min.	30 min.	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	<.001 in./in.
Dragon Skin™ 10 Fast	23,000 cps	1.07	25.8	8 min.	75 min.	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	<.001 in./in.
Dragon Skin™ 10 Medium	23,000 cps	1.07	25.8	20 min.	5 hours	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	<.001 in./in.
Dragon Skin™ 10 Slow	23,000 cps	1.07	25.8	45 min.	7 hours	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	<.001 in./in.
Dragon Skin™ 10 AF	23,000 cps	1.07	25.8	20 min.	5 hours	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	<.001 in./in.
Dragon Skin™ 20	20,000 cps	1.08	25.6	25 min.	4 hours	20A	550 psi	49 psi	620%	120 pli	<.001 in./in.
Dragon Skin™ 30	20,000 cps	1.08	25.7	45 min.	16 hours	30A	500 psi	86 psi	364%	108 pli	<.001 in./in.

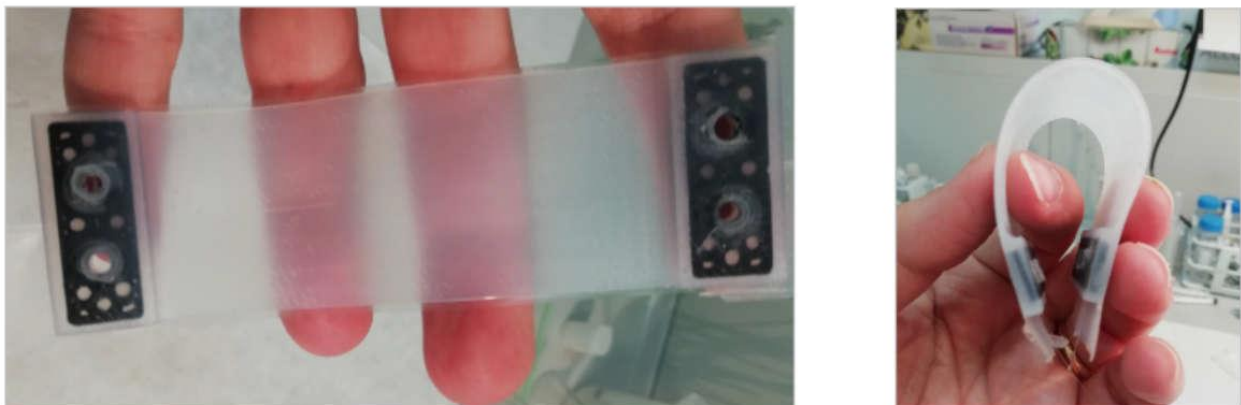
I sensori FBG sono stati inglobati nel Dragon Skin (TM) per moulding, ovvero disponendo in uno stampo il sensore FBG nella posizione voluta e colando il prodotto nello stampo. La Fig. 2 mostra lo stampo con il prodotto colato in fase di cura, lo stampo è disposto su piano orizzontale; i 4 inserti metallici sono utilizzati per tenere in posizione 2 inserti e creare 4 fori nel sagomato, come più avanti spiegato in dettaglio; la fibra ottica, che non risulta visibile nell'immagine, è disposta nello stampo, tesa parallela al lato lungo, coincidente con l'asse centrale sia nel piano orizzontale sia nel piano verticale, con le estremità che fuoriescono dai lati corti sx e dx.

Figura 2 - Inglobamento del sensore in stampo a cielo aperto



La Fig. 3 mostra il sagomato a fine produzione, estratto dallo stampo: sono visibili i due inserti ed i fori passanti attraverso gli inserti ed il sagomato; la fibra si intravede all'interno del sagomato nella (immagine a sinistra), con i capi che fuoriescono dai lati corti (immagine a destra); nella immagine a destra si nota il maggiore spessore del sagomato in corrispondenza degli inserti.

Figura 3 - Sensore FBG al termine della operazione di inglobamento nel sagomato



La Fig. 4 mostra schematicamente la configurazione del sagomato con il sensore inglobato; la posizione del sensore FBG, schematizzato in figura con tratteggio, è nominalmente alla metà della lunghezza del sagomato.

Figura 4 - Disegno concettuale del sensore inglobato in sagomato con piastrini



I piastrini svolgono funzione di elementi di tenuta per la installazione del sagomato sul tessuto dell'indossabile, come schematicamente mostrato in Fig. 5.

Per la produzione dei sagomati di diversa forma sono stati disegnati e realizzati diversi stampi; la produzione degli stampi è stata eseguita mediante tecnica di stampa 3D additiva.

La Fig. 6 mostra a sinistra la fase di casting del prodotto nello stampo: lo stampo è tenuto in posizione su di un apposito supporto, quasi verticale per favorire la colata per gravità e la espulsione dell'aria nello stampo; il casting avviene attraverso una tramoggia che rilascia il prodotto per gravità attraverso un orifizio calibrato; lo stampo è dotato in alto di fori per degassing. Il disegno al centro della figura mostra lo stampo; il disegno a destra mostra il sistema supporto/tramoggia/supporto assemblato, con diversa colorazione per evidenziare i singoli sottosistemi.

Figura 5 - Schematica rappresentazione del sistema di applicazione del sagomato

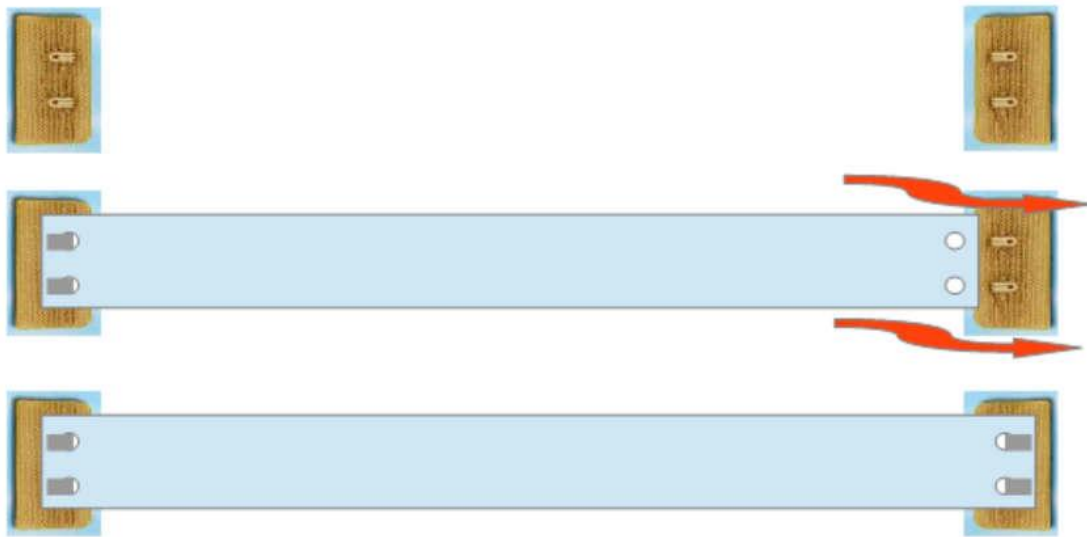
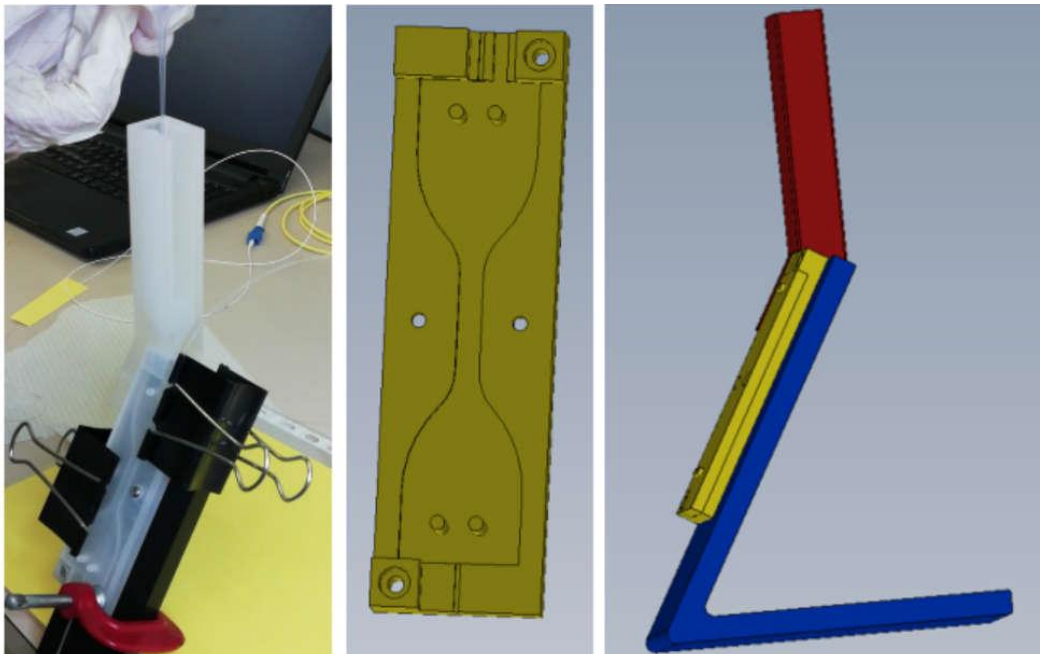


Figura 6 - Operazione di casting (sin.); disegno di uno degli stampi usati (centro); disegno dello stampo applicato sul supporto -in blu- e con la tramoggia -in rosso- in posizione (destra)



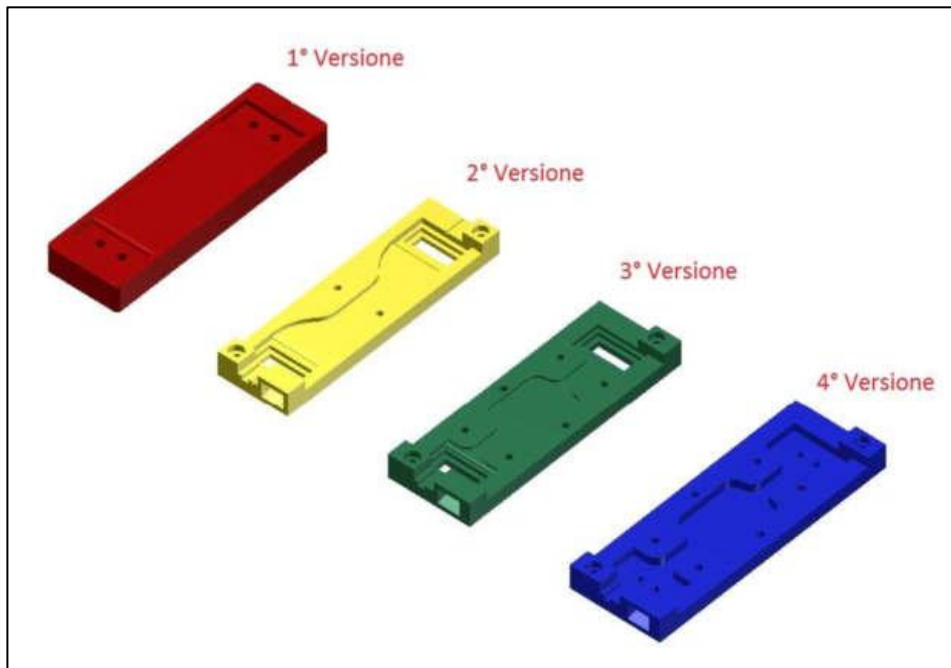
Nella sperimentazione svolta sono state eseguite prove comparative fra realizzazioni con:

- differenti forme del sagomato, con variazioni sulla forma di base di tipo 'papillon';
- materiali della famiglia Dragon Skin (TM) con differenti caratteristiche;
- differenti sistemi di ancoraggio del sagomato sull'indossabile, sia per il disegno del piastrino sia per la tipologia del sistema ancoraggio;

- fibra ottica con coating in poliimide e fibra ottica con coating in acrilato.

La Fig. 7 mostra alcuni degli stampi utilizzati per le prove comparative; la evoluzione della geometria dei provini è stata indirizzata dai risultati delle prove prestazionali e da considerazioni attinenti il controllo e la ripetibilità della produzione.

Figura 7 - Differenti versioni di stampo provate per la ottimizzazione della produzione del sagomato



La Fig. 8 mostra fasi di prova in laboratorio di sensore installato su indossabile per il monitoraggio della postura e dei movimenti della schiena, per applicazioni in campo ortopedico e fisiatrico.

Figura 8 - Prove in laboratorio di sensore installato su indossabile, per il monitoraggio della postura (immagini tratte da relazione proposta a 'I2MTC 2020 conference')

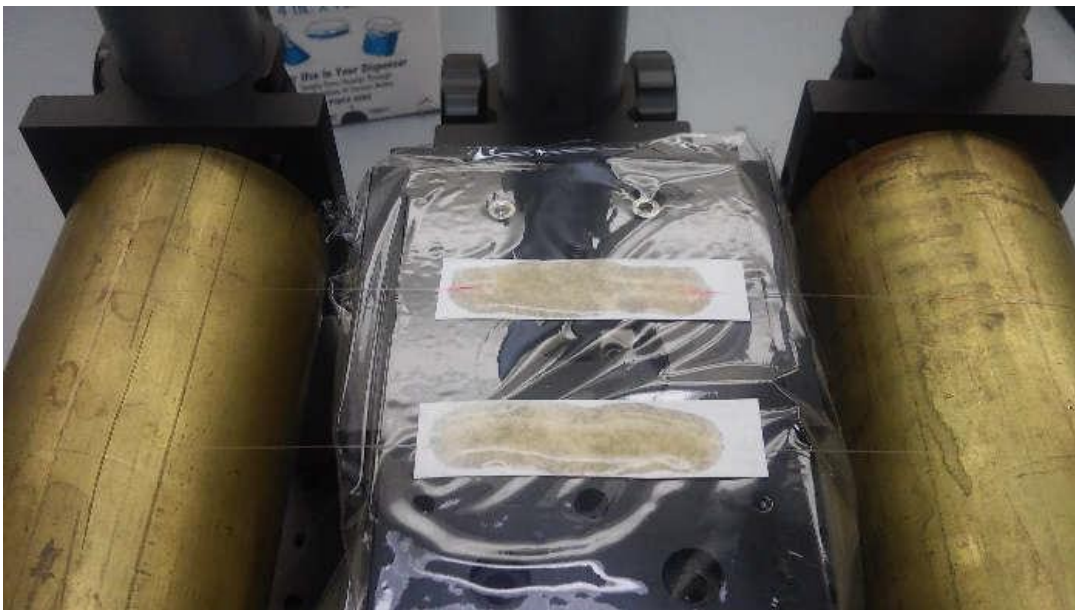


3. Sensori di umidità per la sudorazione

Sono stati realizzati dei sensori di umidità funzionalizzando sensori di tipo FBG con il chitosano, un polimero di origine naturale che è sensibile a sua volta all'umidità. In vista della loro applicazione come sensori indossabili per la sudorazione, si è messa a punto una configurazione tale da facilitare il loro fissaggio ad un oggetto indossabile e allo stesso tempo salvaguardare la loro integrità meccanica e funzionale.

Il polimero chitosano è stato depositato sulla fibra FBG in corrispondenza del sensore, utilizzando come supporto un Tessuto non tessuto (TNT), al quale la fibra sensorizzata si è attaccata grazie all'azione del chitosano (Fig. 9).

Figura 9 - Realizzazione dei sensori di umidità tramite deposito del chitosano



Sono stati realizzati 2 sensori, uno utilizzando la fibra FBG con la sua copertura originale di acrilato e un altro rimuovendo la ricopertura di acrilato e quindi depositando il chitosano direttamente sulla fibra di vetro. In questo modo vogliamo confrontare la sensibilità e il tempo di risposta alle variazioni di umidità nei due casi.

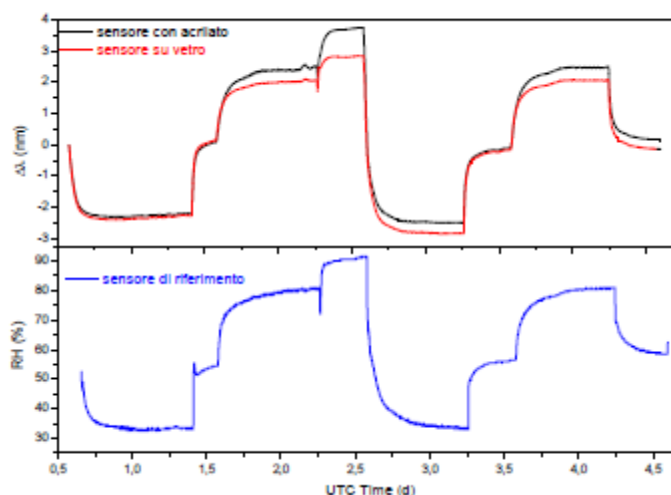
Per la funzionalizzazione è stata utilizzata una soluzione di chitosano al 5% in peso, utilizzando come solvente una soluzione di acido acetico al 1%. La soluzione così ottenuta, molto viscosa, è versata direttamente sulla fibra appoggiata sul TNT e leggermente trazionata per preservare la

linearità della fibra. Dopo l'evaporazione del solvente, la fibra risulta perfettamente ricoperta dal polimero e fortemente adesa al supporto di TNT.

I sensori così realizzati sono stati caratterizzati e la loro risposta alle variazioni di umidità relativa (RH) è stata validata tramite esposizione ad ambienti ad umidità controllata realizzati con soluzioni sature di diversi sali (CaCl₂: 29%, Ca(NO₃)₂: 51%, KCl: 84%).

La risposta è stata molto soddisfacente in quanto i due sensori hanno seguito in modo accurato e veloce le variazioni di umidità (Fig. 10). Nel caso del sensore con acrilato si è riscontrata un'ottima riproducibilità della misura, e quindi tale sensore potrebbe consentire, dopo adeguata calibrazione, anche una misura assoluta di RH.

Figura 10 - Risposta dei due sensori FBG realizzati alle variazioni umidità. Nel grafico in basso è riportata la risposta di un sensore di riferimento capacitivo



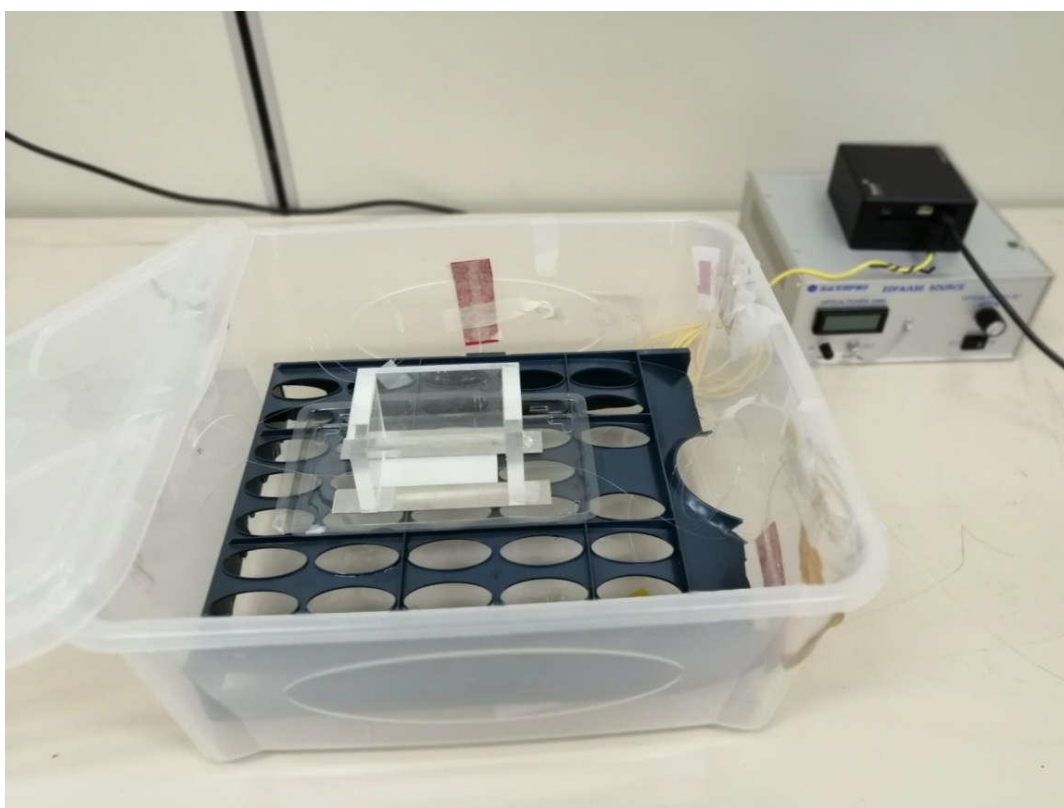
Sono in corso delle misure "open air" per testare sia la risposta dei sensori in ambienti non controllati che la loro robustezza.

4. Studio finalizzato della tecnologia LPG

Per lo studio della tecnologia dei sensori in fibra ottica LPG è stato allestito un banco di sperimentazione costituito da un sensore in fibra ottica SMF-28e montato su un supporto di plexiglass, che garantisce una tensione meccanica costante del sensore, e alloggiato in una vaschetta capace di contenere soluzioni di diverso indice di rifrazione, nelle quali il sensore viene immerso. Questo sistema è inserito in un contenitore di plastica dotato di coperchio e di alcune

aperture per l'inserimento di strumenti di diagnostica e controllo, come il temperature probe EasyLog USB, che misura la temperatura delle soluzioni durante l'acquisizione degli spettri di trasmissione. La sorgente di eccitazione del sensore in fibra ottica consiste in una ASE Light Source della BaySpec, mentre per l'acquisizione degli spettri di trasmissione viene utilizzato l'interrogatore I-MON 512 USB della Ibsen Photonics. La Figura 11 mostra una foto del banco di sperimentazione allestito per lo studio della risposta in trasmissione di un sensore LPG.

Figura 11 - Foto del banco di lavoro per lo studio della risposta in trasmissione dei sensori LPG al variare dei parametri ambientali dell'ambiente a contatto con il cladding



È stata studiata la risposta in trasmissione del sensore LPG al variare dell'indice di rifrazione della sostanza nella quale il sensore viene immerso. La Tab. 1 riporta le soluzioni utilizzate nella sperimentazione ed il loro indice di rifrazione (RI) [1]. Le soluzioni di saccarosio ed etanolo, a differenti concentrazioni, e la soluzione satura di cloruro di calcio (CaCl_2) sono state preparate nel laboratorio di Sintesi chimica di nanomateriali, FSN-TECFIS-MNF, dell'ENEA C.R. Frascati.

Tab. 1 - Soluzioni utilizzate nella sperimentazione e loro indice di rifrazione. La concentrazione delle soluzioni è indicata in gradi Brix (°Bx), ovvero in grammi di sostanza in 100 g di soluzione, ed in percentuale in peso, che esprime, in percentuale, il rapporto tra la massa di soluto e la massa totale di soluzione.

SOLUZIONE	CONCENTRAZIONE	INDICE DI RIFRAZIONE
Aria	100%	1,0003
Acqua Milli-Q	100%	1,3330
Saccarosio (da cucina)	30 °Bx	1,3811
Saccarosio (da cucina)	50 °Bx	1,4201
Saccarosio (da cucina)	70 °Bx	1,4655
Etanolo	12%	1,3410
Etanolo	26%	1,3511
Etanolo	70%	1,3652
Etanolo	100%	1,3614
CaCl ₂	satura	1,4420

Per ogni soluzione analizzata, sono stati acquisiti spettri di trasmissione fissando la potenza della sorgente a 0.75 mW e la frequenza di acquisizione a 1 Hz. Sono state effettuate tre acquisizioni di 5 minuti l'una (300 spettri acquisiti per ciascuna prova) intervallate da 10 minuti, allo scopo di investigare il comportamento dinamico e la risposta a regime del sensore. La Fig. 12 riporta gli spettri medi di trasmissione, in decibel, acquisiti per aria, acqua, etanolo puro ed una soluzione satura di cloruro di calcio. La sensibilità all'indice di rifrazione del sensore LPG è evidente dal cambiamento della lunghezza d'onda e del valore di trasmissione in corrispondenza del minimo della banda di attenuazione. Consente di monitorare, anche a distanza, la concentrazione di differenti soluzioni e si presta ad applicazioni in ambito ambientale, industriale e medicale.

La Fig. 13 mostra i valori della lunghezza d'onda in corrispondenza del minimo degli spettri di Fig. 12 in funzione dell'indice di rifrazione delle soluzioni utilizzate.

Figura 12 - Spettri di trasmissione, in decibel, acquisiti per aria, acqua, etanolo puro e una soluzione satura di CaCl₂

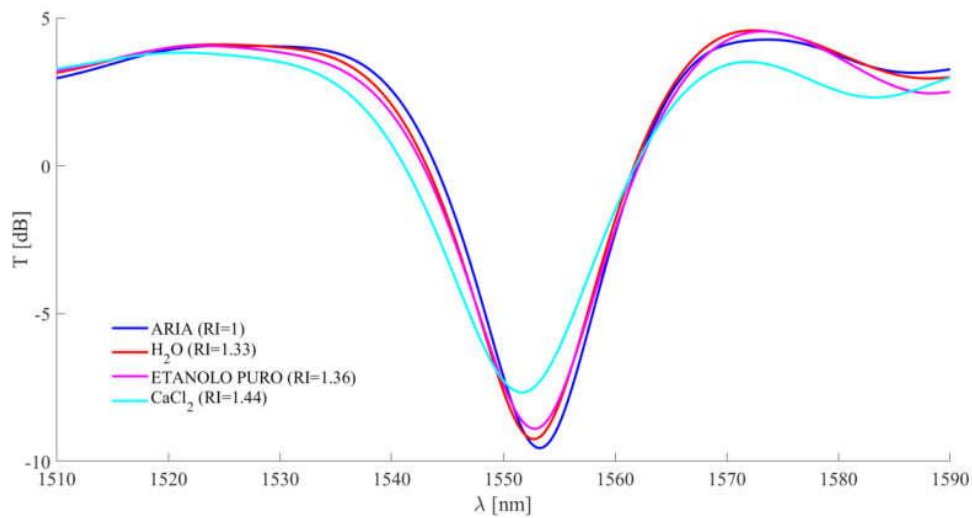
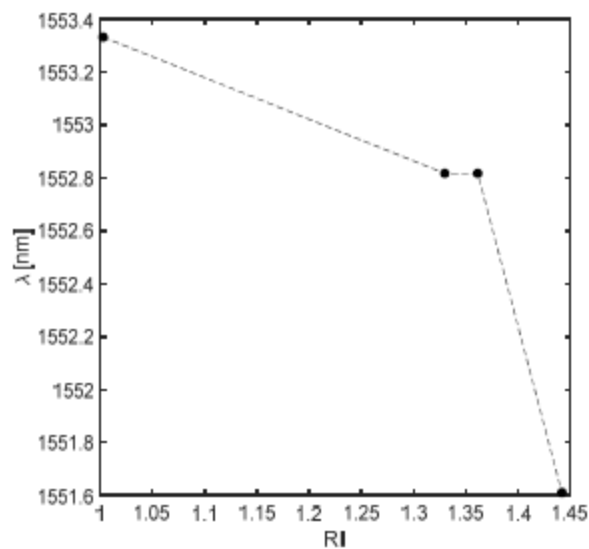


Figura 13 - Valori della lunghezza d'onda in corrispondenza del minimo degli spettri di trasmissione nella precedente figura, in funzione dell'indice di rifrazione delle soluzioni utilizzate



Per lo studio della sensibilità termica del sensore LPG, un sensore, nominalmente identico a quello utilizzato per studiare la sensibilità all'indice di rifrazione, è stato posto in un forno da laboratorio CARBOLITE PN120 nel quale è stato inserito il sensore di temperatura EasyLog. La zona sensibile del sensore (reticolo di Bragg) è stata inserita in un ago metallico, che consente un efficace scambio termico ed evita che il sensore sia sottoposto ad una tensione meccanica (curvatura) che ne altererebbe la risposta. Il forno è stato portato ad una temperatura di 50 °C raggiunta la quale è stato spento, in modo che la temperatura interna potesse raggiungere quella ambiente in alcune

ore. Durante le fasi di riscaldamento e raffreddamento del forno, la cui temperatura è stata monitorata e registrata dal probe EasyLog, sono stati acquisiti gli spettri di trasmissione con una frequenza di uno spettro al minuto e con una potenza della sorgente di 0.75 mW. La Fig. 14 mostra una foto del set-up sperimentale per la misura della sensibilità termica.

Figura 14 - Foto del set-up sperimentale per la misura della sensibilità termica



La Fig. 15 riporta gli spettri di trasmissione acquisiti durante una sessione di misura (sinistra) e le variazioni di temperatura, lunghezza d'onda e valore di trasmissione, in corrispondenza del minimo della banda di attenuazione, in funzione del tempo di acquisizione (destra). Dalle misure sperimentali è stata ottenuta una sensibilità termica del sensore LPG di 0.057 nm/°C.

Figura 15 - Spettri di trasmissione acquisiti durante la misura (sinistra) e le variazioni di temperatura, lunghezza d'onda e valore di trasmissione, in corrispondenza del minimo della banda di attenuazione, in funzione del tempo di acquisizione (destra)

