



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,  
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

**Progetto ADAMO - SAL5**

**(2.10.2019 – 25.01.2020)**

Allegato Tecnico T6.5 alla  
RELAZIONE SCIENTIFICA

**Monitoraggio combinato strutturale  
e di parametri ambientali sulle strutture**

Michele Arturo Caponero, Rosaria D'Amato

ENEA-FSN-TECFIS-MNF

V.E. Fermi 45 Frascati

# Sensori in fibra ottica per misure di RH

Il lavoro svolto nell'ambito del progetto ha portato allo sviluppo ed ingegnerizzazione prototipale di sensori di umidità di minima invasività e visibilità, adatti ad applicazioni per il monitoraggio di beni culturali ed in particolare di strutture murarie, gruppi scultorei in pietra e legno. Il sensore si basa sulla tecnologia in fibra ottica ed è realizzato mediante deposizione di un sottile coating igroscopico su una fibra ottica. Carattere innovativo del sensore sviluppato è il materiale con cui è realizzato il coating, una miscela di agar e chitosano. Tale materiale supera le criticità dei sensori basati su analogia tecnologia già precedentemente proposti in letteratura e sperimentati in varie applicazioni, che prevedono prevalentemente utilizzo di solo agar.

## 1 *Produzione dei sensori*

Per la produzione dei sensori prototipali è stato scelto l'agar ed il chitosano; due sensori sono stati prodotti con agar, uno con chitosano ed agar.

L'agar ha caratteristica di bassa evaporazione, stabilità chimica, non tossicità, elevata capacità di assorbimento e conseguente dilatazione (swelling). Ulteriore motivazione che ha portato alla scelta dell'agar è la sua buona aderenza alla silice, materiale costituivo delle fibre ottiche da funzionalizzare mediante deposizione dell'agar sulla fibra stessa. L'agar è composto da agarosio ed agaropettina, in proporzioni variabili, tipicamente 75% agarosio e 25% agaropettina; fra i due, il composto che ha maggiore capacità di gelificazione è l'agarosio. L'agar è solubile in acqua calda, gelifica se raffreddato a 35-45°C, il gel torna in fase liquida a temperatura superiore agli 85°C (pressione atmosferica).

Il chitosano, usato in soluzione con agar per la produzione del terzo sensore prototipale, è un biopolimero naturale abbondante in natura. E' principalmente derivato dalla chitina, il secondo carboidrato maggiormente presente in natura (dopo la cellulosa), che gioca ruolo strutturale negli esoscheletri dei vertebrati. Il chitosano è un semicristallo polisaccaride che risulta insolubile in acqua a pH neutro, sebbene possa essere disciolto in soluzioni lievemente acide e possa essere ridotto come idrogel. Il chitosano in forma di idrogel può assorbire acqua fino al 2000% del suo stesso peso. Il chitosano non è tossico e presenta eccellenti proprietà fisicochimiche, come biodegradabilità, capacità di filmare, proprietà antibatteriche, buona adesione a molti materiali e buona elasticità. Inoltre, dopo aver filmato il chitosano è capace di grande adsorbimento e dilatazione (swelling) in presenza di umidità, effetto facilmente osservabile facilmente al microscopio e finanche ad occhio nudo.

Le soluzioni di Agar per la realizzazione dei due sensori sono state prodotte con differenti concentrazioni, 1% e 5% in peso, dissolvendolo in acqua distillata a 100°C.

La soluzione agar/chitosano è stata prodotta dissolvendo dapprima chitosano ad 1% in peso in una soluzione di acido acetico al 5% in acqua distillata; quindi, allo schiarirsi della soluzione, è stata aggiunto un pari volume di soluzione calda di agar preparata con concentrazione ad 1% in peso in acqua distillata. Tutte le soluzioni sono state depositate quando ancora calda sulle fibre ottiche, per evitare la formazione di gel.

I sensori sono stati realizzati versando la soluzione in stampo realizzato in PLLA mediante 3D printing. Lo stampo ha forma di vaschetta parallelepipedica a cielo aperto, con intagli su due superfici opposte per consentire la disposizione della fibra ottica sull'asse dello stampo stesso. La fibra è tenuta in posizione in stato di leggero tensionamento, quindi la soluzione è versata nello stampo mentre ancora calda e lasciata raffreddare in aria a temperatura ambiente.

I tre sensori realizzati sono stati denominati ed hanno specifiche come di seguito: "Agar+Chitosano", realizzato con una soluzione di agar/chitosano in stampo 1x1x20 [mm]; "Agar thin", realizzato con soluzione di agar in stampo 1x1x20 [mm]; "Agar thick", realizzato con soluzione di agar in stampo 5x5x20 [mm]. La Figura 1 mostra i sensori realizzati.

## 2 **Setup sperimentale**

Due differenti setup sono stati usati, per provare i sensori in due differenti condizioni: in ambiente chiuso ad RH controllata, per verificare la risposta dei sensori ed eseguirne calibrazione; in ambiente aperto esposto a condizioni climatiche reali, per simulazione di condizione d'uso come previsto in campo. In entrambi i setup è stato usato come sensore di riferimento (compensazione termica) un sensore FBG con coating in acrilato, che non è igroscopico; il sensore di riferimento produce quindi un segnale  $\Delta\lambda_B$  dovuto alla sola variazione di temperatura  $\Delta T$ . In entrambi i setup le misure sui sensori prototipali sono state effettuate in regime di compensazione di temperatura, ovvero:

$$\Delta\lambda_{BRH} = \Delta\lambda_{BRH+T} - \Delta\lambda_{BT}$$

essendo  $\Delta\lambda_{BRH+T}$  il segnale del sensore prototipale;  $\Delta\lambda_{BT}$  il segnale del sensore FBG di riferimento (compensazione termica). Tutti i sensori FBG utilizzati per la produzione dei sensori prototipali e tutti i sensori FBG utilizzati come sensori di riferimento (compensazione termica) appartengono ad uno stesso lotto di produzione di sensori FBG commerciali e sono quindi caratterizzati da una stessa temperature sensitivity. I segnale dei sensori prototipali e dei sensori di compensazione termica sono acquisiti, con frequenza di campionamento pari a 1 Hz, da un sistema di interrogazione per reticoli di Bragg (FS22, HBM Fiber Sensing, Portugal wavelength measurement range: from 1500 nm to 1600 nm, resolution= 1.0 pm). Un sensore di RH capacitivo (EasyLog, EL-USB\_2, USB interface, resolution 0.5%RH) è usato come sensore di riferimento.

## 3 **Risultati e discussione**

Prima di eseguire le misure con i due setup sperimentali precedentemente descritti, lo spettro di ciascun FBG usato per la realizzazione dei sensori prototipali è stato acquisito prima e dopo della produzione dei sensori prototipali stessi (deposizione del coating), per verificare eventuali effetti causati dalla presenza del coating. Il segnale dei sensori FBG è di norma una 'campana stretta e simmetrica', il cui picco corrisponde al valore  $\lambda_B$  del sensore FBG. Lo scopo del confronto era finalizzato a verificare che la deposizione non avesse causato apprezzabili alterazioni dello spettro, in particolare con riferimento alla forma di 'campana stretta e simmetrica' che è indispensabile per la misura del valore di  $\lambda_B$  (Figura 2) con i sistemi di interrogazione normalmente utilizzati. Infatti, la presenza del coating potrebbe introdurre compressioni radiali anisotrope sulla fibra ottica, che tipicamente causano broadening e flat-topping della 'campana'. La valutazione della larghezza a mezza altezza (FWHM) dei sensori prototipali prima della la funzionalizzazione (deposizione del coating) ha mostrato valori pari a 0.3-0.4 nm, mentre dopo la funzionalizzazione ha mostrato valori pari a 0.5-0.6 nm, ma senza la comparsa di apprezzabile top-flattening. Inoltre, per tutti i sensori prototipali, si è apprezzato uno shift verso valori maggiori di lunghezza d'onda per il valore di  $\lambda_B$ ; tale shift è stato attribuito ad una compressione assiale degli FBG durante il processo di solidificazione del polimero.

### **- Test in ambiente ad RH controllato**

Il test era finalizzato a determinare la sensitivity dei sensori prototipali. Ciò ha richiesto di determinare il valore  $\Delta\lambda_{BRH}$  ed il corrispondente valore  $\Delta RH$ . Il test è stato eseguito usando la tecnica delle soluzioni saline sature, che fornisce condizioni di RH note. I sensori sono stati introdotti in un contenitore sigillato, nel quale a turno sono state inserite soluzioni saline sature per ottenere differenti livelli di RH noti. In particolare le soluzioni saline utilizzate sono  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , RH = 29%;  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , RH = 51%; KCl, RH = 84% (essendo i valori di RH riferiti a

condizioni di pressione e temperatura standard). Il valore di RH nel contenitore sigillato è stato monitorato con un sensore di RH capacitivo (sensore di riferimento). In figura 3 sono dati i valori  $\Delta\lambda_{BRH}$  (sensori prototipali) in funzione dei valori  $\Delta RH$  (sensore di riferimento). I dati mostrano che il sensore 'Agar+Chitosano' ha la maggiore sensitivity, mentre la sensitivity dei sensori con coating in agar è funzione dello spessore del coating. Il fit lineare dei dati fornisce i seguenti risultati: 0.01382 sensitivity (0.00122 rms) per "Agar thick"; 0.00249 sensitivity (0.00033 rms) per "Agar thin"; 0.01596 sensitivity (0.00206 rms) per "Agar+Chitosano". Sebbene un fit lineare sia stato utilizzato per definire le prestazioni dei sensori in termini di sensitivity, una relazione propriamente lineare non sembra sussistere, poiché tutti i sensori mostrano un trend di variazione del gradiente che suggerisce una riduzione della sensitivity con l'aumentare del valore di RH, il che potrebbe essere da imputare ad attesi meccanismi di saturazione del processo di swelling.

#### **- Test in ambiente aperto non controllato**

Poiché i sensori sono in sviluppo per applicazioni in campo su elementi murari di strutture monumentali, sono stati provati in condizioni rappresentative dell'uso previsto, su pietre esposte in ambiente aperto. Come riferimento, il valore di RH ambientale è stato monitorato utilizzando un sensore di umidità capacitivo. La prova ha avuto durata di 13 giorni in acquisizione ad 1/60 Hz, con brevi interruzioni per problemi di malfunzionamento del sistema di data storage. La Figura 4 mostra il trend temporale di  $\Delta\lambda_{BRH}$  misurato con i sensori prototipali e di RH misurato con il sensore di riferimento capacitivo. In figura, per usare scala espansa al fine di chiarezza dei dettagli delle variazioni nel tempo, è mostrata la time history di 5 giorni, che è comunque pienamente rappresentativa dei risultati dell'intera prova durata 13 giorni. La variazione circadiana di RH risulta evidente. Come atteso dai risultati mostrati in Figura 3, il sensore "Agar thick" ed il sensore "Agar+Chitosano" hanno sensitivity simili, mentre il sensore "Agar thin" ha sensitivity alquanto minore. Come figura di merito per confrontare i tre sensori, è stata calcolata la correlazione dei loro segnali con la misura RH fornita dal sensore di riferimento capacitivo, ottenendo: 0.93 per "Agar+chitosano"; 0.70 per "Agar thick"; 0.89 per "Agar thin". La Figura 5 mostra in scala espansa una breve time history che fornisce indicazioni sui differenti valori della correlazione. Alle grandi variazioni di RH che hanno luogo nell'intervallo temporale 0-6 h, il sensore "Agar+Chitosano" segue bene le variazioni, mentre il sensore "Agar thick" non segue bene la variazione negativa, effetto quest'ultimo che risulta plausibile attribuire ad un effetto di saturazione/ritardo dello swelling. Comportamento simile è mostrato dal sensore "Agar+Chitosano" in corrispondenza dell'ampia variazione di RH che ha luogo nell'intervallo di tempo 22-28 h, mentre l'ampia variazione negativa che ha luogo al tempo 22 h è seguita bene dal sensore "Agar thick", ma lo stesso mostra poi ritardo di risposta o saturazione. In entrambi i casi, la ampiezza della risposta del sensore "Agar thin" è effettivamente troppo piccola per essere commentata.

Come risultato generale, si può ipotizzare che le migliori caratteristiche del coating realizzato con miscela agar/chitosano è dovuta ad una combinazione delle specifiche caratteristiche dei due materiali. Il chitosano non ha soltanto ampie capacità di swelling, ma ha anche caratteristiche strutturali che regolarizzano l'adsorbimento di umidità evitando che lo swelling abbia luogo troppo violentemente e saturi facilmente; d'altro canto, ha forte propensione a filmare e dunque non produce un coating omogeneo (toroidale) attorno alla fibra ottica. L'agar ha buone capacità di swelling, ma l'adsorbimento ha luogo troppo facilmente e violentemente, tendendo facilmente a saturare; d'altro canto ha buona aderenza alla silice di cui è costituita la fibra ottica e quindi forma un coating regolare/cilindrico attorno a quest'ultima. Nel composto agar/chitosano le caratteristiche dei due materiali si combinano e rendono tale composto il miglior candidato per la ingegnerizzazione di sensori di RH basati sulla tecnologia FBG.

#### 4 Conclusioni

La attività svolta ha individuato nel composto agar/chitosano il miglior candidato per la ingegnerizzazione di sensori di RH basati su tecnologia in fibra ottica FBG. I sensori sono realizzati mediante deposizione di sottile coating su fibra ottica nuda, rendendo i sensori di minima visibilità (quasi perfetta trasparenza) ed invasività (diametro inferiore a 2 mm). Tali sensori risultano quindi particolarmente indicati per monitorare il valore di RH su superfici di beni, esposti alla fruizione dei visitatori ma soggetti a deterioramento in ambienti umidi. I sensori ingegnerizzati in forma prototipale prodotti nell'ambito delle attività del progetto ADAMO sono stati validati in applicazioni dimostrative di lunga durata ed in ambienti rappresentativi di sale espositive e strutture murarie.



Figura 1a. Immagine dei tre sensori prototipali: in alto “Agar+Chitosan”, al centro “Agar thin”, in basso “Agar thick”.

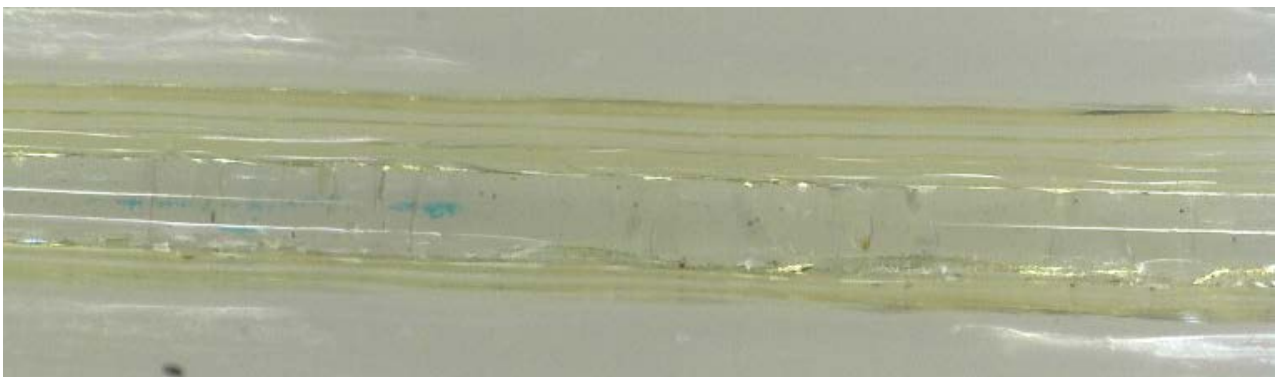


Figura 1b. Immagine a microscopio ottico del sensore “Agar-Chitosan” in fase di preparazione.



Figura 1c. Fase di preparazione per la produzione dei sensori “Agar thin” e “Agar thick”.

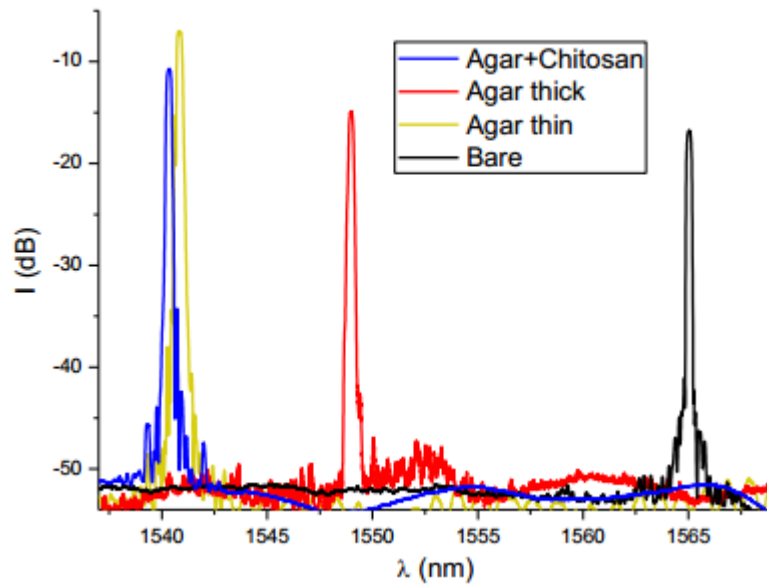


Figura 2. Spettro dei tre FBG funzionalizzati e di un FBG usato come riferimento (bare) per la compensazione termica.

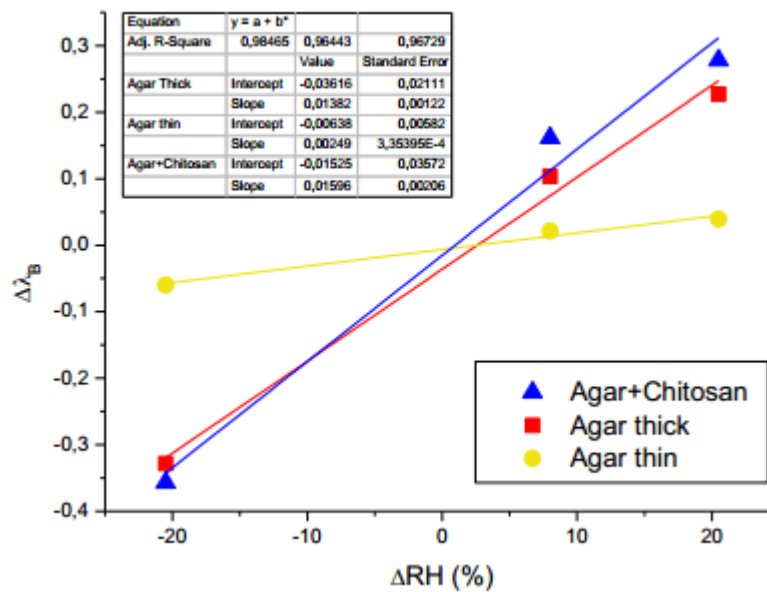


Figura 3. Plot di  $\Delta\lambda_{BRH}$  vs  $\Delta RH$ . Nell'inserto sono dati i parametri del fit lineare.

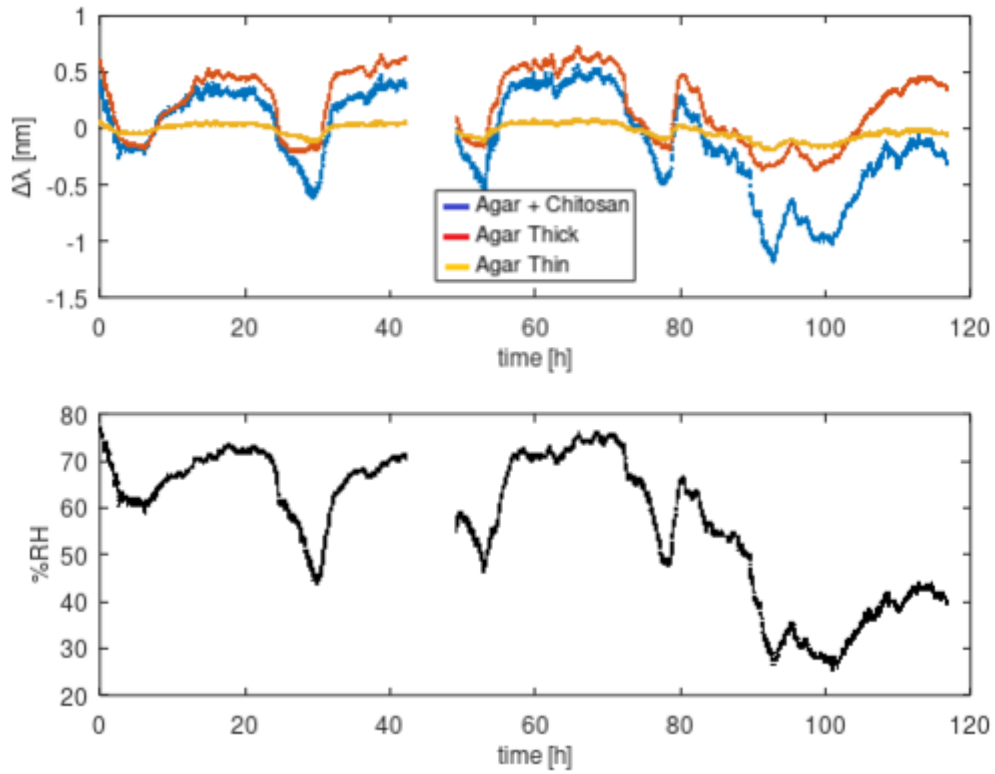


Figura 4. Alto: Time History di  $\Delta\lambda_{BRH}$  per i tre sensori FBG funzionalizzati. Basso: Time History di RH misurata con il sensore di riferimento capacitivo.

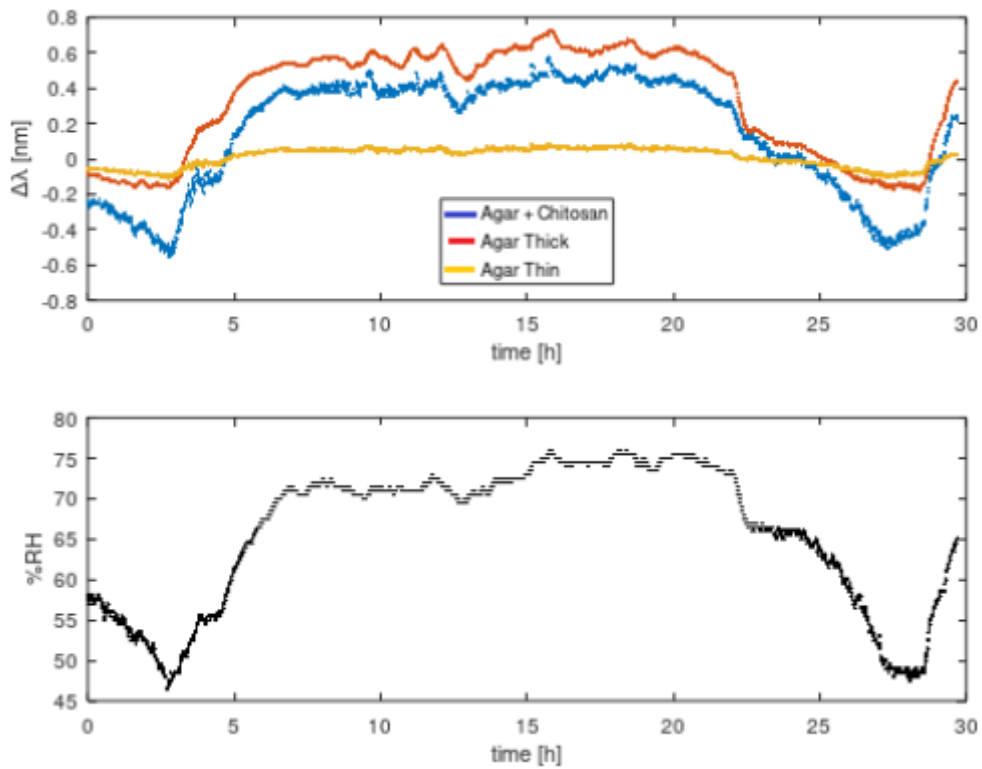


Figura 5. Alto: Time History  $\Delta\lambda_{BRH}$  dei tresensori funzionalizzati. Basso: Time History di RH misurata con il sensore di riferimento capacitivo.

# Monitoraggio strutturale con FBG e tecniche ottiche

## 1 *Metodologia operativa*

Per il controllo dello stato di integrità strutturale del Ninfeo Ponari e delle mura Aureliane tratto Torre L1-L3, è stata definita una metodologia operativa che si basa sulla integrazione di tre differenti tecniche di monitoraggio: fotogrammetria 3D structure from motion (SfM); rilievi topografici robotizzati electronic distance measurement (EDM); rete di fessurimetri basati su sensori in fibra ottica FBG.

Lo stato dei beni è il risultato di vari interventi eseguiti in epoche differenti. In particolare per il Ninfeo Ponari si sono avute varie opere di scavo e lavori di restauro ma non vi è chiara traccia del complesso delle attività svolte. Due interventi principali risultano documentati: il consolidamento della volta con chiodature ed opere di getto; la protezione delle mura dell'atrio esterno con palificazione mediante micropali gettati. Lo stato del bene evidenzia la presenza di varie potenziali problematiche strutturali: presenza di quadro fessurativo diffuso con crepe di varia ampiezza, larghezza e profondità, sia sulle pareti verticali sia sulla volta; le mura dell'atrio sono evidentemente inclinate; parti della pavimentazione sono sollevate. Nel complesso, già una ispezione visiva suggerisce che le potenziali problematiche strutturali sono prevalentemente riconducibili alla spinta che il terreno esercita sulla struttura. In particolare, la spinta del terreno sulle opere murarie varia certamente a causa del variare delle precipitazioni atmosferiche e della conseguente imbibizione. È stato quindi definito una procedura di intervento che prevede le tre tecniche sopra specificate.

### *- Structure from motion (SfM)*

L'intervento ha avuto inizio con un rilievo fotogrammetrico completo del bene per acquisire lo stato fessurativo da utilizzare quale riferimento dello stato di fatto, da utilizzare come riferimento per il monitoraggio della sua evoluzione nel futuro. La metodologia prevede la esecuzione di campagne di misura da ripetere periodicamente per mettere in evidenza l'evoluzione del quadro fessurativo, in particolare la apertura di nuove fessure, e conseguentemente definire interventi strutturali di conservazione e recupero. Il rilievo fotogrammetrico è stato eseguito con tecnica di resa 3D mediante SfM che consente di ottenere un modello del bene come nuvola di punti o poligonali, a partire da immagini 2d fotografiche, da elaborare utilizzando specifici software basati su procedure di visione digitalizzata. In particolare, le acquisizioni sono state eseguite con macchina fotografica con risoluzione 24 Mpixel, per complessive 700 immagini. Come risultato finale, il modello 3D interamente scalato, composto da circa 55 milioni di punti è stato ottenuto, con precisa documentazione dell'intero quadro fessurativo. La Figura 1 mostra una vista della ricostruzione 3D scalata. La Figura 2 mostra una delle maggiori fessure presente, come acquisita dal rilievo effettuato. Va osservato che il rilievo 3D così eseguito può anche essere usato: come base per la realizzazione di modello numerico della struttura per analisi strutturale mediante calcolo agli elementi finiti; per la valutazione quantitativa dello stato di opere policrome; per la mappatura di muffe e aree umide.

### *- Electronic displacement measurement (EDM)*

EDM con stazione robotizzata è stato adottato per misure topografiche finalizzate a structural health monitoring, assumendo che siano adeguate per monitorare assestamenti strutturali causati dagli attesi meccanismi geotecniche interessano il sito. La tecnica è applicata considerando sia target di materializzazione dei punti, sia superfici estese tal quali. I rilievi sono stati eseguiti con 0.5" angular accuracy e 2 mm distance accuracy. Per i rilievi, sono stati posizionati 18 target in punti opportunamente selezionati. I target hanno forma di sfera, tutti di uguale dimensione, e sono usati per monitorare la posizione relativa dei loro centri. La forma dei target consente di essere sempre in mira perpendicolarmente e quindi di essere acquisiti sempre con stessa precisione. Ciò è importante



nella nostra applicazione, poiché i target sono usati per definire il sistema di riferimento locale per il survey delle superfici estese tal quali, come discusso più avanti. I target forniscono informazioni sugli spostamenti relativi dei punti materializzati, rappresentativi dei macroelementi strutturali a cui sono fissati. In funzione dei risultati dalle campagne di misura da ripetere periodicamente, ulteriori target potranno essere installati per migliorare il monitoraggio dei macroelementi della struttura. Il survey delle superfici estese tal quali è effettuato con scansione robotizzata: la scansione di superfici di grande ampiezza è eseguita con scansioni multiple di piccole superfici, muovendo progressivamente il punto base (posizione dello strumento) per avere sempre scansioni quasi-perpendicolari ed ottenere quindi sempre condizioni di minimo errore. Per ciascuna delle scansioni multiple, la posizione della base è determinata con riferimento ai target, consentendo così la corretta costruzione della nuvola di punti delle superfici estese e dell'intera struttura. La nuvola di punti è elaborata per ottenere mesh 3D poligonali. Nella elaborazione, operazioni di filtraggio e smoothing sono fatte per eliminare particolari (rugosità superficiali, scostature, disformità locali) che sono di nessun interesse per quanto attiene alle macrodeformazioni/movimenti causate da meccanismi geotecnici. In particolare, sono considerate le sezioni acquisite con scansione lineare da punto base fisso, essendo queste con minimo errore (solo movimento del sistema goniometrico del carrello robotizzato). La Figura 3 mostra la nuvola di punti completa del Ninfeo Ponari. La Figura 4 mostra, come esempio, risultati della procedura di fit: i punti sono dati EDM di parte della volta acquisiti con movimento in scansione solo goniometrico; la linea piena è la linea di sezione ottenuti per fit con spline.

#### **- Fessurimetri in fibra ottica Fiber Bragg grating (FBG)**

Fessurimetri basati su tecnologia FBG sono stati installati per il monitoraggio continuativo ed ad alta risoluzione di fessure di maggior importanza. I fessurimetri sono realizzati custom per la applicazione, sviluppando sistema ottimizzato per la applicazione sulla tipologia di parete muraria e dotati di sensore di temperatura integrata. Il sistema di monitoraggio è realizzato con progetto fotonico che ne consente l'ampliamento con aggiunta di ulteriori sensori in serie a quelli già installati, come potrà risultare opportuno dalle indicazioni delle campagne di misura eseguite nel con EDM/SfM. La Figura 5 mostra due dei sensori installati presso il Ninfeo Ponari. La Figura 6 mostra esempio di acquisizione continuativa di sensori fessurimetri FBG per periodo continuativo di 5 giorni. Tutti i fessurimetri sono stati prodotti, calibrati e predisposti per la installazione in campo nell'ambito delle attività del progetto ADAMO svolte presso i laboratori ENEA Frascati. I fessurimetri sono stati prodotti con sensore di temperatura integrato per compensazione termica, adottando tecnologia di massima robustezza basata sull'impiego di due sensori FBG: un sensore in contatto strutturale (e quindi anche in contatto termico) con l'encoder di spostamento; un sensore in solo contatto termico con l'encoder di spostamento; l'encoder di spostamento misura la distanza fra i capisaldi dell'encoder di spostamento, essendo l'encoder posizionato a cavallo della fessura stessa; l'apertura della fessura è monitorata mediante la misura differenziale fra il segnale del sensore in contatto strutturale ed il sensore in solo contatto termico.

## **2        *Discussione dei risultati***

Al termine delle attività del progetto ADAMO, la attività di monitoraggio strutturale risulta pianificata nella metodologia di svolgimento e svolta nella acquisizione dello stato di riferimento. Per SfM e EDM risulta acquisito lo stato fessurativo che costituisce riferimento per lo stato di fatto in essere, disponibile per il confronto con le acquisizioni di future campagne di misura. Per Fessurimetri FBG risulta acquisito la caratterizzazione del comportamento delle fessure in acquisizione continuativa di 5 giorni, con evidenza del ciclo circadiano.

Le acquisizioni SfM e EDM risultano coerenti ed hanno fornito precise informazioni in termini della geometria globale della struttura e del quadro fessurativo. Entrambe queste informazioni

giocano ruolo basilare per la definizione di un modello numerico idoneo a predire stati di stress ad il possibile verificarsi di cedimenti che interessino parti della struttura. A tal fine, risulta di interesse il prosieguo delle attività con la definizione di un modello agli elementi finiti che includa almeno le maggiori di quanto acquisito, come ad esempio l'esatta inclinazione delle pareti dell'atrio esterno, oppure le fessure di maggiore dimensione (Figura 7). Il modello agli elementi finiti potrà inoltre godere di upgrade sulla base delle indicazioni delle risultanze del monitoraggio continuativo della apertura delle fessure, come rilevato dai fessurimetri FBG.

### **3 Conclusioni**

La attività svolta nell'ambito del progetto ADAMO ha effettuato il rilievo fotogrammetrico 3D e per nuvola di punti del tratto Torre L1-L3 delle Mura Aureliane (Porta Latina, tratto del camminamento del Museo delle Mura Aureliane) e del Ninfeo Ponari di Cassino. Inoltre, sono stati applicati fessurimetri FBG sulle fessure di maggiore rilevanza, eseguendo monitoraggio continuativo di 5 giorni della evoluzione della apertura delle fessure (evidenza del ciclo circadiano). La attività svolta, pienamente significativa per la definizione di futuro modello agli elementi finiti delle strutture, costituisce inoltre possibile acquisizione dello stato di fatto per l'avvio di monitoraggio strutturale a lungo termine, eseguito con ripetizione periodica di acquisizioni SfM e EDH e con acquisizioni continuative periodiche o permanenti dei fessurimetri



Figura 1. Il modello 3D del Ninfeo Ponari, realizzato mediante tecnica di fotogrammetria Structure From Motion.



Figura 2. Esempio di fessura evidenziata sul modello 3D acquisito mediante tecnica di fotogrammetria Structure From Motion.

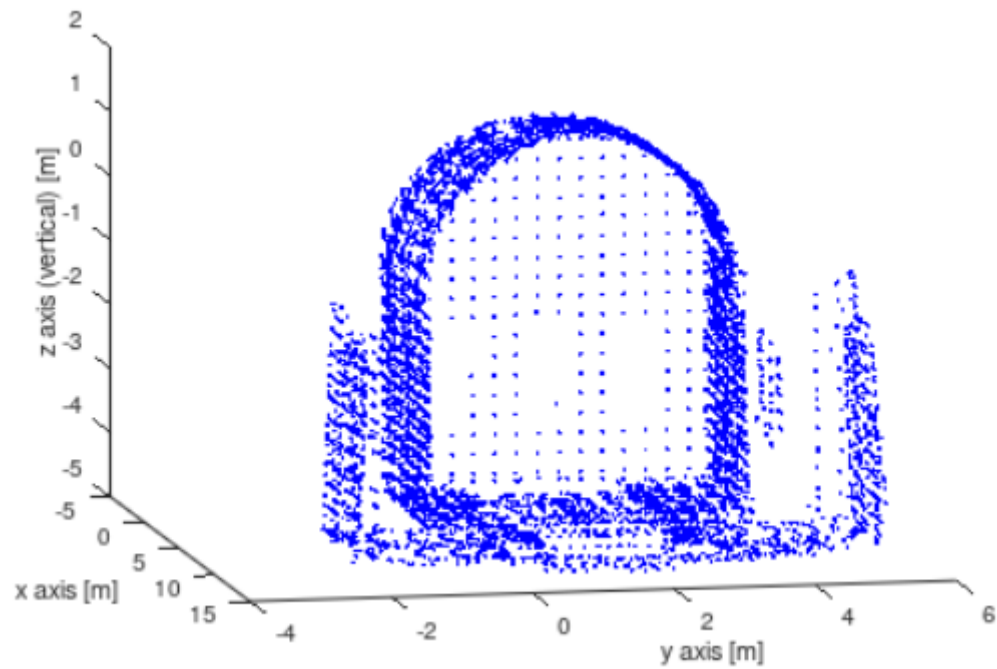


Figura 3. Esempio di nuvola di punti acquisita mediante rilievo EDM (Ninfeo Ponari).

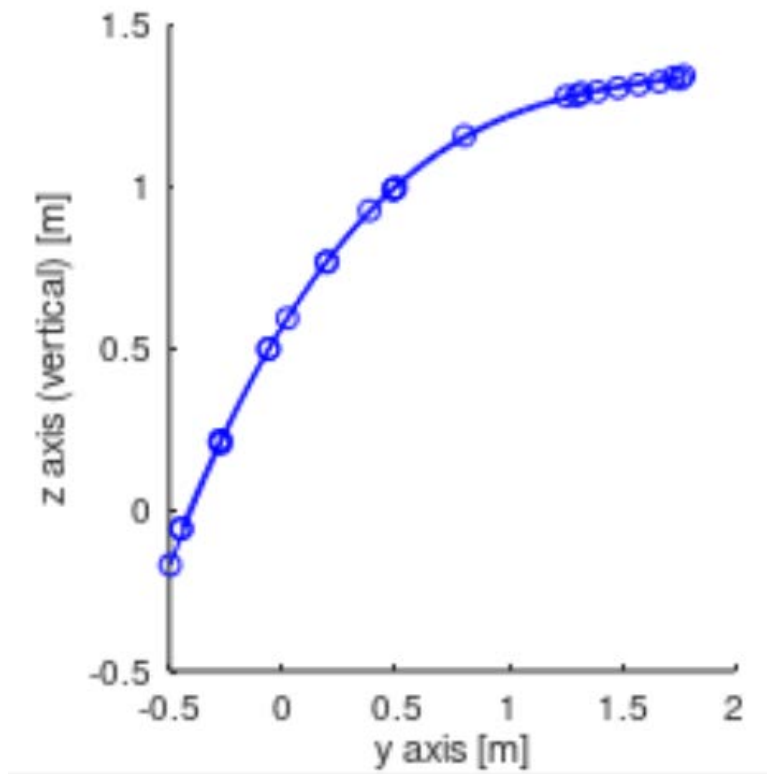


Figura 4. Esempio di linea di sezione da fit di punti acquisiti mediante EDH (Ninfeo Ponari).

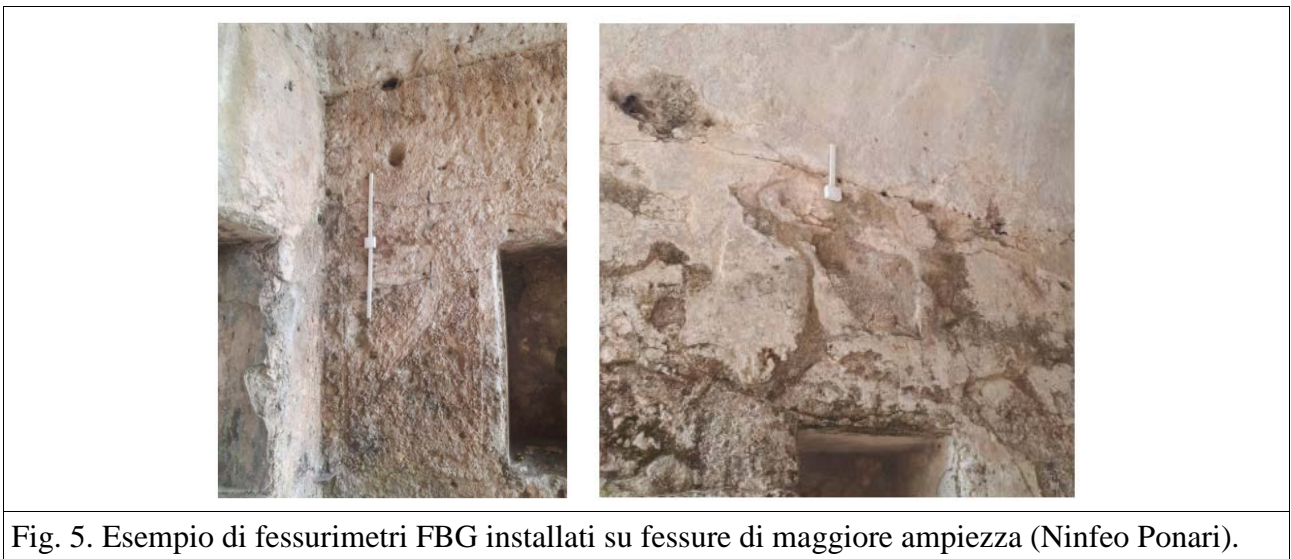


Fig. 5. Esempio di fessurimetri FBG installati su fessure di maggiore ampiezza (Ninfeo Ponari).

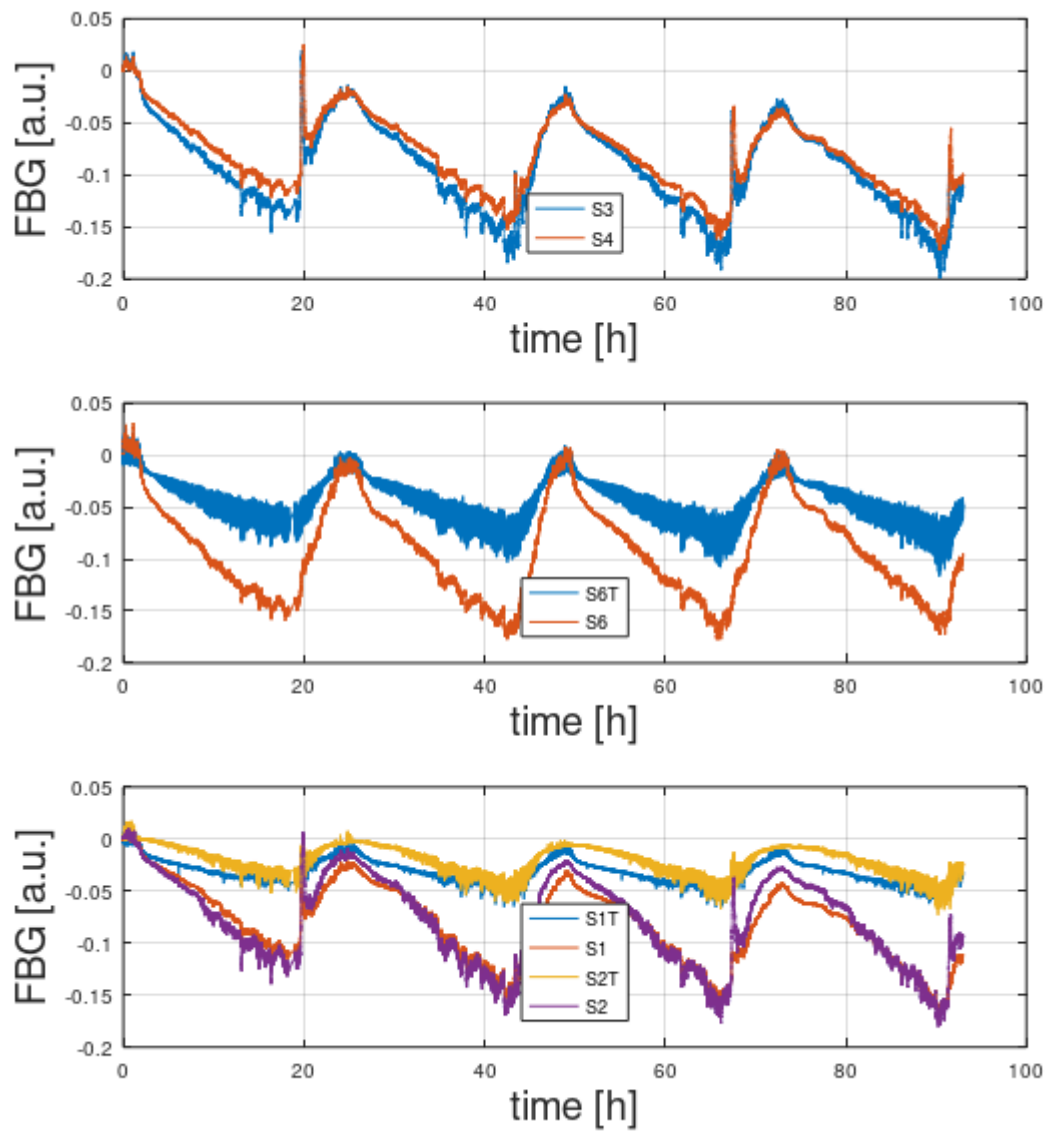


Figura 6. Esempio di acquisizione continuativa 5gg della apertura di fessure con fessurimetri FBG.



Figura 7. Mesh ottenuta da modello 3D SfM della torre L3 (Mura Aureliane) per calcolo agli elementi finiti delle deformate modali