

# Procedure applicative sensori FBG

## Fibra ottica e reticoli di Bragg

Le fibre ottiche sono realizzate sotto forma di cavi in vetro o polimeri con lo scopo di poter condurre al loro interno la luce. Sono costituite da due strati concentrici: un nucleo cilindrico centrale (core) ed un mantello (cladding) attorno ad esso.

La luce che entra nel core ad un certo angolo (angolo limite) si propaga mediante una serie di riflessioni alla superficie di separazione fra i due materiali del core e del cladding, mentre i raggi che entrano ad angoli maggiori dell'angolo limite non vengono trasmessi dalla fibra ottica.

Le fibre utilizzate per i sensori FBG sono in vetro di tipo monomodali le quali hanno in genere un diametro del core pari a  $8\ \mu\text{m}$  e del cladding di  $125\ \mu\text{m}$  e lavorano usualmente con frequenze nella banda ottica del vicino infrarosso.

Nelle applicazioni viene spesso usata una guaina di rivestimento che funge da protezione della fibra.

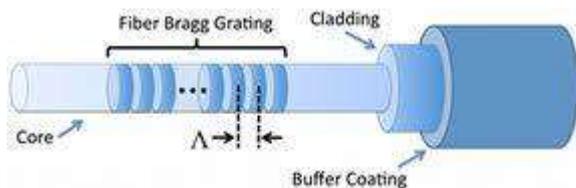


Figura 1: reticolo di Bragg e fibra ottica

I sensori a reticolo di Bragg, noti come FBG (FiberBraggGratings), sono elementi ottici diffrattivi con la proprietà di riflettere un fascio luminoso incidente con lunghezza d'onda  $\lambda_B$ , funzione lineare della temperatura e delle deformazioni subite dalla fibra ottica nella zona di interesse. In pratica è quindi uno strain gage ottico ottenuto fotoincidendo nel core della fibra ottica un reticolo di materiale caratterizzato da un indice di rifrazione differente. Tale fotoincisione, realizzata sulla fibra ottica attraverso una opportuna maschera di fase, produce una periodica variazione dell'indice di rifrazione del core della fibra nella direzione longitudinale, caratterizzando la lunghezza d'onda  $\lambda_B$  di riferimento del sensore. Ogni deformazione che interessa il reticolo causa una variazione della lunghezza d'onda riflessa da cui si può risalire alla deformazione stessa.

Dato che il reticolo è sensibile anche alla temperatura può essere usato come sensore di temperatura se svincolato da ogni tipo di deformazione; se l'escursione termica è importante è invece necessario compensare l'effetto della temperatura per risalire alla reale deformazione.

I sensori FBG sono attualmente una soluzione avanzata, affidabile e competitiva per vastissimi campi, come quello civile, dei trasporti e aerospaziale.

## Caratteristiche dei sensori FBG

Tra le caratteristiche e i vantaggi dei sensori a fibra ottica rispetto ai sensori tradizionali, elettrici o meccanici, si possono citare:

➤ *Elevata sensibilità di misura*

La sensibilità, cioè l'attitudine dello strumento a rilevare piccole variazioni della grandezza di ingresso (allungamento), è di circa  $2 \cdot 10^{-6}$  strain. Lo strain ( $\varepsilon$ ) è una misura adimensionale dell'allungamento; è il rapporto tra la variazione della lunghezza rispetto alla lunghezza iniziale,  $\varepsilon = \Delta l/l$ . Se il sensore è fissato tra due punti distanti un metro può misurare variazioni di  $2 \mu\varepsilon$ .

Per misurare variazioni di lunghezza sia positive che negative i sensori vengono pretensionati prima del fissaggio.

➤ *Insensibilità a tutte le interferenze elettromagnetiche*

Dato che le fibre ottiche sono fatte in vetro, i campi elettromagnetici non possono indurre correnti elettriche in esso, come invece succede in presenza di cavi in rame. Inoltre i campi elettromagnetici non possono modificare la luce che attraversa la fibra ottica.

➤ *Possono essere facilmente strutturate catene di misura anche di centinaia di metri, con cablaggi elementari e hardware di controllo estremamente snello*

I sensori possono essere connessi in successione lungo un'unica fibra ottica, con la possibilità di aumentare i punti di misura senza strumentazioni aggiuntive.

➤ *Sono chimicamente inerti e pressoché insensibili a fenomeni ossidativi ed erosivi*

➤ *Non hanno bisogno di alimentazione elettrica. L'unico consumo è dato dall'unità di controllo, che può essere posta a grande distanza dai sensori.*

➤ *Non risentono di condizioni ambientali di utilizzo*

➤ *Peso e dimensioni trascurabili*

➤ *Permettono la trasmissione dei dati di misura sulle lunghe distanze*

➤ *Durata di utilizzo che può raggiungere i 25 anni*

➤ *Facilmente posizionabili in modo stabile all'interno di materiali e strutture*

➤ *Notevole stabilità e affidabilità che rende superflua ogni ricalibrazione del sistema di misura*

- *Possono lavorare immersi in un liquido e in ambienti con temperature molto alte ~400°C*

Il segnale ottico riflesso dai sensori FBG viene decodificato da un analizzatore di spettro per poi venire trasmesso ad un PC; l'analizzatore di spettro può essere di tipo in divisione di tempo o frequenza. I due sistemi sono stati testati per capire quale si adatti meglio al monitoraggio delle fessurazioni sulle pareti della chiesa di sant'Ignazio a Roma; di seguito vengono presentati brevemente i due sistemi e riportati i risultati dei test fatti.

### Sistema di sensori FBG in divisione di tempo e frequenza

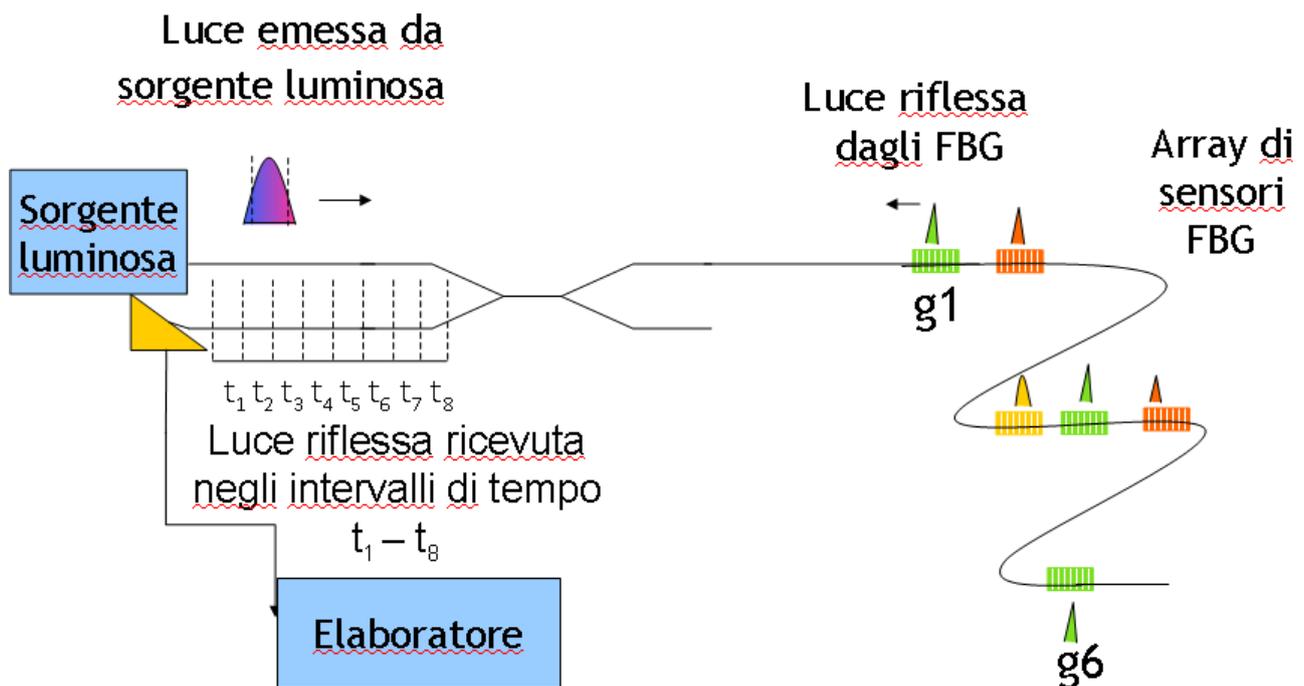


Figura 2: schema del sistema di misurazione

Il sistema, come tutti i sistemi di acquisizioni da sensori FBG, si compone di una sorgente luminosa, un circolatore o uno splitter, una fibra ottica single-mode che contiene dei sensori FBG, un analizzatore di spettro e un'unità di elaborazione dei dati.

Nel caso del sistema in divisione di tempo i componenti e le caratteristiche sono le seguenti:

- La sorgente è costituita da un SOA che emette luce infrarossa intorno a 1550nm (terza finestra di trasmissione) impulsata tramite il controllo di un circuito stimolatore con clock regolabile;
- I sensori sono a bassa riflettività (2-4%) tutti centrati intorno a 1550nm;
- Lo splitter è gestito da un gate ottico temporizzato che permette di creare una cavità fra SOA e uno specifico sensore;
- L'analizzatore di spettro è basato su un TDM OEM 800 SFSI della INSENSYS con banda concentrata intorno alla lunghezza d'onda dei sensori;
- L'elaborazione è affidata a un software che analizza i segnali provenienti dall'analizzatore di spettro e li converte nelle lunghezze d'onda lette dai sensori;
- Ad ogni acquisizione viene emesso dal circuito elettrico un segnale che stimola l'emissione della luce nel SOA. La luce viene riflessa da tutti i sensori ma il gate ottico permette il passaggio solo della luce di ritorno da uno specifico sensore. La luce stimola una nuova emissione amplificata del SOA che torna sui sensori. Si crea così una cavità che permette di amplificare il debole segnale di ritorno dai sensori a bassa riflettività. Alla fine la luce amplificata arriva sull'analizzatore di spettro che converte il segnale in un'informazione che viene trasmessa al computer tramite USB. Infine il programma sul computer si occupa di fare il fitting e salvare la lunghezza d'onda letta;
- Il procedimento viene ripetuto iterativamente cambiando di volta in volta il sensore interrogato.

Nel caso invece del sistema in divisione di frequenza, i componenti e le caratteristiche sono essenzialmente:

- La sorgente o SLED (Superluminescent LED) con circolatore ottico integrato della DenseLight Semiconductors emette luce a banda larga;
- Le lunghezze d'onda dei sensori sono comprese tra 1520 e 1580 nm e, per evitare sovrapposizioni del segnale, ci deve essere una differenza di almeno 2-3 nm tra i sensori.
- Il segnale di ritorno dalla fibra ottica riflesso dai sensori viene inviato all'analizzatore tramite lo SLED;
- L'analizzatore di spettro è un IMON 512 con interfaccia USB della Ibsen Photonics;
- L'elaborazione è affidata a un software che analizza il segnale proveniente dall'analizzatore di spettro e contenente simultaneamente le informazioni di tutti i sensori, facendo il fitting e salvando le lunghezze d'onda lette.

Per il test sono stati vincolati tre FBG a tre campioni in muratura (Figura 3).



Figura 3: test acquisizione in divisione di tempo

In Figura 4 viene riportata la visualizzazione di due sensori nel dominio del tempo.

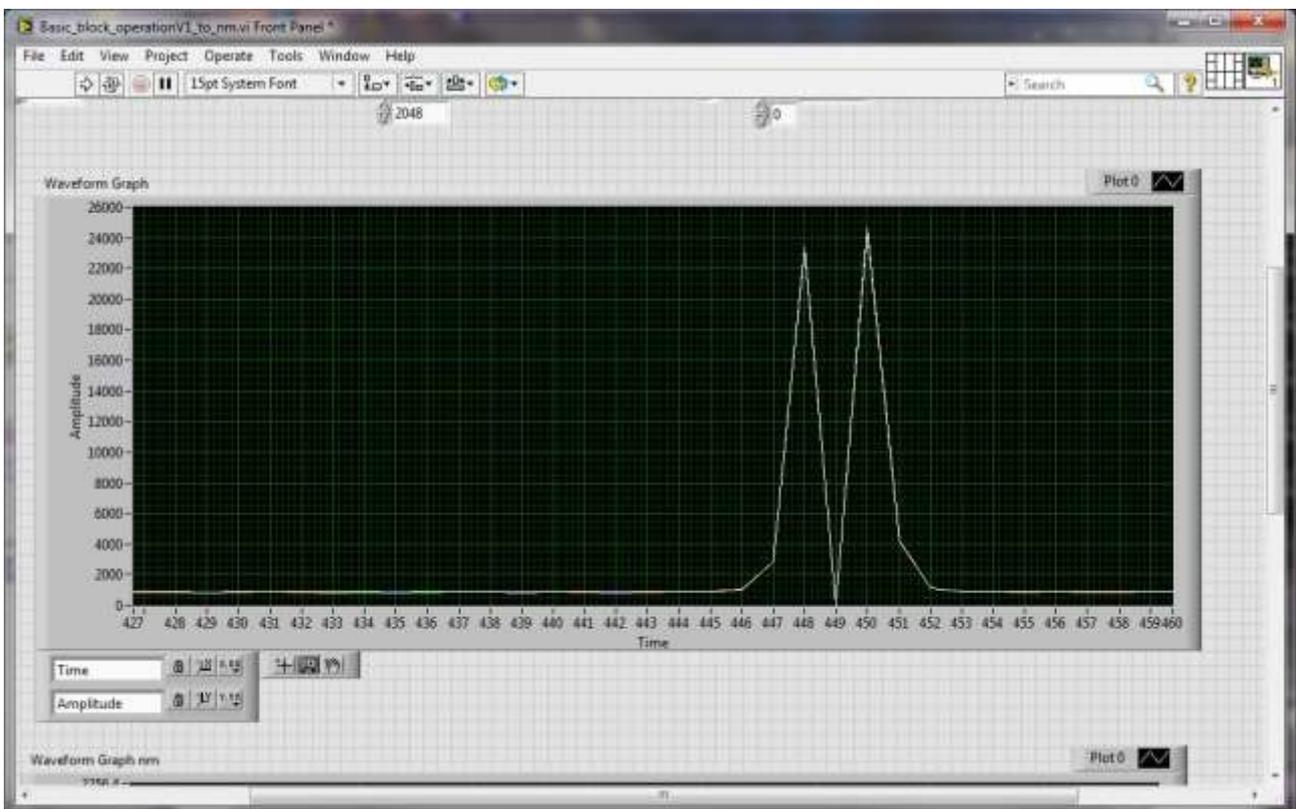


Figura 4: due FBG in divisione di tempo

### **Vantaggi del sistema in divisione di tempo rispetto al sistema in divisione di frequenza:**

- I sensori sono più semplici da produrre sia per la scarsa riflettività, sia per il fatto che sono tutti centrati alla stessa frequenza. Questo si riflette in un minor costo di produzione.
- Si possono inserire tutti i sensori necessari in un unico array togliendo il problema di dover gestire un multiplexer.
- È possibile aumentare l'accuratezza della misura utilizzando analizzatori di spettro un range di frequenze molto ridotto e quindi con la possibilità di aumentarne la risoluzione spettrale.

### **Svantaggi del sistema in divisione di tempo rispetto al sistema in divisione di frequenza:**

- L'elettronica di gestione del sistema è molto più complessa e quindi necessariamente più costosa.
- Le lunghezze d'onda rilevate non sono simultanee ma ad ogni interrogazione viene acquisita quella di un solo sensore.
- Per array molto lunghi è necessario prevedere un lungo tratto di fibra prima dell'array per evitare che la cavità che si crea fra un sensore e il SOA risuoni anche con altri sensori.
- Attualmente è poco utilizzato e quindi è anche difficile e più costoso reperire la tecnologia necessaria.

Con lo scopo di effettuare un monitoraggio dinamico delle fessurazioni è stato preferito utilizzare il sistema in divisione di frequenza che può arrivare a una frequenza di campionamento pari a 3 kHz simultaneamente su tutti i sensori collegati alla fibra ottica.

# Applicazione dei sensori FBG per il monitoraggio dell'eventuale evoluzione dello stato fessurativo

Uno dei campi in cui può risultare vantaggioso l'uso dei sensori a fibra ottica rispetto ai tradizionali sistemi di monitoraggio, soprattutto per la loro bassa intrusività e alta risoluzione, è la diagnostica dei beni architettonici e artistici.

Infatti il monitoraggio di definiti punti critici può essere essenziale per determinare le cause alla base delle lesioni alle strutture che risultano indispensabili per pianificare interventi di consolidamento o per prevedere l'evoluzione nel tempo dell'ampiezza delle fessure.

Le misure dei sensori possono essere usate per determinare sia il comportamento statico che quello dinamico tra le pareti ai lati della lesione e complessivamente della struttura. Dal punto di vista statico il problema fondamentale è capire se la lesione è avvenuta durante un evento particolare, come un evento sismico, e si è stabilizzata o se l'ampiezza della lesione si sta lentamente modificando; un monitoraggio a lunga durata può sicuramente evidenziare fenomeni molto lenti nel tempo, che quindi provocano una variazione molto piccola delle dimensioni della fessura.

Oltre al monitoraggio statico, in cui bastano poche letture al giorno, è importante capire se sono presenti fenomeni dinamici, cioè dovuti a carichi ripetuti, periodicamente o non, che possono produrre vibrazioni tra le pareti ai lati della fessura, generalmente dannose per le strutture perché possono causare il fenomeno della fatica o dell'autoeccitazione. Le sollecitazioni dinamiche possono essere molteplici: presenza del traffico nelle vicinanze della chiesa, entrata/uscita delle persone in visita, il movimento degli studenti del liceo Visconti che fa parte dell'edificio della chiesa...

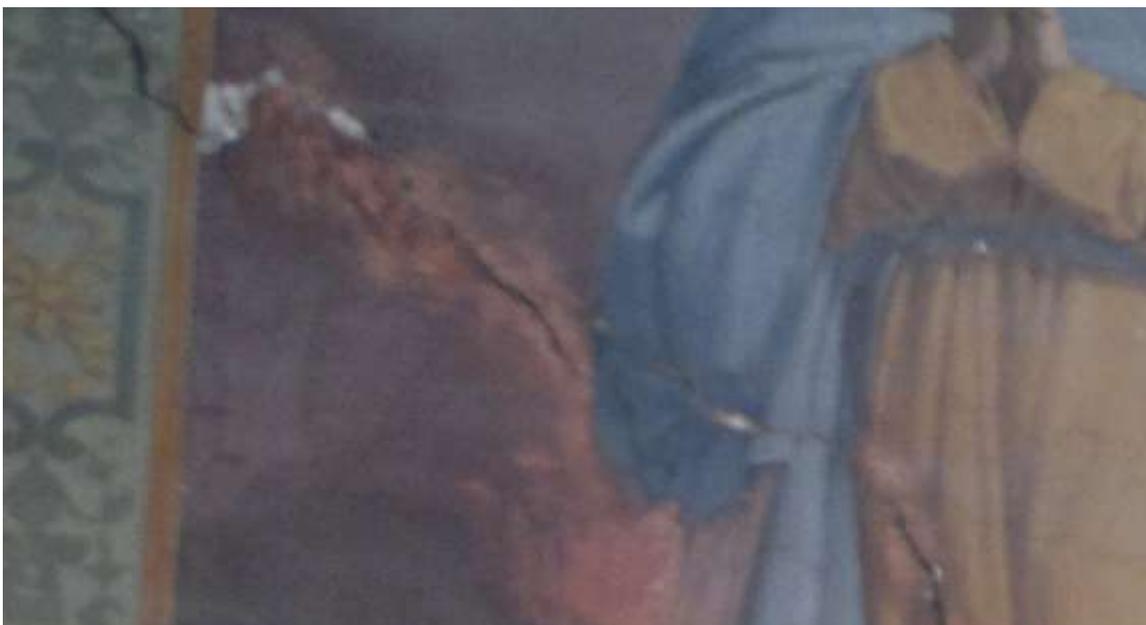


Figura 5: fessura su una parete verticale affrescata

I sensori FBG hanno le opportune caratteristiche, principalmente alta risoluzione e elevata frequenza di campionamento (fino a 3 kHz), per registrare correttamente l'effetto reale delle eventuali vibrazioni.

### **Preparazione del sistema**

Al fine di monitorare le variazioni dell'ampiezza delle fessurazioni su due pareti distinte, sono state configurate preventivamente due file di sensori FBG; ogni fila è composta da 4 o 5 sensori (Figura 12) giuntati lungo una fibra. Prima delle giunzioni tra sensori e fibra è stata effettuata una prova di installazione con una fibra senza sensori sulla parete affrescata con fessura allo scopo di determinare le giuste distanze tra un giunto e l'altro (Figura 6); inoltre è stata determinata la lunghezza della fibra adatta per l'applicazione finale e verificata l'assenza di eventuali zone delicate in prossimità del fissaggio dei sensori, dove qualunque lavorazione potrebbe mettere a rischio l'integrità dell'affresco.



Figura 6: prova di installazione su fessura

Le due file terminano con connettori FC/APC per venire successivamente collegate tramite un cavo armorato di fibra ottica lungo 100 metri.

La prima fila di sensori viene applicata sull'affresco (Figura 5) situato dentro la cappella, mentre la seconda (Figura 7) viene applicata ai lati di una fessura di una parete senza affresco che affaccia all'interno della chiesa.



Figura 7: fessura su parete

### **Procedura di giunzione dei sensori**

Per ottenere le letture i sensori devono essere collegati sulla stessa fibra ottica. Il collegamento può avvenire per giunzione, che consiste nel “fondere” permanentemente due terminali in fibra ottica mediante un arco elettrico, o attraverso connettori, che, per applicazioni ad hoc, devono comunque essere giuntati all'estremità delle fibre, e bussole ottiche che collegano temporaneamente i connettori.

Per le giunzioni è stata usata una splicer Fujikura FSM-60S. I sensori da collegare, della Technica SA, non hanno nessun tipo di placchetta di supporto; il reticolo di Bragg è semplicemente integrato nella fibra, in questo modo l'intrusività dei sensori è ridotta al minimo. Il sensore appare quindi come una normale fibra ottica priva di cavo di protezione esterno.

Tutte le operazioni devono essere svolte con la massima attenzione, perché ogni piccola incisione sulla superficie della fibra compromette la riuscita della fusione.

La procedura di giunzione nel caso della configurazione sopra descritta segue principalmente i seguenti passi. Per l'applicazione dei connettori la

procedura rimane invariata ma bisogna anche rimuovere il cavo di protezione esterno del pigtail.

1. La fibra viene fatta passare all'interno di un piccolo pezzo di cavo di hytrel da 900 micron. In questo modo il termorestringente apposito che verrà usato per irrobustire il punto di giunzione stringerà sul cavo di hytrel evitando piegamenti della fibra.
2. Viene inserito il termorestringente da 60 mm.
3. Viene rimosso il buffer coating della fibra mediante una pinza Miller 80355 di precisione (stripper cable).
4. La fibra viene pulita con alcol isopropilico. La pulizia della fibra è importantissima e va ripetuta ogni volta ci sia stata la possibilità di deposito di sporcizia sulla fibra.
5. Viene effettuato il taglio della fibra con la taglierina per fibre ad alta precisione Fujikura CT 30-A. Questa taglierina ha al suo interno una ruota diamantata; per ottenere un taglio adeguato la fibra deve essere, al momento del taglio, perfettamente ortogonale all'asse della ruota diamantata.
6. L'estremità della fibra così preparata viene posizionata nella sede della giuntatrice (Figura 8).
7. Vengono ripetute le operazioni 1,3,4,5,6 per l'estremità opposta della fibra da giuntare.
8. Una volta inserite le fibre e chiuso il coperchio esterno della giuntatrice inizia il processo automatico di fusione. In una prima fase l'apparecchio scatta una scintilla di debole potenza (prefusione) che serve a pulire la parte di contatto delle due fibre. Successivamente tenta di allineare i due core (Figura 9); in caso di buon allineamento eseguirà la fusione, altrimenti sarà necessario ripetere tutti o parte dei punti precedenti. A fine fusione viene data una stima dei db di perdita che di solito si aggirano intorno ai 0.01-0.02 db.
9. La fibra viene liberata dalle apposite sedi e viene fatto scorrere il termorestringente con i cavetti di hytrel in corrispondenza del punto di fusione; il tutto viene inserito nel fornello (Figura 10).



Figura 8: posizionamento della fibra nella giuntatrice.



Figura 9: allineamento delle fibre prima della fusione.



Figura 10: inserimento del termorestringente nel fornello.

### **Configurazione del sistema**

Per collegare le due file di sensori viene utilizzato una fibra ottica rivestita da una guaina protettiva lunga diverse centinaia di metri e connessa alle estremità con connettori FC/APC.



Figura 11: fibra ottica rivestita (100 m)

Su ogni fila di sensori è previsto un sensore di temperatura; la lettura della temperatura è necessaria per risalire all'effettiva deformazione dei sensori, in quanto influenza la lettura dei dati. Se è presente una significativa escursione termica è indispensabile compensare l'effetto della temperatura;

dato che la distanza tra i sensori di una stessa fila non è eccessiva (3 metri tra i sensori più distanti), e conseguentemente si ipotizza un'escursione termica trascurabile, si è pensato sufficiente l'aggiunta di un solo sensore di temperatura per ogni fila.

In Figura 12 viene riportato lo schema di installazione finale con tutti i componenti collegati.

Tutti i componenti utili per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati (pc, analizzatore di spettro, sorgente luminosa) sono stati posizionati in prossimità della prima fila di sensori, cioè dell'affresco di Figura 5.

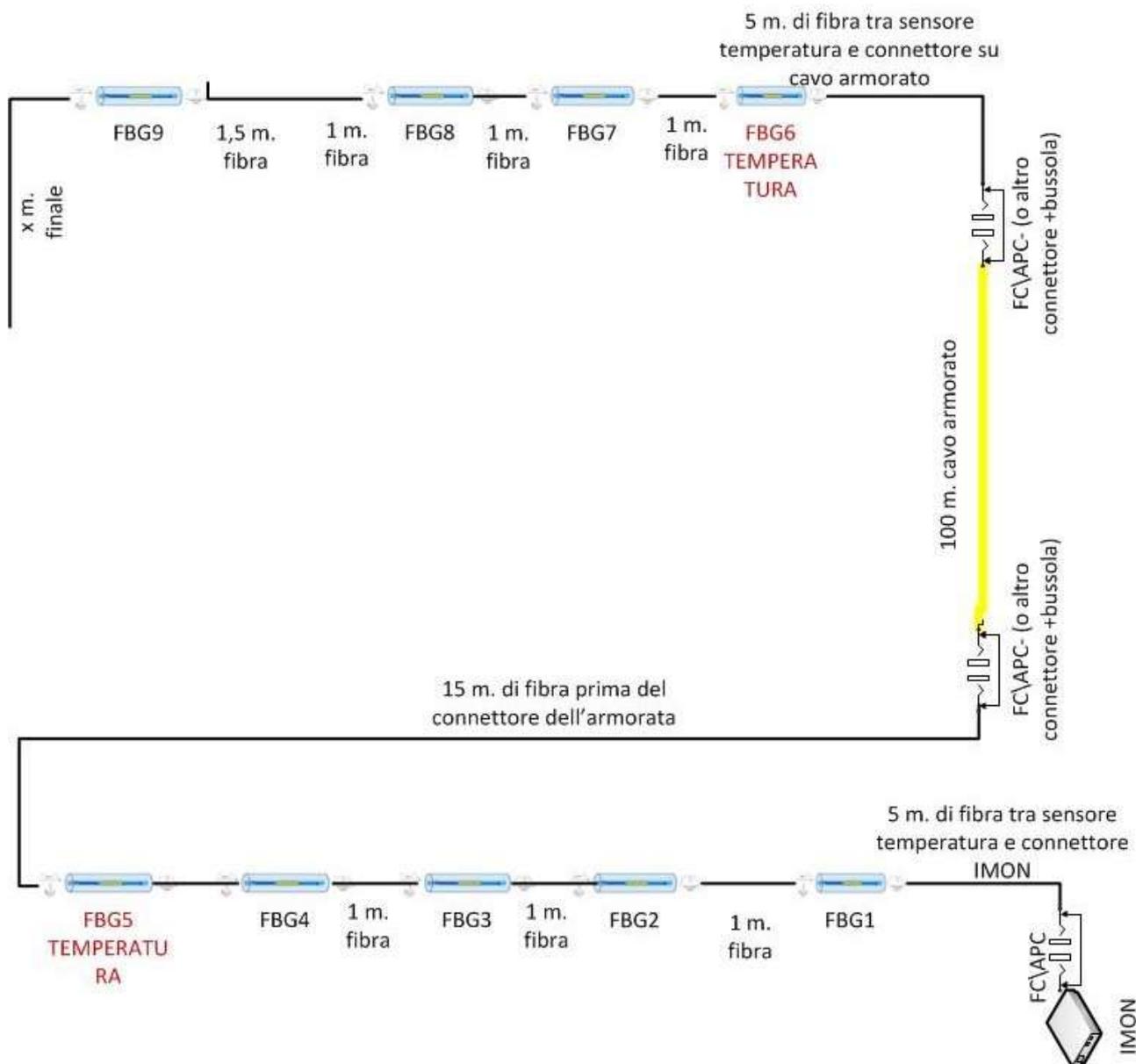


Figura 12: configurazione finale del sistema

Per posizionare in modo compatto e protetto i componenti necessari per l'acquisizione dagli FBG è stata costruita appositamente una custodia di metallo (Figura 15): analizzatore e sorgente ottica (riportati in Figura 13) vengono avvitati sulla base e sulla parte superiore della custodia e collegati

internamente. Esternamente sono collocati una uscita USB e una bussola ottica per collegare computer e fibra ottica. Il tutto viene alimentato tramite presa elettrica. Inoltre è stata inserita una piccola ventola di raffreddamento per evitare l'eccessivo surriscaldamento dei componenti durante l'utilizzo.



Figura 13: SLED

Figura 14: IMON 512 (senza coperchio)

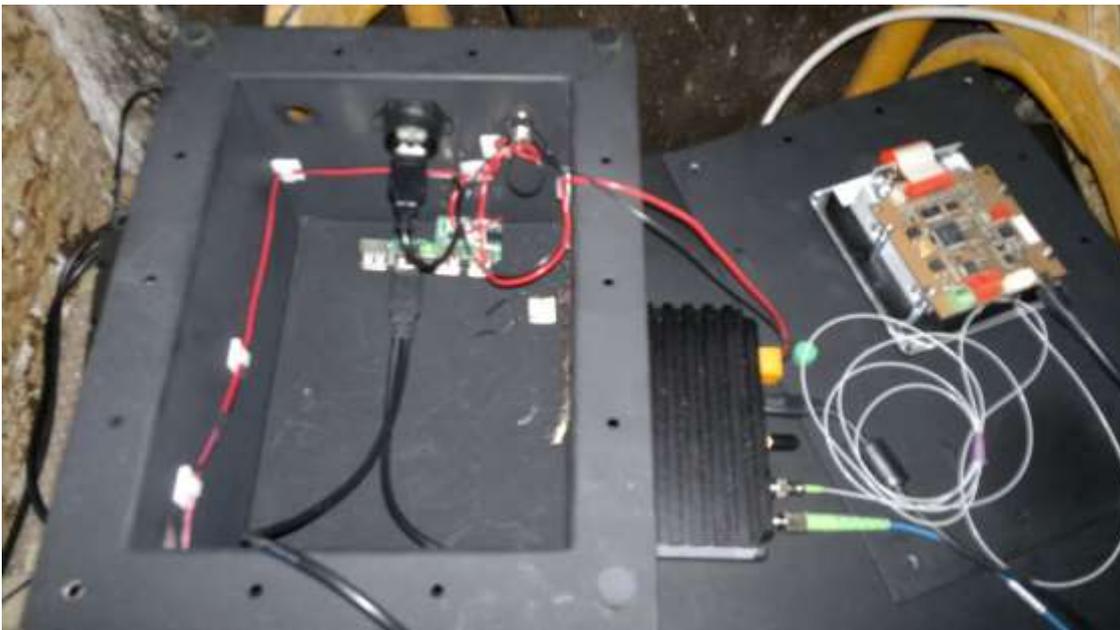


Figura 15: custodia (aperta) contenente i componenti di acquisizione

## Incollaggio sensori

L'incollaggio, cioè l'applicazione dei vincoli alle estremità del sensore, è sicuramente una delle operazioni più delicate nel caso di installazione direttamente sull'affresco. Le problematiche da affrontare sono essenzialmente due: evitare il danneggiamento dell'affresco, con la possibilità di completa rimozione del vincolo, e assicurare una buona tenuta del fissaggio, riuscendo a escludere, nel campo di misura dei sensori, ogni possibile cedimento.

In un'applicazione simile, monitoraggio di una crepa su un arco (F.Felli, A.Brotzu. 2010. Impiego di sensori in fibra ottica per il monitoraggio di fratture statiche e dinamiche), in cui non era però presente il problema di rovinare la zona in prossimità del fissaggio, il sensore è stato posizionato su un letto di colla strutturale Wishay AE10. Dalla lettura dei dati si è potuto verificare che la tenuta dell'incollaggio è risultata ottima; una colla di questo tipo però comporta inevitabilmente un danneggiamento della zona che interessa l'incollaggio, rendendola inadatta ad applicazioni su affresco.

Un'altra possibilità è quella di utilizzare gesso a presa rapida e calce. La rimozione dall'affresco risulta comunque un'operazione delicata e difficoltosa anche con questa modalità.

Il sistema di incollaggio sviluppato prevede il completo ripristino delle condizioni precedenti al fissaggio con tempi di rimozione brevissimi e una tenuta adeguata per lo scopo prefissato.

**Si è proceduto a utilizzare una tecnica innovativa di ancoraggio utilizzando dei vincoli a base di carta giapponese e colla metacrilica. Sono stati effettuati dei test in laboratorio, utilizzando dei provini di affresco, per verificare l'effettiva tenuta degli ancoraggi. Si è realizzato un supporto che ha aumentato la superficie di attacco della fibra utilizzando un preincollaggio di carta giapponese da 1 cm<sup>2</sup> con cianoacrilate. Successivamente è stato ancorato il supporto, oramai solidale alla fibra, con colla metacrilica e altra carta giapponese sovrapposta al "cerotto" base. Questa è risultata, una volta conclusa la prova, facilmente rimovibile dall'affresco.**

## Procedura di calibrazione iniziale

Per controllare il movimento relativo tra le pareti ai lati della fessura i punti di fissaggio devono essere applicati a cavallo della fessura. La distanza tra i vincoli è stata scelta di circa 50 cm. Durante l'applicazione dei punti di vincolo il sistema di acquisizione è stato messo in funzione per poter pretensionare il sensore interessato: in questo modo viene resa possibile la corretta lettura di variazioni della lunghezza anche negative (avvicinamento dei vincoli, a cui corrisponde un restringimento della fessura).

Inoltre i punti di fissaggio sono stati applicati in modo da poter leggere nel modo migliore gli spostamenti verso la direzione normale alla fessura, cioè in modo che la fibra solidale ai vincoli segua la direzione perpendicolare alla crepa.

Per descrivere i passi svolti durante il pretensionamento, supponiamo di voler incollare un sensore con lunghezza d'onda di riferimento a 1550 nm.

1. La fibra con tutti i sensori giuntati viene collegata all'acquisitore e avviato il programma per la visualizzazione in tempo reale della lunghezza d'onda dei sensori. Sull'elaboratore vengono visualizzati i valori e i relativi grafici delle lunghezze d'onda di tutti i sensori collegati.
2. Viene applicato il primo punto di vincolo alla distanza prestabilita mediante la tecnica di incollaggio precedentemente descritta.
3. Prima di incollare la fibra al di là della crepa (il sensore si troverà tra i due punti di fissaggio, in prossimità della fessura) viene messa in tensione la fibra. Sul monitor si visualizzerà una variazione dal valore di riferimento. I sensori usati per questa applicazione possono sopportare allungamenti limite di circa 5000  $\mu\epsilon$  che corrispondono a circa 6000 pm cioè 6 nm; aspettandoci variazioni dell'ampiezza della fessura prettamente positive abbiamo scelto di pretensionare di circa 600 pm che, per vincoli posti a 50 cm, corrisponde a restringimenti della fessura misurabili di massimo 250 micron . Ad esempio nel fissaggio del sensore a 1550 nm, è stata tesa la fibra fino al raggiungimento del valore di 1550.6 nm, visibile sul monitor; questa tensione è stata poi mantenuta durante l'applicazione del secondo punto di vincolo e fino all'indurimento della colla.
4. Viene verificato, osservando i valori letti dall'acquisitore, che non ci siano eccessivi cedimenti.



Figura 16: fessura su affresco dopo l'incollaggio di quattro sensori FBG di strain (FBG in temperatura è libero)

## **Descrizione sintetica del software**

Il software di acquisizione, interfacciato all'analizzatore di spettro e alla sorgente, è stato sviluppato in modo da soddisfare le esigenze derivanti dal monitoraggio dello stato fessurativo e dall'invio dei dati dall'elaboratore locale al server web; il software è interamente scritto in LabVIEW.

Per elaborare correttamente le lunghezze d'onda lette dai sensori è necessario compensare l'effetto della temperatura che influenza sia i valori letti dai sensori che le letture dell'acquisitore; per risalire al dato che indica correttamente i valori di deformazione occorre quindi:

- Aggiornare periodicamente il valore della temperatura interna all'analizzatore di spettro.
- Aggiornare periodicamente il valore di temperatura in prossimità dei sensori (viene utilizzato un sensore di tipo elettrico).
- Compensare i due effetti della temperatura sulle misure.

Data l'elevata frequenza di campionamento (che può arrivare fino a 3 kHz) è stato scelto di non salvare tutti i dati letti dall'elaboratore ma di salvare e inviare al server web solo quelli in cui vengono registrate delle variazioni.

Per far questo è stato fissato un valore di soglia su ogni sensore: se un valore supera istantaneamente la soglia allora il software inizia a salvare i dati e i tempi corrispondenti in un file di testo alla massima velocità finché non viene recuperata la stabilità dei valori.

Parallelamente, per effettuare un monitoraggio anche di tipo statico, vengono salvate in un altro file di testo i tempi e le medie dei valori di allungamento di ogni sensore ogni volta che viene aggiornata la temperatura.

Tutti i file vengono poi inviati al server web per la memorizzazione dei valori e la loro correlazione temporale.