



## Strenght evaluation of bonding of FBG sensors employed in structural monitoring

## Valutazione della resistenza di incollaggi per sensori FBG per il monitoraggio strutturale

A. Brotzu, F. Felli, C. Vendittozi, G.Saviano

*Univeristà degli studi di Roma "La Sapienza, dip. ICMA, via Eudossiana 18 Roma*

M.A. Caponero, A. Polimadei

*Centro Ricerche ENEA, Via Enrico Fermi 13, 00044 Frascati, Roma*

---

**ABSTRACT.** The "Fiber Bragg Grating" sensors are, essentially, highly sensitive strain gauge. Their skill to monitor various parameters such as strain, temperature, stress states (and many more under development) has spread out widely their use in many areas. The small size and ease of handling allow their positioning by bonding on existing structures or directly embedding into various materials, in order to create the "smart materials". Their preventive (precautionary) implementation on materials and structures can provide continuous monitoring of the deformations at several places in order to prevent possible phenomena of failure. Their application on structures in service may allow a monitoring of the phenomena of failure already existing. To get a true, repetitive, measure of parameters that one wants to check it must be ensured an efficient transfer of the deformation from the material/structure to the core of the optical fiber. Considering the structure of the optical fiber, the deformation, applied on the material, is transferred to the sensor through various interfaces. Particularly in the case of embedded optical fibers, the deformation is transferred from the material to the polymer coating (that usually covers the optical fiber), and then from the coating to the optical fiber itself. In case of glued sensors, the strain passes from the material/structure to the glue, from the glue to the cladding, the from the latter to the optical fiber. The purpose of this paper is to evaluate the strength of different types of glue proposed for bonding of sensors.

**SOMMARIO.** I "Fiber Bragg Grating" sono essenzialmente dei sensori di deformazione estremamente sensibili. La loro capacità di monitorare diversi parametri dell'ambiente che li circonda come deformazioni, temperatura, stati tensionali, e molti altri ancora in fase di studio, ha portato ad un loro vasto impiego nei più svariati settori. Le ridotte dimensioni e la facilità di manipolazione permettono sia il loro inserimento direttamente all'interno di materiali di varia natura realizzando così gli "smart materials", che il loro posizionamento mediante incollaggio su materiali e/o strutture già esistenti. La loro applicazione preventiva su materiali e/o strutture permette di ottenere un monitoraggio continuo delle deformazioni in più punti e quindi prevenire eventuali fenomeni di cedimento. Una loro applicazione su strutture già in servizio può consentire un monitoraggio di fenomeni di cedimento già in essere.

Sia che i sensori vengano inseriti all'interno dei materiali sia che vengano incollati su di essi, per ottenere una misura veritiera e ripetitiva dei parametri che si vogliono verificare è necessario che sia garantito un trasferimento efficiente della deformazione dal materiale/struttura al core della fibra ottica dove è foto-inciso il reticolo di Bragg. Considerata la struttura della fibra ottica, la deformazione applicata al materiale viene trasferita al sensore attraverso diverse interfaccia. In particolare nel caso di fibre ottiche inglobate (embedded) all'interno

---



dei materiali, essa passa dal materiale al rivestimento polimerico (cladding) che di solito avvolge le fibre ottiche, e da quest'ultimo alla fibra ottica stessa. Nel caso di sensori incollati la deformazione passa dal materiale/struttura alla colla, dalla colla al cladding e da quest'ultimo alla fibra ottica; in alcuni casi si può rimuovere il coating polimerico, in questo modo si ha un'interfaccia diretta tra struttura/colla/vetro. Lo scopo di questo lavoro è quello di valutare la tenuta di diversi tipi di colle proposte per l'incollaggio dei sensori.

In una prima fase, fibre ottiche non sensorizzate, sono state incollate con diverse tecniche e diverse colle su lamine di acciaio armonico, i provini così realizzati sono stati sottoposti a prove di trazione fino ad una deformazione prefissata (inferiore a quella di rottura) monitorando l'attenuazione della luce per evidenziare fenomeni di cedimento della fibra. Nella seconda fase sono stati realizzati provini incollando sulle lamine delle fibre ottiche sensorizzate. I provini sono stati sottoposti a prove di trazione, in tutto simili a quelle condotte nella prima fase, seguite da un periodo di rilassamento (la deformazione viene mantenuta per un certo tempo); durante tutta la prova il sensore viene monitorato ed i risultati confrontati con quelli di estensimetri convenzionali applicati sulla superficie della lamina, per valutare l'efficienza di trasferimento della deformazione dalla lamina al sensore attraverso l'incollaggio ed eventuali fenomeni di distensione della colla stessa.

**KEYWORDS.** FBG; Efficienza colle; Embedding; Smart patch; Fiber optic.

## INTRODUZIONE

I “Fiber Brag Gratings” sono essenzialmente dei sensori di deformazione estremamente sensibili, iscritti all'interno di una fibra ottica; essi sono in grado di rilevare deformazioni dell'ordine dei microstrain ( $1 \mu\text{m}/\text{m}$ ). Questi strain gauge ottici vengono ottenuti modificando localmente l'indice di rifrazione del core della fibra ottica stessa secondo una ben definita geometria. In particolare mediante tecniche di fotoincisione (la fibra ottica viene illuminata trasversalmente con un fascio coerente di luce UV attraverso una maschera di fase) si ottiene un reticolo caratterizzato da un'alternanza di zone di vetro con indice di rifrazione differente; le maglie del reticolo sono equidistanziate tra di loro e questa distanza  $\Lambda$  caratterizza il sensore. Il risultato finale di questo processo è che al passaggio di un fascio luminoso a banda larga attraverso la fibra, il reticolo così ottenuto riflette una specifica lunghezza d'onda ( $\lambda_B$ ) proporzionale alla distanza caratteristica  $\Lambda$ .

$$\lambda_B = 2n_c \Lambda \text{ (nm)} \quad (1)$$

Al variare della dimensione del sensore, cambia anche la lunghezza d'onda riflessa sia per la variazione dell'indice di riflessione che per la variazione della distanza tra le maglie del reticolo. Di solito la variazione di  $\lambda_B$  legata alla variazione dell'indice di rifrazione del core,  $n_c$ , è trascurabile, pertanto si lega la variazione di lunghezza d'onda essenzialmente alla variazione della distanza tra le maglie del reticolo attraverso la seguente relazione:

$$\varepsilon = \left( \frac{\Delta L}{L} \right) = \left( \frac{\Delta \Lambda}{\Lambda} \right) = \left( \frac{\Delta \lambda_B}{(1 - p_e) \lambda_B} \right) \quad (2)$$

Dove  $p_e$  è un coefficiente che tiene conto dell'effetto delle tensioni sull'indice di riflessione attraverso il rapporto di Poisson  $\nu$  ed i coefficienti di Pockel  $P_{ij}$  del materiale [1,2].

La catena di misura prevede l'utilizzo di un opportuno strumento che oltre ad “illuminare” la fibra, definita “dorsale”, con un fascio a banda larga, sia anche in grado di effettuare con tecniche di tipo spettroscopico la misurazione della lunghezza d'onda della luce riflessa, evidenziando la sua variazione. Tale strumento è di solito interfacciato ad un computer.

I vantaggi di questo tipo di sensori, oltre alla capacità di misurare deformazioni estremamente piccole, sono molteplici. È possibile inserire sulla dorsale più sensori (caratterizzati da  $\Lambda$  diverse) e quindi di monitorare con un unico strumento le deformazioni in più punti. Il materiale con cui è fatto il sensore è chimicamente inerte ed insensibile ai campi elettromagnetici. Il sensore è di ridottissime dimensioni e facilmente integrabile in strutture e/o materiali. Per tutti questi motivi, numerosi sono gli studi sui possibili impieghi degli FBG nei più svariati settori dell'ingegneria e delle scienze.



Le ridotte dimensioni della fibra e la sua facilità di manipolazione permettono sia l'inserimento dei sensori FBG all'interno di materiali che il loro incollaggio sulla superficie di strutture. Sensori FBG sono stati inseriti all'interno di materiali compositi per impieghi strutturali realizzando così alcuni "smart materials", cioè materiali intelligenti in grado di comunicare la loro deformazione in tempo reale e permettere quindi un pronto intervento, in caso di segnali che possano ritenere probabile il cedimento della struttura [3-7]. Rimanendo nel campo dei materiali compositi, tali sensori sono stati inseriti in patch ottenute con fibra di vetro e resine epossidiche, impiegate per il risanamento di strutture murarie danneggiate, ottenendo così un elemento che, oltre ad essere di rinforzo, è anche un vero e proprio sensore utilizzato per controllare l'eventuale danneggiamento della struttura stessa [8].

Tali sensori sono stati inglobati anche dentro materiali metallici, sia mediante tecniche di fusione e colata che di elettrodeposizione, con lo scopo di realizzare dei sensori termici. In questo caso il rivestimento metallico aveva lo scopo di esaltare le deformazioni dovute alle variazioni di temperatura [9].

Le fibre ottiche sensorizzate possono con facilità venire incollate su strutture e/o materiali preesistenti utilizzando diversi tipi di colle. Di solito questa tecnica viene utilizzata per monitorare le deformazioni o fenomeni di cedimento in essere. Sensori FBG sono stati montati su diverse strutture murarie di beni architettonici interessate da importanti fessurazioni, per monitorare nel tempo l'avanzamento di quest'ultime. Per esempio sono stati installati recentemente su di una crepa, che si sviluppava su di un arco, all'interno della sala del Tintoretto nella Scuola Grande di San Rocco a Venezia e a ridosso di alcune fratture presenti nel museo delle mura Aureliane a Roma. Sensori FBG sono stati installati a cavallo di cricche che si sono sviluppate lungo le zampe di due statue equestri in bronzo (Statua di Bartolomeo Colleoni a Venezia e di Vittorio Emanuele II a Napoli) con lo scopo di monitorare le fratture durante le opere di restauro a cui le statue sono state recentemente sottoposte [10]. Sensori FBG sono stati incollati su tondini di acciaio per cemento armato in seguito utilizzati in strutture civili (i.e. sensori installati all'interno delle travi della città dello sport, progettata dall'architetto Calatrava a Tor Vergata in corso di realizzazione, sensori installati sui tondini di acciaio ed in fibra di vetro utilizzati nelle gabbie di rinforzo durante gli scavi della linea C della Metropolitana di Roma). Sensori FBG sono stati utilizzati per sensorizzare diversi elementi di una imbarcazione da gara con lo scopo di monitorarne lo stato tensionale durante le regate.

Come sopra visto la versatilità di questi sensori ne permette l'utilizzo in diversi campi. Non passa giorno che non vengano proposti loro nuovi utilizzi.

Quale che sia il metodo di installazione, perché il sensore sia perfettamente funzionante, la deformazione del materiale, sia che derivi dall'applicazione di un carico alla struttura o da una variazione dei parametri chimico fisici dell'ambiente in cui la struttura è immersa, deve raggiungere il core della fibra dove è foto-inciso il reticolo di Bragg. Per far questo la deformazione deve essere efficacemente trasferita dalla struttura al sensore attraverso una serie di interfacce la cui resistenza gioca un ruolo decisivo. In particolare le deformazioni passano attraverso sforzi di taglio, dalla struttura alla colla e da quest'ultima alla fibra ottica di vetro, attraverso il coating polimerico, la cui presenza è necessaria per permettere la manipolazione della fibra ottica stessa. Sono di conseguenza presenti le seguenti tre interfaccia poste in serie: materiale/colla, colla/coating polimerico e coating polimerico/fibra. [11-15].

La resistenza di queste interfacce e la capacità di trasferire la deformazione da un materiale all'altro, deve essere garantita non soltanto al momento dell'applicazione della deformazione/carico sul materiale/struttura, ma anche per tutta la durata della sollecitazione stessa. Questo è importante per tutte le applicazioni in cui le strutture da monitorare rimangono sollecitate a lungo, per esempio una trave di un edificio. È importante quindi non soltanto verificare e caratterizzare la resistenza intrinseca delle varie interfacce, ma anche la loro stabilità durante un'applicazione prolungata del carico.

Scopo del presente lavoro è quello di studiare sia il comportamento di vari tipi di colle disponibili in commercio per l'incollaggio di fibre ottiche a seguito di carichi applicati prolungati nel tempo che la sopravvivenza in queste condizioni del sensore.

## **MATERIALI E TECNICHE**

**S**ono state testate le seguenti colle commerciali: Araldite 2011, Araldite 2021, Dow Corning RTV 3145. L'Araldite 2011 e l'Araldite 2021 sono colle bi-componente epossidiche, indicate per incollaggi di diversi tipi di materiali (metalli, ceramiche, legno, gomme vulcanizzate, schiume, plastiche) che reticolano in un range di temperature compreso tra 20 e 180 °C (tempi rispettivamente da 15 ore a 5 minuti). Il Dow Corning RTV 3145 è invece un adesivo siliconico anch'esso indicato per diversi tipi di materiali (metalli, ceramiche, vetri, gomme siliconiche e plastiche) che reticola a temperatura ambiente. Viene spesso utilizzato anche come sigillante.

Queste colle sono state utilizzate per incollare le fibre ottiche ed i sensori sia su un substrato metallico (acciaio armonico) che composito (resina epossidica e fibra di vetro unidirezionale).

Per valutare la resistenza effettiva delle colle, nelle condizioni di impiego del presente lavoro, sono stati effettuati test di “lap shear strength”. I test sono stati effettuati seguendo le disposizioni delle norme ASTM D1002 (“Lap shear strength of adhesively bonded metal specimens”) e ASTM D5868 (“Lap shear Adhesion for fiber reinforced plastics”). I provini sono stati realizzati sovrapponendo ed incollando lamine di substrato larghe 25 mm per una lunghezza di sovrapposizione di circa 13 mm. Entrambe le colle sono state fatte reticolare a temperatura ambiente per circa 100 ore.

I provini sono stati quindi testati a trazione alla velocità di 1.3 mm/min per i provini metallici e 13 mm/min per quelli in composito.

La prima fase della ricerca è stata la scelta della geometria dell’incollaggio da impiegare. Per questo sono stati realizzati diversi provini secondo la geometria riportata in Fig. 1. Come colla è stata utilizzata la colla siliconica Dow Corning RTV3145, come fibra una comunissima fibra di vetro con coating in metacrilato, non sensorizzata; come supporto un lamierino di acciaio armonico (250x25x0.2 mm). Su ogni lamierino sono state incollate 3 fibre.

I parametri variati sono:

- ✓ incollaggio a 1 (provini 2 e 3) o 2 punti (provini 1 e 4, distanza tra gli incollaggi 35 mm),
- ✓ fibra tesa (provini 1 e 2) o lasca (provini 3 e 4).

La lunghezza del tratto incollato è di circa 20 mm

Il provino è stato quindi sottoposto a trazione per uno spostamento complessivo del 2 % (spostamento di 3 mm su di una lunghezza del tratto di provino fuori afferraggi di 150 mm, velocità di spostamento della traversa 0,5 mm/min). Si è quindi valutato a posteriori se le fibre avevano subito danni mediante prove di attenuazione del segnale luminoso. Dopo queste prove di trasmissione si è scelto di utilizzare per la seconda fase della sperimentazione provini con incollaggio ad un punto e fibra tesa.

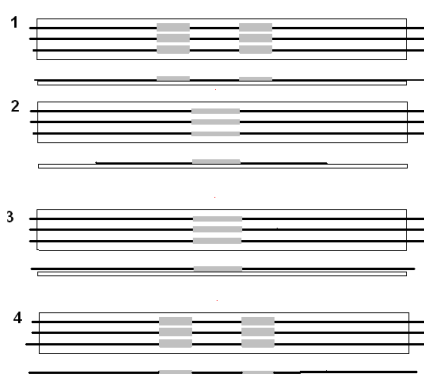


Figura 1: Geometria dei provini per la fase 1.

Figure 1: Phase 1 specimen design.

Nella seconda fase della ricerca sono stati realizzati provini impiegando fibre sensorizzate ( $\lambda$ =come da Tab. 1) con incollaggio a 1 punto e fibra tesa (provini tipo 2), utilizzando come supporti sia lamine di acciaio armonico sia lamine di materiale composito (resina epossidica con rinforzo monodirezionale in fibra di vetro) e come colle sia l’Araldite 2011 (resina epossidica) che l’adesivo siliconico. I provini realizzati con adesivo siliconico e supporto metallico sono stati realizzati con distanze diverse (da 0 a 0.5 mm) della fibra dal supporto, per valutare l’effetto di attenuazione della distanza sulla sensibilità del sensore. Sulla superficie opposta in prossimità del sensore, in alcune prove, sono stati incollati dei coltelli metallici su cui interfacciare un estensimetro elettromeccanico, per controllare la deformazione locale del materiale di base (Fig. 2). In Tab. 1 si riporta un prospetto dei provini realizzati

I provini con substrato metallico sono stati sottoposti a prova di trazione, fino ad una deformazione totale del 2 % (distanza tra gli afferraggi 150 mm, spostamento della traversa 3 mm, velocità di avanzamento della traversa 0.5 mm/min), quindi la deformazione è stata mantenuta per alcuni minuti prima di scaricare il provino, continuando a monitorare il sensore FBG per valutare la sua tenuta. La prova di trazione è stata quindi ripetuta con le stesse modalità, mantenendo però la deformazione finale del 2 % per circa 2 ore. Per queste prove sono stati realizzati 3 provini con adesivo siliconico (provini 1, 2 e 3), due dei quali strumentati anche con estensimetro elettromeccanico (provini 2 e 3) ed 1 con resina epossidica (provino 4).



Provino n	Materiale supporto	Colla	$\lambda$ sensore	Distanza sensore-supporto	estensimetro
1	Acciaio armonico	Dow Corning RTV 3145	1533 nm	0.5 mm	No
2	Acciaio armonico	Dow Corning RTV 3145	1549 nm	0.25 mm	Si
3	Acciaio Armonico	Dow Corning RTV 3145	1549 nm	0 mm	Si
4	Acciaio Armonico	Araldite 2011	1533 nm	0 mm	No
5	Composito	Araldite 2011	1541 nm	0 mm	No
6	Composito	Araldite 2011	1521 nm	0 mm	No

Tabella 1: Descrizione dei provini per la fase 2.

Table 1: Phase 2 specimens description.

I provini (provino 5 e 6) con substrato in composito sono stati realizzati impiegando soltanto la colla epossidica. Questi sono stati inizialmente tirati fino ad una deformazione totale dell'1.1% (1,5 mm di spostamento della traversa), la deformazione è stata mantenuta per circa 20 minuti, quindi aumentata con 2 step di 0,5 mm di spostamento della traversa, fino ad una deformazione finale del 1.7 %. Tra le 2 rampe di salita del carico, la deformazione è stata mantenuta per circa 20 minuti. La deformazione finale è stata mantenuta per circa 2 ore.



Figura 2: Provino in trazione.

Figure 2: Specimen during tensile test.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

### Lap Shear Test

Le Fig. 3 a e b mostrano l'andamento tipo dei test di adesione effettuati. La Tab. 2 riporta i carichi massimo e minimo raggiunti, le tensioni di taglio massima e minima applicata ed il tipo di rottura. Come si può chiaramente vedere, le due colle epossidiche testate hanno comportamenti abbastanza simili. In particolare mostrano un comportamento molto rigido con moduli pressoché uguali. Il carico aumenta in maniera costante fino al cedimento, che avviene in genere con modalità mista adesivo-coesiva (Fig. 4) con prevalenza della componente adesiva (distacco tra colla

e substrato) rispetto alla componente coesiva (frattura nella colla). I valori della resistenza al taglio sono abbastanza uniformi, leggermente superiori quelli della Araldite 2011.

L'adesivo siliconico invece presenta un comportamento differente. Innanzitutto possiede una rigidità notevolmente inferiore. Inoltre, mentre le colle rigide epossidiche si rompono per spostamenti molto piccoli cedendo di schianto, l'adesivo siliconico riesce a sopportare spostamenti superiori (mediamente 5 volte più grandi degli spostamenti a rottura dell'Araldite) prima di iniziare a cedere. Inoltre il cedimento non avviene di schianto, ma gradualmente. Il cedimento avviene sempre con modalità adesiva (Fig. 5), cioè per scollamento tra substrato ed adesivo. La tensione di rottura sono inferiori a quelli registrati con le resine epossidiche.

Non si notano differenze tra i valori di incollaggio su substrati differenti.

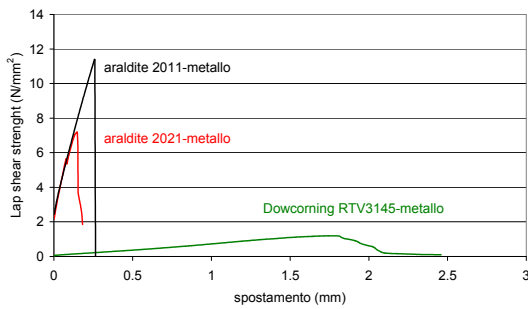


Figura 3a: Grafici tipo lap shear strength vs. spostamento (incollaggi su metallo).

Figure 3a: Typical lap shear strength vs. displacements behaviour of bonding on metal.

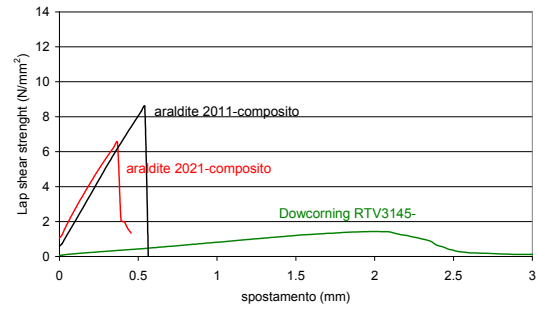


Figura 3b: Grafici tipo lap shear strength vs. spostamento (incollaggi su composito).

Figure 3b: Typical lap shear strength vs. displacements behaviour of bonding on composite.

Incollaggio	Carico di rottura	Tensione di rottura	Tipo di rottura
	KN	N/mm <sup>2</sup>	
Metallo- 2011	3.8-4.7	10.5-13.4	Da adesiva a coesiva
Metallo 2021	2-2.8	7.2-8.5	adesiva
Metallo Dow Corning	0.27-0.34	0.9-1.2	adesiva
Composito 2011	2.4-5.4	6.2-15	Da adesiva a coesiva
Composito 2021	2.1-3.6	6.5-9.2	adesiva
Composito Dow Corning	0.37-0.5	1.02-1.34	adesiva

Tabella 2: Risultati dei Lap shear test.

Table 2: Lap shear test results.

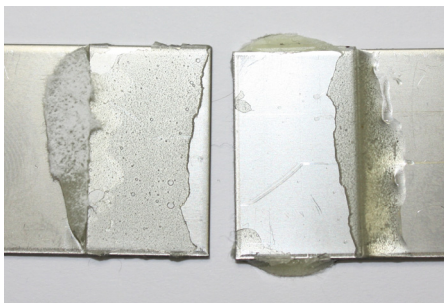


Figura 4: Cedimento della colla Araldite 2011.

Figure 4: Araldite 2011 breaking surface.

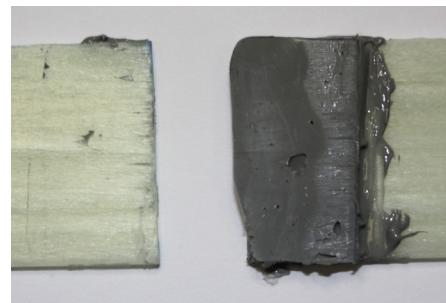


Figura 5: Cedimento della colla Dowcorning RTV 3145.

Figure 5: Dowcorning RTV 3145 breaking surface.



### Caratterizzazione dei substrati

Per avere un riferimento su come si comportano i supporti, su cui le fibre sono state incollate, sono state effettuate delle prove di trazione su provini ricavati per lavorazione meccanica, dal nastro di acciaio armonico (Fig. 6) e dalla piastra di composito (Fig. 7, trazione nel senso delle fibre, interposizione di tab in materiale metallico sugli afferraggi).

L'acciaio armonico presenta un carico di rottura di circa 2000 MPa, un carico di snervamento di circa 1800 MPa, un allungamento a rottura di circa 3.5 %.

Il materiale composito presenta una curva di trazione seghettata (Fig. 7). Tale comportamento è legato a fenomeni di delaminazione osservati durante la prova. I carichi massimi raggiunti sono compresi tra 650 e 750 MPa. La rottura finale in genere avviene all'interno dei tab di rinforzo.

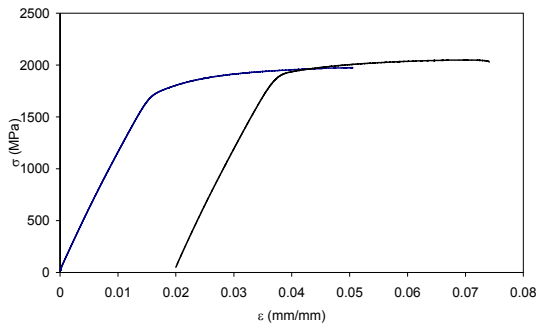


Figura 6: Curve di trazione del lamierino in acciaio armonico.

Figure 6: Armonic steel tensile curves.

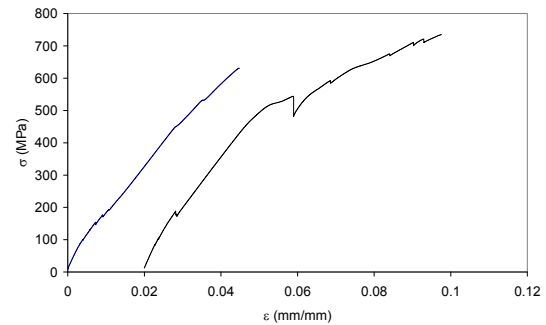


Figura 7: Curve di trazione del composito.

Figure 7: Composite tensile curves.

### Test con i sensori incollati con adesivo silconico

Come già accennato nel paragrafo precedente i provini 1-3 realizzati incollando la fibra sensorizzata su supporto metallico, a differenti distanze dal supporto, sono inizialmente stati sottoposti a test di trazione, seguendo una curva di carico molto lenta (0.5 mm/min) per una deformazione teorica compressiva del provino del 2%. La deformazione massima è stata mantenuta per alcuni minuti prima di scaricare il provino. I dati di deformazione totale dei provini sono ricavati dallo spostamento della traversa. I risultati sono illustrati in Fig. 8.

Come si può vedere già durante la fase di carico questo tipo di incollaggi non segue perfettamente lo spostamento della traversa. Inoltre le deformazioni misurate dai 3 sensori sono inferiori a quelle registrate dalla macchina di trazione. Questo comportamento va addebitato in parte al fatto che la deformazione totale misurata con lo spostamento della traversa non tiene conto della rigidità della macchina e di eventuali cedimenti degli afferraggi, peraltro osservati macroscopicamente nel corso della prova. Ciò può portare ad un certo scostamento dei valori della deformazione come misurati dalla macchina o dal sensore. In ogni caso la notevole differenza misurata va imputata anche all'eccessiva plasticità della colla, la quale assorbe in parte la deformazione prima di trasferirla al sensore. Da questa prova si nota inoltre che il livello di attenuazione del segnale aumenta al crescere della distanza tra la fibra ed il supporto metallico. Durante la fase di applicazione della deformazione massima si nota una diminuzione della deformazione applicata al sensore, indice di un rilassamento della colla attorno alla fibra.

Il test di trazione è stato ripetuto con le stesse modalità iniziali di applicazione del carico ma, mantenendo la deformazione finale applicata per un tempo maggiore, fig. 9. Per questi test sui provini 2 e 3 sono stati applicati degli estensimetri elettromeccanici. Il comportamento dei sensori è analogo a quello rilevato nel test precedentemente illustrato. La variazione di lunghezza d'onda del segnale segue male la curva di carico del provino ed inoltre il valore di deformazione misurato dagli FBG è inferiore a quello teoricamente applicato. La differenza tra deformazione misurata dalla macchina di trazione e quella misurata dagli FBG è superiore a quella rilevata nel test precedente. Inoltre l'attenuazione derivante dalla distanza tra sensore e supporto non segue più la sequenza logica rilevata in precedenza. Ciò è probabilmente dovuto a fenomeni di cedimento dell'interfaccia fibra ottica-adesivo avvenuti durante il primo test. Durante la fase di rilassamento il sensore misura una sensibile riduzione della deformazione applicata per tutta la durata di mantenimento della carico. Peraltro durante questa fase si misura anche una certa attenuazione del carico stesso.

Da questi test possiamo dedurre che adesivi a comportamento elastoplastico (bassi moduli elastici), come l'adesivo silconico testato, sono poco adatti per incollare i sensori sul supporto da monitorare, in quanto è difficile valutare l'effetto di attenuazione e di trasferimento della deformazione dal supporto stesso al sensore. Risulta anche che, durante

L'applicazione dei carichi, avvengono fenomeni di cedimento e/o di scorrimento tra colla e fibra ottica che rendono non ripetitivi i test.

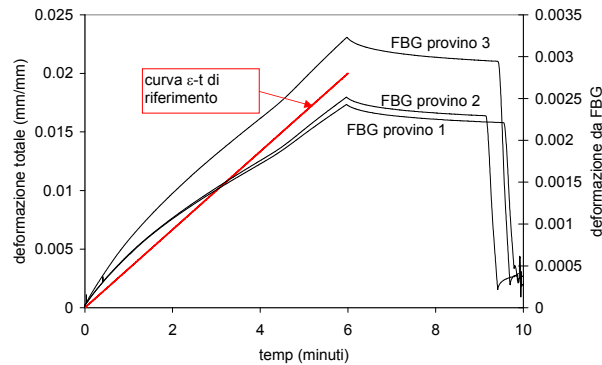


Figura 8: Incollaggio su metallo con adesivo siliconico prova di trazione semplice, confronto tra la deformazione totale e quella registrata dall'FBG.

Figure 8: Metal- silicon adhesive bonding, tensile test, comparison between total strain and FBG measured strain.

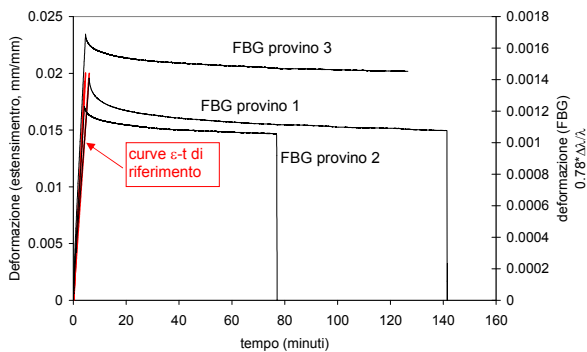


Figura 9a: Incollaggio su metallo con adesivo siliconico prova di trazione con rilassamento, confronto tra la deformazione totale e quella registrata dall'FBG.

Figure 9a: Metal-silicon adhesive bonding, tensile+relaxation test, comparison between total strain and FBG measured strain.

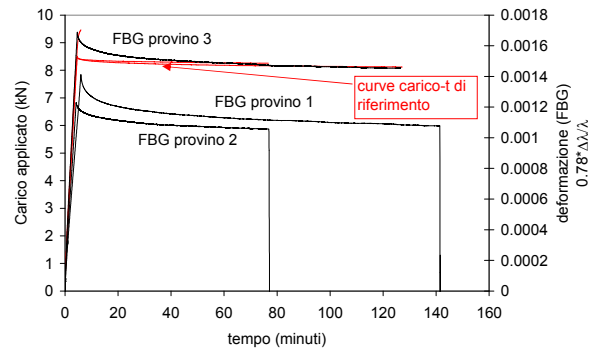


Figura 9b: Incollaggio su metallo con adesivo siliconico, prova di trazione con rilassamento, confronto tra il carico applicato totale e deformazione registrata dall'FBG.

Figure 9b: Metal-silicon adhesive bonding, tensile+relaxation test, comparison between applied load and FBG measured strain.

*Test con i sensori incollati con adesivo epossidico su supporto metallico.*

Questo incollaggio è stato sottoposto a trazione a velocità di applicazione del carico molto lenta fino ad una deformazione massima totale del 2 % e mantenimento di quest'ultima per circa 2 ore. A differenza di quanto verificato con i provini realizzati con adesivo siliconico, questo incollaggio segue fedelmente la fase iniziale di carico del provino. Come si vede dalla Fig. 10 le curve deformazione (da macchina) vs. tempo e deformazione (da FBG) vs. tempo risultano praticamente sovrapposte. In ogni caso si differenziano per il valore massimo raggiunto (il sensore legge una deformazione circa il 50% inferiore rispetto a quella misurata dallo spostamento della traversa). Questo è probabilmente dovuto al non poter tener conto della rigidità della macchina e dei fenomeni di slittamento del provino all'interno degli afferraggi. Durante la fase di mantenimento della deformazione (Fig. 11 a e b) si osserva un rilassamento sia nel carico che nel valore della deformazione misurata localmente dall'FBG. Macroscopicamente non si evidenziano cedimenti nella colla sia all'interfaccia supporto colla, che in quello colla sensore.

Da questi risultati sembra che una colla epossidica sensibilmente più rigida e resistente dell'adesivo siliconico sia in grado di trasferire il carico più efficacemente, dimostrandosi così un buon interfaccia tra supporto e sensore.

*Test con i sensori incollati con adesivo epossidico su supporto composito*

I provini utilizzati in questa fase si differenziano da quelli utilizzati precedentemente per la presenza di tabs metallici incollati sulle estremità per permettere un più efficace afferraggio. I test sono stati effettuati applicando il carico in tre step.





Come si vede dalla Fig. 12 il sensori seguono fedelmente l'andamento del carico monitorando anche il cedimenti istantanei derivanti da fenomeni di delaminazione osservati durante il test. Questi fenomeni vengono infatti rilevati contemporaneamente sia dai sensori della macchina di trazione che dagli FBG incollati. I valori misurati dall'FBG sono inferiori a quelli misurati dalla macchina di trazione, comportamento imputabile in questo caso anche al cedimento dell'incollaggio tra tab e composito. Durante le varie fasi di mantenimento del carico (figure 13 a e b) si registra come in precedenza osservato una riduzione della deformazione misurata dal sensore e del carico registrato dalla cella di carico.

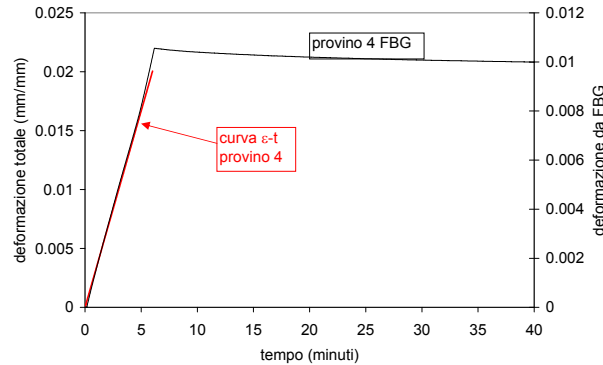


Figura 10: Incollaggio su metallo con colla epossidica confronto tra la deformazione totale e quella registrata dall'FBG.

Figure 10: Metal-epoxidic glue bonding, tensile + relaxation test comparison between total strain and FBG measured strain.

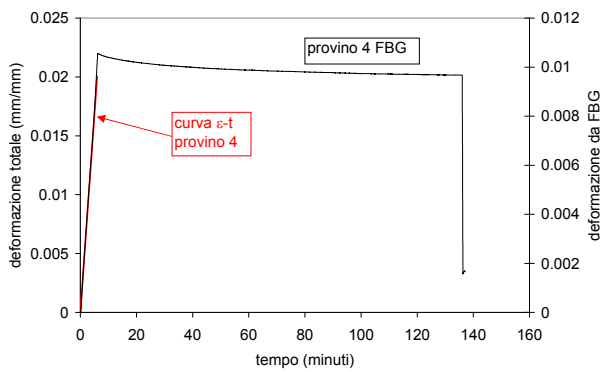


Figura 11a: Incollaggio su metallo con colla epossidica, confronto tra la deformazione totale e quella registrata dall'FBG.

Figure 11a: Metal-epoxidic glue bonding, tensile + relaxation test comparison between total strain and FBG measured strain

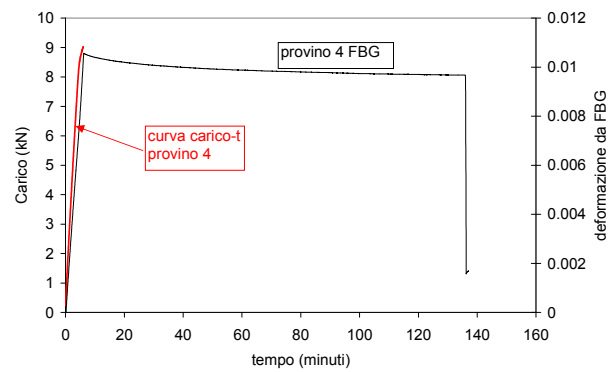


Figura 11b: Incollaggio su metallo con colla epossidica, confronto tra il carico applicato totale e quella registrata dall'FBG

Figure 11b: Metal-epoxidic glue bonding, tensile + relaxation test comparison between applied load and FBG measured strain

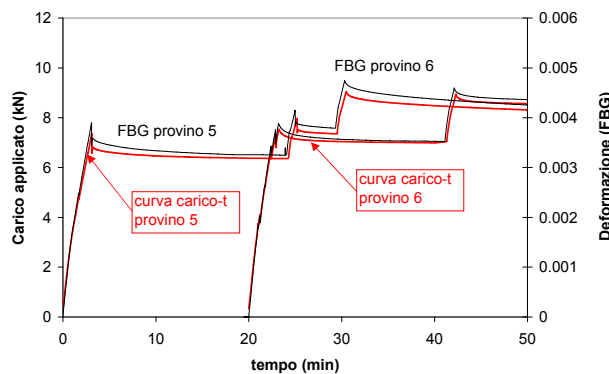


Figura 12: Incollaggio su composito con colla epossidica confronto tra il carico applicato e la deformazione registrata dall'FBG.

Figure 12: Composite-epoxidic glue bonding comparison between applied load and FBG measured strain.

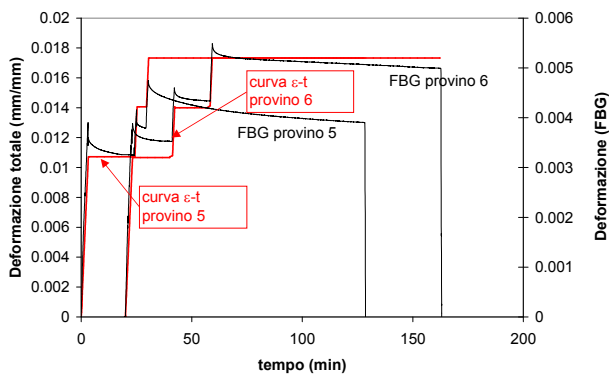


Figura 13a: Incollaggio su composito con colla epossidica, confronto tra la deformazione totale e quella registrata dall'FBG.

Figure 13a: Composite- epoxidic glue bonding comparison between total strain and FBG measured strain.

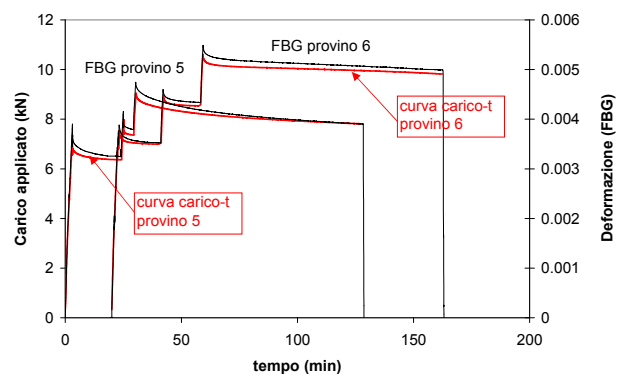


Figura 13b: Incollaggio su composito con colla epossidica, confronto tra il carico applicato totale e quella registrata dall'FBG.

Figure 13b: Composite- epoxidic glue bonding comparison between applied load and FBG measured strain.

## CONCLUSIONI

Il presente lavoro è uno studio preliminare per identificare la possibilità di adoperare colle commerciali, di diversa natura chimica, per incollare sensori in fibra ottica basati sulla tecnologia FBG su vari supporti metallici e non metallici, con lo scopo finale di realizzare sensori di deformazione estremamente sensibili per il monitoraggio strutturale. Le colle studiate sono sia le classiche colle epossidiche bi-componenti rigide e resistenti, sia degli adesivi siliconici sigillanti, il cui comportamento è prevalentemente elastoplastico se confrontato con i precedenti. Questi ultimi sono stati studiati per valutare la possibilità di realizzare una attenuazione controllata della deformazione e permettere quindi un monitoraggio di deformazioni anche elevate con questa tipologia di sensori.

Dai risultati ottenuti emerge che tendenzialmente le colle epossidiche riescono a garantire un corretto trasferimento della deformazione dal supporto di incollaggio al sensore FBG.

Al contrario l'adesivo siliconico impiegato non dà garanzie né di un corretto trasferimento della deformazione dal supporto al sensore, né di tenuta dell'interfaccia colla-fibra che sembra subire cedimenti e/o scorrimenti sin dalla prima applicazione del carico.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] K.O Hill, G. Meltz, *Journal of Lightwave Technology*, 15 (1997)
- [2] Bennion, J.A.R. Williams, L. Zhang, K. Sugden, N.J. Doran, *Optical and Quantum Electronics*, 28 (1996)
- [3] A.Brotzu, M.A. Caponero, D. Colonna, F.Felli, N.Gabarro G. Maddaluno, In: *European Workshop "Structural Health Monitoring"*, (2006) 922.
- [4] A.L. Kalamakarov , K.Q. Liu, D.O. Mac Donal, *Composite part B Engineering*, 29 (1998) 21.
- [5] A.L. Kalamakarov, D.O. Mac Donal, S.B. Fitzgerald, A. V. Georgiades, *Composite Structures*, 50(1) (2000) 69.
- [6] C.E Bakis, A. Nanni, J.A. Terosky, S.W. Koehler, *Composite Science and Technology*, 61(6) (2001) 815.
- [7] N.F. Grace, W.F. Ragheb, G. Abdel Sayed, *Composite Structures*, 64(3-4) (2004) 521.
- [8] P. Corvaglia, O Manni, A. Largo, M.A. Caponero, *Compositi*, II(2) (2007) 8.
- [9] C. Lupi, F. Felli, A. Brotzu, M.A. caponero, A. Paolozzi, *IEEE Sensor Journal*, 8(7) (2008) 1299.
- [10] F.Felli, A. Brotzu, In: *Workshop IGF "Problematiche di Frattura nei materiali per l'Ingegneria"*, (2010) 193.
- [11] A. Brotzu, F.Felli, L. Fiori, M.A. Caponero, *Smart Structures and Systems*, 4(4) (2008) 439.
- [12] A. Dasgupta, J.S. Sirkis, *AIAA J.30* , (1992) 1337.
- [13] L. D'Acquisto, F. Pasta, In: *XXXI Convegno Nazionale dell'AIAS*, (2002).
- [14] M.J. Le Blanc, *Smart Materials and Structures*, 14(2005) 637.
- [15] M.J. Le Blanc, *Smart Materials and Structures*, 14(2005) 647.