

Fibre ottiche segmentate

TRA LE ULTIME FRONTIERE IN FATTO DI MONITORAGGIO, APPROFONDIAMO IL SISTEMA SVILUPPATO DALLA START-UP SECTA MONITORING BASATO SULLA TECNOLOGIA FSI (FIBER SEGMENT INTERFEROMETRY), CHE, IN CONTINUITÀ E TEMPO REALE, "FOTOGRAFA" LA VARIAZIONE DI FORMA (3D SHAPE SENSING) DI STRUTTURE, PONTI E GALLERIE. PROPRIO IN AMBIENTE UNDERGROUND SONO IN CORSO ALCUNE INTERESSANTI SPERIMENTAZIONI A GUIDA ANAS.

Luca Cedrone
Responsabile Unità Gallerie
Anas SpA (Gruppo FS Italiano)

Giuseppe Troccoli
CEO SECTA Monitoring



Attraverso un'importante fase di ricerca, condotta da ricercatori, esperti di ottica e optoelettronica, fisici, meccanici, nonché ingegneri elettronici e civili, in ambito universitario, con originarie applicazioni nel mondo automotive e in particolare della F1, si è arrivati all'introduzione sui mercati di un'innovativa metodologia di misura e monitoraggio basata su sensori in fibra ottica a tecnologia FSI (*Fiber Segment Interferometry*). Il principio di funzionamento dei sensori FSI si basa sull'illuminazione a mezzo di raggio luminoso, generato da una centralina optoelettronica (PCU), della fibra ottica lungo la quale sono iscritti dei segmenti. Poiché la luce laser che si propaga lungo la fibra ottica viene influenzata dalle condizioni in cui si trova la fibra stessa, misurando le variazioni delle caratteristiche ottiche (intensità, distorsione, attenuazione) di una fibra solida all'oggetto da monitorare, è possibile ricostruire con estrema accuratezza le condizioni a cui è sottoposta la struttura sotto osservazione e i conseguenti effetti (per esempio deformazione, temperatura, vibrazione, spostamento, pressione, variazione geometrica 3D). È proprio dall'interrogazione dei segmenti diffrattivi che deriva il nome della tecnologia FSI (*Fiber Segment Interferometry*) il cui principio fisico è soggetto a brevetto, detenuto dalla società di diritto inglese Nova Scientia Ltd, spin out della Cranfield University di Oxford. Risultano proprietà intellettuale della sopracitata Nova Scientia Ltd finanche i sistemi di scrittura delle fibre e gli interrogatori laser, che consentono di creare dei veri

e propri analizzatori di forma: ovvero delle fibre senzienti che operano su segmenti e non su semplici punti discreti. Al fine di approcciarci con la necessaria consapevolezza ai vantaggi e all'innovazione del sistema basato su tecnologia FSI, occorre essere consapevoli che le misurazioni delle fibre ottiche oggi presenti sul mercato utilizzano la tecnologia FBG, ovvero *Fiber Bragg Grating*. Con tale tecnologia, vengono rilevate grandezze fisiche in punti discreti le quali, attraverso software di calcolo, vengono poi interpolate per offrire ai tecnici e ai progettisti una visione d'insieme relativamente alle deformazioni, agli stress tensionali, alle pressioni e ai delta termici. La tecnologia esistente necessita, pertanto, di una "depurazione" dei fenomeni termici, in termini di micro-strain, da quelle che sono le sollecitazioni dovute all'applicazione dei carichi (siano essi statici o dinamici) sulle strutture e, conseguentemente, sulle fibre ottiche ad esse applicate. Le misurazioni della tecnologia FSI sono invece totalmente indipendenti da fenomeni e variazioni termiche, il che comporta un'evidenza dei dati (tab. 1).

Segmenti consecutivi di fibra sono separati da nodi debolmente riflettenti che fungono da sorgenti di segnale interferometrico. Di conseguenza, i segnali di fase provenienti da due riflettori vicini possono essere sottratti, determinando una misurazione del percorso ottico OPD. Pertanto, qualsiasi effetto fisico che modifica l'OPD (*Optical Path Difference*), come ad esempio deformazione e temperatura, può essere determinato e misurato.

1. PCU - Unità d'interrogazione dei sensori FSI

2. Principio di funzionamento



Dalla TAB. 1 (che compara le caratteristiche metrologiche e operative dei sensori in fibra ottica FSI con quelle dei sensori FBG e degli estensimetri a resistenza) si evince che i sensori FSI sono in grado di campionare ad altissima frequenza - quindi impiegabili per analisi modali complesse di validazione dei modelli analitici (FEM) - deformazioni, variazioni di temperatura e forma 2D e 3D, vibrazioni, nonché grandezze fisiche indirette quali pressione, umidità e peso. Un'altra caratteristica metrologica distintiva della tecnologia FSI è la disposizione continua e non discreta dei sensori che consente una misura "distribuita" ad alta risoluzione spaziale degli effetti della sollecitazione termica o meccanica sull'elemento strumentato, con restituzione in tempo reale della geometria risultante, senza ricorrere a interpolazioni dei dati discreti e a vantaggio di precisione del risultato di misura.

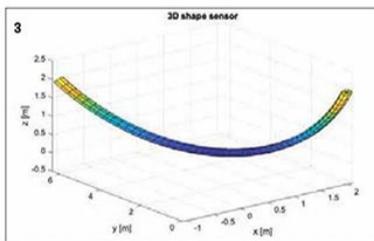
TAB. 1 COMPARAZIONE TRA TECNOLOGIE

Funzionalità	Estensimetri elettrici a resistenza	Sensori in fibra ottica FBG	Sensori in fibra ottica FSI
Risoluzione sensore	10 $\mu\epsilon$	1 $\mu\epsilon$	20 $n\epsilon$
Disposizione sensori	Discreta	Discreta	Continua
Intervallo termico operativo	-150°C ÷ +250°C	-180°C ÷ +600°C	-180°C ÷ +600°C
Immunità elettromagnetica EMI	NO	SI	SI
Architettura multiplexing	NO	SI	SI
Operatività con umidità 100%	NO	SI	SI
Frequenza di Campionamento	20 kHz	2.5 kHz	1 Mhz
Monitoraggio a lunga distanza	NO	SI (\leq km)	SI (\leq km)
Monitoraggio di forma 3D (3D Shape Sensing)	NO	NO	SI
Ciclo di vita	1.000 < 10.000.000 cicli	25 anni	25 anni
Sostituzione in caso di malfunzionamento	SI	SI	SI

Attraverso la misura del cambio di fase è dunque possibile quantificare la deformazione; inoltre, poiché l'FSI non è puntuale, ma continuo, esso rappresenta l'integrale della misura interessata a ridosso del segmento: il modo perfetto per misurare in real time la variazione di forma in 3D.

Start-up innovativa internazionale

Dalla collaborazione di svariati professionisti, esperti ciascuno in settori specialistici, è nata l'esigenza di creare una start up innovativa che potesse rispondere compiutamente a diversi problemi ingegneristici in ambito civile, fluidodinamico, dell'automotive e della meccanica. Tematiche entusiasmanti, legate non solo al monitoraggio di grandi e complesse strutture, ma anche alla fase di realizzazione, all'entrata in esercizio e alle operazioni periodiche di manutenzione. Clive Candler, CEO della già citata Nova Scienza, Alberto Verzeletti, esperto e ricercatore di meccanica, proveniente dal mondo della Mercedes e della Formula 1, Valerio Vezzari, esperto di metrologia e CEO di Global Sensing, Giuseppe Troccoli, socio della IN.CO. Ingegneri consulenti, nonché CEO della IN.CO Smart Technologies, con il supporto di ricercatori, esperti e specialisti in varie discipline, hanno dato vita a una grande avventura scientifica e applicativa a supporto di enti pubblici, concessionari di reti di trasporto, realtà imprenditoriali, produttori di componenti per le costruzioni civili ed il mondo dell'industria. La start-up innovativa prende il nome di SECTA Monitoring Srl derivante dal latino "secta", nominativo femminile singolare del participio perfetto di "secō" (dividere), per richiamare la segmentazione delle fibre FSI. Una struttura con solide basi di ricerca e con grande consapevolezza delle problematiche, ad oggi irrisolte, nel settore delle misurazioni, del monitoraggio, delle mega constructions e con l'ambizione di avviare nei prossimi mesi importanti partnership relativamente al data management, alle analisi predittive, all'intelligenza artificiale e del cloud computing.



Ricerca, applicazione e attenzione alla manutenzione

Lo scenario aperto sulle applicazioni è concretamente immenso. A partire da quelle riguardanti i settori aeronautico e aerospaziale: singolari ad esempio sono le misurazioni in real time effettuate sulle pale di un elicottero in collaborazione con Airbus, ove il comportamento, gli spostamenti, la analisi tensio-deformative vengono offerte già durante il volo al pilota e al suo equipaggio, finché all'individuazione e localizzazione di perdite di fluidi da condotte e serbatoi, utilissima anche nel settore Oil & Gas. Ma si riscontrano applicazioni anche nel settore del racing, della nautica, del controllo di grandi mezzi da costruzione e dei materiali sottoposti a cicli di fatica o a grandi stress tensionali.

Ma ciò che sicuramente più ci interessa in questa sede è la potenzialità offerta nell'ambito dell'ormai dilagante tematica del monitoraggio di ponti e viadotti, del controllo statico delle gallerie, della staticità delle sottostrutture o di singole parti essenziali del processo costruttivo (cavi di precompressione, conci prefabbricati, stralli, giunti, fondazioni profonde, ancoraggi in acciaio e in VTR, appoggi, attrezzature di varo e di sollevamento). Insomma, attraverso questa tecnologia si apre uno scenario praticamente infinito di applicazioni che non interessano solo la fase delle nuove costruzioni, nel campo infrastrutturale, ma anche quella della manuten-

4
SECTA
MONITORING



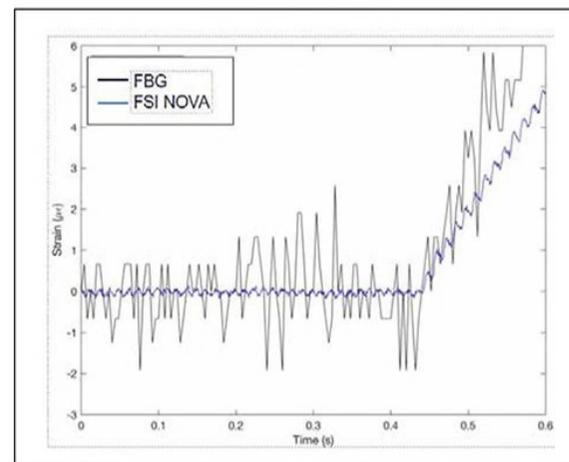
3 Shape sensing - Variazione di forma tridimensionale di un sensore in fibra ottica FSI

4. Logo SECTA Monitoring

5. Esempi di applicazioni industriali

6. Esempi di applicazioni per il monitoraggio di ponti e viadotti

7. Test comparativo di misura di deformazione eseguito in laboratorio con macchina di trazione certificata (asse Y = deformazione espressa in microstrain [$\mu\epsilon$]; asse X = tempo espresso in secondi [s]) tra sensori in fibra ottica FBG e FSI dove è ben evidenziata l'elevata accuratezza e bassa dispersione della misura della deformazione ottenuta con il sensore FSI



zione. Attraverso molteplici soluzioni, i sensori in fibra ottica di SECTA Monitoring verranno annessi, solidarizzati o connessi a strutture o parti di esse, interrogati in continuo oppure on demand da PCU, appositamente progettati e realizzati, e infine i dati saranno resi disponibili in cloud o su server dedicati anche attraverso i principali gestori di data management in IoT. Ma la ricerca e gli studi di questa start up proseguono verso nuove e specifiche tematiche produttive (inclinometri biassiali, fessurimetri 3D in fibra, pese dinamiche WIM, leakage detector per condotte di fluidi, misurazioni e sistemi di early warning in ambiente ATEX o realizzati con un protection grade IP67). Sono solo alcuni spunti delle ricerche applicative già disponibili e che investono in modo determinante perfino i settori medici, bioingegneristici e delle indagini non invasive. La prerogativa di poter studiare,

testare e collaudare anche materiali e strutture composite offre uno scenario multitasking a 360°, per il quale SECTA Monitoring si propone quale partner imprescindibile.

Monitoraggio di ponti e viadotti

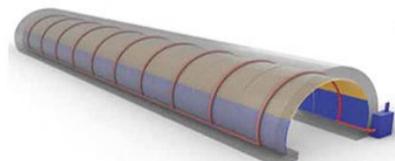
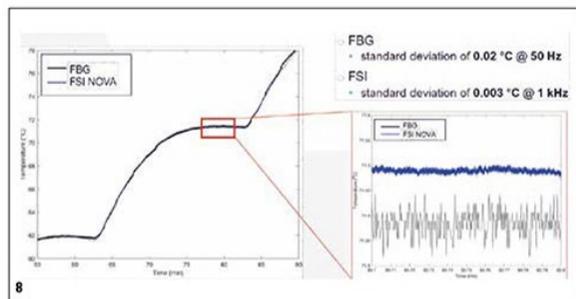
Senza dubbio, il monitoraggio di ponti e viadotti è il tema principe che da qualche anno, dopo i tristi e ripetuti eventi di crolli e danneggiamenti, ha mosso freneticamente il mercato. Sensori di ogni genere, accelerometri, strain gauge e inclinometri più o meno evoluti e precisi, misurazioni ottiche con interferometria SAR satellitare o terrestre, processi di identificazione e caratterizzazione dinamica, offrono soluzioni all'avanguardia, precise ma spesso incomplete, costose e di complessa integrazione ed elaborazione. L'FSI proposta e utilizzata da SECTA Monitoring vuole superare le approssimazioni, i limiti, le complessità applicative e offrire una soluzione precisa e affidabile immediatamente spendibile e integrabile da parte di ogni progettista. Basterebbe solo comparare i limiti della tecnologia FBG alle caratteristiche del sistema FSI per comprendere quanto più agevole siano le verifiche sui modi di vibrare, la precisione delle misurazioni dei microstrain, la sensibilità termica, l'assenza di necessità di calibrazione periodica, l'ininfluenza di misurazione in ambienti inquinati magneticamente, l'utilizzazione delle fibre in ambiente marino e comunque subacqueo. I sensori FSI possono essere utilizzati non solo nella fase di gestione delle opere d'arte indagando spostamenti, sollecitazioni, modi di vibrare, fasi di collaudo, analisi di comportamento a fatica e determinazione della vita utile residua ma, risultano di grande interesse anche nelle fasi di varo dei ponti, nell'analisi del comportamento della struttura e dei sistemi di costruzione nelle fasi montaggio ed avanzamento, nelle fasi di demolizione selettiva di opere d'arte e nel comportamento globale della struttura in tali delicatissimi momenti allorquando risultati sottoposti a sollecitazioni esterne, quali terremoti e pressione del vento.

Controllo attivo di gallerie e tunnel

Certamente meno esplorato, se non nelle fasi di costruzione e di avanzamento di nuove gallerie, è il settore dei mo-

monitoraggio delle opere in sotterraneo (tunnel scavati in tradizionale o con TBM, stazioni di metropolitane e ferroviarie interrato, realizzazioni di canne in adiacenza, allargamento della sezione di gallerie stradali, valutazione della bontà degli interventi di risanamento strutturale, valutazione dell'interferenza e coazione tra rivestimenti di prima fase e definitivi o semplicemente monitoraggio delle condizioni di staticità dei tunnel in esercizio), un campo ad oggi poco attenzionato per quanto concerne la manutenzione delle infrastrutture esistenti.

Su iniziativa della Direzione Operation e Coordinamento Territoriale di Anas SpA (Gruppo FS Italiane) e alla sua Unità Gallerie, la tecnologia FSI è oggi in via di applicazione, opportunamente calibrata con trasduttori dedicati per la verifica delle deformazioni 2D nei piani trasversali e delle deformazioni longitudinali assiali di alcune gallerie in via di manutenzione straordinaria. La tecnologia proposta da SECTA Monitoring non si presta soltanto a un'analisi delle condizioni di sicurezza dei tunnel stradali e ferroviari, del loro comportamento in situazioni delicate e/o critiche, si pensi alle gallerie parietali, superficiali, a quelle immerse o attraversate da mobilitazioni di versanti franosi, intercettanti faglie attive o corpi idrici sotterranei soggette a variazioni significative dell'intorno geomeccanico o dei carichi in superficie, ma esplora e documenta, attraverso l'utilizzazione di *innovative centine strumentate*, annegate nel rivestimento provvisorio, l'evoluzione delle fasi di deformazioni del rivestimento provvisorio con conseguente carico del rivestimento definitivo. In tal modo sarà possibile sperimentare ciò che sino ad ora non è mai stato attenzionato e conosciuto e che potrebbe certamente aprire il varco a nuovi principi di dimensionamento delle gallerie o a costruzioni più consapevoli nei confronti della variabile tempo. Nel contempo, durante le fasi di avanzamento, le centine strumentate forniranno importanti informazioni sulla convergenza del cavo, in stretta connessione ai fenomeni di estrusione del fronte. Indiscutibili saranno i dati e le indicazioni relativamente allo stato di detensionamento dell'intorno del cavo e della sicurezza delle lavorazioni in avanzamento.



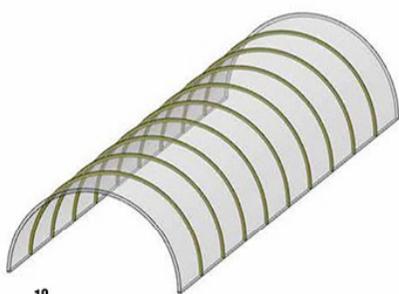
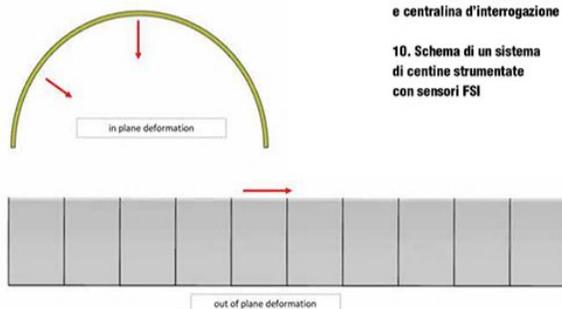
Osservazioni conclusive

La nuova era della manutenzione e della realizzazione di nuove infrastrutture, porterà indiscutibilmente progettisti e gestori a impiegare sistemi innovativi e tecnologie efficienti e all'avanguardia per il controllo e la gestione di tutte le componenti. I risultati ottenuti da sistemi innovativi come quelli basati su tecnologia FSI saranno determinanti per la fruizione e alimentazione della piattaforma AINOP (Archivio Informatico delle Opere Pubbliche), la quale richiederà sempre più un flusso essenziale di dati, condivisi in rete. Tutto ciò consentirà, sempre più, alle Amministrazioni una corretta pianificazione e programmazione dei budget. Inoltre, consentirà la valutazione degli asset e degli assessment di opere d'arte, al fine di procedere a una valutazione ponderata dei costi da sostenere durante operazioni di project financing o di affidamento in concessione. ■■

8. Test comparativo di misura della temperatura eseguito in laboratorio con una termocoppia certificata (asse Y - temperatura espressa in gradi Celsius [°C]; asse X - tempo espresso in minuti primi [min]) tra sensori in fibra ottica FBG e FSI, dove è ben evidenziata l'elevata accuratezza e la linearità della misura della temperatura

9. Sistema di monitoraggio composto da settori con sensori FSI, dorsali di servizio in fibra ottica monomodale e centralina d'interrogazione

10. Schema di un sistema di centine strumentate con sensori FSI



10

GAMMA COMPATTI

TF 30.9/33.7 G

- Portate da 3.000 a 3.300 kg.
- Altezze di sollevamento fino a 8,6 m.
- Pompa idraulica da 98 l/min
- Trasmissione EPD con velocità massima di 40 km/h.
- Motore Stage V da 55,4 kW/75,1 CV.



MASSIME PRESTAZIONI, MINIMI INGOMBRI

I telescopici COMPATTI Merlo sono sollevatori tuttofare per eccellenza, in grado di trovare impiego sia in ambito agricolo sia in campo edile e industriale, senza tralasciare contesti più particolari come riciclaggio, municipalità e miniere. La gamma, caratterizzata da dimensioni ridotte e prestazioni di alto profilo nel totale comfort della cabina più ampia della categoria, è composta da tre modelli che si differenziano per allestimento e dimensioni.

Il P27.6 ha una larghezza di 1,86 metri e un'altezza di 1,96 metri: offre una maneggevolezza e un'accessibilità impareggiabili, arrivando a sollevare 2.700 kg e raggiungendo altezze di sollevamento di 5,9 metri. I modelli TF30.9 e TF33.7 rappresentano il compromesso ideale tra prestazioni e dimensioni: la capacità di sollevamento cresce fino a 3.300 kg con altezza di sollevamento fino a 8,6 m pur mantenendo ingombri ridotti grazie a un mirato studio ingegneristico.