Quaderni Scientifici di Ing. Diego Dell'Erba

Pubblicato il 12.agosto.2011



Monitoraggio Strutturale con Fibre Ottiche dell'Edifico Chiesa di Santa Maria Goretti a Villalba di Guidonia Comune di Guidonia – (Roma)

00172 Roma (Italy) -- Via delle Ciliegie 141/B
Tel. +39-6-64811706 r.a. Fax. 178.228.6668
1001 Manila (Filippine) Makati, Remedios, Bldg, suite, 896
ingdiego@ingdiegodellerba.it
www.ingdiegodellerba.it

Il Monitoraggio strutturale con le fibre Ottiche

1.Introduzione

La sicurezza delle opere del genio civile richiede un controllo periodico delle infrastrutture. I metodi attualmente utilizzati, quali le ispezioni visive o le misure per triangolazione sono spesso complicati nella messa in opera e richiedono la presenza di uno o più operatori specializzati. La complessità ed i costi che ne risultano sono tali da limitare la frequenza delle misure.

La risoluzione spaziale è in generale ridotta e solo la presenza di gravi anomalie nel comportamento globale incita a proseguire l'analisi con maggiore dettaglio e precisione. Esiste dunque un bisogno reale, su scala internazionale, di strumenti che permettano la sorveglianza automatica e permanente all'interno delle strutture stesse, fornendo risultati di grande precisione e buona risoluzione spaziale.

In quest'ottica, il concetto di struttura intelligente (dall'inglese smart structure) ha già provato la sua efficacia in diversi campi dell'ingegneria, in particolare in aeronautica e nello studio dei materiali compositi.

Queste strutture sono provviste di una rete interna di sensori a fibre ottiche che permettono la sorveglianza di diversi parametri, critici per la sicurezza ed utili per una pianificazione efficace degli interventi di manutenzione. Si pensi in particolare alle deformazioni, temperature, pressioni, penetrazioni di agenti chimici nocivi, ecc.

Il monitoraggio strutturale ha assunto negli ultimi anni una sempre maggiore importanza anche in virtu' delle sopravvenute disposizioni normative (Norme Tecniche per le Costruzioni e Ordinanza P.C.M n° 3274 del 20 Marzo 2003 e successive modifiche). Il monitoraggio sottintende un’operazione di controllo e di sorveglianza in tempo reale di un fenomeno attraverso la misura di parametri fisico-meccanici che descrivono l’interazione tra l’ambiente e le variabili di stato dell’oggetto che si intende studiare.

La presenza di un quadro fessurativo in una struttura (più o meno articolato) da origine, indubbiamente, ad una possibile diminuzione nel tempo dei margini di sicurezza globali o locali dovuti a fenomeni fisiologici o patologici.

Quando il quadro fessurativo di una struttura è in evoluzione occorre predisporre apposito monitoraggio con indagini deformometriche dei movimenti attivi e delle rotazioni per

delineare l'origine, l'entità e le leggi evolutive del fenomeno, allo scopo di definire il tipo di intervento e di controllarne gli esiti. Il monitoraggio strutturale rappresenta la forma piu' avanzata di simbiosi tra conoscenza teorica dei fenomeni da una parte ed utilizzo di tecniche di misura, di registrazione, di trasmissione e di elaborazione dei segnali, dall'altra. Il monitoraggio oggi è l'elemento cardine di una nuova cultura che si potrebbe definire dello **"sperimentare per conoscere"** che si sta affiancando alla cultura tradizionale del **"conoscere per progettare"** che è propria dell'ingegnere.

Il continuo deterioramento, rilevato nelle strutture in c.a. negli ultimi anni, ha favorito lo sviluppo di tecniche di controllo di tipo NDT. Il controllo è, oggi, inteso come un mezzo con cui è possibile valutare l'affidabilità dei materiali ed inoltre verificare l'evoluzione, in termini di spostamento, dei quadri fessurativi al fine di prevedere eventi catastrofici [6]. In particolare, le esigenze emerse in campo ingegneristico riguardano strutture esistenti sulle quali è necessario identificare i reali coefficienti di sicurezza attraverso la conoscenza dei materiali o mediante il controllo degli spostamenti in opera, ma anche le strutture di nuova realizzazione dove è opportuno predisporre quanto necessario per verificare periodicamente lo stato di efficienza sia strutturale che materiale. Si intrecciano quindi esigenze di controllo locale con esigenze di controllo e monitoraggio globale che oggi vengono soddisfatte attraverso l'uso di metodologie NDT principalmente orientate all'edificato esistente. In letteratura sono disponibili tecniche e metodologie sperimentali basate sul controllo dei materiali intese sia come mezzo per la valutazione delle caratteristiche meccaniche, sia come mezzo di controllo del livello di conservazione degli acciai. Inoltre, diverse sono le tecniche di monitoraggio utilizzate per gli edifici soggetti a dissesto, alcune tecnicamente avanzate, ma comunque provenienti principalmente dal campo dei controlli su prototipi effettuati in laboratorio.

E' difficile, oggi, disporre di tecniche che permettono di controllare le membrature simultaneamente dall'interno e dall'esterno, ossia, di tecniche che è possibile pensare di utilizzare come sistema residente in una struttura e che possa rappresentare un ottimo sistema a supporto, per l'intera durata della vita utile dell'opera. Sicuramente una delle metodologie di controllo più vicine a quanto su esposto è la tecnica a fibre ottiche.

Infatti, tra le tecniche di monitoraggio non distruttive, negli ultimi anni, hanno avuto notevole sviluppo i sensori a fibra ottica con i quali si può eseguire sia un monitoraggio

strutturale, inteso come controllo di spostamenti e deformazioni di membrature portanti, sia eseguire un controllo sul deterioramento dei materiali.

2. Sensori a Fibra Ottica

Esiste una grande varietà di sensori a fibra ottica adatti al monitoraggio strutturale. Questi sensori sono stati sviluppati negli ultimi 20 anni in ambito accademico ed industriale.

Diversamente da quanto avviene negli Stati Uniti dove l'attenzione é rivolta principalmente ai sensori di deformazione locali, in Europa si assiste ad una maggiore diversificazione delle tecniche utilizzate e dei campi d'applicazione.

Il sistema di monitoraggio a fibre ottiche, presenta dei vantaggi importanti rispetto ai metodi di misura più convenzionali.

Tra questi citiamo il loro basso costo, la vasta gamma di parametri misurabili, l'insensibilità ai campi elettromagnetici (linee ad alta tensione, treni, temporali) ed alla corrosione, le loro dimensioni ridotte, la loro flessibilità d'impiego e la grande densità d'informazione che possono fornire.

Questa straordinaria tecnologia applicata sulla struttura, consiste in una serie di sensori, che vengono saldamente fissati alle barre delle armature all'interno degli elementi strutturali. In una struttura, la misura delle variazioni nel tempo delle caratteristiche, sia della risposta statica, sia della risposta dinamica, può altrettanto validamente essere utilizzata in sistemi di monitoraggio per il rilevamento di stati di danno.

I sensori in fibra ottica, impiegati da vari anni per la il monitoraggio strutturale, hanno dimostrato ottime caratteristiche di sensibilità e stabilità delle misure nel tempo, come pure di durata di vita.

In questo panoramica ci concentreremo sulle tipologie di sensori disponibili su scala industriale o almeno con test avanzati in campo. La seguente tabella riassume le principali tecnologie di sensori a fibre ottiche che verranno discusse nei prossimi capitoli.

	Parametri misurati	Aziende e istituti attivi (selezione)
SOFO	Spostamento, deformazione, inclinazione	SMARTEC, IMAC-EPFL (Svizzera)
Microbending	Spostamento	Osmos (Francia)
Bragg gratings	Deformazione, spostamento, temperatura, pressione	SMARTEC (Svizzera) Micron Optics (USA) FOS&S (Belgio) AOS (Germania) LETI (Francia) EMPA (Svizzera) CiDRA (USA) Blue Road Research (USA) E molti altri…
Fabry-Perot	Deformazione, temperatura, pressione	Fiso, Rocktest (Canada) Luna Innovations (USA) BAM (Germania)
Raman	Temperatura distribuita	SENSA/Schlumberger (UK/USA) Sumitomo (Giappone)
Brillouin	Temperatura e deformazione distribuite	Omnisens, MET-EPFL, SMARTEC (Svizzera) ANDO (Giappone)

Tali sensori possono essere facilmente installati su qualsiasi tipo di superficie, annegati nel calcestruzzo con la possibilità di monitorare le deformazioni subito dopo il getto e a lungo termine. Costituiscono, inoltre, la scelta ideale per molte applicazioni essendo facili da maneggiare, dielettrici, immuni da disturbi elettromagnetici ed in grado di rilevare deformazioni molto piccole con elevata precisione (2 micron indipendentemente dalla lunghezza della base di misura) per lunghi periodi di osservazione. Le fibre ottiche sfruttano i principi dell'ottica ondulatoria e con esse si effettuano le misurazioni attraverso le proprietà della luce. Inoltre consentono di creare, all'interno delle strutture, delle reti neurali che rilevano e trasportano i dati alle unità di lettura e di decodifica facendo, delle strutture stesse, le cosiddette "smart structures". Nel presente lavoro verrà illustrata la metodologia di controllo a fibre ottiche come indispensabile strumento per l'identificazione

di dati finalizzati alla valutazione di consistenza degli edifici in c.a. Attraverso una campagna sperimentale è stata verificata la possibilità di eseguire misure di deformazione su elementi portanti comparando le letture ottenute dai sensori interni alle membrature con le deformazioni rilevate posizionando i sensori all'esterno. Pertanto è stata valutata la possibilità di utilizzare la tecnica come sistema di controllo sull'esistente (sensore esterno) e sull'edificato di nuova realizzazione (sensore interno). Inoltre, la verifica della bontà delle misure ottenute è stata altresì effettuata confrontando questa metodologia con quelle utilizzate con sistemi tradizionali su basi di misura identiche. E' stato, altresì, dimostrato come il sensore a fibra ottica si adatti ottimamente alle escursioni termiche.

Una tecnica innovativa per il controllo di strutture attraverso misure di spostamenti si basa sull'utilizzo dei sensori a fibra ottica [7]. Questa tecnica offre la possibilità di controllare le strutture, in modo continuo e automatico, direttamente dall'interno. Nasce così il concetto di struttura intelligente (dall'inglese smart structure). I sensori a fibra ottica sono strumentazioni che, sfruttando i principi di ottica ondulatoria, adottano per le misurazioni non più le proprietà della corrente elettrica bensì quelle della luce. In particolare, quando nella fibra passa la luce, ogni sensore funge da minuscolo specchio che riflette solo una particolare lunghezza d'onda della luce; questa varia quando il sensore rileva fenomeni di tensione o deformazione. La fibra ottica è costituita da un sottile filo di vetro a base di silice con diametro D = 100 ÷ 200 μm, ha le dimensioni di un capillare ed è flessibile [5]. E' formata da una parte interna, detta nucleo (core) D core = 5 ÷ 100 μm entro cui avviene la propagazione delle radiazioni, ricoperta da un rivestimento concentrico anch'esso di vetro trasparente alla luce e alla radiazione infrarossa, denominata mantello (cladding) D cladding = 125 μm. Il cladding ha un indice di rifrazione di poco inferiore a quello del core.

Il core e il cladding, a loro volta, sono ricoperti da un rivestimento di materiale plastico per la protezione della fibra dalle abrasioni meccaniche D PVC = 250 μm.

Esistono differenti tipi di sensori a fibra ottica le cui possibili applicazioni riguardano, ad esempio:

- misura della deformazione;
- misura della temperatura;
- misura della pressione;
- misura delle vibrazioni (accelerometro).

3. Il Sistema SOFO

Il sistema di monitoraggio SOFO (acronimo francese di Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques – Monitoraggio Strutturale per mezzo di Fibre Ottiche) si basa sul principio fisico dell'interferometria a bassa coerenza applicata a sensori a fibre ottiche. Lo schema di funzionamento del sistema SOFO é rappresentato in Figura 1. Le componenti del sistema sono i sensori a fibre ottiche, l'unità di lettura ed il software di programmazione, acquisizione ed analisi delle misure.

Nell'ambito delle sperimentazioni effettuate nel presente lavoro è stato utilizzato il sistema SOFO® statico che rappresenta un sensore a fibra ottica di tipo lungo. Lo schema di funzionamento del sistema SOFO® statico si sviluppa sul principio dell'interferometro di Michelson. Le componenti del sistema sono i sensori a fibre ottiche, l'unità di lettura ed il software di programmazione, acquisizione ed analisi delle misure. Ciascun sensore è formato da due fibre ottiche monomodali (il raggio luminoso si propaga in un unico modo ossia parallelamente all'asse della fibra perché obbligato dal raggio molto piccolo del core) installate nella struttura da controllare. Una delle fibre, denominata fibra di misura (Fig. 2), è tesa e in contatto con la struttura che la ospita in modo da seguirne le deformazioni, mentre l'altra, disposta vicino alla fibra di misura, è di riferimento.

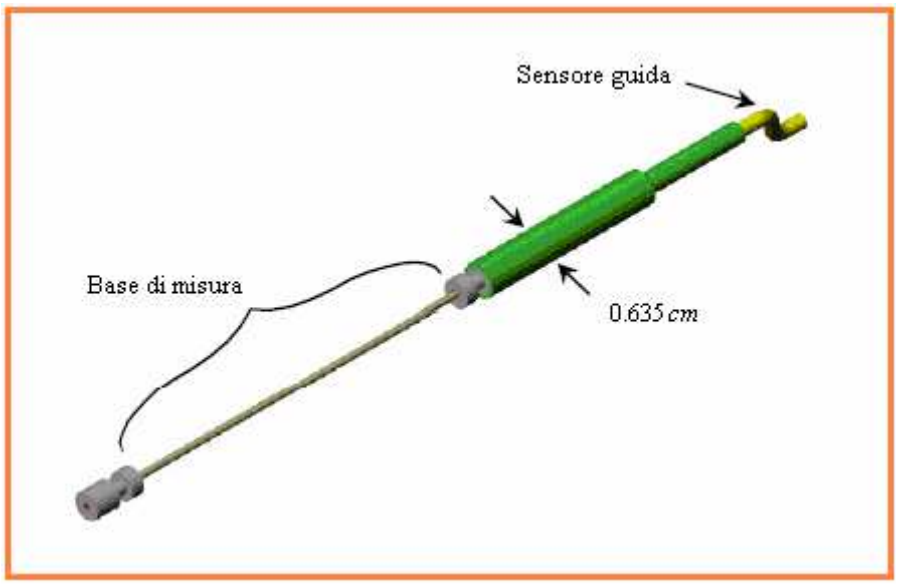
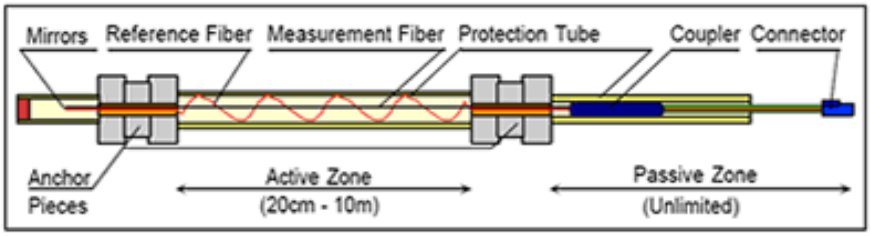
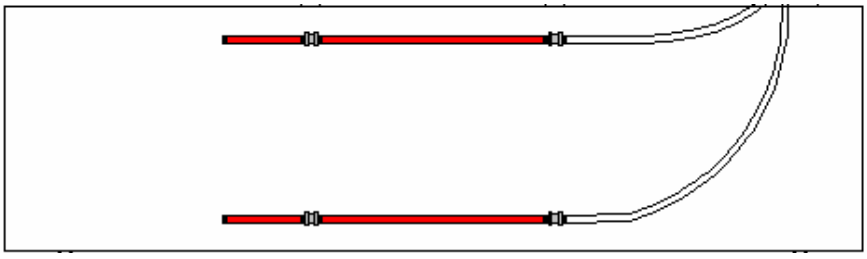


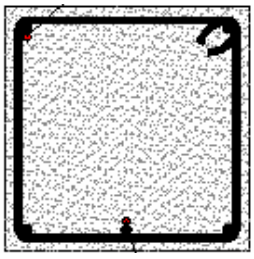
Fig. 2 – Fibra ottica

Entrambe sono preservate all'interno di un tubo di protezione in materiale plastico. Al fine di poter rilevare deformazioni in estensione, ma anche in contrazione della struttura, la fibra di misura é pretesa allo 0.5% della sua lunghezza. La fibra di riferimento é libera ed indipendente dalle deformazioni della struttura. Questa fibra ha lo scopo di auto-compensare gli effetti termici sulle misure fornite dal sensore. Il segnale ottico viene emesso dall'unità di lettura tramite un LED a infrarossi, sdoppiato nelle due fibre all'interno del sensore e quindi riflesso da due specchi (ottenuti per trattamento chimico) posti all'estremità di ciascuna fibra, per ritornare poi all'unità di lettura dove viene demodulato.
Il segnale di ritorno, contenente le informazioni sulle deformazioni che hanno interessato la struttura, viene debitamente trattato e decodificato dall'unità di lettura, per essere quindi visualizzato in forma tabellare e grafica su di un PC grazie al software dedicato SOFO SDB. Con tale sistema si ha una precisione dello 0,2% della deformazione apprezzata con una risoluzione di 2 μm (2/1000 di mm). I sensori non necessitano alcuna calibrazione ed inoltre possono essere annegati nel getto di calcestruzzo oppure installati in superficie grazie ad appositi supporti.



Il sistema SOFO® può inoltre contare su una misura di deformazione mediata lungo tutta la parte attiva del sensore, offrendo perciò un monitoraggio strutturale globale e non puntuale della struttura senza quindi influenze dirette da parte di fenomeni locali quali fessure e/o zone disomogenee.





Ciascun sensore è formato da due fibre ottiche, una di misura ed una di riferimento, entrambe preservate all'interno di un tubo di protezione in materiale plastico. La fibra di misura é tesa, risultando perciò solidale alla struttura in modo da seguirne le deformazioni. Al fine di poter rilevare deformazioni in estensione ma anche in contrazione della struttura la fibra di misura é pretesa allo 0.5% della sua lunghezza. La fibra di riferimento é invece lasca, perciò libera ed indipendente dalle deformazioni della struttura. Questa fibra ha lo scopo di auto-compensare gli effetti termici sulle misure fornite dal sensore.

Il segnale ottico viene emesso dall'unità di lettura tramite un LED a infrarossi, sdoppiato nelle due fibre all'interno del sensore e quindi riflesso da due specchi (ottenuti per trattamento chimico) posti all'estremità di ciascuna fibra, per ritornare poi all'unità di lettura dove viene demodulato.

Il segnale di ritorno, contenente le informazioni sulle deformazioni che hanno interessato la struttura, viene debitamente trattato e decodificato dall'unità di lettura, per essere quindi visualizzato in forma tabellare e grafica su di un PC grazie al software dedicato SOFO SDB. La base di misura del sensore standard è compresa tra 25 cm e 10 m con una risoluzione di 2 mm (2/1000 di mm) e una precisione dello 0,2% della deformazione apprezzata. L'intervallo dinamico di misura va da -0.5% in contrazione a +1.0% in estensione.

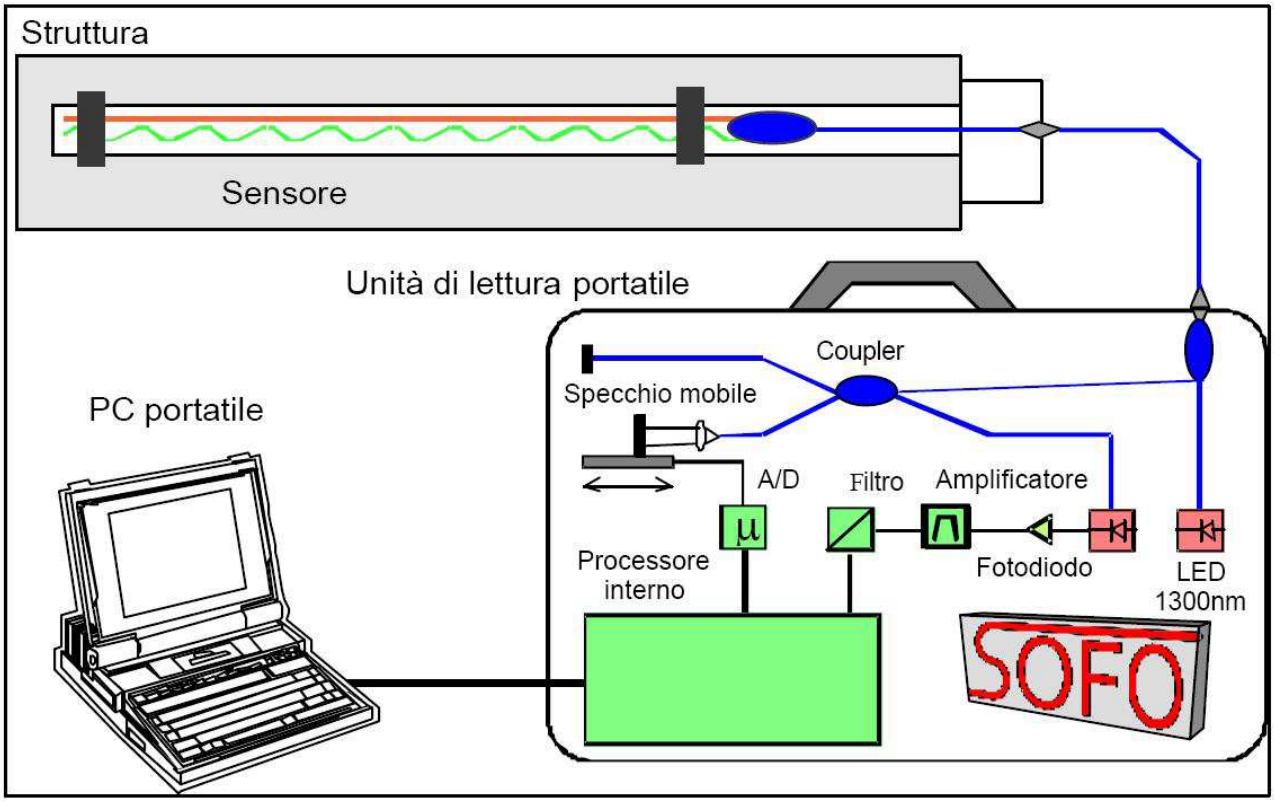
Il sistema SOFO é stato sviluppato nei primi anni '90 e dal 1995 é commercializzato ed impiegato per il monitoraggio di svariate infrastrutture civili, di opere del patrimonio storico artistico e nel settore industriale (ponti, dighe, gallerie, edifici storici e residenziali, macchinari industriali, etc.).

Il sistema SOFO é insensibile ai cambiamenti di temperatura, ai campi elettromagnetici, all'umidità e alla corrosione e a tutt'oggi non presenta alcuna deriva o instabilità nelle misure fornite. Il sistema é ideale per monitoraggi a breve e/o a lungo termine.

I sensori non necessitano alcuna calibrazione ed inoltre possono essere annegatinel getto di calcestruzzo oppure installati in superficie grazie ad appositi supporti. La notevole lunghezza che la parte attiva di misura dei sensori SOFO può avere, ne fa un prodotto unico nella famiglia dei sensori a fibra ottica.

Affidabile e più accurato dei sensori tradizionali, il sistema SOFO può inoltre contare su una misura di deformazione mediata lungo tutta la parte attiva del sensore, offrendo perciò

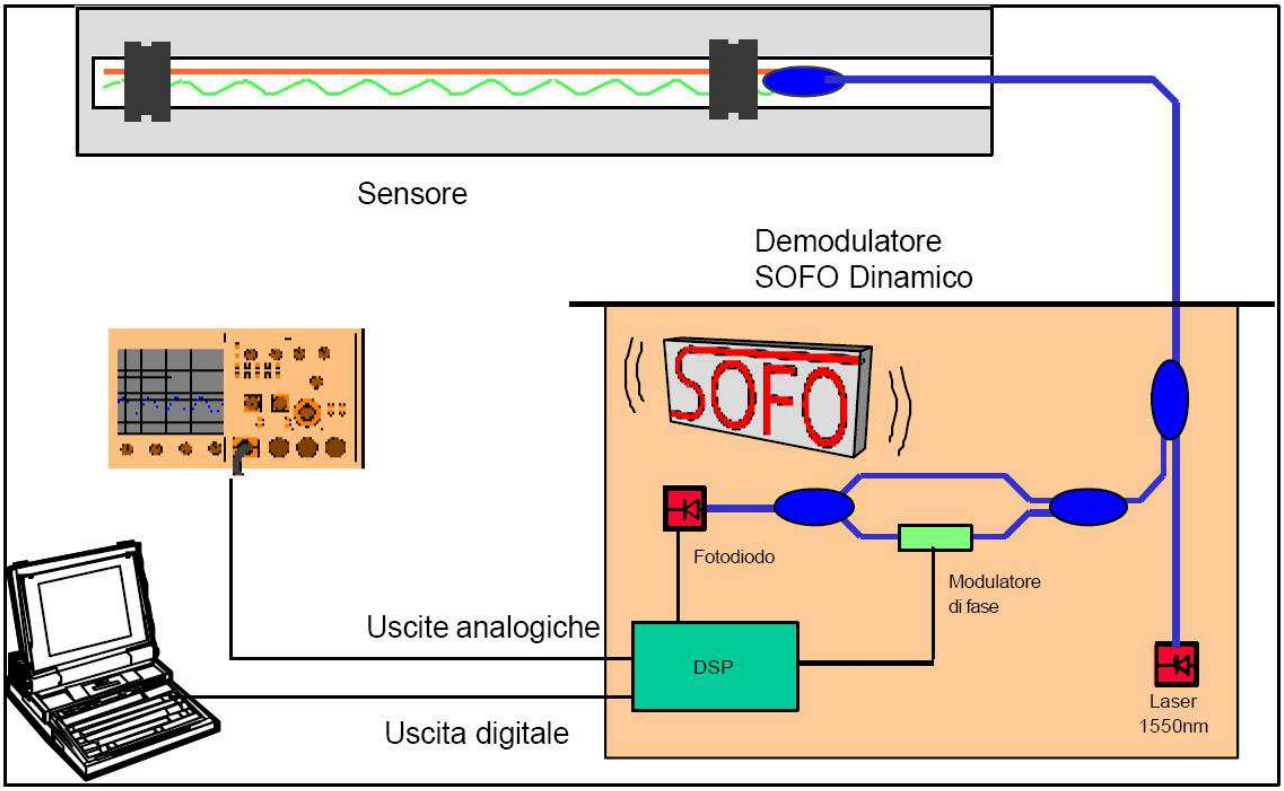
un monitoraggio strutturale globale e non puntuale della struttura, senza quindi influenze dirette da parte di fenomeni locali, quali fessure, zone disomogenee, eccetera.



Il sistema SOFO Dinamico

L'unità di lettura SOFO Dinamico consente la lettura dei sensori SOFO ad alta frequenza. Ogni unità di lettura può essere utilizzata per acquisire sino ad 8 sensori SOFO in simultanea. Qualora fosse necessaria la lettura di più sensori, è possibile integrare più unità con funzionamento in parallelo. L'unità SOFO Dinamico fa uso di sensori SOFO Standard compatibili i quali garantiscono le acquisizioni anche con l'unità SOFO V, per misure statiche nel lungo periodo. La maggior parte dei sensori SOFO standard già installati possono essere acquisiti anche con la nuova unità SOFO Dinamico, grazie all'utilizzo di un compensatore esterno appositamente concepito. L'unità di lettura SOFO Dinamico basa il suo funzionamento sul principio dell'interferometria eterodina a bassa coerenza. Il segnale ottico lanciato da un laser a 1550 nm è modulato in fase mediante un interferometro demodulatore. Acquisito il segnale di ritorno, l'unità di lettura traccia la modulazione di fase introdotta dai sensori e converte lo sfasamento registrato in uno

spostamento. La deformazione che ne deriva è trasferibile in formato analogico attraverso gli 8 canali disponibili, oppure in formato digitale attraverso la porta USB, utile per il trasferimento diretto delle acquisizioni ad un PC (salvataggio e conseguente trattamento del segnale). Lo schema di funzionamento ed i componenti del sistema sono illustrati in Figura 2. Le misure sono relative, intendendo con questo che lo zero di riferimento è perso ogni qualvolta si interrompe l'acquisizione. Tuttavia, con l'utilizzo complementare dell'unità di lettura SOFO statica, è possibile legare le diverse campagne di misurazione senza perdere il riferimento allo zero iniziale della prima lettura. L'utilizzo combinato del sistema statico permette inoltre l'ottenimento di un quadro completo delle reali condizioni della struttura investigata. La Tabella 1 mette a confronto le caratteristiche del sistema SOFOÒ nelle versioni statica e dinamica. Come si può osservare, le caratteristiche del sistema dinamico sono addirittura migliori di quelle del sistema statico, anche se le misure (relativa auto referenziata quella del sistema statico e relativa incrementale quella del sistema dinamico) sono di tipo profondamente diverso.



Il monitoraggio delle strutture civili riguarda sia strutture esistenti, sulle quali è necessario identificare i reali coefficienti di sicurezza attraverso la conoscenza dei materiali o

mediante il controllo degli spostamenti in opera, sia strutture di nuova realizzazione per le quali è opportuno verificare periodicamente lo stato di efficienza strutturale e materiale. Si pongono, quindi, sia esigenze di controllo locale sia esigenze di controllo e monitoraggio globale che oggi vengono soddisfatte attraverso l'uso di metodologie NDT, principalmente applicate agli edifici esistenti. Nel presente lavoro viene illustrata la metodologia di controllo a fibre ottiche come strumento indispensabile per l'ottenimento dei dati finalizzati alla valutazione di consistenza degli edifici in c.a. Attraverso una campagna sperimentale condotta su prototipi di trave in c.a. è stata verificata la possibilità di eseguire misure di deformazione su elementi portanti, comparando le letture ottenute dai sensori interni alle membrature con le deformazioni rilevate posizionando i sensori all'esterno. E' stata inoltre valutata la possibilità di utilizzare la tecnica in parola come sistema di controllo oltre che su strutture esistenti (tramite sensori esterni) anche su strutture di nuova realizzazione (tramite sensori interni). La verifica della bontà delle misure ottenute è stata effettuata confrontando questa metodologia con quelle che utilizzano i sistemi tradizionali con basi di misura identiche.

4. Applicazioni

Di seguito si riportato le immagini inerenti alle lavorazioni sopra citate.



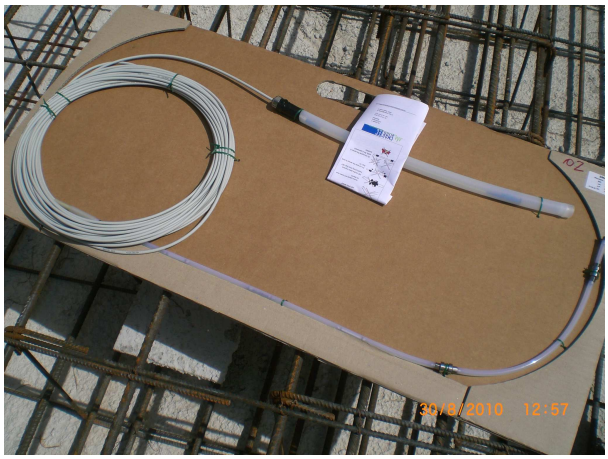


Montaggio sistema di monitoraggio sulle fondazioni – viste 2 - 3





Dettaglio montaggio sistema di monitoraggio sulle fondazioni – viste 4 - 5





Apparecchiatura del sistema di monitoraggio e controller – viste 6 - 7





Gabbie pilastri su cui installare le fibre ottiche e dettaglio installazione – viste 8 - 9





Montaggio controller e catalogazione per setup sistema di monitoraggio – viste 10 - 11





Gabbie montate con la predisposizione del sistema di monitoraggio – viste 12– 13

5. Conclusioni

Il controllo delle strutture nuove ed esistenti è uno degli strumenti essenziali per una gestione intelligente, moderna ed efficiente delle infrastrutture. I sensori sono il primo elemento nella catena di controllo e sono responsabili dell'esattezza e dell'affidabilità dei dati. Il progresso nella tecnologia di rilevamento può quindi tradursi in misure più precise, ma anche in sistemi che sono più facili da installare, usare e gestire. Negli ultimi anni i sensori a fibre ottiche hanno mosso con successo i primi passi nel campo del controllo strutturale ed in particolare

nell'ingegneria civile. Diverse tecnologie di misura sono emerse ed alcune sono evolute in prodotti commerciali. È difficile trovare un elemento comune per motivare il successo dei vari tipi di sensori: ognuno sembra aver trovato una nicchia di mercato dove può offrire delle prestazioni che sorpassano o completano quelle dei sensori più tradizionali. Dovendo scegliere tre caratteristiche dei sensori a fibre ottiche che possano spiegarne il successo presente e futuro, citerei la stabilità delle misure, l'affidabilità nel lungo termine e la possibilità di acquisire misure distribuite e a grande distanza. Nell'immediato futuro é dunque da prevedere che i sensori a fibre ottiche consolidino la loro presenza nell'industria del monitoraggio strutturale.

Bibliografia

Glisic B., D. Inaudi, A. Del Grosso, F. Lanata e G. Brunetti,2002*, Monitoraggio a breve e a lungo termine delle strutture in calcestruzzo tramite sensori a fibre ottiche, Atti del 22°Convegno Nazionale AICAP, Pàtron Editore, Bologna, pp. 531-540*
R. Giacchetti,S. Bufarini,V. D'Aria - *Il controllo strutturale degli edifici in cemento armato e muratura*.
Raymond M. Measures (2001) - *Structural monitoring with fiber optic technology* – Academic Press.
G. Frigione (1995) -Appunti del corso di scienza e tecnologia dei materiali:*tecnologia del calcestruzzo.*
D. Inaudi, N.Casanova e altri (1999) - *SOFO: structural monitorig with fiber optic sensors.*
D. Inaudi, A.Figini – *Monitoraggio strutturale dinamico con fibre ottiche*.
SMARTEC SA 2004.