

TITOLO: "MONITORAGGIO MEDIANTE SENSORI A FIBRE OTTICHE"

AUTORE/INDIRIZZI:

Nicoletta CASANOVA
ISTITUTO MECCANICA DEI MATERIALI SA
Via al Molino 6
CH-6916 GRANCIA, SWITZERLAND
Tel: ++41 91 994 83 41
Fax: ++41 91 994 85 30
e-mail: pcolombo@imm.ch

Daniele INAUDI
SMARTEC SA
Via al Molino 6
CH-6916 GRANCIA, SWITZERLAND
Tel: ++41 91 993 09 24
Fax: ++41 91 993 09 40
e-mail: smartec@smartec.ch

Giovanna COLOMBO
PASSERA & PEDRETTI
CONSULTING AND ENGINEERING SA
Via al Molino 6
CH-6916 GRANCIA, SWITZERLAND
Tel: ++41 91 993 05 33
Fax: ++41 91 993 00 08
e-mail: ppeng@ppeng.ch

SOMMARIO

La sicurezza delle opere del genio civile richiede spesso un monitoraggio periodico. In molte strutture come le gallerie, i ponti, le dighe e i monumenti storici, le deformazioni sono generalmente il parametro più importante da monitorare sia a breve sia a lungo termine.

Con le esperienze raccolte, abbiamo constatato che sistemi di misura mediante sensori di deformazione a fibre ottiche si adattano a molteplici applicazioni e possono dare informazioni utili sia durante le fasi di progettazione e costruzione sia a lungo termine.

Il sistema di misura e monitoraggio SOFO® (“Surveillance d’Ouvrages par Fibres Optiques”) si basa sull’impiego di sensori di deformazioni a fibre ottiche. Esso misura deformazioni tra due punti nella struttura che possono essere distanti da 20 cm a 10 m o più, con una risoluzione di 2/1000 mm indipendente dalla lunghezza dei sensori e un’assoluta stabilità a lungo termine.

Il sistema SOFO® è particolarmente adatto per il monitoraggio delle deformazioni a breve e lungo termine ed ha già trovato impiego in numerose strutture, quali ponti, dighe, gallerie, pali, ancoraggi, pareti ancorate.

1. INTRODUZIONE

La gestione e la sicurezza delle strutture, ed in particolare di quelle di tipo geotecnico, richiedono monitoraggi periodici che permettano la pianificazione di interventi di manutenzione e di un eventuale ripristino. Deformazioni eccessive e non stabilizzate si osservano sovente e anche se non influenzano la sicurezza strutturale globale, possono portare a problemi di durabilità della struttura. Inoltre, una conoscenza accurata del comportamento di queste strutture diventa sempre più importante, in particolare viste le nuove tecniche di costruzione introdotte e visto che strutture esistenti devono rimanere in servizio anche oltre la loro durata teorica. Monitorare, durante la costruzione e a lungo termine, aiuta inoltre a incrementare la conoscenza del comportamento reale delle strutture e a pianificare efficientemente gli interventi di manutenzione.

A lungo termine, il monitoraggio statico richiede un sistema preciso e stabile, capace di rilevare deformazioni che hanno luogo su lunghi periodi di tempo. Il monitoraggio a breve termine richiede invece un sistema di misura in grado di determinare le deformazioni rapidamente e durante tempi relativamente brevi.

Detettori di deformazioni disponibili al giorno d’oggi, come estensimetri induttivi e meccanici, sistemi di triangolazione, sensori a fibre ottiche “microbending” e accelerometri sono adatti per misurazioni in un campo limitato di frequenze. Altri sistemi non offrono sufficienti informazioni sui parametri desiderati o solo di scarsa precisione (per esempio, spesso i calcoli di spostamento degli accelerometri non sono sufficientemente precisi).

Per delle applicazioni con particolari esigenze esiste dunque la necessità reale di un unico sistema capace di coprire le deformazioni strutturali in un largo spettro di frequenze.

2. SISTEMA DI MONITORAGGIO A FIBRE OTTICHE PER IL BREVE E IL LUNGO TERMINE

Durante gli scorsi anni, i sensori a fibre ottiche hanno acquistato sempre più importanza nel campo del monitoraggio strutturale. Sono infatti la scelta ideale per molte applicazioni, essendo facili da maneggiare, dielettrici, immuni da influssi della temperatura, dell’umidità, di campi elettro-magnetici e capaci di determinare deformazioni da pochi micron a qualche centimetro (in percentuale della loro lunghezza).

Il laboratorio IMAC (Institut de mesures et analyses des contraintes dell’Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne – CH) ha sviluppato un sistema di monitoraggio non incrementale a lungo termine basato sull’interferometria a bassa

coerenza, il quale è già stato impiegato con successo in diversi manufatti quali ponti, gallerie, dighe e altre strutture del genio civile.

Il sistema si chiama SOFO®. Il nome è l’abbreviazione francese di “Surveillance d’Ouvrages par Fibres Optiques” (monitoraggio strutturale mediante fibre ottiche).

2.1 Il sistema di misura SOFO®

Il principio funzionale del sistema SOFO® è rappresentato schematicamente nella figura 2.1.1.

Il sensore consiste in una coppia di fibre monomodali installate in un tubicino e ancorate nella struttura da monitorare. Una delle fibre, chiamata fibra di misura, è ancorata alla struttura ospite e ne segue le deformazioni, mentre l’altra, la fibra di riferimento, ha una sovralonghezza rispetto a quella di misura ed è per così dire libera all’interno del tubo. Tutte le deformazioni della struttura risulteranno dal variare della differenza di lunghezza tra queste due fibre.

Per ottenere una misurazione assoluta di questa differenza di lunghezza tra le due fibre, viene usato un doppio interferometro di Michelson a bassa coerenza con configurazione atadem. Il primo interferometro è costituito dalle fibre di misura e di riferimento poste nella struttura, mentre il secondo è contenuto nell’apparecchio di misura portatile. Il secondo interferometro può introdurre, grazie ad uno specchio mobile, una differenza di lunghezza tra le due braccia ben definita.

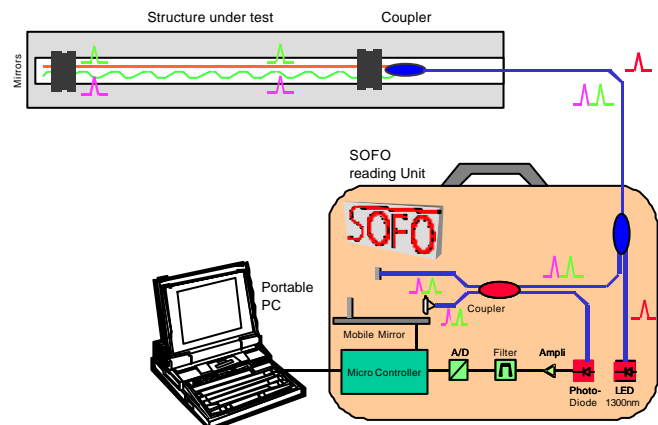


Figura 2.1.1: Sistema di misura SOFO®

A causa della coerenza ridotta della sorgente impiegata nell'apparecchio di misura (ca. 30 micron per il LED impiegato), le frange di interferenza sono rivelate solo se l'interferometro nell'apparecchio di misura compensa la differenza di lunghezza tra le fibre nella struttura.

Il segnale rilevato dal fotodiodo è pre-amplificato e demodulato da un filtro a banda passante e da un filtro digitale.

La precisione e la stabilità ottenute con questa configurazione sono stati quantificati in laboratorio e in sito fino a 2 micron (2/1000 mm), indipendentemente dalla lunghezza del sensore e per più di cinque anni, ormai. Anche il cambiamento delle proprietà di trasmissione della fibra non influenzano in alcun modo la precisione, poiché le informazioni di spostamento sono codificate nella coerenza della luce e non nella sua intensità.

La figura 2.1.2 mostra un sensore a fibre ottiche standard con lunghezza attiva (ossia di misura) fino a 10 m. Il sensore può essere installato direttamente nel calcestruzzo al momento del getto o montato sulla superficie di strutture esistenti. La zona cosiddetta passiva del sensore serve per connettere il sensore all'apparecchio di misura e può essere lunga fino a diversi chilometri.

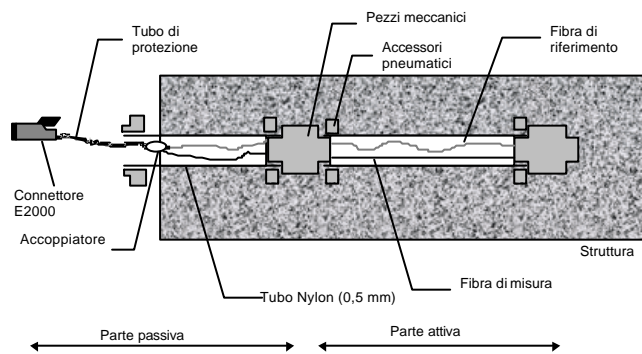


Figura 2.1.2: Sensore di deformazione a fibre ottiche SOFO®

L'apparecchio di misura è portatile, resistente all'acqua e può essere alimentato a batteria, ciò che lo rende ideale per luoghi polverosi e umidi, come quelli trovati in molti cantieri. Ogni misura dura circa 10 secondi e tutti i risultati sono automaticamente analizzati e immagazzinati per le interpretazioni future dal computer portatile esterno.

Le misure possono essere seguite manualmente connettendo i differenti sensori uno dopo l'altro, o automaticamente con l'ausilio di un commutatore ottico. Siccome la misura della differenza di lunghezza tra le fibre è assoluta, non è necessaria una connessione permanente tra l'apparecchio di misura e i sensori. Un unico apparecchio può quindi essere usato per monitorare più sensori in diverse strutture e con la frequenza desiderata. Se la misura è ripetuta periodicamente, l'evoluzione delle deformazioni della struttura può essere seguita senza il bisogno di un continuo monitoraggio.

2.2 Algoritmi per l'analisi dei dati

I software di analisi a disposizione per il sistema di misura SOFO® interpretano i dati immagazzinati nella banca dati. Alcuni programmi sono generali e possono essere

usati per ogni tipo di struttura (ponti, gallerie, ...), mentre altri sono mirati a una precisa struttura o tipo di struttura.

Esempi di programmi di analisi sono:

Analisi dell'evoluzione degli spostamenti: Questo pacchetto generale estrae i risultati riguardanti un solo sensore e li mostra come una funzione, per esempio, del tempo o del carico. I dati possono in seguito essere esportati in altri programmi, come, per esempio, programmi grafici specifici per rappresentazioni particolari.

Analisi delle curvature: In strutture come travi, lastre, volte e cupole, è possibile determinare la curvatura locale e la posizione dell'asse neutro misurando le deformazioni a trazione e compressione di un dato elemento. In molti casi, l'evoluzione della curvatura può dare indicazioni interessanti sullo stato della struttura stessa. Per esempio una trave, la quale è localmente fessurata, tenderà a concentrare le maggiori curvature nella zona delle fessure.

Inoltre con una doppia integrazione della funzione della curvatura si può ritrovare lo spostamento perpendicolare alla direzione dei sensori. Ciò è particolarmente interessante visto che in molti casi gli ingegneri sono interessati alle deformazioni perpendicolari alla direzione nella quale sono installati i sensori a fibre ottiche. Per esempio: in un ponte i sensori sono installati orizzontalmente, ma sono gli spostamenti verticali i più interessanti. In una galleria i sensori possono essere installati tangenzialmente alla volta, ma è la misura della deformazione radiale a dare i valori di convergenza. Allo stesso modo in una diga i sensori sono installati sul piano della parete, ma è lo spostamento perpendicolare che deve essere determinato.

Analisi statistiche: un altro pacchetto di software permette l'analisi dei dati delle deformazioni di strutture sottoposte a carichi statisticamente riproducibili (come per esempio il traffico).

3. MONITORAGGIO DI STRUTTURE CON SENSORI SOFO®

I sensori SOFO® possono essere utilizzati per il monitoraggio di differenti tipi di deformazioni e strutture. Qui di seguito affronteremo in particolare il tema dell'applicazione in strutture nel settore della geotecnica.

3.1 Estensimetro ottico multipunto

Nel settore delle gallerie e della geotecnica in generale esiste un bisogno reale di determinare gli spostamenti relativi piuttosto che i valori tensionali locali. Infatti generalmente si monitorano, per esempio, gli spostamenti orizzontali di tutta una parete ancorata o il rigonfiamento di un'intera soletta di una galleria.

Tecniche di sorveglianza geodetiche convenzionali non sono sempre la soluzione ideale, per esempio a causa delle difficoltà di accesso ai punti di misura e di riferimento (basti pensare alle sottostrutture in generale) e ad una scarsa distribuzione spaziale e precisione.

Tecniche convenzionali possono infatti stimare gli assetamenti e gli spostamenti con un errore superiore al ± 1 mm. Per molte applicazioni, questa precisione può essere sufficiente, ma in generale l'interesse - specialmente nella prima fase della costruzione - è il primo segnale di spostamento. Questo può essere registrato solo con una misura ad alta precisione da 10 a 100 μ m.

Per misurare lo spostamento relativo di due punti distanti, le tecniche convenzionali usate dall'ingegneria geotecnica in galleria, in ancoraggi o simili,

consiste nell'ancorare in un foro una lunga barra Invar, a una distanza sufficiente per essere fuori dalla zona di influenza della struttura (fino a qualche decina di metri), vedi figura 3.1.1

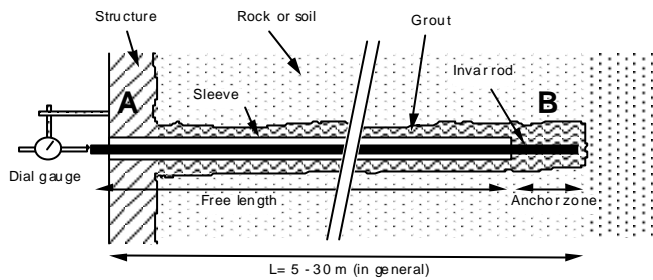


Figura 3.1.1: Rappresentazione schematica di un estensimetro convenzionale, la cui misura dà lo spostamento relativo tra i punti A e B

La barra può scorrere liberamente tra la zona di ancoraggio e la struttura da misurare. La misura viene fatta semplicemente misurando con un comparatore meccanico (o con un trasduttore elettrico LVDT) lo spostamento relativo tra la testa della barra e la struttura.

L'istruzionamento del foro con un sensore a fibre ottiche è simile al sistema tradizionale (vedi figura 3.1.2, dove: a) configurazione con lunghezza singola: la misura dà lo spostamento relativo tra i punti A e B, mentre b) configurazione multipla: la misura dà lo spostamento relativo tra i punti 1 e 2, 2 e 3, ecc.).

È da notare che la fibra ottica non solo viene usata per misurare lo spostamento nella cosiddetta "zona attiva", bensì viene usata anche per trasmettere il segnale all'unità di lettura.

Il vantaggio maggiore dei sensori a fibre ottiche SOFO® comparati con gli estensimetri convenzionali sta nell'alta risoluzione e precisione, nella possibilità di installare un gran numero di sensori in un foro relativamente piccolo, nell'assenza di trasduttori all'inizio dell'estensimetro, nella possibilità di misurarli automaticamente e a distanza (fino a 5 km di cavo, poi evtl. via modem), nella semplicità e rapidità dell'installazione e della misura.

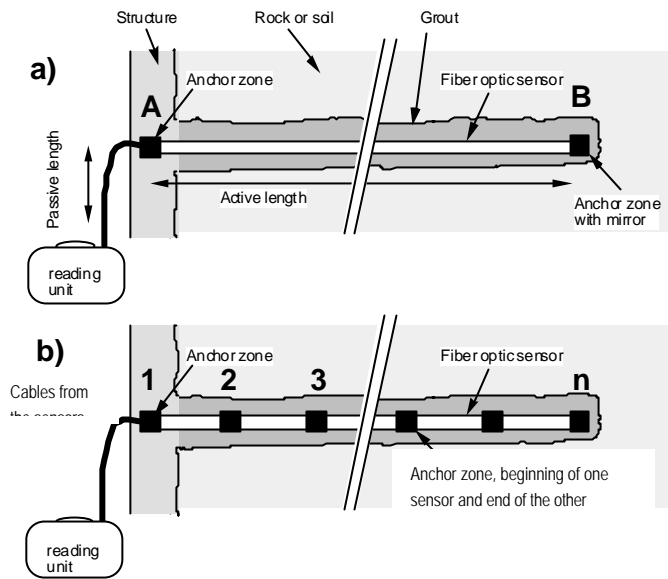


Figura 3.1.2: Rappresentazione schematica dell'estensimetro a fibre ottiche SOFO®

3.2 Misura delle curvature

Coppie di sensori SOFO® possono essere utilizzati per ottenere la variazione media delle curvature dei ponti come pure delle curvature locali in una volta in galleria. In questo caso, i sensori sono installati da una parte all'altra della volta su due livelli paralleli. È interessante notare che i sensori non devono per forza essere installati in linea retta, ma possono seguire l'andamento naturale della galleria (vedi figura 3.2.1).

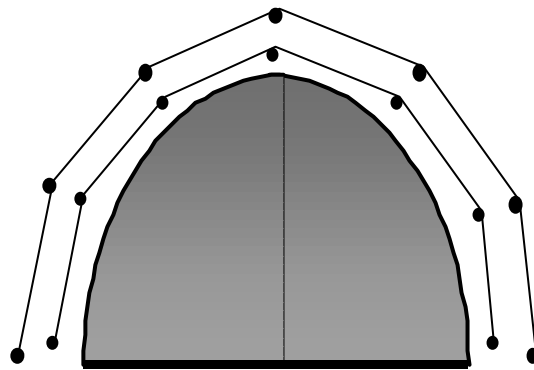


Figura 3.2.1: Installazione di sensori per la misura delle curvature e per analisi di convergenza

Se c'è un numero sufficiente di sensori, è possibile ritrovare la convergenza della galleria facendo una doppia integrazione delle misure di curvatura. Come detto, questa tecnica è usata di solito per calcolare degli spostamenti verticali di ponti con misure di deformazioni orizzontali. Grazie all'alta risoluzione del sistema SOFO® si presuppone che, per sezioni tipiche di gallerie, la precisione dei calcoli di convergenza sarà nell'ordine di 0.1-1 mm. Il vantaggio maggiore di questa tecnica sta nell'assenza di ostruzioni nella sezione trasversale, nella possibilità di effettuare misure di convergenza in modo automatico e a distanza, nella facilità di installazione e misura.

3.3 Valutazione dei materiali e analisi delle deformazioni

Un'interessante particolarità dei sensori SOFO® consiste nell'installazione direttamente nel calcestruzzo, nelle iniezioni di malta, nei cementi, nei calcestruzzi spruzzati. Questo permette la misura delle deformazioni subito dopo il getto e in seguito a lungo termine.

I sensori possono così misurare la deformazione termica dovuta alle reazioni chimiche delle componenti del calcestruzzo, il ritiro termico, il ritiro idraulico e le deformazioni dovute a carichi esterni. I sensori SOFO® sono anche usati per valutare l'aderenza tra materiali con differenti proprietà ed et  come calcestruzzo - roccia, malta - muratura, calcestruzzo nuovo - calcestruzzo vecchio e calcestruzzo - armatura.

Queste misure possono essere usate per migliorare la composizione della miscela di calcestruzzo in modo da ridurre o eliminare le auto-tensioni della costruzione stessa e la susseguente formazione di fessure.

4. ESEMPLI DI APPLICAZIONI: MONITORAGGIO A BREVE E A LUNGO TERMINE

Nel prossimo paragrafo   illustrata una piccola scelta di applicazioni del sistema SOFO® per differenti scopi di monitoraggio per la progettazione, la costruzione e la manutenzione di strutture per il settore geotecnico.

4.1 Galleria di Mt. Terri (Canton Vaud - CH)

Nel corso del 1998 nove sensori SOFO® sono stati installati nella galleria di Mt. Terri per valutare la decompressione della roccia durante lo scavo mediante fresa. Lo scopo principale di quest'installazione   lo studio delle fessurazioni della roccia (argilla opalina) e la sua conseguente perdita di impermeabilit . Questi dati saranno inoltre particolarmente interessanti per valutare l'adattabilit  di tale formazione rocciosa per l'eventuale immagazzinamento di scorie nucleari.

A partire dalla galleria esistente - parallela a quella nuova in costruzione - sono stati installati ed iniettati nove sensori in un foro in roccia verso quella nuova. La lunghezza attiva dei sensori   stata scelta in modo da avere un'alta densit  di dati in prossimit  del nuovo tunnel: i primi quattro sensori (al fronte) sono lunghi 250 mm, i seguenti due sono lunghi 500 mm e gli altri sono lunghi rispettivamente 1 m, 2 m e 4 m (vedi figura 4.1.1).

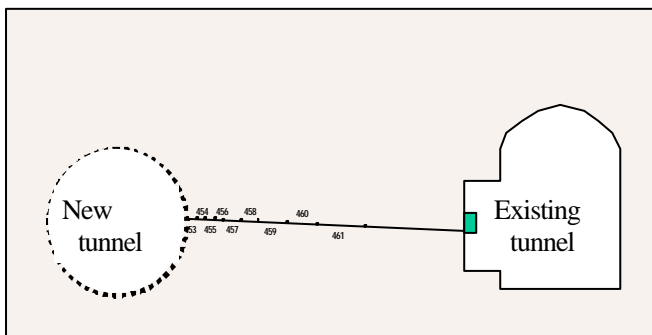


Figura 4.1.1: Installazione di un estensimetro ottico nella galleria di Mt. Terri

Tutti i sensori e i cavi di prolunga hanno potuto essere installati facilmente in un unico foro di diametro 100 mm, anche se un foro di diametro 80 mm sarebbe stato sufficiente.

La figura 4.1.2 mostra le deformazioni specifiche osservate (deformazioni misurate sui sensori divise per la lunghezza attiva dei sensori stessi). Come si pu  vedere non   stata misurata nessuna deformazione significativa prima dell'arrivo della fresa all'altezza dell'estensimetro ottico.

Dopo il passaggio della macchina,   stata misurata una grande deformazione specifica nei primi 4-5 sensori, mentre gli altri mostrano deformazioni pi  piccole (ma sempre facilmente misurabili). L'enorme valore registrato sul sensore n  453 pu  essere spiegato dall'apertura di una fessura.

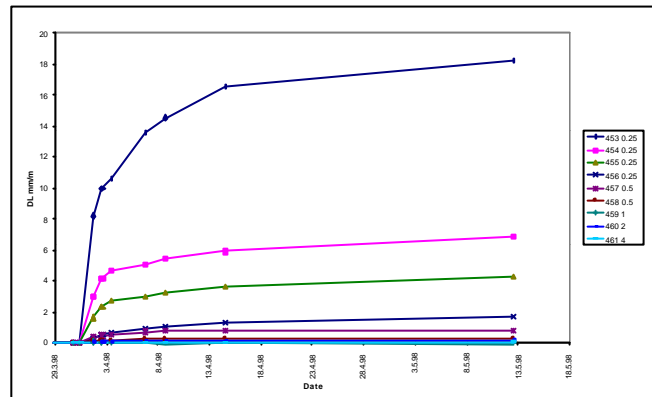


Figura 4.1.2: Misure di deformazione specifiche mm/m nella galleria di Mt. Terri a partire dal passaggio della fresa - sensore n  453 al fronte (lato tunnel nuovo), sensore n  461 in fondo (lato tunnel esistente)

Questa applicazione sfrutta alcuni vantaggi e peculiarit  dei sensori SOFO®. Da una parte,   infatti possibile adattare la lunghezza attiva del sensore e quindi della zona di misura al fenomeno da osservare. Dall'altra parte, l'alta precisione e il campo adattabile di misura del sistema permettono la determinazione delle deformazioni ad ampio raggio, richiedendo solo una limitata conoscenza a priori delle deformazioni attese. Infine, l'assenza di parti mobili nei sensori riduce enormemente il rischio di un mal funzionamento del sensore nel caso di un'importante deformazione al taglio.

4.2 Ancoraggi delle rive del lago di Lugano (Canton Ticino - CH)

La stabilit  della riva del lago di Lugano si presenta in condizioni labili su un tratto di circa 150 m. Questa particolare condizione   legata alla geologia formata da un profilo stratigrafico con depositi lacustri (essenzialmente limi con alti contenuti organici, normalconsolidati) e lenti locali di depositi fluviali (sabbie e ghiaie). Il limite della riva   stato inoltre avanzato verso lago all'inizio del secolo depositando materiale incoerente di natura differente con pendenze estremamente elevate.

Nell'ambito del progetto per la messa in sicurezza delle rive del lago di Lugano su questa tratta, lo studio progettista incaricato ha dunque previsto un diaframma di pali ancorato in testa.

Per lo studio e l'ottimizzazione delle tecniche d'ancoraggio nei particolari terreni presso la riva (depositi lacustri e nelle lenti di sabbie e ghiaie) e con lo scopo di caratterizzare il sottosuolo, in particolare nelle sue stratificazioni più critiche quali gli strati limosi, di determinare i movimenti in corso e di valutare dell'idoneità degli ancoraggi progettati alla testa di pali, lo studio Progettista ha avanzato una serie di campagne conoscitive in sito ed in laboratorio.

In particolare per l'ottimizzazione della lunghezza di ancoraggio, per la verifica di eventuali difficoltà di perforazione e per stabilire la potenza massima di ancoraggi con tratti ancorati eseguiti tramite tecniche differenti in stratificazioni di limi e in ghiaie e sabbie, sono stati realizzati e testati ancoraggi con bulbo posizionato in strati sabbiosi, piuttosto che in materiale di riporto permeabile ed eterogeneo.

Il budget finanziario e le condizioni limitate di spazio a disposizione hanno permesso la perforazione di soli 4 ancoraggi, tutti con tratto ancorato di 10 m di lunghezza, suddivisi nel modo seguente (vedi figura 4.2.1):

- Tratto ancorato realizzato con iniezioni multiple nei depositi lacustri.
- Tratto ancorato realizzato con bulbo Jetting nei depositi lacustri.
- Tratto ancorato realizzato con iniezioni multiple nella lente di sabbie e ghiaie.
- Tratto ancorato realizzato con bulbo Jetting nella lente di sabbie e ghiaie.

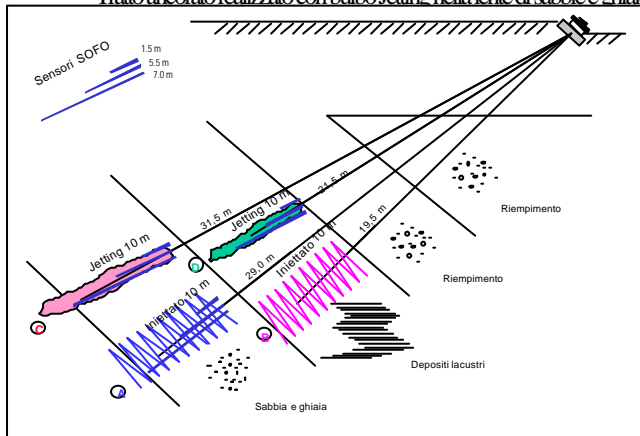


Figura 4.2.1: Rappresentazione schematica dei 4 ancoraggi di prova (B, C e D instrumentati)

I sensori a fibre ottiche tipo SOFO® posti nella zona del tratto ancorato sono stati previsti e posati per verificare la lunghezza ottimale del tratto ancorato, permettendo così lo studio del comportamento nella trasmissione degli sforzi e del comportamento a breve e lungo termine degli sforzi trasmessi dal bulbo d'ancoraggio al terreno (bulbo realizzato con tecniche differenti quali le pluriniezioni e le colonne Jetting).

Sono state realizzate tre catene di tre sensori SOFO® ognuna applicate ai trefoli durante la preparazione dell'ancoraggio in officina (l'ancoraggio iniettato in modo tradizionale nelle sabbie e ghiaie non è invece stato instrumentato). Tutti i sensori hanno quale punto di partenza per le misure la testa del bulbo posta alla fine del tratto libero. Le loro lunghezze sono rispettivamente di 1,5 m, 5,5 m e 7,0 m. Le letture sono state effettuate sia durante le prove di carico sia a distanza di alcune settimane per verificare la correlazione della perdita di carico sulla testa e il comportamento del tratto ancorato.

4.2.1 Ancoraggio B, tratto ancorato iniettato nei limi

Sopra al tratto ancorato nei limi si trova lo strato geologico superficiale costituito da ripiena.

Nella figura 4.2.1.1 sono rappresentate le misure effettuate sull'ancoraggio B durante le prove di carico.

Il primo sensore in testa (n° 685 da 1,5 m) denota una compressione lungo il primo 1,5 m di tratto ancorato.

L'andamento molto analogo tra il secondo (n° 680 da 5,5 m) e il terzo sensore (n° 682 da 7,0 m) lascia presumere che il tratto finale di 1,5 m porta ad un incremento minimo di forza trasmissibile al terreno (vista la contenuta differenza di deformazione tra le due misure).

Le poche misure effettuate con il carico di 300 kN indicano una diminuzione dell'incremento dell'allungamento dei due sensori di coda (sensore da 7,0 m e da 5,5 m), fatto che potrebbe essere correlato con lo sfilaggio del tratto ancorato. Il tempo di misura sarebbe dovuto essere prolungato per poter ottenere dati più chiari.

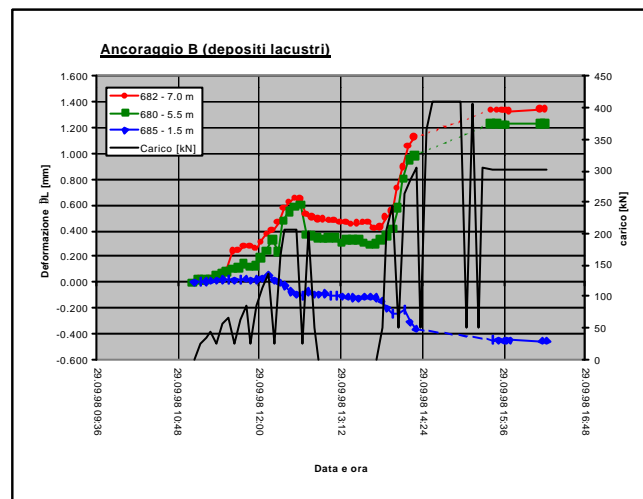


Figura 4.2.1.1: Prove di carico sull'ancoraggio B

Le misure effettuate in data 16 ottobre 1998 hanno fatto rimarcare un aumento della compressione sul primo sensore (n° 685 da 1,5 m) (carico di punta in testa verso la ripiena aumenta), mentre nei due sensori in coda si nota una diminuzione dell'allungamento (perdita di carico trasmessa sul perimetro del tratto ancorato). La presenza della ripiena sopra il tratto ancorato potrebbe quindi giocare un ruolo sulla capacità portante dell'ancoraggio.

4.2.2 Ancoraggio C, bulbo Jetting nelle ghiaie - sabbie

Sopra al tratto ancorato si trova lo strato di limi con caratteristiche estremamente inferiori alle sabbie in cui è stata eseguita la colonna Jetting.

La colonna di Jetting è stata realizzata con 10 m di lunghezza e potrebbe quindi avere la parte terminale posta nella stratificazione di limi inferiore alla lente di sabbia. Nell'incertezza riteniamo corretto trascurare gli ultimi 3 m di colonna.

Nella figura 4.2.2.1. sono rappresentate le misure effettuate sull'ancoraggio C durante le prove di carico.

Il sensore di 1,5 m (n° 683) posto in testa al bulbo segnala una compressione che varia in modo apparentemente proporzionale al carico.

L'andamento identico tra il secondo (n° 678 da 5,5 m) e il terzo (n° 681 da 7,0 m) sensore indica l'assenza di deformazioni nel tratto finale, ossia che l'ultimo 1,5 m di colonna non lavora (non si deforma), e si nota la correlazione tra il comportamento del bulbo d'ancoraggio e il carico misurato in testa dell'ancoraggio.

L'ultimo gradino di carico tra i 1'200 kN e 1'400 kN vede una repentina caduta degli allungamenti dei sensori in coda, mentre nel sensore in testa la compressione cala con un certo ritardo. Si presume che le deformazioni possano essere interpretate come il movimento della colonna a causa del superamento dell'attrito laterale, mentre di punta la colonna continua per un certo periodo a sopportare il carico.

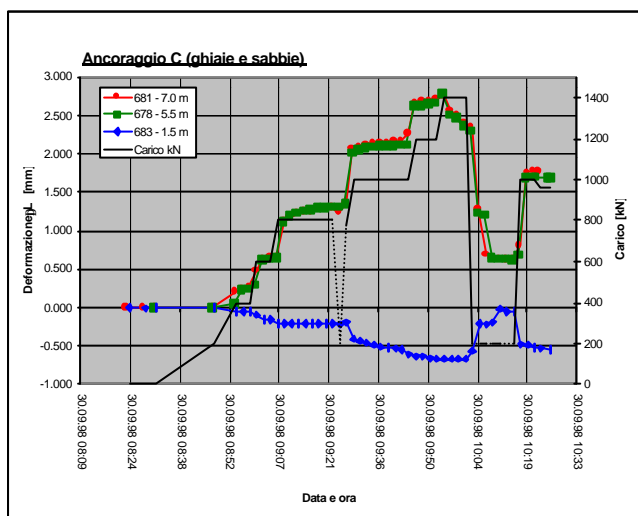


Figura 4.2.2.1: Prove di carico sull'ancoraggio C

Le misure effettuate in data 16 ottobre 1998 hanno fatto rimarcare una diminuzione della compressione sul primo sensore (carico di punta in testa cede verso i limi), mentre nei due sensori in coda si nota una diminuzione dell'allungamento (perdita di carico trasmessa sul perimetro).

4.2.3 Ancoraggio D, bulbo Jetting nei limi

Sopra al tratto ancorato si trova la ripiena con caratteristiche geotecniche estremamente migliori rispetto allo strato in cui è stata eseguita la colonna Jetting.

La colonna di Jetting è stata realizzata con 10 m di lunghezza e potrebbe quindi avere la parte terminale posta nella stratificazione della lente di ghiaia - sabbia. Questo tratto finale potrebbe avere delle ripercussioni favorevoli sulla portata, ma viene trascurato visto che i trefoli del tratto ancorato e la rip perforazione del bulbo (colonna) hanno solo 7 m di lunghezza (nessuna portata a trazione della colonna).

Nella figura 4.2.3.1. sono rappresentate le misure effettuate sull'ancoraggio D durante le prove di carico.

Il sensore da 1,5 m (n° 686) posto in testa segna una compressione che varia in modo apparentemente proporzionale al carico. Scaricata la forza, il sensore non denota un rientro delle deformazioni dovute alla compressione.

L'andamento del secondo sensore (n° 679 da 5,5 m) denota un allungamento iniziale, mentre per carichi leggermente superiori a 220 kN si nota una compressione del tratto che indica l'inizio del movimento del tratto ancorato verso la piastra d'ancoraggio.

Questo cambiamento di tendenza coinvolge il tratto finale della colonna (sensore n° 684 da 7,0 m) che subisce contemporaneamente un repentino allungamento, quindi vengono coinvolti gli attriti sulla superficie della colonna per la trasmissione dei carichi al terreno.

È da notare che il sensore n° 686 da 1,5 m nella seconda parte delle misure durante le prove di carico sembra essersi disteso uscendo dal campo di misura in compressione, non misurando così più eventuali ulteriori accorciamenti.

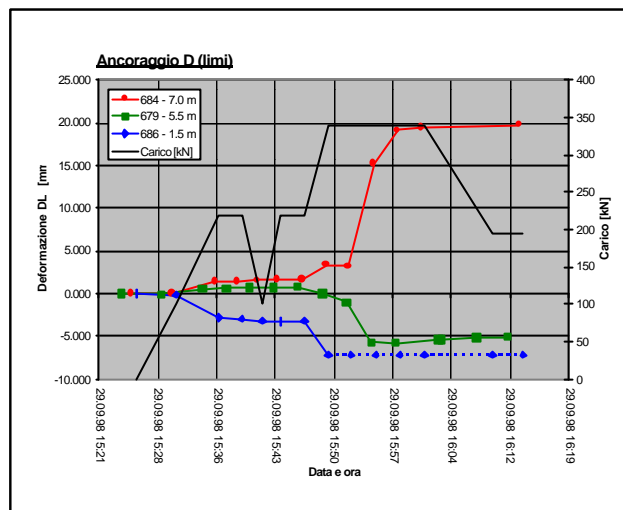


Figura 4.2.3.1: Prove di carico sull'ancoraggio D

Le misure effettuate in data 16 ottobre 1998 hanno fatto rimarcare una diminuzione della compressione sul primo e secondo sensore (carico di punta in testa cede verso la ripiena), mentre il terzo sensore indica una caduta molto marcata delle deformazioni. Un controllo di questo fenomeno difficilmente spiegabile potrà essere effettuato con un'ulteriore campagna di misura.

4.3 Prove di carico su pali (Canton Lucerna – CH)

Per la costruzione della galleria a cielo aperto a Spier, nel Canton Lucerna, nell'autunno del 1997 sono stati testati mediante prova di carico statica 3 pali centrifugati prefabbricati in calcestruzzo di diametro 45 cm. Si tratta di pali galleggianti posti in un terreno composto principalmente da depositi lacustri con argilla, limo, sabbia e qualche strato di ghiaia. All'interno del foro centrale di ogni palo (diametro ca. 70 mm) e su di una lunghezza di ca. 22-26 m è stata introdotta una catena di 7-8 sensori di lunghezza 3-4 m. Il foro è poi stato iniettato con della malta espansiva con un modulo elastico relativamente basso.

Scopo delle misure è stato determinare l'attrito laterale e la resistenza ultima dei pali, sui quali sono stati applicati carichi fino a ca. 2000 kN.

Il sistema di misura SOFO® è stato scelto dal Committente in particolare per la sua affidabilità per la sua precisione, per la facilità di installazione, la semplificazione

dell'infrastruttura necessaria alla prova di carico e per la possibilità di eseguire misure automatiche senza modificare la testa del palo.

Prima, durante e per qualche giorno dopo le prove di carico i sensori installati sono stati misurati automaticamente ad intervalli regolari, grazie all'impiego di un commutatore ottico.

Nella figura 4.3.1 sono rappresentate le deformazioni determinate durante la prova di carico eseguita su uno di questi pali. Ogni curva rappresenta un sensore. Il sensore n° 442 si trova in testa al palo, mentre il sensore n° 449 in punta.

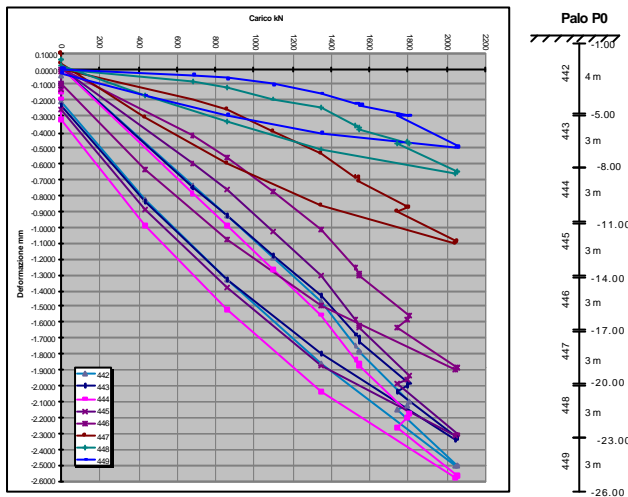


Figura 4.3.1: Grafico carico - deformazione di una catena di sensori e loro posizione nel palo

Nella figura 4.3.2 sono rappresentate le deformazioni in funzione della profondità del sensore. È ben visibile la differenza di assestamento del palo alle differenti quote e la diminuzione delle deformazioni per i sensori posti più in profondità dovuta all'influsso dell'attrito laterale.

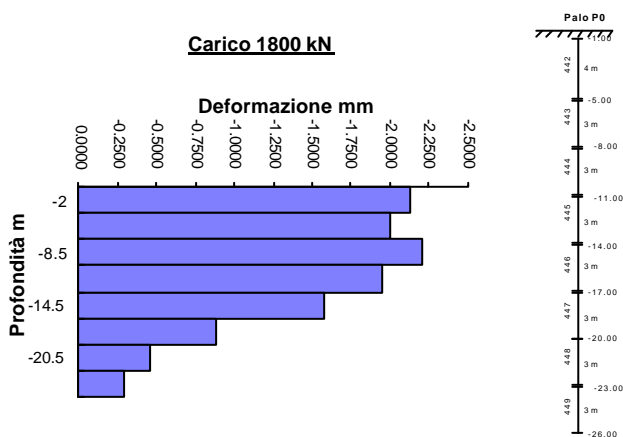


Figura 4.3.2: Grafico profondità - deformazione di una catena di sensori al gradino di carico di 1'800 kN / Posizione e lunghezza dei sensori del palo

Le misure hanno permesso di determinare i differenti assestamenti del palo in relazione al carico e al tempo, di calcolare l'attrito laterale, di verificare la resistenza ultima del palo e di valutare i parametri del terreno. Inoltre sono servite a definire la lunghezza e il numero ottimale dei pali nelle differenti zone e nei differenti materiali.

5. CONCLUSIONI

I benefici del monitoraggio strutturale durante prove di carico, la costruzione, il collaudo e a lungo termine sono evidenti. Un monitoraggio regolare, continuo o di collaudo di una struttura può incrementare la conoscenza dei suoi comportamenti, determinare parametri utili alla progettazione (costi, dimensionamento), aiutare a garantire la sicurezza e a pianificare gli interventi di manutenzione e ripristino, permettendo così di stabilire e pianificare i costi effettivi dell'opera nell'arco della sua vita.

I sensori di deformazione a base lunga (per esempio fino a 10 m) possono dare importanti informazioni sul comportamento globale della struttura.

Nel caso di gallerie, è possibile usarli come estensimetri radiali multipunto, per il monitoraggio delle variazioni di convergenza con la doppia integrazione della curvatura della volta, per l'evoluzione delle proprietà del calcestruzzo e del calcestruzzo spruzzato.

Nel caso di pareti ancorate, ancoraggi e pali, i sensori possono dare interessanti informazioni riguardanti gli spostamenti o cedimenti della struttura, ma anche parametri necessari alla progettazione per l'ottimizzazione di soluzioni tecniche.

Il sistema di monitoraggio SOFO® comprende un apparecchio di misura portatile (adattato alle condizioni di cantiere), una serie di sensori (che possono essere installati direttamente sul calcestruzzo o montati sulla superficie di strutture metalliche o altre strutture esistenti) e un pacchetto di software (che permette l'analisi di un largo numero di dati). Questo sistema è stato applicato in diverse gallerie, in ponti nuovi e esistenti, dighe e altre strutture del genio civile con lo scopo di monitorare il loro comportamento sia breve sia a lungo termine.

6. REFERENZE

Inaudi D, Casanova N, Kronenberg P, Vuppillot S, 1997, "Embedded and surface mounted sensors for civil structural monitoring", Smart Structures and Materials, San Diego Mars 1997, SPIE Vol. 3044-23

Perregaux N, Vuppillot S, Tosco J-S, Inaudi D, Burdet O, 1998, "Vertical Displacement of Bridges using the SOFO System: a Fiber Optic Monitoring Method for Structures", 12th ASCE Engineering Mechanics, San Diego, La Jolla, May 1998

Inaudi D, Casanova N, Glisic B, Kronenberg P, Lloret S, Pflug L, Vuppillot S, 1998, "SOFO: Structural Monitoring with Optical Fiber Deformations Sensors"

Inaudi D, Casanova N, Steinmann G, Mathier J-F, Martinola G, 1998, "SOFO: Tunnel Monitoring with Fiber Optic Sensors", Reducing Risk in Tunnel Design and Construction, Basel, December 1998

Vuillet L, Casanova N, Inaudi D, Osa-Wyser A, Vuppillot S, 1996, "Development and laboratory tests of deformation fiber optic sensors for civil engineering applications", International Symposium on Lasers, Optics and Vision for Productivity in Manufacturing, Europto Series, Besançon, 10-14 June 1996

Colombo G, Luvini E, Studio di ingegneria Passera & Pedretti SA di CH-6916 Grancia, 1998, "Acquisizione dati seconda parte - Ancoraggi di prova", Descrizione e risultati delle prove in situ, Ottobre 1998

7. SUMMARY

The security of civil engineering works demands a periodical monitoring of the structures. In the case of many structures including tunnels, bridges, dams and historical monuments, deformations are the most relevant parameter to be monitored.

The current methods (such as triangulation, water levels, vibrating strings or mechanical extensometers) are often of tedious application and require the intervention of specialized operators. The resulting complexity and costs limit the frequency of these measurements. The obtained spatial resolution is in general low and only the presence of anomalies in the global behavior urges a deeper and more precise evaluation. There is therefore a real need for a tool allowing an automatic and permanent monitoring from within the structure itself and with high precision and good spatial resolution.

In many civil structures like bridges, tunnels and dams, the deformations are the most relevant parameter to be monitored in both short and long-terms. Strain monitoring gives only local information about the material behavior and too many such sensors would therefore be necessary to gain a complete understanding of the structure's behavior.

We have found that fiber optic deformation sensors, with measurement bases of the order of one to a few meters, can give useful information both during the construction phases and in the long term.

The SOFO® ("Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques") monitoring system is based on the use of fiber optic deformation sensors. It measures deformations between two given points in the structure being 20cm to 10m apart. The resolution is of 2/1000 mm independently from the gage length and is guaranteed also for periods of many years.

The measurement system is composed of deformation sensors (that can be installed directly into concrete, into a grout injection or on the surface of existing structures), a fiber optic cable network and a reading unit with data acquisition and management software. Further data treatment software packages are also available.

The SOFO® system is particularly suited for the monitoring of deformation in the short and long term and has been successfully applied to the monitoring of a number of structures including bridges, dams, tunnels, piles, anchorages and anchored walls.

This paper presents in particular the results relative to some of these applications.