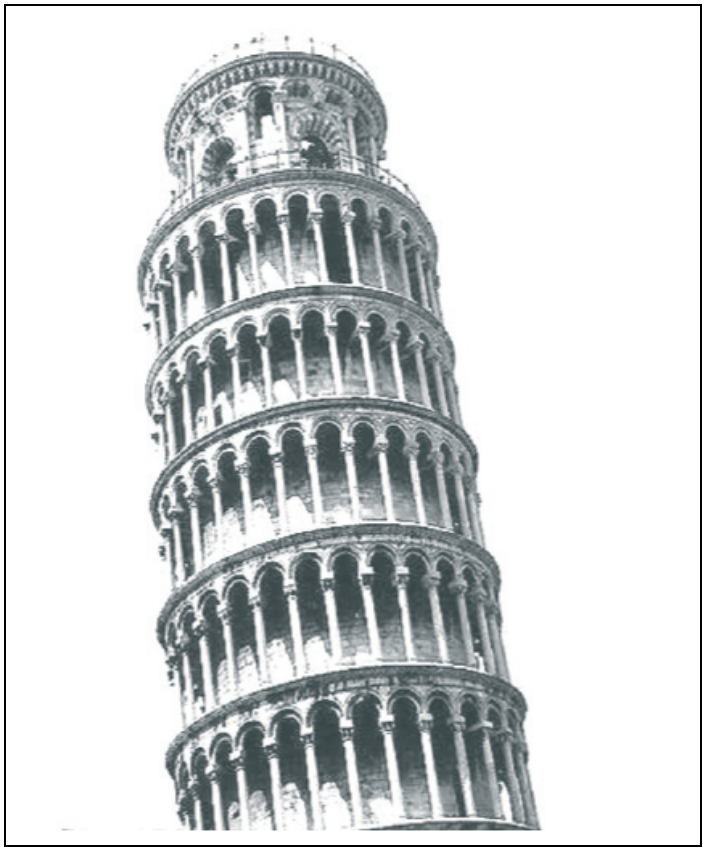
Giornate aicap 2009 - 25° Convegno Nazionale

Pisa, 14 - 16 Maggio 2009



Con il patrocinio di:

CONSIGLIO SUPERIORE DEI LL.PP.

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA

LA PROGETTAZIONE E L'ESECUZIONE DELLE OPERE STRUTTURALI NELL'OTTICA DELLA SOSTENIBILITÀ

Il controllo dei ponti in CAP dalle fasi costruttive, al collaudo all'esercizio

F. Porco, G. Porco, A. Fiore, G. Zaccaria

IL CONTROLLO DEI PONTI IN C.A.P.
DALLE FASI COSTRUTTIVE, AL COLLAUDO, ALL'ESERCIZIO

Andrea Fiore[1], Francesco Porco[2], Giacinto Porco[3], Giulio Zaccaria[1]

1 Sismlab s.r.l., Spin-Off Università della Calabria
2 Dipartimento Icar, Politecnico di Bari
3 Dipartimento di Strutture, Università della Calabria

SOMMARIO
Il monitoraggio in continuo delle opere strutturali sta diventando uno degli strumenti gestionali essenziali nell'ottica della sostenibilità intesa sia come garanzia della sicurezza in servizio sia per consentire una programmazione economica ed efficace degli interventi di manutenzione delle opere infrastrutturali.
Il monitoraggio strutturale, eseguito con la tecnologia dei sensori a fibre ottiche residenti per annegamento nelle membrature strutturali, consente di sorvegliare nel tempo, con periodicità programmata, la funzionalità statica delle strutture mediante il controllo delle deformazioni e degli spostamenti.
In questo lavoro verrà illustrata una metodologia di indagine sperimentale sui ponti e viadotti in c.a.p. di nuova realizzazione, diretta al controllo della funzionalità statica sia nella fase di esercizio che di collaudo. In particolare verranno ripercorse tutte le fasi di controllo a partire dalle fasi di realizzazione delle travi di impalcato, in c.a.p. alle fasi di varo e di realizzazione della sovrastruttura su un caso reale di studio. La procedura proposta è basata su un sistema di controllo residente nell'opera, dai costi relativamente contenuti, che diventa un valido strumento sia per il collaudo che per i successivi interventi manutentivi.

SUMMARY
In the last years, structural monitoring has assumed great importance both as guarantee of the safety during the service life, both to allow an economic planning for maintenance of infrastructures.
Structural monitoring, performed with the technology of the fiber optics sensors resident in reinforced concrete, allows to control, with programmed periodicity, the static functionality of the structures through the control of deformations and displacement.
The present job illustrates a methodology of experimental investigation applied to bridges and viaducts in prestress reinforced concrete of new realization, whose finality is the control of the static functionality in the phases of realization, testing and exercise.
Particularly, with reference to a recent application, all the phases of control will be described beginning from the realization of the beams of the deck, to the launching and the realization of the superstructure.
The presented procedure is based on a "low-cost" system of control resident in the structure, that becomes a valid tool both for the testing and for the following maintenance interventions.

1. INTRODUZIONE

La valutazione dell'affidabilità delle strutture esistenti rappresenta una questione molto attuale soprattutto alla luce dei tragici eventi registrati in Italia negli ultimi anni. Ai "*noti*" problemi delle strutture in muratura dei centri storici, si sono aggiunti quelli delle strutture in calcestruzzo armato che, di fatto, hanno tradito le grandi aspettative di cui tale tecnologia era stata caricata alle soglie del Ventesimo secolo, efficacemente espresse dallo slogan coniato dai precursori: "*il cemento armato è per sempre*". Le strutture in calcestruzzo armato sono affette da problematiche essenzialmente legate al progressivo degrado delle prestazioni dei materiali nel tempo. Tale degrado generalmente si manifesta quando il danneggiamento è già in uno stadio avanzato, pertanto ci si trova ad intervenire quasi sempre in "*ritardo*".

Una soluzione a tali problematiche è sicuramente rappresentata dai moderni sistemi di controllo e monitoraggio strutturale. Tali sistemi se opportunamente progettati, permettono una verifica costante delle condizioni dell'opera e quindi una pianificazione "*economicamente vantaggiosa*" degli interventi di manutenzione ordinaria o straordinaria. Tutto ciò assume un interesse "sociale" ancora più elevato allorquando si ha a che fare con strutture di particolare importanza quali le infrastrutture viarie e gli edifici "strategici" (protezione civile, ospedali, scuole, infrastrutture viarie). Per tali strutture risulta fondamentale non solo un costante monitoraggio nel tempo, per scongiurare problemi di degrado dei materiali, ma anche poter effettuare verifiche dell'efficienza statico-strutturale a valle di eventi "*eccezionali*" (eventi sismici, dissesti idrogeologici).

In questa prospettiva viene presentato un sistema di monitoraggio strutturale per un viadotto con travi in c.a.p.

realizzato a Bari. Tale opera è parte di un intervento di più ampio respiro, che si è reso necessario a causa della particolare vulnerabilità del sito, oggetto nel 2003 di un violento dissesto idro-geologico.

Nel prosieguo, dopo un breve introduzione dei sistemi a fibra ottica, verrà descritto il sistema di monitoraggio realizzato, evidenziando la tipologia e l'ubicazione nelle strutture dei sensori adottatii.

2. BREVE DESCRIZIONE DEI SISTEMI A FIBRA OTTICA

Negli ultimi anni, nell'ambito del monitoraggio strutturale, si è affermata una tecnica innovativa che si basa sull'utilizzo dei sensori a fibra ottica. Questa tecnica offre la possibilità di controllare le strutture, in modo continuo e automatico, attraverso una rete interna di sensori (appunto a fibra ottica) che permettono il monitoraggio di diversi parametri utili sia per una pianificazione degli interventi di manutenzione sia per la valutazione della sicurezza delle strutture stesse.

I tipi di sensori a fibra ottica adatti al monitoraggio strutturale, sviluppatisi soprattutto in ambito scientifico ed industriale, sono essenzialmente quelli atti a monitorare deformazioni e temperatura. E' importante sottolineare che, soprattutto nel caso di strutture di nuova costruzione, la posa in opera di un sistema di monitoraggio strutturale a fibre ottiche, a fronte di un costo percentualmente minimo rispetto all'opera nel suo complesso, fornisce uno strumento fondamentale per la valutazione dell'efficienza strutturale nel tempo. I sensori vengono posizionati all'interno della struttura sulle barre d'armatura (per strutture di nuova costruzione) od all'esterno sul calcestruzzo (per strutture esistenti), pertanto i sensori "seguono" gli stati di deformazione della struttura e permettono quindi di risalire allo stato tensionale interno dei materiali.

Uno dei sistemi di maggiore diffusione è il sistema SOFO ("Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques), che si basa sull'impiego di sensori di deformazione 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 con un'assoluta stabilità a lungo termine .Il sistema SOFO è particolarmente adatto per il monitoraggio delle deformazioni a breve e a lungo termine ed ha già trovato impiego in numerose strutture, quali ponti, dighe, gallerie, pali, ancoraggi, pareti ancorate, edifici storici.

I sensore utlizzati nel sistema SOFO, cosi' come tutti quelli basati su sistemi a fibra ottica, sono insensibili ai cambiamenti di temperatura, ai campi elettromagnetici, all'umidità e alla corrosione e a tutt'oggi non presentano alcuna deriva o instabilità nelle misure fornite. Inoltre non necessitano di alcuna calibrazione e possono essere annegati nel getto di calcestruzzo, senza subire nessun danno, oppure installati in superfici grazie ad appositi supporti.

Il sensore vero e proprio consiste in una coppia di fibre monomodali installate in un tubicino e ancorate nella struttura da monitorare (figura 1 e 2). 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 sovralunghezza rispetto a quella di misura ed è per così dire libera all'interno del tubo . Al fine di poter rilevare deformazioni in estensione ma anche in contrazione della struttura, la fibra di misura è pretesa allo 0,5 % della sua lunghezza. La fibra di riferimento, invece, ha lo scopo di autocompensare gli effetti termici sulle misure fornite dal sensore. La tecnica di misurazione è basata sulla misurazione della differenza di lunghezza di queste due fibre, solamente la deformazione meccanica avrà effetto sui risultati mentre ogni altra perturbazione, come cambi termici che incidono sull'indice di rifrazione della fibra, colpiranno le due fibre in modo identico annullando l'effetto.

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 a tandem. 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.

Oltre ai sensori destinati a registrare le "*deformazioni*" strutturali, vengono disposti anche sensori di temperatura ("termocoppie", figura 2) che permettono di valutare gli effetti legati alle variazioni termiche, permettendo così di "*depurare*" da tali contributi le letture strumentali. Le "termocoppie", di fatto, sono dei veri e propri termometri in metallo la cui resistenza elettrica dipende dalla temperatura. Questa variazione dovuta all'influenza della temperatura è causata dal meccanismo di conduzione dei metalli. Nelle termocoppie due spire di materiali differenti sono unite nel punto di misurazione. Quando questi cosiddetti termo-conduttori vengono uniti con conduttori in rame questi danno vita alla giuntura di riferimento. Il potenziale misurato nella giuntura è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura fra punto di misurazione e la giuntura di riferimento. Le termocoppie non necessitano di calibrazione, funzionano per temperature da -50°C ad 80°C. Presentano diametri di 5mm per i cavi di connessione e 10mm per la termocoppia. La lunghezza dei cavi oscillano da 0,2m a 100 m.

Per quel che riguarda le misurazioni, di deformazione e di temperatura, vengono effettuate attraverso centraline di acquisizione fisse, o come nel caso in esame, attraverso una centralina portatile (figura 3). Ovviamente tutti i risultati sono automaticamente analizzati e immagazzinati per le interpretazioni future dal computer portatile esterno collegato alla centralina. Le misure possono essere eseguite 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 fibra è assoluta, non è necessaria una connessione permanente tra l'apparecchio di misura (unità di lettura) 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 eseguita senza il bisogno di un continuo monitoraggio.

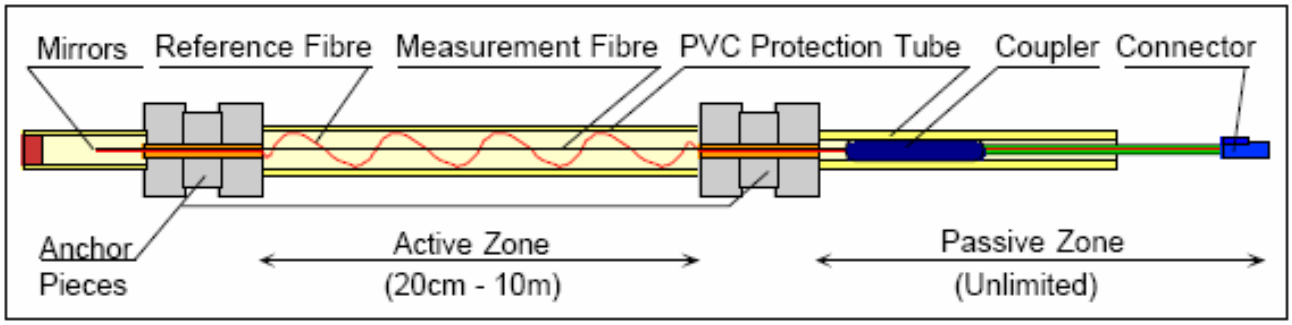


Figura 1 –Schema funzionamento sensore a fibra ottica

Figura 2 –A sensore a fibra ottica (sinistra) e termocoppia (destra)

Figura 3 –Centralina di acquisizione dati

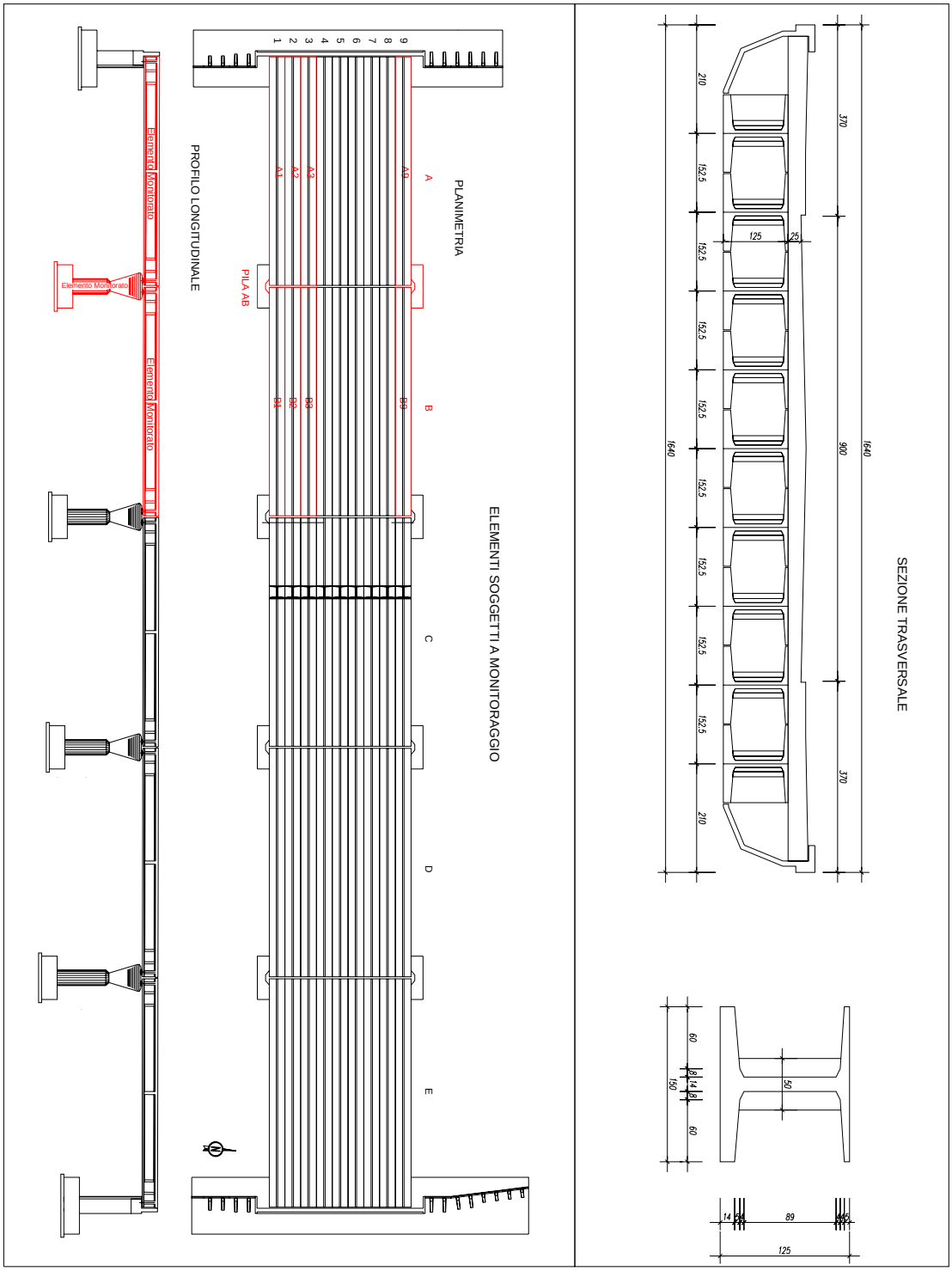


Figura 4 –geometria dell'opera ed individuazione delle travi e della pila soggette a monitoraggio.

3. ILSISTEMA DI MONITORAGGIO

3.1 Descrizione dell'opera

Il viadotto in oggetto si compone di 5 campate, di luce pari a 22.30 m ciascuna, per una lunghezza complessiva di 112 m circa.

L'impalcato, largo complessivamente 16.40 m (di cui 9.00 m di piano viabile), è realizzato a mezzo di 9 travi in c.a.p. con sezione a "I" di altezza h=1.25 m, disposte ad interasse di 1.525 m, solidarizzate da una soletta gettata in opera di spessore minimo pari a 25 cm e da numero di tre traversi di cui due di testata con spessore 40 cm ed uno di campata con spessore pari a 30 cm.

Le travi sono prefabbricate in stabilimento e precompresse con armature pre-tese costituite da trefoli stabilizzati ad andamento rettilineo.

Lo schema di vincolamento di ciascuna campata è del tipo in semplice appoggio, con vincolo longitudinale mobile ad una estremità a vincolo fisso all'altra. Gli scorrimenti longitudinali prodotti sia dai fenomeni lenti che dalle azioni sismiche sono assorbiti da giunti di dilatazione opportunamente dimensionati e preregolati.

Il basamento delle pile, è a sezione rettangolare con rostri arrotondati, di lunghezza complessiva pari a 14,51 m e spessore di 1,60 m; la parte sommitale, invece, ha forma svasata con sezione massima in sommità pari a 2.70m e sezione minima all'attacco con il basamento pila di 1,00m.

Il piano degli appoggi ha dimensioni in pianta (2.20x14,10) ed accoglie n°18 apparecchi di appoggio in acciaio-teflon.

3.2 Progetto del sistema di monitoraggio: finalità

La predisposizione del sistema di monitoraggio è stata effettuata avendo i seguenti obiettivi :

•verificare le fasi realizzative della singola trave in c.a.p e controllare i fenomeni in gioco con particolare attenzione alle perdite di carico nell'armatura precompressa;

•verificare le fasi realizzative dell'impalcato, seguendo gli stati tensionali nelle armature delle travi e della pila a valle della realizzazione della soletta e della sovrastruttura;

•fornire un supporto al tecnico collaudatore durante le operazioni di collaudo;

•valutare lo stato di efficienza statica durante la vita utile.

In particolare, per quanto riguarda il primo obiettivo e nel caso del sistema di precompressione a cavi pre-tesi, tale sistema di monitoraggio permette, mediante l'acquisizione di dati eseguiti nella fase di getto del calcestruzzo, la valutazione delle reali cadute di tensione dei cavi di precompressione.

Il secondo obiettivo viene perseguito acquisendo dati tramite il sistema ottico nelle tre fasi principali di realizzazione dell'impalcato quali:

- varo delle travi;
- realizzazione dei traversi e della soletta in c.a.;
- struttura ultimata.

Per quanto riguarda il terzo obiettivo, si richiama l'attenzione sulla circostanza che la presenza di un sistema di sensori annegati all'interno della struttura rappresenta un valido strumento che, opportunamente utilizzato da personale specializzato, risulta essere di supporto alla prova di carico e permette, attraverso il riscontro dei dati acquisiti, la valutazione diretta dell'impegno statico delle diverse membrature strutturali.

Per quanto riguarda il quarto obiettivo, bisogna considerare che le informazioni acquisite mediante un sistema di monitoraggio a fibra ottica costituiscono parte integrante del piano di manutenzione, ed evidenziano non solo eventuali variazioni del comportamento strutturale nel tempo ma diventano uno strumento di controllo fondamentale qualora si voglia constatare lo stato di efficienza dell'opera a valle di eventi straordinari (sismi, alluvioni etc..).

3.3 Elementi strutturali monitorati

La identificazione delle membrature portanti da monitorare è stata effettuata sulla base di una analisi sia geometrica che strutturale.

La prima passa attraverso la valutazione geometrica delle membrature portanti con particolare riferimento:

•alla luce dell'impalcato

•alla forma, alla dimensione e all'interasse delle singole travi

•a numero e posizione dei traversi

•alla dimensione e posizione della parte carrabile.

Al fine di identificare il comportamento dell'intero impalcato è stata eseguita l'analisi strutturale valutando la risposta indotta dall'azione dei carichi verticali di progetto e dalle azioni quantificate secondo le normative adottate in progetto. Tale analisi è stata effettuata attraverso l'ausilio di un modello tridimensionale agli elementi finiti in base alle indicazioni fornite dagli elaborati progettuali.

Dalle analisi sopra descritte e in considerazione delle operazioni da eseguire in fase di collaudo è emerso che, tra le cinque campate presenti quelle rappresentative e quindi oggetto di monitoraggio sono quelle iniziali identificate come "Campata A" e "Campata B" . Di conseguenza si identificata anche la pila da strumentare di seguito denominata "Pila AB".

In particolare le travi strumentate appartenenti a ciascuna campata, sopra menzionata, sono quattro e identificate nello stralcio planimetrico dell'impalcato come A1,A7,A8,A9, B1,B7,B8,B9 .

E' opportuno precisare che tutte le travi, escluso la A8 e la B8, sono state equipaggiate con 6 sensori ottici e 6 termocoppie in modo tale da cogliere eventuali effetti deformativi causati da effetti termici.

3.4 Installazione

Le fasi di installazione dei sensori e quelle successive di misura, rappresentano una procedura ormai standardizzata che conduce a disporre di dati utili sia per il collaudo che per i controlli periodici. Le fasi principali in sequenza temporale risultano:

•Installazione dei sensori, controllo e verifica di funzionalità documentata;

•Misure di deformazioni prima della prova di collaudo, in regime di massimo carico e alla fase di scarico;

•Misura di deformazioni all'entrata in servizio della struttura per i controlli periodici.

L'operazione di installazione è basata su alcune fasi procedurali e cioè:

A) Identificazione dell' armatura su cui installare il sensore (pila);

B) Identificazione del trefolo su cui installare il sensore (trave in c.a.p.);

C) Fissaggio del sensore ed in particolare della parte attiva nei punti indicati con opportune graffe di serraggio.

D) Sistemazione della parte passiva all'interno del reticolo di armatura in modo da non interferire con le fasi di getto e consentire il collegamento al box di lettura;

E) Verifica delle lunghezze attive e comparazione con il DL di fabbrica al fine di garantire il giusto range di funzionamento;

F) Redazione di un Rapporto di Installazione con il quale si certifica, mediante comparazione, la vicinanza al DL di fabbrica e la corretta funzionalità dello strumento installato.

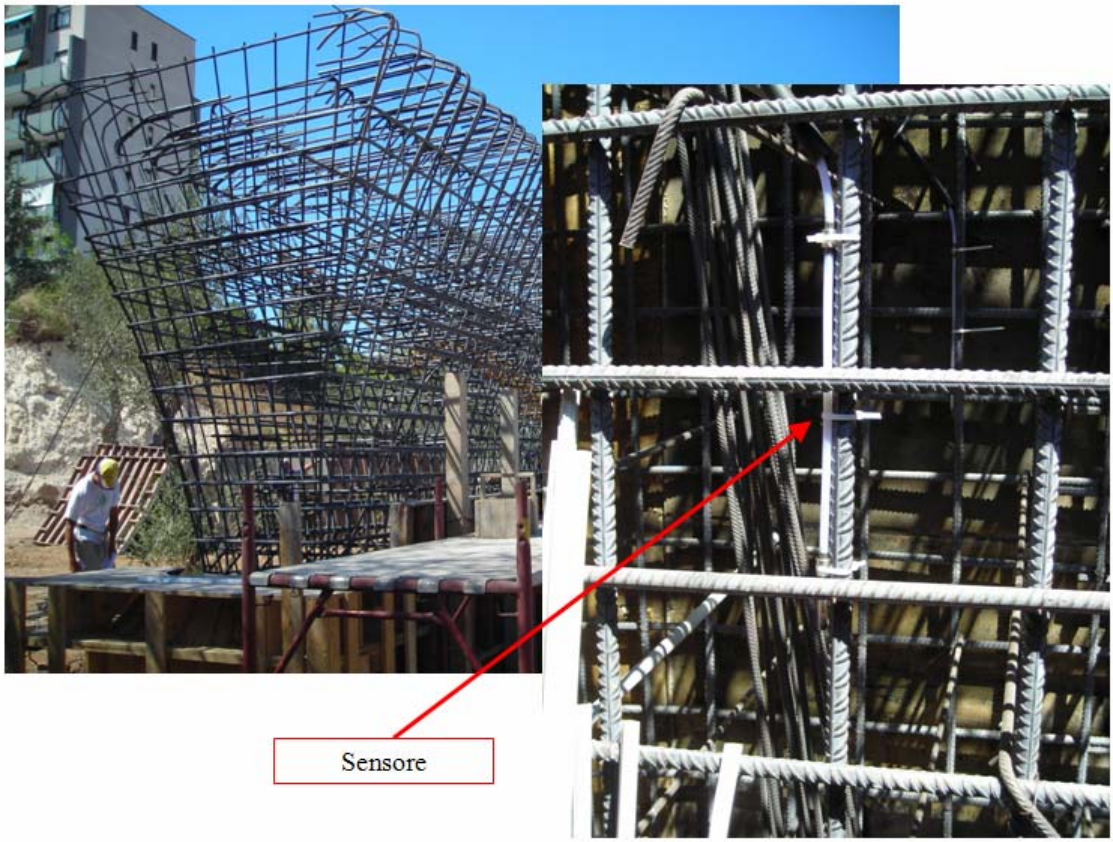


Figura 5 –Installazione sensori sull'armatura lenta della pila

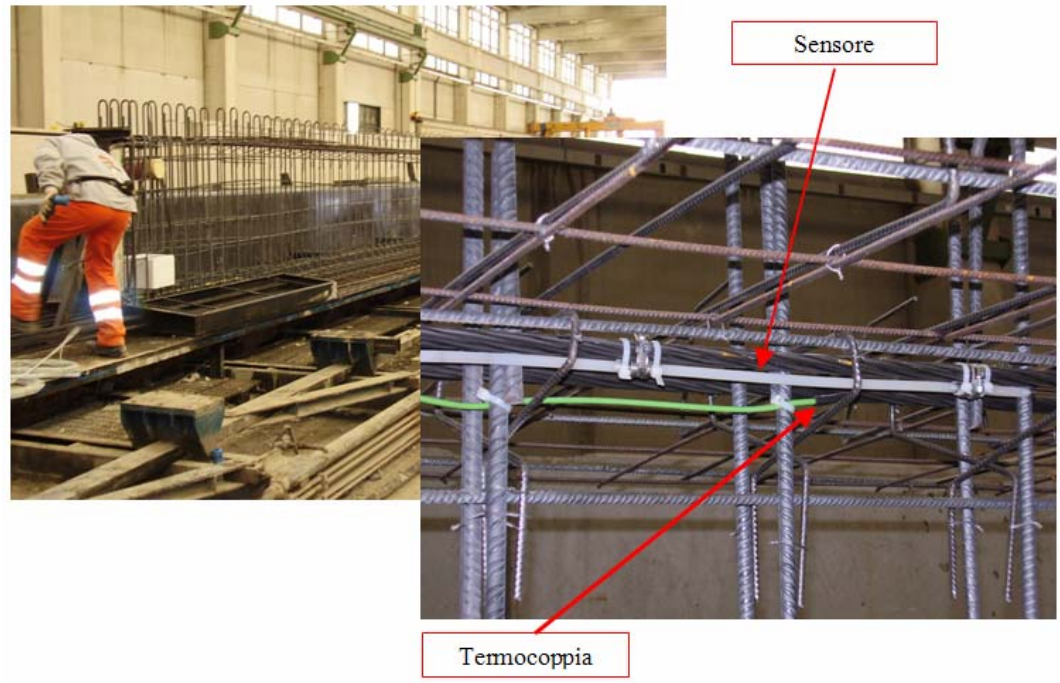


Figura 6 –Installazione sensori e termocoppie sull'armatura da precompresso delle trave

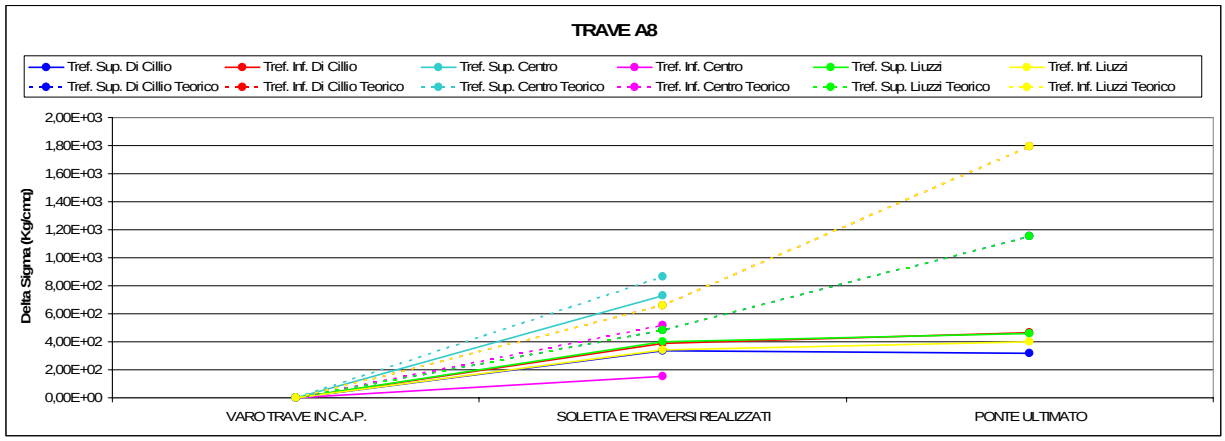


Figura 7 –Confronto, per la trave A8, tra valori teorici e sperimentali degli stati tensionali nelle diverse fasi esecutive

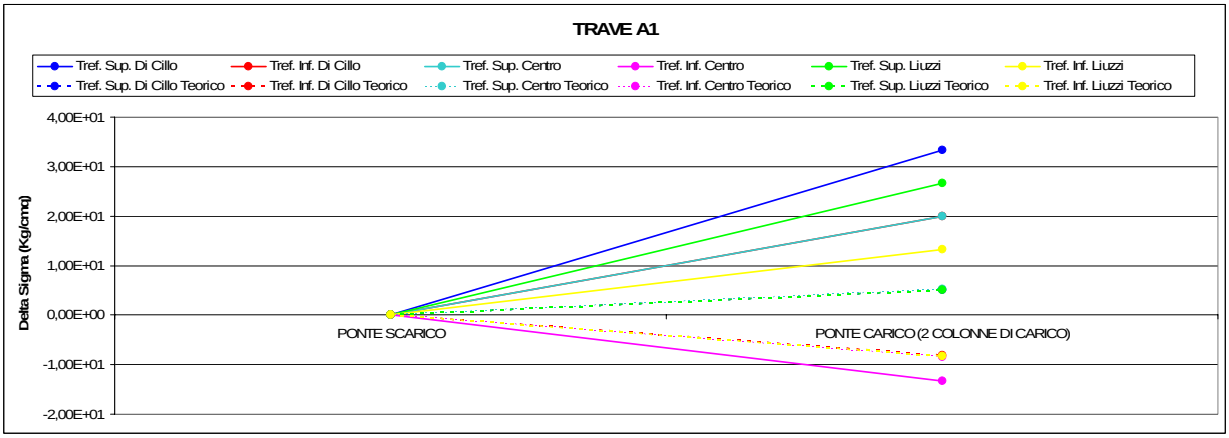


Figura 8 – Confronto, per la trave A1, tra valori teorici e sperimentali degli stati tensionali durante le fasi di carico per il collaudo del ponte.

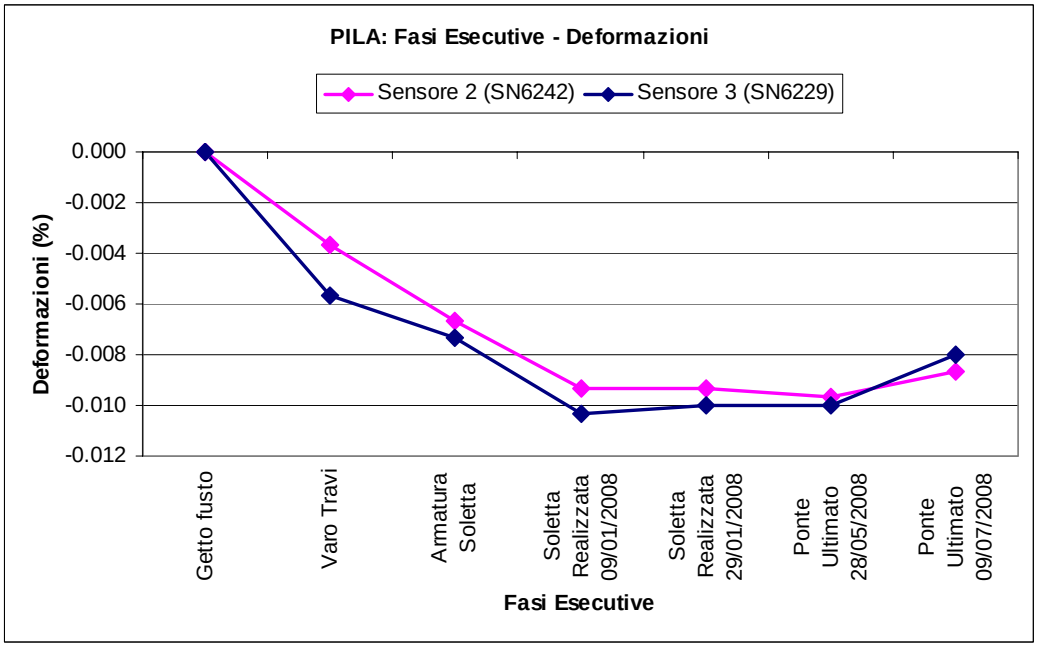


Figura 9 – Valori delle deformazioni per due sensori della pila AB durante le fasi esecutive.

4. LETTURE SPERIMENTALI

4.1 Travi

A valle della fase di installazione dei sensori sulle travi, effettuata in stabilimento prima del montaggio del cassero e del getto, sono state effettuate letture degli stati tensionali sui trefoli stabilizzati nelle seguenti fasi:

- ad installazione del sensore avvenuta (a tesatura del cavo già avvenuta);
- dopo la maturazione e la scasseratura, per verificare la funzionalità del sensore a valle del getto e della vibrazione dello stesso;
- al varo della trave in cantiere;
- al getto dei traversi;
- al getto della soletta;
- ad ultimazione della sovrastruttura;
- . in fase di collaudo dell'opera.

Tutte le letture effettuate hanno permesso di avere passo passo un'effettiva misura dell'impegno strutturale, attraverso la misura della tensione nell'armatura, e di confrontare tali valori con quelli previsti in progetto.

In particolare per tutte le travi strumentate è stato effettuato, per le diverse fasi costruttive, un confronto tra i valori attesi teorici ed i valori sperimentali misurati. Analogo confronto è stato effettuato durante le fasi di collaudo, per le diverse condizioni di carico effettuate. Alcuni grafici di confronto sono riportati in figura 7 e 8.

4.2 Pila

La pila AB è stata strumentata in fase di realizzazione, prima del getto, attraverso l'installazione di sensori di deformazione sulle armature lente. Anche in questo caso, come per le travi, è stato possibile seguire, durante le fasi esecutive, l'evoluzione degli stati di deformazione, e quindi risalire ai valori delle tensioni. In figura 9 sono riprotati alcuni dei valori misurati.

5. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato evidenziato come il monitoraggio strutturale, eseguito con la tecnologia dei sensori a fibre ottiche residenti per annegamento nelle membrature strutturali, consente di sorvegliare nel tempo, con periodicità programmata, la funzionalità statica delle strutture mediante il controllo delle deformazioni e degli spostamenti.

In particolare è stata presentata l'applicazione alle strutture di un ponte di nuova realizzazione. Attraverso l'installazione di sensori, prima del getto, sulle armature lente, per la pila, e sui trefoli, per le travi in c.a.p., si è realizzato un sistema di controllo permanente dell'opera, che ha permesso sia di controllare le fasi realizzative, sia di avere costantemente idea delle condizioni di conservazione dei materiali. In ogni momento, anche a valle di eventi eccezionali, attraverso la semplice lettura dei valori sperimentali, ed il loro confronto con i valori registrati all'entrata in funzione dell'opera, sarà possibile verificare l'integrità strutturale ed eventualmente programmare interventi di manutenzione o riparazione.

BIBLIOGRAFIA

[1] P. G. Malerba (a cura di), Monitoraggio delle strutture dell'ingegneria civile, International Centre for Mechanical Sciences, Collana di Ingegneria Strutturale n° 9, CISM, Udine 1995.

[2] Raymond M. Measures, Structural monitoring with fiber optic technology, Academic Press, 2001.

[3] G. Porco, Valutazione dello stato di consistenza di edifici in c.a. mediante monitoraggio strutturale, Giornata di Studio "Monitoraggio edifici strategici, ponti, gallerie", Napoli, Città della Scienza, 10 novembre 2006.

[4] A. Del Grosso e altri, Monitoring of Bridges and concrete structures with fiber optic sensors in Europe.

[5] G. Uva, F. Porco, G. Porco "Application of ND Protocols to R.C. Structures built at the Beginning of 20th Century. The Assessment of a "Porcheddu Society"'s Structure in the City of Bari", 2° fib Congress, Napoli, 5-8 Giugno 2006.

[6] Condino M., Morrone F., Porco G., Romano D., – Controlli dei livelli di efficienza degli edifici in c.a. mediante il monitoraggio strutturale. Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica. 11° Congresso Nazionale AIPnD, 13-15 Ottobre 2005 Milano.