

Il monitoraggio statico di un ponte in c.a.p. – ovvero non sempre la struttura realizzata conosce le ipotesi di progetto

Dario Foppoli, Emanuele Moretta**

***Amministratore e direttore tecnico di Foppoli Moretta e Associati srl*

Introduzione

L'approccio a qualsiasi problematica strutturale relativa a manufatti esistenti nel settore civile deve essere basato sulla comprensione dei fenomeni in atto. Questa constatazione è tanto banale quanto disattesa nella realtà in quanto in molti casi non sono ancora entrati nell'utilizzo corrente gli strumenti che attualmente sono disponibili e consentono di analizzare sperimentalmente molte delle problematiche relative a strutture esistenti, o ancor meglio di acquisire i dati necessari ad ottimizzare l'analisi effettuata con metodi numerici. Analizzare correttamente con metodi strumentali i fenomeni in atto per comprendere l'evoluzione del comportamento strutturale risulta essenziale al fine di progettare interventi efficaci, efficienti ed in ultima analisi economici (vogliamo sottolineare in particolare la constatazione che l'economicità di un intervento non va valutata a tempo zero, ma prende necessariamente in considerazione sia la corretta rispondenza dell'intervento alle esigenze prestazionali che lo hanno motivato che il suo costo proiettato nel tempo anche in relazione a futuri interventi di riparazione o riprogettazione).

Viene nel seguito descritta una significativa esperienza che a nostro parere rende conto di come un sistema di monitoraggio relativamente semplice (ed in definitiva poco costoso) possa aiutare efficacemente a valutare la discrasia nel comportamento strutturale tra quelle che ragionevolmente erano le ipotesi di progetto e quella che è la struttura effettivamente realizzata a seguito dei possibili (in questo caso anzi probabili) aggiustamenti di cantiere.

Descrizione del manufatto

Oggetto dell'analisi è un ponte stradale in c.a.p. posto in Valmalenco, una valle laterale della provincia di Sondrio, in una zona caratterizzata da alte montagne e da gole molto incise, che consente alla strada provinciale n° 15 di scavalcare il torrente Valdona collegando Sondrio (nel seguito scriveremo "lato Sondrio") e Chiesa in Valmalenco (nel seguito scriveremo "lato Chiesa").

Il ponte (Fig. 1) realizzato negli anni 1980-1982, sostenuto da due alte pile, ha una luce complessiva di 210 m con tre campate rispettivamente di 55, 100 e 55 m. La struttura di impalcato è a cassone, a sezione variabile, con altezza massima di 5,50 m all'innesto sulle pile e 2,20 m in mezzzeria e sulle spalle. Nel complesso il piano stradale ha una pendenza longitudinale uniforme del 4,3%; la sua larghezza complessiva è 9,00 m (7,00 m di carreggiata e due marciapiedi larghi 1,00 m).

L'impalcato del ponte è stato realizzato con la tecnica di getto in opera dei singoli conci in avanzamento a sbalzo dalle pile e successiva solidarizzazione, mediante precompressione, dell'ultimo concio con quelli in precedenza realizzati. In corrispondenza della mezzzeria è presente un giunto il cui modello non risulta noto né individuabile. La relazione di perizia suppletiva riferisce della "messa in opera di uno speciale apparecchio di contatto in chiave che consente una sicura possibilità di manutenzione in quanto asportabile senza interventi sui calcestruzzi". Non è possibile tuttavia desumere dalla perizia altre informazioni in merito all'apparecchiatura installata (caratteristiche costruttive, marca, modello,



Fig. 1 - il ponte oggetto di analisi

ecc..). In corrispondenza di ciascuna delle spalle è presente un giunto di dilatazione costituito da apparecchi di appoggio che consentono lo scorrimento e la rotazione.

Le due pile hanno sezione rettangolare 4,50x5,00 m, sono cave all'interno con spessore di parete variabile e altezza media di circa 40,00 m. Entrambe presentano fondazioni a pozzo di profondità superiore a 15,00 m, diametro di base 13,00 m e diametro in elevazione 8,60 m.

Lo schema statico che si desume dalla relazione di progetto è costituito da due elementi a T incastrati al piede e connessi tra di loro con un carrello posto in corrispondenza della mezzeria del ponte.

Il problema strutturale

L'osservazione del piano stradale evidenzia in corrispondenza alla mezzeria del ponte la presenza di un vistoso avvallamento (Fig. 2) non giustificabile né funzionalmente né strutturalmente.

A seguito di tale riscontro sono state quindi acquisite informazioni da persone che a vario titolo hanno partecipato alla realizzazione del manufatto. E' stato così possibile ipotizzare che nel procedere della costruzione del ponte si sia verificato un disallineamento verticale tra i due sbalzi che si dovevano incontrare in mezzeria a formazione della campata centrale e sia stato quindi necessario intervenire già in corso d'opera nel tentativo di porvi rimedio.

Nella documentazione di progetto e di direzione lavori che è stato possibile analizzare non vi è tuttavia alcun riscontro né di tale evenienza né delle attività intraprese per la sua correzione.

Dalla lettura della relazione del collaudo strutturale, eseguito nel 1983, si evince che durante le prove di carico gli apparecchi di contatto del giunto in mezzeria hanno esaurito la corsa disponibile in tutte le configurazioni che ne comportavano la chiusura; di conseguenza l'entità del carico di una delle prove previste è stata prudenzialmente ridotta al fine di non provocare una inopportuna modifica dello schema statico rispetto a quanto previsto in progetto.

A fronte dei risultati di tali prove di carico il collaudo è stato dapprima emesso con riserva rispetto alla garanzia di corretto funzionamento del giunto in chiave all'esaurimento degli effetti del ritiro e della viscosità del calcestruzzo. La riserva è poi stata sciolta dal Collaudatore che l'anno successivo ha eseguito verifiche visive e strumentali che hanno accertato l'esistenza di un "processo deformativo per fenomeni lenti che si svolge nella direzione delle previsioni teoriche".

L'approccio sperimentale

Sulla base di quanto indicato in precedenza e dell'osservazione sia dell'avvallamento già citato che delle vibrazioni percepite al passaggio degli automezzi

sulla struttura, l'amministrazione provinciale ha richiesto di approfondire lo studio dell'effettivo comportamento strutturale del ponte applicando un approccio sperimentale, ovvero monitorando la variazione nel tempo delle grandezze geometriche significative in alcuni punti della struttura al fine di meglio comprendere il comportamento statico del ponte e di valutare quanto esso si discosti dalle previsioni di progetto.



Fig. 2 - avvallamento del piano stradale



Fig. 3 - particolare del giunto in mezzeria

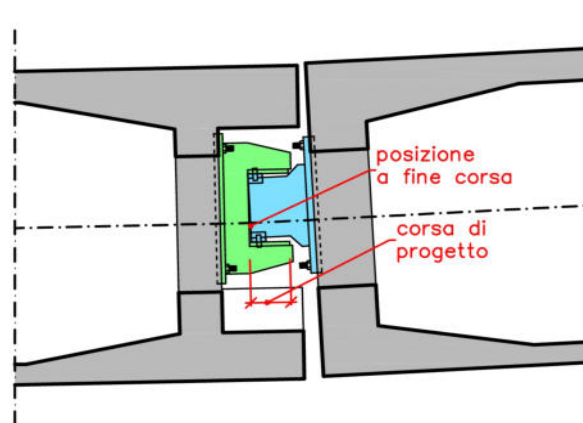


Fig. 4 - rilievo di un apparecchio di contatto (sezione longitudinale)

Preliminarmente è stata eseguita un'ispezione accurata all'interno dei cassoni del ponte, che risultano accessibili e consentono così di effettuare alcune significative osservazioni.

Innanzitutto in alcune zone all'interno del cassone di impalcato sono state osservate tracce indicanti la presenza di acqua meteorica, nello specifico tracce di ristagno in corrispondenza di una spalla (forse conseguenti alla scarsa manutenzione degli scarichi esistenti) e tracce di venute d'acqua dall'estradosso dell'impalcato, sia in corrispondenza delle sigillature di seconda fase dei fori di aggrappo dei casseri, che in corrispondenza di due giunti tra i conci posti a circa 6 m lato Sondrio e 9 m lato Chiesa rispetto al giunto in mezzzeria.

In genere la percolazione di acqua attraverso le fessure del calcestruzzo è un rilevante fattore di degrado in quanto determina il dilavamento dell'idrossido di calcio, con conseguente riduzione dell'alcalinità dell'impasto e perdita della protezione passivante dell'acciaio. Su un ponte stradale in zona di montagna, come quello oggetto di analisi, tale fenomeno viene inoltre esaltato dalla presenza di cloruri utilizzati in funzione antigelo nella stagione invernale.

Nel corso dell'ispezione è stato possibile anche osservare gli apparecchi di contatto in corrispondenza del giunto in mezzzeria compiendo alcune misurazioni di dettaglio; la loro conformazione (Fig. 4) risulta adeguata per operare con un comportamento a carrello tra i due sbalzi conformemente a quanto previsto in

progetto. Tuttavia dei due apparecchi installati quello del lato di monte si presenta "a fine corsa" con una superficie di contatto tra i componenti che evidenzia uno stato di plasticizzazione locale per compressione; la rotazione reciproca tra detti componenti risulta comunque inferiore alla rotazione consentita e non determina il grippaggio del meccanismo. L'apparecchio lato valle non ha invece ancora esaurito la sua corsa, anche se lo scorrimento che è risultato ancora disponibile, pari a circa 5 mm, è sicuramente esiguo rispetto alle attese deformazioni della struttura.

Contestualmente è stato inoltre analizzato il rilievo strumentale del piano stradale, eseguito per punti nell'aprile 2007; si osserva a questo riguardo che le misure rilevate possono essere non esattamente rappresentative della geometria dell'estradosso strutturale a causa di possibili ricarichi non uniformi del manto di asfalto. Il tracciamento del profilo di mezzzeria ha consentito di individuare tre possibili livellette di raccordo (su profili longitudinali di 50, 30 e 15 m rispettivamente) e di evidenziare una significativa variazione della livelletta, nei punti di continuità con il raccordo di 15 m, in corrispondenza dei giunti di ripresa dei conci interessati da fessurazioni all'intradosso.

Scelta dei sensori

Sulla base delle informazioni acquisite è stato quindi possibile individuare i fenomeni cinematici da tenere in considerazione e monitorare:

- il movimento dei giunti di dilatazione corrispondenti

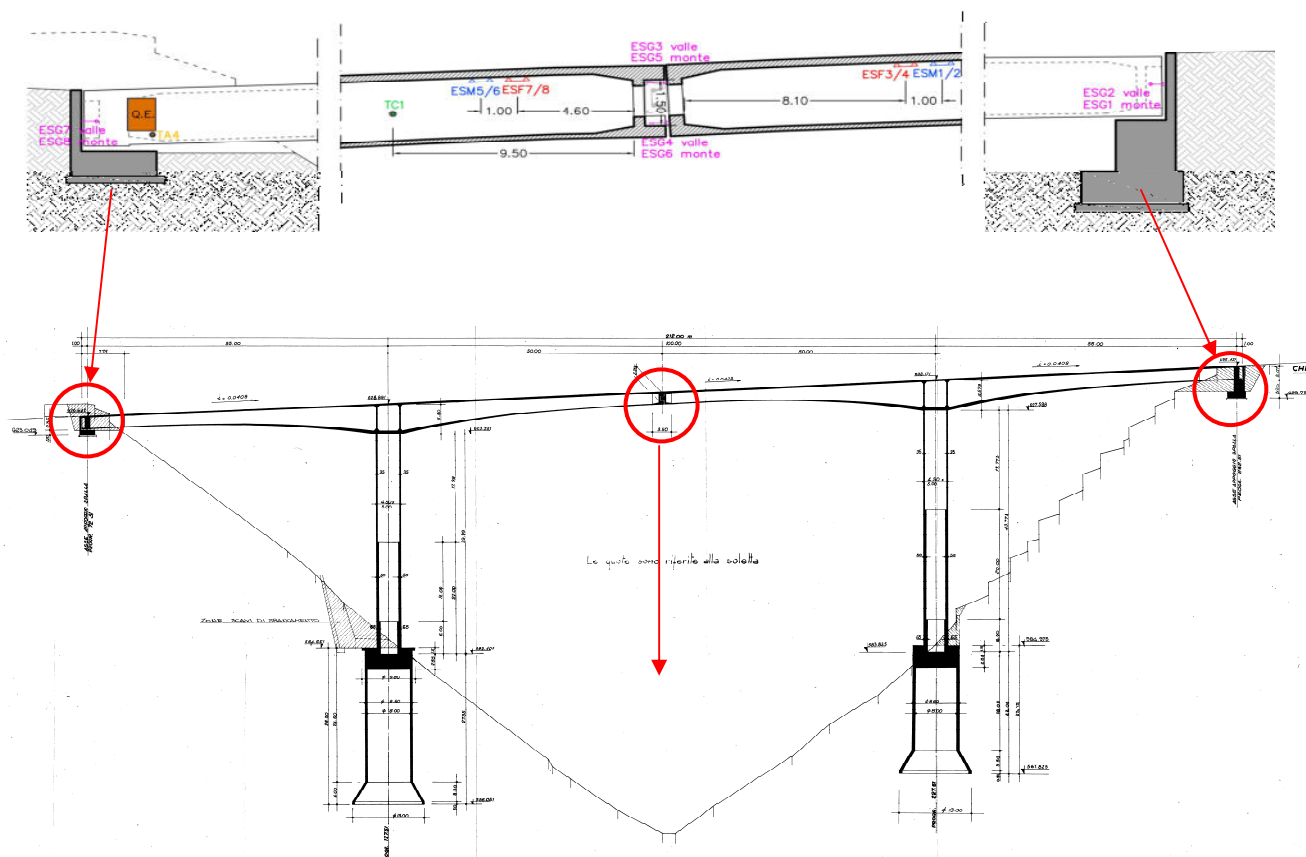


Fig. 5 - layout del sistema di monitoraggio installato

alle spalle del ponte;

- il movimento del giunto di dilatazione corrispondente alla mezzera del ponte;
- i movimenti longitudinali al ponte in corrispondenza delle sopra citate fessure.

I movimenti attesi su una struttura di questo tipo sono necessariamente dipendenti dalla forzante termica per cui tali misurazioni devono essere associate al controllo delle variazioni di temperatura che nel caso specifico hanno riguardato l'ambiente esterno, l'aria all'interno del cassone dell'impalcato e la struttura sul lato di monte e di valle.

Al fine di controllare le variazioni geometriche si è scelto di installare un sistema di monitoraggio strutturale statico con strumentazione fissa messa in opera parte all'interno e parte all'esterno del cassone di impalcato del ponte, in punti non ordinariamente accessibili.

Gli strumenti da installare ed il lay-out generale del sistema di monitoraggio sono stati determinati sulla base di alcune considerazioni che vale la pena sottolineare:

- gli strumenti, dotati di trasduttori potenziometrici, sono robusti, poco sensibili alla polverosità dell'ambiente e di affidabile gestione; la risoluzione di 0,01 mm risulta più che adeguata in relazione all'entità prevista dei fenomeni da controllare;
- stante la mancanza di alimentazione elettrica sul posto, l'estrema esposizione della struttura alle scariche atmosferiche e la mancanza di una specifica protezione, gli strumenti non sono stati collegati all'alimentazione elettrica né ad un data logger e le misure vengono acquisite con modalità discontinua;
- i trasduttori utilizzati risultano comunque idonei ad una eventuale futura automatizzazione delle letture.

Descrizione del sistema di monitoraggio installato

Nel suo complesso il sistema di monitoraggio (Fig. 5) è costituito da:

- 4 basi di misura per il controllo della deformazione del calcestruzzo;
- 4 basi di misura per il controllo della variazione di apertura delle lesioni;
- 8 basi di misura per il controllo della variazione di apertura dei giunti;
- 2 + 2 termosonde per il rilievo della temperatura dell'aria e del calcestruzzo.

Per controllare le variazioni di apertura delle lesioni e dei giunti strutturali sono stati utilizzati sensori di tipo potenziometrico lineare, resi solidali alla struttura attraverso barre filettate Ø 8 mm fissate con resina epossidica. Gli strumenti installati in corrispondenza delle fessure dell'impalcato hanno corsa di 25 mm (± 12.5 mm) e risoluzione pari a 0,01 mm, gli strumenti installati in corrispondenza dei giunti hanno corsa di 100 mm (± 50 mm); tutti i trasduttori utilizzati hanno

linearità 0.25 % / 0.15% del f.s.; risoluzione¹ potenzialmente infinita e ripetibilità² < 0.01 mm.

Per controllare l'apertura dei giunti di dilatazione lato Sondrio e lato Chiesa sono stati installati nel complesso 4 strumenti ripartiti tra il lato di monte ed il lato di valle; per controllare l'apertura del giunto di dilatazione centrale sono stati installati 4 strumenti ubicati nella parte alta e nella parte bassa del cassone, anch'essi in corrispondenza del lato di monte e di valle.

Per controllare le fessure individuate all'intradosso dell'impalcato e già descritte in precedenza sono stati installati 4 strumenti, accoppiati per ogni fessura, in prossimità dei quali sono stati installati altrettanti strumenti "bianchi" posti in zona non fessurata allo scopo di cogliere le deformazioni dell'impalcato.

Per rilevare le variazioni di temperatura sono state utilizzate termosonde Pt100 con temperatura operativa da -50° a +200°C; in parte posizionate in aria all'interno ed all'esterno dei cassoni di impalcato ed in parte posizionate in fori appositamente realizzati nel corpo della struttura ad una profondità di 10 cm rispetto alla superficie interna dei cassoni.

Al fine di agevolare l'esecuzione delle letture, i cavi che trasportano i segnali degli strumenti sono stati raccolti in un quadro con commutatore ubicato in posizione facilmente accessibile all'esterno del cassone di impalcato in corrispondenza della spalla lato Sondrio. La lettura dei dati avviene per mezzo di una centralina manuale portatile di eccitazione che è collegata al morsetto connesso allo strumento.

La strumentazione è stata installata e collaudata nel giugno 2011, quando è stata anche effettuata la lettura di zero. Nel primo anno di esercizio le letture sono state compiute con cadenza mensile; successivamente sono proseguite con cadenza trimestrale. I dati acquisiti sono stati validati, diagrammati ed analizzati.

Andamento delle temperature

I dati delle temperature esterne acquisiti nel corso del monitoraggio variano da -2,5 a +22,7 °C. Le temperature rilevate in interno, tanto in ambiente quanto nei paramenti della struttura, seguono significativamente il medesimo andamento (Fig. 6). Il gradiente termico delle temperature della struttura rispetto a quelle esterne si mantiene nel range ± 5 °C e quello rispetto alla temperatura interna si mantiene nel range ± 2 °C; anche le differenze di temperatura tra le due pareti - la parete di valle è più calda della parete di monte - sono contenute tra 1 e 3 °C.

Comportamento dei giunti strutturali

I dati riguardanti gli spostamenti dei giunti delle spalle mostrano che il comportamento stagionale dei due

¹ sinonimo di sensibilità secondo I.S.R.M. Suggested Methods

² sinonimo di precisione secondo I.S.R.M. Suggested Methods

giunti non risulta in fase tra di loro (Fig. 7). In particolare il giunto della spalla lato Sondrio mostra variazioni di apertura in fase con la variazione della temperatura: sulla base delle convenzioni di installazione degli strumenti ciò significa che all'aumentare della temperatura il giunto si apre, mostrando cioè un comportamento contrario a quanto atteso sulla base di considerazioni strutturali. Al contrario il giunto della spalla lato Chiesa segnala variazioni di apertura in opposizione di fase con le variazioni di temperatura, ovvero si chiude all'aumentare della temperatura. Nel complesso ciò denota uno spostamento pressoché rigido di tutto l'impalcato del ponte in direzione Chiesa all'aumentare delle temperature, che viene poi recuperato al successivo abbassamento delle stesse.

Di particolare interesse è l'osservazione (Fig. 8) che gli spostamenti misurati su entrambe le spalle sono ottimamente correlabili in modo lineare con la temperatura media rilevata all'interno della struttura come appare dall'elevato valore di R^2 ($=0,996 \div 0,997$) calcolato. Lo spostamento complessivo dell'impalcato del ponte risulta quindi direttamente in relazione con la forzante termica senza presentare fenomeni di deriva nel tempo. Tuttavia la differente inclinazione delle rette di interpolazione di Fig. 7 segnala un'anomalia rispetto al comportamento atteso che verrà nel seguito opportunamente commentata.

Stante la particolare situazione della struttura risulta degna di nota l'osservazione dei dati rilevati in corrispondenza del giunto centrale (Fig. 9). In questo caso appare immediatamente evidente che gli spostamenti rilevati dagli estensimetri posti sul lato di valle sono inversamente correlabili con gli andamenti termici; ciò segnala che il giunto di valle appare correttamente funzionante.

Viceversa il comportamento del giunto di monte non risponde correttamente alla forzante termica, e gli strumenti rilevano che gli spostamenti misurati sui lati superiore ed inferiore risultano in qualche caso addirittura discordanti: il valor medio delle letture non si discosta significativamente dallo 0 e le misure stesse appaiono conseguenti piuttosto a rotazioni della sezione trasversale con centro posto nel componente metallico di giunzione, che quindi non funziona in modo corretto.

In questo caso le interpolazioni lineari tra gli spostamenti del giunto centrale e le temperature interne (Fig. 10), confermano che solamente le misure degli estensimetri posti sul lato di valle sono adeguatamente correlabili, anche se in questo caso la correlazione risulta più scadente rispetto a quella ottenuta nel caso dei giunti sulle spalle ($R^2 = 0,896$) evidentemente a causa del malf funzionamento del giunto di monte.

Complessivamente i dati acquisiti confermano che il giunto metallico di monte è costantemente a fine corsa di chiusura, e non si apre nemmeno a seguito della riduzione di lunghezza dell'impalcato in corrispondenza alle basse temperature invernali.

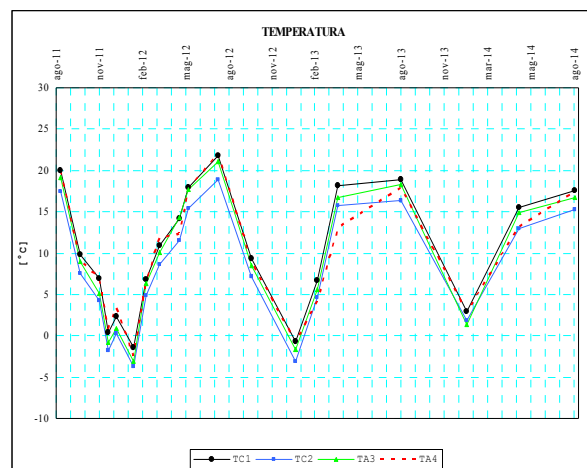


Fig. 6 - andamento delle temperature
(TA4 esterno; TA3 interno; TC1, TC2 struttura)

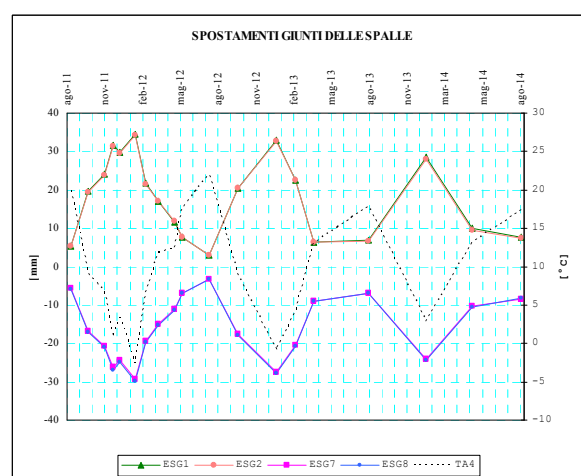


Fig. 7 - spostamento dei giunti delle spalle

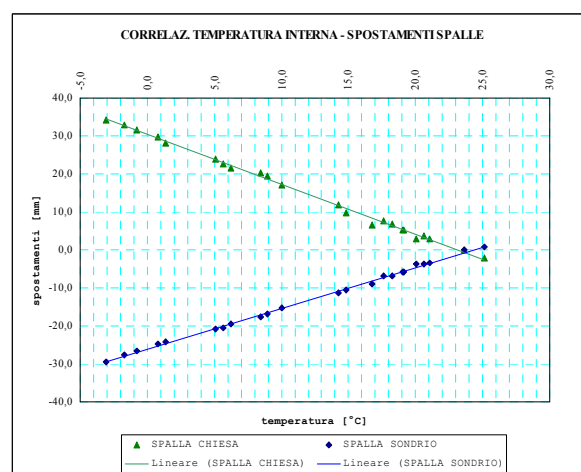


Fig. 8- correlaz. temperatura interna/spostamenti spalle

I dati acquisiti consentono di determinare la variazione massima di temperatura nel periodo di riferimento (28,2 °C) e la corrispondente variazione di lunghezza dell'impalcato del ponte che, tenendo conto del fatto che le dilatazioni misurate risultano di segno opposto, risulta nel complesso:

$$\Delta L_{\text{misurato}} = 36,46 - 30,25 - 1,23 = 4,973 \text{ mm}$$

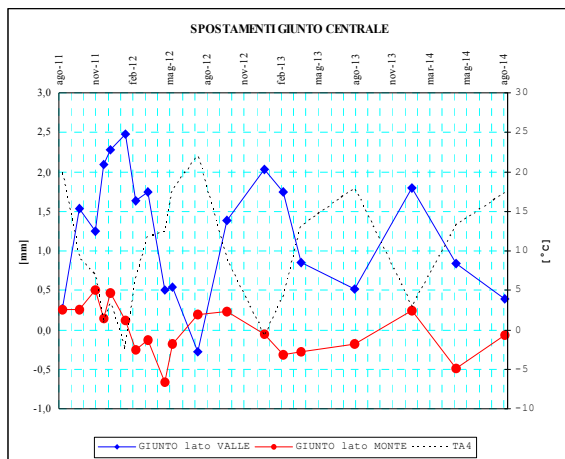


Fig. 9 - spostamenti del giunto centrale

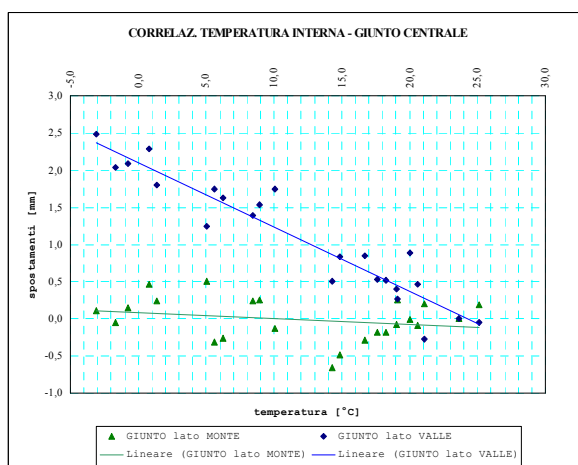


Fig. 10 – correlaz. temperatura interna/ spostamenti giunto centrale

Tenendo conto dell'inefficienza del giunto centrale la variazione teorica della lunghezza dell'impalcato risulta invece:

$$\Delta L_{\text{teorico}} = \alpha L_{\text{impalcato}} \Delta T = 59,23 \text{ mm.}$$

Ipotizzando, in prima approssimazione, che gli strati geologici non risentano di variazioni geometriche conseguenti alla temperatura questa discordanza segnala l'anomalia nel comportamento della struttura rispetto alle ipotesi di calcolo, che può essere giustificato solamente ipotizzando un rilevante effetto conseguente alle dilatazioni impedito dell'impalcato.

Risulta quindi confermato che:

- il giunto centrale è grippato, a fine corsa di chiusura, e non si apre nemmeno a seguito di riduzione della lunghezza di impalcato del ponte per le basse temperature invernali; non presenta quindi comportamento "a carrello", come ipotizzato in fase di progetto, bensì "a cerniera"; il comportamento del giunto determina di conseguenza una mappatura delle sollecitazioni nel ponte difforme da quella ipotizzata in fase di progetto;
- le variazioni di temperatura generano autotensioni assiali - equilibrate ed opposte - nelle sezioni di impalcato tra le due pile (di compressione per

aumento di temperatura) dovute alla dilatazione impedita per la presenza delle pile stesse;

- la differente rigidità delle due pile giustifica il differente spostamento orizzontale a seguito delle autotensioni termiche di impalcato con conseguente traslazione del ponte verso Chiesa all'aumentare della temperatura.

Comportamento delle fessure

Le deformazioni locali conseguenti alle tensioni interne causate dalla presenza dell'iperstatica del giunto di campata sono state rilevate dagli estensimetri "bianchi" posti in opera sulla struttura integra in prossimità delle fessure oggetto di osservazione. Si rilevano movimenti in opposizione di fase rispetto alla temperatura (Fig. 11) con riduzione della lunghezza - indice di maggiore compressione - all'aumentare della stessa. Tale informazione è del tutto congruente con le misure di spostamento dei giunti.

Anche in questo caso la correlazione lineare tra gli spostamenti appare buona (Fig. 12) come risulta dai valori di $R^2 (=0,888 \div 0,758)$.

Per analizzare i dati forniti dagli strumenti installati a cavallo delle fessure vengono determinate le variazioni di apertura di dette fessure al netto delle deformazioni attribuibili alla struttura (misurate dagli strumenti "bianchi") sulla base della formula seguente:

$$a_f = l_e - l_m \frac{b_e}{b_m} \text{ dove}$$

dove:

- l_m = lettura dell'estensimetro su struttura integra
- b_e = lunghezza della base dell'estensimetro sulla fessura
- b_m = lunghezza della base dell'estensimetro sulla struttura integra

Si sono assunte le seguenti ipotesi:

- che la sollecitazione locale sia sempre contenuta nel campo elastico della resistenza dei materiali ivi presenti;
- che la variazione di sollecitazione interna e la variazione di rigidità strutturale locale siano trascurabili tra le due posizioni strumentate (estensimetro "bianco" ed estensimetro su corrispondente fessura).

Analizzando quindi l'apertura così determinata delle fessure si osserva (Fig. 11) che esse sono soggette a cicli di apertura e chiusura di entità massima rispettivamente pari a 0,1 mm e 0,2 mm. Anche se numericamente limitata, tale entità dell'apertura indica che in entrambe le sezioni viene superato lo stato limite di decompressione all'estradosso. I movimenti risultano in opposizione di fase rispetto alla forzante termica: all'aumentare della temperatura si ha infatti una maggiore iperstatica di compressione (o minore

iperstatica di trazione) e quindi una chiusura della lesione.

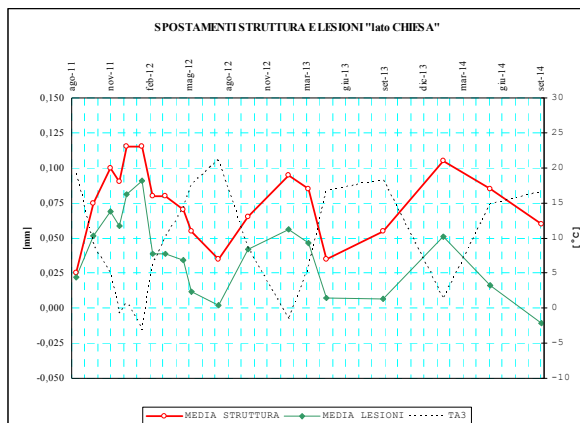


Fig. 11 - misure estensimetri lato Chiesa

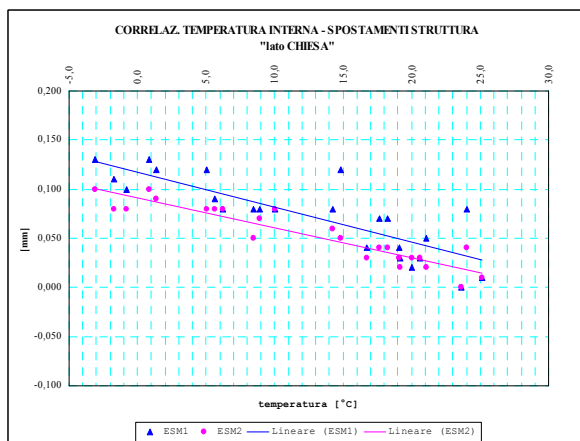


Fig. 12 - esempio di correlazione temperatura interna – struttura integra lato Chiesa

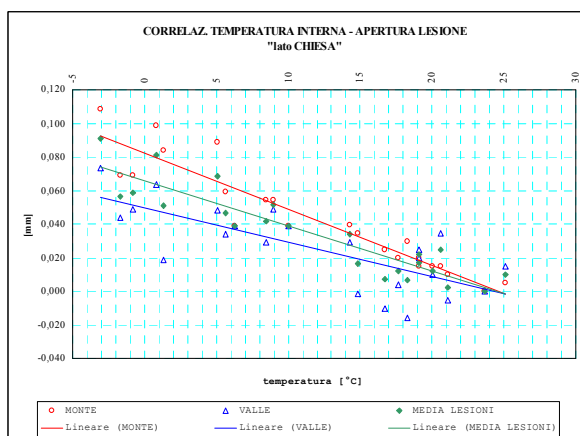


Fig. 13- correlazione temperatura interna /apertura lesione lato Chiesa

La correlazione tra entità di apertura e forzante termica (Fig. 13) non appare in questo caso totalmente soddisfacente ($R^2 = 0,560 \div 0,877$); tale situazione può indicare che le azioni interne responsabili delle aperture si combinano con modalità correlate ad altre entità

(gradienti di temperatura monte-valle, superiore-inferiore, vento, ecc...) oppure che il fenomeno non è stabile e presenta una deriva.

Valutando empiricamente l'entità dei movimenti misurati si osserva che la fessura lato Chiesa presenta oscillazioni con ritorno sostanziale alla misura di zero, con misure di entità estremamente limitata e con recuperi pressoché completi anche per cicli termici di minore ampiezza; la fessura lato Sondrio pare invece evidenziare un trend di apertura nel tempo anche se tale osservazione non può essere confermata mediante valutazioni numeriche più oggettive.

E' possibile tuttavia per la lesione lato Sondrio confrontare coppie di valori caratterizzati da temperature molto vicine in modo da escludere l'influenza di fenomeni di origine termica: confrontando le letture del 17.05.12 e del 06.05.14 si rileva un incremento di soli 0,015 mm negli ultimi 2 anni. Tale misura non è eccessiva rispetto alla duttilità locale della sezione e non desta preoccupazioni immediate, anche se non va trascurato il già citato danneggiamento progressivo causato alle armature dall'acqua di infiltrazione. Vale la pena di osservare che le armature di precompressione, particolarmente sensibili all'aggressione per cloruri, sono comunque ulteriormente protette dalle guaine di post-tesatura e dalle iniezioni di solidarizzazione dei trefoli.

Conclusioni

Il sistema di monitoraggio strutturale installato sulle strutture del ponte sul Torrente Valdome e gestito per tre anni acquisendo i dati di temperatura e di spostamento in corrispondenza dei punti singolari ritenuti più rilevanti (ovvero in corrispondenza dei giunti strutturali e delle fessure) ha consentito di compiere alcune significative osservazioni.

L'apparecchio di contatto del giunto in mezzzeria risulta a fine corsa di chiusura, e non si apre nemmeno a seguito di riduzione della lunghezza di impalcato del ponte per le basse temperature invernali: ciò determina una mappatura delle sollecitazioni nel ponte difforme da quella ipotizzata in fase di progetto, che richiede pertanto specifiche attenzioni.

Tutto l'impalcato trasla rigidamente, con spostamenti nell'ordine di 3,5 cm, verso Chiesa in Valmalenco nella stagione calda in quanto l'allungamento termico della campata centrale, associato al grippaggio dell'apparecchio del giunto, impone alla sommità delle pile spostamenti che risultano dissimmetrici a causa della differente flessibilità delle stesse.

Le fessure presenti all'intradosso dell'impalcato sono soggette a cicli di apertura e chiusura di entità massima prossima a 0,1 mm per quella lato Chiesa in Valmalenco e 0,2 mm per quella lato Sondrio rispettivamente; la prima appare stabile mentre la seconda presenta movimenti maggiori e risposta locale sensibilmente scorrelata rispetto alla forzante termica.

Il sistema di monitoraggio descritto ha consentito di individuare in modo soddisfacente il comportamento complessivo del ponte soggetto alla forzante termica stagionale che risulta marcatamente difforme rispetto a quanto assunto a suo tempo in progetto risultando quindi meritevole di speciale attenzione.

Ringraziamenti

Per le informazioni utilizzate e per la disponibilità dimostrata si ringrazia l'Amministrazione Provinciale di Sondrio, committente della presente ricerca, ed in particolare il dott. Quirino Gianoli e l'ing. Claudio Bolgia del Settore Lavori Pubblici.

Bibliografia

- ISRM suggested methods, *Rock characterization Testing and Monitoring*, ed E.T. Brown, London, 1981
- Bartoli, G. Blasi C., De Robertis N., Foraboschi P., *Metodi di elaborazione dei dati provenienti da sistemi di monitoraggio: il caso della cupola di Santa Maria del Fiore*, in Bollettino degli ingegneri, ed. Collegio degli ingegneri della Toscana, Firenze gen-feb. 1991 n. 1-2 pp. 9-13
- Bartoli, G. Blasi C., De Robertis N., Foraboschi P., Gusella V., *Preliminary analysis of the data recorded by actual monitoring system of the Brunelleschi's Dome in Florence: interpretations of the recorded data*, 2nd international conference on structural repair and maintenance of historical buildings: STREMA 91 ed. C.A. Brebbia, Computational Mechanics publications; Southampton, Boston (UK) april 1991 pp. 209-221
- Malerba P.G. (a cura di) *Monitoraggio delle strutture nell'ingegneria civile*, ed. International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, 1995
- Chiarugi, P. Foraboschi P., *Monitoraggio ed identificazione della cupola di Santa Maria del Fiore, una metodologia per la conservazione e la salvaguardia*, in L'Edilizia, ed. De Lettera, luglio/agosto 1996 n. 7/8 pp. 20-42
- AA.VV., *Controllo e monitoraggio delle strutture*, atti 16° convegno Associazione Tecnologi per l'Edilizia (ATE), Politecnico di Milano, ottobre 1996
- Bertaccini B., *Prevedere il comportamento strutturale della cupola di Santa Maria del Fiore tramite modelli statistici di analisi dei dati rilevati dal sistema di monitoraggio*, Il monitoraggio delle

grandi fabbriche storiche, ed Mandragora, Firenze, 2012

- Armanasco A., Foppoli D., *Diagnostic tests vs structural models: the utility of the comparison*, Atti 11th International conference on non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage (Art'14), Madrid, 2014