



Analysis of the crack patterns of a prestressed concrete box girder bridge

Monitoraggio integrato delle fessure in opere in calcestruzzo armato precompresso

Rebecca ASSO^a, Arianna BERTONE^b, Manuel GARRAPA^b, Davide MASERA^b, Giuseppe C. MARANO^a

^a DISEG - PoliT0

^b Masera Engineering Group S.r.l.

Keywords: Concrete Box Girder Bridges, Cracks Monitoring, Construction Phases.

Parole chiave: Ponti a cassone in calcestruzzo precompresso, Quadri fessurativi, Monitoraggio, Fasi costruttive.

ABSTRACT

One of the main deterioration phenomena in concrete bridges that is often detected during inspections consists in crack patterns.

Crack monitoring represents of the most suitable means to identify the causes (that depend on the elements involved and on the direction of the cracks) and the evolution over time of cracks. National guidelines identify a scale of gravity for each crack, where at the most critical positions there are diagonal cracks in beams, slabs and pier cap, and transversal cracks in the beams, cross beams, slabs and arches. In fact, all these defects can depend on deficiencies related to the shear reinforcement, and must be carefully ensured because shear collapse is fragile and immediate.

The case study is a prestressed concrete box girder bridge with a length of 680 meters in which a 45 ° crack was observed during an inspection in a segment at about a quarter of the span. A Monitoring system composed by a strain gauge and a displacement sensor was set up on the detected crack, together with a temperature sensor .

The analysis of monitoring data was conducted using the Gaussian Process, showing an evolutionary behavior of the crack: the data of the second and of the third month of monitoring are shifted in terms of mean and dispersion compared to the first month. A Finite Element Model was then developed to support data analysis and to identify the possible causes that concurred to the crack formation.

Comparing the identified stresses with the regulatory limits for the state of cracking, is possible to associate the cause of the crack with the construction phases of the structure (cantilever construction).

Finally, using the FE model, it was possible to identify the lower and the upper limits of deformation of the lower edge of the deck subjected to the frequent load combination. The limits are respected in the case of the data collected during the first month of monitoring, but they are exceeded in terms of mean and dispersion during the second and the third month.

SOMMARIO

Durante le ispezioni visive dei ponti in calcestruzzo sovente si rileva la presenza di quadri fessurativi. Il mezzo più idoneo per individuarne le cause, che dipendono dall'elemento coinvolto e dalla direzione della fessura, è un monitoraggio mirato al tracciamento della sua ampiezza nel tempo. Le fessure diagonali presenti in elementi come travi, solette o pulvini e le fessure trasversali che si sviluppano in elementi come travi, traversi, solette e archi, rientrano tra le lesioni più critiche secondo le Linee Guida 2020. Entrambi i difetti possono dipendere da una carenza

dell'armatura a taglio. La loro presenza deve essere trattata in maniera accurata, essendo il collasso a taglio di tipo fragile (quindi immediato).

Il caso studio è un viadotto continuo di 680 metri, formato da due impalcati a cassone in calcestruzzo precompresso, su cui, durante un'ispezione ordinaria, è stata individuata una fessura a 45° a circa un quarto della luce della campata. Sull'opera è stato predisposto un sistema di monitoraggio realizzato tramite un sensore di spostamento a cavallo della fessura, uno strain gauge e un sensore di temperatura.

L'analisi dei dati, condotta tramite gli algoritmi di Regressione Gaussiana, ha delineato un comportamento evolutivo della fessura: al secondo e al terzo mese di monitoraggio si ha uno shift, in termini di media e dispersione, rispetto al primo.

A supporto dell'analisi dei dati e della ricerca delle cause della fessurazione del viadotto, è stato sviluppando un modello agli elementi finiti. Relazionando l'andamento delle tensioni ai limiti normativi per lo stato di fessurazione, emerge che è possibile associare la causa delle fessure presenti alle fasi costruttive dell'opera (costruzione a sbalzo per conci successivi).

Infine, tramite il modello agli elementi finiti, si sono identificati i limiti tensionali inferiore e superiore di deformazione del lembo inferiore dell'impalcato sottoposto a carichi da Normativa per la combinazione frequente. I limiti sono rispettati dai dati raccolti durante il primo mese di monitoraggio, ma vengono oltrepassati, in termini di media e dispersione, durante il secondo e il terzo mese.

1 INTRODUZIONE

La sorveglianza e il monitoraggio sono una parte fondamentale della procedura per la gestione della sicurezza dei ponti e dei viadotti esistenti.

Le Linee Guida 2020 descrivono in maniera accurata i fenomeni di degrado da rilevare durante le ispezioni e ne individuano i parametri che consentono di valutarne l'entità.

Tra i difetti più critici degli elementi in c.a. e c.a.p. rientrano le fessure diagonali (sulle pareti verticali di fondazioni, pile, pulvini, spalle e travi e sulle superfici orizzontali delle solette) e le fessure trasversali (presenti in travi, traversi, solette e archi). In entrambi i casi le fessure potrebbero essere provocate da carenze legate all'armatura resistente a taglio. Essendo il collasso a taglio di tipo fragile, è necessario studiare accuratamente le cause di questi quadri fessurativi. L'analisi dei dati di monitoraggio relativi all'ampiezza delle fessure nel tempo, supportata da un modello agli elementi finiti, rientra tra i mezzi più idonei per la trattazione del fenomeno.

Nell'articolo verrà trattato un caso studio di un viadotto in c.a.p. fessurato, per il quale è stata svolta un'attività di monitoraggio ed è stato sviluppato un modello agli elementi finiti a seguito di un'ispezione straordinaria.

2 LA SORVEGLIANZA E IL MONITORAGGIO SECONDO LE LINEE GUIDA 2020

La procedura per la gestione della sicurezza dei ponti esistenti, illustrata nelle Linee Guida 2020, si compone di tre parti: il censimento e la classificazione del rischio, la verifica di sicurezza, la sorveglianza e il monitoraggio. A partire dal

censimento delle opere, tramite un approccio generale multilivello, si determina la Classe di Attenzione dell'opera sulla base della quale si procede alla verifica della sicurezza. Si ottiene così una conoscenza a livello territoriale dei ponti esistenti che permette di programmare, in base alle priorità, le operazioni di sorveglianza e monitoraggio, di verifica e di intervento.

La sorveglianza ed il monitoraggio delle opere consentono la valutazione della loro condizione in termini di sicurezza strutturale, di pericolosità ambientale e di efficienza degli apparati ausiliari. L'analisi di questi aspetti è fondamentale per migliorare la conoscenza dell'opera ed attribuirgli la Classe di Attenzione più idonea, consentendo una pianificazione degli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria.

Secondo quanto riportato nelle Linee Guida, tra gli strumenti operativi del sistema di sorveglianza e monitoraggio si hanno le ispezioni periodiche ordinarie, le ispezioni straordinarie e il monitoraggio strumentale.

Le ispezioni ordinarie sono eseguite con cadenza definita in funzione della Classe di Attenzione. Si tratta di ispezioni di tipo visivo, condotte con l'ausilio di strumenti semplici come martelli e strumenti di misura, durante le quali viene rilevata la geometria e lo stato di conservazione dell'opera. I difetti riscontrati vengono riportati su apposite "schede di difettosità", differenziate in funzione del tipo di elemento e del materiale di realizzazione, corredate da un rilievo fotografico.

Nel caso in cui vengano riscontrate criticità durante le ispezioni ordinarie, per approfondire la conoscenza dei fenomeni di degrado e della condizione strutturale del ponte, si prevedono ispezioni straordinarie opportunamente

accompagnate da indagini non distruttive e/o sistemi di monitoraggio strumentale.

3 IL CASO STUDIO

3.1 Descrizione dell'opera

Il caso studio è un viadotto da 18 campate, per una lunghezza totale di 680 m, costruito a sbalzo per conci successivi. Lo schema statico è di trave continua semplicemente appoggiata ad altezza costante e sezione trasversale a cassone.

L'opera è costituita da due impalcanti separati ed affiancati per i due sensi di marcia aventi un'altezza costante di 2.20 m, le cui campate esterne hanno una lunghezza di 20 m, mentre le 16 campate interne hanno 40 m di luce.

Ciascun impalcato è formato da due corsie di 3.75 m per il transito, una banchina di 3.50 m per la sosta e un cordolo esterno da 0.60 m sormontato da un sicurvia di tipo metallico ad alto assorbimento di energia.

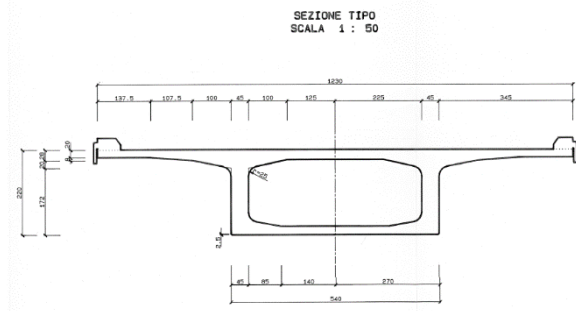


Figura 1. Sezione tipo dell'impalcato del caso studio

Su ogni pila e spalla sono presenti due appoggi in acciaio politetrafluoroetilene, di cui uno unidirezionale ed uno multidirezionale, per consentire sia movimenti di traslazione che di rotazione.

Le pile hanno una sezione circolare piena di 3.00 m di diametro e sono sormontate da un pulvino a calice su cui appoggia l'impalcato. Le fondazioni sono su pali di grandi diametro con ϕ 1500 mm.

3.2 Sistema di costruzione

Il sistema di costruzione adottato per la realizzazione del viadotto è quello a sbalzo per conci successivi in avanzamento simmetrico dalla pila verso la mezzeria della campata. I segmenti vengono prodotti in officina con il metodo dei "conci coniugati" e posti in opera mediante carroponete. Ciascun nuovo concio viene incollato per mezzo di resine e collegato tramite barre tipo

Dywidag al concio precedente già in opera. Il procedimento si ripete fino alla chiusura della mezzeria di ogni campata mediante il getto in opera del concio in chiave a cui fa seguito la precompressione globale dell'impalcato.

Le principali fasi costruttive dell'impalcato, descritte nella relazione di calcolo, risultano essere quindi le seguenti:

- 1) Prefabbricazione dei conci in stabilimento;
- 2) Posa su pila ed assemblaggio con barre provvisorie del pacchetto costituito dai 3 conci di diaframma;
- 3) Montaggio alternato dei conci mediante autogru con solidarizzazione con barre provvisorie e successivo infilaggio e tesatura dei cavi di precompressione superiori;
- 4) Getto del concio di sutura tra le stampelle;
- 5) Infilaggio e tesatura dei cavi inferiori;
- 6) Iniezione delle guaine.

3.3 Stato attuale dell'opera

Per una valutazione accurata delle condizioni di sicurezza statica dell'opera è stata eseguita un'ispezione straordinaria. L'ispezione ha permesso di identificare le posizioni, le estensioni e le dimensioni delle fessure presenti.

In particolare, è emersa la presenza di una fessura continua in intradosso in corrispondenza del quarto concio della seconda campata (a circa un quarto della luce), sia lato interno che lato esterno del cassone.

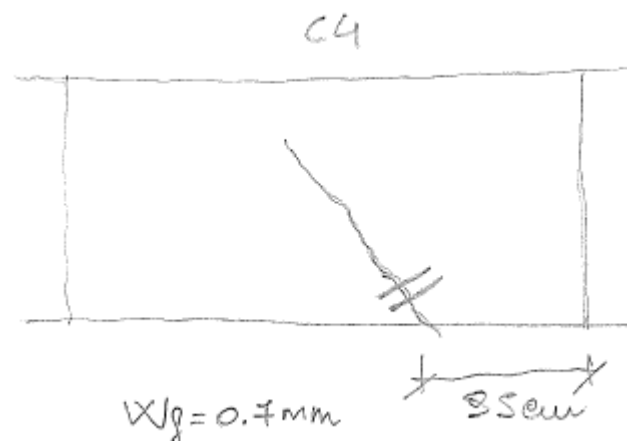


Figura 2. Disegno di una delle fessure rilevate durante l'ispezione

4 IL MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI

Lo sviluppo di un modello agli elementi finiti ha permesso lo studio degli stati tensionali all'intradosso dei conci in cui sono localizzate le fessure. Dal momento che i quadri fessurativi rilevati potrebbero derivare da azioni critiche in stato di esercizio o dai carichi agenti in fase di costruzione del viadotto, durante le analisi la struttura è stata sottoposta a queste condizioni di carico.

4.1 Caratteristiche dei materiali

Le caratteristiche dei materiali e le relative resistenze adottate nei calcoli sono state desunte dalla relazione di calcolo originaria. Il particolare, per il cassone si ha:

- calcestruzzo con resistenza caratteristica a compressione a 28 giorni $R_{ck} \geq 45$ MPa;
- acciaio armonico da precompressione in trefoli $\phi 0.6''$ con tensione caratteristica a carico massimo f_{ptk} pari a 1800 MPa;
- armatura lenta longitudinale e trasversale FeB44K con tensione caratteristica di snervamento pari a 430 MPa.

4.2 Azioni sulla struttura

Le azioni statiche applicate al modello di calcolo, definite e combinate secondo quanto previsto dalle NTC 18, sono:

- peso proprio degli elementi strutturali;
- carichi permanenti portati, comprendenti i contributi della pavimentazione stradale, dei cordoli, delle barriere di sicurezza e delle velette;
- precompressione longitudinale degli impalcati, calcolata a partire da quanto riportato negli elaborati storici di contabilità;

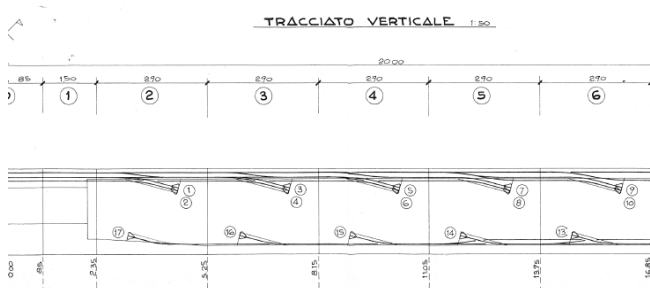


Figura 3. Tracciato verticale dei cavi da precompressione

- ritiro, valutato come somma di un ritiro base (presente anche se la perdita di idratazione è impedita) e il ritiro per essiccazione (presente quando vi è perdita di idratazione);

- viscosità;
- cadute per rilassamento dell'acciaio;
- azioni termiche, considerate attraverso una componente uniforme e una variazione lineare di temperatura;
- azione del vento;
- azione del traffico, disponendo tre corsie convenzionali lungo la sezione trasversale dell'impalcato e tenendo conto dell'azione di frenamento/accelerazione sulla corsia convenzionale n. 1.

4.3 Modello di calcolo

Il modello di calcolo dell'impalcato è stato realizzato utilizzando elementi beam, aventi i nodi posti in corrispondenza dell'estradosso della sezione. Per tenere conto dell'effettiva altezza del cassone e della posizione esatta degli appoggi, si è fatto uso di rigid link per la connessione dell'impalcato al piano esatto degli appoggi.

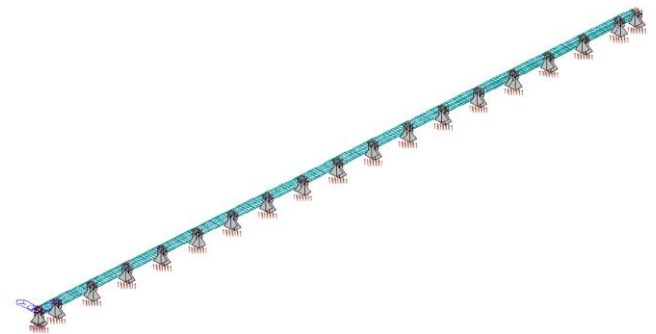


Figura 4. Modello di calcolo dell'impalcato

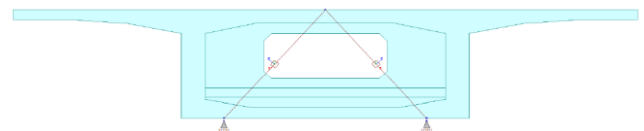


Figura 5. Sezione trasversale in appoggio

Per lo studio delle fasi costruttive e della variazione nel tempo delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo si è proceduto ad una "construction stage analysis". Gli step modellati ripercorrono fedelmente la sequenza operativa della costruzione del viadotto descritta nella relazione di calcolo originaria, riportati in precedenza. Si è considerato lo schema a mensola riportato nella figura seguente, volta a simulare la metà di una generica stampella. Durante la prima fase si hanno i conci A e B senza alcuna compressione ma con il solo collegamento provvisorio, mentre nella i-esime fasi successive si ha il contributo dovuto alla precompressione dei cavi ancorati nel concio (i-1)-esimo ed il peso proprio del concio i-esimo.

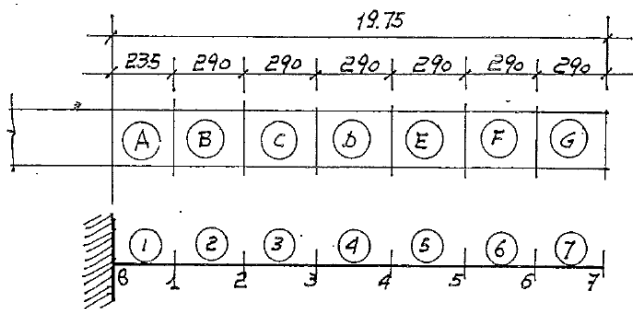


Figura 6. Schema a mensola di metà stampella

4.4 Risultati

Le analisi condotte tramite il modello agli elementi finiti hanno permesso di individuare lo stato tensionale nella sezione sotto l'azione dei carichi di esercizio e dei carichi agenti durante le fasi costruttive (tenendo conto della variazione dello schema statico fase per fase). In particolare, si è investigato lo stato tensionale del lembo inferiore, nel quale hanno origine le fessure presenti, per monitorare il raggiungimento o meno dello stato di fessurazione.

4.4.1 Stato limite di esercizio

In prima battuta si è operato un confronto tra le tensioni generate dai carichi in esercizio, in combinazione frequente, con il valore limite di formazione delle fessure prescritto dalla normativa:

$$\sigma_t = f_{ctm} / 1.2$$

Il limite calcolato non viene mai valicato, tuttavia si può osservare come i massimi valori di tensione di trazione del calcestruzzo si riscontrino in prossimità dei conci in cui sono presenti le fessure.

Per effettuare ulteriori valutazioni di tipo qualitativo si è inoltre calcolato il valore di resistenza caratteristica a trazione del calcestruzzo:

$$f_{ctk,05} = 0.7 \cdot f_{ctm}$$

Confrontando i valori emerge che in corrispondenza del concio fessurato il valore di tensione valica questo limite.

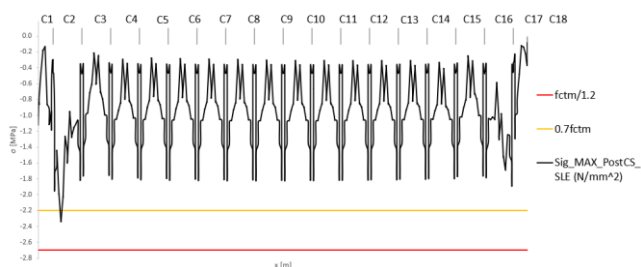


Figura 7. Verifica tensionale in combinazione frequente

4.4.2 Costruzione per fasi

Analizzando le fasi di costruzione del viadotto sono state ricavate le tensioni massime di trazione nel lembo inferiore e lo step a cui corrispondono. I valori ottenuti per ogni concio, in una determinata fase, sono stati confrontati come in precedenza con il limite di formazione delle fessure prescritto dalle NTC18 e con il valore di resistenza caratteristica a trazione del calcestruzzo.

In questo caso i limiti vengono valicati in prossimità di molti dei conci in cui sono presenti le fessure, come si evince dal grafico in Figura 8.

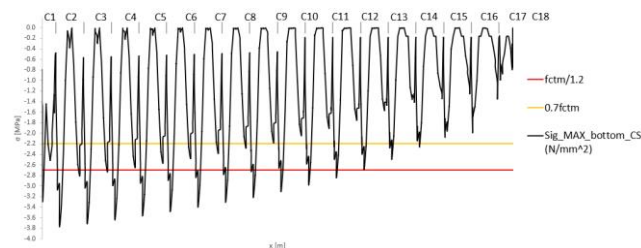


Figura 8. Verifica tensionale durante le fasi costruttive

5 MONITORAGGIO

Contestualmente all'ispezione è stato predisposto un sistema di monitoraggio, installando un fessurimetro e un estensimetro, dotati di sensore di temperatura, in prossimità di due fessure. Il fessurimetro è stato posizionato a cavallo della fessure per verificarne l'andamento dell'ampiezza, mentre l'estensimetro nelle immediate vicinanze per monitorarne lo stato deformativo e tensionale.

Il monitoraggio statico ha permesso il campionamento di un dato all'ora, trasferiti dalla centralina in remoto tramite una connessione cloud.

5.1 Preprocessing

Prima di poter procedere all'analisi è stato necessario effettuare un pre-processamento dei dati tramite le seguenti operazioni:

- controllo della correttezza di acquisizione: si è verificato che non fossero presenti valori che testimoniassero malfunzionamenti dell'impianto di monitoraggio o interferenze;
- correzioni delle doppie misurazioni: si sono eliminate le doppie misurazioni erroneamente salvate ad una stessa ora o salvate in momenti diversi dal campionamento prefissato;

- depurazione dall'installazione: i dati sono stati calibrati in funzione della prima misurazione.

5.2 Analisi dei dati

I dati registrati dai sensori installati sono stati analizzati tramite Processi Gaussiani, che hanno permesso di correlare i valori di apertura della fessura con le variazioni di temperatura ambientale. Tali algoritmi permettono di assumere una distribuzione probabilistica tra due variabili stocastiche (temperatura e spostamento in questo caso) e di identificare una linea di regressione (e di predizione) e un intervallo dov'è possibile trovare il 95% dei dati predetti e misurati.

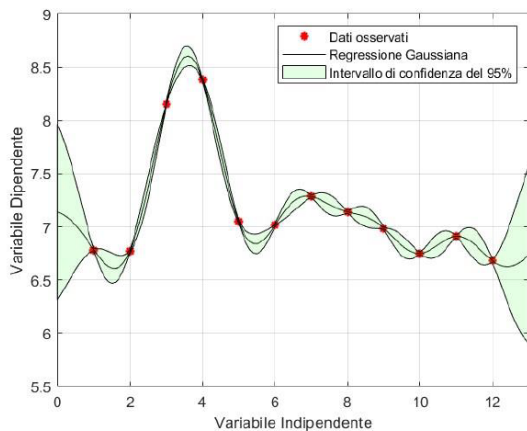


Figura 9. Il principio di regressione gaussiana

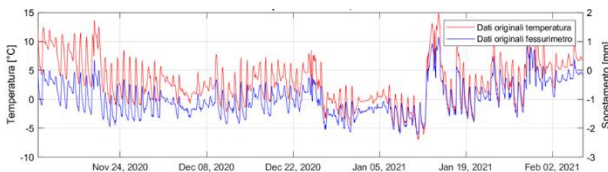


Figura 10. Dati di spostamento registrati

Per studiare l'evoluzione delle fessure, si sono suddivisi i dati in ingresso in tre gruppi della durata di un mese, in ordine cronologico. Tramite i dati relativi al primo mese di monitoraggio si è identificato l'intervallo che caratterizza il comportamento della fessura. Per valutare la presenza di fenomeni evolutivi valori individuati sono stati paragonati ai dati del secondo e terzo mese.

5.3 Risultati

Dall'analisi dei dati è emerso che in una delle due fessure monitorate a partire dal secondo mese di monitoraggio si ha un cambiamento in termini di media e dispersione dei dati, indicatore di un comportamento della fessura di tipo evolutivo.

I dati provenienti dal fessurimetro, il cui grafico è riportato nella Figura 11, mostrano infatti un comportamento instabile della fessura.

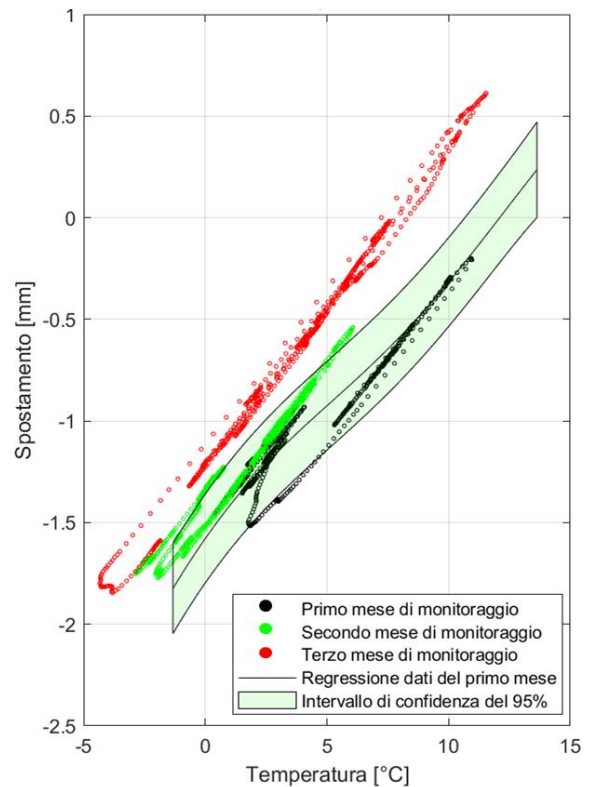


Figura 11. Analisi dei dati provenienti dal fessurimetro

Infine, per effettuare un confronto qualitativo i valori di deformazione derivanti dal monitoraggio sono stati paragonati con i valori derivanti dal modello FEM.

I valori limite di deformazione in esercizio delle fibre inferiori dei conci esaminati tramite il modello agli elementi finiti sono quelli entro cui è contenuto il ventaglio delle deformazioni prodotte dalle varie combinazioni di carico agli SLE. Si è quindi proceduto ad individuare le combinazioni che provocano la massima tensione di trazione e la massima tensione di compressione. Paragonando i valori di soglia individuati con i dati provenienti dal monitoraggio, il comportamento di tipo evolutivo di una delle fessure è confermato: le deformazioni mostrano un andamento poco disperso ed entro i limiti nel primo mese di monitoraggio, mentre a partire dal secondo mese sia ha un netto trend in termini di media e dispersione.

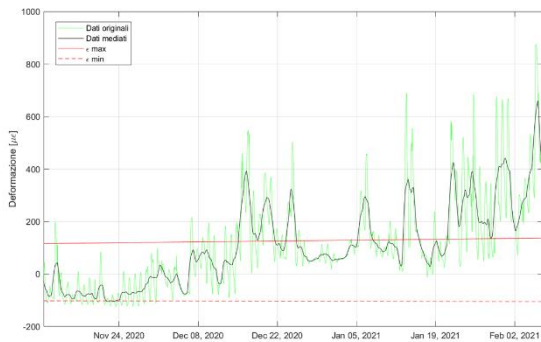


Figura 12. Confronto tra i limiti di deformazione del lembo inferiore e le deformazioni registrate

6 CONCLUSIONI

Le fessure nei ponti in calcestruzzo rientrano nei difetti maggiormente rilevati. Il caso studio presentato nell'articolo è un viadotto a cassone in calcestruzzo armato precompresso, nel quale sono presenti due fessure diagonali a circa un quarto della luce.

Per studiare le cause della fessurazione dell'opera è stato sviluppato un modello agli elementi finiti ed è stato predisposto un sistema di monitoraggio delle fessure.

Tramite il modello FEM sono stati studiati gli stati tensionali all'intradosso dei conci in cui sono localizzate le fessure, sia in condizione di esercizio che durante le fasi costruttive del viadotto. Dal confronto tra i valori di tensione generati dai carichi in esercizio e il valore limite di formazione delle fessure prescritto dalla normativa emerge che i massimi valori di tensione si hanno in prossimità dei conci fessurati, ma la soglia non viene mai valicata. Considerando invece le tensioni presenti durante le fasi di costruzione del viadotto, per ciascun concio ai diversi step, si nota che il valore limite di tensione di formazione delle fessure e/o il valore di resistenza caratteristica a trazione del calcestruzzo vengono superati nella maggior parte dei conci fessurati.

L'analisi dei dati di spostamento e temperatura registrati mediante il sistema di monitoraggio, condotta tramite l'uso di algoritmi di Regressione Gaussiana, ha permesso di delineare un comportamento di tipo evolutivo di una delle fessure presenti. Infatti, i valori di ampiezza relativi al secondo e al terzo mese di monitoraggio manifestano uno shift in termini di media e di dispersione rispetto a quelli del primo.

Infine, mettendo in relazione i limiti inferiore e superiore di deformazione del lembo inferiore (nella combinazione frequente) individuati tramite

il modello agli elementi finiti e i dati relativi alle deformazioni registrate dal sistema di monitoraggio, emerge che i limiti sono rispettati durante il primo mese di registrazione dei dati, ma vengono oltrepassati nei due mesi successivi.

REFERENCES (STYLE REFERENCE TITLE)

- “Linee Guida per La Classificazione e Gestione Del Rischio, La Valutazione Della Sicurezza Ed Il Monitoraggio Dei Ponti Esistenti”, *Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Consiglio superiore dei Lavori Pubblici*, 2020.
- C. E. Rasmussen, “Gaussian Processes in machine learning”, *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 3176, pp. 63–71, 2004, doi: 10.1007/978-3-540-28650-9_4.
- D. Masera, R. Asso, F. Rendace, R. Cucuzza, and G. C. Marano, “Una proposta di procedura per l'escursione degli appoggi”, *Strade & Autostrade*, 2021.
- “Norme tecniche per le costruzioni”, *Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Consiglio superiore dei Lavori Pubblici*, 2018.
- M. Bisti and M. P. Petrangeli, “Patologie dei ponti in c.a.p. costruiti a sbalzo”, *Strade & Autostrade*, 2021.