



IL MONITORAGGIO DI PONTI CON STRUTTURE PRE O POST COMPRESSE

S. Martinello

4 EMME Service Spa

Sommario

Il monitoraggio delle strutture portanti dei ponti costituite da travi o cassoni pre o post-compressi, assume un ruolo di primaria importanza nell'attuale contesto, considerando l'epoca di costruzione della maggior parte di tali opere. Queste strutture sono soggette a processi di degrado che possono compromettere significativamente lo stato di compressione, arrivando talvolta a un completo esaurimento. La corrosione delle armature o dei cavi di compressione rappresenta il principale fattore "naturale" che induce il progressivo decadimento dello stato di precompressione, con un processo accelerato dalle condizioni ambientali avverse come l'esposizione al mare, il vento e da difetti nella produzione dei materiali strutturali come calcestruzzi di scarsa qualità, copriferro limitato o iniezione insufficiente delle guaine. La corrosione riduce la sezione delle armature e dei cavi, spesso concentrata in zone specifiche come le sezioni di giunzione dei conci, compromettendo l'adesione ferro-calcestruzzo e riducendo la resistenza a causa della rottura dei filamenti dei cavi. Questi fenomeni provocano una diminuzione dello stato di trazione dei cavi e, di conseguenza, una riduzione dello stato di compressione delle sezioni di calcestruzzo, come evidenziato dal cedimento dei tiranti nel caso del ponte Morandi.

Il monitoraggio di tali tipologie di ponti riveste quindi un ruolo fondamentale poiché il fenomeno di riduzione dello stato tensionale, e quindi delle capacità portanti, è inevitabile. È necessario effettuare un attento controllo della situazione, al fine di prevenire potenziali catastrofi e, soprattutto, per consentire una valutazione oggettiva dei tempi in cui sarà necessario intervenire per ripristinare lo stato tensionale o sostituire la struttura.

È importante evidenziare che oggi è possibile misurare lo stato tensionale attuale delle sezioni di calcestruzzo mediante la tecnica della "Prova tensionale con provino troncopiramidale" [1]. Questa possibilità consente non solo una valutazione immediata delle condizioni di lavoro durante il transito, ma fornisce anche un punto di riferimento per il monitoraggio nel tempo della riduzione dello stato tensionale.

Questo articolo si propone di fornire agli amministratori uno strumento di valutazione che permetta di investire nel controllo delle infrastrutture stradali, garantendo la sicurezza del traffico attraverso metodi di valutazione economici, semplici e comprensibili direttamente dai tecnici dell'amministrazione. Inoltre, si propone di contrastare l'attuale tendenza all'uso delle costose e poco affidabili metodologie dinamiche come strumenti di monitoraggio [2].

1 Premessa

In Italia, il numero di ponti, viadotti e, in particolare, di campate supera abbondantemente il milione di unità. Tuttavia, va sottolineato che solo una percentuale limitata di queste infrastrutture è di competenza dei principali enti gestori come Anas e Autostrade. La maggioranza dei ponti è di proprietà e responsabilità delle amministrazioni provinciali e comunali. Ad esempio, i Comuni metropolitani gestiscono diverse migliaia di ponti ciascuno. Secondo i dati dell'Archivio Informativo Nazionale delle Opere Pubbliche (AINOP), istituito dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti nel 2020, sono registrati 52.570 ponti stradali (aggiornamento aprile 2023) e 18.820 ponti ferroviari (che includono ponti, viadotti e cavalcavia).

La gran parte di queste opere consiste in strutture portanti pre o post compresse, le quali sono soggette ai fenomeni di degrado menzionati in precedenza. Come già specificato, la causa principale di tale degrado è la corrosione delle armature o dei cavi, che provoca una lenta ma inarrestabile riduzione della capacità portante delle strutture.

La maggioranza dei fenomeni di degrado può essere identificata attraverso un'attenta ispezione visiva, come indicato dalle linee guida del Ministero, le cui metodologie sono dettagliatamente descritte nel Manuale Cias "Valutazione dello stato dei ponti" [3]. Inoltre, le tecniche di indagine sono riportate nel volume Prove in Sito [4]. Tuttavia, la corrosione non è visibile né ispezionabile fino a quando non diventa evidente con l'espulsione del copriferro. Nel corso di periodi prolungati, nell'ordine delle decine di anni, si sviluppa anche il fenomeno del rilassamento dei cavi a causa dell'elevato numero di oscillazioni subite. Queste oscillazioni, alternando gli stati tensionali, provocano una diminuzione dello stato di trazione dei cavi e, di conseguenza, una riduzione della compressione del calcestruzzo.

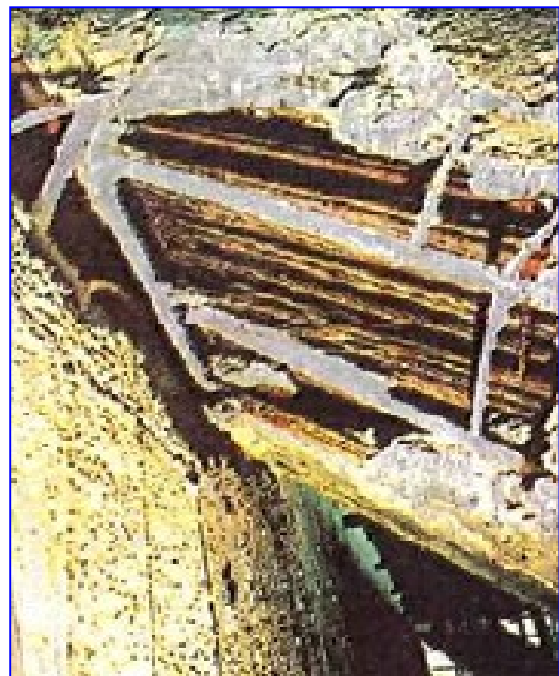


Fig. 1 Tirante pila 11 ponte Morandi – 1992

Attualmente, esistono tecniche di indagine che consentono una valutazione, seppur approssimativa, della quantità e della presenza di corrosione, come la tomografia ultrasonica, le prove riflettometriche, la radiografia, l'endoscopia [5]. Tuttavia, queste tecniche sono complesse da applicare all'interno delle strutture dei ponti e sono praticamente limitate a piccole zone della superficie complessiva. Inoltre, interpretare correttamente gli effetti sullo stato tensionale del calcestruzzo è un compito arduo.

La corrosione dei cavi, con le sue conseguenze di riduzione dell'aderenza e della sezione, determina fin dalle prime fasi una redistribuzione delle forze. In altre parole, la diminuzione dello stato di trazione delle armature o dei cavi si riflette proporzionalmente nella riduzione dello stato di compressione del calcestruzzo.

Questa semplice osservazione ci consente di monitorare la corrosione delle armature attraverso il monitoraggio dello stato di tensione del calcestruzzo. All'aumentare della

corrosione, si osserva una diminuzione dello stato tensionale dei cavi e delle armature, che si traduce in una conseguente riduzione dello stato di compressione del calcestruzzo.

In sostanza, per il controllo dei fenomeni di corrosione, è più conveniente monitorare il calcestruzzo utilizzando strumenti come gli estensimetri (strain gauges), che permettono una misurazione precisa della deformazione relativa, ϵ . Attraverso l'utilizzo del modulo elastico, E , è possibile determinare il valore tensionale, σ .

Il monitoraggio dello stato tensionale a partire dal momento attuale presenta un limite intrinseco di relatività. Pertanto, è fondamentale acquisire la conoscenza dello stato tensionale attuale come punto di riferimento per l'accumulo graduale dei valori ottenuti dal monitoraggio. Ciò ci consentirà di valutare, attraverso un'analisi teorica basata sui carichi transitanti, quando e se intervenire.



Fig. 2 Impalcato con struttura a travi precomprese

Un monitoraggio a lungo termine, esteso su molti anni, permette di identificare linee di tendenza che consentono di valutare con ampio anticipo il momento opportuno per un intervento di ricarica della trazione o di sostituzione dell'impalcato.

Il pregio di questo tipo di monitoraggio, oltre alla sua semplicità e al costo limitato degli strumenti impiegati, risiede nella gestione di una quantità ridotta di dati da elaborare. Questo aspetto sarà affrontato in modo più dettagliato nel paragrafo specifico.

2 Misura dello stato tensionale attuale

La determinazione dello stato tensionale iniziale del calcestruzzo al momento dell'installazione di un sistema di monitoraggio riveste un ruolo di fondamentale importanza. La valutazione del valore attuale dello stato tensionale, basata sui possibili carichi transitanti, fornisce informazioni cruciali sul margine di sicurezza e sul limite ammissibile per la riduzione naturale dello stato tensionale nel corso del tempo.



Fig. 3 Esecuzione della prova tramite Discovery

La tecnica di rilevamento conosciuta come "Prova tensionale con provino troncopiramidale" è stata sviluppata a partire dal 2021 [1]. Questo approccio rappresenta un significativo progresso nelle tecniche diagnostiche, e può essere considerata una vera rivoluzione nel settore, poiché consente di valutare lo stato tensionale nelle sezioni critiche.

Questa tecnica viene ampiamente utilizzata oggi, sebbene spesso in modo improprio. È importante sottolineare che la risposta degli estensimetri al taglio del provino è influenzata da fenomeni di compressione apparente, dovuti alle dimensioni ridotte del

provino sottoposto a taglio (60 x 60 x 25 mm). Tali valori devono essere corretti utilizzando algoritmi specifici sviluppati tramite sperimentazioni in laboratorio. Questo aspetto richiede cautela da parte delle amministrazioni, che devono accertarsi che i laboratori che effettuano tali rilievi siano abilitati tramite una Licenza Internazionale rilasciata dal detentore del brevetto.

È altresì importante ricordare che l'operazione di incisione, che prevede tagli a 45°, deve essere eseguita utilizzando una macchina specifica, il Discovery, che garantisca la corretta direzione e perpendicolarità dei 4 tagli.

Dal punto di vista tecnico, la risposta fornita da questa metodologia è fondamentale per valutare l'andamento futuro dello stato di compressione che sarà monitorato dai dispositivi installati. Accanto viene riportato il grafico classico che esprime, attraverso un algoritmo di valutazione appropriato, l'andamento della deformazione durante il taglio del provino troncopiramidale. Come ci si aspetta, tale andamento è positivo, indicando un aumento delle dimensioni del provino a indicare che in precedenza era soggetto a compressione.

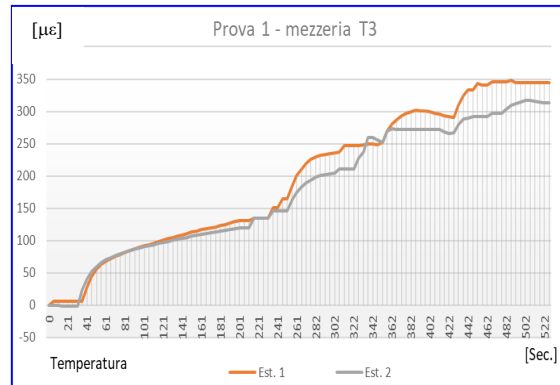


Fig. 4 Andamento del rilascio tensionale

3 Il monitoraggio

È importante sottolineare che il fenomeno di riduzione dello stato tensionale di precompressione si manifesta nel corso di decenni. Di conseguenza, l'acquisizione di un solo dato al giorno risulta più che sufficiente per monitorare adeguatamente la struttura. Oltre alla semplice dilatazione termica, si verificano fenomeni di deformazione differenziata causati dall'irraggiamento solare non uniforme e da fenomeni di auto-deformazione dovuti al diverso coefficiente di dilatazione termica tra il calcestruzzo e il ferro.

È importante sottolineare, a discapito di osservazioni superficiali sui metodi di monitoraggio, che questi fenomeni influenzano tutti i parametri meccanici, compresi quelli dinamici. La deformazione relativa derivante dagli effetti termici ha il vantaggio di essere ben conosciuta e quindi valutabile. Gli estensimetri stessi



Fig. 5 Coppia di estensimetri protetti da piastra inox

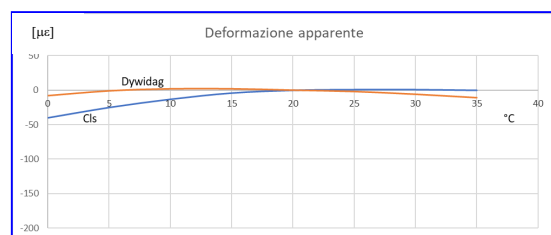


Fig. 6 Deformazione apparente estensimetro 90 mm

subiscono una deformazione dovuta alla variazione di temperatura, ma il loro comportamento è noto grazie alla curva di "deformazione apparente" fornita dal produttore. Indicativamente, tale valore può essere considerato lineare con una pendenza di $2 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$. Pertanto, è possibile "depurare" con buona precisione i valori ottenuti dal monitoraggio, misurando contemporaneamente la deformazione relativa e la temperatura del materiale in superficie, nell'area di incollaggio degli estensimetri.

Al fine di confermare tali considerazioni, è stata condotta un'approfondita sperimentazione su travi precomprese in laboratorio, sottoposte a variazioni termiche comprese tra 0 e 30°C [6]. Questa sperimentazione ha consentito di misurare con precisione l'andamento della deformazione apparente misurata dagli estensimetri. Il grafico mostrato in figura 7 rappresenta l'andamento della deformazione apparente registrata su un estensimetro di lunghezza 90 mm.

Tuttavia, è importante ridurre al minimo gli effetti derivanti dalle variazioni termiche, motivo per cui il momento ottimale per la memorizzazione dei dati si verifica nelle prime ore del mattino, quando la variazione di temperatura cambia di segno e risale. In questo periodo, non vi è un irraggiamento diretto che provoca deformazioni differenziate tra le diverse superfici della struttura, e le differenze di temperatura tra le varie sezioni e materiali sono minime. Per ulteriori precisazioni, occorre sottolineare che la variazione di temperatura, a causa del diverso coefficiente di dilatazione termica tra il ferro e il calcestruzzo, genera lo sviluppo di uno stato tensionale reciproco. Tuttavia, è importante notare che tale valore è estremamente ridotto, come dimostra la formula derivata dall'equilibrio tra la forza generata dal ferro e quella generata dal calcestruzzo al variare della temperatura, così definita:



Fig. 7 Centralina di trasmissione dati - fotovoltaica

$$\epsilon_c = \frac{E_f A_f}{E_c A_c + E_f A_f} \cdot (\lambda_f - \lambda_c) \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Dove:

ϵ_c	$\mu\epsilon$	Deformazione relativa del calcestruzzo al variare della temperatura
A_f	cm^2	Area ferro
A_c	cm^2	Area calcestruzzo
E_f	MPa	Modulo elastico ferro
E_c	MPa	Modulo elastico calcestruzzo
λ_c	$\mu\epsilon/^\circ\text{C}$	Coefficiente di dilatazione termica del ferro
λ_t	$\mu\epsilon/^\circ\text{C}$	Coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo
T_1	$^\circ\text{C}$	Temperatura iniziale
T_2	$^\circ\text{C}$	Temperatura finale

A titolo esemplificativo, è opportuno considerare che una variazione termica di 10°C provoca una variazione dello stato deformativo del calcestruzzo dell'ordine di circa $1 \mu\epsilon$, un valore praticamente trascurabile.

Al fine di gestire in modo efficiente i dati di monitoraggio, sono stati sviluppati algoritmi appositi che consentono di selezionare solo i dati significativi, riducendo al

minimo l'influenza delle variazioni termiche sulla struttura e sugli strumenti. Inoltre, tali algoritmi permettono di escludere i dati rilevati durante il transito dei veicoli, che potrebbero interferire con le misurazioni.

4 Elaborazione ed accessibilità dei dati

È stato sviluppato un applicativo mobile che consente un accesso agevole ai dati memorizzati e una valutazione rapida dell'andamento del fenomeno in esame. Questo applicativo gestisce tutti i monitoraggi della rete di un'organizzazione amministrativa, consentendo la visualizzazione sia dei parametri numerici sia degli andamenti grafici nel corso del tempo.

Va innanzitutto sottolineato che, ai fini del monitoraggio dello stato tensionale, per una campata costituita da più travi o un cassone, di solito sono sufficienti 3 punti di misurazione della deformazione relativa e 1 punto di misurazione della temperatura del materiale in superficie. Da questi dati è possibile elaborare altri parametri più comprensibili anche per coloro che non sono esperti del settore, come ad esempio la freccia in mezzeria o lo stato tensionale espresso in MPa.



Fig. 8 L'applicativo

La freccia in mezzeria può essere stimata calcolando il rapporto tra questa e la deformazione relativa in mezzeria. Questo rapporto è una costante, indipendente dal livello dello stato tensionale. Ricavarlo in modo teorico è complesso in quanto richiederebbe una precisa conoscenza del livello reale di vincolo agli appoggi. Pertanto, si procede in modo sperimentale utilizzando un carico posizionato in mezzeria. Nella pratica, si utilizza direttamente il By-bridge, utilizzato per il montaggio degli strumenti all'intradosso.



Fig. 9 Andamento della freccia in mezzeria

Dopo aver applicato il carico in mezzeria, si procede alla misurazione simultanea della freccia e della deformazione relativa. Considerando che il carico di prova può essere approssimato come un carico concentrato, mentre la freccia virtuale viene valutata a partire da una condizione di carico distribuito, il rapporto R tra la freccia da carico distribuito (f) e la deformazione relativa in mezzeria (ϵ) deve essere corretto utilizzando il rapporto tra la freccia da carico distribuito e la freccia da carico concentrato, mantenendo costante il momento in mezzeria. Questo rapporto è definito come $5/4$. Infatti, la freccia generata da un carico distribuito è maggiore del 20% rispetto a quella prodotta da un carico concentrato, mantenendo costante il momento applicato.

A titolo di esempio, supponiamo che la freccia misurata sia pari a $-3,2$ mm e la deformazione relativa rilevata sia pari a 44 $\mu\epsilon$, si ottiene:

$$R \text{ [mm]} = \frac{f \cdot c}{\epsilon} = \frac{-3,2 \cdot 5/4}{44} = -0,087. \quad (2)$$

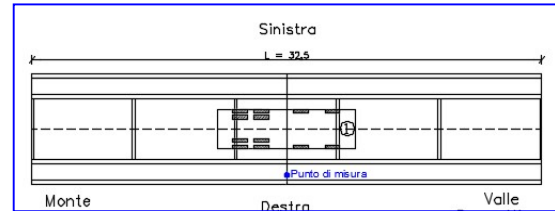


Fig. 10, 11 Carico di misura freccia - deformazione

Dall'andamento della deformazione relativa in una specifica sezione, è possibile ottenere facilmente lo stato tensionale moltiplicando per il Modulo Elastico. È consigliabile determinare sperimentalmente il valore del Modulo Elastico attraverso l'analisi di campioni prelevati in laboratorio. L'andamento della deformazione relativa, e di conseguenza di tutti i parametri virtuali che possono

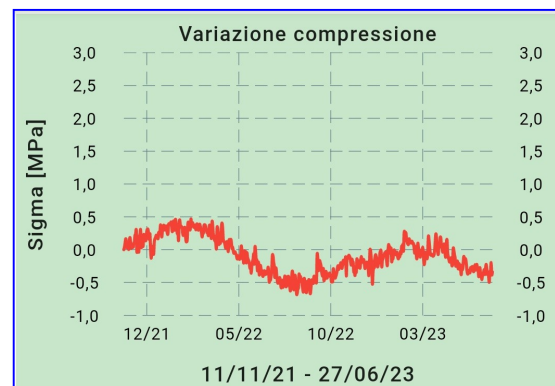


Fig. 12 Variazione della compressione espresso in MPa

essere calcolati, è influenzato dalla normale dilatazione termica e dalla deformazione apparente dell'estensimetro in risposta alle variazioni di temperatura.

Al fine di valutare l'influenza delle variazioni di temperatura sulla struttura e sull'estensimetro, è opportuno utilizzare un estensimetro posizionato trasversalmente e in prossimità di quello posizionato longitudinalmente, come mostrato nella figura 5.

In prima approssimazione, potrebbe sembrare possibile sottrarre il valore misurato trasversalmente da quello misurato longitudinalmente al fine di eliminare gli effetti termici sia sulla struttura sia sull'estensimetro. Tuttavia, la misurazione della temperatura viene effettuata superficialmente, mentre la struttura stessa possiede una notevole inerzia termica e reagisce con ritardo alle variazioni della temperatura superficiale. Lo stesso vale per il sensore trasversale, che viene immediatamente influenzato dagli effetti superficiali. Pertanto, questa semplice approssimazione non tiene pienamente conto della complessità dei fenomeni termici e della risposta termica della struttura.

Di conseguenza, la depurazione degli effetti termici deve essere studiata nel lungo periodo, analizzando l'andamento della temperatura in confronto con la deformazione relativa misurata, che, sebbene complessa come indicato in precedenza, è fortemente legata al coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo. Ciò implica che i valori rilevati devono essere confrontati con ciò che è chiamato "deformazione apparente".

Nel grafico riportato si osserva l'andamento della deformazione compensata dalla deformazione apparente, come rappresentato nella figura 12. È evidente l'effetto inerziale della temperatura sulla struttura, con un ritardo nella reazione rispetto alle variazioni della temperatura superficiale che determinano la lettura della deformazione relativa.

Attraverso una trasformazione approssimata, è possibile convertire la deformazione in

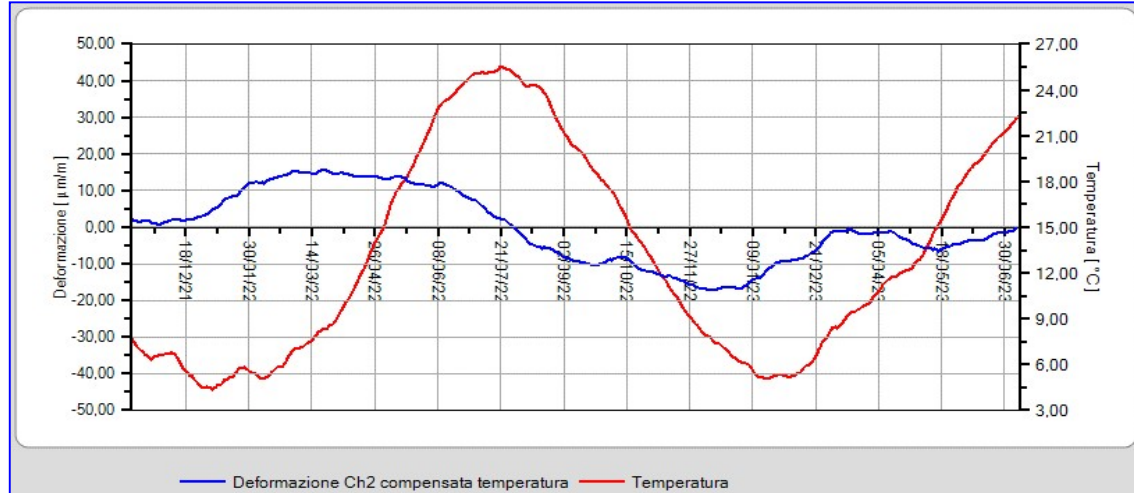


Fig. 13 Andamento della deformazione relativa depurata dalla deformazione apparente

stato tensionale utilizzando un Modulo Elastico valutato a 35.000 MPa, come mostrato nel grafico successivo.

Nonostante i valori esigui ottenuti, che mostrano una variazione massima di 0,5 MPa, si rileva un andamento sinusoidale attorno alla linea di "zero", indicando che lo stato tensionale della trave precompressa, durante i due anni di monitoraggio, non ha subito variazioni significative e rimane sostanzialmente uguale al valore misurato all'inizio del monitoraggio, stimato in 11 MPa utilizzando il rilievo dello stato tensionale "attuale", come evidenziato nella figura 4 ($320 \cdot 10^{-6} \mu\epsilon \times 35.000 \text{ MPa}$).

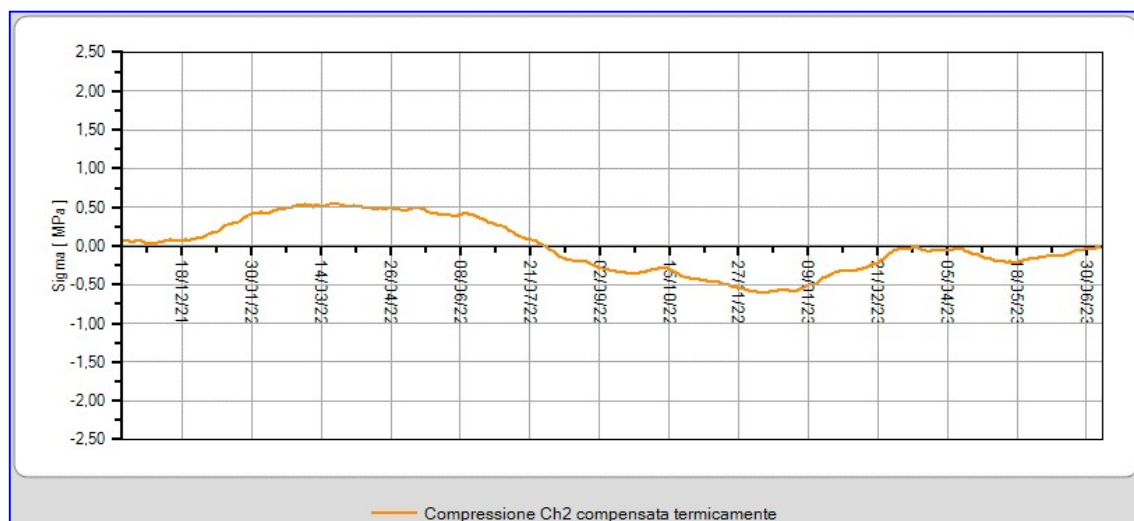


Fig. 14 Andamento dello stato tensionale depurato dalla deformazione apparente

5 Conclusioni e riflessioni

L'esperienza acquisita attraverso numerosi monitoraggi svolti nel corso di una carriera quarantennale, traendo insegnamenti da esperienze interpretative negative, ha permesso lo sviluppo delle metodologie di monitoraggio descritte nel presente studio.

La semplicità intrinseca del processo di monitoraggio descritto contribuisce a ottenere dati affidabili, interpretabili e soprattutto a fornire una valutazione accurata della condizione statica effettiva della struttura.

La Prova tensionale con provino troncopiramidale rappresenta una fondamentale innovazione nel campo della diagnostica strutturale, offre infatti la possibilità di valutare le condizioni di sicurezza delle opere. Grazie al monitoraggio, questa valutazione può essere estesa nel tempo, consentendo di rilevare eventuali variazioni negative dello stato tensionale delle travi precomprese nel corso del tempo.

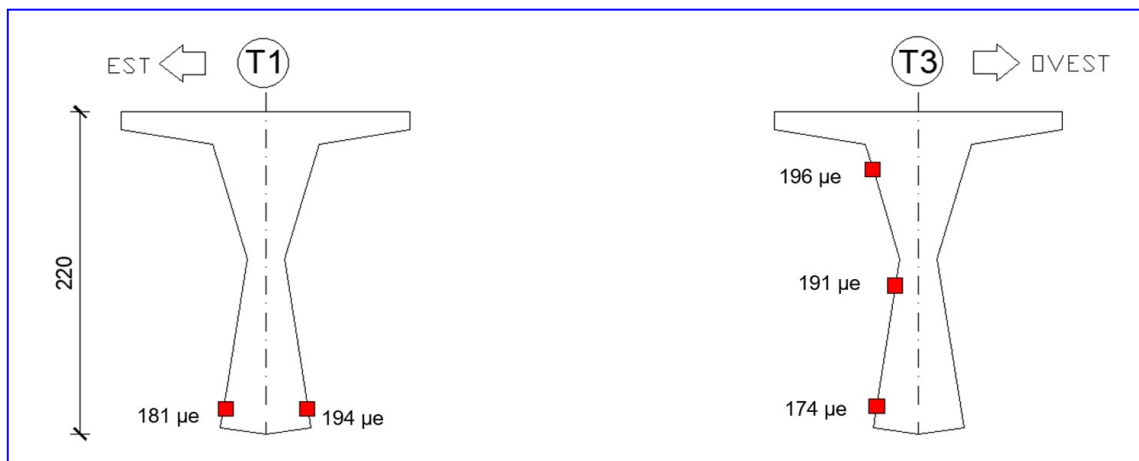


Fig. 15 Risultati della Prova tensionale con provino troncopiramidale sulle travi della figura 2

Questa metodologia, se conosciuta in passato, avrebbe permesso di rilevare il decadimento dello stato di precompressione dei tiranti del ponte Morandi.

La metodologia descritta si caratterizza per la sua semplicità di attuazione, rendendo l'investimento per l'esecuzione del monitoraggio accettabile, permettendo il controllo delle capacità portanti della struttura.

Le procedure di elaborazione semplici e l'accessibilità ai dati rilevati consentono ai tecnici delle amministrazioni di verificare direttamente le condizioni di sicurezza delle opere infrastrutturali.

Questo coinvolgimento diretto del personale tecnico delle amministrazioni favorisce un miglioramento della conoscenza e, di conseguenza, della sicurezza delle nostre opere infrastrutturali. È importante sottolineare che ciò non diminuisce l'importanza degli studi e dei monitoraggi legati a strutture complesse, che richiedono però una preparazione professionale elevata.

Bibliografia

- [1] S. Martinello, rivista Le Strade, aprile 2021 - Rilievo dello stato tensionale di elementi strutturali in calcestruzzo, caso delle travi precomprese
- [2] S. Martinello, rivista Galileo, giugno 2018 - Sulla efficacia del monitoraggio del comportamento dinamico dei ponti
- [3] E. Giangreco, L. Jurina, E. Siviero, S. Tattoni, Edizione 2022, CIAS – Manuale valutazione dello stato dei ponti
- [4] S. Martinello, 4 Emme Service Spa, Edizione 2022 – Prove in sito
- [5] G. Pisciaklo, G.E. likins, B. White, Giugno 2013, International Bridge Conference - Current Practice and New Method
- [6] Ricerca c/o Laboratorio Prove Materiali 4 EMME Spa – Tesi di Laurea ing. Gianluca Tieghi Università di Padova e ing. Maddalena Di Simone Università di Salerno.