

**POLITECNICO DI TORINO**

Collegio di Ingegneria Civile

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Civile**

Tesi di Laurea Magistrale

**Valutazione dello stato di degrado degli  
impalcati da ponte in calcestruzzo  
precompresso mediante l'ausilio di  
estensimetri**



**Politecnico  
di Torino**

**Relatore**

prof. Gabriele Bertagnoli

**Candidata**

Gabriella De Marcellis

27 ottobre 2022



# Indice

<b>1. Introduzione .....</b>	<b>7</b>
<b>2. La precompressione.....</b>	<b>8</b>
<i>2.1 Sistemi di precompressione.....</i>	<i>9</i>
2.1.1 Pre-tensione .....	10
2.1.2 Post-tensione .....	10
2.1.3 Precompressione esterna .....	10
<i>2.2 Criteri generali di progetto della precompressione.....</i>	<i>12</i>
<i>2.3 Le perdite di precompressione .....</i>	<i>13</i>
2.3.1 Perdite per effetto mutuo.....	13
2.3.2 Perdite per attrito .....	13
2.3.3 Perdite per rientro ancoraggio .....	14
2.3.4 Cadute di tensione .....	14
<i>2.4 Gli acciai da precompressione.....</i>	<i>15</i>
<b>3. Caso studio: il viadotto “Molise 1” .....</b>	<b>17</b>
<i>3.1 Inquadramento e descrizione dell’opera.....</i>	<i>20</i>
3.1.1 L’impalcato .....	21
3.1.2 Fasi di costruzione e di calcolo delle travi .....	22
3.1.3 Caratteristiche geometriche delle sezioni.....	23
3.1.4 Materiali .....	24
3.1.5 Armatura di precompressione trave di bordo .....	25
3.1.6 Perdite stimate .....	26

<b>4. Prova di rilascio tensionale .....</b>	<b>27</b>
4.1 <i>Principio</i> .....	28
4.1.1 Metodo di indagine.....	28
4.2 <i>Tecnica di prova</i> .....	32
4.2.1 Prova di laboratorio .....	32
4.2.2 Prova in situ.....	43
4.2.3 Campagna d'indagine.....	43
<b>5. Estensimetri.....</b>	<b>46</b>
5.1 <i>Principio di funzionamento degli estensimetri elettrici a resistenza</i> .....	47
5.1.1 <i>Fattore di taratura</i> .....	49
5.2 <i>Caratteristiche estensimetri</i> .....	50
5.2.1 Geometrie .....	51
5.2.2 Collegamenti .....	53
5.2.3 Reazione alla temperatura .....	54
5.2.4 Lunghezza della griglia attiva .....	54
5.2.5 Resistenza elettrica.....	55
5.2.6 Adesivi .....	56
5.2.7 Protettivi.....	58
5.3 <i>Circuiti per misure estensimetriche</i> .....	60
5.3.1 Ponte di Wheatstone.....	60
5.4 <i>Analisi ed elaborazione dei dati</i> .....	63
5.4.1 Amplificatore .....	64
5.4.2 Il software CATMAN.....	65

5.4.3 Analisi in frequenza e tempo di campionamento .....	65
<b>6. Calcolo perdita di precompressione .....</b>	<b>66</b>
6.1 Risultati ottenuti mediante la prova di rilascio tensionale .....	68
6.2 Risultati ottenuti mediante Eurocodice .....	73
6.2.1 Ritiro.....	74
6.2.2 Viscosità.....	76
6.2.3 Rilassamento acciaio .....	78
6.2.4 Risultato finale $\Delta P_c + s + r$ .....	79
6.4 Confronti .....	80
<b>8. Bibliografia e normativa di riferimento.....</b>	<b>83</b>



## 1. Introduzione

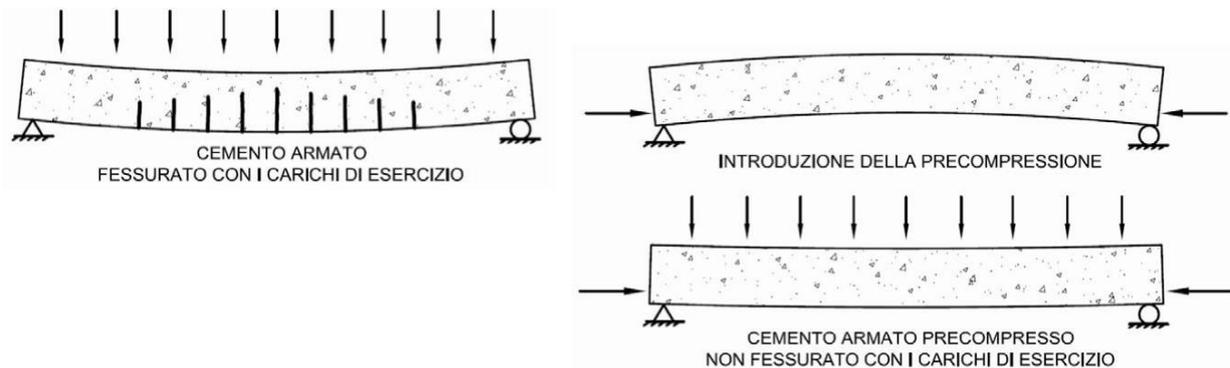
Lo stato di degrado dei ponti esistenti è possibile valutarlo con molteplici metodologie. Nel seguente lavoro di tesi è stato analizzato un ponte stradale in calcestruzzo armato precompresso. Il ponte “Molise 1” che attraversa il fiume Biferno (Molise) è stato costruito nel 1966 e dopo sessant’anni è sorta la necessità di effettuare un monitoraggio che permettesse di valutare l’invecchiamento della struttura in modo da capire se fossero necessarie opere di manutenzione. L’analisi si è basata sulla valutazione della perdita di precompressione mediante l’ausilio degli estensimetri. Questi strumenti hanno permesso di avere una percentuale della perdita di precompressione potendo confrontare il valore iniziale della forza al tiro con quella attuale nella trave.

L’utilizzo di questa strumentazione permette di ottenere un’indicazione sulla complessiva efficienza del sistema di precompressione e delle prestazioni richieste all’elemento trave.

E’ interessante notare come la valutazione dello stato tensionale si ricavi a partire dalla legge di Hooke che permette di ottenere una tensione a partire da una deformazione. La deformazione in oggetto è quella della porzione di trave che, essendo carotata, può rilassarsi non essendo più vincolata dalla trave circostante a cui è stata data una tensione di precompressione. Sull’elemento di trave isolato viene letta una deformazione  $e$ , di conseguenza una tensione uguale e di segno opposto a quella a cui è soggetta la trave al momento della prova. Si tratta di una metodologia innovativa in quanto l’output della prova esprime un giudizio generale sullo stato della trave ed è quindi in grado di cogliere eventuali anomalie che possono pregiudicare la sicurezza statica dell’elemento investigato. E’ un vantaggio rispetto ad altre tipologie di indagini che al contrario hanno un carattere locale e che dunque forniscono informazioni limitate sulla zona indagata, senza poter escludere la presenza di difetti in altri punti dell’elemento indagato. Il metodo proposto è stato testato su 5 travi di bordo di luce 34 metri ma è stato precedentemente tarato mediante una prova in laboratorio. Questa prima prova ha permesso di individuare le criticità e dunque di migliorarle e anche di capire quali sarebbero state le differenze con la prova in situ. Al fine di ottenere un ulteriore riscontro dei risultati ottenuti con la prova di rilascio tensionale e verificare che essi siano coerenti e attendibili si è fatta la valutazione delle perdite di precompressione con le formulazioni proposte dall’Eurocodice 2. La forza di precompressione subisce variazioni nel tempo a causa dei fenomeni reologici del calcestruzzo e del rilassamento dell’acciaio. I confronti mostrano come i termini percentuali delle perdite valutati con i diversi metodi siano molto vicini tra loro e dell’ordine di un 24-25%. Grazie a queste comparazioni la prova estensimetrica ha ricevuto delle conferme sulla sua validità.

## 2. La precompressione

La precompressione consiste in un particolare stato di tensione e di deformazione artificialmente indotto nella struttura al fine di migliorarne il comportamento strutturale. Si tratta di pre-introdurre nella struttura uno stato di tensione opposto a quello a cui essa sarà soggetta durante l'azione dei carichi esterni.



**Figura 2.1:** Struttura in cemento armato e cemento armato precompresso in esercizio.

Nel 1933, nell'articolo *Idees et voies nouvelles* il costruttore Eugène Freyssinet per la prima volta lasciò traccia scritta della parola *precontrainte*, neologismo che definirà per tutti gli anni successivi la tecnica della precompressione. I primi tentativi di realizzare opere in calcestruzzo armato precompresso risalgono al 1888, ad opera di Doering. I risultati furono però deludenti, a causa della scarsa resistenza dei materiali adottati. Nel 1907 fu Koenen a riproporre la soluzione per ridurre le sollecitazioni nel calcestruzzo e migliorarne la durabilità. Usando, però, acciai con una resistenza molto bassa e un tasso di lavoro intorno ai 100 MPa, la precompressione veniva precocemente annullata dai fenomeni di ritiro e scorrimento viscoso del calcestruzzo.

I primi risultati soddisfacenti furono ottenuti applicando la presollecitazione nella produzione di tubi in calcestruzzo, ad opera della ditta italiana Vianini, nel 1925. L'intento comune era solamente quello di applicare una precompressione per evitare o ridurre la fessurazione del calcestruzzo, ignorando altri aspetti statici benefici del procedimento. I concetti base della moderna precompressione furono ideati da Freyssinet, che nel 1928 ne depositò il brevetto. Lo stesso ideatore dal 1936 utilizzò la tecnica della precompressione per quasi tutte le sue opere. Tra i pionieri dell'uso del cemento armato precompresso in Italia e creatore del brevetto Morandi M5 nel 1948 si annovera l'ingegnere Riccardo Morandi, i cui viadotti strallati hanno i tiranti calcestruzzo armato precompresso.

## 2.1 Sistemi di precompressione

Le modalità di introduzione della precompressione sono le seguenti:

- Spostamento impresso ai vincoli: tale modalità viene citata esclusivamente per ragioni storiche, in quanto i primi esperimenti utilizzavano proprio tale tecnica, peraltro con scarsi risultati. Si consideri infatti il sistema in figura precompresso tramite l'ausilio di martinetti, in modo da indurre una tensione uniforme  $\sigma_c$ ; ne consegue una deformazione elastica istantanea pari a  $\varepsilon = \sigma_c/E_c$ . Applicando una  $\sigma_c=15$  MPa, con un modulo elastico pari a  $E_c=30000$  MPa, si ha una deformazione pari allo 0.5‰, che viene completamente annullata dall'evolvere nel tempo dei fenomeni di ritiro (circa 0.35‰) e di fluage.
- Utilizzazione di armature opportunamente messe in tensione prima (pre-tensione) o contemporaneamente all'applicazione dei carichi (post-tensione). In realtà anche tale sistema non risulta particolarmente efficiente se vengono utilizzate armature di resistenza ordinaria.; introducendo infatti una tensione di 200 MPa nell'armatura precompressa, si ottiene una pre-deformazione pari all' 1‰ ( $E_s = 200'000$  MPa), anch'essa non sufficiente a garantire la stabilità della precompressione nel tempo.

In pratica, per ottenere dei vantaggi significativi con questa tecnica, si deve disporre di materiali aventi un limite di snervamento molto elevato; le attuali armature da precompressione hanno infatti, a parità di modulo elastico, tensioni di rottura dell'ordine dei 2000 MPa, con tensioni al tiro di circa 1400 MPa e relative pre-deformazioni dell'ordine del 7‰. Gli acciai da precompressione sono disponibili in forma di fili, trefoli e barre. L'utilizzo della precompressione porta in genere a minori costi di costruzione in quanto l'acciaio da precompressione presenta un minor rapporto fra costo unitario e tensione di snervamento rispetto all'acciaio ordinario.

La precompressione può essere:

- integrale: sotto i carichi di servizio non si manifestano tensioni di trazione (nella direzione della precompressione)
- a sezione interamente reagente: la tensione di trazione massima non supera, sempre in corrispondenza dei carichi di esercizio, un valore specificato e ritenuto accettabile (in genere la resistenza a trazione del calcestruzzo  $f_{ctk,0.05}$ )
- parziale: non sono fissati limiti alla tensione di trazione, e si opera in regime fessurato.

Negli ultimi due casi è usualmente necessario introdurre armature aggiuntive ordinarie per soddisfare le verifiche di resistenza ultime, mentre nel primo caso la sola armatura da precompressione risulta in genere sufficiente per tali verifiche.

### 2.1.1 Pre-tensione

La pre-tensione è usata principalmente nella pre-fabbricazione di elementi in calcestruzzo. Consiste nel pretensionare le armature di precompressione (in genere fili o trefoli) fra due punti fissi, installare il cassero attorno alle armature predisposte, e gettare il calcestruzzo, che in tal modo risulta immediatamente aderente all'acciaio. A maturazione avvenuta (dopo poche ore se si utilizza la maturazione a vapore) si effettua il rilascio delle armature da precompressione che, tendendo ad accorciarsi, precomprimono il calcestruzzo per aderenza. Con tali modalità è possibile non precomprimere parzialmente od integralmente alcuni tratti della struttura, procedendo all'intubettamento di una parte o della totalità dei trefoli.

### 2.1.2 Post-tensione

Con questa tecnica, l'acciaio da precompressione è messo in tensione dopo il getto e l'indurimento del calcestruzzo; l'acciaio deve dunque, in questa fase, risultare indipendente dal calcestruzzo stesso. A tale scopo vengono posizionate all'interno del cassero delle guaine entro cui il cavo può scorrere. In genere il cavo viene introdotto nelle guaine dopo il getto del calcestruzzo, e la guaina viene iniettata di malta dopo la tesatura del cavo; si deve quindi porre particolare attenzione alla presenza di difetti nelle guaine, che potrebbero portare ad una ostruzione parziale o totale delle stesse, con impossibilità di portare a termine le operazioni di infilaggio. I cavi vengono realizzati tramite assemblaggio di trefoli. Il pre-tensionamento è realizzato attraverso appositi dispositivi che, facendo contrasto sul calcestruzzo, tendono il cavo fino alla tensione o all'allungamento desiderato. In corrispondenza dei punti terminali, vengono posizionate le testate di ancoraggio, che si distinguono in attive o passive a seconda della possibilità di effettuare localmente la tesatura o meno. La post-tensione risulta in genere meno economica rispetto alla pre-tensione (soprattutto per la precompressione di grandi volumi di calcestruzzo), ma presenta almeno due vantaggi:

1. possibilità di precompressione in sito, senza necessità di trasporto di elementi di grandi dimensioni;
2. possibilità di scelta del tracciato. Infatti, mentre i cavi pre-tesi devono avere tracciati rettilinei, con al più pochi punti di deviazione, le guaine dei cavi post-tesi possono essere posizionate in modo da seguire una traiettoria qualunque (in genere parabolica o cubica), in modo da contrastare più efficacemente le azioni a cui la struttura verrà soggetta.

### 2.1.3 Precompressione esterna

La precompressione esterna è realizzata con cavi che vengono in genere posizionati all'esterno della sezione trasversale, e comunque lasciati non aderenti per l'intera vita di progetto della struttura. Per prevenirne la corrosione vengono infilati all'interno di guaine che sono successivamente iniettate con grasso cera o boiaccia. Rispetto ai sistemi precedenti tale tecnica presenta alcuni svantaggi:

1. come per la pre-tensione si ha la necessità di utilizzare tratti rettilinei fra due punti di deviazione successivi;

2. l'incremento di tensione nel cavo legato al crescere del carico dipende dall'allungamento complessivo del cavo, e quindi dalla deformabilità della struttura nel suo complesso, e non solo dalla deformazione della sezione in esame. Ciò comporta una notevole difficoltà di calcolo dell'incremento tensionale, che comunque si dimostra essere piccolo rispetto all'incremento della corrispondente precompressione pre- o post-tesa. In genere si assume un incremento tensionale nullo, o al limite del 5%; tale tipo di precompressione risulta quindi meno performante allo stato limite ultimo.

3. l'incremento di deformazione provoca una diminuzione dell'eccentricità del cavo rispetto al baricentro, soprattutto se sono presenti pochi punti di deviazione.

D'altra parte tale tecnica è oggi via via più utilizzata in quanto presenta anche innegabili vantaggi:

1. possibilità di ispezione, manutenzione ed eventuale sostituzione di una parte dei cavi, anche in condizioni di esercizio;

2. possibilità di aggiunta di nuovi cavi anche su strutture esistenti che, per ammaloramento o nuova destinazione d'uso necessitano di un incremento del livello di precompressione.

## 2.2 Criteri generali di progetto della precompressione

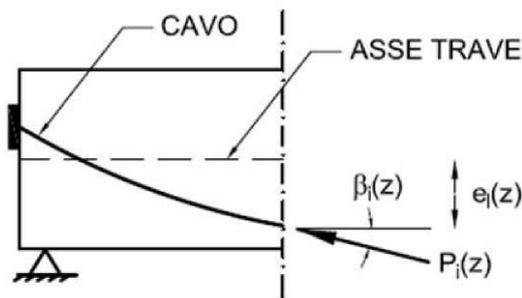
Il progetto della precompressione consiste fondamentalmente nella valutazione della forza di precompressione applicata alla struttura (e quindi del numero di cavi o trefoli) e nell'individuazione del tracciato dei singoli cavi. Peraltro, nella fase di progetto preliminare della precompressione, in luogo dei singoli cavi, si può far riferimento al cavo risultante, che può essere definito come il cavo avente, in ogni sezione, un tiro pari alla risultante dei tiri nei singoli cavi e applicato nel baricentro degli stessi. Operando su una sezione con asse di simmetria verticale ed indicando con  $P_i$ ,  $\beta_i$  ed  $e_i$  il tiro, l'inclinazione rispetto all'orizzontale e l'eccentricità rispetto al baricentro del cavo  $i$ -esimo nella sezione in esame, si hanno le seguenti espressioni rispettivamente per il tiro, l'inclinazione e l'eccentricità del cavo risultante.

$$P = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n.cavi} P_i \cos \beta_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n.cavi} P_i \sin \beta_i\right)^2}$$

$$\tan \beta = \frac{\sum_{i=1}^{n.cavi} P_i \sin \beta_i}{\sum_{i=1}^{n.cavi} P_i \cos \beta_i}$$

$$e = \frac{\sum_{i=1}^{n.cavi} P_i e_i \sin \beta_i}{\sum_{i=1}^{n.cavi} P_i \cos \beta_i}$$

**Tabella 2.1:** Tiro, inclinazione, eccentricità cavo risultante



**Figura 2.2:** Simbologia per Tabella 2.1

Una volta determinato l'andamento del cavo risultante, quest'ultimo può essere scomposto nei singoli cavi per procedere a calcoli più raffinati e ad eventuali aggiustamenti dei singoli tracciati. In genere nelle strutture a cavi aderenti, la precompressione (intesa come numero e tracciato dei cavi) è individuata in modo da soddisfare le verifiche in corrispondenza della combinazione di esercizio delle azioni ed in particolare il non superamento di un determinato livello tensionale ai lembi estremi delle sezioni in tutte le fasi in cui la struttura si può venire a trovare, incluse le fasi costruttive.

### 2.3 Le perdite di precompressione

La tensione in un cavo di precompressione è variabile sia lungo il cavo che nel tempo, pur risultando in ogni caso inferiore alla tensione al martinetto; si è quindi soliti parlare di variazione di tensione rispetto al valore di riferimento al tiro. Da un punto di vista lessicale, è usuale dividere le cause di riduzione nella tensione dei cavi in riferimento all'istante in cui la stessa si verifica.

- Perdite di tensione: variazioni nella forza di precompressione che intervengono al tempo  $t=0$  (fase di messa in tensione): effetto mutuo, attrito, rientro ancoraggi.
- Cadute di tensione: variazioni di tensione che intervengono per tempi  $t>0$ : ritiro, viscosità, rilassamento.

#### 2.3.1 Perdite per effetto mutuo

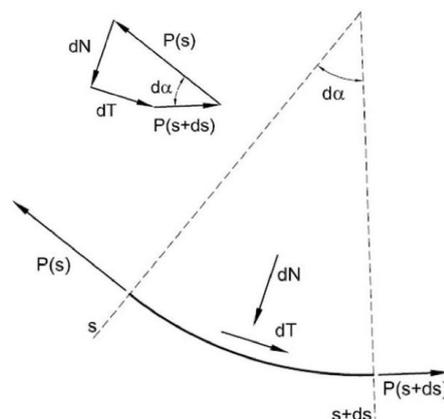
Le tesature dei cavi in più fasi successive comportano un ulteriore accorciamento elastico della trave rispetto a quello intervenuto nelle fasi precedenti di precompressione, con conseguente diminuzione del tiro dei cavi già messi in tensione. In via approssimata tale perdita può essere valutata con la seguente espressione:

$$\Delta P_C = A_p E_{sp} \sum_j \frac{\Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)}$$

con  $\Delta \sigma_c$  variazione di tensione indotta nel calcestruzzo dalla successiva tesatura. La formula nel caso di  $n$  cavi, dovrà essere applicata  $n-i$  volte se ci si riferisce al cavo  $i$ -esimo.

#### 2.3.2 Perdite per attrito

Si verifica in caso di post-tensione o pre-tensione con deviatori ed è dovuta all'attrito tra cavo e guaina o tra cavo e deviatore. Poiché la forza di attrito è proporzionale alla forza di contatto tramite il coefficiente di attrito  $\mu$ , si ottiene, supponendo  $dT \ll P(s)$ .



**Figura 2.3:** Calcolo delle perdite per attrito  $\Delta P_\mu$

$$\Delta P_{\mu} = P_0 - P(s) = P_0 \cdot [1 - e^{-\mu \cdot (\alpha + k \cdot s)}]$$

I valori del coefficiente  $\mu$  definiti dall' EC2 sono riportati nella seguente tabella:

	Post-tensione <sup>1)</sup>	Precompressione non aderente			
		Condotto di acciaio non lubrificato	Condotto HDPE non lubrificato	Condotto di acciaio lubrificato	Condotto HDPE lubrificato
Filo laminato a freddo	0.17	0.25	0.14	0.18	0.12
Trefolo	0.19	0.24	0.12	0.16	0.10
Barra deformata	0.65	-	-	-	-
Barra liscia tonda	0.33	-	-	-	-

1) Valori validi per cavi che riempiono circa la metà della guaina

**Tabella 2.2:** Valori del coefficiente di attrito  $\mu$

I valori di  $k$  variano nell'intervallo 0.005÷0.01 rad/m per la post-tensione. Nel caso di precompressione esterna le deviazioni non-intenzionali possono essere trascurate.

### 2.3.3 Perdite per rientro ancoraggio

È la perdita di tensione dovuta al rientro del cavo all'interno del cuneo di ancoraggio. Tale perdita ha in genere effetto confinato nelle zone terminali del cavo, grazie all'intervento, questa volta benefico, dell'attrito, che impedisce che l'effetto del rientro si risenta in un tratto troppo esteso di trave. Può però accadere che, per particolari tracciati caratterizzati da attrito ridotto e per travi di lunghezza limitata, l'effetto del rientro degli ancoraggi possa interessare una zona di estensione non trascurabile.

### 2.3.4 Cadute di tensione

La forza di precompressione, così come determinata considerando le perdite descritte precedentemente, subisce delle ulteriori variazioni nel tempo a causa dei fenomeni reologici del calcestruzzo e del rilassamento dell'acciaio. Siano:

- $\varepsilon_{c,sh}$  deformazione per ritiro del calcestruzzo
- $\varepsilon_{c,c}$  deformazione per fluage del calcestruzzo
- $\Delta\sigma_r$  variazione di tensione nell'acciaio dovuta al rilassamento.

## 2.4 Gli acciai da precompressione

Per il cemento armato precompresso vengono utilizzati acciai ad alta resistenza (acciai armonici), che presentano pertanto elevati valori di allungamento al limite elastico, necessari per contenere le perdite. Essi presentano comportamento altamente fragile caratterizzato da una elevata resistenza in assenza o quasi di snervamento.

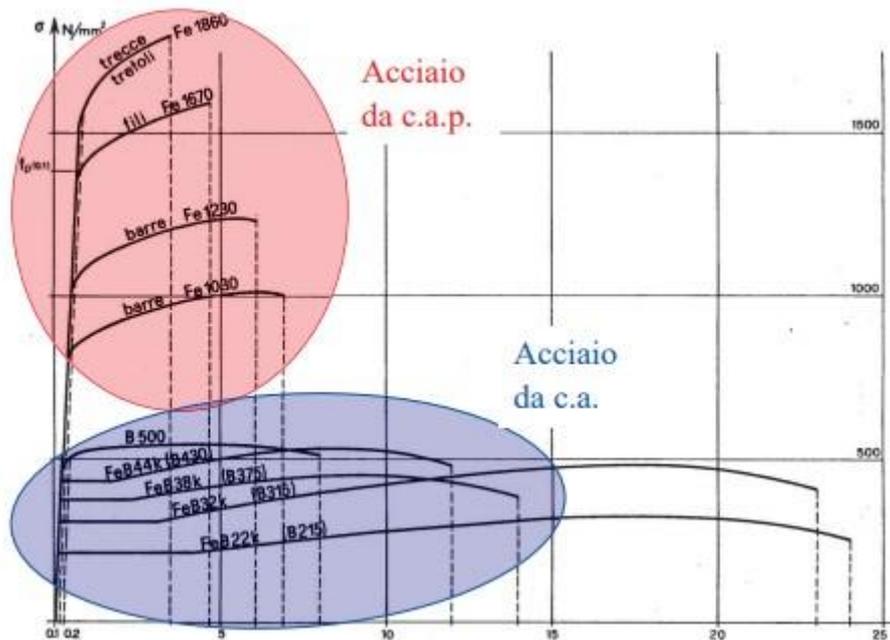


Figura 2.4 : Diagramma costitutivo acciaio

Per tale motivo si adotta la convenzione di utilizzare il valore della tensione allo 0.2% di deformazione residua o all'1% di deformazione sotto carico in sostituzione della tensione di snervamento. Tale tipologia di acciai può arrivare a resistenze dell'ordine di 1500-1800 MPa. Gli acciai da c.a.p. sono disponibili sotto forma di fili, trecce, trefoli e funi generalmente forniti in rotoli o bobine, barre in fasci.

I fili sono un prodotto laminato a sezione piena, generalmente fornito sotto forma di rotoli. I fili possono essere tondi o di altre forme; vengono individuati mediante il diametro nominale e non presentano snervamento. Non è consentito l'impiego di fili lisci nelle strutture precomprese ad armature pre-tese. Ciascun rotolo di filo liscio, ondulato o con impronte deve essere esente da saldature.

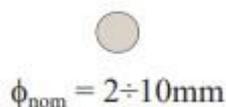


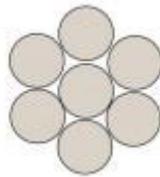
Figura 2.5 : Fili

Una treccia è costituita da 2 o 3 fili avvolti ad elica intorno al loro comune asse longitudinale; passo e senso di avvolgimento dell'elica sono eguali per tutti i fili della treccia.



**Figura 2.6 :** Treccie

Un trefolo è costituito da più fili avvolti ad elica intorno ad un filo rettilineo completamente ricoperto dai fili elicoidali. Il passo ed il senso di avvolgimento dell'elica sono uguali per tutti i fili di uno stesso strato.



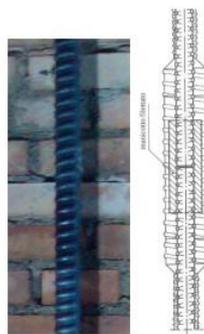
**Figura 2.7 :** Trefoli

Le funi sono costituite da un gran numero di fili organizzati in vario modo. Le funi sono generalmente utilizzate per gli apparecchi di sollevamento, come ascensori, montacarichi ed impianti a fune, e non per il cemento armato precompresso.



**Figura 2.8 :** Funi

La barra da c.a.p. è un prodotto laminato di sezione piena, forniti soltanto in forma di elementi rettilinei e piuttosto rigidi. Le barre possono essere lisce, a filettatura continua o parziale, con risalti; vengono individuate mediante il diametro nominale.



**Figura 2.9 :** Barra

### 3. Caso studio: il Viadotto “Molise 1”

Il viadotto in esame fa parte della strada statale 647 Fondo Valle del Biferno (SS 647), chiamata comunemente Bifernina, una delle strade statali principali del Molise. Si presenta a una corsia per senso di marcia ed è priva di gallerie ed intersezioni a raso ad eccezione di qualche accesso privato. È lunga 75,250 km e collega la strada statale 17 dell'Appennino Abruzzese e Appulo Sannitico all'altezza di Bojano con la strada statale 87 Sannitica. Il tratto più affascinante di questa strada è rappresentato dalla diga del Liscione, costruita sul fiume Biferno nel 1972 al fine di creare un bacino artificiale che prende il nome di lago di Guardialfiera o di Liscione. Si tratta di un invaso che si sviluppa essenzialmente lungo l'asse SO-NE. La strada lo sovrasta nel tratto iniziale e finale mediante due viadotti (Molise 1 e Molise 2) di 3,6 e 4,9 chilometri progettati nel 1966 dall'ingegner Filippo Arredi.



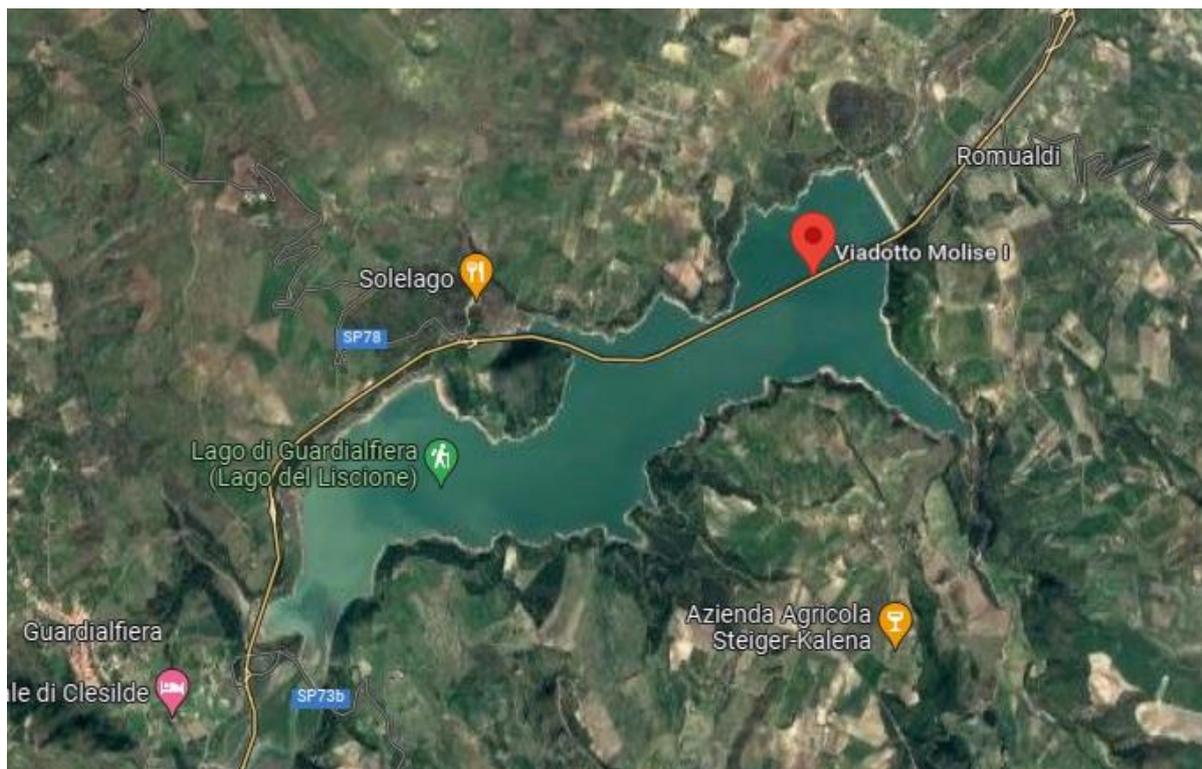
**Figura 3.1:** Ponte del Liscione

Sulla sponda est del lago si colloca il punto d'incontro tra il viadotto e il piano della diga del Liscione. La Diga del Liscione è uno sbarramento lungo quasi 500 metri ed è costituito da un terrapieno impermeabilizzato con uno spesso strato di calcestruzzo. La diga principale è un rilevato con sezione trapezoidale, con larghezza in sommità di 9 metri. Il viadotto progettato da Arredi la scavalca poco più in alto della sua linea di colmo.



**Figura 3.2:** Diga del Liscione

La strada è un ottimo collegamento tra l'Appennino e l'Adriatico, inserendosi tra quelle infrastrutture che hanno l'obiettivo di velocizzare i tempi di guida tra le due coste italiane.



**Figura 3.3:** Ponti “Molise 1” e “Molise 2” visti da satellite



**Figura 3.4 :** SS 647 Fondo Valle del Biferno

Il viadotto “Molise 1” è costituito da singole campate di lunghezza pari 32,40 metri realizzate ciascuna da n. 5 travi ad interasse di 2,47 m. Le travi sono di forma a “T” e sono collegate da soletta in conglomerato cementizio gettata in opera, per tutte le parti su terra, mentre l’attraversamento dell’invaso del Liscione è costituito da campate di m 68,00 realizzate con n. 3 travi precomprese a doppia T, collegate con soletta gettata in opera. Le foto risalenti all’epoca della realizzazione del viadotto mostrano chiaramente che le opere sono state realizzate completamente sul posto, con prefabbricazione e precompressione delle travi in situ. L’altezza media del viadotto è di 35 m.

### *3.1 Inquadramento e descrizione dell'opera*

I due ponti in calcestruzzo armato precompresso che coprono una lunghezza totale di 7 km sono formati da un totale di 62 piloni. Dalla relazione di calcolo datata 25 maggio 1966 si evince che i calcoli statici sono stati redatti in base alle norme ufficiali vigenti (R.D. n.2229 del 16/22/1939 – D.G.P.S. n. 1516 del 20/12/1947) e alle Circolari del Consiglio Superiore dei LL.PP. n.384 del 14/2/1962 sui carichi per il calcolo dei ponti stradali e numero 1398 del 23/1/1965 sulle strutture in cemento armato precompresso.



**Figura 3.5:** Vista piloni

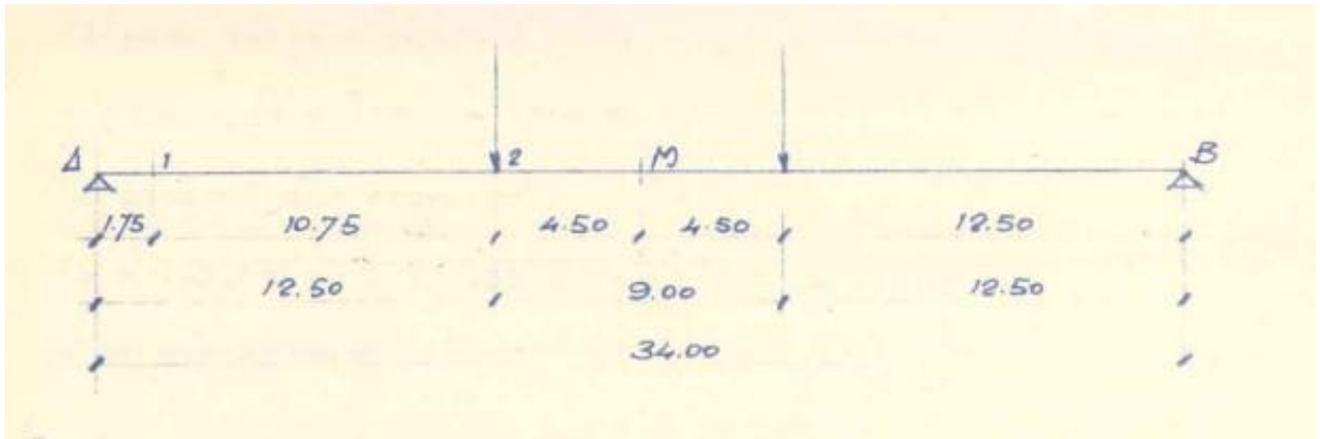
### 3.1.1 L'impalcato

L'impalcato è costituito da travi e solette ad armature aderenti e con traverse precomprese a cavi scorrevoli. Le solette sono prefabbricate in lastre aventi lunghezza pari alla larghezza dell'impalcato. Il tipo di impalcato è stato approvato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici con nota n. 1456 del 16/5/1964.



**Figura 3.6:** Vista impalcato

### 3.1.2 Fasi di costruzione e di calcolo delle travi



**Figura 3.7:** Sezione longitudinale trave di bordo da relazione di calcolo

Le fasi di costruzione e messa in opera delle travi principali sono 4. La fase 1 è quella di precompressione iniziale e di trasporto e posa in opera. La trave è soggetta solo al peso proprio. Nella fase 2 vengono posti in opera gli elementi prefabbricati delle traverse e delle solette. La trave è soggetta al peso relativo. La fase 3 è quella in cui, avvenuta la maturazione dei getti di collegamento delle solette si procede all'esecuzione delle sovrastrutture e della pavimentazione stradale. La fase 4 corrisponde all'azione dei carichi accidentali per cui la trave resiste come nella fase precedente.

Il calcolo delle travi è stato eseguito sulla base della seguente analisi dei carichi:

Fase 1

Il peso proprio della trave è così definito:

$$1.95 \cdot 0.65 - 2 \cdot \left( \frac{1.09 + 1.67}{2} \cdot 0.225 \right) \cdot 2500 = 1615 \text{ kg/m} = 16.15 \text{ kN/m}$$

In corrispondenza delle traverse si hanno due carichi concentrati così definiti:

$$0.621 \cdot 0.63 \cdot 2500 = 980 \text{ kg} = 9.8 \text{ kN}$$

$$\frac{4 \cdot 1.75 \cdot 1.77 \cdot 0.3 \cdot 2500}{5} = 1860 \text{ kg} = 18.6 \text{ kN}$$

Fase 2

Il peso della soletta è:

$$2.4 \cdot 0.2 \cdot 2500 = 1200 \text{ kg/m} = 12 \text{ kN/m}$$

Fase 3

Si ha solamente un carico uniforme così definito:

Marciapiedi  $2 \cdot 1 \cdot 0.3 \cdot 2600 = 1440 \text{ kg/m}$

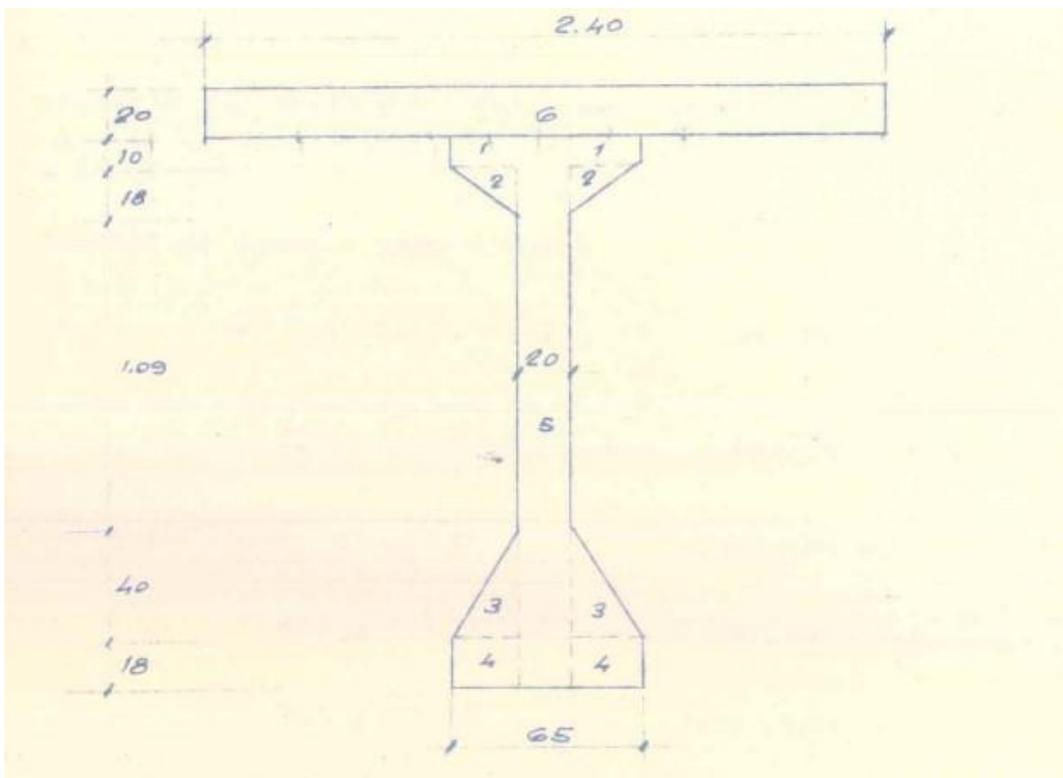
Pavimentazine  $10 \cdot 200 = 2000 \text{ kg/m}$

Parapetti e sicurtvia  $60 \text{ kg/m}$

$$\frac{3500}{5} = 700 \text{ kg/m} = 7 \text{ kN/m}$$

### 3.1.3 Caratteristiche geometriche delle sezioni

Le 5 travi che costituiscono l'impalcato presentano la medesima sezione trasversale e risulta essere la seguente:



**Figura 3.8:** Sezione trasversale trave di bordo da relazione di calcolo

L'area della trave con la parte di soletta di competenza è la seguente:

$$2 \cdot 22.5 \cdot 10 = 450 \text{ cm}^2$$

$$1/2 \cdot 2 \cdot 22.5 \cdot 18 = 405 \text{ cm}^2$$

$$1/2 \cdot 2 \cdot 22.5 \cdot 40 = 900 \text{ cm}^2$$

$$2 \cdot 22.5 \cdot 18 = 810 \text{ cm}^2$$

$$20 \cdot 195 = 3900 \text{ cm}^2$$

$$20 \cdot 240 = 4800 \text{ cm}^2$$

$$A = 450 + 405 + 900 + 810 + 3900 + 4800 = 11265 \text{ cm}^2 = 1.1265 \text{ m}^2$$

Il momento statico è così valutato:

$$S = 450 \cdot 190 + 405 \cdot 179 + 900 \cdot 31.3 + 810 \cdot 9 + 3900 \cdot 97.5 + 4800 \cdot 205 \\ = 1557705 \text{ cm}^3 = 1.56 \text{ m}^3$$

Il momento d'inerzia:

$$J = \left( \frac{1}{12} \cdot 45 \cdot (10^3 + 18^3) \right) + \left( \frac{1}{36} \cdot 45 \cdot (18^3 + 40^3) \right) + \left( \frac{1}{12} \cdot 20 \cdot 195^3 \right) \\ + (450 \cdot 101.26^2) + (405 \cdot 90.26^2) + (900 \cdot 57.44^2) + (810 \cdot 79.74^2) \\ + (3900 \cdot 8.76^2) + \left( \frac{1}{12} \cdot 240 \cdot 20^3 \right) + (6465 \cdot 49.45^2) + (4800 \cdot 66.72^2) \\ = 66127600 \text{ cm}^4 = 0.66 \text{ m}^4$$



**Figura 3.9:** Fotografia impalcato stato attuale

### 3.1.4 Materiali

Il calcestruzzo utilizzato all'atto della messa in coazione degli elementi prefabbricati ha mostrato una resistenza cubica massima di  $420 \text{ kg/cm}^2$ . La sollecitazione unitaria massima di compressione ammessa all'atto della precompressione risultava di  $420 \times 0.42 = 176 \text{ kg/cm}^2$ . Il calcestruzzo impiegato nelle strutture in c.a.p. si differenzia da quello usato nel c.a. solamente per una resistenza più elevata, ciò perché deve essere associato ad acciai di elevata resistenza e perché nella fase di presollecitazione i livelli di tensione raggiungibili possono essere estremamente elevati.

Calcestruzzo per l'impalcato:

$$R_{ck} = 420 \text{ kg/cm}^2 = 41.18 \text{ MPa}$$

$$f_{ck} = 0.83 \cdot R_{ck} = 34.18 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 42.18 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 22000 \cdot (f_{cm}/10)^{0.3} = 33880 \text{ MPa}$$

Resistenza caratteristica cubica

Resistenza cilindrica a compressione

Resistenza media cilindrica a compressione

Modulo elastico

### 3.1.5 Armatura di precompressione trave di bordo

La trave è precompressa nella fase 1 con 60 trefoli  $\phi$  1 / 2'' dei quali 22 inclinati e 38 dritti. I trefoli inclinati sono disposti su quattro file.

#### Trefolo 7 fili

Standard italiano DM 14/01/2008

Diametro nominale		Sezione	Tolleranza sulla sezione	Tensione caratteristica	Tensione all'1% di allungamento	Modulo elastico	Tolleranza sul modulo elastico	fp1%/fp1	fp1%/fp1
$\phi$	mm	mm <sup>2</sup>	%	MPa	MPa	MPa	%	%	%
5/16	7.90	38	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95	85-95
3/8	9.30	52	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95	85-95
3/8 S	9.60	55	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95	85-95
7/16	11.11	75	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95	85-95
1/2	12.50	93	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95	85-95
1/2 S	12.90	99	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95	85-95
6/10	15.20	139	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95	85-95
6/10 S	15.70	150	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95	85-95
7/10	17.80	190	± 2	1860	1670	201000	± 5	85-95	85-95

Figura 3.10: Trefoli 7 fili

In corrispondenza del tratto centrale la distanza  $d$  dal lembo inferiore del baricentro relativo è:

$$d = (20 \cdot 13 + 2 \cdot 25)/22 = 14.09 \text{ cm}$$

Quelli dritti sono disposti in tre gruppi, due laterali di 17 trefoli ciascuno ed uno centrale di quattro trefoli. Si ha:

$$d = (20 \cdot 9 + 7 \cdot 17 + 6 \cdot 21)/38 = 12.37 \text{ cm}$$

Pertanto, la distanza del baricentro dell'armatura di precompressione dal lembo inferiore della trave risulta nel tratto centrale definito da:

$$d = (21 \cdot 14.09 + 38 \cdot 12.37)/60 = 13 \text{ cm}$$

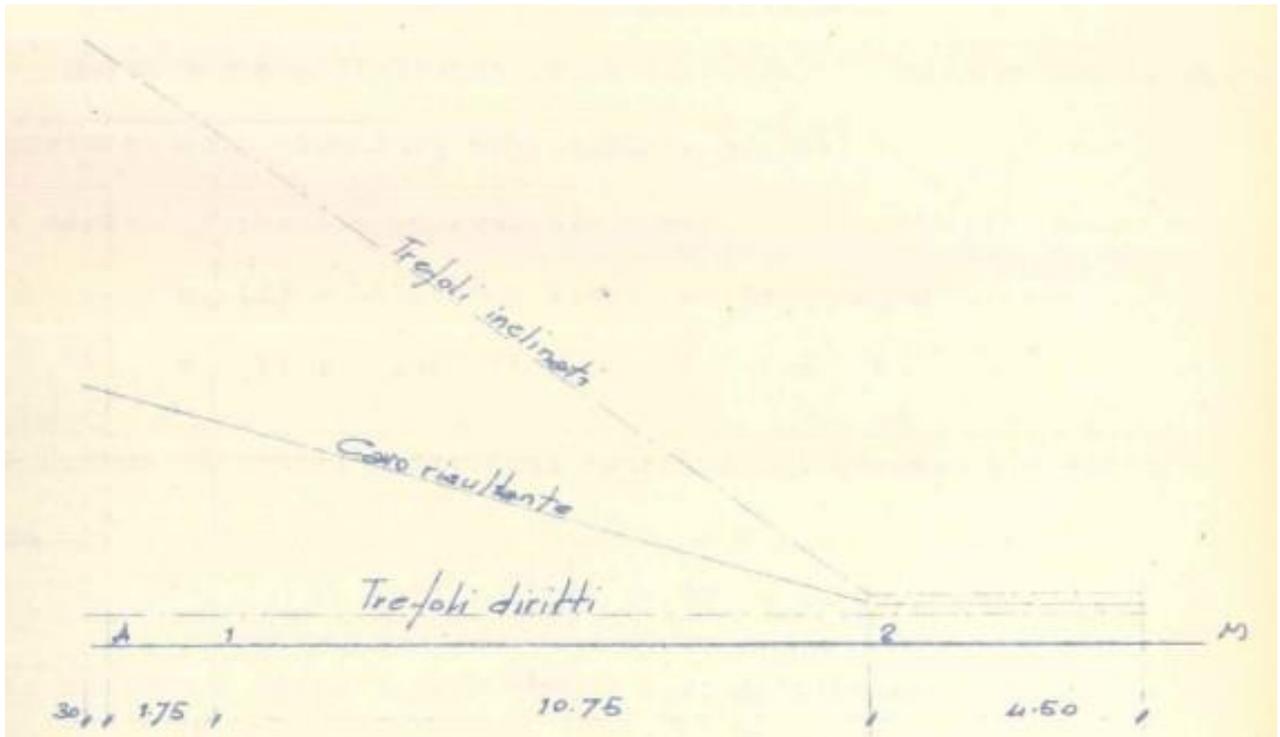
In corrispondenza delle testate i trefoli inclinati sono disposti a distanze mutue di 5.5 cm dal bordo superiore della trave e pertanto ad una distanza dal basso di

$$195 - (6 \cdot 5.5) = 162 \text{ cm}$$

E pertanto l'inclinazione del fascio di trefoli inclinati risulta

$$\tan \alpha = \frac{162 - 14.1}{1280} = 0.11555$$

Trefoli inclinati e cavo risultante hanno quindi l'andamento indicato nella figura seguente:



**Figura 3.11:** Andamento cavi da relazione di calcolo

### 3.1.6 Perdite stimate

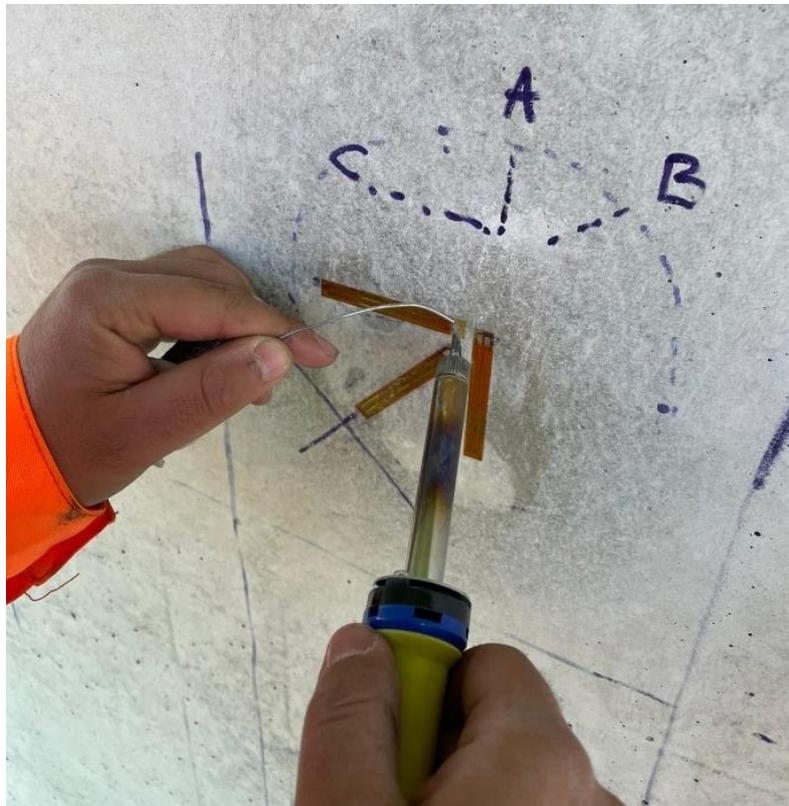
Le cadute lente di tensione nel tempo sono previste dell'ordine di grandezza seguente:

Per deformazione plastica dell'acciaio	10.1%
Per deformazione plastica del calcestruzzo	9.5%
Per ritiro del calcestruzzo	4.6%
	24.2%

#### 4. Prova di rilascio tensionale

La prova consiste nella determinazione dello stato tensionale su calcestruzzo in travi precomprese finalizzato alla valutazione della precompressione residua. Il metodo prevede l'acquisizione dei dati sperimentali di deformazione in continuo dagli estensimetri durante l'esecuzione della carota. Come mostrato in figura sono stati posizionati 3 estensimetri di lunghezza 6 cm, orientati con 3 direzioni diverse:

- Estensimetro SG\_A, in direzione verticale
- Estensimetro SG\_B, in direzione a 45°
- Estensimetro SG\_C, in direzione orizzontale



**Figura 4.1:** Prova di rilascio tensionale sulla trave di bordo del ponte della Bifernina

## 4.1 Principio

La prova di rilascio tensionale si inquadra nell'ambito dell'intensa attività recentemente avviata nel nostro Paese per valutare la sicurezza delle opere d'arte presenti sulla rete stradale italiana, con particolare attenzione alle opere con sistemi di precompressione. Viene dunque richiesta l'esecuzione di indagini speciali per questa tipologia di elementi strutturali. La conoscenza dello stato di conservazione dei cavi è da lungo tempo oggetto di ricerca e sperimentazioni senza tuttavia esser ancora giunti alla messa a punto di una tecnica di indagine in grado di fornire attendibili indicazioni a riguardo. Alla luce di ciò, per dare risposta alla immediata richiesta di informazioni in merito alla sicurezza delle opere d'arte, si è scelto di seguire un differente approccio che non si basa su indagini "locali" volte a valutare puntualmente lo stato di conservazione di cavi, bensì si mira ad ottenere una indicazione sulla complessiva efficienza del sistema di precompressione e sulla efficacia a garantire il soddisfacimento delle prestazioni richieste all'elemento trave. Tale obiettivo può essere ottenuto, mediante una semplice analisi tensionale di sezioni della trave in corrispondenza delle quali sono eseguite prove di rilascio tensionale del calcestruzzo per ricavare sperimentalmente lo stato di sollecitazione agente in un determinato punto appositamente prescelto. L'approccio proposto non contiene elementi di novità dal punto di vista teorico. Il presente studio è atto a sistematizzare una procedura chiara e di semplice applicabilità che fornisce indicazioni quantitative attendibili, facilmente interpretabili e di rapida derivazione che consentono di esprimere un giudizio oggettivo sullo stato di efficienza e sull'efficacia del sistema di precompressione nel suo insieme, in modo tale da essere in grado di cogliere quelle situazioni in cui sussistono anomalie del sistema di precompressione tali da poter pregiudicare la sicurezza statica dell'elemento investigato. Tale caratteristica costituisce un significativo vantaggio rispetto alle indagini "locali" che forniscono informazioni limitate alla zona indagate, senza poter escludere la presenza di difetti in altri punti dell'elemento indagato e, quindi, fornisce una informazione parziale e di valenza limitata. Un importante elemento di avanzamento che caratterizza il metodo di valutazione proposto e lo rende applicabile su larga scala, è costituito dalla nuova tecnica di esecuzione delle prove di rilascio tensionale volte a valutare l'efficacia di diverse prove da utilizzare nell'ambito delle indagini speciali. La prova di rilascio tensionale del cls non è ad oggi normata. Il metodo proposto è stato applicato su larga scala nell'ambito dei progetti sperimentali.

### 4.1.1 Metodo di indagine

Il metodo d'indagine proposto per la valutazione dello stato di efficienza e sull'efficacia del sistema di precompressione di travi in c.a.p. si basa sulla misurazione della tensione effettivamente agente in punto di una sezione dell'elemento. Assumendo noti i carichi esterni, l'unica incognita per la determinazione dello stato di sollecitazione risultante nella sezione investigata è lo sforzo di precompressione agente, che può quindi essere ricavato risolvendo la ben nota formula di Navier:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{N \cdot e}{W} - \frac{M_G}{W}$$

$$N = \frac{\left(\sigma + \frac{M_G}{W}\right)}{\left(\frac{1}{A} + \frac{e}{W}\right)}$$

dove:

$\sigma$  è la tensione agente (misurata con la prova RT);

$N$  è la precompressione agente (incognita);

$e$  è l'eccentricità del cavo risultante;

$M_G$  è il momento dovuto a pesi propri e carichi permanenti;

$A$  è l'area della sezione;

$W$  è il modulo di resistenza.

Nel caso di costruzione per fasi, come tipico per opere in c.a.p., si deve prestare attenzione nell'applicare la formula per le singole fasi, utilizzando gli appropriati valori di  $A$ ,  $W$  ed  $e$  della sezione effettivamente reagente, e quindi sommare gli effetti. La tensione agente nella trave allo stato attuale si ricava a partire dai risultati delle prove di rilascio tensionale attraverso la legge di Hooke:

$$\sigma_{rt} = E \cdot \varepsilon_{rt}$$

dove:

$\varepsilon_{rt}$  è la deformazione misurata dalla prova RT

$E$  è il modulo elastico del materiale.

Nota  $N$  dalla formulazione inversa dell'equazione di Navier e lo sforzo  $N_0$  al tiro dalla documentazione progettuale o, in assenza, da una stima basata sull'esperienza, si determina la perdita di precompressione effettiva, che confrontata con quella stimata in progetto fornisce una prima indicazione sull'efficienza del sistema di precompressione rispetto alle previsioni progettuali. Il valore della precompressione residua stimato come illustrato può essere utilizzato nello svolgimento delle verifiche rispetto agli SLU. Il metodo è basato su semplici concetti e nozioni teoriche che favoriscono la verifica delle condizioni di applicabilità, dell'attendibilità e dell'accuratezza dei risultati. Le espressioni utilizzate trovano applicabilità al caso delle travi in c.a.p. in quanto, per elementi integri in condizioni di esercizio, la risposta è in campo elastico lineare. L'accuratezza della tensione ricavata mediante la prova di rilascio tensionale dipende essenzialmente dal punto di misura e dall'attendibilità del dato di deformazione misurato sperimentalmente. Tanto più il punto di misura si trova in uno stato di sollecitazione monoassiale, tanto maggiore è l'accuratezza del valore di tensione. La prova viene eseguita sulle superfici laterali della trave e può essere svolta con varie modalità. Si può procedere effettuando un carotaggio a sezione circolare oppure effettuando dei tagli che permettono di estrarre un provino tronco piramidale. C'è differenza tra queste due tipologie di prove in quanto quella a sezione circolare deve raggiungere profondità maggiori al fine di far rilassare completamente il provino. Questo in alcuni casi può essere dannoso per l'elemento strutturale. Al contrario effettuando i tagli viene interessata una porzione superficiale della sezione e dunque non vengono interessate le armature di precompressione. La forma tronco-piramidale infatti consente il completo rilascio tensionale e in questo modo la prova è sostanzialmente non distruttiva.



**Figura 4.2:** Prova di rilascio tensionale su calcestruzzo mediante carota circolare



**Figura 4.3:** Prova di rilascio tensionale su calcestruzzo mediante provino tronco piramidale

Si è posta anche la questione degli effetti di bordo che possono portare a sottostimare la tensione agente nella porzione interna della sezione. Le tensioni misurate nelle prove di RT eseguite in laboratorio su elementi cubici di calcestruzzo soggetti ad uno stato di sollecitazione noto però non hanno mostrato influenza degli effetti di bordo. Ovviamente, per i travi in c.a.p. di grande luce c'è un diverso effetto di scala rispetto ai campioni provati in laboratorio. Tuttavia, l'eventuale errore per difetto nella determinazione della tensione agente è in favore di sicurezza, ovvero si sottostima la precompressione agente, per cui, sempre in relazione agli obiettivi dell'indagine, ciò non costituisce un limite alla validità del metodo proposto. Studi numerici e sperimentali sulla problematica di cui sopra sono in corso di svolgimento. Per quanto riguarda il modulo elastico, considerata la variabilità delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo,

è raccomandabile effettuare delle prove in prossimità del punto di misura della prova RT per stimare il valore locale di E. A tal fine potrebbero essere eseguite prove di pull-out per stimare la resistenza a compressione del calcestruzzo, e quindi ricavare il modulo elastico mediante l'espressione:

$$E_c = 22000 \left( \frac{f_{c,sito}}{10} \right)^{0.3}$$

riportata al §-11.2.10.3 della NTC18.

In alternativa, il modulo può essere ricavato da prove su campioni di cls prelevati dall'elemento indagato da sottoporre a prova di laboratorio. Questa seconda opzione è certamente più invasiva e laboriosa, oltre a non consentire una stima immediata del modulo elastico, per cui si ritiene possa essere adottata solo nel caso in cui le indagini in corso non siano limitate alla valutazione dell'efficacia del sistema di precompressione, bensì si inquadrino in una più generale campagna di indagine volta ad acquisire la conoscenza accurata dell'opera, come previsto dalle vigenti norme nel caso di valutazioni di sicurezza delle costruzioni esistenti. Inoltre, come mostrato nel seguito, l'influenza della variabilità del modulo elastico sulla valutazione dello stato di precompressione è inferiore al 5 %, quindi all'interno dell'intrinseca ed irriducibile variabilità del fenomeno indagato. Infatti per il nostro scopo è stato utilizzato il modulo elastico da relazione di calcolo. Infine, relativamente ai carichi agenti, la deformazione misurata mediante la prova di rilascio è riferibile ai soli pesi propri e carichi permanenti, che possono essere conosciuti con accuratezza. Gli autoveicoli ed i mezzi leggeri che transitano sull'opera durante l'esecuzione della prova hanno un limitato effetto sui risultati della stessa, come sarà mostrato nel seguito dall'analisi dei risultati della sperimentazione effettuata. Alla stima delle perdite di precompressione si è soliti attribuire molta importanza in quanto perdite significativamente superiori alle previsioni progettuali sono una spia di possibili difetti nei cavi, tipicamente corrosione per infiltrazioni di acqua o cattiva iniezione delle guaine. Tuttavia, essa non dà indicazioni sull'efficacia del sistema di precompressione, intesa come la capacità dell'elemento di soddisfare le prestazioni richieste per l'esercizio con il corrispondente livello di sicurezza implicitamente previsto dalla Norma. Tale informazione può essere tuttavia ottenuta molto semplicemente sempre a partire dal valore di tensione misurato mediante la prova di rilascio tensionale.

## 4.2 *Tecnica di prova*

La tecnica di prova è stata sviluppata dal Laboratorio *TE.MA.CO. Srl*. Le specifiche di prova sono state modificate nel corso della campagna stessa, intervenendo sulla disposizione degli estensimetri, sulle distanze a cui eseguire le carote, sulle modalità di registrazione del dato, al fine di determinare il set-up ottimale, che è risultato essere quello di seguito illustrato. Queste accortezze e miglioramenti è stato possibile ottenerli grazie ad una prima prova in laboratorio che ha permesso la taratura della stessa. Infatti, solo dopo aver imparato a posizionare correttamente gli estensimetri e a saperne leggere e interpretare i risultati dall'amplificatore è stato possibile andare in sito, sulla trave di bordo del Ponte della Bifernina.

Tra la prova svolta in laboratorio e quella svolta sulla trave indagata ci sono delle differenze.

### 4.2.1 Prova di laboratorio

La prova di rilascio tensionale è stata prima tarata in laboratorio e solo successivamente si è andati in sito, sulla trave di bordo del Ponte della Bifernina. La prova è divisa in due principali passi. Il primo consiste nell'applicazione pratica degli estensimetri, la quale si è rivelata una procedura molto delicata. La seconda parte della prova concerne l'elaborazione e l'interpretazione dei dati di output attraverso l'uso di un software specifico.

Per la prima parte della prova, ovvero l'applicazione degli estensimetri sul calcestruzzo, l'attrezzatura utilizzata è stata la seguente:

- Pietra porosa per levigare la superficie del calcestruzzo
- Dosatori per colla
- Colla X60 in polvere
- Colla X60 liquida
- Contenitore in plastica per impasto colla con mescolatore in legno
- Carta abrasiva (grana 80, 150,222)
- Solvente spray isopropilico
- Basette in acciaio
- Estensimetri
- Scotch
- Taglierino
- Colla Z70 liquida

Step da eseguire:

1. Carteggio superfici con pietra porosa per rimuovere le asperità del calcestruzzo e pulizia da polvere



**Figura 4.4 :** Procedura di applicazione estensimetri

2. Mescolare colla in polvere X60 (1 misurino) con 18 gocce di colla liquida X60. Con la spatolina spargere la colla su tutta la superficie da analizzare. Tempi di attesa 15-20 min con aiuto di un fono. La funzione della colla è otturare i pori e avere una superficie per lo più omogenea.



**Figure 4.5 :** Procedura di applicazione estensimetri



**Figure 4.6 :** Procedura di applicazione estensimetri

3. A colla asciutta misurare le direttrici (orizzontale, verticale e diagonale) per verificare la necessità di aggiungere ulteriore colla, ovvero per essere certi che la superficie di interesse sia stata tutta ricoperta dalla colla e quindi omogenea.
4. Carteggiare la superficie con le carte abrasive (prima grana 80, poi 150 e poi 220) per formare uno strato leggero.



**Figura 4.7 :** Procedura di applicazione estensimetri

5. Posizionare l'ER con una pinzetta sopra una basetta di metallo. Mettere uno strato di scotch sopra e tagliare con il taglierino le estremità



**Figura 4.8:** Procedura di applicazione estensimetri



**Figure 4.9:** Procedura di applicazione estensimetri

- Una volta carteggiata la superficie tracciare le direttrici e fissare l'estensimetro lungo le direttrici. Posizionare un pezzetto di scotch alla base e intorno all'ER in modo tale che la colla, nel caso in cui fosse troppa, va sullo scotch e non sull'estensimetro. Con la base fissata ho una la linguetta. (Colla: la prima goccia la buttiamo via, si effettua una pulizia sotto l'ER e sulla superficie. Posizioniamo una goccia di colla sulla base dell'ER e poi si spalma su tutto l'ER con una mano e con un dito spingere l'ER sulla superficie del cls)



**Figure 4.10** : Procedura di applicazione estensimetri



**Figure 4.11** : Procedura di applicazione estensimetri

7. Preparare il teflon e un gommino per premere una volta messa la colla. (Subito dopo posizionare il teflon e il gommino e restare fermi in modo da far aderire la colla. (Con la colla X60 è più lungo il tempo d'attesa mentre con la Z70 bastano 2 min)



**Figure 4.12** : Procedura di applicazione estensimetri

8. Una volta asciutto, togliere tutti gli strati di scotch
9. Isolare l'ER e procedere con gli altri ER
10. Posizionare la basetta
11. Iniziare a preparare i cavi e carteggiare i terminali con una matita con la punta in semi-grafite (utilizziamo carta abrasiva)



**Figure 4.13** : Procedura di saldatura cavi

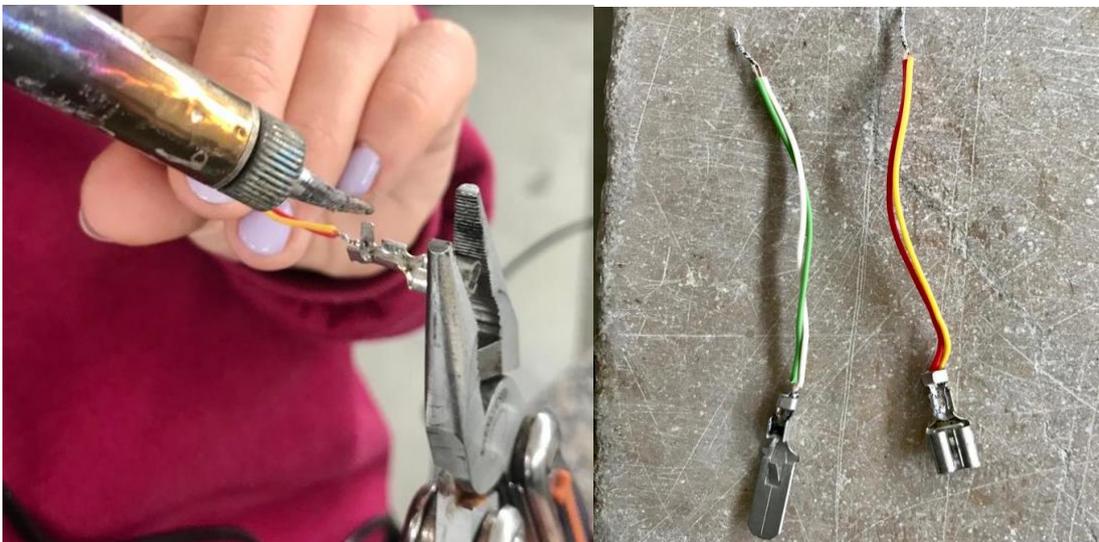
12. Saldare i cavi preparati prima con i terminali



**Figure 4.14 :** Procedura di saldatura cavi

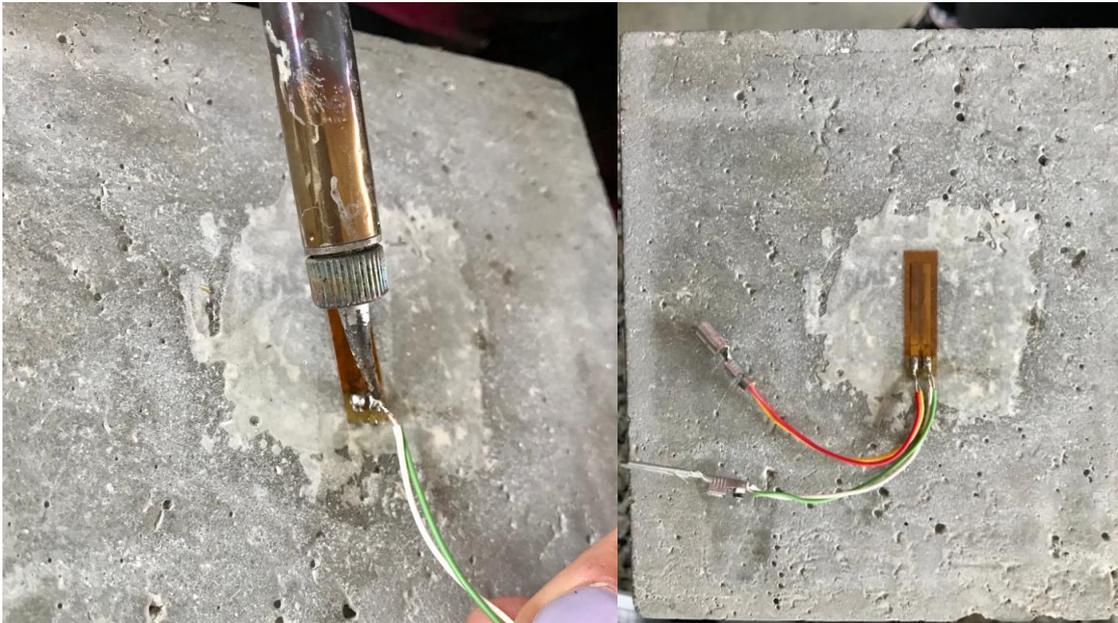
13. Stagnare la base e i collegamenti

14. Saldare i cavi con i jack



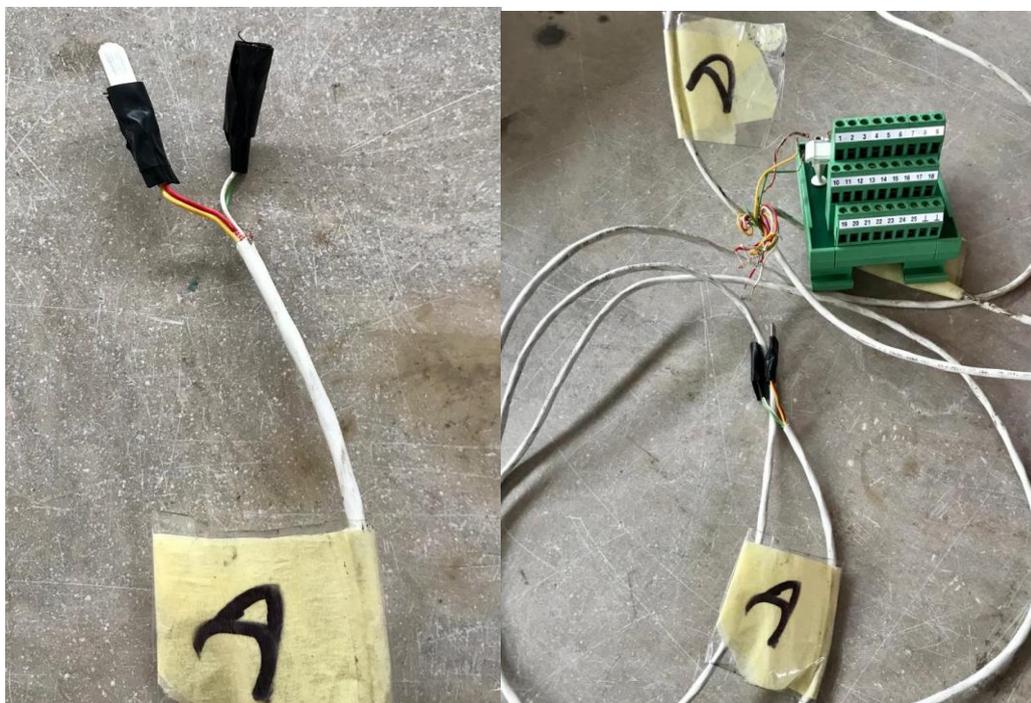
**Figure 4.15 :** Procedura di saldatura cavi

15. Scegliere i colori dei cavi e mantenere quelli per tutte le prove per comodità



**Figure 4.16:** Procedura di saldatura cavi

16. Collegare i cavi all'amplificatore in base alle combinazioni del  $\frac{1}{4}$  di ponte



**Figure 4.17 :** Connessioni cavi

17. Prendere l'amplificatore e collegarlo alla centralina (distributore di segnali leggere sul catalogo)
18. Collegamento jack maschio-femmina rispettando la combinazione di colori



**Figura 4.18 :** Conessioni cavi

19. Collegare il cavo ethernet dall'amplificatore al computer



**Figura 4.19:** Amplificatore MCG plus (fronte)



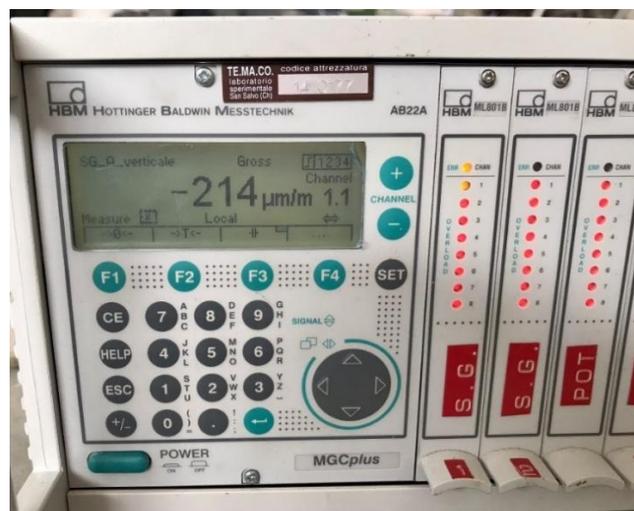
**Figura 4.20 :** Amplificatore MCG plus (fronte)

20. Effettuare il test di conducibilità elettrica per verificare il voltaggio degli estensimetri



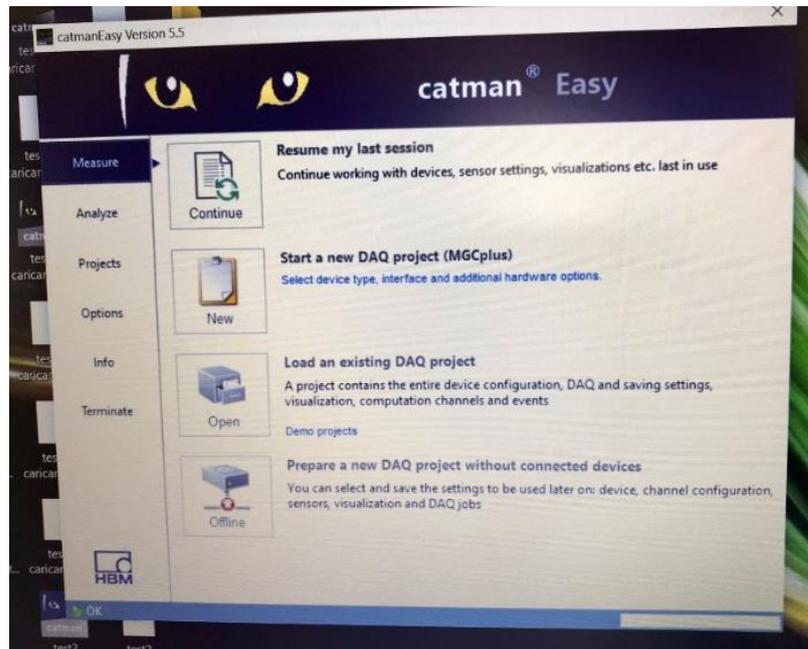
**Figura 4.21:** Apparecchio per test di conducibilità elettrica

21. Leggere le deformazioni sull'amplificatore.

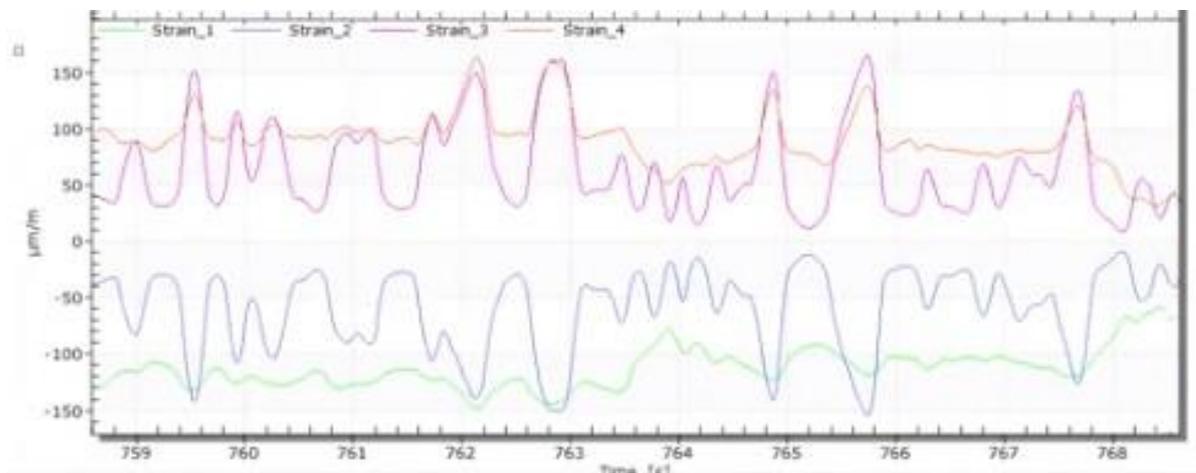


**Figura 4.22 :** Deformazioni lette sull'amplificatore

## 22. Leggere i parametri sul software CATMAN



**Figura 4.23:** Interfaccia CATMAN



**Figura 4.24:** Deformazioni rilevate da CATMAN

## 4.2.2 Prova in situ

La prova è stata eseguita procedendo con i seguenti step.

Per prima cosa è stato necessario fare un'analisi pacometrica per il rilievo delle armature in prossimità della sezione di mezzera della trave in c.a.p.

Il pacometro, strumento digitale che permette di rilevare in maniera non distruttiva la presenza la direzione e il diametro delle barre di armatura all'interno di elementi in calcestruzzo armato, ha permesso di determinare la posizione corretta in cui sarebbe dovuta essere fatta la carota evitando di tranciare anche le armature. Questa accortezza rende la prova di rilascio tensionale poco invasiva per l'elemento strutturale.

E' necessario a questo punto preparare la superficie della trave dove verranno applicati gli estensimetri. Questa è una procedura minuziosa a cui bisogna prestare particolare attenzione dato che inficerà sui risultati della prova.

Gli estensimetri sono strumenti ad elevata sensibilità ed anche piccole variazioni delle condizioni al contorno potrebbero portare a risultati errati o anomali. E' necessario inoltre sottolineare come in sito sia operativamente più complesso raggiungere la giusta configurazione per gli estensimetri e soprattutto far si che le misure siano le più indisturbate possibili. Nel caso in esame infatti la trave in cap investigata si trova ad un'altezza di 35 metri ed attraversa il fiume Liscione. Per raggiungere il punto di misura è stato adottato un by-bridge ma la presenza di vento e oscillazioni del mezzo stesso hanno reso l'applicazione degli estensimetri più complessa. Gli step eseguiti per la prova in situ però, sono stati gli stessi di quelli della prova in laboratorio.

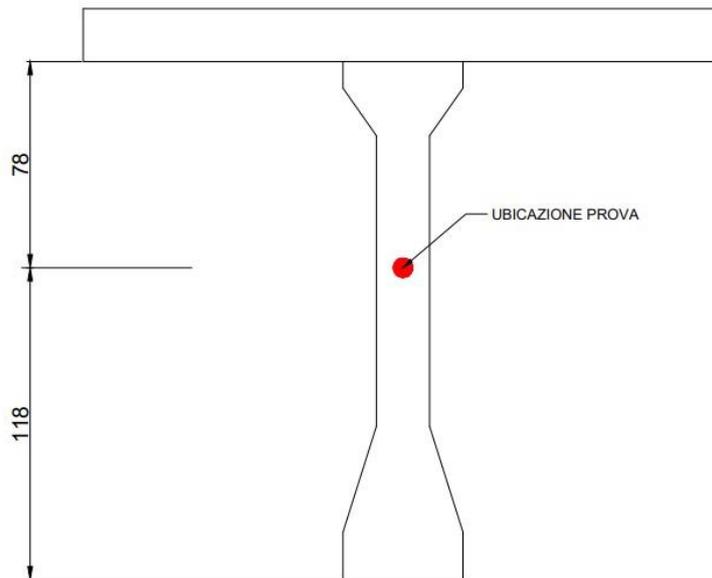
## 4.2.3 Campagna d'indagine

Il laboratorio *TE.MA.CO Srl* ha svolto una campagna di prove investigando 5 travi bordo del ponte "Molise 1".

Si tratta delle travi che vanno dalla pila 39 alla pila 42 in direzione Termoli.



**Figura 4.25:** Pianta del ponte con relative posizioni delle prove



**Figura 4.26 :** Sezione della trave con relativa posizione della prova

Vengono riportati nelle tabelle i valori delle deformazioni lungo le 3 direzioni e l'angolo di rotazione sia a L0 (lettura di zero) che a L1 (dopo che è stata effettuata la carota).

	<b>L0</b>	<b>L1</b>	<b><math>\Delta L</math></b>
<b><math>\epsilon_1</math></b>	-149	-166	-17
<b><math>\epsilon_3</math></b>	315	394	79
<b><math>\epsilon_2</math></b>	675	826	151
<b>Angolo</b>	86.41	86.29	/

**Tabella 4.1:** Campata 40-39

	<b>L0</b>	<b>L1</b>	<b><math>\Delta L</math></b>
<b><math>\epsilon_1</math></b>	-584	-594	-10
<b><math>\epsilon_3</math></b>	866	973	107
<b><math>\epsilon_2</math></b>	200	380	180
<b>Angolo</b>	55.16	57.13	/

**Tabella 4.2:** Campata 41-40

	<b>L0</b>	<b>L1</b>	<b><math>\Delta L</math></b>
<b><math>\epsilon 1</math></b>	-775	-775	0
<b><math>\epsilon 3</math></b>	-24	35	59
<b><math>\epsilon 2</math></b>	110	362	252
<b>Angolo</b>	72.58	78.49	/

**Tabella 4.3:** Campata 42-41

	<b>L0</b>	<b>L1</b>	<b><math>\Delta L</math></b>
<b><math>\epsilon 1</math></b>	192	174	-18
<b><math>\epsilon 3</math></b>	1455	1519	64
<b><math>\epsilon 2</math></b>	54	197	143
<b>Angolo</b>	43.52	45.25	/

**Tabella 4.4:** Campata 43-42

	<b>L0</b>	<b>L1</b>	<b><math>\Delta L</math></b>
<b><math>\epsilon 1</math></b>	-974	-972	2
<b><math>\epsilon 3</math></b>	1046	1090	44
<b><math>\epsilon 2</math></b>	319	415	96
<b>Angolo</b>	57.6	58.43	/

**Tabella 4.5:** Campata 44-43

## 5. Estensimetri

Le misure estensimetriche sono una metodologia di analisi non invasiva, ma di indubbia velocità e precisione, utile a misurare lo stato di materiali e strutture di vario genere in condizioni di esercizio o di stress. L'utilità delle misure estensimetriche sta nel fatto che permettono di monitorare in maniera molto precisa deformazioni meccaniche dell'oggetto analizzato altrimenti non visibili dall'occhio umano. Mediante gli estensimetri, inoltre, possono essere misurate deformazioni elastiche e plastiche su qualsiasi materiale; è solo richiesta una preparazione della superficie in corrispondenza della zona dove viene installato l'estensimetro.

Questo tipo di misura si presta inoltre all'analisi di deformazioni anche alle basse ed alte temperature ed in ambiente ostile. Le misure estensimetriche sono importanti per tutta una serie di valutazioni relative al funzionamento di strutture a regime o soggette a particolari sollecitazioni, per garantire la sicurezza delle stesse, per compiere analisi progettuali preventive o in corso d'opera o più in generale per:

- Analisi sperimentale delle tensioni
- Analisi delle tensioni residue
- Misura della coppia torcente e delle vibrazioni torsionali
- Analisi modale sperimentale
- Analisi dinamica delle sollecitazioni
- Cicli indicati su compressori alternativi ad alta pressione
- Recipienti in pressione

## 5.1 Principio di funzionamento degli estensimetri elettrici a resistenza

L'estensimetro è uno strumento di misura utilizzato per rilevare le piccole deformazioni di un corpo sottoposto a sollecitazioni meccaniche o termiche (es. applicazione di carichi o variazioni di temperatura). Esistono diverse tipologie costruttive di estensimetri e le principali sono le seguenti:

- Estensimetri elettrici a resistenza
- Estensimetri a semiconduttore (elevata sensibilità)
- Estensimetri capacitivi (elevata temperatura)
- Estensimetri piezoelettrici
- Estensimetri fotoelastici

La tipologia utilizzata per la prova di rilascio tensionale è quello elettrico a resistenza. Questi strumenti permettono di ricavare facilmente i carichi a cui il materiale è sottoposto conoscendo a priori le caratteristiche meccanico/fisiche del materiale  $e$ , misurando le deformazioni. Mediante l'estensimetro quindi, si misura la deformazione nell'intorno di un dato punto in una dimensione nota. La deformazione di un corpo o di una struttura è un qualsiasi cambiamento della configurazione geometrica del corpo che porta ad una variazione della sua forma o delle sue dimensioni in seguito all'applicazione di una sollecitazione interna o esterna. La deformazione è una grandezza adimensionale ed è il rapporto tra la variazione di lunghezza e la lunghezza iniziale:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$$

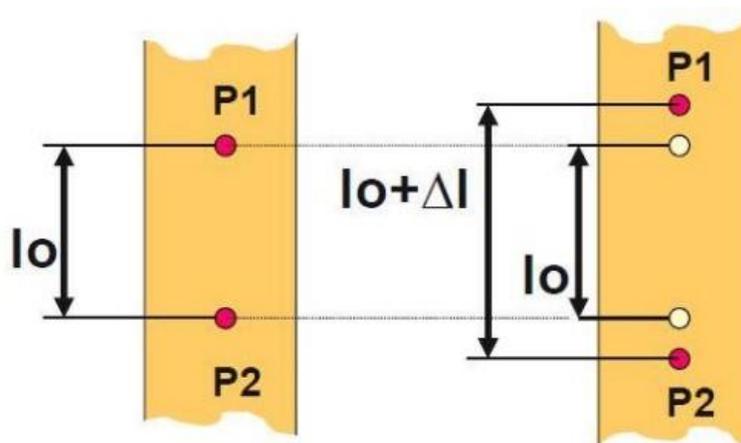
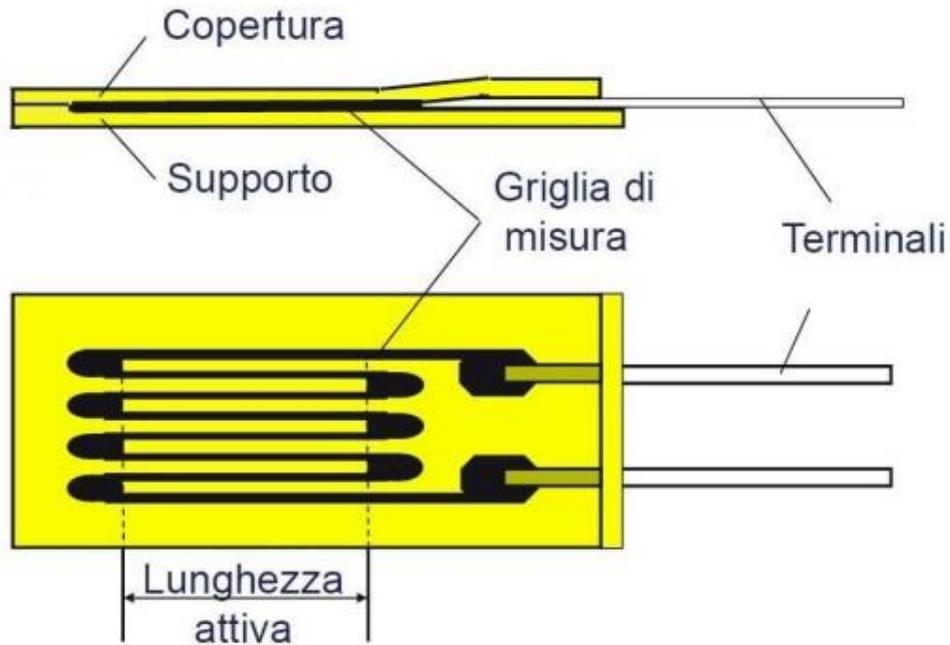


Figura 5.1 : Deformazione estensimetro

L'estensimetro elettrico a resistenza è costituito da una griglia di sottilissimo filo metallico (solitamente costantana) applicata su un supporto di materiale plastico. L'estensimetro viene utilizzato incollandolo sulla superficie del corpo di cui si vogliono misurare le deformazioni mediante colle a caldo o a freddo. La griglia dell'estensimetro segue le deformazioni della superficie a cui è incollato, allungandosi e accorciandosi insieme ad essa. Queste variazioni dimensionali causano una variazione della resistenza elettrica del filo. Misurando, tramite un

ponendo in un ponte di Wheatstone tali variazioni, si può risalire all'entità della deformazione che le ha causate.



**Figura 5.2** : Estensimetro a resistenza

Gli estensimetri elettrici si basano sulla misura della variazione di resistenza subita da un conduttore soggetto a deformazione:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{k}$$

Dove:

k = fattore di taratura

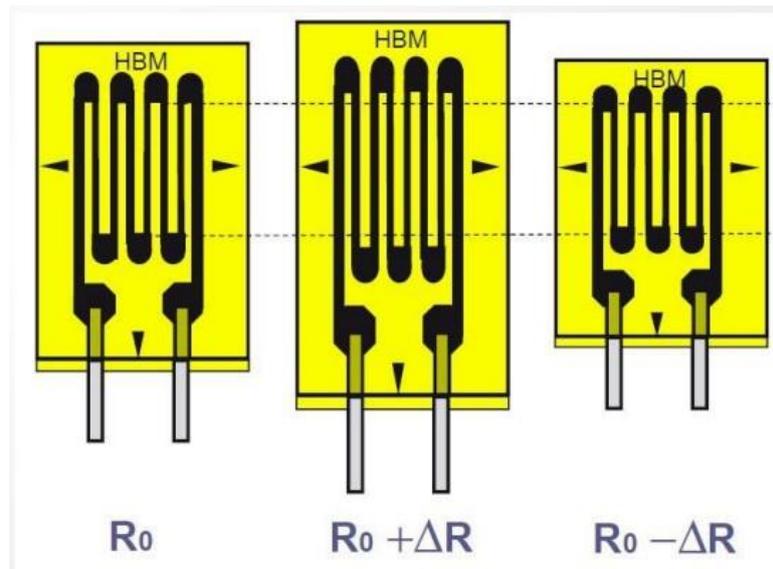
R = Resistenza dell'estensimetro

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

$\rho$  = resistività

L = lunghezza

S = sezione



**Figura 5.3** : Variazione di resistenza elettrica

La resistenza elettrica  $R$  dei materiali conduttori varia con la deformazione. Per molti materiali ed entro certi limiti la relazione tra variazione di resistenza e deformazione è lineare. L'estensimetro, quindi, rileva il valore medio della deformazione sottostante la propria griglia di misura, pertanto:

- Per materiali omogenei è possibile utilizzare ER con griglia media (3-6 cm);
- Per materiali non omogenei è consigliato l'utilizzo di una griglia lunga almeno 5 volte la disomogeneità.

### 5.1.1 Fattore di taratura

Per un estensimetro sottoposto ad uno stato di tensione monoassiale il rapporto tra la variazione di resistenza relativa  $\Delta R/R$  e la deformazione longitudinale  $\varepsilon_1$  è definito fattore di taratura  $K$ :

$$K = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_1} = 1 + 2 \cdot \nu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\varepsilon_1}$$

Il fattore di taratura viene determinato sperimentalmente dai produttori degli estensimetri, i quali procedono in modo statistico scegliendone un certo numero (generalmente l'1%) per ogni lotto di produzione e per ciascuno di questi determinando il valore di  $K$  corrispondente: dai dati ricavati si determina il valore medio e il campo di dispersione estendendo poi questi valori all'intero lotto.

## 5.2 Caratteristiche estensimetri

Esiste una vasta gamma di estensimetri che differiscono tra loro per proprietà, destinazione d'uso e componenti di cui sono dotati. Il caso della prova sperimentale svolta sul ponte "Molise 1" presenta un set-up particolare. Il materiale su cui verrà applicato l'estensimetro è calcestruzzo, quindi di natura eterogenea. Perciò la scelta dell'estensimetro deve essere effettuata tenendo conto dei seguenti criteri: geometria e collegamenti dell'estensimetro, adeguamento alla reazione alla temperatura, lunghezza della griglia attiva e resistenza elettrica. Ogni estensimetro è caratterizzato da un numero di serie, in cui ogni lettera e numero ha un preciso significato:

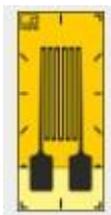
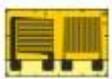


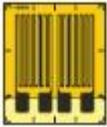
**Figura 5.4:** Numero di serie estensimetri a resistenza

## 5.2.1 Geometrie

Gli estensimetri sono costruiti in varie forme e dimensioni. Sono disponibili diverse lunghezze delle griglie di misura e varie posizioni per i contatti. Il numero elevato di forme e dimensioni è dovuto alla necessità di adattamento degli estensimetri a differenti problemi applicativi. Quando l'oggetto è sufficientemente grande rispetto alle dimensioni dell'estensimetro e il campo di deformazione è omogeneo, si possono usare estensimetri con una lunghezza di griglia di 3-6 mm. Vi sono alcuni tipi di materiali quali ad esempio agglomerati cementizi, legno, materiali plastici rinforzati, compositi, ecc., che sottoposti a tensione possono presentare campi di deformazioni non omogenei. In queste situazioni si possono impiegare estensimetri con una elevata lunghezza di griglia al fine di rilevare la media delle condizioni di deformazione esistenti lungo lo sviluppo lineare dell'estensimetro stesso. Il valore medio che si ottiene risulta attendibile quando la lunghezza della griglia è almeno quattro-cinque volte superiore alle dimensioni del nucleo aggregato più grande. Per contro, nel caso in cui la non uniformità del campo di deformazione sia legata ad un gradiente locale di tensione è necessario utilizzare estensimetri con dimensioni sufficientemente ridotte per poter rilevare l'effettivo valore della deformazione.

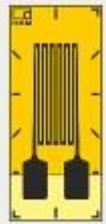
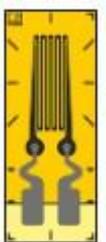
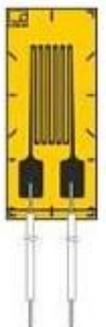
Le geometrie assunte dagli estensimetri sono le seguenti:

	Gli estensimetri lineari (es. LY4) hanno una griglia di misura e misurano la deformazione in una sola direzione.
	Le rosette T (es. XY3) hanno due griglie di misura disposte con una deviazione di 90° l'una dall'altra. Le applicazioni tipiche per questo tipo di estensimetro comprendono l'analisi dello stato di sollecitazione biassiale con le direzioni principali note e le misurazioni della tensione sulle barre di compressione.
	Gli estensimetri con forma a V (es. XY4) hanno 2 griglie di misura disposte con una deviazione di 90° l'una dall'altra. Le applicazioni tipiche per questi estensimetri comprendono le misurazioni sulle barre di torsione e la determinazione delle sollecitazioni di taglio sulle travi di taglio nella zona delle fibre neutre.

	<p>Gli estensimetri lineari doppi (es. DY4) hanno due griglie di misura disposte parallelamente l'una all'altra. Le applicazioni tipiche per questi estensimetri includono la misurazione sulle travi in flessione.</p>
	<p>Le rosette con 3 griglie di misura (es. RY8) disposte con un angolo di <math>0^\circ/45^\circ/90^\circ</math> o <math>0^\circ/60^\circ/120^\circ</math> sono adatte per l'analisi dello stato di sollecitazione biassiale con direzioni principali non note.</p>
	<p>Le catene di estensimetri (es. KY8) sono composte da 10 o 15 griglie di misura molto piccole situate su un supporto comune a distanza costante (disposte in maniera equidistante) più un estensimetro di compensazione. Le catene di estensimetri sono particolarmente adatte per la determinazione dei gradienti di deformazione.</p>
	<p>Gli estensimetri full bridge (es. VY4) hanno 4 griglie di misura disposte in modo tale che ognuna sia disposta con una deviazione di <math>90^\circ</math> da quella vicina. Le applicazioni tipiche degli estensimetri full bridge includono le misurazioni sulle barre di tensione/compressione e la determinazione delle sollecitazioni di taglio nelle travi di taglio.</p>

**Tabella 5.1:** Geometrie estensimetri

## 5.2.2 Collegamenti

	<p><b>Placche di saldatura integrate</b> (es. LY4) consentono la saldatura diretta sull'estensimetro.</p>
	<p><b>Placche di saldatura grandi con scarico della deformazione</b> (es. LY6) consentono la saldatura diretta sull'estensimetro, fornendo contemporaneamente la separazione meccanica delle placche di saldatura e del supporto dell'estensimetro.</p>
	<p><b>Cavi in rame placcati in nichel, non isolati, lunghi circa 30 mm</b> (es. LY1) nessuna saldatura diretta all'estensimetro. E' necessario usare terminali di saldatura separati direttamente sull'estensimetro.</p>
	<p><b>Cavi di collegamento isolati con fluoropolimeri, lunghi circa 50 mm</b> (es. K-C LY4) nessuna saldatura diretta all'estensimetro. L'isolamento con fluoropolimeri evita che il cavo si incolli durante l'installazione. E' necessario usare terminali di saldatura separati vicino all'estensimetro.</p>
	<p><b>Cavi di collegamento isolati con fluoropolimeri, lunghi circa 50 mm</b> (es. K-C LY4) lunghezza dei cavi come richiesto da 0,5 a 10 m (1.64-32.81 ft) in opzioni a 2, 3 e 4 cavi. Nessuna saldatura diretta al punto di misura. L'isolamento con fluoropolimeri evita che il cavo si incolli durante l'installazione.</p>

**Tabella 5.2 :** Collegamenti estensimetri

### 5.2.3 Reazione alla temperatura

Gli estensimetri collegati singolarmente in un circuito a ponte di Wheatstone in configurazione quarto di ponte mostrano un segnale in uscita in caso di variazione della temperatura. Questo segnale viene definito “deformazione apparente” o “output termico” ed è indipendente dal carico meccanico sull’oggetto sottoposto a prova. Tuttavia, è possibile adeguare un estensimetro al coefficiente di espansione termica di un materiale specifico, in modo tale che il segnale in uscita sia molto piccolo in caso di variazione di temperatura. Questi estensimetri vengono definiti estensimetri con “reazione adeguata alla temperatura” o “autocompensati”. Per poter sfruttare i vantaggi dell’adeguamento alla reazione della temperatura, gli estensimetri devono essere scelti in base al coefficiente di espansione termica del materiale sottoposto a prova.

Materiale	Coefficiente di espansione termica $\alpha$
Acciaio ferritico	$10.8 \cdot 10^{-6}/K$ ( $6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$ )
Alluminio	$23 \cdot 10^{-6}/K$ ( $12.8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$ )
Acciaio austenitico	$16 \cdot 10^{-6}/K$ ( $8.9 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$ )
Vetro di quarzo/composito	$0.5 \cdot 10^{-6}/K$ ( $0.3 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$ )
Titanio / ghisa grigia	$9 \cdot 10^{-6}/K$ ( $5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$ )
Plastica	$65 \cdot 10^{-6}/K$ ( $36.1 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$ )
Molibdeno	$5.4 \cdot 10^{-6}/K$ ( $3 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$ )

**Tabella 5.3:** Coefficiente espansione termica estensimetri

### 5.2.4 Lunghezza della griglia attiva

La lunghezza della griglia di misura dell’estensimetro dipende dallo scopo della misurazione. Di conseguenza, la misurazione effettuata tramite estensimetro corrisponderà alla deformazione media al di sotto della griglia di misura. In generale, lunghezze della griglia di misura di 3 o 6 mm costituiscono una buona soluzione. Si raccomanda di utilizzare griglie di misura lunghe in caso di materiale disomogeneo, come cemento o legno. Un estensimetro lungo compensa le disomogeneità del pezzo lavorato e la misurazione darà come risultato la deformazione al di sotto della griglia di misura.

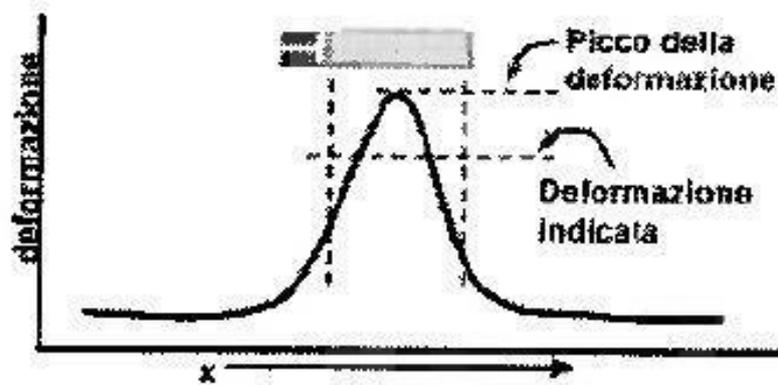


Figura 5.5 : Picco di deformazione in caso di base corta

Base corta = Rileva una deformazione di picco.

Base lunga = Rileva una deformazione media.

Per deformazioni dinamiche di breve durata o frequenze elevate devono essere scelte griglie con base di misura corta. Le griglie di misura corta sono adatte per la rilevazione di uno stato di deformazione locale. Sono quindi adatte per determinare i gradienti di deformazione, il punto massimo delle sollecitazioni di picco e di altre sollecitazioni simili. Al contrario per materiali cattivi conduttori di calore devono essere scelte dimensioni della griglia maggiori. In conclusione per gradienti elevati si opterà per una base corta <3mm, per campi uniformi per base media compresa tra i 3 e i 20 mm, mentre nel caso di materiale non omogeneo sarà necessaria una base lunga >20 mm.

### 5.2.5 Resistenza elettrica

Un basso valore di resistenza elettrica comporta una minore influenza della variazione della resistenza di isolamento. La variazione di resistenza di isolamento produce una deformazione apparente. A parità di tensione di alimentazione un ER ad elevata resistenza elettrica assorbe minor corrente e quindi una minore dissipazione del calore. Livelli eccessivi di alimentazione portano ad un riscaldamento dell'installazione con conseguente deriva di origine termica. Il livello di alimentazione risulta essere:

$$V = 2\sqrt{P \cdot A \cdot R}$$

Dove

R= Resistenza dell'ER;

A= Area della griglia [mm<sup>2</sup>];

P= Densità di potenza [W/mm<sup>2</sup>].

## 5.2.6 Adesivi

Il materiale legante ha il compito di collegare in modo sicuro l'estensimetro alla superficie dell'oggetto da misurare e trasferire senza perdite la deformazione dell'oggetto all'estensimetro. Le svariate condizioni e influenze e le opzioni di applicazione richiedono diversi materiali leganti e metodi di applicazione. Il legante è il fattore più importante. I particolari vantaggi di questo metodo di collegamento, relativamente alle installazioni degli estensimetri, sono i seguenti:

- Possibilità di collegare diversi materiali, anche dissimili. Il collegamento è eseguito a temperatura ambiente o a temperature superiori a seconda del tipo di adesivo.
- Non influisce sui materiali da collegare (anche se potrebbero esservi restrizioni per la plastica).
- Gli adesivi con indurente chimico (ormai usati solamente nelle tecnologie per estensimetri) sono caratterizzati da ridotto assorbimento di umidità.
- Controllo della velocità di lavoro tramite la selezione di diversi tipi di adesivi per le condizioni di solidificazione (a caldo o a freddo).
- La maggiore resistenza elettrica specifica contribuisce ad aumentare la resistenza dell'isolamento tra estensimetro e componente.

### Tipo di materiali leganti

Sia le condizioni di lavoro sul sito di installazione che i diversi requisiti per le prestazioni del materiale di legatura, soprattutto in rispetto alla temperatura di esercizio, hanno reso disponibili diversi tipi di materiali leganti. I materiali leganti possono essere differenziati come segue, sulla base della tecnologia dell'applicazione.

#### 1. Adesivi con solidificazione a freddo

Possono essere applicati facilmente e non richiedono molti sforzi. Sono disponibili adesivi a singolo componente che inizia a solidificare quando ad esempio l'aria viene esclusa ("anaerobico") e i componenti biadesivi devono essere miscelati prima dell'applicazione. Gli adesivi con tempi di reazione molto breve sono anche chiamati "supercolle". Sono applicati prevalentemente nei test sperimentali.

#### 2. Adesivi con solidificazione a caldo

Questi adesivi possono essere usati soltanto se l'oggetto testato può essere riscaldato alla temperatura di solidificazione. Questo solitamente è possibile nella fabbricazione di trasduttori, ma anche dove si possono installare gli estensimetri prima dell'assemblaggio dei macchinari o laddove è possibile smontare componenti per l'installazione degli estensimetri. Contrariamente agli adesivi con solidificazione a freddo, quelli con solidificazione a caldo consentono una

gamma di applicazione più vasta a temperature superiori e sono adatti ai requisiti più rigidi di precisione vigenti nella produzione dei trasduttori.

<b>Materiali leganti (adesivi)</b>	<b>Principali aree di applicazione</b>	<b>Materiale</b>	<b>Durata di lavorabilità</b>	<b>Temp.</b>	<b>Tempo</b>	<b>Pressione da contatto</b>
<b>X60</b> solidificazione a freddo (supercolla)	Prova sperimentale	Metacrilato	3-5 min	0 °C 20 °C 35 °C	60 min 10 min 2 min	Pressione del pollice
<b>Z70</b> solidificazione a freddo (supercolla)	Test sperimentale produzione di trasduttori con limitati requisiti di precisione	Cianoacrilati	-	5 °C 20 °C 350 °C	60 min 10 min 2 min	Pressione del pollice
<b>X280</b> solidificazione a freddo	Prova sperimentale	Resina epossidica	30 min	20 °C 65 °C 95 °C	8 h 2 h 1 h	0.05-2 N/mm <sup>2</sup>
<b>EP70</b> solidificazione a caldo	Test sperimentale	Resina epossidica	2h	60 °C	3 h	Pressione di contatto
<b>EP310N</b> solidificazione a caldo	Test sperimentale a temp elevate	Resina epossidica	4 sett	150 °C 180 °C 200 °C	3 h 2 h 1 h	0.1-0.5 N/mm <sup>2</sup>
<b>P250/P250-R</b> solidificazione a caldo	Prova sperimentale	Resina fenolica	Illimitata	140 °C 160 °C 190 °C	8 h 2 h 1 h	10-50 N/mm <sup>2</sup>
<b>DP490</b> solidificazione a freddo	Test sperimentale	Resina epossidica	12 mesi	20 °C 30 °C 40 °C	10 h 20 h 40 h	Pressione di contatto

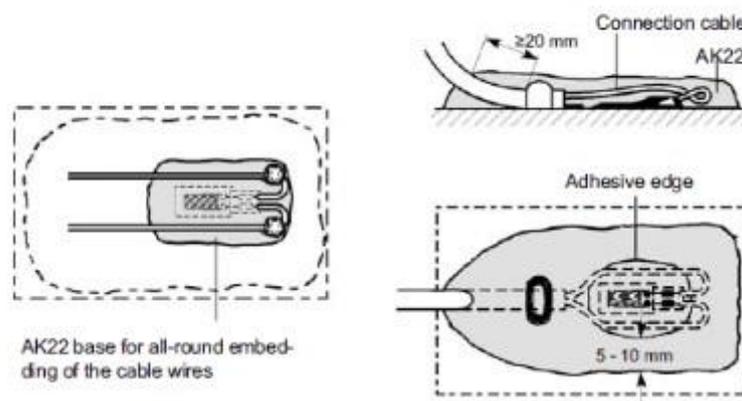
**Tabella 5.4:** Caratteristiche adesivi

### 5.2.7 Protettivi

La qualità di una misura effettuata con un estensimetro dipende essenzialmente dal tipo di installazione e dal design del punto di misura. Per ottenere risultati esenti da problemi, bisogna tenere conto di alcuni fattori fondamentali, quali un'attenta preparazione della superficie di installazione, un collegamento corretto e l'impiego di una copertura di protezione. Appena terminata l'installazione di un estensimetro, è necessario provvedere a un'accurata protezione del punto di misura sulla superficie del componente dagli agenti atmosferici utilizzando un materiale di copertura. Nella scelta del materiale di copertura, è necessario tenere in considerazione i fattori seguenti:

- Condizioni ambientali durante la misurazione
- Durata della misurazione
- Vita utile richiesta
- Precisione della misurazione

L'oggetto da misurare non deve essere solidificato in maniera irreversibile. Il materiale che viene a contatto con il punto di misura, compreso il cavo per il collegamento, deve avere un'elevata resistenza all'isolamento e non deve innescare reazioni chimiche o corrosione.



**Figura 5.6:** Punto di misura con copertura di protezione

Il punto di misura deve essere coperto subito dopo l'installazione. E' consigliabile utilizzare solamente materiali di copertura raccomandati dai produttori degli estensimetri per proteggere l'estensimetro e lo strato adesivo. Il punto di misura deve essere in condizioni perfette prima di essere coperto, ossia deve essere privo di sporcizia, umidità, sudore proveniente dalle mani dell'operatore e residui di saldatura. Se non è possibile evitare l'installazione dell'estensimetro in condizioni di umidità (scadenze, brutto tempo, locali umidi), l'oggetto da misurare deve essere essiccato in forno laddove possibile; in caso ciò non sia possibile, il punto di misura deve essere asciugato con un asciugacapelli o con un altro strumento con la stessa funzione. L'agente di copertura deve aderire completamente all'area circostante il punto di misura. Eventuali difetti e capillarità costituiscono infatti punti di accesso da cui potrebbero penetrare sostanze aggressive. Il legame tra l'agente di copertura e l'area circostante deve rimanere invariato per tutto il periodo di vita utile del punto di misura. L'area circostante (circa 1 o 2 cm oltre l'estremità esterna dell'adesivo) e il punto di contatto

dell'adesivo devono quindi essere puliti in maniera approfondita. Il sudore delle mani (punte delle dita) può causare la formazione di ruggine sotto all'agente di copertura e renderlo quindi inefficace nonostante le perfette condizioni iniziali. Gli ingressi dei cavi devono essere sigillati con cura. L'agente di copertura deve circondare le estremità dei cavi, anche nella parte inferiore, per garantire che non siano presenti canali o capillari attraverso i quali l'umidità potrebbe penetrare nella copertura. In caso di cavi multiconduttore, si devono incastrare i cavi singolarmente nell'agente di copertura e coprire anche una parte della guaina dei cavi con l'agente di copertura. In condizioni ambientali critiche è necessario irruvidire l'isolamento dei cavi e poi sgrassarlo con un solvente senza agenti chimici.

### 5.3 Circuiti per misure estensimetriche

La misura della deformazione è valutata da un amplificatore tramite la variazione di resistenza elettrica. Le leggi di Ohm rappresentano la formulazione matematica che descrive la correlazione delle grandezze elettriche (resistenza, corrente, tensione) al loro variare. Per resistenza si intende l'ostacolo che incontra la corrente nel suo percorso, quanto più è alta, tanto più difficile sarà per la corrente attraversarla.

1<sup>a</sup> Legge di Ohm: In un conduttore metallico l'intensità di corrente (a temperatura T costante) è direttamente proporzionale alla tensione applicata ai suoi capi e inversamente proporzionale alla resistenza del conduttore

2<sup>a</sup> Legge di Ohm: La resistenza di un conduttore varia con la sua natura, è direttamente proporzionale alla sua lunghezza ed inversamente proporzionale alla sua sezione.

Per misurare la resistenza elettrica possono essere utilizzati diversi circuiti.

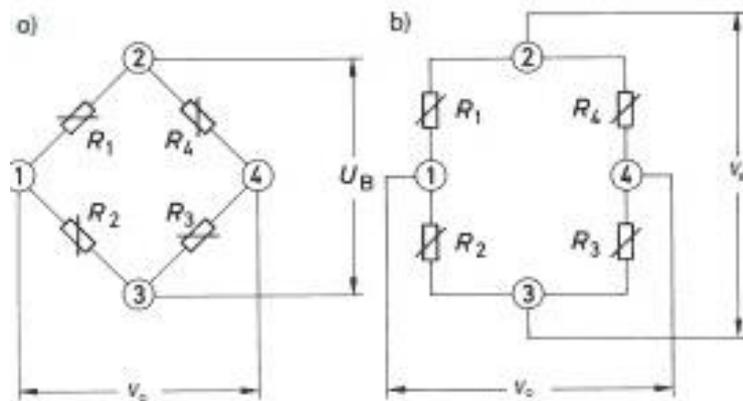
#### 5.3.1 Ponte di Wheatstone

Per poter leggere le piccole variazioni di resistenza indotte da una deformazione dell'estensimetro è necessario utilizzare un circuito di collegamento che sia in grado di fornire un segnale amplificato. Il circuito più adatto è quello del collegamento tramite ponte di Wheatstone. Il ponte di Wheatstone può essere utilizzato in diversi modi per misurare la resistenza elettrica:

- Per determinare il valore assoluto di una resistenza confrontandola con una resistenza nota
- Per determinare le variazioni di resistenza relative

Il secondo metodo viene utilizzato in relazione alle tecniche di misurazione con estensimetri. Questo metodo consente di misurare con estrema precisione variazioni di resistenza relative nell'estensimetro, solitamente nell'ordine di  $10^{-4}$  -  $10^{-2}$   $\Omega/\Omega$ .

L'immagine riportata sotto mostra due diverse configurazioni del ponte di Wheatstone identiche dal punto di vista elettrico: la figura a) mostra la configurazione a rombo in cui viene solitamente utilizzato il circuito di Wheatstone; la figura b) illustra la stessa configurazione in un modo più chiaro per un utente poco esperto di circuiti elettrici.



**Figura 5.7:** Collegamento a Ponte di Wheatstone

I quattro bracci del circuito a ponte sono formati dalle resistenze da  $R_1$  a  $R_4$ . I vertici 2 e 3 del ponte indicano i collegamenti per la tensione di eccitazione del ponte  $V_s$ . La tensione in uscita dal ponte  $V_0$ , ossia il segnale di misura, è disponibile ai vertici 1 e 4. Non esiste una regola generale per la configurazione dei componenti e dei collegamenti del ponte. Nella letteratura esistente, sono presenti tutti i tipi di configurazione. L'eccitazione del ponte è in genere una tensione di corrente continua o alternata, applicata e stabilizzata,  $V_s$ . Se viene applicata una tensione di alimentazione  $V_s$  ai punti di alimentazione del ponte 2 e 3, la tensione di alimentazione viene divisa tra le due metà del ponte  $R_1, R_2$  e  $R_4, R_3$  come rapporto delle resistenze del ponte corrispondenti: ogni metà del ponte forma un regolatore di tensione. Il ponte può non essere equilibrato, a causa della differenza di tensione delle resistenze elettriche su  $R_1, R_2$  e  $R_3, R_4$ . Questo valore viene calcolato come segue:

$$V_0 = V_s \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

Se il ponte è equilibrato e  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$

Quando la tensione in uscita dal ponte  $V_0$  è uguale a zero.

In presenza di una deformazione preimpostata, la resistenza dell'estensimetro cambia di un valore pari a  $\Delta R$ . Da qui, la seguente equazione:

$$V_0 = V_s \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right)$$

Per misurare la deformazione, le resistenze  $R_1$  e  $R_2$  devono essere uguali nel ponte di Wheatstone. Lo stesso vale per  $R_3$  e  $R_4$ .

Con alcune supposizioni e semplificazioni, è possibile determinare la seguente equazione:

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

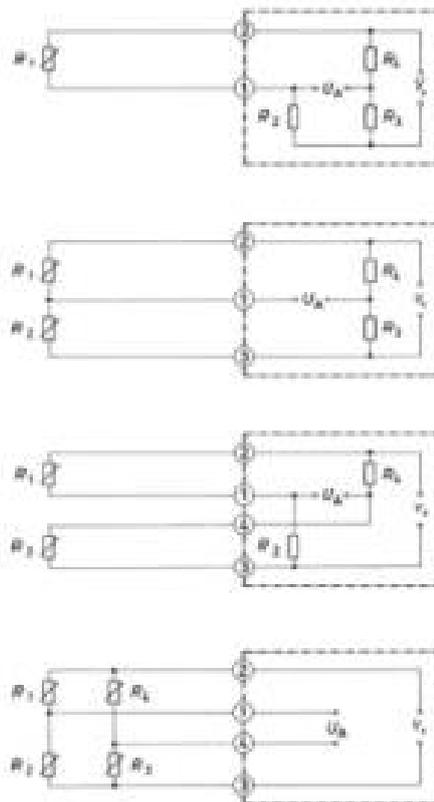
Nell'ultimo passaggio del calcolo,  $\Delta R/R$  deve essere sostituito con:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$$

dove  $k$  è il fattore  $k$  dell'estensimetro e  $\varepsilon$  è la deformazione. Ne risulta la formula seguente:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

L'equazione presuppone che tutte le resistenze nel ponte cambiano. Ad esempio, questa situazione si verifica nei trasduttori o con oggetti di prova che svolgono funzioni simili. Nelle prove sperimentali, ciò non avviene quasi mai e in genere solo alcuni dei bracci del ponte contengono estensimetri attivi; il resto è costituito da resistori di completamento del ponte. Sono comuni configurazioni di forme diverse, come il quarto di ponte, il mezzo ponte, il ponte diagonale o il ponte intero.



**Figura 5.8:** Circuiti elettrici

## 5.4 Analisi ed elaborazione dei dati

Per l'analisi e l'elaborazione delle deformazioni, si utilizza il software CATMAN. Viene registrata la storia della deformazione ma è l'operatore a scegliere il tempo d'inizio e di fine. Anche la frequenza di campionamento, che descrive in hertz il numero dei campioni presenti in un secondo di segnale digitale, è scelta in modo autonomo dall'operatore. Essa non dovrà essere né troppo grande né troppo piccola. Il software ha quindi il compito di leggere i segnali provenienti dall'estensimetro, elaborarli e amplificarli. L'output che si legge a schermo sono le deformazioni lungo le 3 direzioni e l'angolo di rotazione sia a L0 (lettura di zero) che a L1 (dopo che è stata effettuata la carota). Durante questa fase della prova bisogna fare attenzione agli eventuali cambiamenti di temperatura  $\Delta T$ , infatti è questa la condizione al contorno che potrebbe far ottenere dei risultati errati.

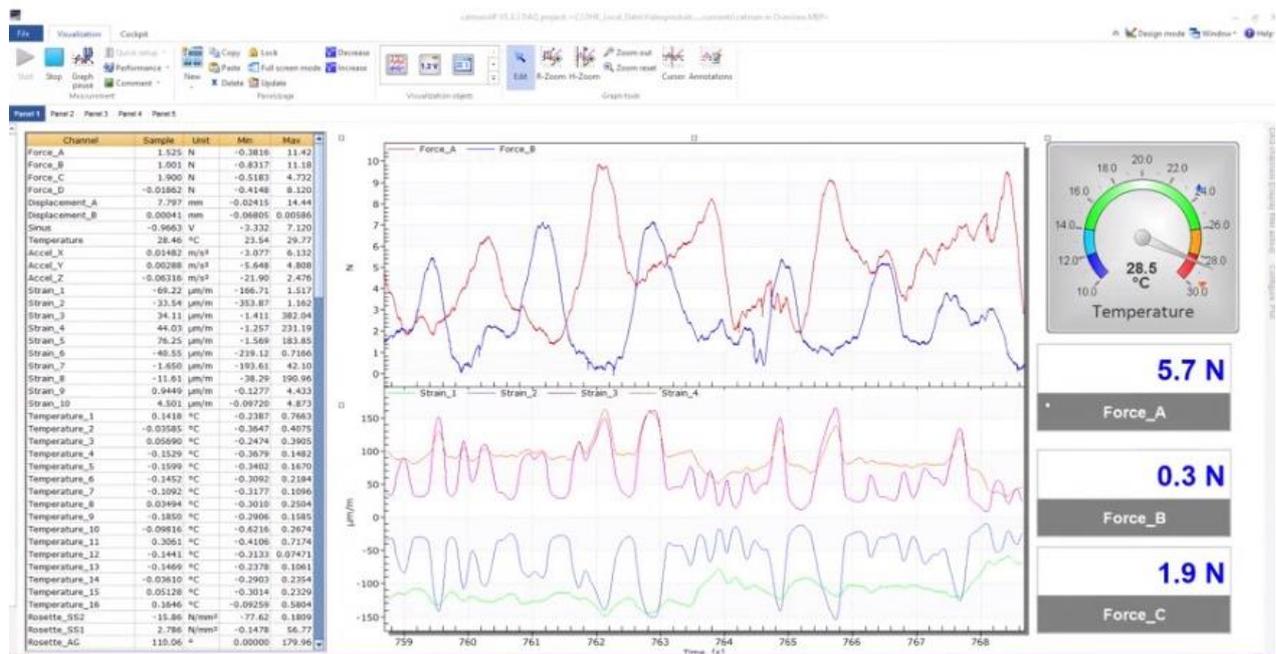
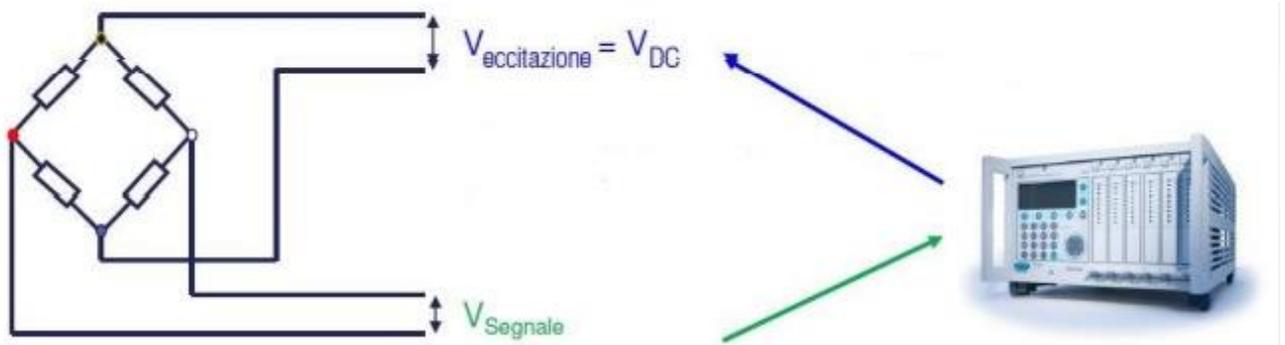


Figura 5.9: Elaborazioni misure con CATMAN

### 5.4.1 Amplificatore

Un amplificatore di segnale, detto anche condizionatore di segnale, è uno strumento di acquisizione di dati che converte il segnale in dati leggibili e compatibili con il software integrato. Solitamente, un amplificatore di segnale acquisisce un segnale meccanico o elettrico e ne amplifica la risoluzione o il rapporto segnale/rumore. Il segnale convertito viene quindi trasmesso al comando della macchina con interfacce digitali o analogiche. Con un amplificatore di segnale dedicato è possibile collegare al comando della macchina componenti multipli, in grado di fornire una diagnostica di segnale rapida per ridurre i tempi morti dei macchinari e migliorare il controllo del processo in una serie di settori.



**Figura 5.10:** Circuito e amplificatore



**Figura 5.11:** MGCplus

Per la taratura, il materiale o i test di fatica: il sistema di acquisizione dati MGCplus è usato in qualunque tipo di applicazione. Acquisisce dati su sollecitazioni, forza, spostamento, coppia, tensione, corrente, temperatura e molti altri parametri. Vista la sua versatilità, MGCplus è uno dei sistemi di acquisizione dati più diffusi. Offre una comprovata compatibilità, non solo con il sistema MGCplus, ma anche lungo tutta la catena di misura dal sensore al software.

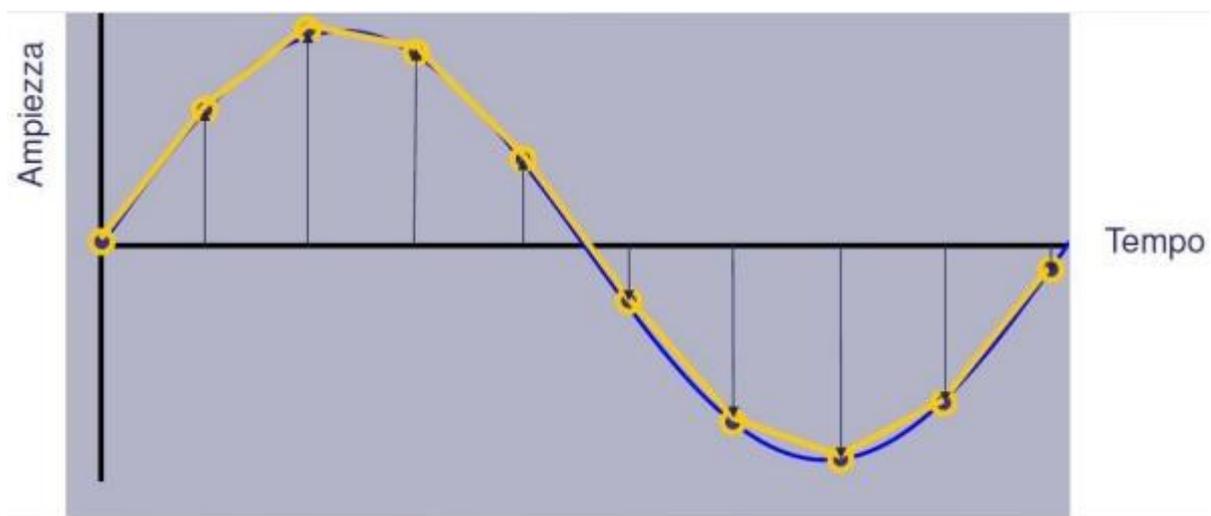
## 5.4.2 Il software CATMAN

Con il software di acquisizione dati catman (software DAQ) è possibile acquisire, visualizzare e analizzare i dati di misurazione o immediatamente o dopo l'elaborazione. Il software permette di elaborare i dati sia per test sul campo mobile, test di componenti basati su laboratorio, test di banco o attività di monitoraggio.

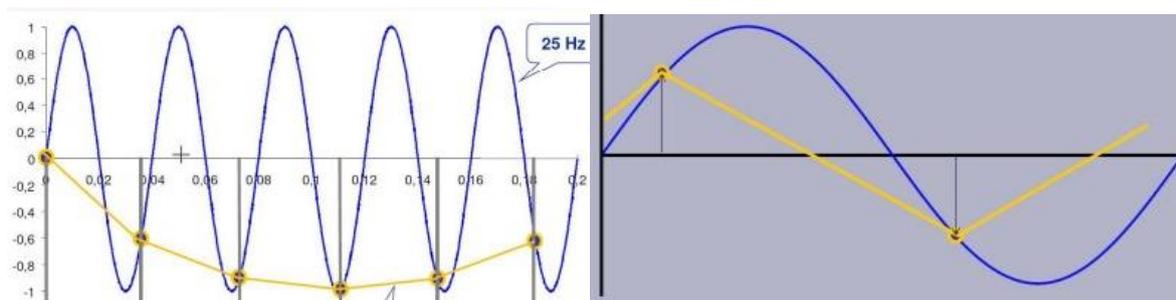
## 5.4.3 Analisi in frequenza e tempo di campionamento

La frequenza di campionamento è la misura espressa in Hz del numero di volte al secondo in cui un segnale viene misurato e memorizzato.

Per poter essere considerato affidabile, un segnale dev'essere campionato ad una velocità almeno 10 volte superiore a quella di prova.



**Figura 5.12** : Campionamento corretto



**Figura 5.13**: Sotto-campionamento

## 6. Calcolo perdita di precompressione

L'obiettivo del lavoro di tesi è la valutazione dello stato di degrado del ponte oggetto di studio, ovvero il "Molise 1". Dunque, partendo dal valore del tiro iniziale  $N_0$ , sono stati svolti i calcoli per valutare la percentuale di perdita di precompressione con diverse metodologie:

- Attraverso i risultati della prova di rilascio tensionale
- Attraverso le formulazioni dell'Eurocodice 2

Il valore del tiro iniziale  $N_0$  di precompressione è stato valutato moltiplicando la forza di un trefolo per il numero totale dei trefoli.

Dalla relazione di calcolo è nota la tensione iniziale che è stata data all'acciaio definita come:

$$\sigma_f = \frac{10350}{1 - 0.242} = 13650 \frac{kg}{cm^2} = 1.365 \frac{kN}{mm^2}$$

Che corrisponde a

$$1.365 \frac{kN}{mm^2} \cdot 93 mm^2 = 126.8 kN$$

avendo dei trefoli  $\phi \frac{1}{2}$  di area  $93 mm^2$ . Dunque,  $N_0$  risulta:

$$126.8 kN \cdot 60 trefoli = 7608 kN$$

Dalla relazione di calcolo si legge come le perdite di tensione nel tempo siano previste del 24%, date dalla somma della deformazione plastica dell'acciaio e del calcestruzzo e dal ritiro del calcestruzzo.





**Figura 6.1:** Fotografie rappresentanti lo stato di degrado dell'impalcato

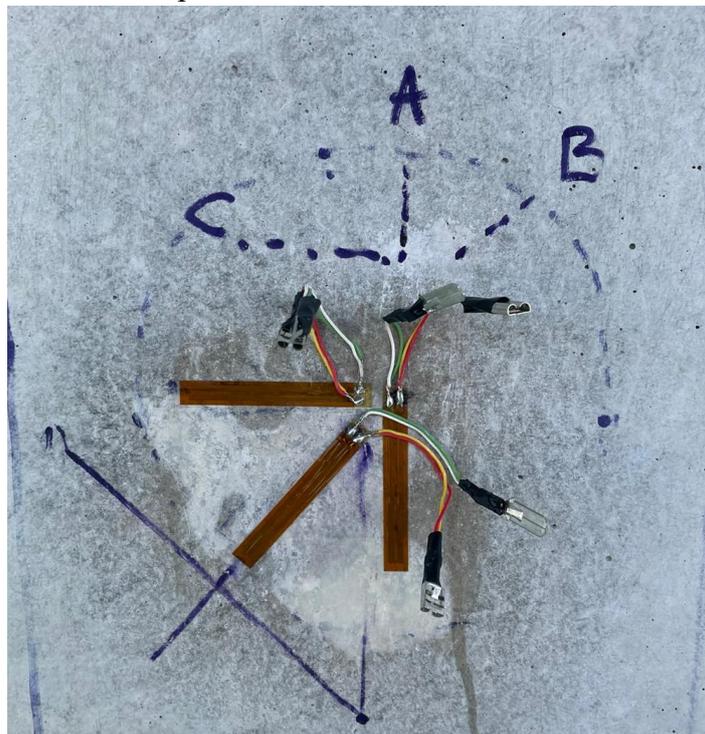
## 6.1 Risultati ottenuti mediante la prova di rilascio tensionale

I valori delle tensioni misurate dagli estensimetri sono i seguenti:

Campata	$\epsilon_{rt}$	E	$\sigma_{rt}$	$M_g$	$N_{eff}$
	-	MPa	MPa	kNm	kN
Pila 44-43	9.60E-05	33881	3.253	5433	4123
Pila 43-42	1.43E-04	33881	4.845	5433	5265
Pila 42-41	2.52E-04	33881	8.538	5433	7914
Pila 41-40	1.80E-04	33881	6.099	5433	6165
Pila 40-39	1.51E-04	33881	5.116	5433	5460

**Tabella 6.1:** Parametri rilascio tensionale

Per arrivare al risultato finale, ovvero la percentuale di perdita di precompressione, si è partiti dalla misurazione della tensione effettivamente agente nel punto della sezione della trave dove sono stati applicati gli estensimetri. Il dato di partenza è la deformazione  $\epsilon_{rt}$  misurata dalla prova di rilascio tensionale mediante gli estensimetri. Si tratta di deformazioni dell'ordine del micrometro. La deformazione è ottenuta dalla differenza di due letture, la lettura di zero L0 e la lettura che è stata effettuata dopo l'esecuzione della carota L1.



**Figura 6.2:** Posizionamento estensimetri per valutare le deformazioni

Altro dato fondamentale è il modulo elastico del calcestruzzo preso da relazione di calcolo. A questo punto è stato possibile valutare la  $\sigma_{rt}$  tramite legge di Hooke.

$$\sigma_{rt} = E \cdot \varepsilon$$

Il valore è riportato con il segno positivo perché rappresenta una trazione sull'elemento carotato, che è uguale e opposto alla tensione a cui è soggetta la trave, ovvero una compressione indotta dai trefoli. Lo sforzo normale effettivo della trave è stato valutato come:

$$N = \frac{\left(\sigma + \frac{M_G}{W}\right)}{\left(\frac{1}{A} + \frac{e}{W}\right)}$$

È stata dunque necessaria la valutazione del momento dovuto ai pesi propri e ai carichi permanenti.

Per la trave in esame avente sezione trasversale a I e progettata con uno schema statico in semplice appoggio, riprendendo l'analisi dei carichi svolta nel Cap.2, il massimo momento è stato così valutato:

Peso proprio = 16.15 kN/m;

Traverse = 28.4 kN/m;

Peso soletta = 12 kN/m;

Marciapiede, pavimentazione, parapetti = 7 kN/m

$$M_{max} = \frac{(16.15 + 12 + 7) \cdot 34^2}{8} + 9.8 \cdot 12.5 + 18.6 \cdot 12.5 = 5434.175 \text{ kNm}$$

Gli altri dati necessari al fine del calcolo (formula di Navier inversa) sono stati recuperati dalla relazione di calcolo e sono:

- $e$  è l'eccentricità del cavo risultante pari a 1.19 m;
- $A$  è l'area della sezione pari a 1.18 m<sup>2</sup>;
- $W$  è il modulo di resistenza pari a 2.18 m<sup>3</sup>;

<b>Campata</b>	<b>N<sub>0</sub></b>	<b>N<sub>eff</sub></b>	<b>pp</b>
	<b>kN</b>	<b>kN</b>	<b>[%]</b>
Pila 44-43	7608	4123	45.8
Pila 43-42		5265	30.8
Pila 42-41		7914	-4.0
Pila 41-40		6165	19.0
Pila 40-39		5460	28.2
<b>Media</b>			<b>24.0</b>
<b>pp stimata</b>			<b>24.2</b>

**Tabella 6.2:** Output rilascio tensionale

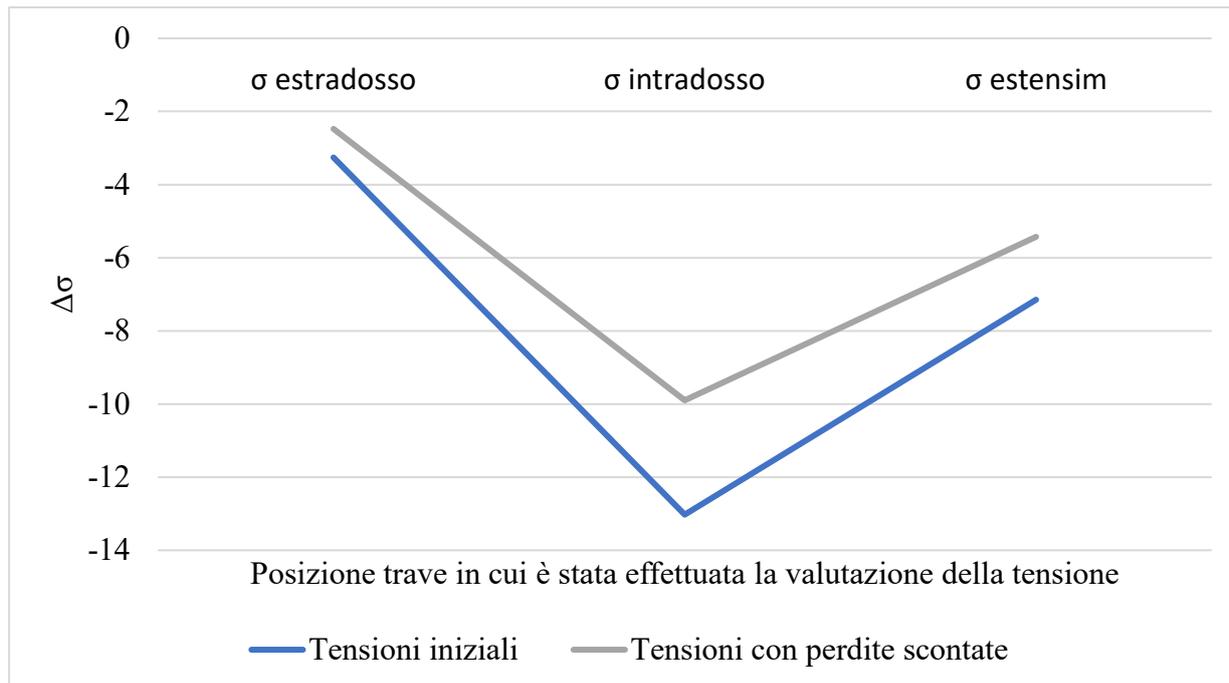
Noto  $N_0$  al tiro e calcolato  $N_{\text{effettivo}}$  è stata ottenuta la percentuale di perdita di precompressione. La prima considerazione che può essere fatta è che la media tra tutte le percentuali di perdita di precompressione risultate dalle 5 prove risulti molto prossima a quella stimata dalla relazione di calcolo. Ciò vuol dire che le deformazioni misurate dagli estensimetri possono essere ritenute misure coerenti. E' necessario però anche notare come tra i risultati in termini di percentuale ci siano almeno due valori molto distanti dagli altri. Questo conferma il carattere molto delicato degli estensimetri. Dalla teoria è noto come questi strumenti risentano molto delle condizioni al contorno come il clima, il tempo di esecuzione della prova, l'applicazione effettuata da un operatore diverso o anche da quanto la carota sia più o meno disturbata dall'esecuzione del foro. Questa prova è stata svolta ad un'altezza significativa ed è stato possibile raggiungere il punto di misura solo mediante l'utilizzo di un by bridge. Dunque, aver ottenuto due valori molto distanti rappresentano proprio i sintomi di questi disturbi.

E' stato svolto poi un ulteriore controllo tensionale che ci ha permesso di fare un importante confronto. E' stata valutata la tensione nella trave nel punto di intradosso, estradosso e nella posizione dove sono stati applicati gli estensimetri. Questa procedura è stata effettuata per tre volte, ovvero:

- Non considerando perdite di precompressione
- Considerando la perdita di precompressione stimata in fase progettuale con le normative vigenti nel 1966, pari al 24,2%
- Valutando la tensione mediante la deformazione data dagli estensimetri

	Inizio	Con perdite del 24,2%
$\sigma$ estradosso [MPa]	-3.25	-2.48
$\sigma$ intradosso [MPa]	-13.02	-9.89
$\sigma$ estensimetri [MPa]	-7.15	-5.43

**Tabella 6.3 :** Calcolo tensioni trave



**Figura 6.3:** Confronto tensioni iniziali e con perdite del 24,2%

$N_0$ [kN]	7608
$M_g+M_p$ [kNm]	3688
$A$ [m <sup>2</sup> ]	1.18
$J$ [m <sup>4</sup> ]	0.75
$y$ estensimetri [m]	0.64
$y$ intradosso [m]	1.32
$y$ estradosso [m]	0.14

**Tabella 6.4:** Dati trave

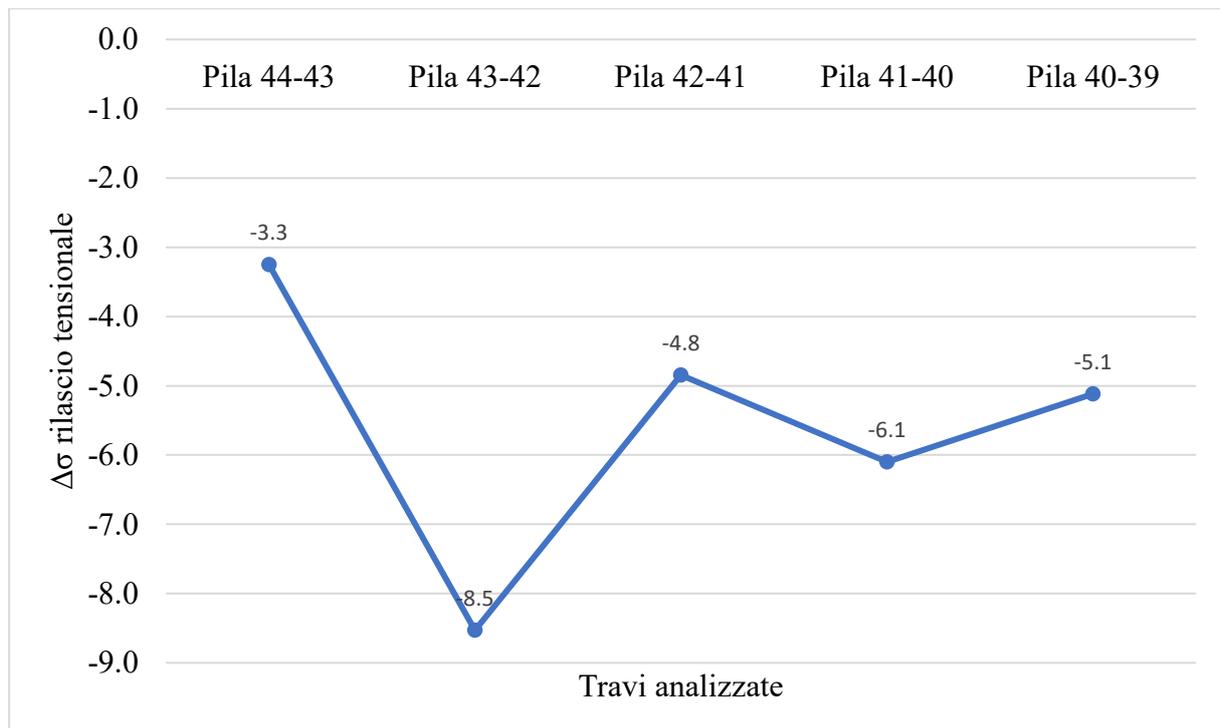
I risultati in Tabella 6.3 sono stati ottenuti dai dati di Tabella 6.4, utilizzando le opportune  $y$  nella formula:

$$\sigma = \frac{N_0}{A} + \frac{M_g + M_p}{J} \cdot y$$

Si riporta una tabella riassuntiva con i valori tensionali attuali misurati dagli estensimetri sulle travi indagate:

<b><math>\sigma</math> estensimetri [MPa]</b>	
Pila 44-43	-3.25
Pila 43-42	-8.53
Pila 42-41	-4.84
Pila 41-40	-6.09
Pila 40-39	-5.12
Media	-5.57

**Tabella 6.5 :** Tensioni estensimetri



**Figura 6.4:** Tensioni attuali nelle travi analizzate misurate mediante estensimetri

Dal confronto si evince come le tensioni misurate dagli estensimetri ovvero a 1.18 m dall'intradosso della trave siano confrontabili con il valore di tensione calcolato nel medesimo punto considerando le perdite di precompressione stimate dalla relazione di calcolo. Questo ci conferma che l'ordine di grandezza della riduzione della tensione stimata nel 1966 è corretto.

## 6.2 Risultati ottenuti mediante Eurocodice

Gli Eurocodici sono norme europee per la progettazione strutturale e ognuno di essi tratta un preciso argomento:

L'Eurocodice fornisce le indicazioni di base per affrontare la progettazione con il metodo semiprobabilistico agli stati limite, le combinazioni di verifica, i fattori di sicurezza (salvo diversamente specificato) per la combinazione delle azioni.

L'Eurocodice 1 fornisce le indicazioni necessarie per determinare le azioni di calcolo sulle strutture, in vari frangenti, dai carichi dovuti alla folla e alla neve, al vento, ai carichi termici derivanti da un incendio, a quelli nelle fasi di montaggio e a quelli, più specifici, dei ponti.

L'Eurocodice 2 è dedicato alle strutture in calcestruzzo non armato, armato e precompresso.

L'Eurocodice 3 è dedicato alle strutture in acciaio.

L'Eurocodice 4 è dedicato alle strutture miste acciaio-calcestruzzo.

L'Eurocodice 5 è dedicato alle opere in legno strutturale.

L'Eurocodice 6 è dedicato alle strutture in muratura portante, armata e non, naturale e artificiale.

L'Eurocodice 7 è dedicato alle problematiche geotecniche (fondazioni, muri di sostegno ecc.).

L'Eurocodice 8 è dedicato all'aspetto sismico: si collega agli altri in relazione al materiale utilizzato (calcestruzzo, acciaio, legno, geotecnica).

L'Eurocodice 9 è dedicato alle strutture in alluminio.

Le perdite di precompressione dipendenti dal tempo sono fornite dal capitolo 5.10.6 dell'Eurocodice 2 e possono essere calcolate considerando le due seguenti riduzioni di tensioni nell'acciaio:

(a) quella conseguente all'accorciamento dell'armatura causata dalla deformazione del calcestruzzo per viscosità e ritiro, sotto i carichi permanenti;

(b) riduzione di tensione nell'acciaio dovuta al rilassamento sotto tensione.

Il rilassamento dell'acciaio dipende dalla deformazione del calcestruzzo per viscosità e ritiro. Questa interazione può generalmente e approssimativamente essere tenuta in conto tramite un coefficiente di riduzione 0,8.

E' fornito un metodo semplificato per la valutazione delle perdite di precompressione dipendenti dal tempo alla posizione  $x$  sotto i carichi permanenti è dato dall'espressione

$$\Delta P_{c+s+r} = A_p \Delta \sigma_{p,c+s+r} = A_p \frac{\varepsilon_{cs} E_p + 0.8 \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c,qp}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \frac{A_p}{A_c} \left(1 + \frac{A_c}{I_c} z_{cp}^2\right) [1 + 0.8 \varphi(t, t_0)]}$$

dove:

- $\Delta \sigma_{p,c+s+r}$  è il valore assoluto della variazione di tensione nelle armature dovuta a viscosità, ritiro e rilassamento alla posizione  $x$ , all'istante  $t$ ;
- $\varepsilon_{cs}$  è la deformazione per ritiro;
- $E_p$  è il modulo di elasticità dell'acciaio da precompressione;
- $E_{cm}$  è il modulo di elasticità del calcestruzzo;

- $\Delta\sigma_{pr}$  è il valore assoluto della variazione di tensione nelle armature alla posizione  $x$ , al tempo  $t$ , per effetto del rilassamento dell'acciaio da precompressione;
- $\phi(t, t_0)$  è il coefficiente di viscosità all'istante  $t$  con applicazione del carico all'istante  $t_0$ ;
- $\sigma_{c,QP}$  è la tensione nel calcestruzzo adiacente alle armature, dovuta a peso proprio, precompressione iniziale e ad altre azioni quasi-permanenti ove presenti;
- $A_p$  è l'area di tutte le armature di precompressione nella posizione  $x$  ;
- $A_c$  è l'area della sezione di calcestruzzo;
- $I_c$  è il momento d'inerzia della sezione di calcestruzzo;
- $z_{cp}$  è la distanza tra il baricentro della sezione di calcestruzzo e le armature.

### 6.2.1 Ritiro

La deformazione totale da ritiro  $\epsilon_{cs}$  è formata da due componenti : la deformazione da ritiro per essiccamento e la deformazione da ritiro autogeno. La deformazione da ritiro per essiccamento si sviluppa lentamente, dal momento che è funzione della migrazione dell'acqua attraverso il calcestruzzo indurito. La deformazione da ritiro autogeno si sviluppa durante l'indurimento del calcestruzzo: la maggior parte si sviluppa quindi nei primi giorni successivi al getto. Il ritiro autogeno è una funzione lineare della resistenza del calcestruzzo. Esso si considera specificatamente quando un calcestruzzo fresco è gettato contro un calcestruzzo già indurito. Perciò i valori della deformazione totale da ritiro  $\epsilon_{cs}$  discendono da

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca}$$

dove:

$\epsilon_{cs}$  è la deformazione totale da ritiro;

$\epsilon_{cd}$  è la deformazione da ritiro per essiccamento;

$\epsilon_{ca}$  è la deformazione da ritiro autogeno.

Lo sviluppo del ritiro per essiccamento nel tempo è regolato dalla:

$$\epsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \epsilon_{cd,0}$$

dove:

$k_h$  è un coefficiente che dipende dalla dimensione convenzionale  $h_0$

$h_0$	$k_h$
100	1,0
200	0,85
300	0,75
$\geq 500$	0,70

**Figura 6.5:** Valori di  $k_h$

$f_{ck}/f_{ck,cube}$ (MPa)	Umidità relativa (in %)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0,62	0,58	0,49	0,30	0,17	0,00
40/50	0,48	0,46	0,38	0,24	0,13	0,00
60/75	0,38	0,36	0,30	0,19	0,10	0,00
80/95	0,30	0,28	0,24	0,15	0,08	0,00
90/105	0,27	0,25	0,21	0,13	0,07	0,00

**Figura 6.6:** Valori nominali del ritiro (in ‰) per essiccamento non contrastato  $\epsilon_{cs,0}$  del calcestruzzo con cemento CEM classe N

$$\beta_{cls}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04\sqrt{h_0^3}}$$

dove:

$t$  è l'età del calcestruzzo, espressa in giorni, al momento considerato;

$t_s$  è l'età del calcestruzzo (in giorni) all'inizio del ritiro per essiccamento (o rigonfiamento).

Generalmente questo avviene alla fine della maturazione;

$h_0$  è la dimensione convenzionale (in millimetri) della sezione trasversale =  $2A_c/u$ .

dove:

$A_c$  è l'area della sezione trasversale di calcestruzzo;

$u$  è il perimetro della parte di sezione trasversale esposta ad essiccamento.

$\beta_{cls}(t, t_s)$	0.994	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	646500
$k_h$	0.85	$u$ [mm]	5533.8
$\epsilon_{cd0}$	2.60E-04	$h_0$ [mm]	233.6
$t$ [giorni]	25000	$t_s$ [giorni]	28

**Tabella 6.6 :** Valori per calcolo di  $\beta_{cls}(t, t_s)$

La deformazione da ritiro autogeno è data da:

$$\epsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t)\epsilon_{ca}(\infty)$$

Dove

$$\epsilon_{ca}(\infty) = 2.5(f_{ck} - 10)10^{-6} \text{ e } \beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0.2t^{0.5})$$

Con  $t$  espresso in giorni.

<b>t</b>	25000
<b><math>\beta_{as}</math></b>	1.0000
<b><math>\epsilon_{ca}(\infty)</math></b>	6.05E-05

**Tabella 6.7 :** Valori per calcolo di  $\epsilon_{ca}$

<b><math>\epsilon_{cs}</math></b>	2.80E-04
<b><math>\epsilon_{ca}(t)</math></b>	6.045E-05
<b><math>\epsilon_{cd}(t)</math></b>	2.20E-04

**Tabella 6.8:** Valori  $\epsilon_{cs}$

### 6.2.2 Viscosità

Per determinare il coefficiente di viscosità si è utilizzato l'Appendice B ed è stato calcolato con la seguente relazione:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0)$$

Dove

$\varphi_0$  è il coefficiente nominale di viscosità ed è stato valutato mediante:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

$\varphi_{RH}$  è un coefficiente che tiene conto dell'effetto dell'umidità relativa sul coefficiente nominale di viscosità e dato che siamo nel caso di un  $f_{cm}$  maggiore di 35 Mpa è stato valutato con la seguente formulazione:

$$\varphi_{RH} = 1 + \left[ \frac{1 - RH/100}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2$$

Dove RH è l'umidità ambientale relativa, in percentuale;

$\beta(f_{cm})$  è un coefficiente che tiene conto dell'effetto della resistenza del calcestruzzo sul coefficiente nominale di viscosità:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}}$$

Con  $f_{cm}$  la resistenza media a compressione del calcestruzzo, in Megapascal, all'età di 28 d;

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0.1 + t_0^{0.2})}$$

$H_0$  è la dimensione fittizia dell'elemento, in millimetri, dove:

$$h_0 = \frac{2A_c}{u}$$

$A_c$  è l'area della sezione trasversale;

$u$  è il perimetro dell'elemento a contatto con l'atmosfera;

$\beta_{c(t,t_0)}$  è un coefficiente atto a descrivere l'evoluzione della viscosità nel tempo dopo l'applicazione del carico e può essere valutato con la seguente espressione:

$$\beta_c(t, t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0.3}$$

$t$  è l'età del calcestruzzo, in giorni, al momento considerato;

$t_0$  è l'età del calcestruzzo, in giorni, al momento dell'applicazione del carico;

$t - t_0$  è la durata non corretta del carico, in giorni;

$\beta_H$  è un coefficiente dipendente dall'umidità relativa (RH in %) e dalla dimensione fittizia dell'elemento ( $h_0$  in millimetri). Può essere calcolato nel modo seguente avendo un  $f_{cm} > 35$

$$\beta_H = 1.5[1 + (0.012 RH)^{1.8}]h_0 + 250\alpha_3 \leq 1500 \alpha_3$$

$\alpha_1/\alpha_2/\alpha_3$  sono coefficienti atti a prendere in conto l'influenza della resistenza del calcestruzzo:

$$\alpha_1 = \left[ \frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.7} \quad \alpha_2 = \left[ \frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.2} \quad \alpha_3 = \left[ \frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.5}$$

$\alpha_1$	0.877552
$\alpha_2$	0.963368
$\alpha_3$	0.910921

**Tabella 6.9:** Valori di  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$

$\varphi(t, t_0)$	1.6	$\beta_c$	0.993
$\varphi_0$	1.61	$t$	25000
$\Phi_{rh}$	1.274518	$t_0$	28
$\beta(f_{cm})$	2.586759	$\beta_H$	578.21
$\beta(t_0)$	0.48845	$t-t_0$	24972
RH	80	$H_0$	233.65

**Tabella 6.10 :** Valori per il calcolo della viscosità

### 6.2.3 Rilassamento acciaio

Per la valutazione della perdita di precompressione dovuta al rilassamento dell'acciaio da precompressione per prima cosa è necessario definire la classe di rilassamento.

L'Eurocodice 2 ne definisce 3:

- Classe 1: fili o trefoli, rilassamento ordinario;
- Classe 2: fili o trefoli, basso rilassamento;
- Classe 3: barre laminate e lavorate a caldo.

Nel caso in esame siamo in presenza di un acciaio con rilassamento ordinario.

I calcoli devono essere basati sul valore di  $\rho_{1000}$ , ovvero il valore della perdita per rilassamento (in percentuale) a 1000 h dopo la messa in tensione e a una temperatura media di 20°C. I valori di  $\rho_{1000}$  possono essere assunti pari all'8% per la Classe 1, al 2,5% per la Classe 2 e al 4% per la Classe 3.

La  $\Delta\sigma_{pr}$  è stata valutata con la seguente formula:

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5.39\rho_{1000}e^{5.7\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)} 10^{-5}$$

$\Delta\sigma_{pr}$  è il valore assoluto delle perdite per rilassamento;

$\sigma_{pi}$  per le armature post-tese  $\sigma_{pi}$  è il valore assoluto della tensione iniziale  $\sigma_{pi} = \sigma_{pm0}$

$t$  è il tempo dopo la messa in tensione (in ore);

$\mu = \sigma_{pi}/f_{pk}$ , dove  $f_{pk}$  è il valore caratteristico della resistenza a trazione dell'acciaio da precompressione;

<b>t (ore)</b>	500000
<b>C1</b>	5.39
<b>C2</b>	6.7
<b><math>\rho_{1000}</math></b>	8
<b><math>\mu</math></b>	0.734
<b><math>\sigma_{pi}</math></b>	1364.9

**Tabella 6.11:** Valori per il calcolo del rilassamento dell'acciaio

#### 6.2.4 Risultato finale $\Delta P_{c+s+r}$

<b>Ac [mm<sup>2</sup>]</b>	646500
<b>Ap [mm<sup>2</sup>]</b>	5574
<b>E<sub>cm</sub> [MPa]</b>	33881
<b>E<sub>p</sub>[MPa]</b>	201000
<b><math>\sigma_{c,Qp}</math> [MPa]</b>	11.77
<b>z<sub>cp</sub> [mm]</b>	1190
<b>J</b>	7.5E+11

<b><math>\Delta\sigma_{c+s+r}</math> [MPa]</b>	317
<b><math>\Delta P_{c+s+r}</math> [kN]</b>	1769

**Tabella 6.12:** Valori finali di perdita di precompressione valutati con EC2

<b><math>\sigma_{iniz}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_{fin}</math> [MPa]</b>	<b><math>\Delta\sigma</math> [MPa]</b>	<b>p.p. [%]</b>	<b><math>\Delta\sigma_{ec2}</math> [MPa]</b>	<b>p.p. [%]</b>
1365	739.7	625.2	46	317	23
	944.6	420.3	31		
	1419.9	-54.9	-4		
	1106.0	259.0	19		
	979.5	385.4	28		
Media			24		23

**Tabella 6.13:**  $\Delta\sigma$  calcolate con EC2 e con estensimetri

In tabella 6.13 stato importante valutare la  $\Delta\sigma$  con le tensioni attuali misurate dagli estensimetri così da poterla confrontare con  $\Delta\sigma_{ec2}$ , ovvero la diminuzione di tensione valutata grazie alla formulazione semplificata dell'Eurocodice 2.

La  $\Delta\sigma_{ec2}$  pari a 317 MPa si colloca perfettamente tra i valori della  $\Delta\sigma$  della prova di rilascio tensionale. Questa verifica mostra come i valori estensimetrici siano supportati anche dai risultati prodotti utilizzando una normativa recente e completa come l'Eurocodice.

## 6.4 Confronti

<b>N<sub>0</sub> [kN]</b>	7608
---------------------------	------

<b>ΔP<sub>rt</sub> [kN]</b>	1822	<b>pp [%]</b>	24
<b>ΔP<sub>stimata</sub> [kN]</b>	1826	<b>pp [%]</b>	24.2
<b>ΔP<sub>c+s+r</sub> [kN]</b>	1769	<b>pp [%]</b>	23.3

**Tabella 6.14:** Confronti in termini di forze

<b>σ<sub>iniz</sub> [MPa]</b>	1365
-------------------------------	------

<b>Δσ<sub>rt</sub> [MPa]</b>	327	<b>pp [%]</b>	24
<b>Δσ<sub>stimata</sub> [MPa]</b>	328	<b>pp [%]</b>	24.2
<b>Δσ<sub>c+s+r</sub> [MPa]</b>	317	<b>pp [%]</b>	23.3

**Tabella 6.15 :** Confronti in termini di tensioni

Confrontando i risultati ottenuti dalla prova di rilascio tensionale, quelli stimati dalla relazione di calcolo e quelli valutati mediante EC2 si nota come in essi siano molto vicini tra loro. Tale valutazione è stata svolta sia in termini di forze che tensionali.

## 7. Conclusioni

L'analisi svolta in questo lavoro di tesi si è basata sulla valutazione del degrado di un ponte in cemento armato precompresso. Oggigiorno i monitoraggi sono diventati fondamentali per poter controllare lo stato delle opere, le quali, per la maggior parte, risalgono agli anni 50-60 del Novecento. Il patrimonio edilizio in Italia, infatti, aumentò vertiginosamente nel dopoguerra. Si trattava di anni di grande boom economico in cui, nel 1951 erano stati costruiti 10,7 milioni di abitazioni che erano quasi raddoppiate nel 1991 raggiungendo la cifra di 19,7 milioni di unità, ad oggi quindi dopo 50-60 anni siamo in epoca di grandi ristrutturazioni con associati miglioramenti ed adeguamenti sismici spesso difficili da raggiungere. Dunque, anche per il viadotto "Molise 1" risalente al 1966 il monitoraggio dello stato della precompressione era d'obbligo. L'innovazione che si è voluta mostrare in questa tesi è la metodologia con cui è stato effettuato il monitoraggio. L'utilizzo degli estensimetri è infatti una nuova proposta che sta prendendo sempre più piede nell'ingegneria civile. Questi strumenti fin'ora erano i principali componenti che permettevano di effettuare misurazioni in altri campi di studio, quali l'elettronica o la meccanica. Da recenti prove sperimentali però si è visto che anche nel campo delle costruzioni gli estensimetri offrono dei risultati coerenti, utili e di semplice interpretazione. Grazie alla loro misura delle deformazioni (dell'ordine del micron) di elementi strutturali quali travi, provini è stato possibile ottenere un'indicazione sulla complessiva efficienza del sistema di precompressione e delle prestazioni richieste all'elemento studiato. La prova è chiamata di rilascio tensionale perché solo permettendo il rilassamento dell'elemento di carota della trave è possibile leggere una deformazione. Affinchè i risultati della prova mostrassero dei valori attendibili è stato necessario per prima cosa effettuare un vasto studio teorico della strumentazione in esame. Gli estensimetri mostrano un'elevata sensibilità alle condizioni al contorno quindi per non produrre misure disturbate è necessario conoscere approfonditamente il loro comportamento. Parallelamente alla conoscenza teorica si è sviluppata quella pratica, la quale anch'essa mostra dei punti delicati che devono essere svolti con particolare precisione. Per comprendere a pieno il comportamento della strumentazione e imparare a leggere e interpretare i risultati la prova è stata prima tarata in laboratorio. Solo dopo il processo di taratura sono stati applicati gli estensimetri sulla trave di bordo del Viadotto del Liscione e sono stati ottenuti i risultati del rilascio tensionale. Essi hanno mostrato una percentuale di perdita di precompressione molto simile a quella stimata in fase di progetto e dunque il risultato estensimetrico è coerente con il fenomeno misurato. Al fine di rendere più consistente la prova rilascio sono stati effettuati confronti tensionali. Il primo è stato confrontare la tensione nel calcestruzzo alla quota della posizione degli estensimetri partendo dalla tensione iniziale di progetto e riducendola del 24,2% (percentuale di perdita stimata dai progettisti). Questo valore tensionale è stato confrontato con quello misurato dagli estensimetri. I due risultati sono prossimi tra loro, e questa è un'ulteriore conferma della validità della prova. La perdita di precompressione è un fenomeno ormai noto da decenni ed è stato studiato nel dettaglio. Conoscere questo fenomeno e potergli associare un valore quantitativo riesce a migliorare la fase di progettazione iniziale delle opere. L'Eurocodice 2 offre formulazioni specifiche per valutarla nel modo più accurato e dunque si è voluto anche confrontare i dati

della prova sperimentale con quelli valutati tramite normativa. Il risultato anche in questo caso è stato positivo poiché il valore della variazione di tensione da EC2 si colloca esattamente nel mezzo tra i valori delle 5 prove svolte sulle campate da 34 m. In definitiva si può affermare che la prova di rilascio tensionale abbia prodotto dei risultati significativi e soprattutto confermati da diversi confronti. Le varie metodologie utilizzate per valutare la perdita di tensione che rappresenta la precompressione agente vanno a convergenza tra loro. Da quest'analisi si evince quindi che gli estensimetri sono un buono strumento per effettuare le misure anche nel campo dell'ingegneria civile su materiali come il calcestruzzo. Occorre prestare attenzione con questa strumentazione perché non nasce propriamente per il campo civile, ma in futuro potrà utilizzarsi ad una più larga scala, questo per la semplicità con cui si ottengono risultati sul benessere dell'opera indagata. Nel caso oggetto di studio, i risultati estensimetrici ottenuti mostrano come la trave di bordo del Ponte della Bifernina sia sana poiché la perdita di precompressione risulta essere nella norma e molto vicina a quella stimata in fase di progettazione.

## 8. Bibliografia e normativa di riferimento

- *“Fondamenti di tecnica delle costruzioni”* Mauro Mezzina
- Relazione di calcolo *“Impalcati in c.a.p. su luce di 34 m”* per strada di fondovalle del Biferno, 25 maggio 1966, *Ferrocemento*
- *“Valutazione delle travi da ponte in c.a.p. a cavi post-tesi mediante l’esecuzione di prove di rilascio”* Lupoi Alessio e De Benedetti Giorgia, 2021
- Rapporto di prova n.1 del 18/05/2022 rif. verbale di accettazione n. 3762/C del 29/04/2022, Laboratorio prove *TE.MA.CO. S.r.l.*
- *“Strain gages and accessories, measurement with confidence”*, *HBM*
- Eurocodice 2 UNI EN 1992-1-1, “Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Parte 1-1: regole generali e regole per gli edifici”

## Indice delle figure

<b>Figura 2.1:</b> Struttura in cemento armato e cemento armato precompresso in esercizio. ....	8
<b>Figura 2.2:</b> Simbologia per Tabella 2.1 .....	12
<b>Figura 2.3:</b> Calcolo delle perdite per attrito $\Delta P\mu$ .....	13
<b>Figura 2.4 :</b> Diagramma costitutivo acciaio .....	15
<b>Figura 2.5 :</b> Fili .....	15
<b>Figura 2.6 :</b> Trecce .....	16
<b>Figura 2.7 :</b> Trefoli.....	16
<b>Figura 2.8 :</b> Funi.....	16
<b>Figura 2.9 :</b> Barra .....	16
<b>Figura 3.1:</b> Ponte del Liscione .....	17
<b>Figura 3.2:</b> Diga del Liscione.....	18
<b>Figura 3.3:</b> Ponti “Molise 1” e “Molise 2” visti da satellite .....	18
<b>Figura 3.4 :</b> SS 647 Fondo Valle del Biferno.....	19
<b>Figura 3.5:</b> Vista piloni .....	20
<b>Figura 3.6:</b> Vista impalcato .....	21
<b>Figura 3.7:</b> Sezione longitudinale trave di bordo da relazione di calcolo .....	22
<b>Figura 3.8:</b> Sezione trasversale trave di bordo da relazione di calcolo .....	23
<b>Figura 3.9:</b> Fotografia impalcato stato attuale.....	24
<b>Figura 3.10:</b> Trefoli 7 fili .....	25
<b>Figura 3.11:</b> Andamento cavi da relazione di calcolo.....	26
<b>Figura 4.1:</b> Prova di rilascio tensionale sulla trave di bordo del ponte della Bifernina .....	27
<b>Figura 4.2:</b> Prova di rilascio tensionale su calcestruzzo mediante carota circolare .....	30
<b>Figura 4.3:</b> Prova di rilascio tensionale su calcestruzzo mediante provino tronco piramidale .....	30

<b>Figura 4.4</b> : Procedura di applicazione estensimetri .....	33
<b>Figure 4.5</b> : Procedura di applicazione estensimetri .....	33
<b>Figure 4.6</b> : Procedura di applicazione estensimetri .....	34
<b>Figura 4.7</b> : Procedura di applicazione estensimetri .....	34
<b>Figura 4.8</b> : Procedura di applicazione estensimetri .....	35
<b>Figure 4.9</b> : Procedura di applicazione estensimetri .....	35
<b>Figure 4.10</b> : Procedura di applicazione estensimetri .....	36
<b>Figure 4.11</b> : Procedura di applicazione estensimetri .....	36
<b>Figure 4.12</b> : Procedura di applicazione estensimetri .....	37
<b>Figure 4.13</b> : Procedura di saldatura cavi.....	37
<b>Figure 4.14</b> : Procedura di saldatura cavi.....	38
<b>Figure 4.15</b> : Procedura di saldatura cavi.....	38
<b>Figure 4.16</b> : Procedura di saldatura cavi.....	39
<b>Figure 4.17</b> : Connessioni cavi.....	39
<b>Figura 4.18</b> : Connessioni cavi.....	40
<b>Figura 4.19</b> : Amplificatore MCG plus (fronte).....	40
<b>Figura 4.20</b> : Amplificatore MCG plus (fronte).....	41
<b>Figura 4.21</b> : Apparecchio per test di conducibilità elettrica .....	41
<b>Figura 4.22</b> : Deformazioni lette sull'amplificatore .....	41
<b>Figura 4.23</b> : Interfaccia CATMAN.....	42
<b>Figura 4.24</b> : Deformazioni rilevate da CATMAN.....	42
<b>Figura 4.25</b> : Pianta del ponte con relative posizioni delle prove .....	43
<b>Figura 4.26</b> : Sezione della trave con relativa posizione della prova.....	44
<b>Figura 5.1</b> : Deformazione estensimetro .....	47
<b>Figura 5.2</b> : Estensimetro a resistenza.....	48

<b>Figura 5.3</b> : Variazione di resistenza elettrica .....	49
<b>Figura 5.4</b> : Numero di serie estensimetri a resistenza .....	50
<b>Figura 5.5</b> : Picco di deformazione in caso di base corta.....	55
<b>Figura 5.6</b> : Punto di misura con copertura di protezione .....	58
<b>Figura 5.7</b> : Collegamento a Ponte di Wheatstone .....	61
<b>Figura 5.8</b> : Circuiti elettrici.....	62
<b>Figura 5.9</b> : Elaborazioni misure con CATMAN.....	63
<b>Figura 5.10</b> : Circuito e amplificatore .....	64
<b>Figura 5.11</b> : MGCplus .....	64
<b>Figura 5.12</b> : Campionamento corretto .....	65
<b>Figura 5.13</b> : Sotto-campionamento .....	65
<b>Figura 6.1</b> : Fotografie rappresentanti lo stato di degrado dell'impalcato .....	67
<b>Figura 6.2</b> : Posizionamento estensimetri per valutare le deformazioni .....	68
<b>Figura 6.3</b> : Confronto tensioni iniziali e con perdite del 24,2%.....	71
<b>Figura 6.4</b> : Tensioni attuali nelle travi analizzate misurate mediante estensimetri .....	72
<b>Figura 6.5</b> : Valori di $k_h$ .....	74
<b>Figura 6.6</b> : Valori nominali del ritiro (in %) per essiccamento non contrastato $\epsilon_{cs,0}$ del calcestruzzo con cemento CEM classe N.....	75

# Indice delle tabelle

<b>Tabella 2.1:</b> Tiro, inclinazione, eccentricità cavo risultante.....	12
<b>Tabella 2.2:</b> Valori del coefficiente di attrito $\mu$ .....	14
<b>Tabella 4.1:</b> Campata 40-39 .....	44
<b>Tabella 4.2:</b> Campata 41-40 .....	44
<b>Tabella 4.3:</b> Campata 42-41 .....	45
<b>Tabella 4.4:</b> Campata 43-42 .....	45
<b>Tabella 4.5:</b> Campata 44-43 .....	45
<b>Tabella 5.1:</b> Geometrie estensimetri .....	52
<b>Tabella 5.2 :</b> Collegamenti estensimetri.....	53
<b>Tabella 5.3:</b> Coefficiente espansione termica estensimetri .....	54
<b>Tabella 5.4:</b> Caratteristiche adesivi .....	57
<b>Tabella 6.1:</b> Parametri rilascio tensionale .....	68
<b>Tabella 6.2:</b> Output rilascio tensionale.....	70
<b>Tabella 6.3 :</b> Calcolo tensioni trave.....	71
<b>Tabella 6.4:</b> Dati trave.....	71
<b>Tabella 6.5 :</b> Tensioni estensimetri .....	72
<b>Tabella 6.6 :</b> Valori per calcolo di $\beta_{cls}(t,t_s)$ .....	75
<b>Tabella 6.7 :</b> Valori per calcolo di $\epsilon_{ca}$ .....	76
<b>Tabella 6.8:</b> Valori $\epsilon_{cs}$ .....	76
<b>Tabella 6.9:</b> Valori di $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ .....	77
<b>Tabella 6.10 :</b> Valori per il calcolo della viscosità.....	77
<b>Tabella 6.11:</b> Valori per il calcolo del rilassamento dell'acciaio.....	78
<b>Tabella 6.12:</b> Valori finali di perdita di precompressione valutati con EC2.....	79

<b>Tabella 6.13:</b> $\Delta\sigma$ calcolate con EC2 e con estensimetri .....	79
<b>Tabella 6.14:</b> Confronti in termini di forze .....	80
<b>Tabella 6.15 :</b> Confronti in termini di tensioni.....	80

## **Ringraziamenti**

Ringrazio il mio relatore, il prof. Gabriele Bertagnoli, per avermi guidato e supportato nella stesura della tesi, mostrandosi sempre disponibile. Le sono estremamente riconoscente per i suoi preziosi consigli, i suggerimenti pratici e le conoscenze trasmesse.

Ringrazio i miei tutor del laboratorio TE.MA.CO. Srl, l'Amministratore Nazzareno Nardone e l'ing. Claudia di Basilico per avermi accompagnato e formato nel mio percorso di tesi. Ricorderò per sempre l'entusiasmo con cui mi è stata spiegata ogni cosa, la disponibilità, la gentilezza e il tempo a me dedicato. Grazie per avermi mostrato come si possa svolgere un lavoro con passione.

Vorrei ringraziare con tutto il mio cuore mia mamma e mio padre per avermi amata infinitamente, siete i pilastri della vita. Grazie perché mi avete insegnato che non ci si arrende, che per i sogni si lotta. Grazie per essere i miei più grandi sostenitori dandomi la forza per affrontare il mondo. Grazie perché nei successi siete più felici di me e nei momenti difficili sapete sempre farmi rialzare più forte di prima. Siete il più bell'esempio che si possa avere, da grande vorrei avere la forza di mio padre e il coraggio di mia madre. Orgogliosa di avere come genitori due persone belle come voi. E' a voi che devo tutto.

Ringrazio zia Gianna e zio Tony, siete un punto di riferimento importantissimo per me. Pronti a sostenermi in ogni occasione, ad incoraggiarmi, ad essere sempre dalla mia parte. Grazie per l'amore che mettete in tutto ciò che fate per me, per le dolcissime attenzioni che mi riservate. E' bellissimo avere due zii speciali come voi sui quali so di poter sempre contare. Vi porto in un posto speciale del mio cuore.

Ringrazio nonno Antonio, venuto a mancare due mesi fa, per l'affetto che mi ha dimostrato in ogni momento, sempre orgoglioso della sua nipotina.

