

# Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

# Determinazione del valore di precompressione residua nei ponti: applicazione della Digital Image Correlation su provini strumentati con supporto polimerico

Relatore: prof. Bernardino Chiaia

Correlatore: prof. Valerio De Biagi

> **Candidato:** Nicola Labanca

Anno Accademico 2021/2022

# Sommario

Il presente elaborato di tesi si pone come obiettivo la determinazione del valore di precompressione residua negli impalcati a graticcio con travi precompresse. Durante la vita utile di una struttura in c.a.p., a causa dei fenomeni reologici, ritiro e fluage del calcestruzzo e rilassamento dell'acciaio, oltre che per le azioni ambientali, si prevede una riduzione della forza di precompressione a cui essa è sottoposta. Queste cadute di tensioni, attraverso leggi empiriche, vengono preliminarmente valutate nella fase di progetto dell'opera. D'altro canto, la realizzazione nel passato di opere in c.a.p., con mano d'opera non specializzata e l'utilizzo di materiali non idonei, ha determinato un'errata realizzazione dei dettagli costruttivi e dei sistemi di protezione dei cavi, con conseguenze sulla durabilità delle strutture. L'impossibilità di accesso diretto e in maniera non invasiva alle armature da precompressione raffigura la maggior difficoltà nella conoscenza del livello di degrado strutturale.

La stima della perdita di precompressione di un elemento strutturale è indispensabile per una corretta valutazione delle condizioni di lavoro, e quindi di sicurezza, di una struttura. La misurazione dei livelli di forza di precompressione, in una struttura non strumentata durante la costruzione, può avvenire mediante metodi semidistruttivi. Questi metodi permettono di valutare indirettamente la forza di precompressione attraverso un'altra grandezza, ovvero la deformazione.

Questo lavoro propone di eseguire una prova di rilascio tensionale su calcestruzzo con carota strumentata, andando a sostituire gli estensimetri con un supporto circolare in materiale polimerico. Sottoponendo il supporto a una Digital Image Correlation (DIC) si può valutare la deformazione indotta dalla precompressione e dai carichi permanenti. Successivamente, mediante la legge di Hooke, è possibile risalire alla tensione agente.

Rispetto al rilevamento con estensimetri, in cui la misurazione è limitata in un punto, lo spostamento a pieno campo ottenuto dal DIC fornisce una quantità maggiore di dati, portando a una stima più accurata della deformazione e dunque ad un'opportuna riduzione degli errori di misura, causati dalla disomogeneità del calcestruzzo. Inoltre, l'installazione di un supporto polimerico non richiede né il montaggio della strumentazione nell'area centrale, che potrebbe esser danneggiata durante la prova di carotaggio, né di un particolare trattamento della superficie di incollaggio.

Il presente lavoro di tesi si è focalizzato sullo studio del supporto polimerico, tramite un'analisi FEM, e sulla Digital Image Correlation (DIC) di immagini acquisite su provini sollecitati a prefissati valori di tensione, precedentemente strumentati con il supporto polimerico. Dal confronto della deformazione reale e quella rilevata tramite DIC si è convalidato il metodo di stima dello stato tensionale attraverso il supporto polimerico su scala di laboratorio. Infine, l'elaborato si è concluso tramite una back analysis, per individuare in una trave in c.a.p. il tiro del P<sub>i-esimo</sub> cavo e la perdita ad esso associata. A partire dal risultato della prova di rilascio tensionale su calcestruzzo, conoscendo la geometria, la carpenteria e lo stato di sollecitazione attuale della trave, si stima la perdita effettiva del cavo in esame.

# Indice

1	Int	roduzione	1
1.1		Tecnologie di precompressione	1
	1.1.1	Sistema a fili aderenti	3
	1.1.2	Sistema a cavi scorrevoli	4
	1.1.3	Sistema a cavi esterni	6
	1.1.4	Tipologie di ponti a graticcio	8
		1.1.4.1 Impalcato a graticcio gettato in opera	8
		1.1.4.2 Impalcato a graticcio con travi a I prefabbricate e soletta gettata in opera	9
		1.1.4.3 Impalcato a graticcio con travi a V prefabbricate e soletta gettata in opera	11
1.2		Stato di salute dei ponti in Italia	. 12
1.3		Manutenzione dei ponti in Italia	. 14
2	Ca	use e difetti degli elementi strutturali in c.a.p	. 16
2.1		Introduzione	. 16
2.2		Qualità delle iniezioni	. 16
2.3		Corrosione dell'armatura di precompressione	. 18
2.4		Quadro Fessurativo	. 19
	2.4.1	Lesioni Longitudinali	19
	2.4.2	Lesioni Trasversali	21
	2.4.3	Lesioni capillari ancoraggi	22
2.5		Umidità, infiltrazioni e scolature	. 23
2.6		Difetti del calcestruzzo lungo il tracciato dei cavi	. 24
	2.6.1	Delaminazione del calcestruzzo	24
	2.6.2	Ancoraggi esposti	25
	2.6.2 2.6.3	Ancoraggi esposti Guaine in vista	25 26
3	2.6.2 2.6.3 Va	Ancoraggi esposti Guaine in vista lutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di	25 26
3 deter	2.6.2 2.6.3 Va nsion	Ancoraggi esposti Guaine in vista lutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento	25 26 .27
3 deter 3.1	2.6.2 2.6.3 Va nsion	Ancoraggi esposti Guaine in vista lutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione	25 26 .27 .27
<b>3</b> <b>deter</b> 3.1 3.2	2.6.2 2.6.3 Va	Ancoraggi esposti Guaine in vista lutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione Prove di detensionamento sui trefoli/fili	25 26 .27 .27 .30
<b>3</b> <b>dete</b> 3.1 3.2 3.3 2.4	2.6.2 2.6.3 Va	Ancoraggi esposti Guaine in vista lutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione Prove di detensionamento sui trefoli/fili Prove di detensionameto sul calcestruzzo	25 26 .27 .27 .30 .36
<b>3</b> deter 3.1 3.2 3.3 3.4 2.5	2.6.2 2.6.3 Va	Ancoraggi esposti Guaine in vista lutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione Prove di detensionamento sui trefoli/fili Prove di detensionameto sul calcestruzzo Prova di rilascio tensionale con provino tronco piramidale Metedelogia di prova proposta: Carata strumentata con supporto polimerico per	25 26 .27 .27 .30 .36 .44
<b>3</b> <b>deter</b> 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5	2.6.2 2.6.3 Va nsion	Ancoraggi esposti Guaine in vista lutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione Prove di detensionamento sui trefoli/fili Prove di detensionameto sul calcestruzzo Prova di rilascio tensionale con provino tronco piramidale Metodologia di prova proposta: Carota strumentata con supporto polimerico per	25 26 .27 .27 .30 .36 .44
<b>3</b> <b>deter</b> 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 1'ana <b>4</b>	2.6.2 2.6.3 Vansion	Ancoraggi esposti Guaine in vista lutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione Prove di detensionamento sui trefoli/fili Prove di detensionameto sul calcestruzzo Prova di rilascio tensionale con provino tronco piramidale Metodologia di prova proposta: Carota strumentata con supporto polimerico per IC	25 26 .27 .27 .30 .36 .44 .47
<b>3</b> deter 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 l'ana <b>4</b> 4.1	2.6.2 2.6.3 Va nsion lisi D Di	Ancoraggi esposti Guaine in vista Iutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione Prove di detensionamento sui trefoli/fili Prove di detensionameto sul calcestruzzo Prova di rilascio tensionale con provino tronco piramidale Metodologia di prova proposta: Carota strumentata con supporto polimerico per IC gital Image Correlation Introduzione	25 26 27 30 36 44 47 52
<b>3</b> deter 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 l'ana <b>4</b> 4.1 4.2	2.6.2 2.6.3 Va nsion Llisi D Di	Ancoraggi esposti Guaine in vista lutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione Prove di detensionamento sui trefoli/fili Prove di detensionameto sul calcestruzzo Prova di rilascio tensionale con provino tronco piramidale Metodologia di prova proposta: Carota strumentata con supporto polimerico per IC gital Image Correlation Aspetti base della DIC	25 26 27 30 36 44 47 52 52 53
<b>3</b> deter 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 l'ana <b>4</b> 4.1 4.2 4.3	2.6.2 2.6.3 Va nsion lisi D Di	Ancoraggi esposti Guaine in vista Iutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione Prove di detensionamento sui trefoli/fili Prove di detensionameto sul calcestruzzo Prova di rilascio tensionale con provino tronco piramidale Metodologia di prova proposta: Carota strumentata con supporto polimerico per IC gital Image Correlation Introduzione Aspetti base della DIC Correlazione di immagini digitali	25 26 .27 .30 .36 .44 .47 .52 .52 .53 .54
<b>3</b> deter 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 l'ana <b>4</b> 4.1 4.2 4.3 4.4	2.6.2 2.6.3 Va nsion lisi D Di	Ancoraggi esposti Guaine in vista lutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione Prove di detensionamento sui trefoli/fili Prove di detensionameto sul calcestruzzo Prova di rilascio tensionale con provino tronco piramidale Metodologia di prova proposta: Carota strumentata con supporto polimerico per IC gital Image Correlation Introduzione Aspetti base della DIC Correlazione di immagini digitali Speckle Pattern e Subset	25 26 27 30 36 44 52 53 54 56
<b>3</b> deter 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 l'ana <b>4</b> 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5	2.6.2 2.6.3 Va nsion lisi D Di	Ancoraggi esposti Guaine in vista lutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione Prove di detensionamento sui trefoli/fili Prove di detensionameto sul calcestruzzo Prova di rilascio tensionale con provino tronco piramidale Metodologia di prova proposta: Carota strumentata con supporto polimerico per IC gital Image Correlation Introduzione Aspetti base della DIC Correlazione di immagini digitali Speckle Pattern e Subset Corrispondenza tra i subset	25 26 .27 .30 .36 .44 .47 .52 .53 .54 .56 .59
<b>3</b> deter 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 l'ana <b>4</b> 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	2.6.2 2.6.3 Va nsion lisi D Di	Ancoraggi esposti Guaine in vista Iutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione Prove di detensionamento sui trefoli/fili Prove di detensionameto sul calcestruzzo Prova di rilascio tensionale con provino tronco piramidale Metodologia di prova proposta: Carota strumentata con supporto polimerico per IC gital Image Correlation Introduzione Aspetti base della DIC Correlazione di immagini digitali Speckle Pattern e Subset Corrispondenza tra i subset Stima degli spostamenti in sub-pixel	25 26 .27 .30 .36 .44 .47 .52 .53 .54 .59 .62
<b>3</b> deter 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 l'ana <b>4</b> 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	2.6.2 2.6.3 Va nsion lisi D Di 4.6.1	Ancoraggi esposti Guaine in vista Iutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione. Prove di detensionamento sui trefoli/fili. Prove di detensionameto sul calcestruzzo Prova di rilascio tensionale con provino tronco piramidale. Metodologia di prova proposta: Carota strumentata con supporto polimerico per IC	25 26 27 27 30 36 44 52 53 54 59 63
<b>3</b> deter 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 l'ana <b>4</b> 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	2.6.2 2.6.3 Vansion lisi D Dig 4.6.1 4.6.2	Ancoraggi esposti Guaine in vista Iutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione. Prove di detensionamento sui trefoli/fili. Prove di detensionameto sul calcestruzzo Prova di rilascio tensionale con provino tronco piramidale. Metodologia di prova proposta: Carota strumentata con supporto polimerico per IC. gital Image Correlation. Introduzione. Aspetti base della DIC. Correlazione di immagini digitali. Speckle Pattern e Subset. Corrispondenza tra i subset. Stima degli spostamenti in sub-pixel. Interpolazione bilineare Interpolazione bilineare	25 26 27 27 30 36 44 52 53 54 54 64
<b>3</b> deter 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 l'ana <b>4</b> 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7	2.6.2 2.6.3 Va nsion lisi D Di 4.6.1 4.6.2	Ancoraggi esposti Guaine in vista Iutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento	25 26 27 30 36 44 52 53 54 55 63 64 65
<b>3</b> deter 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 l'ana <b>4</b> 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 <b>5</b>	2.6.2 2.6.3 Va nsion disi D Di 4.6.1 4.6.2 Ap	Ancoraggi esposti Guaine in vista Iutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di amento Introduzione. Prove di detensionamento sui trefoli/fili. Prove di detensionameto sul calcestruzzo Prova di rilascio tensionale con provino tronco piramidale. Metodologia di prova proposta: Carota strumentata con supporto polimerico per IC. gital Image Correlation. Introduzione. Aspetti base della DIC. Correlazione di immagini digitali. Speckle Pattern e Subset. Stima degli spostamenti in sub-pixel. Interpolazione bilineare Interpolazione delle deformazioni.	25 26 27 30 36 44 52 53 54 54 63 64 65 64

5.2.1 Str 5.2.2 Re 5.2.3 Ve 5.3 F 5.3.1 Ca 5.4 A 5.5 C 5.6 F 5.6 F 5.6.1 Str 6 Model 6.1 I 6.2 I 6.3 I 6.4 A	rumentazione per l'acquisizione di immagini digitali ealizzazione del Pattern e preparazione dei provini erifica della qualità del Pattern. Prove di compressione. Alcolo dei carichi da applicare in campo lineare Analisi DIC tramite Ncorr Convalidazione e valutazione degli errori Risultati e Analisi rain Plot. Ilazione numerica del supporto Introduzione. Dimensioni, condizioni di vincolo e condizioni di carico del modello	
5.2.2 Re 5.2.3 Ve 5.3 F 5.3.1 Ca 5.4 A 5.5 C 5.6 F 5.6.1 Str 6.1 I 6.2 I 6.3 I 6.4 A	ealizzazione del Pattern e preparazione dei provini erifica della qualità del Pattern Prove di compressione alcolo dei carichi da applicare in campo lineare Analisi DIC tramite Ncorr Convalidazione e valutazione degli errori Risultati e Analisi rain Plot Ilazione numerica del supporto Introduzione Dimensioni, condizioni di vincolo e condizioni di carico del modello	
5.2.3 Ve 5.3 F 5.3.1 Ca 5.4 A 5.5 C 5.6 F 5.6.1 Str 6 Model 6.1 F 6.2 F 6.3 F 6.4 A	erifica della qualità del Pattern Prove di compressione Prove di compressione Prove di compressione Analisi DIC tramite Ncorr Convalidazione e valutazione degli errori Convalidazione e valutazione degli errori Risultati e Analisi rain Plot Ilazione numerica del supporto Introduzione Dimensioni, condizioni di vincolo e condizioni di carico del modello	
5.3 F 5.3.1 Ca 5.4 A 5.5 C 5.6 F 5.6.1 Str 6 Mode 6.1 I 6.2 I 6.3 I 6.4 A	Prove di compressione Alcolo dei carichi da applicare in campo lineare Analisi DIC tramite Ncorr Convalidazione e valutazione degli errori Risultati e Analisi rain Plot Ilazione numerica del supporto Introduzione Dimensioni, condizioni di vincolo e condizioni di carico del modello	
5.3.1 Ca 5.4 A 5.5 C 5.6 F 5.6.1 Str 6.1 I 6.2 I 6.3 I 6.4 A	Analisi DIC tramite Ncorr Convalidazione e valutazione degli errori Risultati e Analisi rain Plot Ilazione numerica del supporto Introduzione Dimensioni, condizioni di vincolo e condizioni di carico del modello	7 
5.4 A 5.5 C 5.6 F 5.6.1 Str 6 Mode 6.1 I 6.2 I 6.3 I 6.4 A	Analisi DIC tramite Ncorr Convalidazione e valutazione degli errori Risultati e Analisi rain Plot Ilazione numerica del supporto Introduzione Dimensioni, condizioni di vincolo e condizioni di carico del modello	
5.5 C 5.6 F 5.6.1 Str 6 Mode 6.1 F 6.2 F 6.3 F 6.4 A	Convalidazione e valutazione degli errori Risultati e Analisi rain Plot Ilazione numerica del supporto Introduzione Dimensioni, condizioni di vincolo e condizioni di carico del modello	
5.6 F 5.6.1 Str 6 Mode 6.1 I 6.2 I 6.3 I 6.4 A	Risultati e Analisi rain Plot Ilazione numerica del supporto Introduzione Dimensioni, condizioni di vincolo e condizioni di carico del modello	
5.6.1 Str 6 Mode 6.1 I 6.2 I 6.3 I 6.4 A	rain Plot Ilazione numerica del supporto ntroduzione Dimensioni, condizioni di vincolo e condizioni di carico del modello	9 
6 Mode 6.1 I 6.2 I 6.3 I 6.4 A	<b>llazione numerica del supporto</b> introduzione Dimensioni, condizioni di vincolo e condizioni di carico del modello	<b>10</b> 
6.1       I         6.2       I         6.3       I         6.4       A	ntroduzione Dimensioni, condizioni di vincolo e condizioni di carico del modello	
6.2       I         6.3       I         6.4       A	Dimensioni, condizioni di vincolo e condizioni di carico del modello	10
6.3 I 6.4 A		
6.4 A	Definizione delle proprietà dei materiali	11
	Analisi della forma del supporto e sistema di incollaggio	11
6.4.1 Inc	collaggio a croce	11
6.4.2 Inc	collaggio sul bordo	12
6.4.3 Inc	collaggio uniforme	12
6.5 A	Analisi dei materiali a diversi spessori	
6.6 I	nfluenza del modulo elastico del calcestruzzo	
6.7 (	Osservazioni	
7 Calco	lo a posteriori della precompressione	
8 Concl	lusioni e sviluppi futuri	

# Indice delle figure

Figura 1 – Principio di funzionamento [1]	1
Figura 2 – Processo di produzione di elementi pre-tesi [1]	3
Figura 3 – Processo di produzione di elementi post-tesi [1]	4
Figura 4 – Sistema di precompressione esterna [1]	6
Figura 5 – Uso della precompressione esterna per il rinforzo di ponti esistenti [2]	7
Figura 6 – Sezione longitudinale e trasversale impalcato a graticcio gettato in opera [2]	8
Figura 7 – Impalcato a graticcio con travi prefabbricate a I. vista in pianta - sezione longitudi	nale
e trasversale [2]	9
Figura 8 – Armatura per collegamento trave-soletta gettata in opera [2]	10
Figura 9 – Impalcato a graticcio con travi prefabbricate a V, sezione trasversale [2]	11
Figura 10 – Schema disposizione trefoli [2]	11
Figura 11 – Collassi di impalcati a graticcio con travi in c.a.p.	13
Figura 12 – Approcecio multilivello e relazioni tra i livelli di analisi [6]	
Figura 13 – Cavi non iniettati con guaina non più esistente sull'intradosso del bulbo inferiore d	lella
trave [4].	
Figura 14 – Vuoti di iniezione dovuti al bleeding [4]	17
Figura 15 – Endoscopia: guaina ossidata, iniezione assente, trefoli fortemente ossidati [4]	
Figura 16 – Trefoli fortemente corrosi con fili rotti [4]	.18
Figura 17 – Lesioni trasversali: ubicazione e conformazioni tiniche [7]	19
Figura 18 – Lesioni longitudinali tino L2 sull'intradosso del bulbo inferiore e sul fianco del bu	ilho
[4]	20
Figura 19 – Lesioni trasversali: ubicazione e conformazioni tiniche [7]	20
Figure 20 $-$ Lesioni trasversali tipo T2 [4]	21
Figure 20 Desioni dasversan upo 12 [4]	21
Figura 22 – Errori costruttivi – Pluviali non efficienti o assenti [1]	22
Figure 23 – Corretto sistema di convogliamento delle acque [2]	23
Figure $24 - Delaminazione sull'anima della trave [8]$	2 <del>4</del> 24
Figura 25 Umidità interna lungo il tracciato dei cavi stalattiti sul hulho inferiore [8]	24
Figure 26 – Testa di angoraggio ossidata – Euoriusaita delle barre [4]	25
Figure 27 Errori costruttivi disposizione dell'armeture [2]	25
Figure 28 Vespaio gull'introdesse della trava con armature lente a guaine dei covi	20 ; 4;
recompressione especte e ossidate $[\Lambda]$	26
Figure 20 Colibro a filo vibrante	20
Figure 20 – Callolo a filo violante	
rigura 50 – Sensori a fibra ottica distribuiti e discreti – Trave post tesa strumentata con fibra ot	20
[1/]	.29
Figura $51 -$ Trefolo di precompressione con filo centrale sostituito con anima in cardoni	10 e
Eigung 22 – Scheme teoring [4]	29
Figura $32 - $ Schema leonco [4]	30
Figura $33 - \text{Estensimetro resistivo}$	31
Figura $34 - \text{Esecuzione del taglio} - \text{particolare del taglio e dell'estensimetro [4]}$	31
Figura $55 - $ Strumentazione e attrezzatura per prova di detensionamento sui fili/trefoli [4]	
Figure $30 - Fast operative prove di detensionamento sui trefoli/fili [4]$	
Figura $3 / -$ Scheda di restituzione della prova [4]	
Figura $38 -$ Schema teorico del rilascio dello stato tensionale	36
Figura 39 – Rilievo dell'armatura di precompressione lungo il setto del cassone in c.a.p.[4]	36
Figura 40 – Strumentazione e attrezzatura per prova di detensionamento sul calcestruzzo [4]	38

Figura 41 – Fase di applicazione degli estensimetri e passaggio dei 3 cavi nel foro passante [4]	.39
Figura 42 – Fase di protezione degli estensimetri [4]	.39
Figura 43 – Fase di carotaggio – Carota estratta e protezione rimossa [4]	.40
Figura 44 – disposizioni estensimetriche, rosetta rettangolare a tre griglie a 45°	.41
Figura 45 – Collocazione della prova per la trave a mensola [4]	.41
Figura 46 – disposizioni estensimetriche, estensimetro biassiale	.41
Figura 47 – Collocazione della prova per la trave semplicemente appoggiata [4]	.42
Figura 48 – Calcolo delle tensioni principali estensimetro biassiale	.42
Figura 49 – Calcolo delle tensioni principali rosetta rettangolare a tre griglie a 45°	.42
Figura 50 – Scheda di restituzione della prova [4]	.43
Figura 51 – Operazioni di taglio con Discovery e provino rimosso [19]	.44
Figura 52 – Fase di Taglio [20]	.44
Figura 53 – Scheda di restituzione della prova [20]	.46
Figura 54 – Schema teorico del rilascio dello stato tensionale	.47
Figura 55 – Esecuzione dello speckle pattern	.48
Figura 56 – Informazione radiometrica fornita dai pixel	.48
Figura 57 – Diagramma di flusso del metodo proposto per la stima dello stato tensionale	.49
Figura 58 – Setup di prova	.49
Figura 59 – Setup di posizionamento	.50
Figura 60 – Numero di pubblicazioni relative alle diverse tecniche di misura della deformazio	one
[22]	.52
Figura 61 – Setup di prova DIC-2D	.53
Figura 62 – Informazione radiometrica fornita dai pixel	54
Figura 63 – Discretizzazione dell'immagine di riferimento [23]	.55
Figura 64 – Step DIC per l'analisi della deformazione	56
Figura 65 - Esempi di speckle pattern. Da sinistra: speckle di 5 px (diametro) al 30%	di
ricoprimento, 5 px al 50% e 9 px al 50%	.56
Figura 66 – Dimensione subset	.57
Figura 67 – Sovrapposizione di subset	.58
Figura 68 – Confronto tra subset di riferimento e subset deformato	.59
Figura 69 – Corrispondenza tra subset [25]	.60
Figura 70 – Corrispondenza tra subset di riferimento e subset deformato	.61
Figura 71 – Errore introdotto dalle funzioni interpolanti [26]	.62
Figura 72 – Interpolazione tramite funzione bilineare [26]	.63
Figura 73 – Interpolazione tramite funzione bicubica [26]	.64
Figura 74 – Camera e illuminazione impiegate per le prove	.66
Figura 75 – Sistema di acquisizione	.67
Figura 76 – Esempio di immagini acquisite	.68
Figura 77 – Illuminazione del pattern	.68
Figura 78 – Foglio Policarbonato trasparente	.69
Figura 79 – Esecuzione dello speckle pattern	.70
Figura 80 – Cubetti di calcestruzzo prima e dopo l'installazione del supporto polimerico	.70
Figura 81 – Cubetti di calcestruzzo strumentati con un supporto polimerico per l'analisi DIC	.71
Figura 82 – Superficie del provino 1	.71
Figura 83 – Porzione della superficie del provino 1 in scala 1:1, a sinistra pattern realizzato c	on
distanza 20 cm. a destra nattern realizzato con distanza 30 cm	.72

Figura 84 - Dettaglio del pattern del provino 1: a sinistra diametro della macchiolina 7px (patt	ern
realizzato con distanza 20 cm), a destra diametro della macchiolina 4px (pattern realizzato o	con
distanza 30 cm)	.72
Figura 85 – Porzione della superficie del provino 1 prima e dopo conversione in scala di grigi	.73
Figura 86 – Porzione della superficie del provino 1 trasformata in immagine binaria	.73
Figura 87 – Istogramma dell'immagine della superficie del provino 1	.74
Figura 88 – Pressa Baldwin utilizzata per le prove	.77
Figura 89 – Diagramma di carico	.78
Figura 90 – Flusso di lavoro Ncorr	.80
Figura 91 – Region of Interest relativa allo speckle pattern realizzato da 30 cm	.81
Figura 92 – Impostazione parametri DIC	.81
Figura 93 – Posizionamento dei seeds	.83
Figura 94 – Analisi dei seeds	.83
Figura 95 – v_displacements [px]	.84
Figura 96 – u_displacements [px]	.85
Figura 97 – Strain Radius	.86
Figura 98 – εy [με]	.86
Figura 99 – Errore di fondo	.89
Figura 100 – Errore di fondo e deviazione standard speckle pattern 20 cm	.90
Figura 101 – Errore di fondo e deviazione standard speckle pattern 30 cm	.90
Figura 102 – Confronto tra με riferimento e με DIC – Step1	.93
Figura $103 - Confronto tra \mu\epsilon$ riferimento e $\mu\epsilon$ DIC - Step2	.93
Figura 104 – Confronto tra uɛ riferimento e uɛ DIC – Step3	.94
Figura 105 – Confronto tra ugeriferimento e uge DIC tra i tre step di carico	.94
Figura 106 – Strain Plot della prova 1 speckle pattern 20 cm	.96
Figura 107 – Strain Plot della prova 1 speckle pattern 30 cm	.97
Figura 108 – Strain Plot della prova 2 speckle pattern 20 cm	.98
Figura 109 – Strain Plot della prova 2 speckle pattern 30 cm	.99
Figura 110 – Strain Plot della prova 3 speckle pattern 20 cm	100
Figura 111 – Strain Plot della prova 3 speckle pattern 30 cm	101
Figura 112 – Strain Plot della prova 4 speckle pattern 20 cm	102
Figura 113 – Strain Plot della prova 4 speckle pattern 30 cm	103
Figura 114 – Strain Plot della prova 5 speckle pattern 20 cm	104
Figura 115 – Strain Plot della prova 5 speckle pattern 30 cm1	105
Figura 116 – Strain Plot della prova 6_speckle pattern 20 cm1	106
Figura 117 – Strain Plot della prova 6 speckle pattern 30 cm1	107
Figura 118 – Geometria del problema in pianta	109
Figura 119 – Assi di simmetria	110
Figura 120 – Modello di un quarto del problema	110
Figura 121 – Mesh del modello	111
Figura 122 – Gradi di libertà dei nodi [29]	112
Figura 123 – Condizioni di vincolo sugli assi di simmetria1	113
Figura 124 – Condizioni di vincolo	113
Figura 125 – Condizioni di carico	114
Figura 126 – Modello completo	115
Figura 127 – Forma supporto	118
Figura 128 – Incollaggio a croce	119

Figura 129 – Dettaglio incollaggio a croce	119
Figura 130 – Incollaggio sul bordo	120
Figura 131 – Dettaglio incollaggio sul bordo	120
Figura 132 – Incollaggio uniforme	121
Figura 133 – Displacement Dy	122
Figura 134 – Nodi calcestruzzo sulla base di incollaggio	123
Figura 135 – Nodi parte superiore del supporto	124
Figura 136 - Confronto degli spostamenti Dy (nodi 10 -1371) al variare della resisten	za fck del
calcestruzzo	125
Figura 137 – Schema statico	127
Figura 138 - Stato tensionale dovuto alla precompressione più carichi gravitazionali a	sezione di
mezzeria	129

# Indice delle tabelle

Tabella 1 – Matrice per l'individuazione della vulnerabilità strutturale intrinseca [4]12
Tabella 2 - Confronto dei metodi per il monitoraggio delle forze di precompressione [12]28
Tabella 3 – Identificazione Prova75
Tabella 4 – Caratteristiche geometriche provino75
Tabella 5 – Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo76
Tabella 6 – Impostazione pressa per carico a step78
Tabella 7 – Livelli di carico applicati
Tabella 8 – Valori di deformazione
Tabella 9 – Parametri analisi DIC
Tabella 10 – Valori di deformazione di riferimento91
Tabella 11 – Risultati analisi DIC_speckle pattern 30 cm91
Tabella 12 – Risultati analisi DIC_speckle pattern 20 cm92
Tabella 13 – Caratteristiche meccaniche Polimetilmetacrilato116
Tabella 14 – Caratteristiche meccaniche Policarbonato117
Tabella 15 – Caratteristiche meccaniche Politetrafluoroetilene117
Tabella 16 – Effetto irrigidente del supporto – calcestruzzo C32/40, supporto di Plexiglass123
Tabella 17 – Spostamenti Dy nodo 1371124
Tabella 18 – Coefficiente di dilatazione termica126

# 1 Introduzione

## 1.1 Tecnologie di precompressione

La precompressione consiste nell'introdurre artificialmente nella struttura uno stato tensionale e deformativo tale da migliorarne il comportamento strutturale. L'obiettivo è di ridurre o eliminare le tensioni di trazione in modo da ottenere una sezione di calcestruzzo completamente reagente. Infatti, per evitare la parzializzazione della sezione si applica una forza eccentrica tale da generare un momento opposto al momento dovuto ai carichi esterni. In questo modo, la somma delle tensioni di trazione, generate dai carichi esterni, e delle tensioni di compressione, indotte artificialmente, può essere inferiore alla resistenza a trazione del calcestruzzo o addirittura può portare a uno stato globale di compressione, tale da non far nascere fessure in esercizio.



Figura 1 – Principio di funzionamento [1]

Il progetto di strutture in c.a.p. richiede consapevolezza e senso di responsabilità; infatti, la non appropriata introduzione di stati tensionali può risultare catastrofica. Inoltre, le fasi costruttive di queste opere sono più numerose e per ciascuna di essa è richiesta la valutazione dei carichi, delle condizioni di vincolo e le conseguenti verifiche di sicurezza.

Per ottenere vantaggi significativi con questo sistema è necessario utilizzare acciai armonici aventi un limite di snervamento molto elevato. Attualmente, le armature da precompressione presentano, 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 ‰. Le armature di precompressione sono disponibili in forma di fili, trefoli e barre.

Si fa osservare che, gli acciai da precompressione non possono esser utilizzati nelle strutture in cemento armato ordinario, perché la limitazione dell'apertura delle fessure impone il contenimento delle tensioni nell'acciaio.

Per quanto riguarda il calcestruzzo, considerazioni tecnologiche e di durabilità portano ad utilizzare calcestruzzi di classe più elevata rispetto al cemento armato ordinario (da C28/35 a C50/60).

Il sistema di precompressione può essere progettato in modo tale che la precompressione sia:

- integrale;
- a sezione interamente reagente;
- parziale.

La precompressione integrale è in grado di garantire, sotto i carichi di esercizio, il non manifestarsi di tensioni di trazione nella direzione di precompressione. In altri termini, si progetta in modo tale che la sezione sia tutta compressa.

Mentre, nella precompressione a sezione interamente reagente si accettano tensioni di trazione, ma la tensione di trazione massima non supera, sempre in corrispondenza dei carichi di esercizio, un valore limite ritenuto accettabile (in generale la resistenza a trazione del calcestruzzo).

Infine, nella precompressione parzializzata non si fissano limiti alla tensione di trazione nel calcestruzzo, e si opera in regime fessurato.

Si nota che, in caso di precompressione a sezione interamente reagente o parzializzata, occorre inserire delle armature aggiuntive ordinarie per soddisfare le verifiche di resistenza ultime. Viceversa, nella precompressione integrale la sola armatura da precompressione risulta in genere sufficiente per tali verifiche.

La precompressione può esser introdotta nella struttura con tre diverse soluzioni tecnologiche:

- pre-tensione (armature aderenti al calcestruzzo fin dal getto);
- post-tensione (armature inizialmente non aderenti e rese aderenti a costruzione ultimata);
- precompressione esterna-unbonded (armature non aderenti per tutta la vita della struttura posti all'esterno della sezione di calcestruzzo o all'interno dell'intercapedine di un ponte a cassone a conci prefabbricati).

#### 1.1.1 Sistema a fili aderenti

La pre-tensione si utilizza per realizzare elementi prefabbricati in calcestruzzo. In stabilimento l'armatura di precompressione, fili o trefoli, viene pretensionata fra due punti fissi. Attorno a questo sistema si realizza la gabbia di armatura ordinaria e si installa il cassero per poter effettuare il getto di calcestruzzo. In questo modo, l'armatura di precompressione risulta immediatamente aderente al calcestruzzo. A maturazione avvenuta, che può essere ridotta a poche ore utilizzando la maturazione a vapore (velocizzando il processo di fabbricazione), si effettua il taglio delle armature rimaste fuori dal cassero. Per effetto del rilascio delle armature, il filo o trefolo tende ad accorciarsi precomprimendo il calcestruzzo per aderenza. Lo stato tensionale risultante è funzione della tensione di tesatura, della quantità e della posizione dell'armatura pretesa rispetto all'asse baricentrico. Tipicamente il tracciato dell'armatura è rettilineo cioè ha la stessa eccentricità rispetto al baricentro della trave lungo tutto lo sviluppo (induce un momento costante lungo la direzione di precompressione). Per avere un tracciato deviato (spezzato) è possibile inserire un deviatore, il quale deve essere zavorrato, in modo da non spostarsi per effetto della spinta verso l'alto indotta dalla precompressione.

Qualora la precompressione risultasse eccessiva o inutile (ad esempio all'estremità di una trave in semplice appoggio) si può far sì che alcune porzioni non siano precompresse, mediante intubettamento della porzione corrispondente di trefolo, tale da non far sviluppare aderenza tra acciaio e calcestruzzo.



Figura 2 – Processo di produzione di elementi pre-tesi [1]

#### 1.1.2 Sistema a cavi scorrevoli

Nella post-tensione l'acciaio da precompressione è messo in tensione dopo il getto e l'indurimento del calcestruzzo. Nella fase iniziale, affinché l'acciaio sia non aderente al calcestruzzo, si inseriscono delle guaine tubolari nel cassero in cui l'armatura (cavi costituiti da n. trefoli) può scorrere. In seguito all'indurimento del calcestruzzo, si inserisce all'interno delle guaine il cavo da precompressione per mezzo di macchinari spingi trefolo. Tramite martinetti i cavi vengono tesati da entrambi lati per evitare asimmetria nel comportamento della struttura. Raggiunta la tensione richiesta o l'allungamento desiderato, il cavo è bloccato alla struttura attraverso una testata di ancoraggio. Tramite iniezione di malta (boiacca cementizia), si sviluppa l'aderenza tra cavo e calcestruzzo e quindi avviene il trasferimento dello stato tensionale. Pertanto, in questo sistema la precompressione è inizialmente trasferita mediante le forze applicate alle testate (aree molto piccole) e poi per aderenza grazie all'iniezione della boiacca che rendere solidali l'armatura da precompressione e calcestruzzo.

L'operazione di iniezione della malta è estremamente delicata, poiché la presenza di vuoti o sacche d'acqua favorisce i processi di corrosione localizzata con conseguenze sulla durabilità dell'opera. Inoltre, l'impossibilità di accesso diretto e in maniera non invasiva alle armature da precompressione rappresenta la maggior difficoltà nella conoscenza del livello di degrado. L'eventuale perdita di uno o più cavi può causare un collasso improvviso per effetto del solo peso proprio, senza segnali premonitori. Purtroppo, nel passato l'errata operazione di iniezione e l'utilizzo di materiali non idonei, hanno determinato risultati scadenti in queste opere.



Figura 3 – Processo di produzione di elementi post-tesi [1]

Il post-tensionamento è più costoso rispetto al pre-tensionamento ma presenta due importanti vantaggi:

- possibilità di scelta di un tracciato qualunque (in generale parabolica o cubica), in questo modo si contrasta più facilmente l'azione a cui la struttura è sottoposta;
- possibilità di precompressione direttamente in sito, in questo modo si possono realizzare elementi di grandi dimensioni risolvendo i problemi legati al trasporto.

Nella post-tensione, a differenza della pre-tensione che non prevedete tesature successive, si deve tener conto della riduzione di tensione che avviene durante la messa in tensione cioè al tempo t=0. Dunque, per questa soluzione tecnologica esistono tre tipi di perdita di tensione cioè:

- perdite per effetto mutuo (le tesature dei cavi in più fasi successive conportano un ulteriore accorciamento elastico della trave rispetto a quello intervenuto nelle fasi precedenti, con conseguente diminuzione del tiro dei cavi già messi in tensione);
- perdite per attrito (perdita dominante che avviene per effetto dell'attrito che si sviluppa tra cavo e guaina);
- perdite per rientro degli ancoraggi (perdita di tensione dovuta al rientro del cavo all'interno del cuneo di ancoraggio).

### 1.1.3 Sistema a cavi esterni

Infine, la precompressione esterna si realizza con cavi generalmente posizionati all'esterno della sezione trasversale che seguono un andamento spezzato, in cui la deviazione è garantita mediante un deviatore, ossia un elemento in calcestruzzo che resiste alla spinta verso l'alto indotta dalla deviazione stessa del cavo. A livello tecnologico, il processo è uguale alla precompressione post-tesa, ma la guaina risulta esterna al calcestruzzo; quindi, il cavo non è aderente al calcestruzzo. Per prevenire la corrosione dei cavi, all'interno delle guaine si iniettate boiacca, cera o grasso (infatti non bisogna garantire l'aderenza tra calcestruzzo e acciaio).



Figura 4 – Sistema di precompressione esterna [1]

Rispetto ai sistemi precedenti tale tecnica di precompressione presenta tre svantaggi:

- si utilizzano tracciati rettilinei fra due punti di deviazione successivi (non si può ottenere un tracciato parabolico);
- la non aderenza acciaio calcestruzzo fa sì che non si possa sfruttare completamente la
  resistenza dell'acciaio da precompressione (la precompressione esterna è meno
  performante allo SLU rispetto a una precompressione equivalente ottenuta con un altro
  metodo);
- l'incremento della deformazione determina una riduzione dell'eccentricità del cavo rispetto al baricentro (infatti, il cavo rimane nella stessa posizione mentre la struttura si deforma, così l'eccentricità si riduce; un numero corretto di deviatori consente di trascurare questo effetto).

D'altronde, la precompressione esterna presenta due ovvi vantaggi:

- possibilità di ispezione e manutenzione dei cavi ed eventuale sostituzione (nel caso di eccessive perdite di precompressione i cavi possono essere ritesati o sostituiti);
- possibilità di aggiungere cavi anche su strutture esistenti perché ammalorate o per una nuova destinazione d'uso.

Questa tecnologia di precompressione è spesso applicata nel rinforzo di ponti esistenti in calcestruzzo precompresso in modo da incrementare il livello di precompressione dell'opera.



Figura 5 – Uso della precompressione esterna per il rinforzo di ponti esistenti [2]

In considerazione delle diverse tecnologie di precompressione, appare indispensabile garantire nel tempo determinati livelli di forza di precompressione, i quali a causa delle proprietà reologiche dei materiali, oltre che per le azioni ambientali, potrebbero ridursi nel tempo determinando una condizione di lavoro non sicura della struttura. Infatti, il calcestruzzo è soggetto a fenomeni di deformazione lenta (ritiro e fluage), mentre l'acciaio è soggetto al fenomeno del rilassamento. Pertanto, il complesso dei fenomeni dà luogo alle cadute di tensione, cioè una riduzione nel tempo della tensione nell'acciaio, con conseguenze sulla durabilità dell'opera.

Nel paragrafo successivo si riportano le più frequenti tipologie di impalcati a graticcio con travi precompresse, per i quali data la vulnerabilità si propone una metodologia di prova per la determinazione del valore di precompressione residua.

## 1.1.4 Tipologie di ponti a graticcio

Gli impalcati a graticcio con travi precompresse rappresentano un numero significativo dei ponti esistenti in Italia. Questo tipo di opera ha trovato nel passato una rapida diffusione grazie alla possibilità di prefabbricazione degli elementi. L'impalcato è formato da più elementi longitudinali, travi ad I o V pre-tese in stabilimento o post-tese in situ, collegati tra loro dalla soletta e da elementi trasversali chiamati traversi. Dato l'utilizzo di elementi prefabbricati, lo schema statico utilizzato è quello di travi semplicemente appoggiate con soletta continua sugli appoggi. Il range di luce massima è di circa 40-50 m; infatti, per luci maggiori si preferiscono sezioni a cassone.

#### 1.1.4.1 Impalcato a graticcio gettato in opera

La struttura può esser realizzata in cemento armato o in cemento armato precompresso utilizzando la post-tensione in quanto l'opera è realizzata in sito. Con il cemento armato la lunghezza massima è di circa 20 m, mentre tramite precompressione si raggiungono i 40 m. Si potrebbero raggiungere luci maggiori utilizzando un sistema strutturale continuo; in quest'ultimo caso però problematico diventa il sistema costruttivo. Inoltre, l'utilizzo di una trave continua non permette di dare la corretta resistenza alla flessione nelle zone soggette a momento negativo in corrispondenza degli appoggi. La trave gettata in opera presenta una sezione trasversale costante. Lo spessore dell'anima della trave longitudinale di solito varia da 35 a 55 cm, tenendo conto dello spazio richiesto dalle armature.

Generalmente la distanza tra le travi è compresa tra 1,8 e 3 m per minimizzare il costo dovuto all'utilizzo dei materiali e la realizzazione dei casseri. Per problemi di durabilità la soletta superiore deve presentare uno spessore superiore ai 25 cm, limite non sempre rispettato nel passato. Il numero di traversi varia tra 3 a 5, si possono avere soluzioni con solo due traversi agli appoggi ma è necessario inserire un maggior quantitativo di armatura nella soletta per garantire la ripartizione dei carichi.



Figura 6 – Sezione longitudinale e trasversale impalcato a graticcio gettato in opera [2]

# **1.1.4.2 Impalcato a graticcio con travi a I prefabbricate e soletta gettata in opera.**

Questo impalcato presenta delle travi longitudinali che, a differenza del caso precedente, sono prefabbricate. Dunque, il trasporto degli elementi prefabbricati di elevate dimensioni e peso limitano la luce massima a circa 35 m. In questa tipologia di impalcato a graticcio, la soletta superiore di collegamento e le travi trasversali sono gettate in opera. Le travi possono essere realizzate tramite pre-tensionamento, post-tensionamento o con una soluzione mista in cui si ha una prima precompressione con pre-tensionamento e in seguito si completa la precompressione in cantiere con post-tensionamento. Dalla figura successiva si osserva che, in corrispondenza degli appoggi, per consentire il corretto ancoraggio dei cavi di precompressione e aumentare la resistenza a taglio, si realizza una sezione rettangolare piena.



Figura 7 – Impalcato a graticcio con travi prefabbricate a I, vista in pianta - sezione longitudinale e trasversale [2]

Il collegamento tra le travi longitudinali, attraverso i traversi, avviene tramite armatura di precompressione passante nell'anima delle travi prefabbricate. I traversi possono non essere collaboranti con la soletta.

Per facilitare la connessione fra gli elementi prefabbricati e la soletta gettata in opera, le travi prefabbricate presentano un'apposita armatura, ciò consente di ottenere una sezione resistente a T.



Figura 8 – Armatura per collegamento trave-soletta gettata in opera [2]

# **1.1.4.3 Impalcato a graticcio con travi a V prefabbricate e soletta gettata** in opera

Questa soluzione prevede l'utilizzo di travi prefabbricate a V. La campata massima è di circa 35 m a causa dei problemi di trasporto. Gli elementi prefabbricati sono pre-tesi in quanto lo spessore ridotto dell'anima non consente di garantire il copriferro ai cavi da post-tensione. Per limitare la precompressione, ad esempio all'estremità della trave in semplice appoggio, si effettua l'intubettamento della porzione corrispondente di trefolo, in modo da non far sviluppare aderenza tra acciaio e calcestruzzo. Questo tipo di impalcato trova largo impiego nei ponti ferroviari grazie alla rigidezza torsionale; infatti, il getto della soletta dà luogo a sezioni chiuse a "cassoncino".



SEZIONE TRASVERSALE Scala 1:50

Figura 9 – Impalcato a graticcio con travi prefabbricate a V, sezione trasversale [2]



Figura 10 – Schema disposizione trefoli [2]

# 1.2 Stato di salute dei ponti in Italia

La rete infrastrutturale italiana è tra le più articolate al mondo per l'orografia del territorio, infatti sono presenti circa 30.000 ponti in una rete di strade principali di 180.000 km [3]. Tra gli anni '50 e '80 la gran parte dei ponti e viadotti sono stati realizzati in cemento armato precompresso, metodologia conveniente dal punto di vista economico e adatta a processi d'industrializzazione. Pertanto, queste opere hanno superato la vita utile associabile alle strutture realizzate con le tecniche disponibili nel secondo dopoguerra. Inoltre, l'aumento sia del numero che dei carichi veicolari implica ingenti stress di fatica tali da compromettere la staticità dell'opera.

Negli ultimi due decenni abbiamo assistito al collasso di impalcati a graticcio con travi in c.a.p. a cavi post-tesi (Figura 11), per questo motivo il piano ANAS di gestione dei ponti e viadotti assegna a questa tipologia strutturale il massimo indice di vulnerabilità [4]

Anno	Materiale						
Costruz.	Mur	C.A.	CAP pre	CAP post	Acciaio	Acc/Cls	Mur/Cls
<1961	1.8	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
1961-1980	1.8	1.8	1.8	2.0	1.8	1.8	1.8
1980-2000	1.5	1.5	1.8	1.8	1.5	1.5	1.5
>2001		1.1	1.5	1.5	1.1	1.1	1.5

Tabella 1 - Matrice per l'individuazione della vulnerabilità strutturale intrinseca

Il modus operandi dell'epoca era orientato a minimizzare i costi di produzione mediante un'ottimizzazione eccessiva delle sezioni resistenti. Ciò ha portato alla realizzazione di travi precompresse che presentano:

- un'eccessiva concentrazione di cavi nel bulbo inferiore in mezzeria,
- copriferro di spessore insufficiente,
- riduzione degli spessori delle anime,
- attribuzione alle armature di precompressione la totale resistenza a flessione e taglio

La progettazione di queste travi non ha tenuto conto, né dell'esigenza di ispezionabilità "comoda" dell'opera, né dell'esigenza di smontaggio e sostituzione dei componenti.

Infatti, non è semplice definire un livello di conoscenza idoneo sulle condizioni attuali di degrado di queste strutture utilizzando tecniche convenzionali di indagine e ispezioni visive. Inoltre, in un ponte, ad esclusione per i dispositivi di appoggio, non è possibile sostituire un componente senza pesanti interventi anche distruttivi sull'intera opera.

Nelle strutture in c.a.p. la variazione della precompressione delle travi non risulta visibile, anche se i fenomeni di degrado che determinano il decadimento sono fenomeni che si sviluppano nel tempo. Infatti, i segnali di pericolo che la struttura mostra sono estremamente deboli, "Weak Signals" (WS), ciò deriva dal fatto che le strutture sono rigide e massicce, dove gli spostamenti e le deformazioni sono estremamente piccoli tali da non permettere una semplice deduzione della crisi strutturale.





1999 - Viadotto S. Stefano - SS1142014 - Viadotto Petrulla - SS626Figura 11 - Collassi di impalcati a graticcio con travi in c.a.p.

È ben chiaro che deve esser prestata particolare attenzione a queste opere dal momento che rappresentano un numero significativo dei ponti esistenti, al fine di una corretta manutenzione della rete infrastrutturale italiana.

## 1.3 Manutenzione dei ponti in Italia

Quando si progetta una struttura, durante la sua vita utile, essa deve funzionare senza interventi di manutenzione straordinaria, piuttosto occorre prevedere interventi di manutenzione ordinaria.

La costruzione di ponti, in una rete stradale o ferroviaria, necessita di ingenti investimenti economici, la sua longevità dipende non solo dalla validità del progetto e durabilità dei materiali, ma anche dalla buona gestione e manutenzione. Infatti, la chiusura stradale e la riabilitazione dell'opera, dovute a un danneggiamento o crollo, possono far raddoppiare il costo risultante. Questo concetto era già ben chiaro nel Medioevo, quando l'ordine di costruzione di un ponte da parte dello Stato della Chiesa era "*costruire e mantenere*", utilizzando fondi di donazioni e pedaggi.

In Italia la gestione della rete stradale è affidata allo Stato, Regioni, Province, Comuni e società concessionarie. Ad oggi non esiste un database nazionale delle opere, diretta conseguenza di poche informazioni cartacee e in possesso da diversi gestori. Di conseguenza ciò ha determinato l'attribuzione di budget inappropriati agli enti gestori ed errati piani di manutenzione. Pertanto, la gestione frammentata rende la manutenzione dei ponti italiani particolarmente complessa.

In seguito al crollo del cavalcavia di Annone Brianza, del 28 ottobre 2016, l'ANAS ha redatto una relazione in cui risultava che nel 2019 nei 26 mila km di strade gestite da ANAS, erano presenti 992 cavalcavia, costruiti negli anni '60, senza un "proprietario" e dunque senza manutenzione. Oggi l'articolo 49 del *Decreto Legge 16 luglio 2020, n. 76 (c.d. decreto semplificazioni)* ha introdotto nuove disposizioni che disciplinano la titolarità, in caso di attraversamento a livelli sfalsati, tra due strade appartenenti a enti diversi [5]

In Italia, si sente sempre più spesso parlare di manutenzione in seguito a eventi catastrofici come il crollo avvenuto il 14 Agosto 2018 di una sezione di 200 metri del Ponte Morandi (Viadotto del Polcevera) sull'autostrada A10 Genova-Ventimiglia. Questo ha reso necessario, per le opere esistenti, di programmare interventi di manutenzione adeguata e distribuiti sul territorio attraverso un adatto sistema di indagini. Infatti, sono state redatte in attuazione dell'art. 14 del Decreto Genova D.I. n. 109/2018 le "Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti-17 aprile 2020 [6].

Le linee guida rappresentano un supporto avanzato per tutti i gestori, da quelli nazionali a enti locali come città metropolitane e piccoli comuni, permettendo di valutare e programmare, sulla tratta di competenza e dunque di loro responsabilità, interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria.

Il documento descrive, oltre che le modalità di ispezione e censimento, il modo in cui si classificano i ponti in classe di attenzione. In funzione della classe di attenzione saranno stabilite le operazioni di ispezioni e monitoraggio necessari per una corretta gestione.

Inoltre, per l'attività di sorveglianza e monitoraggio, si indica quando eseguire il monitoraggio occasionale-periodico e il monitoraggio permanente o continuo (*Structural Health Monitoring – SHM*). Infine, viene illustrato come tramite il monitoraggio sia possibile rilevare mal funzionamenti strutturali.



Figura 12 – Approccio multilivello e relazioni tra i livelli di analisi [6]

Si può osservare come nelle linee guida, i ponti in c.a.p. a cavi post-tesi risultino una tipologia strutturale che richiede particolari attenzioni da parte del gestore, effettuando ispezioni speciali (§3.6 [6]) e straordinarie (§7.4.2 [6]).

L'utilizzo di metodi e strumenti digitali (BIM), da parte degli enti gestori nelle attività di censimento, ispezioni, classificazione e monitoraggio, consentirà attraverso AINOP (archivio informatico nazionale delle opere pubbliche) di condividere e stabilire la vulnerabilità dell'infrastruttura.

Il documento costituisce così un manuale univoco per poter migliorare la conoscenza sulla sicurezza della rete stradale consentendo una corretta gestione del patrimonio.

# 2 Cause e difetti degli elementi strutturali in c.a.p.

# 2.1 Introduzione

Nel presente capitolo si descrivono sinteticamente le cause e le principali patologie degli elementi strutturali in cemento armato precompresso. Infatti, le strutture in c.a.p. nel tempo subiscono processi di degrado che determinano danni più o meno gravi con conseguenze sulla funzionalità e prestazione della struttura. Gli errori di costruzione, di progettazione e l'assenza di manutenzione sono la causa dei difetti degli elementi in cemento armato precompresso. In particolare, la variazione dello stato tensionale può far sviluppare sollecitazioni di trazione e dunque causare fessurazioni, ma allo stesso tempo è una conseguenza di altri tipi di danno come corrosione e rottura di trefoli o fili.

# 2.2 Qualità delle iniezioni

Nelle travi in c.a.p. a cavi post-tesi la precompressione è inizialmente trasferita mediante le forze applicate alle testate e in seguito tramite l'aderenza tra cavo e calcestruzzo. Lo sviluppo dell'aderenza e quindi il trasferimento dello stato tensionale si realizza grazie alla boiacca di cemento che rende solidali l'armatura da precompressione e il calcestruzzo. La boiacca di cemento, materiale ad elevata alcalinità, è un calcestruzzo molto fluido che viene iniettato ad alta pressione in modo da occupare i vuoti compresi tra guaina e cavo. Questa operazione è delicata perché la non corretta iniezione della guaina può causare vuoti o delle sacche d'acqua. In questo modo l'acciaio da precompressione non è protetto dalla corrosione ed entrando a contatto con ossigeno e umidità è esposto a corrosione localizzata per pitting.



Figura 13 - Cavi non iniettati con guaina non più esistente sull'intradosso del bulbo inferiore della trave[4]

Inoltre, la non aderenza tra cavo e acciaio comporta un errato trasferimento della precompressione, situazione molto pericolosa dato che a differenza del c.a., dove la barra in alcune zone è sottoposta a lievi stress tensionali, nel c.a.p. il cavo lavora a tensioni molto grandi in tutte le sezioni.

Di conseguenza questa operazione richiede mano d'opera specializzata e miscele adeguate per preservare la durabilità delle strutture.

La presenza di vuoti all'interno del cavo è scaturita da:

- Occlusione della guaina dovuta a procedure e miscele non adeguate tali da costituire sacche d'aria;
- Bleeding e successiva evaporazione dell'acqua, generalmente ubicati nella sezione di ancoraggio e di mezzeria (Figura 14).



Figura 14 - Vuoti di iniezione dovuti al bleeding [4]

Ovviamente, se il difetto non si trova in uno stato avanzato di degrado, non è direttamente visibile e questo comporta la realizzazione di prospezioni endoscopiche o l'utilizzo di tecniche non distruttive come radiografie, ultrasoniche ecc..



Figura 15 – Endoscopia: guaina ossidata, iniezione assente, trefoli fortemente ossidati [4]

# 2.3 Corrosione dell'armatura di precompressione

I generici processi di corrosione possono essere descritti come un'ossidazione di specie metalliche e la riduzione di specie non metalliche presenti nell'ambiente. La forma ossidata degli atomi metallici è la più termodinamicamente stabile e rappresenta la forza trainante della corrosione metallica.

Nelle strutture in c.a.p. a cavi post-tesi, l'errata iniezione della guaina o l'esposizione diretta dovuta a fenomeni di degrado può portare a una riduzione della protezione dei cavi; di conseguenza l'armatura di precompressione può entrare in contatto con ossigeno e umidità.

La presenza di concentrazioni differenziali di ossigeno dà luogo al meccanismo di corrosione per pitting, ovvero un attacco localizzato che causa vaiolature. Inoltre, l'azione combinata del mezzo corrosivo e della tensione meccanica, a cui è sottoposto il cavo, instaura il processo di tenso-corrosione (corrosione per pitting sotto tensione). All'interno del metallo, in questo modo si generano cricche di tipo transgranulari, perpendicolari alla direzione di sforzo seguendo una o più direzioni principali. Il risultato è quello di avere una cricca che progredisce più velocemente rispetto a cricche nucleate per trazione senza l'esposizione ad ambiente corrosivo. Infatti, la propagazione della frattura avviene quando gli sforzi all'apice della cricca raggiungono un valore critico del fattore di intensificazione degli sforzi K<sub>c</sub> minore del rispettivo valore calcolato in assenza di fenomeni corrosivi. Raggiunto il K<sub>c</sub> si ha una rottura di tipo fragile; dunque, improvvisa e ciò rappresenta l'insidiosità del processo.

Il crollo del Silver Bridge del 1967 è da imputare ai fenomeni tensocorrosivi, dove l'alto livello di tensioni residue nella struttura e il carico termico dovuto alla bassa temperatura, causarono il collasso dell'intera struttura in meno di un minuto.

Dunque, questa tipologia di corrosione è molto pericolosa poiché la riduzione della sezione resistente può causare la rottura fragile del singolo filo. Inoltre, i tempi di sviluppo della tenso-corrosione sono più brevi rispetto a una rottura per fatica del metallo.



Figura 16 - Trefoli fortemente corrosi con fili rotti [4]

Gli impalcati di luce modeste possono esser realizzati con elementi pre-tensionati. La loro realizzazione in stabilimento permette un maggior controllo di qualità su copriferro, posizione delle armature, dimensione degli aggregati e qualità del calcestruzzo. Nonostante ciò, anche se non intervengono i problemi legati all'iniezione della guaina, il fenomeno della corrosione non è da sottovalutare. Infatti, la presenza di calcestruzzo dilavato e ammalorato, a causa di sistemi di convogliamento delle acque assenti o danneggiati, può portare all'ossidazione dei fili e la conseguente rottura fragile

## 2.4 Quadro Fessurativo

La corrosione ed eventuali rotture di fili del trefolo comportano cambiamenti dello stato tensionale, tali da far nascere uno stato di trazione nel calcestruzzo e di conseguenza la formazione di fessure. Purtroppo, le fessure si manifestano quando i processi corrosivi sono in uno stadio molto avanzato. Nel seguito si descrivono brevemente i difetti che interessano travi e traversi in c.a.p. riportati nel manuale ANAS di ispezione principale di ponti e viadotti [7]

### 2.4.1 Lesioni Longitudinali



Figura 17 - Lesioni trasversali: ubicazione e conformazioni tipiche [7]

#### • Lesioni tipo L1

"Descrizione: Lesioni inclinate sull'anima, lungo il tracciato dei cavi di precompressione". "Cause: copriferro delle guaine troppo sottile, spessore dell'anima ridotto, corrosione delle guaine e dei trefoli aggravata da carenze di iniezione e presenza di acqua, sollecitazioni di precompressione troppo elevate".

#### • Lesioni tipo L2

"Descrizione: Lesioni orizzontali lungo il bulbo inferiore, sia sulle superfici inclinate e verticali che sull'intradosso, generalmente ubicate nei 2 quarti centrali della luce".

"Cause: copriferro delle guaine troppo sottile, corrosione dei cavi aggravata da carenze di iniezione e presenza di acqua, sollecitazioni di precompressione troppo elevate".



Figura 18 - Lesioni longitudinali tipo L2 sull'intradosso del bulbo inferiore e sul fianco del bulbo [4]

#### • Lesioni tipo L3

"Descrizione: Lesioni corte ubicate parallelamente al cavo nella zona degli ancoraggi, soprattutto per i cavi ancorati in soletta".

"Cause: frettaggio insufficiente, concentrazione di tensioni nella zona dell'ancoraggio; possono essere aggravate da carenze di iniezione e presenza di acqua nella guaina".

• Lesioni tipo L4

"Descrizione: Lesioni orizzontali sulle anime dei traversi".

"Cause: copriferro troppo sottile, spessore dell'anima ridotto, corrosione cavi aggravata da carenze di iniezione e presenza di acqua, sollecitazioni di precompressione troppo elevate".

## 2.4.2 Lesioni Trasversali



Figura 19 - Lesioni trasversali: ubicazione e conformazioni tipiche [7]

#### • Lesioni tipo T1

"Descrizione: Lesioni inclinate in corrispondenza della seggiola Gerber, che si dipartono dallo spigolo interno e si estendono sull'anima verso la mezzeria".

"Cause: insufficiente armatura a taglio, perdita di precompressione e/o da sollecitazioni taglianti troppo elevate rispetto a quelle di progetto; l'ampiezza e l'estensione delle lesioni è tanto maggiore quanto minore è la capacità di resistenza della sezione".

#### • Lesioni tipo T2

"Descrizione: Lesioni verticali passanti nella zona di mezzeria, che si dipartono dall'intradosso del bulbo inferiore e si estendono sull'anima".

"Cause: perdita di precompressione, sollecitazioni flettenti troppo elevate rispetto a quelle di progetto precompressione; l'ampiezza e l'estensione delle lesioni è tanto maggiore quanto minore è la precompressione agente nella sezione".



Figura 20 - Lesioni trasversali tipo T2 [4]

• Lesioni tipo T3

"Descrizione: Lesioni inclinate passanti ubicate nel primo e nell'ultimo quarto della trave, che si dipartono verticalmente dall'intradosso del bulbo inferiore e si estendono sull'anima inclinandosi verso la mezzeria".

"Cause: perdita di precompressione, combinazione di sollecitazioni flettenti e taglianti troppo elevata rispetto a quella di progetto".

Lesioni tipo T4

"Descrizione: Lesioni verticali passanti ubicate in corrispondenza della zona di collegamento tra traversi e travi".

"Cause: armatura insufficiente, ritiro eccessivo, cattiva esecuzione, ecc.".

Lesioni tipo T5

"Descrizione: Lesioni verticali e/o inclinate passanti che si dipartono dall'intradosso e si estendono in altezza".

"Cause: perdita di precompressione trasversale, sollecitazioni trasversali flettenti e taglianti troppo elevate; l'ampiezza e l'estensione delle lesioni è tanto maggiori quanto minore è la capacità di resistenza della sezione.".

## 2.4.3 Lesioni capillari ancoraggi

Queste lesioni si localizzano in corrispondenza delle testate d'ancoraggio e si manifestano come lesioni corte e ravvicinate, dunque non sono da attribuire a fenomeni di ritiro del calcestruzzo.



Figura 21 – Direzione delle tensioni e formazione delle potenziali fessure [1]

La presenza di queste fessure è da attribuire a un'errata progettazione dell'armatura di Bursting, Spalling e Splitting (presente solo negli elementi pre-tesi).
#### 2.5 Umidità, infiltrazioni e scolature

La presenza di acqua superficiale su elementi in c.a.p., e la conseguente infiltrazione dell'umidità nel calcestruzzo determinano il rilascio di tracce di calcio tali da generare zone di colorazione differente. La presenza di aree di colore scuro indica che i fenomeni di penetrazione sono tuttora in corso, viceversa macchie di colore biancastro indicano la fine del processo. Nel caso di scorrimenti superficiali di acqua si parla di scolature.

L'avanzare del degrado può portare al dilavamento e ammaloramento del calcestruzzo fino al distacco del copriferro e corrosione dell'armatura lenta e di precompressione.

Le cause di tali difetti sono da imputare a:

- sistemi di smaltimento di acqua piovana danneggiati o assenti;
- sistema di impermeabilizzazione della soletta non efficiente o assente;
- imperfetta tenuta dei giunti;
- pluviali assenti o deteriorati;



• materiali con elevata porosità.

Figura 22 - Errori costruttivi – Pluviali non efficienti o assenti [1]

Nell'immagine sottostante è rappresentato un esempio di corretto sistema di smaltimento di acque meteoriche.



Figura 23– Corretto sistema di convogliamento delle acque [2]

#### 2.6 Difetti del calcestruzzo lungo il tracciato dei cavi

#### 2.6.1 Delaminazione del calcestruzzo

La presenza di umidità interna ai cavi favorisce il processo di corrosione della guaina e dei cavi da precompressione, generando una concentrazione di sforzi e di conseguenza la formazione di zone delaminate. La delaminazione comporta il distacco di superfici estese di spessore fino a 10 cm di calcestruzzo lungo il cavo. Il difetto è individuato tramite battitura con martello, permettendo l'emissione di un suono "risonante".



Figura 24 – Delaminazione sull'anima della trave [8]

#### 2.6.2 Ancoraggi esposti

Nel caso di strutture a cavi post-tesi, l'errata sigillatura delle teste di ancoraggio (soprattutto nel caso di ancoraggio in soletta), unitamente a guaine non iniettate correttamente e impermeabilizzazione della soletta inefficiente o assente, dà vita alla presenta di tracce di umidità dovuta al passaggio di acqua lungo le guaine e stalattiti sul bulbo inferiore in mezzeria della trave.



Figura 25 - Umidità interna lungo il tracciato dei cavi - stalattiti sul bulbo inferiore [8]

Inoltre, la presenza di teste di ancoraggio esposte e quindi sottoposte ai fenomeni corrosivi può portare al cedimento degli ancoraggi con fuoriuscita delle barre. Di conseguenza nell'elemento si annulla lo stato tensionale indotto dalla precompressione con conseguenze catastrofiche. Per questo motivo bisogna far particolarmente attenzione a questo difetto tenendo conto che non sempre è possibile accedere direttamente alle testate degli impalcati.



Figura 26 – Testa di ancoraggio ossidata – Fuoriuscita delle barre [4]

#### 2.6.3 Guaine in vista

La disposizione ravvicinata di guaine e armature, in fase di messa in opera del calcestruzzo, non permette una efficiente vibrazione, così l'aria intrappolata fa nascere dei vespai nel calcestruzzo.



Figura 27 – Errori costruttivi – disposizione dell'armature [2]

La presenza di cavità nel bulbo inferiore della trave viene individuata tramite battitura con martello, provocando la rottura di un sottile strato di calcestruzzo fine e l'emissione di un suono "risonante".

Il difetto, in uno stato avanzato, determina l'esposizione diretta dei cavi di precompressione.



Figura 28 – Vespaio sull'intradosso della trave con armature lente e guaine dei cavi di precompressione esposte e ossidate [4]

## 3 Valutazione della tensione di precompressione residua tramite prove di detensionamento

#### 3.1 Introduzione

Per valutare le prestazioni strutturali, la determinazione della tensione residua risulta un parametro fondamentale in strutture in cemento armato precompresso. I metodi per la valutazione della precompressione residua si basano sulla determinazione di un parametro rilevante, che ne caratterizza il metodo, il quale indirettamente permette la stima della tensione residua. Attualmente si individuano sei metodi:

- metodi basati sullo studio del comportamento dinamico;
- metodi basati sullo studio della variazione dell'impedenza meccanica;
- metodi elasto-magnetici;
- metodi acusto-elastici;
- metodi basati sulla misura della variazione di deformazione;
- metodi diffrattometrici.

Malgrado la possibilità di utilizzare diversi metodi, oggi solo quelli basati sulla misura della variazione di deformazione sono diffusamente utilizzati nel monitoraggio della forza di precompressione nelle strutture in c.a.p., grazie allo sviluppo di tecnologie di rilevamento innovative e del ben noto legame tra lo stato di sollecitazione e deformazione.

Infatti, con i metodi dinamici, nel caso di travi non fessurate, la variazione di precompressione non altera i parametri dinamici [9]. Nel caso di travi fessurate, si osserva una correlazione con le frequenze naturali poiché la forza di precompressione, chiudendo le microfessure, produce un irrigidimento della struttura e di conseguenza un aumento delle frequenze naturali. Bisogna tener conto che le variazioni di frequenze naturali sono legate anche

ad altri tipi di danni e condizioni ambientali, e dunque risulta difficile identificare gli effetti dovuti esclusivamente alle perdite di precompressione.

I metodi sullo studio della variazione dell'impedenza meccanica sfruttano l'effetto piezoelettrico, cioè utilizzano materiali piezoelettrici in cui le risposte elettriche e meccaniche sono accoppiate. La misura può esser effettuata solo sulla testata, dunque fornisce solo valori all'ancoraggio, zona molto spesso di difficile applicazione sugli impalcati esistenti [10]. Inoltre, la misura è fortemente influenzata da variazioni di condizioni di vincolo e di temperatura.

I metodi elasto-magnetici sfruttano il legame tra le proprietà ferromagnetiche dell'acciaio e il suo stato tensionale. Questi metodi sono utili per applicazioni su cavi liberi [11] (ponti sospesi e ponti strallati), mentre non sono di facile applicazione nel caso di strutture in c.a.p. esistenti[12].

I metodi acusto-elastici consentono di studiare le proprietà elastiche dei materiali attraverso la propagazione di onde ultrasoniche; infatti, la velocità degli ultrasuoni in una barra dipende dal suo stato tensionale [13]. Tuttavia, la variazione di velocità ha una bassa sensibilità alle variazioni di stress, inferiore all'1% per GPa [14]. L'applicazione di questo metodo richiede l'accesso all'estremità dei trefoli (non sempre possibile), inoltre a causa degli effetti di attenuazione delle onde dovuti alla presenza della malta, poiché il cavo non è isolato, risulta difficile da utilizzare. Nella tabella che segue vengono riassunti e confrontati i metodi per il monitoraggio delle strutture in cemento armato precompresso.

	Vibration	Impedance	Elasto-magnetic	Acoustoelastic	Strain
Sensitivity to prestress	Debatable	High (locally)	High	Low	High
force changes					
Effects of environmental	High	High	High (can be	Not explored	High (can be
factors			calibrated)		compensated)
Distribution of force	Not feasible, global	Local but only	Feasible, local	Not feasible,	Feasible, local
along the structure		at anchorage		global	
Feasibility of instrumentation	High	High	Low	High	High
Applicability to real-life	Unfeasible	Feasible with	Feasible with	Feasible with	Feasible
structures		calibration	calibration	attenuation	
				considerations	

Tabella 2 – Confronto dei metodi per il monitoraggio delle forze di precompressione [12]

I metodi basati sulla deformazione devono tener conto degli effetti termici sia sui sensori che sulla struttura. Per quanto riguarda i sensori, attraverso dei test sull'influenza della temperatura, i produttori rilasciano delle costanti di calibrazione per la correzione. Invece, la deformazione termica sulla struttura è direttamente proporzionale alla variazione di temperatura  $\Delta T$ , dove la costante di proporzionalità, nota come coefficiente di dilatazione termica  $\alpha_T$ dell'acciaio o calcestruzzo, può esser determinata sul campo o con prove di laboratorio.

Dunque, la compensazione termica sulla struttura può avvenire in maniera accurata tramite l'equazione:

 $\varepsilon_{\text{compensata}} = \varepsilon_{\text{misurata}} - \alpha_T \Delta T$ 

Per le costruzioni future, il monitoraggio della deformazione attraverso l'implementazione pervasiva di sensori di deformazioni all'avanguardia combinati a modelli matematici, mostra i risultati più incoraggianti.

Esempi sono l'utilizzo di estensimetri a corda vibrante [15] [16], sensori a fibra ottica distribuiti e sensori a fibra ottica discreti [17].





Figura 29 – Calibro a filo vibrante



Figura 30 – Sensori a fibra ottica distribuiti e discreti – Trave post tesa strumentata con fibra ottica [17]

In fase di sviluppo è la realizzazione di trefoli di precompressione "intelligenti" a sette fili che incorporando un sensore a reticolo di Bragg in fibra (FBG) nel filo centrale permettono misurazioni accurate della deformazione. [18]



Figura 31 – Trefolo di precompressione con filo centrale sostituito con anima in carbonio e sensore a fibra ottica [18]

Purtroppo, siccome attualmente queste tecnologie sono in fase di prima applicazione e sviluppo, si deve affrontare la determinazione della deformazione e di conseguenza la tensione residua su strutture non strumentate.

I metodi utilizzati sono semidistruttivi, i quali verranno descritti nel dettaglio nei paragrafi successivi. Le prove adoperate, basandosi sul rilascio dello stato tensionale, permettono di conoscere lo stato attuale di compressione della trave sotto i carichi permanenti e peso proprio. Partendo così da un dato misurato sperimentalmente, si può effettuare una simulazione con i carichi da traffico previsti da normativa per comprendere il comportamento della trave. Inoltre, lo stato di compressione attuale è il punto di partenza di un monitoraggio continuo della variazione di degrado dell'opera. Fissata così una soglia d'allarme dello stato di precompressione, qualora fosse oltrepassata, si devono predisporre degli interventi di manutenzione, quali ritesatura della trave (dove possibile) o sostituzione della stessa.

#### 3.2 Prove di detensionamento sui trefoli/fili

La prova di dentensionamento sui trefoli/fili consente la misura della tensione  $\sigma$  agente nell'armatura di precompressione tramite la realizzazione di un taglio; di un filo di trefolo se precompressione a trefoli, o di uno dei fili nel caso di precompressione a fili paralleli. Infatti, in esercizio il filo è sottoposto a una tensione  $\sigma$  che dà luogo a una deformazione  $\varepsilon$ , quindi effettuando il taglio si annulla lo stato tensionale e la deformazione subita dal filo è uguale e di segno contrario alla deformazione  $\varepsilon$  indotta dalla tensione di esercizio  $\sigma$ . Cosi, nota la deformazione  $\varepsilon$ , uguale alla deformazione misurata e cambiata disegno, moltiplicata per il modulo elastico dell'acciaio si ottiene la tensione agente  $\sigma$ . Per poter rilevare la deformazione il filo è preventivamente strumentato con un estensimetro resistivo.



Figura 32 – Schema teorico [4]

L'estensimetro, costituito da una struttura di filo metallico, incollato sulla superficie metallica segue le deformazioni della superficie accorciandosi; questo accorciamento causa una variazione di resistenza elettrica del filo, che misurata con un ponte di Wheatstone permette di risalire alla deformazione che l'ha causata. Gli estensimetri utilizzati sono in grado di rilevare variazioni

nell'ordine di  $\pm 0,2$  µɛ. Data la ridotta dimensione L=5mm, essi consentono misure puntuali, cioè nel punto in cui sono installati.



Figura 33 – Estensimetro resistivo

Particolare attenzione deve esser posta nell'esecuzione del taglio del filo dei trefoli o dei fili paralleli. La sezione di armatura di precompressione destinata al taglio non deve esser superiore al 2% della sezione totale. Inoltre, il taglio deve interessare esclusivamente il filo strumentato e non intaccare i fili adiacenti, utilizzando una mini-troncatrice dotata di disco da taglio di 24 mm.



Figura 34 – Esecuzione del taglio – particolare del taglio e dell'estensimetro [4]

Affinché la prova presenti un elevato grado di affidabilità è necessario sia utilizzare strumentazione e attrezzatura adeguata, sia eseguire una procedura accurata di pulitura, lucidatura, sgrassaggio e incollaggio.

Nel dettaglio, la strumentazione e attrezzatura utilizzata è la seguente [4]:

- estensimetri resistivi per acciaio: lunghezza 5 mm e resistenza 120Ω, precablati con cavo tripolare di lunghezza 3m;
- unità di condizionamento ed acquisizione per estensimetri: collegamento degli estensimetri a <sup>1</sup>/<sub>4</sub> di ponte con terzo filo, bilanciamento automatico del ponte

estensimetrico, risoluzione 24 bit, frequenza massima di campionamento pari ad almeno 100 Hz;

- mini-troncatrice elettrica, con accessori: cilindro abrasivo di grana 120, disco da taglio di tipo "heavy duty" di diametro 24 mm;
- accessori per l'incollaggio degli estensimetri: garze, acetone puro, collante cianoacrilico professionale.



A) Mini-troncatrice - B) cilindro abrasivo grana 120 - C) disco da taglio φ24 mm - D) acetone puro
E) colla cianoacrilica - F) estensimetro resistivo L=5mm - G) centralina estensimetrica dinamica
Figura 35 – Strumentazione e attrezzatura per prova di detensionamento sui fili/trefoli [4]

Le prove vengono eseguite secondo la procedura seguente [4]:

- a. demolizione locale del copriferro e messa a nudo del cavo di precompressione per una lunghezza di almeno 30 cm;
- b. apertura di una sfinestratura rettangolare sulla guaina in lamierino metallico di lunghezza pari ad almeno 25 cm, praticando 2 tagli trasversali ed un taglio longitudinale e ripiegando la parte tagliata sul lato longitudinale non tagliato; nel praticare i tagli occorre fare la massima attenzione a non intaccare l'armatura di precompressione;
- c. rimozione locale della boiacca di iniezione mediante leggera scalpellatura manuale, per mettere a nudo un trefolo/filo senza intaccarlo per una lunghezza di almeno 25 cm;
- d. individuazione del punto di installazione dell'estensimetro sul filo/ fili del trefolo (nel seguito semplicemente filo);
- e. e. pulizia del filo su una lunghezza di circa 2 cm, rimuovendo ogni traccia di ossido e smerigliando la superficie fino a portarla a lucido, utilizzando una minismerigliatrice elettrica equipaggiata con cilindro abrasivo di grana 120;
- f. sgrassatura della parte lucidata del filo, strofinandone la superficie con una garza imbevuta di acetone, mediante passate successive utilizzando sempre nuove parti pulite

di garza fino a quando sulla stessa non restano più tracce sporche; N.B. la superficie sgrassata del filo non deve più essere toccata con le dita;

g. incollaggio dell'estensimetro sul filo mediante collante cianoacrilico professionale; la parte attiva dell'estensimetro (da incollare sul filo) non deve essere toccata con le dita;

h. collegamento dell'estensimetro alla centralina di acquisizione dinamica (collegamento a ¼ di ponte con terzo filo), ed attivazione dell'acquisizione con digitalizzazione pari ad almeno 50 Hz (50 campioni al secondo);

i. dopo almeno 30 secondi dall'avvio della sequenza di acquisizione, esecuzione del taglio del filo mediante mini-smerigliatrice elettrica equipaggiata con disco da taglio tipo "Heavy duty" con diametro 24 mm; il taglio deve essere eseguito ad una distanza di almeno 30 mm dell'estensimetro operando obliquamente (a becco di flauto), ponendo la massima attenzione a non intaccare i restanti fili; N.B. nel caso di fili adeguatamente tesi, la rottura generalmente interviene quando il taglio ha raggiunto un'estensione compresa tra il 50% ed il 60% della sezione;

j. a circa 30 secondi dalla rottura, arresto della sequenza di acquisizione; documentazione fotografica della prova;

k. protezione dell'armatura di precompressione esposta con vernice passivante, ripristino dell'iniezione asportata con resina epossidica, richiusura dei lembi della guaina metallica e ricostruzione del copriferro con malta fibrorinforzata a ritiro controllato.





A) Sfinestratura della guaina in lamierino, rimozione della boiacca, installazione dell'estensimetro

B) Particolare della lucidatura del filo e dell'incollaggio dell'estensimetro

Figura 36 – Fasi operative prova di detensionamento sui trefoli/fili [4]

Il risultato della prova è il diagramma deformazione tempo  $\varepsilon$ -t, da cui si può ricavare la deformazione media valutata tra 10 e 30 secondi in seguito alla rottura ovvero alla stabilizzazione del diagramma  $\varepsilon$ -t. Dalla deformazione media in  $\mu\varepsilon$ , noto il modulo elastico E=210'000 MPa, si ricava la tensione agente nel cavo in MPa attraverso la relazione:

$$\sigma=-E\varepsilon$$

La tensione ricavata è una tensione puntuale riferita al trefolo testato; dunque, trefoli appartenenti a cavi adiacenti possono avere valori di tensione diverse. La prova ha un buon grado di affidabilità poiché le deformazioni dovute al taglio sono molto elevate e inoltre le procedure di installazione dell'estensimetro sull'acciaio (pulitura, lucidatura, sgrassaggio, incollaggio) sono di semplice esecuzione (nella prova di detensionamento su calcestruzzo, che viene analizzata nel successivo paragrafo, la procedura di incollaggio degli estensimetri risulta difficile e complessa).



Nella figura successiva si riporta un esempio di scheda di restituzione della prova che deve esser prodotta per ogni prova di detensionamento.

Figura 37 – Scheda di restituzione della prova [4]

#### 3.3 Prove di detensionameto sul calcestruzzo

Lo scopo dell'indagine è la valutazione della tensione in situ nelle strutture in calcestruzzo, sotto l'azione dei carichi permanenti e della precompressione. La prova consiste, attraverso estensimetri posti sulla superficie, nella misura della deformazione  $\varepsilon$  subita dalla porzione isolata mediante carotaggio. La deformazione rilevata, all'interno della circonferenza di taglio di una carota, è uguale e di segno opposto alla deformazione indotta dalla precompressione e dai carichi permanenti. Pertanto, nell'esecuzione di carotaggio l'avanzamento della carotatrice fa si che lo stato tensionale vari fino ad annullarsi (rilascio dello stato tensionale) dando luogo a una deformazione di segno contrario a quella preesistente. Noto il modulo elastico E del calcestruzzo; ricavabile attraverso prove Pull-out eseguite in prossimità dei punti di monitoraggio o prova di compressione eseguita sulla carota stessa (dal Rc del materiale in sito ricaviamo E attraverso la legge di Hooke  $\sigma = E\varepsilon$ .



Figura 38 – Schema teorico del rilascio dello stato tensionale

La prova deve esser preceduta da un rilievo accurato dell'armatura di precompressione utilizzando misure pacometriche (ECT) o radar (GPR) in modo da verificare l'assenza di armature lente e cavi di precompressione. L'esecuzione del carotaggio deve avvenire in zone in cui il calcestruzzo non sia degradato, fessurato e delaminato.



Figura 39 – Rilievo dell'armatura di precompressione lungo il setto del cassone in c.a.p.[4]

Particolare attenzione è da porre nell'installazione degli estensimetri, a differenza dell'acciaio la qualità dell'incollaggio è minore. Gli estensimetri devono esser protetti con attenzione e materiali adeguati nei confronti dell'acqua. Il calcestruzzo è un materiale intrinsecamente disomogeneo, dunque, le lunghezze degli estensimetri sono maggiori per poter avere un valore medio del comportamento del materiale.

La preparazione della superficie del calcestruzzo deve avvenire in maniera scrupolosa, attraverso molatura meccanica (mediante smerigliatrice angolare), e sgrassatura della superficie molata. È preferibile l'utilizzo di colle bicomponenti alla colla cianoacrilica per calcestruzzo anche se richiedono un maggior tempo di presa.

A differenza della prova di detensionamento sui trefoli/fili il valore di tensione ricavato non è locale, limitato al singolo filo del trefolo (trefoli appartenenti a cavi adiacenti possono avere valori di tensione diverse) ma globale del calcestruzzo, riferito al punto strumentato. Bisogna notare che le deformazioni, dovute al rilascio dello stato tensionale del calcestruzzo, sono di ridotta entità rispetto alle deformazioni prodotte dal taglio nella prova di detensionameto sui trefoli/fili; quindi, necessitano una misurazione accurata per ottenere un elevato grado di affidabilità.

Nel dettaglio, la strumentazione e attrezzatura utilizzata è la seguente [4]:

- estensimetri resistivi a filo per cls.: lunghezza 60 mm e resistenza 120 Ω, precablati con cavo tripolare di lunghezza 5 m;
- smerigliatrice angolare elettrica, con disco per levigatura a secco per marmo / calcestruzzo;
- perforatore elettrico con punta  $\phi$  6 mm L 300 mm;
- accessori per l'incollaggio degli estensimetri: garze, acetone puro, collante cianoacrilico professionale per l'incollaggio degli estensimetri sul calcestruzzo, fogli protettivi in alluminio rivestiti di stucco plasmabile (tipo HBM ABM75);
- unità di condizionamento ed acquisizione per estensimetri: almeno 3 canali di misura, collegamento degli estensimetri a <sup>1</sup>/<sub>4</sub> di ponte con terzo filo, bilanciamento automatico del ponte estensimetrico, risoluzione 24 bit, frequenza massima di campionamento pari ad almeno 10 Hz;
- carotatrice elettrica con telaio di fissaggio, corona diamantata \$125 mm L 400 mm e pompa per acqua.



A) Carotatrice con corona 125 mm - B) smerigliatore angolare - C) Perforatore con punta  $\phi 6 / 300$ D) fogli protettivi - E) colla cianoacrilica - F) acetone - G) estensimetro per cls. - H) centralina estensimetrica Figura 40 – Strumentazione e attrezzatura per prova di detensionamento sul calcestruzzo [4]

Le prove vengono eseguite secondo la procedura seguente [4]:

- a. individuazione della zona di misura, di dimensioni approssimative 50 x 50 cm e caratterizzata da una superficie sufficientemente liscia ed esente da delaminazione, fessure e pori;
- b. rilievo magnetico delle armature con evidenziazione delle stesse sulla superficie del calcestruzzo;
- c. delimitazione della zona da carotare, di diametro 125 mm e non ubicata in corrispondenza delle barre;
- d. installazione della carotatrice, montaggio della corona di diametro 125 mm, ed avanzamento della stessa fino a toccare la superficie del calcestruzzo; disegno della circonferenza della corona sulla superficie del calcestruzzo con pennarello e successivo smontaggio della corona senza rimuovere la carotatrice;
- e. marcatura mediante cutter di 3 diametri della circonferenza, orientati orizzontalmente, verticalmente e a 45° rispetto all'orizzontale;
- f. esecuzione di un foro orizzontale passante di diametro 6 mm in corrispondenza del centro di uno dei 2 quadranti della circonferenza non intersecato dal diametro inclinato a 45°;
- g. molatura meccanica della zona da carotare, mediante smerigliatrice angolare equipaggiata con disco per levigatura a secco per calcestruzzo/marmo, rimuovendo lo strato più degrado del calcestruzzo per uno spessore di almeno 2 - 3 mm; successiva rimozione della polvere mediante spazzola con setole non metalliche e ripetizione della marcatura di cui al punto e);
- h. sgrassatura della superficie molata, strofinando la superficie del cls con una garza imbevuta di acetone, mediante passate successive utilizzando sempre nuove parti pulite

di garza fino a quando sulla stessa non restano più tracce sporche; N.B. la superficie sgrassata del cls non deve più essere toccata con le dita;

- i. incollaggio dell'estensimetro orizzontale mediante collante cianoacrilico professionale specifico per estensimetri e per calcestruzzo, mantenendo l'estensimetro premuto per almeno 5 minuti con l'interposizione dell'apposita cartina in teflon; la parte attiva dell'estensimetro (da incollare sul cls) non deve essere toccata con le dita;
- j. incollaggio dell'estensimetro verticale sopra quello orizzontale, e quindi dell'estensimetro inclinato a 45° sopra quello verticale, seguendo la medesima procedura
- k. infilaggio dei 3 cavi di collegamento degli estensimetri nel foro passante e recupero degli stessi dalla parte opposta dell'anima;



Figura 41 – Fase di applicazione degli estensimetri e passaggio dei 3 cavi nel foro passante [4]

 protezione degli estensimetri mediante gli appositi fogli in alluminio rivestiti di stucco plasmabile, avendo cura di coprire tutta e solamente la superficie circolare da carotare senza fuoriuscire dalla circonferenza di 120 mm;



Figura 42 – Fase di protezione degli estensimetri [4]

- m. collegamento dei 3 estensimetri alla centralina di acquisizione (collegamento a ¼ di ponte con terzo filo); dopo almeno 45 minuti dall'incollaggio dell'ultimo estensimetro, attivazione dell'acquisizione con digitalizzazione pari ad almeno 1 Hz (1 campione al secondo);
- n. rimontaggio della corona sulla carotatrice, e avvio del carotaggio continuo a circolazione d'acqua dopo almeno 5 minuti dall'inizio dell'acquisizione; il carotaggio deve interrompersi immediatamente prima di carotare l'intero spessore dell'anima (a circa 1cm dal paramento opposto) per evitare che la carota una volta isolata possa ruotare all'interno della corona e strappare i cavi di collegamento;
- o. arresto della sequenza di acquisizione dopo almeno 10 minuti dall'ultimazione del carotaggio, e comunque ad avvenuta stabilizzazione delle deformazioni misurate;
- p. recupero della carota e chiusura del foro del carotaggio con malta fibrorinforzata a ritiro controllato.



Figura 43 – Fase di carotaggio – Carota estratta e protezione rimossa [4]

La procedura descritta fa riferimento alla configurazione a tre estensimetri disposti con un'opportuna geometria a "rosetta" per l'analisi dello stato di tensione piano. In particolare, si considera la rosetta rettangolare in cui il secondo e terzo asse di misura sono rispettivamente a 45° e a 90° rispetto al primo asse (Figura 44). Le rosette estensimetriche sono necessarie quando non è nota la direzione delle tensioni principali per la contemporanea presenza di taglio e momento sulla sezione, che si traducono in tensioni normali e tangenziali rispetto all'asse della trave. Questa situazione si verifica sulle travi a mensola, dove nella sezione d'incastro, oltre al massimo momento flettente (negativo) è presente anche il massimo taglio. La prova è eseguita al di sotto dell'ala superiore e sulla faccia interna dell'anima della trave in modo che la superficie di prova sia meno degradata, come rappresentato nella figura 45.



Figura 44 – disposizioni estensimetriche, rosetta rettangolare a tre griglie a 45°

Trave a mensola



Figura 45 – Collocazione della prova per la trave a mensola [4]

Contrariamente, sulle travi appoggiate il carotaggio è eseguito nella sezione di mezzeria, dove il valore di momento flettente è massimo e il taglio è nullo. L'assenza del taglio nella sezione di mezzeria fa sì che le tensioni principali corrispondano alla direzione verticale e orizzontale; dunque, non è necessario utilizzare la rosetta estensimetrica, ma basta una coppia di estensimetri cioè un estensimetro biassiale (Figura 46). La prova è eseguita al di sopra il bulbo inferiore e sulla faccia interna dell'anima della trave in modo che la superficie di prova sia meno degradata, come rappresentato nella figura 47.



Figura 46 – disposizioni estensimetriche, estensimetro biassiale



Trave semplicemente appoggiata

Figura 47 – Collocazione della prova per la trave semplicemente appoggiata [4]

I risultati della prova sono i diagrammi deformazione tempo  $\varepsilon$ -t, da cui si può ricavare rispettivamente la deformazione media  $\varepsilon_x \varepsilon_{45^\circ} \varepsilon_y$ , valutata tra 5 e 10 minuti in seguito alla stabilizzazione del diagramma  $\varepsilon$ -t. Noto il modulo elastico del calcestruzzo (ricavabile attraverso prove Pull-out eseguite in prossimità dei punti di monitoraggio o prova di compressione eseguita sulla carota stessa) e il coefficiente di Poisson del calcestruzzo  $\nu = 0.15 - 0.20$ , dalla teoria elastica considerando uno stato piano di sollecitazione, in funzione della configurazione degli estensimetri si determina la tensione di precompressione  $\sigma_1$ .



*Figura 48 – Calcolo delle tensioni principali estensimetro biassiale* 



Figura 49 – Calcolo delle tensioni principali rosetta rettangolare a tre griglie a 45°



Nella figura successiva si riporta un esempio di scheda di restituzione della prova che deve esser prodotta per ogni prova di detensionamento sul calcestruzzo.

Figura 50 – Scheda di restituzione della prova [4]

#### 3.4 Prova di rilascio tensionale con provino tronco piramidale

Sempre con la filosofia del rilascio tensionale la società *4 Emme Service Spa* ha realizzato una tecnica innovativa per il rilievo della deformazione. La prova consiste nel prelevare una porzione di materiale, precedentemente predisposta attraverso due estensimetri, non più con una carotatrice, ma con una macchina elettromeccanica chiamata Discovery. Questo macchinario consente di ottenere un provino tronco piramidale definito "diamante di calcestruzzo".



Figura 51 – Operazioni di taglio con Discovery e provino rimosso [19]

Eseguendo quattro tagli, il provino rilascia lo stato tensionale cioè perde lo stato di compressione; la sua deformazione sarà uguale e di segno opposto alla deformazione provocata dallo stato tensionale presente nella struttura. I tagli sono eseguiti su un quadrato di 60 mm, in maniera perfettamente ortogonale, con una direzione di 45° verso l'interno. La prova di rilascio tronco piramidale consente una penetrazione di soli 25 mm quindi la zona d'interesse è relativa solo al copriferro, ciò consente, dove possibile, l'applicazione anche sul bulbo inferiore della trave senza intersecare eventuali cavi. A differenza della prova con carotatrice, l'apparecchiatura di acquisizione è montata direttamente sul Discovery e non dal lato opposto alla carota, dunque viene meno il problema del trancio dei cavi di collegamento degli estensimetri.



Figura 52 – Fase di Taglio [20]

Le prove vengono eseguite secondo la procedura seguente [21]:

- a. individuazione delle armature, mediante sondaggio pacometrico nelle adiacenze del punto di prova e individuazione del punto di prova più vicino con una distanza minima libera di 50 mm dalle armature dal centro del provino. Sono ammesse armature nell'area di prova purché profonde almeno 30 mm dalla superfice esterna;
- b. preparazione della superficie di incollaggio degli estensimetri mediante smerigliatrice, successiva sgrassatura con solvente per calcestruzzo e preparazione della superfice apposito gel di miglioramento dell'aderenza;
- c. incollaggio, mediante colla cianoacrilica, di 2 estensimetri da 120 Ohm di lunghezza 30 mm, con direzione in linea con la tensione di rilevamento;
- d. protezione degli estensimetri attraverso una pellicola di alluminio rivestita di stucco plasmabile adesivo;
- e. installazione della macchina elettro meccanica per l'esecuzione dei tagli;
- f. collegamento degli estensimetri con il Datalogger in configurazione a ¼ di ponte impostando una frequenza di scansionamento da 1 a 0,2 Hz;
- g. esecuzione di due tagli simmetrici a distanza di 60 mm tra loro in direzione verticale e successivamente di due tagli in direzione orizzontale, con disco diamantato da 125 mm di diametro. Il taglio va eseguito con direzione 45° verso il centro dell'impronta in modo da formare un elemento tronco-piramidale. I tagli sono eseguiti in successione: lato destro, sinistro, taglio superiore, taglio inferiore;
- h. il primo taglio inizia dopo 60 secondi dall'attivazione dell'acquisizione dei dati; la successiva cadenza tra un taglio ed il successivo è di 90 secondi;
- i. misura della temperatura della trave nel punto di prova.

Nella figura successiva si riporta un esempio di scheda di restituzione della prova che deve esser prodotta per ogni prova di detensionamento sul calcestruzzo. Si osserva che data la precompressione, le deformazioni registrate dai tagli verticali (primi due) sono maggiori rispetto alle deformazioni dovute ai tagli orizzontali.

RAPPORTO DI PROVA	N. 4726/11	30.06.2021		
Descrizione della prova:				
Descrizione della prova: Committente:	RILASCIO TENSIONALE SU TRAVI	CASSONE IN C.A.P.		
Struttura oggetto di prova:	XXXXXXXXXX			
Referente Committenza:	ing. Xxxxxxxx			
Centro operativo:	4 Emme Service SpA – Centro di Trev	viso		
Esecutore della prova:	XXXXXXXX			
Altri operatori presenti:	XXXXXXXX			



Posizione area di prova				Tipo estensimetri		Collante
Carreggiata	Campata	Distanza dalla spalla/pila	Distanza da soletta inferiore	Per cls	30 mm, M E 120 Ω ciano	M Bond – colla
Nord	P10/P11	300 cm	110 cm			cianoachiica



Lettura Deformazione	Al termine della prova		
Estensimetro verticale [µɛ]	155		
Estensimetro orizzontale [µɛ]	211		

Figura 53 – Scheda di restituzione della prova [20]

# 3.5 Metodologia di prova proposta: Carota strumentata con supporto polimerico per l'analisi DIC

Questo lavoro di tesi si pone come obiettivo la determinazione del valore di precompressione residua, utilizzando il rilascio dello stato tensionale in combinazione alla Digital image correlation (DIC). Il metodo propone di isolare mediante carotaggio una porzione di un elemento strutturale, preventivamente strumentato con un supporto polimerico, il quale sarà sottoposto alla Digital image correlation.

Il supporto incollato sulla superfice aderendo perfettamente si deforma con essa; dunque, la deformazione subita dalla carota di calcestruzzo, a seguito del rilascio tensionale, si rispecchierà identicamente sul supporto polimerico.

(Per l'identificazione del materiale del supporto, dello spessore e del tipo di incollaggio che consentono di non alterare il campo deformativo si rimanda al capitolo 6).

Pertanto, la deformazione  $\varepsilon$  subita dal supporto è uguale e di segno opposto alla deformazione indotta dai carichi permanenti e dalla precompressione. Noto il modulo elastico E del calcestruzzo; ricavabile attraverso prove Pull-out eseguite in prossimità dei punti di monitoraggio o prova di compressione eseguita sulla carota stessa (dal Rc del materiale in sito ricaviamo E attraverso la relazione fornita dalle norme tecniche), è possibile ricavare la tensione  $\sigma$  agente attraverso la legge di Hooke  $\sigma = E\varepsilon$ .



Figura 54 – Schema teorico del rilascio dello stato tensionale

Il supporto polimerico presenta un motivo stocastico (speckle) in bianco e nero (o rosso), realizzato in laboratorio usando uno strato bianco di vernice spray seguito da una puntinatura di vernice spray nera (o rossa), il quale consentirà attraverso l'analisi e il confronto delle immagini di ricavare informazioni sul movimento dei punti della superficie, da cui ricavare le deformazioni ( $\epsilon e \gamma$ ). La vernice spray utilizzata è indelebile, tale che l'azione abrasiva dell'acqua e polvere a cui è sottoposto il materiale durante il carotaggio non alteri lo speckle pattern realizzato sul supporto.



Figura 55 – Esecuzione dello speckle pattern

La digital image correlation (DIC) si basa sulla ricerca del massimo della correlazione tra le intensità dei pixels all'interno del sottoinsieme individuato.

Nell'immagine di riferimento è definito un sottoinsieme chiamato subsets (sottomatrice dell'immagine), quindi la posizione dello stesso è identificata nell'immagine deformata.

Questo avviene perché l'immagine digitale è costituita da una matrice bidimensionale i cui elementi si chiamano pixel, ognuno dei quali corrisponde ad un numero che raffigura il livello di luminosità di quel pixel (immagine a scala di grigi) od il colore.



*Figura 56 – Informazione radiometrica fornita dai pixel* 

Ricavata la correlazione massima tra il subset dell'immagine di riferimento e quello della immagine deformata, si conosce lo spostamento subito da quel subset.

Trovando ripetutamente la nuova posizione dei sottoinsiemi all'interno delle immagini, si può ottenere il campo di spostamento bidimensionale.

(Per maggiori dettagli sulla correlazione di immagini digitali (DIC) si rimanda al capitolo successivo).



Come mostrato nella Figura, la procedura complessiva del metodo proposto consiste nei

seguenti passaggi:

Figura 57 – Diagramma di flusso del metodo proposto per la stima dello stato tensionale.

L'immagine di riferimento e l'immagine deformata saranno scattate in laboratorio in condizione di luce e temperatura controllata. L'immagine di riferimento rappresentante la condizione indeformata del supporto, precederà il carotaggio. Mentre, l'immagine deformata verrà eseguita inseguito al rilascio tensionale, dunque il supporto risulterà incollato alla carota di calcestruzzo estratta in situ (Figura 58).



Figura 58 – Setup di prova

La digital image correlation deve esser eseguita su due immagini eseguite nella stessa posizione, in modo tale da ottenere la corretta deformazione superficiale del calcestruzzo.

Il supporto presenta un centro definito attraverso due direzioni preferenziali, tale da poter consentire la replica della stessa immagine nella stessa posizione (Figura 59). L'immagine di riferimento e l'immagine deformata vengono eseguite in modo tale che il centro dell'obiettivo sia centrato con il centro del disco con un reticolo di centraggio fissato sul dispositivo di acquisizione. In questo modo, fissata la distanza L tra il piano della fotografia e il piano del disco, le due immagini vengono eseguite con la stessa posizione. La carota è posizionata su un dispositivo adeguato al suo alloggio, che consente di muoverla verticalmente e orizzontalmente e di conseguenza di muovere il supporto ad essa solidale, permettendone il centraggio.

Se il dispositivo fotografico calibrato resta fisso e si utilizza un sistema di contrasto tale che il supporto vada in battuta, si può replicare la stessa situazione con il disco nella stessa posizione.



Figura 59 – Setup di posizionamento

L'attendibilità del risultato della prova di rilascio è fondamentale, in quanto in alcuni casi, il valore della tensione residua può rappresentare un fattore di allarme con conseguenti decisioni drastiche. Il calcestruzzo è un materiale disomogeneo, le cui caratteristiche possono cambiare sensibilmente anche in aree limitate; infatti, i valori misurati con due estensimetri paralleli forniscono sempre valori che non coincidono perfettamente. Dunque, l'analisi DIC che permette la raccolta di sufficienti informazioni, fornendo uno spostamento a tutto campo, consente un'opportuna riduzione degli errori di misura, causati dalla grande incertezza del calcestruzzo. Proprio per questo, le norme prevedono più misure e tecniche di elaborazione basate sulle medie per prove di resistenza sui cubetti o su carote, per prove sclerometriche ecc....

Si fa notare che la misura di deformazione, attraverso estensimetri, è una misura molto delicata; infatti, la prova di detensionamento tramite carotaggio richiede:

- il montaggio della strumentazione nell'area centrale, che potrebbe essere danneggiata durante la fase di carotaggio;
- una scrupolosa procedura di preparazione della superficie per l'installazione degli estensimetri sul calcestruzzo;
- una protezione adeguata attraverso materiali idonei nei confronti dell'acqua impiegata per il taglio.

Inoltre, l'installazione di tre estensimetri (quando non è nota la direzione delle tensioni principali), accuratamente distanziati e orientati su un piccolo cerchio, non è né facile da fare né consigliabile, poiché piccoli errori nella posizione o nell'orientamento dell'estensimetro producono grandi errori nelle sollecitazioni residue calcolate. Le stesse vibrazioni sul provino prodotte nella procedura di carotaggio possono indurre delle anomalie.

Contrariamente, l'installazione di un supporto polimerico non richiede un particolare trattamento della superficie di incollaggio e non essendoci dei cavi di collegamento (i cavi di collegamento tra estensimetri e centralina durante la prova possono subire dei danneggiamenti) non è necessaria una protezione specifica. Dunque, l'uso del metodo di correlazione dell'immagine digitale (DIC), dati i suoi vantaggi, viene indicato per la misurazione della deformazione e della sollecitazione residua che ne deriva.

Nei successivi capitoli, si esamina attraverso un'analisi FEM il supporto polimerico, ovvero il materiale, l'influenza del modulo elastico del calcestruzzo, lo spessore e il tipo di incollaggio che consentono di rispecchiare la deformazione subita dalla carota di calcestruzzo. Inoltre, si effettua una correlazione di immagine digitale (DIC) su provini sollecitati a prefissati valori di tensione, precedentemente strumentati con il supporto polimerico.

In questo modo, il metodo di stima dello stato tensionale, utilizzando il supporto polimerico, è convalidato attraverso prove su scala di laboratorio.

### **4 Digital Image Correlation**

#### 4.1 Introduzione

Negli ultimi dieci anni, grazie ai progressi tecnologici dei computer e dei sensori della fotocamera, la tecnologia ottica come metodo di misurazione senza contatto è stata attentamente studiata grazie alla sua potenzialità di ricavare misurazioni a pieno campo. Tra i diversi metodi di misurazione ottica la Correlazione di Immagini Digitali, abitualmente chiamata DIC (Digital Image Correlation), ha ricevuto notevole attenzione grazie alla sua capacità di ottenere misurazioni dei campi di spostamento e deformazioni delle superfici analizzate, superando così le misure puntuali ricavate con i metodi tradizionali.

La Digital Image Correlation è abbondantemente utilizzata nei diversi campi della scienza e in particolare dell'ingegneria. La figura successiva mostra bene come il numero di ricerche e applicazioni dal 2000 al 2015 ha visto una crescita esponenziale nell'applicazione della correlazione di immagini digitali per misurazioni di deformazione.



Figura 60 – Numero di pubblicazioni relative alle diverse tecniche di misura della deformazione [22]

#### 4.2 Aspetti base della DIC

La Digital Image Correlation, sviluppata agli inizi degli anni '80 da un team di ricercatori della "University of South Carolina", è una tecnica non invasiva che consente la misurazione a tutto campo degli spostamenti tramite l'acquisizione di immagini, con uno o più dispositivi fotografici, della superficie dei provini sottoposti a un prefissato stato di sollecitazione. In questo lavoro di tesi, utilizzando una singola fotocamera, si analizza la correlazione d'immagini digitali 2D idonea per lo studio dello stato di deformazione piana della superficie. Invece, la tecnica DIC-3D prevede l'utilizzo di due camere in modo da sfruttare la visione stereoscopica che combinata alla DIC consente lo studio delle deformazioni tridimensionali su elementi non piani. La filosofia del metodo DIC è quella di determinare il campo di spostamenti e derivarne le deformazioni della superficie del campione preventivamente sottoposto a una puntinatura, confrontando un'immagine di riferimento e la successiva deformata.

L'applicazione della tecnica DIC prevede tre passaggi fondamentali:

- realizzazione di un pattern a macchioline o puntini chiamato comunemente "speckle pattern";
- acquisizione dell'immagini delle superfici del campione nelle diverse condizioni di sollecitazione;
- analisi dell'immagini confrontando un'immagine di riferimento con immagini deformate, utilizzando uno specifico criterio di correlazione per il calcolo dei campi di spostamento e deformazione.

Durante la fase di acquisizione di immagini, deve essere rispettato sia il parallelismo tra il sensore della camera e la superficie sottoposta alla DIC, sia la costanza della distanza focale interposta tra il sensore fotografico e la superficie del provino. Il rispetto delle due condizioni permette di misurare il reale campo deformativo privo di deformazioni apparenti.



Speckled Sample

Figura 61 – Setup di prova DIC-2D

L'analisi DIC è sempre preceduta da un'attenta fase di definizione e configurazione dei seguenti parametri:

- densità dei puntini che definiscono il pattern;
- il grado di grigio del pattern;
- dimensione dei subset (subset size);
- dimensione del passo (step size);
- algoritmo di correlazione e ottimazione.

La corretta combinazione tra i parametri consentirà di aumentare l'accuratezza dei risultati.

#### 4.3 Correlazione di immagini digitali

Le immagini della superficie del provino, rappresentative delle diverse configurazioni di stress a cui è sottoposto il provino, sono l'input per un software DIC.

Nell'immagine di riferimento è definito un sottoinsieme chiamato subsets (sottomatrice dell'immagine), quindi la posizione dello stesso è identificata nell'immagine deformata.

La digital image correlation si basa sulla ricerca del massimo della correlazione tra le intensità dei pixels all'interno del sottoinsieme individuato.

Questo avviene perché l'immagine digitale è costituita da una matrice bidimensionale i cui elementi si chiamano pixel, ognuno dei quali corrisponde ad un numero che raffigura il livello di luminosità di quel pixel (immagine a scala di grigi) od il colore.



Figura 62 – Informazione radiometrica fornita dai pixel

Ricavata la correlazione massima tra il subset dell'immagine di riferimento e quello della immagine deformata, si conosce lo spostamento subito da quel subset.

Trovando ripetutamente la nuova posizione dei sottoinsiemi all'interno delle immagini, si può ottenere il campo di spostamento bidimensionale.

Nel dettaglio, l'area d'interesse nell'immagine di riferimento (che può coincidere con l'intera immagine), definita ROI (region of interest), viene suddivisa attraverso una griglia regolare con dimensione del subset che può variare negli step successivi. L'immagine successiva (Figura 63) mostra un tipico processo a "serpentina" per l'individuazione dei subset. L'immagine ha una dimensione K x L, in funzione della densità dei puntini che definiscono il pattern viene individuato la dimensione ideale del subset e di conseguenza la dimensione della griglia (m x n subset distanziati  $\Delta X_s$  in direzione  $X_s$  e  $\Delta Y_s$  in direzione  $Y_s$ ,  $\Delta X_s e \Delta Y_s$  possono assumere valori negativi in modo da avere un "overlapping area")



Figura 63 – Discretizzazione dell'immagine di riferimento [23]

Per ogni subset, contenente diversi pixel e dunque informazioni radiometriche, in seguito alla correlazione del subset nelle diverse immagini, viene rilevato lo spostamento al centro del subset. Appare evidente l'importanza della scelta della dimensione del subset e della densità dei puntini che definiscono il pattern. Il più piccolo subset costituito da un solo pixel, dunque un solo livello di grigio, può esser correlato in maniera errata in diversi punti dell'immagine deformata con conseguenti errori. Dunque, la correlazione avviene tra subset composti da più pixel e in funzione della densità del pattern.

Il subset individuato nell'immagine di riferimento viene ricercato nell'immagine deformata in modo che presenti la stessa distribuzione di livelli di grigio, ottenendo così il vettore di spostamento del suo punto centrale, differenziando i valori di spostamento lungo la superficie del provino si ricavano le deformazioni.



Figura 64 – Step DIC per l'analisi della deformazione

#### 4.4 Speckle Pattern e Subset

Il Pattern è un elemento indispensabile nell'analisi DIC, esso è strettamente correlato all'accuratezza e alla precisione della misurazione. La sua realizzazione può esser preceduta da una preparazione della superficie (sgrassaggio, lucidatura, ecc...) in modo che sia garantito il movimento e la deformazione con la superficie del provino studiato. Per una corretta correlazione è opportuno dipingere un pattern stocastico ad alto contrasto (rapporto nero-bianco del 50%) né troppo fine, né troppo grossolano. Le macchioline, che rappresentano il pattern, devono avere dimensioni tra i 3 e i 7 pixel e devono esser tali da ricoprire la superfice da analizzare tra il 40% e il 70% senza accumuli di colore che porterebbero a subset "neri" con conseguenti perdite di informazioni.



Figura 65 – Esempi di speckle pattern. Da sinistra: speckle di 5 px (diametro) al 30% di ricoprimento, 5 px al 50% e 9 px al 50%

Da notare che la dimensione in px della macchiolina è funzione della risoluzione dello strumento di acquisizione e della finestra di misura.

Riassumendo lo speckle pattern dovrebbe esser caratterizzato da:

- contrasto elevato;
- casualità;
- isotropia;
- dimensioni delle macchioline comprese tra 3 e 7 pixel;
- densità di ricoprimento tra il 40% e 70%;
- perfetta aderenza alla superficie del campione.

Tutto ciò determina un adeguato pattern sulla superficie che consente una corretta corrispondenza dei subset tra immagine di riferimento e deformata, determinando una stima esatta degli spostamenti.

Il pattern può essere realizzato sia artificialmente attraverso adesivi in vinile e patter prestampati sia naturalmente tramite bombolette spray, pennelli e rulli, aerografi, incisione laser, polvere di grafite ecc....

La dimensione del subset è legata al pattern, esso deve presentare dimensioni tali da distinguersi correttamente tra gli altri. Nella figura sottostante si evince come la dimensione del subset utilizzato per l'immagine di sinistra è inopportuna perché tutti i pixel sono ricoperti da nero; invece, la dimensione individuata per l'immagine di destra sullo stesso pattern racchiude diversi gradi di grigio.





Figura 66 – Dimensione subset

Per una correlazione univoca, una volta realizzato un speckle pattern adeguato come definito in precedenza, il subset deve presentare dimensioni in linea di massima comprese tra i  $20x20 \text{ px}^2$  e i  $40x40 \text{ px}^2$ . Un subset grande riduce il rumore e consente di ottenere una buona accuratezza, ma non riesce a cogliere gli effetti locali, dunque utile per un campo di deformazione omogeneo. Per contro, un subset piccolo consente di rilevare gli effetti locali ma non è un filtro per il rumore, perciò adatto in caso di grandi gradienti di spostamento.

I subset vengono analizzati imponendo uno step size tale da determinare un'area di sovrapposizione, definita come "overlapping area", consentendo di avere più punti di misura ravvicinati. Ovviamente, un'area di overlapping maggiore determina maggiori tempi di calcolo.



Figura 67 – Sovrapposizione di subset
## 4.5 Corrispondenza tra i subset

Per identificare in modo univoco il subset nell'immagine di riferimento e immagine deformata viene utilizzato un criterio di correlazione. Il confronto tra subset di riferimento e deformato avviene confrontando i valori di scala di grigio dei pixel contenuti nel subset.



Figura 68 - Confronto tra subset di riferimento e subset deformato

Si individuano due famiglie principali: criteri di cross-correlation e criteri di sum-squared differences.

Definite le funzioni f e g, che definiscono il valore di grigio del singolo pixel di coordinate (x;y) del subset dell'immagine di riferimento e deformata; si definiscono le seguenti equazioni:

$$C_{CC} = \frac{\sum_{(i,j)} (f(x_{ref,i}; y_{ref,j}) - f_m) (g(x_{cur,i}; y_{cur,j}) - g_m)}{\sqrt{\sum_{(i,j)} [f(x_{ref,i}; y_{ref,j}) - f_m]^2 \sum_{(i,j)} [g(x_{cur,i}; y_{cur,j}) - g_m]^2}},$$

$$c_{ls} = \sum_{(i,j)} \left[ \frac{f(x_{ref,i}; y_{ref,j}) - f_m}{\sum_{(i,j)} [f(x_{ref,i}; y_{ref,j}) - f_m]^2} - \frac{g(x_{cur,i}; y_{cur,j}) - g_m}{\sum_{(i,j)} [g(x_{cur,i}; y_{cur,j}) - g_m]^2} \right]^2,$$

dove  $f_m$  e  $g_m$  rappresentano i valori di grigio medio del subset dell'immagine di riferimento e deformata:

$$f_m = \frac{\sum_{(i,j)} [f(x_{ref,i}; y_{ref,j})]}{n},$$
$$g_m = \frac{\sum_{(i,j)} [g(x_{cur,i}; y_{cur,j})]}{n},$$

La prima equazione rappresenta il criterio di correlazione incrociata normalizzato, mentre la seconda equazione rappresenta il criterio dei minimi quadrati normalizzato [24].

Per una corretta correlazione è opportuno che per il primo criterio  $C_{cc}$  sia il più possibile prossimo a 1 e nel secondo  $C_{ls}$  tenda a 0.

Questi criteri sono quelli più utilizzati nella Digital Image Correlation; esistono svariati criteri che sono disponibili in letteratura, ciò che si osserva che sono sempre relazionati tra loro.

Individuato il corretto subset deformato (anche chiamato Target subset) rispetto alla condizione di riferimento, si confronta la posizione dei centri del subset e il vettore che collega i centri dei subset rappresenta il vettore spostamento. Definite le componenti (u;v) del vettore spostamento, la posizione finale del target subset è definita da:

$$x^* = x + u,$$
  
$$y^* = y + v,$$

Il campo di spostamenti si ottiene ripetendo la procedura per tutti i subset.



Figura 69 – Corrispondenza tra subset [25]

Siccome il provino sottoposto all'analisi non subirà uno spostamento rigido ma delle deformazioni, il rispettivo subset dopo deformazione non è nella condizione indeformata. Dunque, sarà necessario introdurre delle funzioni di forma del primo e secondo ordine che consentono di passare dalla condizione iniziale indeformata alla condizione deformata del subset per la corretta correlazione. Ovviamente funzioni di forma di ordine elevato consentono una migliore corrispondenza. Di contro, aumentando il numero di parametri aumenta anche la difficoltà del problema.



Figura 70 - Corrispondenza tra subset di riferimento e subset deformato

La funzione di forma del primo ordine comunemente usata può essere espressa come:

$$x^* = u + \frac{\delta u}{\delta x} \Delta x + \frac{\delta u}{\delta y} \Delta y,$$
$$y^* = v + \frac{\delta v}{\delta x} \Delta x + \frac{\delta v}{\delta y} \Delta y,$$

dove:

- x\* e y\* sono gli spostamenti finali del subset di riferimento lungo gli assi x e y;
- u e v sono le componenti dello spostamento del centro P del subset;
- Δx e Δy sono la distanza iniziale tra un punto Q arbitrario del subset e il punto centrale del P;
- $\delta u/\delta x$ ,  $\delta u/\delta y$ ,  $\delta v/\delta x$ ,  $\delta v/\delta y$  sono le componenti del gradiente di spostamento del subset di riferimento.

## 4.6 Stima degli spostamenti in sub-pixel

In seguito alla deformazione, le macchioline all'interno del subset di riferimento possono localizzarsi in frazioni di pixel nell'immagine deformata. Dunque, è necessario determinare gli spostamenti dell'ordine dei sub-pixel per ottenere una precisione al di sotto del pixel. La stima degli spostamenti in sub-pixel avviene tramite un'operazione di correlazione eseguita in frazioni di pixel, richiedendo la conoscenza del livello di grigio tra i pixel. La determinazione dei livelli di grigio tra i pixel si effettua tramite funzioni di interpolazione bilineari e bicubiche.

Purtroppo, l'introduzione di funzioni interpolanti dà luogo ad un errore sistematico in funzione dello spostamento del subset, rappresentato da una sinusoide in cui l'ampiezza dipende dal tipo di funzione [21]. Come si evince dalla figura sottostante, l'applicazione di funzioni bicubiche consente di ottenere stime migliori rispetto a funzioni bilineari.



Figura 71 – Errore introdotto dalle funzioni interpolanti [26]

#### 4.6.1 Interpolazione bilineare



Figura 72 – Interpolazione tramite funzione bilineare [26]

Dato il generico pixel, in funzione della distribuzione dell'intensità di luce sull'area del pixel, si definisce il livello di grigio G(i;j), attribuendolo al centro del pixel. Individuati i quattro valori dei livelli di grigio G(i;j), G(i;j+1),  $G(i+1;j+1) \in G(i+1;j)$  nei rispettivi centri, il livello di grigio in seguito a deformazione  $G(x^*;y^*)$  tra i pixel si ricava tramite funzione bilineare ovvero:

$$G(x^*; y^*) = a_{11}x'y' + a_{10}x' + a_{01}y' + a_{00}y' + a_{0$$

dove:

- x' e y' indicano la distanza da x\* e y\* lungo i e j, con  $0 \le x' \le 1$  e  $0 \le y' \le 1$ ;
- a<sub>00</sub>, a<sub>10</sub>, a<sub>01</sub> e a<sub>11</sub> sono i coefficienti della funzione bilineare introdotta, essi risultano funzione dei livelli di grigio dei 4 pixel:

$$a_{11} + a_{10} + a_{01} + a_{00} = G(i + 1, j + 1)$$
$$a_{10} + a_{00} = G(i + 1, j)$$
$$a_{01} + a_{00} = G(i, j + 1)$$
$$a_{00} = G(i, j)$$

### 4.6.2 Interpolazione bicubica



Figura 73 – Interpolazione tramite funzione bicubica [26]

L'interpolazione bicubica consiste nel determinare 16 coefficienti, dunque, definiti 16 valori di livelli di grigio per 16 pixel nei rispettivi centri, il livello di grigio G ( $x^*;y^*$ ) tra i pixel in seguito a deformazione si ricava tramite funzione bicubica come:

$$G(x^*; y^*) = b_{33}x'^3y'^3 + b_{32}x'^3y'^2 + b_{31}x'^3y' + b_{30}x'^3 + b_{23}x'^2y'^3 + b_{22}x'^2y'^2 + b_{21}x'^2y' + b_{20}x'^2 + b_{13}x'y'^3 + b_{12}x'y'^2 + b_{11}x'y' + b_{10}x' + b_{03}y'^3 + b_{02}y'^2 + b_{01}y' + b_{00} =$$
$$= \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 b_{ij}x'^iy'^j$$

dove:

- x' e y' indicano la distanza da x\* e y\* lungo i e j, con  $-1 \le x' \le 2$  e  $-1 \le y' \le 2$ ;
- b<sub>00</sub>, b<sub>01</sub>,b<sub>02</sub> ... b<sub>33</sub> sono i coefficienti della funzione bicubica introdotta, essi risultano funzione dei 16 livelli di grigio dei 16 pixel.

## 4.7 Misurazione delle deformazioni

In seguito alla determinazione del campo di spostamenti della superficie del provino, attraverso un'opportuna funzione interpolante, tale da consentire una precisione al di sotto del pixel, è possibile definire il rispettivo campo deformativo. Infatti, differenziando i valori di spostamento lungo la superficie del provino è possibile ricavare le deformazioni. Questa operazione però conduce a un aumento dell'errore di misura presente già nel campo di spostamento, per questo si utilizza un'operazione di "smoothing" sugli spostamenti da cui ricavare, per derivazione, le deformazioni. Come per i criteri di correlazione anche per l'operazione di "smoothing" sono presenti diverse soluzioni in letteratura. I più efficienti utilizzano il metodo dei minimi quadrati. Gli spostamenti vengono espressi nel seguente modo:

$$u(i,j) = a_0 + a_1 x + a_2 y$$
  
 $v(i,j) = b_0 + b_1 x + b_2 y$ 

dove:

- -u e v sono ricavati dall'analisi DIC;
- a<sub>0</sub>, a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> sono i coefficienti da determinare con i minimi quadrati.

Le deformazioni sono definite da:

$$\varepsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x} = a_1$$
$$\varepsilon_y = \frac{\delta v}{\delta y} = b_2$$
$$\gamma_{xy} = \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} = a_2 + b_1$$

Come anticipato in §4.4 un subset grande riduce il rumore e consente di ottenere una buona accuratezza, ma non riesce a cogliere gli effetti locali, dunque utile per un campo di deformazione omogeneo. Per contro, un subset piccolo consente di rilevare gli effetti locali ma non è un filtro per il rumore, perciò adatto in caso di grandi gradienti di spostamento.

# **5** Applicazione DIC

# 5.1 Introduzione

Nel presente capitolo si descrivono dettagliatamente le fasi necessarie per l'applicazione della Digital Image Correlation. Il fine di queste applicazioni è simulare una prova di rilascio tensionale, acquisendo delle immagini digitali per ogni stato di tensione imposto nel provino. In laboratorio, con l'ausilio di una pressa meccanica, si sottopongono a diversi step di carico dei provini cubici di calcestruzzo, strumentati precedentemente con un supporto polimerico sul quale viene condotta l'analisi DIC. Nel dettaglio, sarà discussa la preparazione e realizzazione del setup di prova, il calcolo dei carichi monoassiali applicati ai provini, ed infine le analisi e i risultati ottenuti tramite l'applicativo Matlab *Ncorr*.

## 5.2 Setup di prova

La corretta correlazione tra le immagini, acquisite sulla superficie del provino, richiede un setup di prova specifico. Infatti, l'esatta illuminazione della superficie di prova e l'esecuzione corretta dello speckle pattern, unitamente alla corretta strumentazione di acquisizione delle immagini, consentono di ottenere la giusta accuratezza nelle misure.



Figura 74 – Camera e illuminazione impiegate per le prove

#### 5.2.1 Strumentazione per l'acquisizione di immagini digitali

L'acquisizione delle immagini digitali dei campioni, preventivamente strumentati con un supporto polimerico, è stata realizzata tramite fotocamera Canon EOS 700D, predisposta con un obiettivo professionale. La risoluzione ottenuta è di 72 dpi e dimensione 5184 x 3456 (18 Megapixel)



Figura 75 – Sistema di acquisizione

La camera è stata fissata su un treppiede in modo da facilitare l'acquisizione di scatti multipli e garantire sia il parallelismo tra il sensore della camera e la superficie sottoposta alla DIC, sia la costanza della distanza focale interposta tra il sensore fotografico e la superficie del provino. Durante l'acquisizione delle immagini digitali, la camera, precedentemente calibrata, non deve esser sottoposta a nessun spostamento o vibrazione; pertanto attraverso un collegamento con cavo USB, si è utilizzata la fotocamera in modalità remota tramite il software EOS Utility. Inoltre, il collegamento ha consentito la visualizzazione istantanea delle foto e il salvataggio delle stesse.

La distanza individuata, tra la superficie del campione e il centro a terra del treppiedi, è di 1,5 metri tale da permettere sia la miglior messa a fuoco dello speckle pattern, sia di acquisire la superficie del supporto polimerico e una piccola area di contorno della superficie di calcestruzzo del provino.

Ciò ha consentito di acquisire immagini nitide, in cui si distingue in maniera univoca i diversi livelli di grigio tra i pixel dell'immagine.



Figura 76 – Esempio di immagini acquisite

Per un'elevata accuratezza delle misure è necessario che la superficie del supporto polimerico sia sottoposta a una luce costante durante l'intero periodo di acquisizione. Infatti, un'illuminazione non omogenea e variabile porta alla correlazione di subset errati poiché presentano diversa luminosità nel tempo. Si è optato l'utilizzo di una luce artificiale, in quanto la prova è stata eseguita in una posizione del laboratorio che non garantiva una luminosità omogenea date anche le condizioni atmosferiche variabili.

Al fine di garantire una sufficiente illuminazione del pattern, in seguito al posizionamento del provino tra i piatti della macchina, si è individuato il corretto posizionamento del faro a LED.



Figura 77 – Illuminazione del pattern

#### 5.2.2 Realizzazione del Pattern e preparazione dei provini

Volendo determinare il valore di precompressione residua, utilizzando il rilascio dello stato tensionale in combinazione alla Digital Image Correlation (DIC), in laboratorio sono stati predisposti sei provini cubici di calcestruzzo (l=150 mm) i quali sono stati sollecitati a prefissati valori di tensione. I provini, precedentemente strumentati con il supporto polimerico su cui è stato realizzato il pattern, consentono di eseguire l'analisi DIC e dunque di verificare lo stato attuale di tensione imposto dalla pressa meccanica.

I sei supporti polimerici, relativi ai sei provini di calcestruzzo, sono stati ottenuti da un foglio A4 297 x 210 mm trasparente in policarbonato (PC) di spessore 1 mm. Il foglio presentava su entrambi i lati una pellicola protettiva tale da preservarlo da graffi e conservare la superfice pulita per garantire l'aderenza della vernice spray.



Figura 78 – Foglio Policarbonato trasparente

Il ridotto spessore del foglio ha consentito il taglio di sei rettangoli di dimensione 105x99 mm attraverso un taglierino.

(Per l'identificazione del materiale del supporto, dello spessore e del tipo di incollaggio che consentono di non alterare il campo deformativo si rimanda al capitolo 6.)

Come già riscontrato nel capitolo precedente la realizzazione del pattern è indispensabile nell'analisi DIC e influenza direttamente la precisione della misurazione. Per la realizzazione del pattern stocastico si è impiegato uno strato bianco opaco di vernice spray, seguito da una puntinatura di vernice spray lucida nera (o rossa) in modo da garantire un elevato contrasto tra i colori. Sono stati realizzati 3 supporti puntinati in rosso e 3 in nero. Per ogni supporto, la realizzazione della puntinatura, attraverso vernice spray, è stata eseguita per metà da una distanza di circa 20 cm, tra il supporto e l'ugello della bomboletta, l'altra da circa 30 cm, coprendo la metà già realizzata con un foglio di carta. Di conseguenza, il supporto presenta una diversa densità dei



puntini che definiscono il pattern (vedi figura 79). Ciò consente di eseguire le analisi DIC su due diversi pattern per ogni campione, andando a selezionare l'opportuna ROI (region of interest).

Figura 79 – Esecuzione dello speckle pattern

Il Supporto, ottenuto dal foglio di policarbonato sul quale viene realizzato lo speckle pattern, viene incollato sulla superficie del cubetto di calcestruzzo tramite un'opportuna colla a base acqua, idonea per la superficie porosa del calcestruzzo.

L'operazione di incollaggio, del supporto in policarbonato sulla faccia del provino in calcestruzzo, non ha richiesto nessuna preparazione specifica contrariamente a quanto accade per l'installazione di un estensimetro.



Figura 80 - Cubetti di calcestruzzo prima e dopo l'installazione del supporto polimerico

La realizzazione del pattern e la preparazione dei provini è stata eseguita in poche ore di lavoro e non ha richiesto ingenti risorse economiche.

![](_page_84_Picture_0.jpeg)

Figura 81 – Cubetti di calcestruzzo strumentati con un supporto polimerico per l'analisi DIC

#### 5.2.3 Verifica della qualità del Pattern

Predisposta la strumentazione per l'acquisizione di immagini digitali e realizzati i provini strumentati è possibile effettuare una verifica della qualità del Pattern. Dalle immagini corrispondenti alla condizione di carico nullo (immagini di riferimento) è possibile visionare in scala 1:1 il pattern realizzato osservando la diversa densità di puntini.

![](_page_84_Picture_4.jpeg)

Figura 82 – Superficie del provino 1

![](_page_85_Picture_1.jpeg)

Figura 83 – Porzione della superficie del provino 1 in scala 1:1, a sinistra pattern realizzato con distanza 20 cm, a destra pattern realizzato con distanza 30 cm

Nella figura successiva si evince come la combinazione tra la risoluzione dello strumento di acquisizione, la finestra di misura e lo speckel pattern realizzato, determina un diametro in px della macchiolina nel primo caso (pattern realizzato con distanza 20 cm) di circa 7 px, nel secondo caso (pattern realizzato con distanza 30 cm) un diametro di circa 4 px.

![](_page_85_Picture_4.jpeg)

Figura 84 – Dettaglio del pattern del provino 1: a sinistra diametro della macchiolina 7px (pattern realizzato con distanza 20 cm), a destra diametro della macchiolina 4px (pattern realizzato con distanza 30 cm)

Per valutare la percentuale di ricoprimento delle macchioline all'interno del pattern si ricorre alla trasformazione dell'immagine digitale. La prima operazione consiste nel convertire l'immagine a colore in scala di grigi a 8 bit attraverso il software *Photoshop*.

Con l'applicazione del filtro i valori d'intensità di ogni pixel variano tra 0 (nero) e 256 (bianco).

![](_page_86_Picture_2.jpeg)

Figura 85 – Porzione della superficie del provino 1 prima e dopo conversione in scala di grigi

Attraverso l'App MATLAB *Image Segmenter* è possibile trasformare l'immagine in scala di grigi in un'immagine binaria in cui ogni pixel può assumere due possibili valori 0 (nero) 1 (bianco).

![](_page_86_Picture_5.jpeg)

Figura 86 – Porzione della superficie del provino 1 trasformata in immagine binaria

L'informazione radiometrica fornita dai pixel è esporta ed elaborata in MATLAB.

La percentuale di pixel neri rispetto al totale è del 73% per il pattern eseguito da una distanza di circa 30 cm tra il supporto e l'ugello della bomboletta. Mentre, per il pattern realizzato da una distanza di circa 20 cm, la densità di ricoprimento è del 64%.

Ulteriore verifica, per la qualità dell'immagine digitale, è la visualizzazione dell'istogramma dell'immagine, la quale rappresenta il numero di pixel per ogni valore tonale. Dunque, l'osservazione dell'istogramma consente di valutare la distribuzione tonale dell'immagine valutando eccessi di pixel scuri (sottoesposizione) o pixel chiari (sovraesposizione).

Non esiste un istogramma "ideale" di riferimento, ma la sua forma dipende dalla scelta "artistica". Ad esempio, fotografare un oggetto bianco su uno sfondo nero comporta a un istogramma concentrato a sinistra. L'obiettivo dell'acquisizione del pattern è ottenere un'esposizione equilibrata, cioè una distribuzione di pixel bilanciata nell'istogramma senza zone sottoesposte o sovraesposte.

Gli istogrammi consentono di ricavare anche informazioni sul contrasto dell'immagine. Infatti, più l'istogramma è distribuito, più contrasto è disponibile nell'immagine; viceversa avere un istogramma assottigliato significa avare un'immagine con poco contrasto.

Attraverso l'Image Processing di Matlab è possibile ricavare l'istogramma dello speckle pattern realizzato sul supporto polimerico.

Come si evince dalla figura successiva l'istogramma è uniformemente spaziato, presenta una forma a campana, sinonimo di immagine correttamente esposta e con un buon contrasto.

![](_page_87_Figure_7.jpeg)

Figura 87 – Istogramma dell'immagine della superficie del provino 1

Dalla verifica della qualità del pattern risultano rispettati i requisiti di dimensione delle macchioline, la densità di ricoprimento e di contrasto. Inoltre, l'utilizzo di vernice spray ha consentito di ottenere un pattern stocastico e perfettamente aderente alla superficie del supporto polimerico.

## 5.3 Prove di compressione

In laboratorio, volendo simulare ciò che accade nell'esecuzione di carotaggio, ovvero la variazione dello stato tensionale fino al completo rilascio tensionale (annullamento dello stato), si sono condotte sei prove di compressione uniassiale per introdurre degli stati tensionali nel campione.

La singola prova consiste nel sottoporre il cubo di calcestruzzo, già strumentato con il supporto polimerico, a step di carico prestabiliti. Per ogni step di carico si mantiene il carico costante per un minuto, il tempo necessario per le acquisizioni di immagini digitali della superficie del supporto polimerico provvisto di speckel pattern.

Durante le prove sono stati sottoposti sei cubi di calcestruzzo omogenei di lato 150 mm, caratterizzati da una resistenza caratteristica cubica di 40 MPa. Ogni provino, strumentato precedentemente con il supporto polimerico, è distinguibile tramite il proprio cartellino di identificazione.

Nelle tabelle seguenti sono riassunte le caratteriste dei provini utilizzati.

Prova	Cartellino Identificazione Cls	Speckel Pattern - Supporto in PC
1	AIR1A31dGD/3	Nero
2	AIR1A31dGD/4	Rosso
3	AIR1A31dGD/1	Rosso
4	1A31dGD/2	Rosso
5	1O31dGD/1	Nero
6	AIR1A31dGD/2	Nero

Tabella 3 – Identificazione Prova

Numero provini	6	
Tipo di Provini	Cubici	
Altezza provini [mm]	150	
Superficie A [mm <sup>2</sup> ]	22500	

Tabella 4 - Caratteristiche geometriche provino

Dalla resistenza cubica  $R_{ck}$  è possibile ricavare quella cilidrica  $f_{ck}$  attraverso la seguente espressione:

$$f_{ck} = 0,83 R_{ck}$$

Mentre, per passare dal valore caratteristico al valor medio della resistenza cilindrica si utilizza la relazione:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \ [MPa]$$

Per il modulo elastico del calcestruzzo, convenzionalmente non si riferisce al modulo tangente iniziale ma al modulo secante corrispondente al valore di tensione  $0.4f_{cm}$ .[27] Il modulo di elasticità longitudinale vale:

$$E_{cm} = 22000 \left[\frac{f_{cm}}{10}\right]^{0.3}$$
 [MPa]

Calcestruzzo C32/40				
Peso specifico	Y	25	kN/m³	
Coefficiente di Poisson	ν	0,2	-	
Resistenza caratteristica cubica	$R_{ck}$	40	MPa	
Resistenza caratteristica cilindrica	$\mathbf{f}_{ck}$	32	MPa	
Resistenza media cilindrica a compressione	$\mathbf{f}_{cm}$	40	MPa	
Modulo di elasticità longitudinale	Е	33345	MPa	

Tabella 5 – Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo

#### 5.3.1 Calcolo dei carichi da applicare in campo lineare

Il carico di compressione è stato applicato tramite la pressa idraulica Baldwin che ha consentito l'applicazione del carico a step. Le prove sono state eseguite in controllo di forza con valore di 2 kN/s.

![](_page_90_Picture_2.jpeg)

Figura 88 – Pressa Baldwin utilizzata per le prove

Lo scopo di queste prove è quello di rappresentare il più possibile le condizioni di esercizio di una trave precompressa; ovvero quelle condizioni che, qualora fossero superate, determinano una perdita di funzionalità, condizionando o limitando la prestazione dell'opera.

Per simulare le condizioni che si verificano durante una campagna di prove tramite carotaggio, volta alla definizione della tensione residua, i carichi utilizzati si basano sull'idea di non portare a rottura i provini di calcestruzzo ma di rimanere nel campo elastico lineare, limitando lo sforzo nel provino al più a 0.6f<sub>ck</sub>.

Sono stati individuati 3 step di carico con incremento per step di 100 kN, il primo step è stato impostato a 100 kN.

Numero di step	3	-
Velocità tra gli steps	2	kN/s
Primo step	100	kN
Incremento per step	100	kN
Tempo di mantenimento nello step	60	S
Tipo di mantenimento negli step	ep Controllato in forz	

Tabella 6 – Impostazione pressa per carico a step

![](_page_91_Figure_4.jpeg)

Figura 89 – Diagramma di carico

La possibilità di mantenere il carico costante per 60 secondi ha consentito di acquisire per ogni step tre immagini digitali dello speckel pattern della superficie del supporto polimerico.

In questo modo, l'analisi DIC eseguita su immagini "statiche", cioè le tre immagini eseguite nei 60 secondi per il singolo step in cui il carico non varia (nessun spostamento o deformazione tra le immagini), consente di valutare l'errore complessivo della prova e dunque l'accortezza del test. (Per la convalida e la valutazione degli errori nelle misurazioni si rimanda al *§5.5)* 

Suddividendo il carico per l'area della faccia del provino si ricava la tensione di compressione  $\sigma$  applicata al provino di calcestruzzo:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Nella tabella successiva si riportano i valori di tensione  $\sigma$  per i tre step di carico successivi, applicati ad ognuno dei sei cubi di calcestruzzo.

Step	F [kN]	σ [MPa]	%f <sub>ck</sub>
1	100	4,44	14%
2	200	8,89	28%
3	300	13,33	42%

Tabella 7 – Livelli di carico applicati

I valori di tensione applicati sono inferiori al 60% della resistenza cilindrica, risultano quindi ben distanti dalla rottura del campione.

In conclusione, note le forze da prova e il modulo elastico da normativa del calcestruzzo dei provini, si ricavano i valori di deformazione imposti nel campione per ogni step:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Step	σ [MPa]	E [Mpa]	με [-]	
1	4,44		133	
2	8,89	33345	267	
3	13,33		400	

Tabella 8 – Valori di deformazione

I tre valori di deformazione sono i valori di riferimento, utilizzati nell'ultimo paragrafo del presente capitolo, per il confronto con i valori ottenuti con l'analisi DIC.

## 5.4 Analisi DIC tramite Ncorr

Per la correlazione di immagini digitali 2D si è utilizzato il software open source *Ncorr*, realizzato in ambiente Matlab dal Georgia Institute of Technology.

In questo paragrafo verrà mostrato il procedimento operativo del software sulle immagini digitali relative al primo step (F=100 kN) della prova 1 sullo speckle pattern realizzato da 30 cm. I risultati completi delle sei prove sono riportati al paragrafo \$5.6.

L'applicazione DIC avviene tramite sette passaggi riportati nell'interfaccia principale del software, consentendo all'utente di sapere in quale si trova e quale sia il successivo.

![](_page_93_Figure_5.jpeg)

Figura 90 - Flusso di lavoro Ncorr

In questa prima applicazione si utilizza come immagine di riferimento l'immagine del campione scarico; mentre, per l'immagine corrente si adopera l'immagine relativa al primo step di carico (F=100 kN) del campione 1.

Caricate nel software le immagini di riferimento e corrente, si definisce la porzione dell'immagine da analizzare con il software attraverso la scelta della regione di interesse (ROI). Al tracciamento diretto della ROI, tramite interfaccia (Draw ROI), si è preferito impostarla tramite un'immagine, permettendo di analizzare la stessa identica area nei tre step di carico.

Si è realizzata un'immagine delle stesse dimensioni dell'immagini utilizzate (5184 x 3456) in cui la regione da analizzare è composta da un rettangolo bianco e la restante parte da nero. L'area bianca ha una dimensione di 2520 x 990 in px in cui il vertice superiore sinistro, per la ROI relativa allo speckle pattern realizzato da 30 cm ha coordinate in px (2928 ; 194), mentre per il pattern realizzato da 20 cm, ha coordinate in px (1537 ; 194). Le aree bianche sono individuate in modo tale che i punti della ROI presenti nell'immagine di riferimento, siano compresi anche nell'immagini correnti successive.

![](_page_94_Figure_0.jpeg)

Dunque, per l'analisi delle due aree dello speckle pattern, realizzate da una distanza di 20 e 30 cm, sono state realizzate due ROI identiche ognuna relativa all'area di interesse.

Figura 91 - Region of Interest relativa allo speckle pattern realizzato da 30 cm

La fase successiva è l'impostazione dei parametri relativi al subset, ovvero il Subset Radius e il Subsets Spacing. Il Subset Radius viene individuato in maniera iterativa, esso deve presentare dimensioni tali da distinguersi correttamente tra gli altri, racchiudendo al suo interno almeno tre macchioline. Come riportato nel manuale del software, "*l'idea principale è quella di selezionare il più piccolo subset possibile che non si traduce in dati rumorosi di spostamento (poiché subset di grandi dimensioni tendono ad avere un effetto levigante)*" [28].

L'ausilio di un "impoint" verde (vedi figura successiva), rappresentante il centro del subset, nella finestra chiamata "subset location", consente di visualizzare i diversi subset.

![](_page_94_Picture_5.jpeg)

Figura 92 – Impostazione parametri DIC

Sul subset selezionato è possibile visualizzare il Subset Spacing. Tanto più piccolo sarà lo spacing, tanto maggiore risulterà "overlapping area", cioè più punti di misura ravvicinati ma a svantaggio dell'onere computazionale.

Tramite la visualizzazione interattiva, analizzando i diversi subset si è scelto di impostare un Subset Radius di 20 px e un Subset Spacing di 8 px.

Queste impostazioni sulla ROI di dimensione 2520 x 990, determineranno la definizione di un campo di spostamento attraverso una matrice di dimensione 280 x 110

Per "Iterative Solver Option" si hanno dei valori predefiniti piuttosto stringenti come riportato dal manuale del software, dunque non vengono modificati.

Il "Multithreading Options" consente di selezionare il numero di core dedicati all'analisi aumentando così la velocità computaziale. In questo lavoro di tesi, il computer utilizzato ha 8 core logici e quattro core fisici, quindi si è scelto di utilizzare 4 core per il calcolo.

Non vengono attivate le opzioni "High Strain Analysis" e "Discontinuos Analysis", poiché la prima viene utilizzata quando è necessario aggiornare l'immagine di riferimento durante l'analisi; invece, la seconda viene utilizzata quando si ha la formazione di una fessura sulla superfice analizzata.

L'ultimo passaggio prima di ottenere il campo di spostamento è di impostare i parametri relativi alla DIC Analysis. All'interno della ROI analizzata si posizionano dei "seeds" in funzione dei core utilizzati, ovvero quattro core fisici.

Il posizionamento dei quattro seeds deve essere tale da non uscire dal campo visivo durante la deformazione, poiché essi forniscono le ipotesi iniziali per l'analisi. Inoltre, i seeds devono suddividere in aree uguali la ROI, così ogni area può esser calcolata in parallelo dai 4 core fisici. Di seguito viene mostrato il posizionamento dei quattro seeds e le analisi corrispondenti:

承 Set Seeds	1	
Seed Options Seed(s) Set: 4 of 4 Set:Seeds	Select Region	
Menu		
Finish		A.
	+ +	
		1000
		for any
	Name: 0kN_1.JPG	

Figura 93 – Posizionamento dei seeds

![](_page_96_Figure_2.jpeg)

Figura 94 – Analisi dei seeds

Come si può osservare dall'immagine precedente, il numero massimo di iterazioni prima del raggiungimento della convergenza è pari a 7, inferiore al numero massimo 50; mentre, il coefficiente di correlazione non assume valore elevato. Dunque, i valori assunti da questi due parametri confermano la bontà dell'analisi.

Terminata l'analisi è possibile visualizzare gli spostamenti orizzontali e verticali per la coppia di immagini analizzate. Nel ricavare gli spostamenti, al fine di filtrare valori erronei, si imposta una soglia massima del coefficiente di correlazione di 0.02. In questo modo, valori di spostamento molto alti o bassi, che presentano coefficienti di correlazione elevati, vengono filtrati ed esclusi dall'analisi. Questa impostazione determina, all'interno della ROI analizzata, l'eventuale assenza di valori, come è possibile osservare nei diagrammi successivi.

Nella figura successiva sono riportati gli spostamenti relativi al primo step di carico (F=100 kN) della prova 1, relativi all'analisi dello speckle pattern realizzato da una distanza di 20 cm.

![](_page_97_Figure_4.jpeg)

Figura 95 – v\_displacements [px]

Gli spostamenti verticali risultano coerenti con gli spostamenti imposti sul provino dalla pressa idraulica. Si osserva che la parte inferiore subisce uno spostamento diverso rispetto alla parte superiore in quanto non si ha una semplice traslazione. Inoltre, gli spostamenti (negativi rispetto al sistema di riferimento) della parte inferiore risultano maggiori della parte superiore; quindi, rappresentano in maniera corretta l'accorciamento del provino.

![](_page_98_Picture_0.jpeg)

Figura 96 – u\_displacements [px]

Ugualmente gli spostamenti orizzontali sono coerenti con la sollecitazione monodirezionale imposta, in quanto la parte centrale del provino non si sposta e le parti laterali si dilatano trasversalmente per Poisson.

Si fa osservare che i valori di spostamenti ricavati dall'analisi DIC sono espressi in px; attraverso una distanza nota sull'immagine (ad esempio la dimensione in altezza del supporto polimerico) è possibile convertire i valori in  $\mu$ m. Poiché, lo scopo dell'analisi è quello di risalire ai valori di deformazione, grandezza adimensionale, si è preferito non effettuare la conversione delle unità.

Per l'analisi della deformazione l'unico parametro da impostare è il raggio di deformazione, definito come Strain Radius. Il raggio di deformazione è scelto in modo che non sia troppo grande per il campo di spostamento.

Il valore utilizzato è di 10, tale da individuare un gruppo di punti i cui valori di spostamento si adattano perfettamente a un piano (vedi figura successiva).

Set Strain Parameters		- 🗆 X
Strain Options Strain Radius: 10  View Options Lagrangian U-Displacement Discontinuous Analysis Subset Truncation Zoom/Pan Ran	Preview	Displacement Displ
Menu Finish Cancel	Reference Name: 0kN_1.JPG Current Name: 100kN_1.JPG	1500 1450 1400 3400 < 1 >

Figura 97 – Strain Radius

La figura successiva rappresenta la deformazione subita in seguito al primo step di carico (F=100 kN) della prova 1, relativa all'analisi dello speckle pattern realizzato da una distanza di 30 cm.

![](_page_99_Figure_4.jpeg)

Figura 98 –  $\varepsilon_y$  [ $\mu\varepsilon$ ]

Come si può osservare, l'intera area analizzata presenta un valore di deformazione pressoché uniforme, il cui valor medio è di 143  $\mu \epsilon$ .

Al termine dell'analisi nel Workspace di Matlab sono presenti tutte le informazioni e i risultati dell'analisi. I campi di spostamento e deformazione sono definiti attraverso una matrice di dimensione 280 x 110 (la dimensione dipende dalla dimensione della ROI e dal Subspacing).

Si osserva che rispetto al rilevamento con estensimetri, in cui la misurazione è limitata in un punto, l'analisi DIC effettuata fornisce una quantità maggiore di dati cioè 30800 (280 x 110), ottenendo una stima più accurata della deformazione e dunque una riduzione degli errori, dovuti alla disomogeneità del calcestruzzo.

Attraverso la matrice Eyy si ricava il valor medio di deformazione verticale che verrà confrontato con il valore di riferimento calcolato al paragrafo precedente.

In conclusione, la tabella sottostante riassume i parametri utilizzati nelle analisi attraverso il software Ncorr.

Image Resolution	5184 x 3456
Subset Radius	20
Subset Spacing	8
Diffnorm Cutoff	1e-06
Iteration Cutoff	50
Num Threads	4
High Strain Analysis	Disabled
Discontinuous Analysis	Disabled
Corr-Coef Cutoff	0.02
Strain Radius	10

Tabella 9 – Parametri analisi DIC

# 5.5 Convalidazione e valutazione degli errori

In questo paragrafo si stima l'effetto dei vari parametri sui risultati ricavabili dall'analisi DIC.

La valutazione degli errori è importante poiché i risultati dell'analisi DIC variano in funzione del setup di prova, ovvero l'illuminazione della superficie di prova, la qualità dello speckle pattern, la strumentazione di acquisizione delle immagini e la distanza tra la superficie del campione e il centro a terra del treppiedi della camera. Purtroppo, risulta difficile individuare e separare i contributi relativi delle singole fonti di errore nell'applicazioni DIC, ma l'errore complessivo può esser misurato con analisi specifiche.

Il rumore di fondo del setup di prova può esser stimato attraverso "immagini statiche" cioè confrontando immagini che rappresentano una condizione indeformata del provino. Dall'analisi di suddette immagini digitali, i valori di deformazione diversi da zero, rappresentano il rumore di fondo poiché l'analisi è eseguita in condizioni in cui non si ha spostamento o deformazione tra le immagini.

Per questo motivo, oltre all'acquisizione di due "immagini statiche" in condizione di carico assente, durante le prove di laboratorio si è scelto di applicare un carico a step tale da consentire di acquisire per ogni step tre "immagini statiche", dello speckel pattern della superficie del supporto polimerico.

Dunque, per la singola prova si è eseguito attraverso il software Ncorr l'analisi di due immagini eseguite in condizione di carico assente, e di tre immagini in condizioni di carico costante per i tre step di carico, per un totale di dieci analisi DIC.

In questa fase si sono stabilite le dimensioni e posizioni delle ROI in modo tale che tutti i punti di suddette aree presenti nell'immagine di riferimento siano compresi anche nell'immagini correnti successive. Le due ROI individuate, ognuna relativa all'area dello speckle pattern di 20 e 30 cm, per l'analisi dell'errore di fondo sono le stesse con cui si svolgono le analisi DIC per la determinazione della deformazione del supporto polimerico.

In questo modo, il rumore di fondo valutato nel presente paragrafo coincide con l'errore complessivo di cui sono affette le misure di deformazione eseguite nel successivo paragrafo.

Nel presente lavoro si è utilizzato inizialmente l'applicativo Matlab *Pivlab*, ma siccome il rumore di fondo, dovuto al setup di prova, risultava di un ordine di grandezza maggiore rispetto al software *Ncorr* si è scelto di utilizzare quest'ultimo.

Per la singola prova, attraverso le "immagini statiche", sono state eseguite dieci analisi per ognuna delle due aree dello speckle pattern realizzato da 20 e 30 cm. Pertanto, il risultato finale per le 6 prove è quello di ottenere 120 coppie di valori di deformazione ( $\mu\epsilon_x$ ;  $\mu\epsilon_y$ ).

In assenza di deformazione e di spostamenti rigidi reali, il rumore medio stimato è pari a  $3,2 \ \mu\epsilon$  e la deviazione standard è di 2,4.

La figura successiva riporta le coppie di deformazione ottenute dall'analisi "dell'immagini statiche", eseguite sulle due diverse porzioni di speckle pattern.

![](_page_102_Figure_2.jpeg)

Figura 99 – Errore di fondo

Analizzando separatamente le sei prove, e concentrando l'attenzione sulla deformazione assiale  $\varepsilon_y$ , predominante per la sollecitazione monodirezionale imposta, si osserva un rumore di fondo prodotto dal setup di prova uniforme per gli speckle pattern realizzati da 20 e 30 cm.

Il rumore medio risulta pari a 2,8  $\mu\epsilon$  per il pattern eseguito da 20 cm e 3,6  $\mu\epsilon$  per il pattern realizzato da 30 cm.

Anche se il pattern realizzato da una distanza 20 cm presenta una densità di ricoprimento elevata nelle aree centrali, ciò non induce un errore poiché l'applicazione di una soglia massima del

coefficiente di correlazione 0.02 (stesso valore utilizzato nelle analisi DIC per la determinazione della deformazione del supporto polimerico) consente di filtrare ed escludere i valori erronei.

Le figure successive mostrano il rumore di fondo e la deviazione standard della deformazione lungo y delle 6 prove, analizzando le porzioni di speckle pattern realizzati da 20 e 30 cm delle "immagini statiche".

![](_page_103_Figure_3.jpeg)

Figura 100 – Errore di fondo e deviazione standard\_speckle pattern 20 cm

![](_page_103_Figure_5.jpeg)

Figura 101 – Errore di fondo e deviazione standard\_speckle pattern 30 cm

Dall'analisi delle "immagini statiche" il rumore di fondo risulta ampiamente accettabile dato il suo esiguo valore rispetto ai valori attesi di deformazione, che vengono misurati attraverso l'analisi DIC nel paragrafo successivo. In conclusione, dai risultati ottenuti si può ritenere convalidato il test.

## 5.6 Risultati e Analisi

Si illustrano ora i risultati ottenuti nell'applicazione DIC dei sei provini cubici di calcestruzzo sottoposti tramite pressa idraulica a sforzi prestabiliti.

I tre stati deformativi di riferimento (tabella 10), ovvero le deformazioni a cui è sottoposto il provino e di conseguenza il supporto polimerico, sono ricavati dal valore di sforzo da prova (inferiore al 0.60f<sub>ck</sub> in modo da rimanere nel campo elastico lineare) e il modulo elastico da normativa del calcestruzzo dei provini. Questi tre valori vengono confrontati con i valori stimati con l'analisi DIC (tabella 11-12).

Step	$\mu\epsilon_{\rm riferimento}$ [-]
1	133
2	267
3	400

Tabella 10 – Valori di deformazione di riferimento

Prova	Provino	Supporto in PC	Step	με_DIC [-]
	AIR1A31dGD/3	Nero	1	143
1			2	283
			3	389
			1	137
2	AIR1A31dGD/4	Rosso	2	279
			3	403
	AIR1A31dGD/1	Rosso	1	136
3			2	276
			3	408
	1A31DGD/2	Rosso	1	128
4			2	256
			3	375
	O31dGD/1	Nero	1	126
5			2	270
			3	392
6	AIR1A31dGD/2	Nero	1	145
			2	142
			3	139

Tabella 11 – Risultati analisi DIC\_speckle pattern 30 cm

Prova	Provino	Supporto in PC	Step	με_DIC [-]
1	AIR1A31dGD/3		1	145
		Nero	2	288
			3	392
	AIR1A31dGD/4		1	141
2		Rosso	2	277
			3	397
	AIR1A31dGD/1	Rosso	1	145
3			2	289
			3	422
	1A31DGD/2	Rosso	1	118
4			2	244
			3	370
	O31dGD/1	Nero	1	131
5			2	264
			3	384
	AIR1A31dGD/2	Nero	1	149
6			2	147
			3	146

Tabella 12 – Risultati analisi DIC speckle pattern 20 cm

Si osserva che per la prova numero sei i risultati ottenuti nel secondo e terzo step di carico risultano confrontabili con il valore di riferimento attinente al primo step di carico, dunque inferiori ai rispettivi valori di riferimento. Questa singolarità è da attribuire al distacco tra il supporto polimerico e la superficie del calcestruzzo durante la prova. Pertanto, per applicazioni future si può prevedere l'eventuale preparazione della superficie di incollaggio mediante smerigliatrice e successiva sgrassatura o l'utilizzo di gel per il miglioramento dell'aderenza.

I diagrammi successivi illustrano i risultati ottenuti dall'analisi DIC sui sei provini di calcestruzzo, strumentati precedentemente con il supporto polimerico. In particolare, si riporta per i tre step di carico il confronto tra il valore di deformazione di riferimento e i risultati stimati attraverso l'analisi DIC dello speckle pattern realizzato da una distanza di 20 e 30 cm.

![](_page_106_Figure_0.jpeg)

Figura 102 – Confronto tra  $\mu \varepsilon_{\rm riferimento}$  e  $\mu \varepsilon_{\rm DIC}$  – Step1

![](_page_106_Figure_2.jpeg)

Figura 103 – Confronto tra  $\mu \varepsilon_{-}$ riferimento e  $\mu \varepsilon_{-}$ DIC – Step2

![](_page_107_Figure_1.jpeg)

Figura 104 – Confronto tra  $\mu \epsilon_r$ iferimento e  $\mu \epsilon_D IC$  – Step3

![](_page_107_Figure_3.jpeg)

Figura 105 – Confronto tra  $\mu \epsilon_{riferimento}$  e  $\mu \epsilon_{DIC}$  tra i tre step di carico
Si deduce dai diagrammi precedenti una rilevante vicinanza tra i valori di riferimento e quelli stimati tramite DIC per entrambi gli speckle pattern.

Nel dettaglio, la prova numero 3 presenta la maggior differenza tra i valori misurati attraverso la DIC sui diversi speckle pattern. Ciò è da imputare a un'eccessiva densità di ricoprimento nell'area centrale per lo speckle pattern realizzato da 20 cm. Infatti, l'applicazione del coefficiente di correlazione 0.02 consente di filtrare ed escludere i valori erronei (nel diagramma di deformazione è visibile una notevole assenza di dati – Pag. 100, figura 110), ma contemporaneamente si ha una minor quantità di dati ottenendo così una stima meno accurata della deformazione.

Nel complesso, escludendo i valori errati di deformazione della prova sei dovuti alla separazione tra le superfici del supporto polimerico e del calcestruzzo per il secondo e terzo step di carico, i risultati ottenuti tramite l'analisi DIC, per entrambi gli speckle pattern, sono del tutto accettabili dato il ravvicinato valore a quello di riferimento. Infatti, l'errore commesso nella stima della deformazione tramite DIC risulta per tutte le prove e per ogni step di carico inferiore al 12 % rispetto al valore di riferimento.

Dunque, l'obiettivo che si desiderava ottenere durante questo lavori di tesi, ovvero la stima dello stato tensionale attraverso il supporto polimerico su scala di laboratorio, tramite il confronto della deformazione di riferimento e quella rilevata tramite DIC, è stato raggiunto.

#### 5.6.1 Strain Plot

Come mostrato nel §5.4 l'analisi DIC effettuata ci consente di esaminare graficamente il campo delle deformazioni. Il plot fornito dal software rappresenta graficamente i risultati ottenuti dell'analisi DIC, quindi, è influenzato dalla qualità dello speckle pattern, dall'illuminazione della superficie di prova e dalla strumentazione di acquisizione delle immagini, ovvero tutti i parametri individuati nel setup di prova.

Qui di seguito, si riporta lo strain plot delle sei prove di laboratorio delle due rispettive ROI analizzate sullo speckle pattern.

Come si può osservare, le aree analizzate presentano un valore di deformazione pressoché uniforme lungo l'intero provino e via via crescente nei successivi step di carico, in conformità con quanto accade sulla superficie di calcestruzzo del campione per gli sforzi imposti.



Figura 106 – Strain Plot della prova 1\_speckle pattern 20 cm



Figura 107 – Strain Plot della prova 1\_speckle pattern 30 cm



Figura 108 – Strain Plot della prova 2\_speckle pattern 20 cm



Figura 109 – Strain Plot della prova 2\_speckle pattern 30 cm



Figura 110 – Strain Plot della prova 3\_speckle pattern 20 cm



Figura 111 – Strain Plot della prova 3\_speckle pattern 30 cm



Figura 112 – Strain Plot della prova 4\_speckle pattern 20 cm



Figura 113 – Strain Plot della prova 4\_speckle pattern 30 cm



Figura 114 – Strain Plot della prova 5\_speckle pattern 20 cm



Figura 115 – Strain Plot della prova 5\_speckle pattern 30 cm



Figura 116 – Strain Plot della prova 6\_speckle pattern 20 cm



Figura 117 – Strain Plot della prova 6\_speckle pattern 30 cm

# 6 Modellazione numerica del supporto

#### 6.1 Introduzione

Nel presente capitolo si realizza una modellazione numerica di un cubo di calcestruzzo su cui è incollato un supporto. Lo scopo è l'identificazione del materiale del supporto, il suo spessore e il tipo di incollaggio sulla porzione dell'elemento strutturale, che sarà sottoposto al rilascio tensionale. La realizzazione del modello consente di eseguire uno studio parametrico per individuare la configurazione migliore, cioè la condizione che permette di rispecchiare identicamente sul supporto la deformazione subita dalla carota di calcestruzzo a seguito del rilascio tensionale.

La costruzione del modello, è eseguita attraverso il software *Straus7*, ovvero un sistema generale per analisi bidimensionali e tridimensionali ad elementi finiti, sviluppato da G+D Computing.

Si prevedono piccoli spostamenti e tensioni in campo lineare; verrà pertanto utilizzato il solutore statico lineare (Linear Static Solver).

## 6.2 Dimensioni, condizioni di vincolo e condizioni di carico del modello

Il modello è formato da entità ("nodes", elementi "plates" e "bricks"), attributi ("face pressure") e condizioni di vincolo.

Per eseguire questa analisi si fa riferimento ad una sequenza standard di passi comunemente utilizzata nella modellazione ad elementi finiti:

- 1. definizione della geometria e del tipo di elementi;
- 2. definizione delle condizioni di vincolo;
- 3. definizione delle condizioni di carico;

- 4. definizione delle proprietà dei materiali
- 5. risoluzione del modello;
- 6. post-processing del modello, per la visualizzazione e l'interpretazione dei risultati.

Il risultato di questa modellazione consente di confrontare gli spostamenti della parte superiore del supporto (libera) con quelli subiti dal cubetto di calcestruzzo.

La scelta e la definizione della geometria del problema rappresentano il primo passaggio per la costruzione di un modello numerico che consenta di ottenere dei risultati quanto più realistici. In generale, l'operazione di carotaggio viene eseguita tramite carotatrice a diamante con diametro variabile da 25 a 202 mm. Come visto al §3.3, il diametro della corona utilizzata durante la prova di detensionamento sul calcestruzzo su travi in c.a.p. è generalmente di 125 mm.

Pertanto, si è considerato un cubetto di calcestruzzo di lato 200 mm e un supporto circolare di diametro 80 mm tale da rientrare nell'area interessata dal carotaggio.



Figura 118 – Geometria del problema in pianta

Uno dei modi più usuali per ridurre le dimensioni di un modello ad elementi finiti, ove possibile, è di utilizzare le condizioni di simmetria. Nel caso in esame si possono individuare, sia per la geometria che per il carico, due assi di simmetria.



Figura 119 – Assi di simmetria

Dunque, tenendo conto della simmetria, si modella un solo quarto del problema.



Figura 120 – Modello di un quarto del problema

I campi di tensione, deformazione e spostamento saranno identici per ogni quarto. Lungo gli assi di simmetria saranno applicate opportune condizioni al contorno, per far sì che il quarto di struttura considerato si comporti come farebbe nella struttura completa.

Per la definizione del modello si è creata la geometria di riferimento tramite alcuni nodi ed elementi di appoggio. *Straus7* possiede vari tipi di elementi (beam, plate, brick e di link) per la creazione dei singoli elementi.

Nel dettaglio, sono stati impiegati elementi brick a 8 nodi per il cubetto di calcestruzzo, mentre per il supporto, data la natura bidimensionale del problema, sono stati utilizzati elementi plate quadrancolari a 4 nodi.

Per ottenere risultati accurati si è realizzata una mesh più fine, suddividendo in modo regolare la mesh esistente. In particolare, nello svolgere la suddivisione degli elementi (tramite il comando Subdivide di *Straus7*) si è prestata attenzione agli elementi adiacenti (superficie di incollaggio) in modo che gli elementi ottenuti per suddivisione si "incontrino" negli stessi nodi.



Figura 121 – Mesh del modello

Una volta creata la geometria del modello, occorre assegnare opportune condizioni di vincolo, perché in assenza di queste la struttura è libera di muoversi nello spazio. Per fornire i vincoli necessari, occorre porre attenzione alla situazione fisica che si sta simulando. Ogni nodo possiede sei gradi di libertà e quindi sei possibilità di movimento: tre traslazioni secondo X,Y e Z e tre rotazioni attorno agli stessi assi.

Se fisicamente un vincolo impedisce al nodo di muoversi in una o più direzioni, nel modello corrispondente il nodo dovrà avere quegli spostamenti impediti, tramite la soppressione di uno o più gradi di libertà.



Figura 122 – Gradi di libertà dei nodi [29]

Nel caso in esame, le condizioni al contorno da attribuire sono le condizioni di simmetria rispetto agli assi relativi. Rispetto ad un asse di simmetria, gli spostamenti dei punti che stanno da una parte si riflettono simmetricamente dall'altra. Dunque, sull'asse di simmetria non può esserci spostamento in direzione normale all'asse, ma solo lungo l'asse stesso.

Quindi tutti i nodi che si trovano sull'asse X di simmetria devono avere spostamento DY impedito, viceversa tutti i nodi che si trovano sull'asse Y di simmetria devono presentare spostamento DX impedito.



Assi di simmetria Figura 123 – Condizioni di vincolo sugli assi di simmetria

Nel problema in esame l'applicazione delle condizioni di simmetria elimina i moti rigidi, infatti, non consentono né traslazioni né rotazioni rigide.

Pertanto, si vincolano i nodi appartenenti agli assi di simmetria tramite dei doppi pendoli (o bipendoli). Questi impediscono la traslazione lungo l'asse dei pendoli e la rotazione (i momenti non sono nulli ma simmetrici).



Figura 124 – Condizioni di vincolo

In questa applicazione, il carico è una pressione applicata sulla faccia destra del cubetto di calcestruzzo del quarto considerato.



Figura 125 – Condizioni di carico

Le norme tecniche definiscono delle resistenze minime cioè classi minime di resistenza per le strutture. I materiali usati per realizzare elementi in cemento armato precompresso hanno caratteristiche meccaniche superiori rispetto a quelli comunemente usati nel cemento armato ordinario. Così, per quanto riguarda il calcestruzzo, considerazioni tecnologiche e di durabilità portano ad utilizzare calcestruzzi di classe più elevata rispetto al c.a. (da C28/35 a C50/60).

Dunque, tenendo conto del range di variabilità della classe di resistenza, si è scelto di applicare tramite *Straus7*, alla faccia di calcestruzzo, una "normal face pressure" di 20 Mpa. In questo modo, limitando lo sforzo al più a 0.6f<sub>ck</sub>, lo stress applicato alla superficie del cubetto di calcestruzzo è tale da rimanere nel campo elastico lineare.

Una volta applicati i vincoli su entrambi gli assi di simmetria e il carico, il modello è completo e appare come in figura.



Figura 126 – Modello completo

### 6.3 Definizione delle proprietà dei materiali

Completata la fase di costruzione del modello, si possono assegnare le proprietà alle entità create. *Straus7* fornisce un catalogo di proprietà dei materiali, dove l'utente può apportare modifiche o creare dei propri cataloghi.

Per assegnare le proprietà del cubetto di calcestruzzo si sono utilizzati i cataloghi precodificati dei materiali. Nell'individuazione del sistema di incollaggio, del tipo di materiale e della forma del supporto si è assegnato al modello un calcestruzzo C32/40. Invece, nel valutare l'influenza del modulo elastico del calcestruzzo sullo spostamento del supporto (vedi §6.6) si sono definite altre due classi di resistenza del calcestruzzo (C40/50 e C50/60).

Per il materiale del supporto, l'identificazione è stata dettata da due caratteristiche fondamentali:

- 1. bassa rigidezza;
- 2. materiale incollabile.

Infatti, il rilascio tensionale a cui è sottoposta la carota di calcestruzzo non deve esser condizionato dal supporto. Ad esempio, l'utilizzo di un disco di acciaio, quindi con un modulo elastico maggiore rispetto a quello del calcestruzzo, impedirebbe il rilascio tensionale della carota rappresentando un vincolo alla carota stessa. Inoltre, è fondamentale l'utilizzo di un materiale incollabile alla superficie porosa del calcestruzzo.

Pertanto, la scelta del materiale del supporto è ricaduta sulle materie plastiche date le buone proprietà di incollaggio, tramite colla a base acqua, e la ridotta rigidezza (i due materiali differiscono per un ordine di grandezza).

Per il supporto, i dati relativi ai materiali sono stati inseriti in una nuova libreria; le tabelle successive riassumono le proprietà definite per i diversi materiali polimerici analizzati.

Polimetilmetacrilato (Plexiglass)	
Peso specifico [kg/m^3]	1200
Modulo Elastico [GPa]	3
Coeff. di Poisson	0.39

Tabella 13 – Caratteristiche meccaniche Polimetilmetacrilato

Policarbonato	
Peso specifico [kg/m^3]	1200
Modulo Elastico [GPa]	2.8
Coeff. di Poisson	0.39

Tabella 14 – Caratteristiche meccaniche Policarbonato

Politetrafluoroetilene (Teflon)		
Peso specifico [kg/m^3]	2200	
Modulo Elastico [GPa]	0.5	
Coeff. di Poisson	0.39	

Tabella 15 – Caratteristiche meccaniche Politetrafluoroetilene

In seguito, è possibile effettuare l'analisi del modello tridimensionale, essendo esso compiutamente definito.

Per ricavare gli spostamenti subiti dalla parte superiore del supporto (libera) e gli spostamenti che subisce il cubetto di calcestruzzo si esegue l'analisi statica lineare.

Lanciato il solutore di Straus, si può passare al post-processing cioè tutte le procedure impiegate per estrarre ed interpretare i risultati ottenuti con l'analisi agli elementi finiti.

*Straus7* consente di eseguire il contour plot (mappe di colore) di tutti i tipi di entità di grandezze, quali spostamenti, tensioni ecc.... Inoltre, per un confronto accurato degli spostamenti si sono ricavati i risultati in forma di listati, cioè un foglio elettronico che consente di scegliere ed ordinare i risultati nodali.

#### 6.4 Analisi della forma del supporto e sistema di incollaggio

Lo scopo di questa modellazione numerica è quello di individuare la configurazione migliore e tecnicamente possibile. Inoltre, lo strumento deve alterare il meno possibile il corpo.

L'analisi viene condotta attraverso un supporto di forma circolare, quindi si analizza l'ovalizzazione del supporto dovuto allo stress applicato al cubetto di calcestruzzo.

Dato il ridotto spessore del supporto polimerico individuato al paragrafo successivo (vedi  $\S 6.5$ ), la realizzazione di un supporto pressoché circolare, attraverso forbici o taglierino, avviene senza difficoltà. Si è esclusa la possibilità un supporto polimerico di forma quadrata, in quanto il cambio brusco di geometria crea delle singolarità, condizionando il comportamento del provino di calcestruzzo. Infatti, nell'angolo del supporto (discontinuità geometria) si ha un punto di concentrazione delle tensioni non volute sul supporto.



Figura 127 – Forma supporto

Individuata la forma del supporto si sono considerate tre condizioni di incollaggio:

- 1. incollaggio a croce;
- 2. incollaggio sul bordo;
- 3. incollaggio uniforme.

Si è scelto di analizzare i primi due sistemi di incollaggio per alterare meno possibile il corpo. Infatti, il supporto tende a irrigidire il calcestruzzo condizionando la deformazione del provino, quindi, la misura risulterebbe falsata.

Nel paragrafo successivo (vedi §6.5) si osserverà come il supporto vincola il calcestruzzo e il suo effetto è tanto maggiore quanto maggiore è lo spessore del supporto.

Le analisi successive, sul sistema di incollaggio, sono state eseguite considerando un supporto di plexiglass e un calcestruzzo C32/40.

#### 6.4.1 Incollaggio a croce

In questo sistema si è considerata la possibilità di realizzare un supporto polimerico che presenta sulla base di incollaggio un "gradino" di spessore millimetrico, tale da consentire l'incollaggio a croce in corrispondenza degli assi di simmetria.



Figura 128 – Incollaggio a croce

Eseguendo l'analisi, si osserva che solo i nodi liberi, in corrispondenza dei nodi incollati alla superficie, presentano degli spostamenti pressoché coincidenti con gli spostamenti del calcestruzzo. Dunque, l'incollaggio a croce è da ritenersi sbagliato in quanto non si vincola tutta la superficie ma solo dei punti. Infatti, si impongono degli spostamenti solo in alcuni punti del supporto, mentre la superficie del calcestruzzo non si comporta in questo modo.



Figura 129 – Dettaglio incollaggio a croce

Nella figura precedente si osserva come i nodi liberi del supporto 1369 e 1379, in seguito all'applicazione del carico, non seguono il corrispondente nodo 16 sul calcestruzzo.

#### 6.4.2 Incollaggio sul bordo

In questo sistema si considera sulla base di incollaggio un "gradino" di spessore millimetrico sul bordo del disco, tale da consentire un incollaggio anulare.



Figura 130 – Incollaggio sul bordo

Il collegamento sul bordo del disco, a differenza dell'incollaggio a croce, è corretto in quanto il bordo trasmette alla parte interna la parte di sforzo. Questo sistema permette di ridurre l'irrigidimento del calcestruzzo, infatti, per ridotti spessori del supporto lo spostamento sulla base libera rispecchia lo spostamento della superficie del calcestruzzo.



Figura 131 – Dettaglio incollaggio sul bordo

#### 6.4.3 Incollaggio uniforme

In questo sistema la base del supporto polimerico non presenta rialzi, ma tutta la superficie è incollata alla superficie porosa del calcestruzzo.



Figura 132 – Incollaggio uniforme

Si osserva che, per ridotti spessori del supporto, il risultato ottenuto è il medesimo del sistema di incollaggio sul bordo.

L'incollaggio uniforme, seppur vincola maggiormente la carota (l'effetto si riduce man mano che lo spessore del supporto è minimo), presenta due vantaggi principali.

Il primo è la non necessarietà di realizzare particolari forme del supporto; infatti, si lascia la base di incollaggio liscia. Il secondo è legato al fatto che, come visto dalle prove di laboratorio (vedi §5.6 - prova 6 - secondo e terzo step di carico), il materiale può scollarsi; pertanto, è preferibile una superficie di incollaggio maggiore.

Data la possibilità di trovare in commercio fogli di materie plastiche con spessori da 0.5 a 10 mm questo sistema di incollaggio non rappresenta un problema, e viene considerato ottimale per queste prove.

### 6.5 Analisi dei materiali a diversi spessori

Il supporto polimerico, destinato all'analisi DIC, verrà incollato sulla superficie di calcestruzzo che subirà il rilascio tensionale inseguito all'operazione di carotaggio. Dunque, la base tramite incollaggio è solidale alla superficie di calcestruzzo e sarà sottoposta allo stesso spostamento. Invece, la parte superiore non è vincolata e il suo spostamento è funzione della rigidezza e dello spessore del supporto.

Nel presente paragrafo si analizzano per i diversi materiali plastici, introdotti al paragrafo § 6.3, e per diversi spessori dei supporti, gli spostamenti dei nodi che congiungono il calcestruzzo e supporto con i nodi superiori liberi del supporto. Dunque, la scelta del materiale e dello spessore si basa sul far coincidere il più possibile questi spostamenti.

Lo spostamento di riferimento è quello lungo la direzione della compressione imposta; in questa modellazione è la direzione Y. Infatti, gli spostamenti sono predominanti in questa direzione e gli spostamenti lungo X, generati per il coefficiente di Poisson, possono esser considerati nulli.

Come si osserva dalla figura successiva, gli spostamenti y sono a "banda" cioè tutti i punti con la medesima y presentano lo stesso spostamento. Ciò rappresenta correttamente lo schiacciamento uniforme del campione.



Figura 133 – Displacement Dy

Come anticipato nel precedente paragrafo, il supporto tende a irrigidire il calcestruzzo condizionando la deformazione del provino. Questo aspetto è rilevabile attraverso la modellazione, infatti, confrontando gli spostamenti dei nodi del blocco di calcestruzzo senza supporto con gli spostamenti dei nodi del calcestruzzo con supporto essi risultano diversi.



Figura 134 – Nodi calcestruzzo sulla base di incollaggio

Nodi cls sulla base di incollaggio	Dy_cls supporto 8 mm [10 <sup>-6</sup> m]	Dy_cls supporto 1 mm [10 <sup>-6</sup> m]	Dy_cls senza supporto [10 <sup>-6</sup> m]
10	26	28	29
17	23	26	27
21	18	21	21
16	17	20	21
27	16	19	20
25	13	15	16
13	12	15	15
24	10	12	13
15	9	12	12
22	8	10	11
26	5	9	9
20	5	7	8
28	4	6	7
23	3	5	6

Tabella 16 – Effetto irrigidente del supporto – calcestruzzo C32/40, supporto di Plexiglass

In particolare, si osserva che l'effetto irrigidente (seppur piccolo data la scelta di un materiale a bassa rigidezza) del supporto è tanto maggiore quanto maggiore e il suo spessore. Infatti, man mano che lo spessore diminuisce il valore dello spostamento sul calcestruzzo aumenta fino a tendere al valore reale. Pertanto, gli spostamenti di riferimento del calcestruzzo sono quelli riferiti a quelli del modello senza supporto per non avere una misura falsata.

Individuati gli spostamenti y di riferimento, essi vengono confrontati con gli spostamenti subiti dai rispettivi nodi della parte superiore del supporto (non vincolata).



Figura 135 – Nodi parte superiore del supporto

Per i diversi materiali individuati, partendo da spessori di 10 mm e via via scendendo fino a 1 mm, si confrontano gli spostamenti in modo da stabilire il materiale e lo spessore che fornisce la lettura realistica. Per lo spessore si è scelto di non scendere al disotto del millimetro, poiché il supporto tenderebbe ad essere troppo sottile e difficile da maneggiare.

La tabella successiva mostra gli spostamenti subiti dal nodo 1371 (vedi figura 135), posto sulla parte superiore libera del supporto, per i diversi spessori delle tre materie plastiche analizzate.

Spessore	Dy_supporto	Dy_supporto	Dy_supporto
[mm]	Plexiglass [10⁻⁶ m]	Policarbonato [10 <sup>-6</sup> m]	Teflon [10 <sup>-6</sup> m]
10	14	14	14
8	19	19	20
5	22	22	23
3	24	24	25
1	28	28	28

Tabella 17 – Spostamenti Dy nodo 1371

Si osserva che, man mano che lo spessore del supporto diminuisce, gli spostamenti tendono a coincidere con lo spostamento di riferimento del calcestruzzo senza supporto, ovvero di 29  $\mu$ m (vedi tabella 16 – nodo 10). Con lo spessore minino di 1 mm si riesce ad avere la lettura più realistica possibile. Inoltre, la variazione del modulo elastico, tra i materiali polimerici considerati, non influenza la misura. Lo spostamento subito dal supporto di teflon (il suo modulo

elastico è sei volte più piccolo del plexiglass) è analogo agli spostamenti degli altri materiali polimerici. Pertanto, con l'impiego di un supporto polimerico (bassa rigidezza) lo spessore gioca il ruolo principale.

#### 6.6 Influenza del modulo elastico del calcestruzzo

In questo paragrafo si conclude lo studio parametrico sul supporto polimerico. Infatti, individuato il sistema di incollaggio, lo spessore e la rigidezza del materiale, si valuta l'influenza del modulo elastico del calcestruzzo sullo spostamento del supporto.

Dunque, fissato il materiale (policarbonato) di spessore di 1 mm con un incollaggio uniforme, si sono attribuiti al blocco di calcestruzzo altre due classi di resistenza, ovvero C40/50 e C50/60.

Come atteso, all'aumentare della classe di resistenza del calcestruzzo gli spostamenti del blocco di minuiscono. Quindi, gli spostamenti di riferimento del blocco di calcestruzzo senza supporto variano al variare della classe di resistenza considerata.

Dal confronto si osserva che la classe di resistenza del calcestruzzo non è determinante sul valore di spostamento.

La figura successiva riporta il confronto degli spostamenti tra il nodo 10 (vedi figura 134), sulla base di incollaggio, e il corrispondente nodo 1371 (vedi figura 135), sulla parte superiore del supporto, per le tre classi di resistenza del calcestruzzo.

Benché minimo, più il calcestruzzo è resistente minore è l'errore nella misura.



Figura 136 – Confronto degli spostamenti Dy (nodi 10 -1371) al variare della resistenza f<sub>ck</sub> del calcestruzzo

#### 6.7 Osservazioni

Dalla presente modellazione numerica, la scelta di un supporto polimerico (bassa rigidezza), di spessore 1 mm e con incollaggio uniforme sulla superfice del calcestruzzo, consente di ottenere ottimi risultati senza la necessità di apportare correzioni.

Come visto nel paragrafo §3.5, realizzato lo speckel pattern sul supporto esso verrà fotografato per ottenere l'immagine di riferimento. Questa operazione verrà eseguita in laboratorio a condizioni di temperatura controllata. In situ, il supporto sarà incollato alla superficie della trave da ponte in c.a.p. e verrà effettuata la prova di detensionamento su calcestruzzo tramite carotatrice. Dunque, in cantiere la carota di calcestruzzo e il supporto polimerico subiranno la stessa contrazione in seguito al rilascio tensionale a determinate condizioni di temperatura. Riportando il supporto polimerico, solidale alla carota, in laboratorio per ottenere le immagini deformate, il supporto polimerico e la carota di calcestruzzo sono sottoposti a una variazione di temperatura. Quindi, bisogna tener conto degli stress indotti sul supporto dovuti al riscaldamento della carota strumentata, in quanto i due corpi si deformano in maniera differente (in funzione del coefficiente di dilatazione termica) sottoposti a una stessa variazione di temperatura.

Perciò, nell'analisi DIC si confrontano due immagini differenti e nella differenza bisogna prendere in considerazione anche gli effetti legati alla temperatura.

Detto ciò, la scelta del materiale polimerico ricade per motivi termici sul politetrafluoroetilene (PTFE), comunemente chiamato teflon. Infatti, il teflon ha un coefficiente di dilatazione termica comparabile con il calcestruzzo e ciò evita la nascita di stress interni dovuti alla temperatura.

Coeff. di dilatazione termica - $\alpha$	[mm/m°C]
Calcestruzzo	0.012
Politetrafluoroetilene (Teflon)	0.014
Polimetilmetacrilato (Plexiglass)	0.06
Policarbonato	0.065

Tabella 18 – Coefficiente di dilatazione termica

L'utilizzo principale del politetrafluoroetilene, per il 50% della produzione, è nel cablaggio di applicazioni aerospaziali e informatiche. Viene ampiamente utilizzato nelle applicazioni industriali come, ad esempio, nelle piastre di scorrimento o ingranaggi. Nell'industria chimica è adoperato per la realizzazione di guarnizioni e parti destinate al contatto con agenti corrosivi. Si trovano in commercio fogli di teflon di spessori variabili dai 10 ai 0.5 mm, e colle bicomponenti che consentono l'unione di materiali dissimili e difficili da legare.

# 7 Calcolo a posteriori della precompressione

Nel presente capitolo si valuterà lo stato di efficienza del sistema di precompressione. Infatti, a partire dallo studio dello stato tensionale sulla superficie del supporto polimerico, si può risalire alla tensione di precompressione residua all'interno della struttura in una data sezione. La stima della perdita di precompressione di un elemento strutturale è indispensabile per una corretta valutazione delle condizioni di lavoro, e quindi di sicurezza, di una struttura. Attraverso una back analysis, con il risultato della prova di rilascio e informazioni sulla geometria e carpenteria della trave, è possibile individuare il tiro del P<sub>i-esimo</sub> cavo e la perdita ad esso associata.

Si consideri la fase di esercizio (t =  $\infty$ ) di una trave a cavi scorrevoli in semplice appoggio di luce L.



Figura 137 – Schema statico

In questo caso la precompressione, come tutte le coazioni, non determina sollecitazioni reattive come invece avviene in strutture iperstatiche. Inoltre, nel caso in esame di post-tensione, che prevede tesature successive, si prevede sia la riduzione del tiro del cavo durante la messa in tensione (t=0), sia la variazione nel tempo a causa dei fenomeni reologici (t>0), ovvero, ritiro e fluage del calcestruzzo e rilassamento dell'acciaio.

Dunque, nella fase di esercizio  $(t = \infty)$  si sono scontate sia le perdite di tensione (t=0) che le cadute di tensione (t>0). Inoltre, la trave è sottoposta ai carichi permanenti strutturali e ai carichi permanenti non strutturali (pavimentazione, cordoli, barriere di ritenuta ecc...).

In ogni sezione la distribuzione delle tensioni normali, associata ai carichi esterni, assume il classico andamento a "farfalla", con valori nulli in corrispondenza dell'asse neutro e tensioni di compressione al lembo superiore e di trazione al lembo inferiore (flessione semplice).

Mentre, lo stato tensionale dovuto alla precompressione, di una generica sezione dipende dalla posizione in cui viene posizionato il cavo. Tendenzialmente il cavo nella sezione critica, dove si ha il massimo momento flettente esterno, avrà la massima eccentricità. Invece, nel caso di pretensione, il tracciato dei cavi è costante, allora il momento di precompressione e lo sforzo normale di precompressione sono costanti lungo tutta la trave a meno che si sia effettuato l'intubettamento di trefoli tale da non far sviluppare aderenza.

Sia  $N_p$  il carico di precompressione con eccentricità "e" nella generica sezione. La precompressione non induce una compressione uniforme sulla sezione ma uno sforzo normale eccentrico. Lo stato tensionale indotto dalla precompressione, infatti è di presso-flessione (flessione composta). Le sollecitazioni si ottengono sovrapponendo gli effetti della semplice flessione e dello sforzo assiale dovuti al carico di precompressione  $N_p$ = - P.

Nel dettaglio, le tensioni dovute alla precompressione determinano delle tensioni di segno opposto a quelle a cui è soggetta la struttura per effetto del momento esterno. Infatti, in intradosso si sviluppa una tensione di compressione, mentre in estradosso nasce una tensione di trazione.

La figura successi riporta le distribuzioni delle tensioni normali relative alle diverse sollecitazioni.

Per semplicità di calcolo si considera il 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.



Figura 138 – Stato tensionale dovuto alla precompressione più carichi gravitazionali sezione di mezzeria

Nella figura precedente, il diagramma finale delle tensioni è tutto di compressione, ovvero, sotto il carico di esercizio non si manifestano tensioni di trazione (precompressione integrale). Si potrebbero avere delle tensioni di trazione al lembo inferiore nella trave, per effetto del carico di esercizio. Affinché la sezione sia interamente reagente esse non devono superare la resistenza di trazione caratteristica  $f_{ctk}$ . Infatti, se la tensione supera questo limite la precompressione è parzializzata, quindi l'opera lavora in regime fessurato.

In linea generale è preferibile avere in condizioni di esercizio un diagramma con tensioni di trazione nulle.

In condizioni di esercizio vale il principio di sovrapposizione degli effetti. In corrispondenza della generica fibra y dal baricentro la tensione  $\sigma_y$  vale:

$$\sigma_y = \frac{M}{J_X}y + \frac{N_p}{A} + \frac{M_p}{J_X}y$$

dove:

- A è l'area della sezione di calcestruzzo;
- J<sub>x</sub> è il momento d'inerzia rispetto all'asse di flessione, calcolato con distanze parallele all'asse di sollecitazione;
- y è la distanza dall'asse di flessione.

Se la struttura è isostatica, le sollecitazioni che nascono dipendono solo dal tiro del cavo, dalla sua inclinazione e dalla sua eccentricità, quindi vale che:

$$N_p = -P$$
$$M_p = -P \ e$$

dove:

- P è il tiro del cavo risultante;
- "e" è l'eccentricità del punto di applicazione dello sforzo di compressione rispetto al baricentro.

Sostituendo le relazioni nella precedente espressione si ottiene:

$$\sigma_y = \frac{M}{J_X}y - \frac{P}{A} - \frac{P}{J_X}y$$

Dunque, si può ricavare il tiro P del cavo risultante attraverso la seguente relazione:

$$P = \left(\frac{M}{J_X}y - \sigma_y\right) \left(\frac{A \ J_X}{J_X + A \ e \ y}\right)$$

Dalla prova di rilascio tensionale, ricavata la deformazione  $\varepsilon$  subita dalla porzione isolata mediante carotaggio, si ricava la tensione in situ nella struttura sotto l'azione dei carichi permanenti e della precompressione. Infatti, noto il modulo elastico E del calcestruzzo; ricavabile attraverso prove Pull-out eseguite in prossimità dei punti di monitoraggio o prova di compressione eseguita sulla carota stessa (dal Rc del materiale in sito ricaviamo E attraverso la relazione fornita dalle norme tecniche), è possibile ricavare la tensione  $\sigma$  agente attraverso la legge di Hooke:

$$\sigma = E \epsilon$$
Pertanto, conoscendo la quota y di prelievo della carota, si associa ad essa il rispettivo valore di tensione.

$$\sigma_y = E \varepsilon$$

In generale, le travi da ponte sono state progettate da rimanere uno stato di compressione per i carichi di esercizio. Dunque, stimare dalle prove di rilascio tensionale sul calcestruzzo valori di tensione di compressione è un indice di buon funzionamento del sistema di precompressione.

Come visto al paragrafo §3.3, la prova è eseguita al di sopra il bulbo inferiore e sulla faccia interna dell'anima della trave in modo che la superficie di prova sia meno degradata. Inoltre, la prova viene preceduta da un rilievo accurato dell'armatura di precompressione utilizzando misure pacometriche (ECT) o radar (GPR) in modo da conoscere e verificare l'assenza di armature lente e cavi di precompressione.

La posizione ottimale per eseguire la prova è nella sezione di mezzeria, dove il valore di momento flettente è massimo e il taglio è nullo.

Nella sezione critica della trave precompressa considerata, sia g il carico permanente strutturale e q il carico permanente non strutturale, il massimo valore del momento agente vale:

$$M_{max} = \frac{(g+q)l^2}{8}$$

Nel caso più complesso, ad esempio di un impalcato a graticcio con travi precompresse è opportuno adottare metodi semplificativi, come il metodo di Courbon, per calcolare la ripartizione dei carichi sulle travi longitudinali. Oppure, sviluppare una modellazione agli elementi finiti, tale da riprodurre fedelmente la sezione trasversale e longitudinale dell'opera, in modo da conoscere lo stato di sollecitazione della trave in esame.

Pertanto, conoscendo lo stato tensionale (attraverso la prova di rilascio tensionale sul calcestruzzo), la geometria e carpenteria della trave (da tavole di progetto o rilievi) e lo stato di sollecitazione attuale della trave (se necessario attraverso modellazione agli elementi finiti), si stima il tiro P del cavo risultante applicato nel baricentro del sistema dei cavi. Siccome il tiro del cavo risultante in ogni sezione è pari alla risultante dei tiri, che si hanno nei singoli cavi, si possono ricavare i singoli contributi P<sub>i</sub> dei cavi costituiti da n. trefoli.

Noti il tiro stimato sul singolo cavo e il tiro iniziale sul singolo cavo (tiro di progetto a perdite di tensione scontate (t=0)) si calcola la perdita associata:

$$Perdita \, effettiva \, [\%] = \, \left(1 - \frac{P_{stimato}}{P_{iniziale}}\right)$$

Si fa osservare che la perdita è legata al singolo cavo e non al cavo risultante che identifica lo stato tensionale.

Per valutare lo stato di efficienza del sistema di precompressione, si può confrontare la perdita effettiva con le perdite di tiro stimate in fase di progetto. Infatti, in fase di progetto pet  $t=\infty$ , si tiene conto che la forza di precompressione, oltre alle perdite di tensione (legate solo alla post-tensione), subisce ulteriori variazioni nel tempo a causa dei fenomeni reologici del calcestruzzo (ritiro e fluage) e del rilassamento dell'acciaio.

Si ricava il tiro finale di progetto tenendo conto che la variazione di tensione nel cavo  $\Delta \sigma_p$  è in parte proporzionale alla variazione di deformazione del calcestruzzo  $\Delta \varepsilon_c$  a livello del cavo tramite il modulo elastico dell'acciaio da precompressione  $E_{sp}$ , ed in parte dovuta alla variazione di tensione nell'acciaio dovuta al rilassamento  $\Delta \sigma_{ril}$ .

$$\Delta \sigma_{\rm p} = \Delta \varepsilon_{\rm c} \, \mathrm{E}_{\rm sp} + \Delta \sigma_{\rm ril}$$

In particolare, la variazione di deformazione del calcestruzzo  $\Delta \varepsilon_c$  a livello del cavo (per planarità della sezione coincide con la deformazione dell'acciaio nel cavo) si esprime come somma di tre contributi:

- $\varepsilon_{c,sh}$  ritiro del calcestruzzo, valutato dalla tesatura in poi;
- ε<sub>c,c</sub> variazione di deformazione nel calcestruzzo per effetto del fluage nell'ipotesi che la tensione σ<sub>c0</sub> sia costante nel tempo;
- deformazione totale (elastica + viscosa) nel calcestruzzo a livello del cavo dovuta alla variazione di tensione Δσ<sub>c</sub> che il calcestruzzo subisce a seguito della variazione di precompressione cercata. In considerazione del fatto che la variazione di tensione Δσ<sub>c</sub> non interviene all'istante t<sub>0</sub>, ma è spalmata nel tempo, la relativa deformazione viscosa è ridotta tramite il coefficiente di invecchiamento χ.

Dunque, la variazione di deformazione del calcestruzzo  $\Delta \varepsilon_c$  è data da:

$$\Delta \varepsilon_c = \varepsilon_{c,sh} + \sigma_{c0} \frac{\varphi(t,t_0)}{E_c} + \Delta \sigma_c \left[ \frac{1}{E_c} + \chi \frac{\varphi(t,t_0)}{E_c} \right]$$

dove:

- $\varphi(t,t_0)$  è il coefficiente di fluage al tempo t per carico applicato al tempo  $t_0$ ;
- E<sub>c</sub> è il modulo elastico del calcestruzzo;
- σ<sub>c0</sub> / E<sub>c</sub> è la deformazione elastica dovuta alla tensione iniziale a perdite scontate (t=0) del calcestruzzo a livello del cavo σ<sub>c0</sub>;
- $\chi$  è il coefficiente di invecchiamento.

Per di più, la variazione di tensione nel calcestruzzo a livello del cavo  $\Delta\sigma_c$  è funzione della variazione della sollecitazione  $\Delta N_p e \Delta M_p$  a loro volta funzione della variazione del tiro nel cavo  $\Delta P = \Delta \sigma_p A_p$ .

Quindi, nella sezione di interesse la variazione di forza nel cavo dà luogo a una variazione di sollecitazione pari a:

$$\Delta N_P = -\Delta \sigma_P A_P$$
$$\Delta M_P = -\Delta \sigma_P A_P z_P$$

Dunque, la variazione di tensione nel calcestruzzo a livello del cavo  $\Delta \sigma_c$  vale:

$$\Delta \sigma_c = \frac{\Delta N_P}{A_c} + \frac{\Delta M_P}{J_c} z_{cp} = -\left(\frac{\Delta \sigma_P A_P}{A_c} + \frac{\Delta \sigma_P A_P z_{cp}}{J_c} z_{cp}\right)$$

dove:

- z<sub>cp</sub> è la distanza fra il cavo e il baricentro della sezione;
- A<sub>p</sub> è l'area totale dei cavi di precompressione nella sezione in esame;
- A<sub>c</sub> è l'area di calcestruzzo nella sezione in esame;
- Δσ<sub>c</sub> assume valore negativo se corrisponde ad una tensione di trazione (ovvero ad una diminuzione di precompressione).

Per tutto ciò, la variazione di tensione nel cavo  $\Delta \sigma_p$  vale:

$$\Delta \sigma_p = \frac{E_{sp} \varepsilon_{c,sh} + \alpha \sigma_{c0} \varphi(t, t_0) + \Delta \sigma_{ril}}{1 + \alpha \frac{A_P}{A_c} \left(1 + \frac{A_c z_{cp}^2}{J_c}\right) (1 + \chi \varphi(t, t_0))}$$

dove:

•  $\alpha = \frac{E_{sp}}{E_c}$  è il coefficiente di omogeneizzazione dell'acciaio da precompressione.

Nella relazione, il termine di rilassamento  $\Delta \sigma_{ril}$  dipende da  $\Delta \sigma_{p}$ ; occorre quindi instaurare un ciclo iterativo.

In alternativa, l'EC2 per evitare il calcolo del ciclo iterativo, considera 0,8  $\Delta \sigma_{ril}$  in luogo di  $\Delta \sigma_{ril}$  e assume il coefficiente di invecchiamento pari a  $\chi = 0.8$  (coefficiente usato per il calcolo della  $\Delta \varepsilon_c$ , che tiene conto della graduale variazione tensionale nel tempo).

Pertanto, ricavata la variazione di tensione per le cadute di tensione, nota la tensione iniziale a perdite scontate (t=0) e l'area  $A_p$ , si ricava il tiro finale di progetto a cadute di tensione scontate (t= $\infty$ ).

Dunque, noto il tiro finale di progetto sul singolo cavo ( $t=\infty$ ) e il tiro iniziale sul singolo cavo (tiro di progetto a perdite di tensione scontate (t=0)) si calcola la perdita di tiro valutata in fase di progetto:

Perdita di tiro stimate in fase di progetto [%] = 
$$\left(1 - \frac{P_{finale \ di \ prog}}{P_{iniziale}}\right)$$

In questo modo è possibile valutare se le perdite di precompressione stimate sono compatibili con quelle previste dal progettista.

Sovrabbondanti perdite sono da imputare a fenomeni di degrado del cavo, dovuti a un'errata realizzazione dei dettagli costruttivi dei sistemi di protezione dei cavi (mano d'opera non specializzata) e l'utilizzo di materiali non idonei.

Nel caso si riscontrassero delle perdite di tiro eccesive è necessario predisporre degli interventi di manutenzione, quali ritesatura della trave (dove possibile) o sostituzione della stessa.

## 8 Conclusioni e sviluppi futuri

L'oggetto di studio della tesi proposta ha riguardato la valutazione del valore di precompressione residua negli impalcati a graticcio con travi precompresse. Difatti, l'utilizzo di tecniche convenzionali di indagine e le ispezioni visive non consentono di definire un livello di conoscenza idoneo sulle condizioni attuali di degrado di queste strutture. La maggior difficoltà nella conoscenza del livello di degrado strutturale è l'impossibilità di accesso diretto e in maniera non invasiva alle armature da precompressione.

Sebbene i fenomeni di degrado, che determinano un decadimento della precompressione nelle strutture in c.a.p., si sviluppino nel tempo, i segnali di pericolo che la struttura mostra sono estremamente deboli ("Weak Signals"). Dunque, gli spostamenti e le deformazioni di queste strutture, rigide e massicce, sono eccessivamente piccoli, tali da non consentire una semplice deduzione della crisi strutturale. La costruzione di opere in c.a.p. nel passato, spesso presenta un'errata realizzazione dei dettagli costruttivi e dei sistemi di protezione dei cavi. Infatti, l'utilizzo di materiali non idonei e di mano d'opera non specializzata ha portato a conseguenze negative in termini di durabilità delle strutture.

Nei primi capitoli del presente elaborato di tesi si sono evidenziate le caratteristiche principali e criticità generali di queste opere, descrivendo le cause e i difetti caratteristici degli elementi strutturali in cemento armato precompresso. Inoltre, si sono investigati i diversi metodi utilizzati per la valutazione della precompressione residua, rilevando che i metodi basati sulla misura della variazione di deformazione sono oggi diffusamente utilizzati nel monitoraggio della forza di precompressione nella strutture in c.a.p.. Infatti, le prove di detensionamento sul calcestruzzo o sui treofoli/fili, basandosi sul rilascio dello stato tensionale, consentono di conoscere lo stato attuale di compressione della trave sotto i carichi permanenti e peso proprio.

Il cuore della tesi ha riguardato lo sviluppo di una nuova metodologia di prova, ovvero la determinazione del valore di precompressione residua attraverso il rilascio dello stato tensionale in combinazione alla Digital image correlation (DIC). Dunque, la proposta consiste in una prova di rilascio tensionale su calcestruzzo sostituendo gli estensimetri con un supporto circolare in materiale polimerico. In questo modo, sfruttando la tecnologia ottica come metodo di misura senza contatto, si determinano i campi di spostamento e deformazione delle superfici analizzate, andando a ridurre gli errori di misura causati dalla disomogeneità del calcestruzzo. Inoltre,

l'impiego di un supporto polimerico, a differenza degli estensimetri, non richiede né particolare trattamento della superficie di incollaggio né il montaggio e protezione della strumentazione nell'area centrale, che potrebbe esser danneggiata durante la fase di carotaggio. Per tutto ciò, l'analisi di correlazione di immagini digitali, dati i suoi vantaggi, è stata utilizzata per la determinazione della deformazione e della sollecitazione che ne deriva.

In particolare, si è effettuata una correlazione di immagini digitali su provini strumentati con il supporto polimerico e sollecitati, tramite pressa idraulica, a prefissati valori di tensione. I risultati ottenuti attraverso l'analisi DIC, per i diversi speckle pattern analizzati, sono del tutto promettenti dato il ravvicinato valore a quello di riferimento. Infatti, l'errore commesso nella misura della deformazione, attraverso il metodo ottico, è risultato per tutte le prove e per ogni step di carico inferiore al 12% rispetto al valore di riferimento (escludendo i valori errati di deformazione della prova sei, in cui è avvenuta la separazione tra la superficie del supporto polimerico e del calcestruzzo). Pertanto, lo scopo di questo lavoro di tesi, ovvero la stima dello stato tensionale attraverso il supporto polimerico su scala di laboratorio, tramite il confronto della deformazione di riferimento DIC, è stato raggiunto.

Nell'ultima parte della tesi, la modellazione numerica del supporto ha consentito di eseguire uno studio parametrico, tale da individuare la condizione "ideale" che consente di rispecchiare identicamente sul supporto la deformazione subita dalla carota di calcestruzzo a seguito del rilascio tensionale. L'analisi dei risultati ottenuti ha condotto alla scelta di un supporto polimerico (bassa rigidezza), di spessore 1 mm e con incollaggio uniforme. Come materiale polimerico è stato indicato il politetrafluoroetilene (PTFE), comunemente chiamato teflon, in quanto il suo coefficiente di dilatazione termica, comparabile con il calcestruzzo, evita la nascita di stress interni dovuti alla temperatura.

Il presente lavoro si è concluso tramite una back analysis, per individuare in una trave in c.a.p. il tiro del P<sub>i-esimo</sub> cavo e la perdita ad esso associata. Infatti, a partire dal risultato della prova di rilascio tensionale su calcestruzzo (studio dello stato tensionale sulla superficie del supporto polimerico), conoscendo la geometria, la carpenteria (da tavole di progetto o rilievi) e lo stato di sollecitazione attuale della trave (se necessario attraverso modellazione agli elementi finiti) si stima la perdita effettiva del cavo in esame. Perciò, qualora le perdite di tiro fossero eccessive, è necessario predisporre tempestivamente interventi di manutenzione, quali ritesatura delle travi, dove possibile, o sostituzioni delle stesse.

È auspicabile, una volta noto lo stato di compressione attuale della struttura, di attivare un monitoraggio continuo della variazione di compressione, tale da consentire lo sviluppo di degrado dell'opera. In questo modo, fissato un valore come soglia d'allarme della precompressione, qualora fosse oltrepassato, si devono predisporre interventi di manutenzione. Gli studi effettuati sono aperti a nuove analisi col fine di approfondire ulteriori aspetti:

- Confrontare i valori stimati con l'analisi DIC con ulteriori valori di deformazioni, ricavati tramite estensimetri applicati nella faccia opposta a quella su cui si è incollato il supporto polimerico, migliorando in tal modo la stima dell'errore commesso. Nel presente elaborato i valori di riferimento sono stati ricavati dal valore di sforzo da prova e il modulo elastico da normativa del calcestruzzo dei provini.
- 2. Sottoporre dei provini a compressione monoassiale, quindi, noto lo stato tensionale e il relativo stato deformativo, valutare l'eventuale profondità di carotaggio in cui si sviluppa il completo rilascio tensionale. Di conseguenza, si individua una profondità di carotaggio che permetta di rilevare, attraverso l'analisi DIC, lo stato deformativo corrispondente alla precompressione e ai carichi esterni. Infatti, è preferibile evitare l'operazione di carotaggio completa, al fine di non danneggiare eccessivamente la trave nelle sezioni critiche, ovvero le sezioni di mezzeria dove la sollecitazione è massima.

## **Bibliografia**

[1] Giordano L. – Slide del corso di Teoria e progetto delle costruzioni in c.a. e c.a. precompresso, Politecnico di Torino, 2020.

[2] Giordano L. – Slide del corso di Bridges construction and design, Politecnico di Torino, 2020.

[3] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Dipartimento per le Infrastrutture, i Sistemi Informativi e Statistici. *Conto Nazional delle Infrastrutture e dei Trasporti*.

[4] ANAS – Ispezione approfondita di impalcati da ponte con travi in c.a.p. a cavi post-tesi - aprile 2020.

[5] Decreto-legge 16 luglio 2020, n. 76 (in S.O. n. 24/L alla Gazzetta Ufficiale - Serie generale - n. 178 del 16 luglio 2020), coordinato con la legge di conversione 11 settembre 2020.

[6] Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti - *Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti* - 17 aprile 2020.

[7] ANAS – Manuale di ispezione principale di ponti e viadotti – 2018.

[8] Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti – *Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti, allegato C. schede difettologiche.* - 17 aprile 2020.

[9] Noble D, Nogal M, O'Connor A, Pakrashi V. - *The effect of post-tensioning force magnitude and eccentricity on the natural bending frequency of cracked post-tensioned concrete beams.* 

[10] Kim, Jeong-Tae. - *Smart PZT-interface for wireless impedance-based prestress-loss monitoring in tendon-anchorage connection* - Smart Structures and Systems, vol. 9, no. 6, pp. 489–504, Jun. 2012.

[11] Zonta D, et al.- *Calibration of elasto-magnetic sensors for bridge-stay cable monitoring* - Proc 6th Eur Workshop Struct Health Monit. 2012.

[12] Hiba Abdel, Jaber Branko Glisic - *Monitoring of prestressing forces in prestressed concretestructures*.

[13] Chaki S, Bourse G. - Stress level measurement in prestressed steel strands using acoustoelastic effect - Exp Mech. 2009.

[14] Washer GA, Green RE, Pond RB -Velocity constants for ultrasonic stress measurement in prestressing tendons - Res Nondestr Eval. 2002.

[15] Barr PJ, Kukay BM, Halling MW - *Comparison of Prestress Losses for a Prestress Concrete Bridge Made with High-Performance Concrete* - Journal Of Bridge Engineering ASCE/ september/october 2008.

[16] David B. Garber, José M. Gallardo, Dean J. Deschenes, and Oguzhan Bayrak - *Experimental Investigation of Prestress Losses in FullScale Bridge Girders* - ACI STRUCTURAL JOURNAL, Title No. 112-S45.

[17] Junqi Gao, Bin Shi, Wei Zhang, Hong Zhu - *Monitoring the stress of the post-tensioning cable using fiber optic distributed strain sensor* - Measurement, Volume 39, Issue 5, 2006.

[18] Kim, S.T.; Park, Y.; Park, S.Y.; Cho, K.; Cho, J.-R. - A Sensor-Type PC Strand with an Embedded FBG Sensor for Monitoring Prestress Forces - Sensors 2015, 15, 1060-1070.

[19] Martinello S. – *Strutture in calcestruzzo-Tecniche di misura dello stato tensionale* – leStrade 4/2021.

[20] Pavan T.; Sartor S. - Prove di rilascio tensionale-Campagna di indagini sui materiali e di prove di rilascio tensionale sugli elementi strutturali di un viadotto a 17 campate - Prove speciali 4 Emme Service Spa.

[21] 4 Emme Service Spa - Capitolato-Prove di diagnostica strutturale - 2021.

[22] Y.L. Dong & B. Pan - A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment.

for Digital Image Correlation - Experimental Mechanics (2017) 57:1161–1181.

[23] William N. Sharpe, Jr. - Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics - Sharpe Editor.

[24] J. Blaber, B. Adair, and A. Antoniou - *Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software* - Experimental Mechanics (2015).

[25] Jianlong Zhao, Yong Sang, Fuhai Duan - *The state of the art of two-dimensional digital image correlation computational method* - Engineering Reports. 2019;1: e12038.

[26] Satoru Yoneyama - *Basic principle of digital image correlation for inplane displacement and strain measurement* - Advanced Composite Materials, 25:2, 105-123.

[27] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - *Norme Tecniche per le Costruzioni* - Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018.

[28] Justin Blaber, Antonia Antoniou - *Ncorr, Instruction Manual* - Version 1.2.2 6, Georgia Institute of Technology, 6/13/2017.

[29] G+D Computing Pty Ltd - Guida all'uso di Straus7, sistema per l'analisi ad elementi finiti
- 1ª edizione novembre 1999



## **POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Nicola Labanca Anno Accademico 2021/2022