



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale di Ingegneria Civile

A.a. 2022/2023

Sessione di Laurea Ottobre 2023

Ispezioni speciali di travi in c.a.p. (calcestruzzo armato precompresso) esistenti

Revisione ed Analisi

Relatori:

Civera Marco
Chiaia Bernardino
Piscini Andrea

Candidato:

Comoglio Igor

Indice

Ringraziamenti	1
Introduzione	2
1. Calcestruzzo armato precompresso e le travi in c.a.p. a cavi post tesi	3
1.1. Introduzione	3
1.2. Cenni storici	4
1.3. Descrizione tecnica del c.a.p.	5
1.3.1. C.a.p. a cavi post tesi	5
1.3.1.1. Tipologie di ancoraggi e sistemi di tensionamento dei cavi	7
1.4. Conservazione degli elementi in c.a.p. a cavi post-tesi	11
1.5. Considerazioni finali	11
2. Ispezioni Speciali di travi in c.a.p.: introduzione alle Linee Guida	12
2.1. Introduzione (all'ispezione speciale)	12
2.2. Fase 0	13
2.2.1. Analisi storico-critica	14
2.2.2. Analisi dei difetti e dei rischi connessi	15
2.2.3. Individuazione del tracciato dei cavi tramite prove non distruttive: GeoRadar	19
2.2.4. Determinazione del numero di campioni e della loro localizzazione	19
2.3. Fase 1	22
2.3.1. Indagine del campione per la localizzazione e quantificazione dei difetti	22
2.3.1.1. Indagini tomografiche	22
2.3.1.2. Endoscopie	24
2.3.2. Valutazione preliminare della probabilità di corrosione	25
2.4. Fase 2	26
2.4.1. Analisi accurata dei difetti	26
2.4.1.1. Saggio diretto	27
2.4.2. Valutazione della probabilità di corrosione	28

2.4.3. Valutazione tensione locale del calcestruzzo e dell'acciaio da precompressione	29
2.4.3.1. Tensione locale del calcestruzzo: metodo del rilascio tensionale	29
2.4.3.2. Tensione dell'acciaio da precompressione: diffrazione a raggi X	30
2.5. Fase 3	31
2.6. Valutazione accurata	32
2.6.1. Determinazione del numero di prove	32
2.6.2. Procedimento per l'esecuzione delle prove	34
2.6.3. Stima dell'area residua e della tensione ultima dell'acciaio da precompressione	35
3. Analisi statistica dei risultati delle prime ispezioni speciali condotte da SINA	38
3.1. Introduzione	38
3.2. Fase 0	39
3.3. Fase 1	39
3.3.1. Video-Ispezioni	40
3.3.1.1. Analisi per singolo elemento	40
3.3.1.2. Analisi Incrociate	48
3.3.2. Tomografia	53
3.4. Fase 2	56
3.4.1. Prove di Rilascio Tensionale	57
3.4.2. Prove Diffratometriche	64
3.4.2.1. Analisi solo sulle prove Diffratometriche	65
3.4.2.2. Analisi incrociate	68
3.5. Valutazione accurata	75
3.5.1. Prove Durometriche	75
4. Commenti finali e Conclusioni	80
4.1. Commenti finali	80
4.2. Conclusioni	81
5. Bibliografia	83

Ringraziamenti

Chi mi conosce si aspetterà qualcosa di completamente fuori dall'ordinario in questo "capitolo". E vi devo dire (ti devo dire) che sicuramente avrà un'impronta tale da rappresentare il mio pensiero nella forma più genuina. Non mi sento particolarmente bravo nel dimostrare il mio affetto e la mia gratitudine alle persone che mi circondano e che mi sostengono, o mi hanno sostenuto, in questi anni. Potrei passare le prossime righe inventandomi nomi, persone e storie giusto per il mio sollazzo, o non scrivere nulla affatto e concentrare l'attenzione esclusivamente sul contenuto principale di questo elaborato. Ma non lo troverei giusto nei confronti di chi ci tiene veramente al mio compimento di questo lungo e doloroso percorso.

Prima di addentrarmi nella sfera più personale, ci terrei innanzitutto a ringraziare il Politecnico e SINA per avermi dato la possibilità di poter lavorare per la mia tesi su questo progetto, nella speranza che possa risultare anche in minima parte utile per il continuo sviluppo dei monitoraggi strutturali in Italia. Ringrazio anche i relatori Civera Marco e prof. Chiaia Bernardino, per esservi preso l'incarico di seguirmi in quest'ultimo step per completare il mio percorso universitario al Politecnico. Un particolare grazie va riservato all'altro relatore e mio tutor anche durante il mio percorso da Tirocinante in SINA, l'ing. Piscini Andrea, per tutto il tempo che ha dedicato nei miei percorsi da tirocinante e tesista, nonostante il poco tempo a sua disposizione. Senza di lui non sarei stato in grado di poter realizzare neanche un decimo di questo elaborato. Ringrazio anche i ragazzi della sede di strada della Cebrosa di SINA, per avermi accolto come uno di loro e sostenuto, anche se per un breve periodo di tempo.

Ho avuto l'immensa fortuna e il grande onore di essere circondato da persone fantastiche che, nel bene e nel male, mi hanno aiutato a crescere e supportato, oltre che sopportato, nel mio percorso formativo, che sia scolastico o personale. Vorrei citare ognuno di voi, sempre nel mio modo di fare strano ed assurdo, alludendo ad ogni persona un fatto strano o particolare che, in alcuni casi, potrei ricordare solamente io, ma dovrei scrivere un'altra tesi da 150 pagine solo per i ringraziamenti. Per la pietà dei pochi e poveri pazzi lettori che sono arrivati fino a questo punto, ai quali faccio i miei complimenti, cercherò di essere più sintetico possibile, cosa non facile per il sottoscritto. Ringrazio tutta la mia famiglia, che a prescindere che siano i miei genitori, la mia brutta sorellina e i miei nonni veneziani come pochi, o i miei cugini/zii/pro zii mi hanno sempre sostenuto, incoraggiato e dimostrato affetto in qualsiasi situazione. Ringrazio tutti quelli che posso definire orgogliosamente miei amici, e che mi reputano un loro amico, che siano i pazzi birbanti del Granducato di Fottonia e le sambuche moleste di "Zieng", o i ragazzi "spinetensi" e le infinite partite nei mille mila giochi (da tavolo e non) che hanno arricchito ogni ritrovo nelle varie taverne e garage, così come gli amici di Torino, tra i miei coinquilini, vecchi e nuovi, che hanno sopportato mentre cercavo di capire come si cucina un piatto che non sia solamente pasta pesto e pancetta, e i compagni di avventure esotiche, tra "tamango" ed "R", che mi hanno preso a schiaffi quando serviva. Un ringraziamento speciale va a quel gruppo di scappati di casa che è la Yama Arashi, che mi hanno fatto sentire parte di una seconda famiglia e che non cambierei per nulla, nonostante non possiamo più entrare in metà dei locali del torinese (e tra un mese pure romagnoli). Ci sono così tante persone che vorrei andare a dire grazie personalmente e che sicuramente ho omesso, non perché sono insensibile ma perché siete troppi e io sono troppo pigro. Ma vorrei dedicare due parole per due persone speciali che oramai non ci sono più, le quali hanno contribuito così tanto nel mio percorso di vita che non averle al mio fianco per la fine dei miei studi e l'inizio della mia seconda vita da lavoratore mi rende triste. Mia nonna Giuliana, e mia zia Franca, due delle persone più altruiste, gentili, affettuose e generose che io abbia mai conosciuto e che hanno dato tutto ad un ragazzino che aveva ed ha tanto talento quanto una roccia in una competizione di atletica leggera, permettendogli di provare, sperimentare e realizzare sogni impossibili e improbabili. Mi piacerebbe poter vedere le loro facce mentre dimostro che hanno avuto ragione ad investire su di me e che ha fruttato più di quanto immaginavano. Però, con il pensiero che a prescindere di dove saranno mi daranno sempre il loro sostegno, mi aiuta e mi aiuterà ad affrontare i miei prossimi passi. Per questo ed altro, non posso che dirvi grazie. E questo vale per tutte le persone nella mia vita. Grazie per credere in me, grazie per valutarmi e considerarmi parte del vostro ecosistema, grazie per rendermi felice e partecipe di questo pazzo, sregolato e insensato mondo. Grazie.

Introduzione

Al giorno d'oggi, le reti infrastrutturali italiane sono intrinsecamente legate al passato, al presente e al futuro. Se è importante promuovere una continua innovazione delle opere strutturali componenti le infrastrutture presenti sul suolo italiano, altrettanto, se non di più, è importante garantire il corretto funzionamento delle opere già esistenti. Tale obiettivo ha molteplici scopi, i quali permettono di avere una gestione ergonomica delle stesse reti infrastrutturali, così come di implementare processi di monitoraggio ed ispezione efficienti per garantire la stabilità di ciascuna struttura, che sia "vecchia" o "nuova". Perciò, nel corso degli ultimi anni, è aumentata la richiesta di tecniche di controllo sempre più adatte alle nuove esigenze relative al continuo sorgere di problematiche legate all'"invecchiamento" nel tempo delle opere esistenti, le quali, se non arginate correttamente, portano ad ammaloramenti tali da poter influenzare la società, come purtroppo è accaduto per esempio a Genova (crollo del ponte "Morandi", 2018). Da tale tragedia è sorta l'assoluta necessità di arginare la problematica che ha portato a tale evento, ergo alla nascita dell'ispezione speciale affrontata e studiata in questo elaborato.

Questa tecnica d'indagine, regolata dalle Linee Guida "Ispezioni speciali su ponti esistenti in c.a.p. a cavi scorrevoli ai sensi delle Linee Guida: la classificazione e la valutazione accurata" [4] riguarda alla valutazione delle condizioni degli elementi delle opere, per la precisione le travi degli impalcati dei ponti, che sono fatti in calcestruzzo armato precompresso, o c.a.p., a cavi "post-tesi", cioè tirati dopo il getto del calcestruzzo. Il concepimento di questa tecnica d'ispezione è per sopperire al problema relativo all'investigazione di questo particolare sistema costruttivo: infatti, gli elementi oggetto dell'ispezione, cioè i cavi in acciaio che costituiscono l'armatura da precompressione, sono ben addentrati nella trave, risultando quindi difficilmente indagabili attraverso le tradizionali metodologie d'ispezione. Considerando la massiccia presenza degli elementi appena descritti, la loro cura permette di garantire il corretto funzionamento dei ponti, strutture nevralgiche per il corretto funzionamento delle reti stradali italiane.

L'obiettivo dello studio intrapreso in questo elaborato riguarda la revisione e verifica dell'intero processo ispettivo, così come per le singole prove costituenti l'ispezione speciale. Lo studio, grazie alla gentile concessione da parte di SINA s.p.a., la quale ha gentilmente dato la disponibilità dei dati raccolti dalle prove da loro eseguite, si avvalerà di diversi metodi di analisi statistiche impiegate per valutare l'intero processo e ciascuna prova tramite tali dati forniti da SINA. Un ulteriore scopo sarà quello di rendere ancora più efficiente, se possibile, l'ispezione speciale delle travi in c.a.p. a cavi post-tesi. Perciò, per poter comprendere le scelte dietro ai metodi analitici intrapresi, si partirà con una revisione della tecnica costruttiva oggetto del metodo ispettivo, ovvero del c.a.p. a cavi post-tesi, così come con una breve presentazione del metodo d'indagine descritto dalle Linee Guida tramite il Documento Operativo "Ispezioni speciali su ponti esistenti in c.a.p. a cavi scorrevoli ai sensi delle Linee Guida: la classificazione e la valutazione accurata" [4].

1. Calcestruzzo armato precompresso e le travi in c.a.p. a cavi post tesi

1.1. Introduzione

Cosa è il calcestruzzo armato precompresso (c.a.p.)? E cosa è la precompressione?

Esistono diverse definizioni assegnate a questo particolare sistema strutturale nel corso della storia. Un esempio può essere la definizione data dalle normative tecniche tedesche, nello specifico la DIN 4227 del 1953, la quale cita:

“Le strutture in c.a.p. sono elementi nei quali il calcestruzzo è precompresso in misura tale, mediante l’introduzione di forze speciali, che sotto il carico di servizio esso non risulta sollecitato a trazione, oppure lo è solo limitatamente. Per precompressione si intende solo quello stato di autotensione, generato in questo modo, che rimane dopo detratte tutte le tensioni provocate da altri casi di carico.”

Un altro esempio può essere quella data dall’ingegnere **Cestelli-Guidi** nel suo libro [2]:

“Corpo in stato di coazione se sussiste in esso una distribuzione di sforzi interni, pure in assenza di forze esterne esplicitamente applicate. La causa di tale coazione può essere una mutua costrizione fra le diverse parti del corpo per particolari connessioni interne o vincoli esterni, i quali devono risultare sovrabbondanti. Queste costrizioni generatrici devono aver origine dall’applicazione di sistemi di forze equilibrato (nel complesso) sul corpo e rimaste come forze interne a connessione avvenuta. [spiegazione del precompresso] Detto ciò, si può definire la trave (o qualunque oggetto considerato) “precompressa” una struttura o un elemento strutturale posto artificialmente in stato di coazione generando tensioni interne di segno opposto a quello delle tensioni indotte dalle forze esterne, fornendo all’oggetto caratteristiche di resistenza non esistenti precedentemente.”

Da questi esempi, e anche dalle altre numerose definizioni reperibili da norme e libri dedicati su questo argomento, si può notare come l’elemento comune è lo stato di coazione presente nel sistema, dove, considerando un sistema composto da due materiali, le tensioni imposte, e quindi generate, da un materiale vanno di conseguenza a generare delle tensioni di risposta nell’altro materiale. Questo stato di coazione porta a compensare le caratteristiche meccaniche carenti dei materiali coinvolti.

Considerando il nostro caso, cioè un conglomerato composto da calcestruzzo e cavi in acciaio, la sollecitazione generata dalla messa in tensione del cavo causa delle tensioni di compressione di risposta da parte del calcestruzzo stesso (da cui il nome di “precompressione”), aumentando quindi la sua resistenza a trazione. Inoltre, lo stato di coazione, essendo non univoco, provoca quindi anche un aumento della resistenza a compressione dell’acciaio costituente le armature da precompressione per via dello stesso principio.

1.2. Cenni storici

Le nozioni ed applicazioni, relative alla tecnica costruttiva di precompressione, riscontrabili al giorno d'oggi sono state raggiunte attraverso diverse sperimentazioni ed applicazioni durante il corso della storia umana. Infatti, alcune terminologie moderne derivano addirittura dagli antichi egizi, più precisamente dai carpentieri navali, i quali presollecitavano parti dello scafo delle navi, usando matasse di fibre vegetali orientate parallelamente alla chiglia e propriamente in tensione per compensare le deformazioni. Un altro esempio storico di natura simile è dato dalle prime cerchiature metalliche delle ruote di legno, applicate per migliorare resistenza e compattezza delle stesse ruote. Il tutto avveniva quando, al raffreddamento delle cerchiature, imprimevano uno stato di coazione persistente che aveva come effetto quello di mantenere saldamente in compressione gli elementi contenuti.

Nonostante esistano appunto esempi e testimonianze antiche, si dovette aspettare fino al 1888 per avere il primo esempio di presollecitazione applicato a strutture adoperanti il calcestruzzo (e di conseguenza il calcestruzzo armato). Infatti, in quell'anno, come logica conseguenza del concetto di presollecitare una struttura in modo tale da non avere lembi in trazione date dalle successive azioni agenti esterne, P.H. Jackson portò come brevetto un sistema per poter confezionare pavimentazioni in lastre di calcestruzzo o pietra con barre d'acciaio sporgenti all'esterno, la quale presollecitazione era data dal serraggio agli estremi mediante piastre e bulloni stringenti.

Successivamente, il numero di brevetti e sperimentazioni incrementò nei primi 20 anni del XX secolo. Tra questi uno portato da R.H. Dill mise importanza nell'impiego di fili ad alta resistenza e tesati ad elevate tensioni. L'importanza di conferire alte tensioni all'acciaio era per evitare che la precompressione impressa andava ad esaurirsi nel tempo per via del ritiro e viscosità propri del calcestruzzo. Da questa considerazione Freyssinet, nel 1928, brevettò un sistema di precompressione con tensioni dell'acciaio superiori ai 400 Mpa.

Il contributo di questo ingegnere nel campo della precompressione fu fondamentale per lo sviluppo di questa tecnica nel ventennio 1920-1940, portando allo sviluppo, e progettazione, di sistemi con le armature da precompressione tesate successivamente al getto del calcestruzzo. Questa tecnica è tutt'ora riconosciuta come precompressione a cavi post tesi (o a cavi scorrevoli). In contemporanea, Hoyer sviluppò e progettò il sistema conosciuto tutt'ora come precompressione con armatura pre-tesa (o a cavi aderenti), dove le armature sono tesate precedentemente al getto del calcestruzzo. Questi due sistemi di precompressione furono strumentali nello sviluppo di strutture e infrastrutture, soprattutto tra gli anni 50 e 70, con diversi esempi in Italia.

Da un gran numero di applicazioni è naturale aspettarsi una continua evoluzione di questi due sistemi: alcuni esempi possono essere la nascita del procedimento B.B.R.V. (dagli ingegneri svizzeri Brikenmaier, Brandestini, Ros, Vogt) negli anni 50, ovvero il sistema di precompressione a teste di ancoraggio ricalcate; sempre nello stesso periodo, Leohnardt e Baur permisero la fabbricazione delle prime travi continue con cavi a trefoli concentrati, mentre Finsterwalder realizza la prima struttura precompressa a sbalzo di un ponte a travata (realizzata per conci successivi gettati in opera), tecnica che poi permetterà di realizzare impalcati in c.a.p. senza necessariamente utilizzare centine poggianti a terra, evitando gli impedimenti dati dall'instabilità dei terreni e l'altezza dal suolo. Un ulteriore step fu portato dall'allievo di Freyssinet, l'ing. Muller, introducendo la messa in opera dei conci tramite gru a pontone prelevandoli direttamente dal campo di prefabbricazione. In questo modo si evita lo sviluppo le deformazioni, non tollerabili per il traffico, dagli effetti differiti del calcestruzzo (causati dal mantenimento in opera dello schema a mensola).

Ulteriori step successivi a quelli descritti hanno portato all'attuale nozione della tecnica di precompressione conosciuta. Nonostante ciò, molte opere presenti con elementi strutturali costruiti sfruttando il sistema di precompressione sono datate. Per poter quindi comprendere meglio questo sistema, sia nel suo processo evolutivo che nella sua applicazione strutturale, è necessario affrontare una descrizione più specifica e più tecnica.

1.3. Descrizione tecnica del c.a.p.

Come già descritto sopra, il c.a.p. consiste nell'impiego del calcestruzzo armato applicando, oltre all'armatura "d'ordinanza" se necessaria, un'ulteriore armatura specifica, la quale è impiegata per garantire un aumento delle caratteristiche di resistenza a trazione del conglomerato tramite il sistema denominato "sistema di precompressione".

La precompressione viene attuata precaricando a trazione l'armatura specifica aggiunta per il sistema di compressione, la quale è composta tendenzialmente da cavi d'acciaio. Tali cavi, in seguito all'applicazione del precarico, vengono svincolati ma opportunamente solidarizzati al conglomerato. In questo modo attuano uno stato di coazione come "equilibrio di compromesso" tra la loro tendenza, quando in trazione, ad accorciarsi (cioè riportarsi alla lunghezza originale) in assenza di tensioni e la conseguente riluttanza del volume di calcestruzzo ad accorciarsi alla compressione esterna applicata. Questo stato di coazione, però, non si sofferma semplicemente ad uno stato di compressione-trazione, ma, in diverse entità, pure allo stato di flessione e taglio. Infatti, il termine più corretto per definire questa tecnica sarebbe "Presollecitazione" (si possono vedere diversi esempi nelle terminologie usate in altre lingue, come per esempio "Prestressing" in inglese).

Esistono diversi modi per "pretensionare" a trazione i cavi. Questi diversi metodi si basano sulla tipologia di sistema di precompressione scelto. Esistono due sistemi principali di precompressione, i quali derivano da quelli introdotti all'epoca corrispettivamente da Freyssinet e Hoyer: a cavi pre-tesi (o pre-tensionamento) e a cavi post-tesi (o post-tensionamento).

Nel primo sistema (pretensioning in inglese, detto anche precompressione sul banco o pista di tensione) i cavi, detti "aderenti/ad aderenza immediata", vengono inseriti (ed ancorati) e tesi prima dell'indurimento del calcestruzzo, in modo tale che al suo getto i cavi vanno ad aderire immediatamente al conglomerato.

Nel secondo sistema (posttensioning in inglese, detto anche precompressione dopo l'indurimento del cls o a fili scorrevoli) i cavi sono inseriti in maniera scorrevole in "binari" (detti anche canali di tiro) già presenti sotto forma di guaine già incorporate nel conglomerato. I cavi inseriti verranno quindi ancorati e tesi dopo l'indurimento del calcestruzzo. L'inserimento dei cavi può avvenire in diverse modalità, così come con la tesatura. Esistono 2 casi principali: il cavo è già nella guaina prima del getto; il cavo viene introdotto nella guaina prima della messa in tensione.

Le opere studiate, nello specifico le travi impiegate nella realizzazione delle infrastrutture indagate ed ispezionate, si basano sul secondo metodo, cioè sulla precompressione a cavi post tesi. Per tale motivo, svilupperemo più nel dettaglio la seconda tipologia di pretensionamento.

1.3.1. C.a.p. a cavi post tesi

Il calcestruzzo armato precompresso a cavi post-tesi, o a "cavo scorrevole", consiste nel tendere l'armatura successivamente al getto del calcestruzzo. Durante la messa in tensione (la quale avviene da una singola estremità o da entrambe mediante apparecchiature tipo martinetti idraulici), l'armatura si allunga mentre il calcestruzzo presenta un accorciamento, cioè una deformazione elastica istantanea (che però non ha effetto sull'entità finale della precompressione). L'allungamento ed accorciamento dei cavi è libero in quanto, come suggerisce il nome di questo sistema di precompressione, l'armatura è libera di scorrere all'interno di tubi, detti guaine.

Le tipologie di guaine impiegate generalmente sono due: metalliche (tendenzialmente laminato) e plastiche (tendenzialmente in polietilene/polipropilene). Le guaine metalliche sono il sistema più economico per formare i canali di scorrimento ed alloggio dei cavi da precompressione. Sono tendenzialmente prodotti in lamierino corrugato e forniscono una barriera secondaria (la prima è fornita dalla boiaccia/malta cementizia) alla corrosione dei cavi rimanendo aderenti al calcestruzzo. Le guaine in plastica, invece, sono impiegate quando viene ritenuto necessaria la protezione secondaria a lungo termine, cioè in ambiente aggressivo (per esempio negli impianti di depurazione delle acque o strutture sottoposte a sali antigelo). Entrambe le tipologie possono essere fornite anche in rotoli.

Le guaine influenzano sia positivamente che negativamente la tesatura dell'armatura da presollecitazione. Andando nello specifico, nella tesatura dei cavi, per via della reazione e contatto fra martinetto e trave, vengono considerate e soddisfatte le condizioni d'equilibrio (cioè, lo stato di coazione, letto tramite sforzo finale del manometro nel martinetto) e di congruenza (cioè, le deformazioni consequenziali allo stato di coazione sia sull'acciaio sia sul calcestruzzo). La tensione generata non sarà costante per la totalità del cavo ma si avrà un andamento tendenzialmente decrescente, in base alle deformazioni causate dalla deformazione elastica del cavo e dalle forze d'attrito generate da tale fenomeno in contrasto con la guaina impiegata.

Esistono due versioni diverse di c.a.p. a cavi post tesi. La prima versione ha il cavo già all'interno nella guaina prima del getto. Si ha un maggior pericolo di corrosione in quanto il cavo non è coperto fin da subito dal materiale inerte (tipo la malta cementizia). Inoltre, si potrebbero avere delle infiltrazioni della malta nel conglomerato attraverso le pareti delle guaine: tale problema causa un impedimento alla messa in tensione. Nella seconda versione, invece, il cavo viene introdotto solamente prima della messa in tensione. In questo caso bisogna evitare di deformare la guaina durante il getto, la quale deformazione può impedire una corretta fluidità della malta per l'intera lunghezza del cavo, lasciando delle zone di vuoto (le quali possono portare alla corrosione del cavo contenuto nella guaina).

L'aderenza è un altro elemento chiave nel preservare meglio il cavo, così come per poter impartire più facilmente lo stato di coazione nel conglomerato. Se nel sistema di precompressione a cavi "pre-tesi" l'aderenza del cavo con il calcestruzzo circostante è diretta, in questo caso la guaina impedisce il contatto diretto. Si può ottenere l'aderenza però attraverso l'iniezione di un materiale inerte nei canali di scorrimento, come la malta cementizia (o da iniezione). Le motivazioni per cui il materiale deve risultare inerte riguardano sia per ottenere l'aderenza dei cavi a tensionamento fatto, sia per poter ricreare un ambiente inerte attorno ai cavi per proteggerli dalla corrosione. La protezione dalla corrosione è una caratteristica chiave da tenere sempre conto nell'applicazione di sistemi di precompressione: a causa delle alte richieste di caratteristiche meccaniche dei materiali coinvolti, l'acciaio impiegato risulta più sensibile alla corrosione, richiedendo quindi un ulteriore accorgimento alla protezione da corrosione dei cavi dell'armatura da presollecitazione, soprattutto quando non è possibile ottenere un ambiente inerte intorno ai suddetti cavi.

Esistono però casi dove i cavi non sono aderenti. In tali casi, denominati "unbonded tendons", la non aderenza permette ai cavi di rimanere scorrevoli tra l'avvenimento del processo di precompressione ed un'eventuale aderenza successiva. Questa situazione è valida per casi particolari, cioè quando l'armatura ordinaria è dimensionata in modo tale da garantire sia capacità portante che funzionalità. Un vantaggio di questa modalità è nel facilitare la sostituzione, in caso di necessità, dei cavi da precompressione. Allo stesso tempo, poiché mancano le condizioni di protezione dei cavi da corrosione, è necessario trovare un modo alternativo per proteggerli: un esempio può essere l'impiego di additivi che portano a formare uno strato anticorrosivo attorno al cavo.

Un esempio di una tipica costruzione di elementi precompressi con cavi post tesi (non considerando il caso degli unbonded tendons) è il seguente:

- formazione dei cavi;
- posa in opera dei cavi ottenuti insieme agli apparecchi di ancoraggio applicati alle estremità;
- getto del calcestruzzo;
- (ad indurimento avvenuto) messa in tensione delle armature tramite martinetti, con successivo bloccaggio agli ancoraggi delle armature appena tensionate;
- eventuale ripresa successiva del tiro;
- iniezioni di malta/pasta cementizia (materiale inerte) nelle guaine.

1.3.1.1. Tipologie di ancoraggi e sistemi di tensionamento dei cavi

Per la pretensione degli elementi in c.a.p. a cavi post tesi il sistema di tensionamento, ed anche il tipo di ancoraggio, utilizzato diventa di fondamentale importanza. Sin dall'antichità, fino al giorno d'oggi, sono stati concepiti diversi sistemi di tensionamento e diverse tipologie di ancoraggio. Tali sistemi e tali elementi hanno subito quindi un'evoluzione continua, arrivando alle attuali soluzioni utilizzate.

Riguardo agli ancoraggi, sono riconosciute, al giorno d'oggi, 5 "macro-categorie": fissi, mobili, intermedi, multipli e giunti di accoppiamento. Per ogni "macro-categoria" si possono avere ancoraggi a cuneo e ancoraggi non a cuneo. La differenza tra le due risiede nel sistema di fissaggio dei fili/trefoli (componenti il cavo, se non formato da un'unica barra d'acciaio) che compongono l'armatura di pretensionamento: in quello "a cuneo" il fissaggio avviene solitamente tramite l'incastro di due coni, uno femmina e uno maschio; in quello "non a cuneo", tendenzialmente il fissaggio avviene attraverso l'applicazione di dado e controdado, con anche piastre e/o spessori d'acciaio usati per mantenere saldo il fissaggio delle testate.

1.3.1.1.1. Ancoraggi Fissi

Gli ancoraggi fissi hanno lo scopo di trattenere l'armatura, senza poter tenderla. Ad una estremità sono presenti dispositivi che sfruttano l'aderenza delle armature o usano elementi, quali piastre o boccole, terminali. Tra gli esempi più noti troviamo ancoraggi a serraggio a boccola DYWIDAG per gli ancoraggi non a cuneo (vedi cap. 1.3.1.1.6.1.1) ed ancoraggi ad aderenza di fasci di fili (tipo Freyssinet) per gli ancoraggi a cuneo (vedi cap. 1.3.1.1.6.2).

1.3.1.1.2. Ancoraggi mobili

Questi ancoraggi permettono la messa in tensione dell'armatura tesata da martinetto, il quale è poggiato sulla testata dell'elemento tirato. Un dispositivo di bloccaggio diventa necessario per chiudere l'estremità del cavo una volta in tensione, anche se una messa in tensione successiva è ammessa dalla maggior parte dei sistemi che utilizzano questa tipologia di ancoraggio. Tendenzialmente vengono impiegate barre munite di un filetto speciale su tutta la lunghezza, se ottenuto durante il processo di laminazione, oppure alle estremità, se ottenuto per imbottitura.

Come per gli ancoraggi fissi, abbiamo esempi noti sia per sistemi con cunei sia per sistemi senza cunei.

I sistemi con cunei che vengono usati solitamente sono ancoraggi a cunei/chiavette alloggiati in opportuni fori conici (per esempio il sistema Morandi o il sistema Rinaldi, vedi cap. 1.3.1.1.6.2). Per alcuni esempi di questa tipologia di ancoraggio, il bloccaggio dei coni provoca un leggero slittamento dei fili/trefoli. Tale slittamento, e tale leggera perdita di tensione, è compensato da un sovratensionamento del cavo stesso prima del bloccaggio. Un'altra soluzione sono gli ancoraggi con un sistema di avvitamento tramite cono femmina e dado (simile al Freyssinet, vedi cap. 1.3.1.1.6.2). Il cono femmina viene fissato su una testa conica che penetra una zona filettata, sulla quale si avvita il dado. In questo modo si elimina la perdita di tensione prima del bloccaggio.

Riguardo ai sistemi senza cunei, invece, i due sistemi più utilizzati sono il sistema di ancoraggio a barre tramite DYWIDAG, assicurato da dado, oppure il sistema B.B.R.V. (per entrambi vedi cap. 1.3.1.1.6.1).

1.3.1.1.3. Ancoraggi intermedi

Gli ancoraggi intermedi permettono di mettere in tensione i cavi partendo da una sezione intermedia. Questo succede quando risulta impossibile la messa in tensione nella maniera più tradizionale, cioè dalle estremità. L'impossibilità può essere data da motivi di costruzione, esecuzione o estetici. Tra gli esempi più noti abbiamo gli ancoraggi di estremità incassati, i quali sono principalmente senza cunei ed appartenenti ai sistemi classificati come DYWIDAG (un esempio può essere l'ancoraggio a piastra ED, vedi cap. 1.3.1.1.6.1.1).

1.3.1.1.4. Ancoraggi multipli

Con questo sistema è permesso la ripartizione della forza d'ancoraggio complessiva su multiple testate. Generalmente viene usato per cavi da grandi capacità, cioè di grandi dimensioni.

1.3.1.1.5. Giunti di accompagnamento

I giunti di accompagnamento si dividono in due tipologie diverse: giunti fissi e giunti mobili. I giunti fissi sono usati per raccordare un cavo con un altro già in tensione, mentre i giunti mobili uniscono due cavi montati in successione e non tesati in maniera tale da ottenere una tesatura simultanea. I giunti mobili sono usati molto nei ponti costruiti in avanzamento. Infatti, per tale scopo, i giunti di accompagnamento risultano molto utili per accoppiare le barre DYWIDAG tramite l'uso di un manicotto filettato alle estremità contigue delle barre da accoppiare.

1.3.1.1.6. Alcuni esempi particolari di sistemi di ancoraggio

1.3.1.1.6.1. Sistemi di ancoraggio non a cunei

1.3.1.1.6.1.1. Sistemi di ancoraggio catalogati come DYWIDAG

Il sistema DYWIDAG, detto anche DYWIDAG-Finsterwalder, è un ancoraggio studiato da Finsterwalder senza cunei per tondini da 26mm scorrevoli dentro tubi in lamiera, filettati all'estremità per rifollamento (per evitare riduzione di sezione e quindi un indebolimento locale). Il tondino, che viene tirato dal martinetto, viene fissato con dado e controdado trasmettendo pressione alla piastrina metallica, che ha la funzione di ripartizione del carico sul calcestruzzo. Tali tondini, per via della resistenza caratteristica dell'acciaio, ha una tensione di tiro sensibilmente inferiore a quando vengono applicati fili da $\Phi 7$, ritenendo necessaria la ripresa di tiro. Se il sistema comprende dei ferri giuntati con manicotti, viene permesso la lavorazione a tratti delle strutture, facilitando quindi la costruzione a sbalzo (tipo per le travi dei ponti).

Del sistema DYWIDAG esistono in realtà diverse interpretazioni. Tra le tali, le più gettonate sono:

Piastra ED (ancoraggio a piastra, montato ad entrambe le estremità del cavo, usato in solette e similari), Ancoraggio a superfici multiple (fusto conico d'ancoraggio a tre superfici di contatto, per cavi longitudinali di travi e impalcati da ponte), Ancoraggio a fiore ZF/ZR (deformazione plastica dei fili/trefoli per trasferimento del carico nella zona del bulbo, per cavi prefabbricati), Piastra SD (ridotte distanze dai bordi e interassi limitati, per strutture di limitato spessore o cavi trasversali), Ancoraggio piatto FA (trefoli in un solo piano devianti in guaine a forma ovale, per solette da ponte e solai sottili), Accoppiatore M ed ME (ancoraggio flottante con i fili/trefoli sovrapposti nel blocco con funzionamento a fibbia, per strutture a simmetria di rotazione), Accoppiatore P (fusto a superfici multiple, per cavo già tesato) ed Accoppiatore D (accoppiamento dei singoli fili/trefoli con manicotto, per prolungare cavi non ancora tesati come per i ponti costruiti a fasi successive).

1.3.1.1.6.1.2. Sistema BBRV

Il sistema B.B.R.V. (nome derivante dagli ingegneri Brikenmaier, Brandestini, Ros, Vogt) consiste in una tesatura cilindrica in acciaio forata, dai quali fori passano i fili costituenti il cavo di pretensionamento. Questi fili rimangono ancorati da una testina, la quale è ottenuta per rifollamento. Inoltre, successivamente al tiro tramite martinetto, i fili vengono bloccati in testa attraverso dei dadi, i quali si pongono in contrasto con una ghiera (che funge da ripartizione del carico sul conglomerato). Il bloccaggio può anche avvenire tramite l'uso di spessori/lamiere d'acciaio. Il sistema è molto usato per la ripresa dei cavi: il sistema mantiene bloccati, senza scorrimento, i cavi quando questi tendono a scorrere nel momento del bloccaggio per via della ripresa data dal fluage.

1.3.1.1.6.1.3. Altri sistemi

Esistono altri sistemi simili, o con comportamento simile, a quelli sopra citati. Tra i vari esistenti, i più noti sono: il Sistema Macchi, il Sistema Leoba e il Sistema Baur-Leohnardt.

Il sistema Macchi consiste nel fissaggio dei singoli fili alla testa mobile di acciaio, stampando a freddo le estremità del filo e restando ancorato al foro conico di testa. Possiede gli stessi pregi del BBRV.

Il sistema Leoba ha i fili piegati a cappio e avvolti intorno ad una stampella solidale ad un tondino di "forte" diametro dove si esercita il tiro. Vengono accostati più ancoraggi per poter costruire fascio di cavi in due ordini di notevole sezione.

Il sistema Baur-Leohnardt, invece, prevede i fili avvolti attorno a blocchi di calcestruzzo. Dopo il getto del calcestruzzo delle travi, si dispone il sistema fra le estremità delle travi stesse e i blocchi di ancoraggio dei normali martinetti, i quali distanziano i blocchi esercitando il tiro. Infine, i blocchi vengono collegati permanentemente alla struttura mediante getto di calcestruzzo, per poi asportare i martinetti.

1.3.1.1.6.2. Sistemi di ancoraggio a cunei

Questi sistemi sono solitamente usati per ancoraggi di tipo fisso o mobile. Si basano sul primo sistema concepito di questa tipologia, cioè il Freyssinet.

Il sistema Freyssinet (il più usato dalla maggior parte degli ancoraggi) consiste nel bloccare i fili per mezzo di cunei. Ogni ancoraggio è costituito da un cono femmina annegato nel calcestruzzo dove il cavo fuoriesce e da uno maschio che serra i fili dopo il tiro quando pressato nel cono femmina.

Altri sistemi simili, o che si basano sullo stesso principio, sono: Sistema Magnel, Sistema Franki-Smet, Sistema Barredo, Sistema Morandi, Sistema Rinaldi, Sistema Balducchi, Sistemi Zvezelj, Sistema Held e Francke, Sistema Hochtief A. G., Sistema "Inglese", Sistema Gifford-Udall e il sistema Stressstell Co. Molti di questi sistemi differenziano solamente in piccoli dettagli, in quanto alcuni sono nati consequenzialmente ad altri sistemi già in uso o applicati in zone e in strutture dove è richiesto un diverso accorgimento rispetto ai sistemi esistenti precedenti.

Dei sistemi sopracitati, i più conosciuti sono i sistemi Morandi, Rinaldi e Balducchi (dal fronte italiano), il sistema Magnel e i sistemi anglosassoni quali quello "inglese" e il Stresssteel (con il G-U).

Il Sistema Morandi (che prende nome dall'ingegnere italiano Riccardo Morandi) prevede un ancoraggio a piastra metallica forata, dove ogni foro tiene due fili bloccati e riporta il carico sul calcestruzzo. I vengono successivamente tirati quattro alla volta, con possibile ripresa a distanza dal tiro. Esiste una versione leggermente differente, sempre del periodo anni 50/60, dove i fili sono bloccati a gruppi di tre, per comporre poi ciascun cavo da gruppi di tre fili.

Simile al sistema Morandi, il Sistema Rinaldi si basa anch'esso su una piastra/ghiera metallica con fori conici dove i fili vengono bloccati a gruppi di due. Grazie agli studi portati avanti dall'ing. Marozzi è stato sperimentato un bloccaggio stile Freyssinet (cono maschio-femmina).

Il Sistema Balducchi, invece, si basa sul tirare e bloccare per ciascun filo all'interno di una piastra di acciaio forata. In questo modo il carico trasmesso sul cavo è ripartito sul calcestruzzo. Il bloccaggio avviene con pinzette (spinte nei fori conici fino a serrare energeticamente i fili), con impiego di piastre rettangolari e circolari per formare cavi in base all'esigenza. Dei telarini distanziatori vengono piazzati nel percorso dei cavi per evitare attriti tra fili durante la fase di tiro dell'armatura di presollecitazione.

Con il Sistema Magnel si inizia ad impiegare una doppia piastra. La prima funziona da ripartizione solidale al conglomerato della trave (e forata per far passare i fili), mentre la seconda, detta "piastra sandwich", è posizionata sopra alla prima piastra di ripartizione, dove trovano sede i tondini i quali, dopo tiratura, vengono fissati per mezzo di cunei d'acciaio. Questo sistema è caratteristico per permettere la formazione di cavi con un grande numero di fili, di gran vantaggio per opere con notevole mole.

Dei sistemi anglosassoni, invece, possiamo notare due diversi approcci: il sistema detto "inglese", dove sfrutta il sistema della ghiera metallica forata (con fori adattabile ai numeri dei fili impiegati, così come le tipologie di spine, anche se di solito profilate a cuneo); il sistema Gifford-Udall, di origine statunitense, consiste nel bloccaggio di ciascun filo (il quale può tenere dimensioni fino a $\Phi 7$) entro cilindretti cavi tramite due mezzi cunei dentellati internamente (per maggiore aderenza), con impiego di ghiera distanziatrici, in lamina forata, dei fili. Un sistema simile al Gifford-Udall è il Stresssteel Co., dove viene impiegato per cavo un unico tondino di notevoli dimensioni (tipo 26mm).

1.4. Conservazione degli elementi in c.a.p. a cavi post-tesi

L'influenza che questo sistema costruttivo ha avuto nel XX secolo ha portato ad avere al giorno d'oggi diverse opere composte parzialmente o totalmente da elementi strutturali fatti in c.a.p.. Considerando un continuo decrescere dell'impiego di tale tecnica costruttiva dopo questo periodo, molte opere strutturali e infrastrutturali al giorno d'oggi, composte da elementi o interamente in c.a.p., provengono per la maggior parte da quel periodo storico. Per tale motivo, diventa importante, per garantire la durabilità dell'opera, la conservazione degli elementi in c.a.p., soprattutto per quelli con i cavi da precompressione post-tesi.

La conservazione degli elementi precompressi, soprattutto per quelli con i cavi da precompressione post-tesi, ruota attorno agli elementi chiave che compongono il sistema di precompressione. Un "cattivo" stato di conservazione di almeno un elemento chiave può portare a compromettere non solo la stabilità strutturale del sistema appartenente ma anche dell'intero sistema. L'elemento chiave più importante, e quindi da garantire il più possibile la sua conservazione, è l'armatura da precompressione: tale, se danneggiata (tendenzialmente da corrosione), non solo va ad annullare lo stato di coazione nell'eventuale cedimento del sistema di appartenenza ma va ad influenzare, se non portare a cedimento, l'intera struttura; inoltre, la conservazione dei cavi è legata alla conservazione degli altri elementi chiave (quali la guaina, la malta da iniezione, il copriferro, ...) in quanto costituiscono la protezione necessaria per mantenere la conservazione degli stessi cavi.

Considerando come esempi strutturali unicamente i ponti e i cavalcavia componenti la rete infrastrutturale italiana (in quanto legati agli elementi investigati dalle prove svolte da SINA, cioè le travi componenti gli impalcati dei vari viadotti autostradali), esistono diversi casi negli ultimi 15 anni di crolli di impalcati per cedimenti dati da elementi in c.a.p. non conservati bene: alcuni degli esempi più noti possono essere il Viadotto "Madonna del Monte" nel 2019, così come il Viadotto "Carasco" del 2013. Il caso più eclatante è stato il Viadotto Polcevera, conosciuto anche come Ponte Morandi, il quale cedimento (nel 2018) ha scaturito in maniera definitiva l'assoluta necessità di garantire un'ottima conservazione degli elementi strutturali in c.a.p. a cavi post-tesi.

1.5. Considerazioni finali

Dalla stessa considerazione fatta nel punto precedente (cap.1.4), si può già identificare la provenienza delle opere investigate e considerate nelle successive analisi, le quali risultano provenire dallo stesso periodo storico. Inoltre, se il periodo di costruzione di ciascuna opera risulta vicino l'una con l'altra, è possibile che i sistemi di precompressione (e/o di tecniche costruttive) impiegati risultano simili o uguali. Per tale motivo, tra le diverse opzioni possibili, solo alcune risulteranno di nostro interesse, le quali però devono essere ovviamente relative alle opere considerate.

Concentrandosi sul sistema di precompressione, attraverso l'analisi storico critica e la revisione dei materiali in possesso, è stato possibile definire subito come risulta sufficiente concentrarsi principalmente sui sistemi d'ancoraggio e cavi impiegati nei vari sistemi di precompressione nelle opere indagate: infatti, per quasi la metà di tali opere il sistema di tensionamento ed ancoraggio impiegato risulta essere il BBRV (solitamente con cavi BBRV-PREBETON); nelle restanti opere, eccezion fatta per pochi casi dove o non è stato possibile conoscere il sistema di ancoraggio utilizzato o non è stato ben definito, i sistemi, e tipo di acciaio impiegato per i cavi di precompressione, rientrano nella categoria di ancoraggio fisso su entrambi i lati e sono riconducibili al sistema BBRV-PREBETON.

2. Ispezioni Speciali di travi in c.a.p.: introduzione alle Linee Guida

2.1. Introduzione (all'ispezione speciale)

L'analisi e valutazione di strutture già esistenti sono importanti aspetti nella gestione di opere strutturali ed infrastrutturali. Nel caso dei ponti, nello specifico per le travi in c.a.p. (calcestruzzo armato precompresso) con cavi post-tesi le Linee Guida prescrivono l'esecuzione delle ispezioni speciali tramite un progressivo approfondimento della conoscenza delle condizioni strutturali dell'opera soggetta a revisione, nello specifico riguardo allo stato dei cavi di post-tensione. Il motivo risiede nella difficoltà di determinare il deterioramento degli elementi principali costituenti il sistema di precompressione tramite convenzionali metodologie d'indagine e/o tramite ispezioni visive (vedi cap.1.4 per i problemi legati alla conservazione di elementi in c.a.p. a cavi post tesi).

L'articolazione proposta da tali Linee Guida è stata applicata e approfondita in diversi studi eseguiti successivi alla loro emanazione. Da tali approfondimenti ed applicazioni si è arrivati alle seguenti 4 differenti fasi operative (rappresentate sinteticamente nello schema in Figura 2.1):

- Fase 0: fase conoscitiva dell'opera, si suddivide nelle analisi "storico-critica" (riguardo alla documentazione reperibile dell'opera), dello stato attuale delle difettosità presenti e dei rischi connessi a tali difettosità; viene determinato in questa fase il numero e la localizzazione dei campioni da indagare; inoltre, viene anche verificata la corrispondenza tra stato di progetto e stato "di fatto"; nella verifica di corrispondenza, uno degli aspetti controllati riguarda all'individuazione del tracciato dei cavi, il quale risulta importante come supporto alle successive indagini; l'individuazione del tracciato dei cavi risulta anche indispensabile per le prove volte all'analisi preliminare dei difetti.

-Fase1: fase preliminare di determinazione dei difetti riscontrati; si svolge tramite l'esecuzione di prove non distruttive e semi-distruttive (poco invasive), oltre alla valutazione preliminare del rischio corrosione; la classificazione delle prove in una delle due categorie avviene in base all'impatto che hanno sulla struttura indagata; in base all'esito complessivo dell'intera Fase 1 si procede con l'ispezione, dove un esito "positivo" rappresenta un'assenza di un quadro esteso di difettosità e quindi porta direttamente all'individuazione della classe di attenzione, mentre un esito "negativo" necessita all'esecuzione di quanto previsto nella successiva fase di approfondimento (Fase 2).

-Fase 2: fase di accurata determinazione dei difetti riscontrati tramite l'esecuzione di prove localmente semi-distruttive o distruttive, oltre alla valutazione della probabilità di corrosione e alla stima del livello di tensione nel calcestruzzo e nell'acciaio da precompressione; l'analisi accurata riguarda all'effettiva estensione e gravità delle zone presumibilmente difettose individuate nelle Fasi precedenti, alla verifica della presenza di difetti nelle zone critiche non indagabili altrimenti e di approfondire la valutazione di rischio di corrosione; in base all'esito complessivo di questa fase si procede all'individuazione della classe di attenzione (esito "positivo") o alla valutazione accurata dell'opera (esito "negativo"); nell'eventualità l'esito risulta "incerto", cioè non sia possibile affermare in modo certo la gravità ed estensione dei difetti, così come la probabilità di corrosione e i risultati delle misure della tensione locale siano ambigui, si può procedere con la Fase 3 se si reputano i dati raccolti non sufficienti per la valutazione accurata.

-Fase 3: fase di studio della risposta strutturale globale dell'opera; la risposta strutturale globale è valutata tramite l'esecuzione di prove di carico statiche e analisi dinamiche sperimentali; un esito negativo di questa fase porta a procedere con la valutazione accurata, mentre un esito positivo permette la valutazione di attenzione della classe di attenzione dell'intera opera.

Il procedimento, così la sequenzialità dell'applicazione delle fasi, è illustrato nel seguente schema:

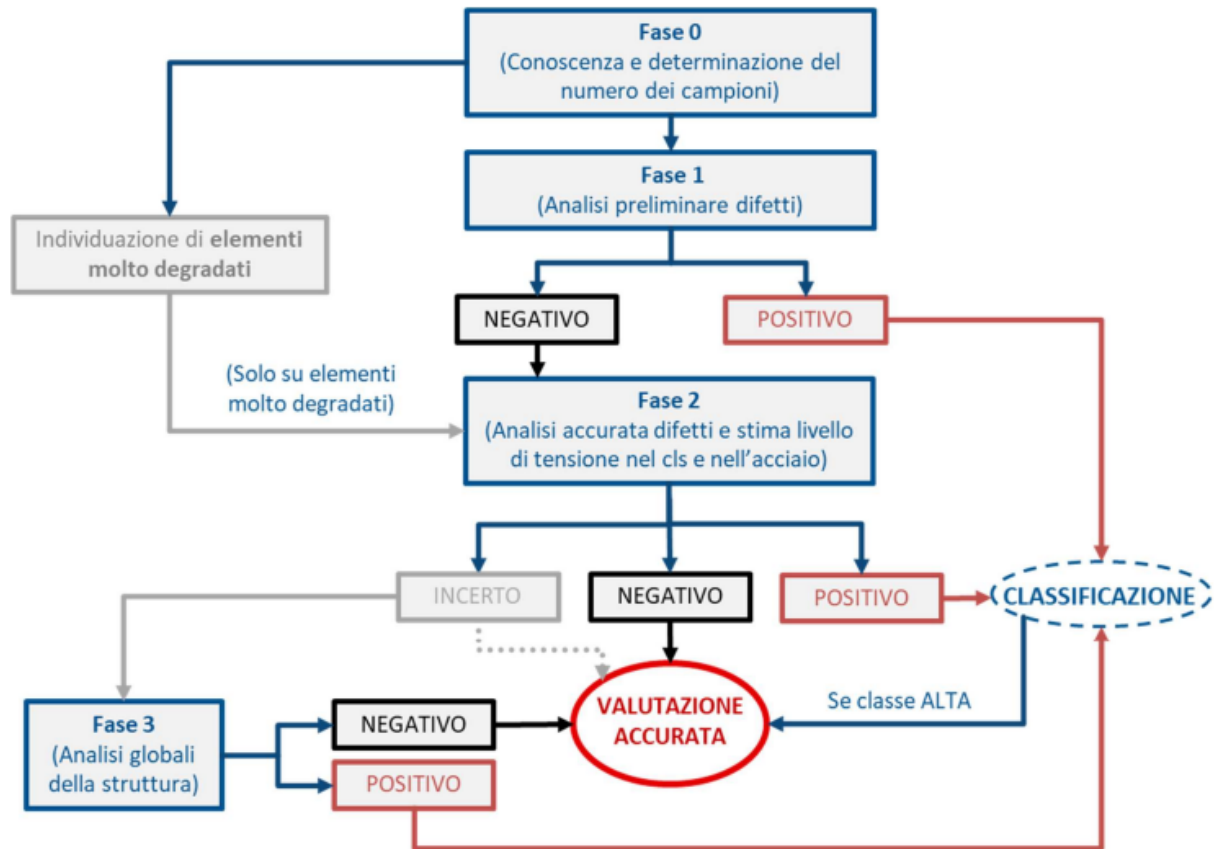


Figura 2.1: flusso logico per l'esecuzione dell'ispezione speciale (preso da [4])

2.2. Fase 0

L'obiettivo di questa fase risiede nella conoscenza dell'opera e nella determinazione del numero di campioni da indagare, come punto di partenza per lo sviluppo del processo ispettivo.

Il processo di conoscenza dell'opera si articola in tre "step":

- 1) Analisi storico-critica e dei rischi connessi: punto di partenza del processo di conoscenza dell'opera, si reperisce la maggior parte delle informazioni che verranno raccolte durante questa Fase, oltre ad aiutare la determinazione del numero e localizzazione dei campioni d'indagine (punto (3));
- 2) Analisi difetti e dei rischi connessi: individuazione degli elementi critici e determinazione dello stato di conservazione della struttura, con la determinazione della difettosità sia attuale che manifesta;
- 3) Stima del numero di campioni di indagine: determinazione data da un completo processo di conoscenza, il quale deve comprendere l'individuazione delle principali caratteristiche geometrico-tipologiche, l'individuazione del tracciato e del numero dei cavi, la determinazione del livello di difettosità attuale degli elementi del sistema di precompressione e l'identificazione, oltre alla definizione, della difettosità degli elementi critici.

Da tale processo si otterrà il livello di conoscenza richiesto per la progettazione delle indagini, quindi al procedimento della fase successiva. Al raggiungimento di tale traguardo vengono in aiuto l'individuazione di alcuni dati indispensabili: le principali caratteristiche geometrico-tipologiche; il tracciato e numero dei cavi, ricavato da elaborati o da prove non distruttive praticate in situ; il livello di difettosità attuale degli elementi che compongono il sistema di precompressione; l'identificazione è la valutazione della difettosità degli elementi "critici".

2.2.1. Analisi storico-critica

L'analisi è possibile se disponibile il progetto originale e previe ispezioni. Questo anche considerando il fatto che le travi in c.a.p. a cavi post-tesi, come tipologia strutturale, hanno ripetitività progettuale, cioè gli elementi risultano ripetitivi. La ripetitività deve essere verificata, rispecchiando lo stato di fatto, in seconda battuta, necessitando quindi di documentazioni originali e/o precedenti investigazioni.

La documentazione richiesta consiste nel progetto, relazioni di calcolo originali, interventi successivi e previe ispezioni. La disponibilità di questi documenti è la principale discriminante dell'analisi storico-critica, influenzando questa parte del processo in due strade diverse: con la documentazione originale disponibile e senza la documentazione originale.

Nel primo caso, bisogna per prima cosa assicurare che la documentazione sia inerente al progetto originale (e la sua realizzazione), così come ad eventuali interventi successivi, e ad eventuali ispezioni pregresse. La documentazione inerente al progetto (così come per gli eventuali interventi successivi) deve contenere le seguenti informazioni:

1. anno di costruzione e normativa vigente all'epoca di costruzione,
2. tipologia strutturale,
3. tipologia, andamento e numero dei cavi di post-tensione,
4. grado di ridondanza strutturale,
5. specifiche relative al calcestruzzo,
6. specifiche relative alla boiaccia di riempimento,
7. specifiche relative al metodo e sequenza di costruzione,
8. sequenza di tensionamento dei cavi e di riempimento delle guaine,
9. tipologia del sistema di impermeabilizzazione,
10. interventi successivi sostanziali.

Di queste, le informazioni indicate ai punti (2), (3) e (10) risultano fondamentali per questa fase, anche se non sono da escludere le altre rimanenti (anche se difficili da reperire, come il punto (6)). Infine, si verifica l'attinenza dello stato di fatto con il progetto originale tramite sopralluoghi e rilievi di massima degli elementi principali tramite un processo iterativo (per esempio a livelli progressivi di approfondimento). Riguardo alle ispezioni pregresse, le informazioni da dover tener conto sono relative agli elementi critici e/o zone degradate. Questo per aiutare poi lo svolgimento dell'ispezione visiva.

Nel secondo caso, invece, si agisce quando gli elaborati inerenti al progetto originale (più eventuali interventi) risultano incompleti o illeggibili. Per ottenere le informazioni richieste per il completamento dell'analisi storico-critica è necessario l'esecuzione d'indagini preliminari sui dettagli strutturali, sulle caratteristiche meccaniche dei materiali (per una sufficiente conoscenza globale dell'opera) e sui dettagli costruttivi (per la definizione delle caratteristiche geometriche di massima del sistema di precompressione, cioè l'andamento e il numero dei cavi post-tesi). Tali indagini sono regolate nella maniera appropriata dalle Linee Guida di riferimento. Nell'eventualità non venga trovata corrispondenza tra il tracciato dei cavi da progetto e quello in sito, se è possibile l'accesso ad una delle superfici frontali delle testate, si può optare per la rimozione dei tamponi di malta di protezione per il conteggio "a nudo" dei fili/trefoli dei cavi da precompressione.

Un'indagine importante da eseguire, nel caso di mancata documentazione, è l'individuazione del tracciato e del numero dei cavi dell'armatura da precompressione (cap.2.2.3). L'individuazione del tracciato è fatta tramite prove non distruttive e vengono eseguite per circa il 15% degli elementi strutturali principali del sistema di precompressione come percentuale preliminare indicativa. Tale indicazione è data dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, in particolare riguardo alle indagini limitate per edifici a telaio in c.a. e acciaio esistenti. La percentuale assegnata è in via preliminare, lasciando la scelta finale del numero d'indagini al professionista (con l'obiettivo di ottenere una sufficiente conoscenza preliminare. La scelta delle travi indagate è legata anche ad altri fattori: (in ordine di priorità) presenza di difetti manifesti, presenza di difetti spia. Per tale classificazione (e scelta di priorità a parità di difetti dato l'ordine di grandezza degli indici k_1 e k_2), vedi lo step di analisi dei difetti e dei rischi connessi (cap.2.2.2.1).

Al termine delle analisi, indipendentemente dalla strada intrapresa, si passa al secondo step della Fase 0, cioè all'analisi dei rischi connessi per l'individuazione di elementi critici (o porzioni di struttura), con la localizzazione di eventuali zone d'interesse in fase d'ispezione.

2.2.2. Analisi dei difetti e dei rischi connessi

Questo step si sviluppa in due processi: analisi dei rischi connessi all'opera e determinazione dello stato di conservazione.

Il primo è finalizzato all'individuazione degli elementi critici (in base a quanto indicato in Normativa CS465) ed è derivabile dall'analisi della documentazione originale. L'obiettivo è l'identificazione dei parametri di rischio, ovvero qualsiasi fenomeno o dettaglio influenzante negativamente il sistema di presollecitazione e correlati a tale sistema. Oltre all'individuazione, in questa analisi si compie anche una valutazione preliminare e qualitativa riguardo alla loro "predisposizione" al degrado. Una categoria di rischio riguarda le cosiddette "vulnerabilità intrinseche". Queste sono parametri che intrinsecamente risultano un rischio per la struttura, essendo relative alla morfologia, tecnologia e materiali utilizzati per la costruzione (informazioni derivabili dallo step precedente, cioè l'analisi storico-critica). Perciò un altro obiettivo di quest'analisi è la localizzazione delle zone ad alto rischio di deterioramento, in modo tale da sapere dove concentrare le indagini per inadeguatezza di uno dei seguenti fattori: sistema convogliamento delle acque, impermeabilizzazione, qualità dei materiali (tendenzialmente inadeguata qualità significa scarsa qualità), geometria e scelte costruttive. Per perseguire tali obiettivi, si seguono le indicazioni date dalle tabelle fornite in [4].

Il secondo, invece, si concentra appunto sulla determinazione dello stato di conservazione, valutando i rischi ad esso connessi ed eseguendo ispezioni in situ volte alla determinazione dello stato di difettosità attuale della struttura. La determinazione dello stato di conservazione, e quindi la relativa analisi dei rischi connessi, si svolge riferendosi alla Normativa CS465 e si basa sulla determinazione dei parametri nella categoria di rischio inerente allo stato di conservazione. Tali parametri sono desumibili in fase di ispezione o sono rintracciabili in precedenti record ispettivi, per poi venire elencati in liste, compilate poi contestualmente all'analisi della difettosità, in modo tale da facilitare il conseguimento dell'analisi qualitativa dello stato di conservazione. Gli obiettivi dell'analisi qualitativa sono: localizzazione delle zone particolarmente degradate (per concentrare l'analisi della difettosità), identificazione dei difetti sul sistema di convogliamento e smaltimento delle acque ed identificazione di elementi critici.

2.2.2.1. Determinazione difettosità attuale

L'analisi della difettosità attuale risulta di grande importanza nella valutazione dello stato di conservazione dell'opera soggetta ad ispezione. L'analisi si svolge tramite l'esecuzione di ispezioni visive in situ, tenendo conto anche di eventuali ispezioni pregresse. Le ispezioni visive dovranno essere eseguite seguendo le Linee Guida, le quali suddividono le diverse tipologie di difetti specifici, per impalcati a cavi post-tesi, in due famiglie principali: difetti manifesti e difetti spia.

I difetti manifesti sono i difetti ben visibili sugli elementi del sistema di presollecitazione. Tipici difetti considerati come manifesti possono essere: guaine degradate e fili ossidati (fig.2.2); riduzione dell'armatura di precompressione (fig.2.3); fuoriuscita delle barre d'ancoraggio (fig.2.4). A ciascun difetto è assegnato un peso detto G, il quale rappresenta la gravità del difetto attraverso una scala alfanumerica da 1 a 5, dove 1 rappresenta i difetti meno gravi per poi andare scalando in maniera crescente fino a 5, che rappresenta la massima gravità. I difetti che rientrano tra 4 e 5 rappresentano le gravità più significative, con la possibilità di influenzare l'integrità globale della struttura. In alcuni casi, i difetti con questa gravità possono essere affiancati da una sigla "PS", che indica la possibilità di pregiudicare la statica della struttura.



Figura 2.2: guaine degradate e fili ossidati (ricavata da [4])



Figure 2.3 e 2.4: rispettivamente riduzione di armatura da precompressione e fuoriuscita delle barre d'ancoraggio (ricavate da [4])

I difetti spia sono quelli che potrebbero segnalare uno stato di degrado in elementi appartenenti al sistema di post-tensione e ne esistono di molteplici. Alcuni di questi possono essere (alcuni esempi nelle fig.e 2.5-2.8): testate di ancoraggio non sigillate, lesione sull'anima lungo i cavi, lesioni sulla suola del bulbo, guaine in vista, armatura scoperta oppure ossidata nelle testate, fessure trasversali, difetti sulle selle Gerber, residui d'acqua nei cassoni. Oltre ai sopracitati, ed altri non citati (per vedere la lista completa vedi le Linee Guida e il documento operativo), si affiancano tutti quelli riscontrabili sul calcestruzzo o sull'acciaio dell'armatura lenta. Questi sono da tenere conto e da segnalare in fase d'ispezione in quanto sintomo di un cattivo stato di conservazione, il quale può essere un rischio per l'integrità del sistema di precompressione. Anche per i difetti spia è assegnato un peso G per il livello di gravità.



Figure 2.5-2.8: rispettivamente armatura scoperta ed ossidata, guaine in vista, lesioni trasversali e difetti su selle Gerber (ricavate da [4])

La classificazione appena descritta dei difetti riscontrabili è impiegata nelle schede usate durante l'ispezione visiva, dette schede di livello 1 (vedi [4]). Le schede vengono compilate per ciascun elemento e differenziate per tipologia di elementi costituenti e per materiale di realizzazione. Per ogni difetto elencato in ciascuna scheda si assegna un determinato peso G (già come indicato nei paragrafi precedenti), così come due coefficienti: k_1 , per la stima dell'estensione del difetto, e k_2 , per la stima dell'intensità del difetto.

I due coefficienti variano da 0 a 1, con 1 equivalente a casi dove non risulta necessario indicare l'estensione o l'intensità (esempio per k_1 può essere lesioni da schiacciamento, per k_2 macchie di umidità), mentre 0 rappresenta l'estensione o intensità più bassa. La variazione tra i due è decimale e possono rientrare in una delle tre sottocategorie: basso (da 0 a 0,2), medio (da 0,2 a 0,5) e alto (da 0,5 a 1). I valori di k_2 risultano solitamente assegnati, mentre k_1 sono determinabili da uno dei due seguenti rapporti:

$$\frac{\text{lunghezza complessiva del difetto}}{\text{lunghezza campata o sezione di riferimento}}$$

se il difetto ha sviluppo lineare (es: fessure, lesioni, difetti in corrispondenza dei giunti, inflessione trave),

$$\frac{\text{area complessiva del difetto}}{\text{area campata o elemento strutturale di riferimento}}$$

se il difetto ha sviluppo areale (es: deterioramenti, distacchi).

Infine, per poter determinare la difettosità complessiva del sistema, è necessario definire e specificare “elemento critico” e “condizione critica”. Un “elemento critico” equivale ad un elemento con particolari caratteristiche di fragilità e dal quale una crisi può comportare una crisi dell’intera struttura o di una porzione di essa, se non la perdita di funzionalità dell’opera (esempio: difetti nei cavi di precompressione o nelle selle Gerber). Una “condizione critica”, invece, è una condizione di possibile collasso data da un accumulo di difetti con elevata estensione ed intensità su un insieme di elementi significativo per numero e/o posizione.

La difettosità complessiva del sistema è scaturita dal livello di difettosità di ogni singolo elemento appartenente al sistema investigato: per ogni elemento viene quindi determinato il proprio livello dalle sopraccitate schede compilate opportunamente post ispezione visiva. Tali livelli di difettosità sono suddivisi in:

-Alto: difetti ove gravità, estensione e posizione può compromettere la funzionalità statica dell’elemento e/o dell’intera struttura; inoltre, la difettosità è concentrata su elementi critici o realizza condizioni critiche (per il singolo elemento e/o per la struttura).

-Medio-Alto: difetti ove gravità, estensione e posizione può compromettere la funzionalità statica dell’elemento e/o dell’intera struttura nel tempo ma ne è possibile il controllo della sua evoluzione tramite sistemi di ispezione e monitoraggio (in attesa di eventuali interventi).

-Medio: il difetto può come non può coinvolgere un elemento non critico; in entrambi i casi, la crisi di tale elemento non compromette il comportamento statico globale dell’opera; in alternativa, a tale difetto è assegnato un peso tra 4 e 5 ma con un’intensità ed estensione tale da non rientrare nelle due categorie precedenti (alto o medio-alto);

-Medio-basso: si ha un numero elevato di difetti con gravità, estensione e posizione non compromettenti la crisi dell’elemento e/o della struttura appartenente; non viene compromesso neanche il funzionamento statico nel tempo.

-Basso: si ha un numero esiguo di difetti con gravità, estensione e posizioni non compromettenti la crisi dell’elemento e/o della struttura appartenente; anche in questo caso non viene compromesso il funzionamento statico nel tempo; inoltre, non esistono casi con elementi critici e/o con presenza di condizioni critiche e i pesi della gravità dei difetti non vanno oltre a $G = 3$.

2.2.2.1.1. Difettosità del sistema di precompressione (per una singola campata e complessiva)

Per il sistema di precompressione è necessario una valutazione dedicata per poter stimare il numero di campioni da indagare nelle Fasi successive (quindi propedeutico per l’ultimo step della Fase 0). Il livello designato per il sistema di precompressione è legato alla sola ispezione visiva. Quindi, dovrà essere rivalutato al termine di ogni fase (a prescindere dalla presenza di difetti).

Per la singola campata, esistono due casi principali. Nel primo caso, se si ha anche un solo elemento del sistema con difettosità alta/medio-alta, all'intero sistema verrà assegnato il livello di difettosità massimo riscontrato tra gli elementi strutturali principali. Sempre in questo caso, se esiste una condizione critica relativa alla struttura (sia intera che una porzione di essa), considerando la possibile crisi scatenabile, verrà assegnato all'intero sistema un livello alto o medio-alto. Nel secondo caso, invece, se non si hanno rilevazioni di difettosità alto/medio-alto sugli elementi considerati, si assegnerà all'intero sistema un livello medio, medio-basso o basso in base al livello riscontrato su ogni singolo elemento basandosi sulla seguente quantificazione in percentuale del numero di elementi ricadenti nei diversi livelli possibili: se almeno il 50% degli elementi risulta di livello medio, il sistema verrà considerato di livello medio; altrimenti, si assegnerà al sistema un livello tra medio-basso e basso in base alla percentuale maggiore di elementi ricadenti in una delle due categorie di difettosità.

Per l'intera opera, il livello assegnato sarà il livello massimo riscontrabile nel sistema per singola campata.

2.2.3. Individuazione del tracciato dei cavi tramite prove non distruttive: GeoRadar

Per procedere alla determinazione del numero e localizzazione dei campioni da indagare nelle successive fasi, è necessario individuare il tracciato dei cavi e il numero di cavi presenti nell'armatura da precompressione.

La procedura proposta dalle Linee Guida utilizza il GeoRadar come strumento d'identificazione. Tale strumento viene adoperato impiegando frequenze non inferiori a 2GHz ed è stato scelto per maneggevolezza ed immediatezza nell'interpretazione dei risultati.

Il procedimento è il seguente:

- 1)tracciamento della griglia di riferimento, con linee verticali a passo non maggiore di 100 cm da testata per un tratto tale da permettere il tracciamento per l'intera altezza della trave (quindi compresa di anima e bulbo);
- 2)esecuzione di scansioni verticali in corrispondenza delle linee verticali individuate al punto (1);
- 3)individuazione del tracciato dei cavi tramite le scansioni verticali eseguite al punto (2), in corrispondenza di ciascuna linea verticale individuata al punto (1); l'unione delle singole posizioni individuate formano l'andamento di ciascun cavo;
- 4)rilievo dei "punti singolari", per esempio nelle testate o in mezzeria (dove i cavi possono sovrapporsi), andando quindi a scansionare nell'intradosso di tali punti (dove la scansione non risulta influenzata dalla sovrapposizione dei cavi); in ordine verranno prima eseguite le scansioni all'intradosso della mezzeria, poi quelle all'intradosso delle testate.

2.2.4. Determinazione del numero di campioni e della loro localizzazione

La determinazione del numero di campioni da indagare nelle prossime Fasi, come già accennato all'inizio di questo capitolo, parte dal completo processo di conoscenza, che consiste dell'insieme delle informazioni ricavate nei precedenti step. Da tali informazioni vengono derivate le classi di rischio per poi effettuare una valutazione qualitativa dei campioni da indagare. In questo processo è importante tenere anche conto delle eventuali differenti popolazioni di cavi, dove ciascuna popolazione contiene cavi omogenei in termini di tipologia, geometria e lunghezza. Inoltre, è importante controllare il tipo di impalcato: se è un unico impalcato, l'opera verrà considerata come unica, mentre se gli impalcati risultano separati (detto due vie separate), verranno considerati entrambi gli impalcati separatamente ma identici tra di loro a livello progettuale, a livello costruttivo e a livello realizzativo, oltre ai livelli di difettosità congruenti (cioè il numero degli elementi è distribuito equamente tra le due vie).

La definizione della classe di rischio viene fatta in base alla definizione di due indici: l'indice di Probabilità (P, cioè la probabilità di avere difetti all'interno del cavo) e l'indice di conseguenza (C, cioè la conseguenza di una crisi del cavo sull'intera struttura). Entrambi gli indici assumono un valore da 1 a 5 e sono calcolati attraverso le seguenti formule:

$$P = \sum P_i \cdot w_i;$$

$$C = \sum C_i \cdot w_i$$

Con P_i come indice di probabilità del singolo fattore d'influenza i , C_i come indice di conseguenza del singolo i e w_i come peso del fattore P_i o C_i .

Entrambi gli indici sono calcolati assegnando un valore numerico in un range da 1 a 5, così come un peso, per ciascun indice d'influenza considerato per il calcolo: presenza di documentazione tecnica ($w_i = 0.15$), lunghezza e geometrica dei cavi ($w_i = 0.4$), livello di difettosità attuale del sistema di precompressione ($w_i = 0.45$) sono gli indici d'influenza considerati per il calcolo di P ; per il calcolo di C , invece, sono stati considerati il costo per il completo ripristino della funzionalità dell'opera ($w_i = 0.4$), la ridondanza dell'elemento strutturale ($w_i = 0.4$) e il livello d'importanza dell'opera rispetto alla rete stradale di appartenenza ($w_i = 0.2$).

I valori ottenuti dal calcolo di P e di C verranno incrociati attraverso la seguente matrice, ottenendo la definitiva classe di rischio (R) associata:

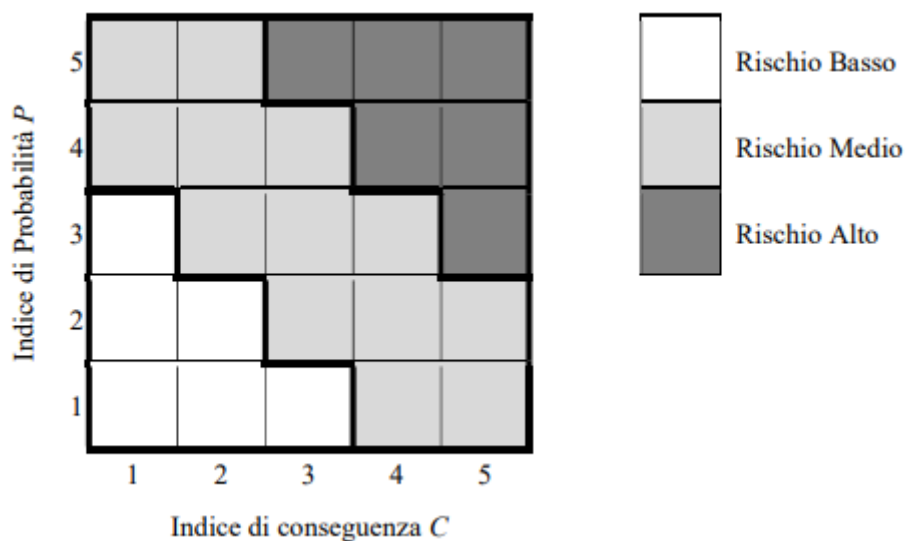


Figura 2.9: matrice per la definizione della Classe di Rischio (R , ricavata da [4]).

Le classi di rischio potranno essere Bassa, Media o Alta.

Oltre alla classe di rischio, per la determinazione del numero di campioni da indagare è necessario conoscere anche il grado d'impatto (I): quest'indice rappresenta il grado d'impatto dell'ispezione svolta sul cavo indagato sulla sicurezza globale della struttura. Come per le classi di rischio, il grado d'impatto può assumere uno dei seguenti gradi:

-**Basso**, cioè si ispeziona il cavo tramite indagini non distruttive/semi distruttive e poco invasive (le indagini endoscopiche non rientrano in questo grado d'impatto per via del gran numero di prove richieste, che causano un aumento del rischio;

-**Medio**, cioè si ispeziona il cavo tramite indagini semi distruttive in maniera estesa dove è richiesto un attento ripristino per garantire la durabilità della struttura e dei cavi (per esempio: prelievi di calcestruzzo o saggi conoscitivi);

-**Alto**, cioè le indagini eseguite prevedono tagli o prelievi di armatura da precompressione.

Ottenuti R (classe di rischio) ed I (grado d'impatto), attraverso le Linee Guida (vedi [4]) si ricava la percentuale massima accettabile di cavi potenzialmente difettosi.

Tabella 2.1: percentuale accettabile dei cavi con presenza di difetti in funzione di R (Classe di Rischio) ed I (Grado d'Impatto)

Classe di Rischio	Grado d'impatto delle indagini sulla sicurezza strutturale globale		
	Alto	Medio	Basso
Alto	20%	10%	10%
Medio	30%	20%	10%
Basso	30%	30%	20%

Dalla percentuale appena ricavata possiamo ottenere il numero di campioni da indagare in base al livello di confidenza scelto (per poter confermare anche la stessa percentuale considerata): generalmente viene assunto un livello di confidenza del 75%; se si richiede una valutazione accurata, il livello di confidenza, e di conseguenza il numero di campioni richiesto, aumentano. Il numero di campioni appena ricavato tiene conto anche dello stato di conservazione del ponte, ovvero dei possibili difetti emersi in sede d'ispezione visiva: se sono presenti difetti manifesti d'intensità ed entità non trascurabile, tali difetti rientreranno nel gruppo di campioni che verranno direttamente analizzati approfondimenti.

Il calcolo del numero effettivo di campioni da indagare sarà uno dei due seguenti:

$$N_{tot.camp.}^{\circ} = N_{FHWA}^{\circ}$$

se non sono presenti difetti manifesti "grossi",

$$N_{tot.camp.}^{\circ} = N_{FHWA}^{\circ} + N_{elem.dif.}^{\circ}$$

se sono presenti difetti manifesti "grossi".

Dopo la determinazione del numero di campioni è necessario individuare la localizzazione di tali ed è data, oltre a conoscere il tracciato dei cavi e il loro numero, dai seguenti fattori: accessibilità ed indagabilità degli elementi (in base alle tipologie di prove scelte e dalla tipologia di macchine da cantiere disponibili per l'esecuzione di tali indagini); presenza di sezioni critiche o zone ad alto rischio di penetrazione di aria umida, acqua e contaminanti (fattori che possono scaturire la corrosione del sistema di post tensione). Il processo per la localizzazione dei punti e/o zone d'indagine è il seguente:

- 1) individuazione degli impalcati con la maggior presenza di difetti (da ispezione visiva);
- 2) individuazione delle travi con il maggior numero di difetti spia (preferibilmente le travi scelte appartengono ad impalcati diversi e in non posizioni analoghe);
- 3) individuazione dei cavi con una maggiore predisposizione ad avere presenza di vuoti, cioè i tracciati di tali cavi hanno un raggio di curvatura più accentuato e/o con pendenze maggiori (consigliato un massimo di 2 cavi per trave o per popolazione di cavi, se coesistono più popolazioni nella stessa trave);
- 4) individuazione dei punti o zone d'indagine;
- 5) nel caso alcuni punti e/o zone risultano irraggiungibili, ripercorrere il procedimento dal punto (2).

Il campione risulta completamente indagato quando tutte le zone critiche individuabili sono state indagate.

2.3. Fase 1

Per effettuare la determinazione dei difetti riscontrati, la Fase 1 si articola in:

- Preparazione del campione: necessaria l'individuazione del tracciato dei cavi nella zona indagata (procedimento simile a quanto descritto al cap.2.2.3 con anche le operazioni di quotatura e registrazione misure), per poi selezionare la percentuale dei campioni da indagare (vedi cap.2.2.4 per il procedimento);
- Indagine del campione per la localizzazione e quantificazione dei difetti attivi, oltre ai vuoti nelle condotte;
- Valutazione preliminare della probabilità di corrosione.

Riguardo alla preparazione del campione, alcune zone che hanno subito l'operazione di tracciatura vengono utilizzate anche per confrontare tale tracciatura con quella definita da progetto.

2.3.1. Indagine del campione per la localizzazione e quantificazione dei difetti

Il processo per la localizzazione e quantificazione dei difetti attivi (e vuoti nei condotti) si svolge con le indagini ed analisi preliminare per localizzare e quantificare i difetti individuati nella Fase precedente. Lo scopo principale di tale processo è l'individuazione di vuoti nelle condotte e dei difetti attivi sul sistema di precompressione. Inoltre, si può già fare un'analisi preliminare della probabilità di corrosione.

L'individuazione dei vuoti e dei difetti attivi è determinata tramite l'esecuzione di prove non distruttive e semi distruttive poco invasive, richiedendo quindi una tecnologia tale da non recare o da recare in maniera ridotta impatto sulla struttura.

Esempi di possibili indagini non distruttive possono essere:

- indagini tomografiche;
- impact echo;
- indagini a raggi X;
- emissioni acustiche;
- magnetic flux leakage (per sistemi di post-tensione esterni).

I primi tre esempi determinano con maggiore o minore affidabilità la presenza di anomalie esistenti all'interno dei condotti: dei tali è stato optato l'uso delle indagini tomografiche nelle prove eseguite considerate nelle analisi svolte nel prossimo capitolo (cap.3.3).

Esempi di indagini semi distruttive, e poco invasive, sono le prove endoscopiche (o di "video-ispezione").

2.3.1.1. Indagini tomografiche

L'indagine è svolta tramite l'impiego del tomografo portatile. Lo strumento viene impiegato per eseguire scansioni, sia lineari che matriciali, attraverso l'invio di segnali acustici. Il processo d'indagine, se le scansioni sono lineari, avviene nella seguente maniera:

- 1)tracciamento della griglia, tramite linee verticali e parallele, sul lato oggetto d'indagine;
- 2)esecuzione di scansioni con tomografo lineare;
- 3)individuazione delle zone con intensità anomala.

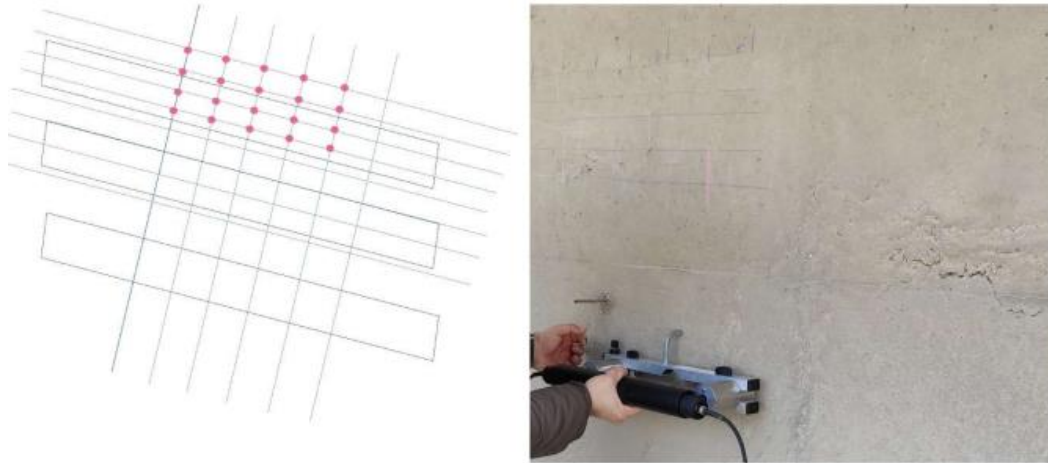


Figura 2.10: schema applicativo (a dx) e applicazione sulla zona indagata del tomografo (a sx), entrambe prese da [4]

Il punto (2) è preceduto da misure di calibrazione tramite scansioni di tipo trasversali, dette “B-scan”, ripetute in più punti corrispondenti alle sezioni non identificate come critiche. Tali scansioni sono eseguite con frequenze specifiche (tra i 50 e i 60 kHz) variando l’amplificazione analogica e digitale in intervalli considerevoli. Una volta determinata una calibrazione “accettabile”, si esegue una scansione trasversale al cavo di almeno 30 cm, cioè tendenzialmente 3 scansioni in linea, come riscontro finale.

Sempre nella fase di calibrazione, se le “condizioni al contorno” (solitamente sono presenza di vespai, scabrosità superficiali, distacco del calcestruzzo e/o dell’armatura lenta...) non permettono una chiara identificazione del cavo si considera impraticabile l’indagine tramite il Tomografo portatile.

Le intensità anomale, individuate nel punto (3), possono essere delle cavità d’aria esterne alla guaina (cioè relative ad un distacco guaina-calcestruzzo) o anche delle piccole sacche d’aria tra i trefoli/fili e la guaina (cioè piccole fessurazioni e frantumazioni nella boiacca). Esse, quindi, non sono per forza riconducibili ad un difetto d’iniezione nella guaina, poiché il tomografo, nonostante identifica una differenza nell’impedenza acustica (ergo una differenza nella densità e velocità di attraversamento delle onde acustiche nel materiale soggetto a tali onde), trova complicato identificare l’estensione, gravità e l’esatta locazione del difetto.

Se le scansioni eseguite sono matriciali, il procedimento diventa il seguente:

- 1) esecuzioni scansioni con tomografo matriciale;
- 2) esecuzioni scansioni in punti singolari (per esempio in mezzeria e nell’intradosso della trave).

Oltre a mantenere un simile procedimento per le misure preliminari di calibrazione effettuate per le scansioni lineari (quindi le scansioni matriciali usano lo stesso riferimento di quelle lineari), è necessario segnalare come le scansioni matriciali risultano più onerose delle lineari in quanto tutti i sensori vengono utilizzati come singolo emittente/ricevente.

I risultati ottenuti dalle indagini tomografiche possono considerarsi attendibili nel caso le guaine presenti nel sistema di precompressione siano metalliche. Nel caso di guaine polimeriche, invece, le guaine stesse impediscono la corretta esecuzione dell’indagine. Portare anche attenzione, sempre per lo stesso motivo, alle “condizioni al contorno” (ovvero la presenza di vespai, eventuali scabrosità superficiali e distacchi del calcestruzzo, così come distacchi dell’armatura lenta sia longitudinale che trasversale particolarmente congestionata).

2.3.1.2. Endoscopie

Le prove endoscopiche richiedono un martello perforatore, con punte per calcestruzzo (diametri tipici sono dagli 8 ai 27 mm) e compressore elettrico portatile, insieme al video-endoscopio (ad alta definizione con sonda da un diametro sui 6-10 mm). Il procedimento, da eseguire post tracciatura dei cavi, quindi dopo la localizzazione dei punti d'indagine, è il seguente:

- 1) esecuzione del foro preliminare (con diametro di 10 mm), di profondità tale da intercettare il cavo;
- 2) pulizia del foro e verifica dell'effettiva intercettazione del cavo tramite l'impiego del video-endoscopio;
- 3) nel caso di un esito positivo del punto (2), allargamento progressivo del foro (a 20 mm e poi a 27 mm di diametro);
- 4) apertura lembi della guaina tramite l'impiego di un perforatore senza percussione con eventuale giravite a taglio;
- 5) pulizia del foro e verifica della visibilità dell'armatura (se necessario, cioè per rimuovere la boiaccia e/o allargare l'apertura, usa lo stesso procedimento indicato nel punto (3));
- 6) esecuzione dell'ispezione "visiva" mediante i video-endoscopio inseriti;
- 7) protezione dell'armatura da precompressione con una vernice passivante, per poi completare la chiusura del foro tramite l'impiego di una resina epossidica o di una malta fibrorinforzata a ritiro controllato.



Figura 2.11: (a sx) endoscopi posizionati negli appositi fori e collegati (a dx) ad opportuno strumento di lettura (preso da [4])

L'obiettivo è quello di verificare lo stato di conservazione del cavo e della guaina, nello specifico riguardo a: eventuale presenza ed intensità di ossidazione/corrosione (per entrambi), eventuale presenza di umidità e alla completezza e consistenza dell'iniezione. Durante il procedimento, soprattutto quando si esegue il foro e l'allargamento di tale foro (tipo i punti (1) e (3)), bisogna prestare particolare attenzione a non danneggiare l'armatura.

Durante l'esecuzione dell'ispezione video-visiva (punto (6)), nel caso in cui il cavo si trovi ad una profondità minore di 100 mm dalla superficie esterna, bisogna procedere con l'ispezione usando macrofotografie in foro al posto delle video-endoscopie. La procedura appena proposta permette di avere maggiore nitidezza e risoluzione rispetto alle "video-ispezioni".

2.3.2. Valutazione preliminare della probabilità di corrosione

La stima della probabilità di corrosione in questa fase non può essere definita solo dall'analisi del contesto della struttura (valutazioni ottenute dalla Fase 0, principalmente durante l'analisi storico-critica) e della determinazione dello stato di conservazione (vedi cap.2.2.4). Il problema è legato al numero minimo e tipologia di indagini considerata nei due step sopra citati, i quali potrebbero non presentare delle condizioni critiche o situazioni tali da poter causare la corrosione degli elementi interni. Perciò ci si avvale di un ulteriore step che è la valutazione preliminare della probabilità di corrosione.

È necessario distinguere tra valutazioni effettuate sulla matrice di calcestruzzo e quelle effettuate all'interno dei condotti, quindi sulla malta d'iniezione.

Le valutazioni sulla matrice di calcestruzzo sono valutazioni a completamento delle analisi preliminari della corrosione e vengono eseguite oltre alle valutazioni effettuate nelle guaine e sulla malta d'iniezione. Le informazioni ricercate nella valutazione della matrice sono le seguenti:

- concentrazione degli ioni cloruro, attraverso il “profilo di penetrazione”;
- concentrazione degli ioni solfato, in funzione di un eventuale contatto dell'elemento precompresso con terreni o acque di falda;
- livello di alcalinità;

Con il “profilo di penetrazione” si intende il prelievo di porzioni di cloruri a profondità differenti, le quali modalità operative sono riportate nella UNI 11747:2019 “Prove sul calcestruzzo indurito – Determinazione della profondità di penetrazione degli ioni cloruro”. Tale operazione è fatta in modo tale da capire l'impatto degli ioni cloruro a contatto con lo strato di passività formatosi sull'acciaio, in quanto gli ioni sono tra i principali fattori nell'indurre l'innesco della corrosione, anche in ambiente alcalino, e quindi la probabilità di innesco della corrosione risulta proporzionale al contenuto di ioni cloruri nell'impasto.

Il livello di alcalinità del calcestruzzo impiegato è il contenuto di alcali nella pasta di cemento e rappresenta il grado di “capacità tampone”, ovvero quanta capacità ha la soluzione a resistere a cambiamenti del pH i quali portano a far diventare la matrice più acida. Il contenuto di alcali nel cemento è determinabile tramite metodi spettrofotometrici su porzioni di legante disciolte in acido (da normativa UNI EN 196-21). Lo studio delle condizioni di alcalinità all'interno del calcestruzzo è utilizzato come metodo più semplice per avere una valutazione rapida della probabilità di corrosione delle armature da precompressione.

Le valutazioni all'interno delle condotte, invece, si differiscono per valutazioni relative alla guaina, a livello dell'elemento post-teso e al livello di condotta d'alloggiamento dei cavi.

Riguardo alle valutazioni relative alla guaina, si distinguono due casi diversi. Il primo riguarda le guaine in lamierino metallico, dove la loro corrosione è determinata più da una perdita delle capacità protettive della matrice di calcestruzzo (che può essere data da carbonatazione o diffusione di cloruri per esempio): tale perdita porta alla perforazione della guaina, favorendo la contaminazione della malta d'iniezione o dell'ingresso di acqua e inquinanti nelle condotte. Il secondo caso, invece, riguarda le guaine polimeriche, le quali non vengono influenzate dalla contaminazione del calcestruzzo (ma le armature lente ne subiscono l'effetto!). La corrosione dei cavi può avvenire, però, da possibili infiltrazioni d'acqua o da contaminazioni preesistenti nella boiaccia.

Le analisi dell'elemento post-teso sono condotte attraverso le valutazioni delle seguenti informazioni:

- spessore dello strato di calcestruzzo che ricopre la guaina: si usano metodi non e semi distruttivi, come il Geo-Radar o le indagini endoscopiche, oppure generalmente si estrapola in sede di altre prove effettuate;
- potenziale elettrochimico delle armature e della loro velocità di corrosione;
- resistività del calcestruzzo: influisce la velocità di corrosione ed è determinato attraverso la correlazione tra la velocità di corrosione delle armature depassivate e la stessa resistività;
- profondità della carbonatazione

Le analisi eseguite nella condotta, cioè a carico della boiacca d'iniezione, sono condotte attraverso le valutazioni delle seguenti informazioni:

- contenuto di cemento;
- concentrazione di ioni cloruro;
- concentrazione di ioni solfato;
- alcalinità;
- contenuto di umidità.

Di tutte queste informazioni, quelle fondamentali per poter avere una conoscenza basilare delle condizioni dell'elemento ispezionato sono il profilo di penetrazione dei cloruri (vedi nella pagina precedente) e del fronte di carbonatazione.

Il fronte di carbonatazione rappresenta la profondità più bassa raggiunta dalla carbonatazione. La carbonatazione rappresenta l'entità dell'effetto scaturito dalla reazione tra l'anidride carbonica atmosferica e l'alcalinità del calcestruzzo. Tale reazione porta alla riduzione di pH sin ad arrivare a neutralità, dove, anche in assenza di cloruri, il calcestruzzo perde le condizioni di passività. La determinazione della profondità raggiunta è determinata (sempre tramite le norme tecniche UNI EN 12504-1, UNI EN 14630 e UNI EN 13295) attraverso il metodo della fenolftaleina su carote o polvere direttamente estratte dall'elemento indagato, applicando una soluzione all'1% di fenolftaleina in alcool etilico sulla superficie della carota estratta ed asciutta. Da tale applicazione si riconoscerà il calcestruzzo carbonato come quello di colore inalterato, mentre assume un colore rosso violetto se non carbonato. Se invece si considera la polvere estratta, che è il nostro caso, la determinazione è data dalla polvere ottenuta genericamente dalle prove endoscopiche, raccogliendole in provetta, dove verrà rilasciata la soluzione di fenolftaleina. È importante però ottenere una determinazione in poco tempo, in quanto la polvere di calcestruzzo reagisce velocemente con l'anidride carbonica.

Le condizioni di rischio di corrosione alto, in questi casi, risiede nel fronte di carbonatazione a livello delle guaine e la concentrazione degli ioni cloruro oltre la soglia di attenzione.

2.4. Fase 2

Questa fase viene considerata se dalla Fase 0 si trova la presenza di elementi particolarmente difettosi o se dalla Fase 1 la localizzazione e quantificazione preliminare dei difetti ha avuto esito "negativo", cioè è stato riscontrato almeno un difetto di grande dimensione o di media dimensione associati ad un'alta probabilità di corrosione (quindi non si può escludere che la struttura sia priva di difetti con la probabilità determinata a monte).

La Fase 2 si articola in:

- Analisi accurata dei difetti;
- Valutazione della probabilità di corrosione;
- Valutazione della tensione locale del calcestruzzo e dell'acciaio da precompressione.

2.4.1. Analisi accurata dei difetti

Lo scopo principale è la determinazione della presenza ed estensione di zone di vuoto all'interno delle guaine attraverso l'impiego di procedure semi distruttive (per esempio i saggi diretti). Queste indagini verranno svolte in corrispondenza delle zone classificate "difettose" durante la Fase 1, insieme ad eventuali zone critiche fortemente degradate individuate in Fase 0 (e non altrimenti indagabili).

2.4.1.1. Saggio diretto

Il saggio diretto viene eseguito tramite l'uso di un martello demolitore con scalpelli per il calcestruzzo. Viene anche impiegato un pacometro per individuare l'armatura lenta: è uno strumento che sfrutta campi magnetici ad impulsi, basandosi sul principio dell'induzione elettromagnetica, per individuare le armature interne ad un elemento di calcestruzzo armato. Dopo aver localizzato la zona d'indagine, si procede nella seguente maniera:

- 1) Individuazione dell'armatura lenta (sia trasversale che longitudinale) tramite indagine pacometrica per definizione della zona esatta per la rimozione del copriferro, con la zona di dimensione sui 30x20 cm;
- 2) rimozione del copriferro e messa a nudo della guaina nella zona individuata nel punto (1), senza danneggiare il sistema di post tensione;
- 3) apertura della guaina tramite 4 tagli, 2 trasversali e 2 longitudinali;
- 4) se presente, rimozione della boiaccia, con anche una leggera scalpellatura manuale per poter mettere a nudo l'armatura da post-tensione;
- 5) se l'armatura da post-tensione risulta corrosa o arrugginita e non sono previste prove per verificare lo stato tensionale dei fili (di solito tramite l'impiego del Diffrattometro a raggi X), pulitura della ruggine sull'armatura;
- 6) esecuzione dell'ispezione visiva e del rilievo fotografico;
- 7) ripristino dell'intera zona.

Le informazioni da ricercare durante l'ispezione visiva e il rilievo fotografico (punto (6)) sono relative all'ossidazione o corrosione della guaina metallica, alla completezza e consistenza della boiaccia da iniezione (ed eventualmente la presenza di umidità), alla presenza ed intensità dell'ossidazione o corrosione sull'armatura da post-tensione, ed infine alla eventuale valutazione della sezione residua dell'armatura. In generale sono tutte informazioni facilmente ricavabili attraverso l'ispezione visiva e la rilevazione fotografica, cosa invece che non accade con la valutazione della sezione residua.

La valutazione della sezione residua dell'armatura continua successivamente all'esecuzione del saggio diretto, dove avviene l'effettiva misurazione dell'area residua. Il procedimento di tale operazione avviene tramite l'uso di un calibro per tre misure per filo, se a fili paralleli, o di $n \cdot 3$ misure (con n = numero di fili visibili), se a trefoli. Il valore dell'area residua risulterà quindi la somma della misurazione media (tra le 3 eseguite) per filo, se a fili paralleli, mentre per i trefoli a tale misurazione media va sommata il residuo medio ottenuto dalla misurazione della sezione trasversale del trefolo.

Tale valutazione porta ad imbattersi di fronte a due problematiche: il saggio diretto espone solo una parte della sezione trasversale del cavo ed è solitamente ed approssimativamente coincidente con la metà inferiore della sezione circolare del cavo, perciò la misura diretta delle singole sezioni di ciascun filo/trefolo non può fornire la stima della sezione totale del cavo; i trefoli hanno una particolare configurazione geometrica, la quale porta ad una valutazione approssimata della sezione trasversale di ciascun filo. Dalla prima problematica si deduce, inoltre, che non si esegue la misura direttamente in situ, dalla sezione trasversale, di tutti i fili o trefoli.

Risulta quindi un processo non facile da eseguire, soprattutto quando il livello di corrosione dei cavi non è molto avanzato. È stato suggerito un procedimento alternativo, solitamente per cavi a trefoli ma impiegabile per i cavi a fili paralleli. Supponendo di avere un trefolo costituito da 7 fili di sezione "A", vengono previste 3 classi di corrosione: "S0", che indica un trefolo integro oppure ossidato superficialmente; "S1", che indica un trefolo corrosivo; "S2", che indica un trefolo fortemente corrosivo. "S1", che risulta la condizione intermedia, porta ad avere una sezione residua uguale al 66% del filo integro e 71% del trefolo integro ($S2 = 0,71 \cdot S0$). Invece, per S2 si intende una corrosione tale da non riuscire a vedere i contorni laterali, con la sezione del trefolo assimilabile ad una circonferenza. In tale condizione l'area residua del singolo filo risulta il 33% del corrispettivo filo integro, mentre per i trefoli la sezione residua risulta il 43% del trefolo integro ($S1 = 0,43 \cdot S0$).



Figura 2.12: zona „scoperchiata“ per poter indagare il cavo, e gli elementi da precompressione, tramite la prova del Saggio diretto (presa da [4]).

Il processo di ripristino dell'intera zona indagata (punto (7)) è eseguito nel seguente ordine: protezione dell'armatura da precompressione esposta tramite l'impiego di vernice passivante; chiusura dei lembi della guaina metallica e ricostruzione del copriferro usando malta fibrorinforzata a ritiro controllato. Attenzione che l'uso di resine epossidiche precludono la possibilità di future indagini quali le “tomografie” (o le prove con il Tomografo portatile, vedi cap.2.3.1.1) e le “diffrazzometrie” (o le prove con il Diffrazzometro portatile, vedi cap.2.4.3.2).

2.4.2. Valutazione della probabilità di corrosione

La valutazione della probabilità di corrosione è regolamentata dalla normativa CS 465 ed è stimabile tramite la misurazione delle seguenti caratteristiche della boiaccia:

- **contenuto di cemento**, il quale, nella miscela, risulta essere un parametro di grande interesse per determinare l'alcalinità del sistema; inoltre, maggior contenuto di calcestruzzo porta ad una minor probabilità di innesco di corrosione in presenza di cloruri (per via del rapporto molare);
- **concentrazioni di ioni cloruro e solfato**: i primi sono in grado di danneggiare lo strato di passività dell'acciaio, con la probabilità d'innesco proporzionale al contenuto dei cloruri nell'impasto, oltre al contenuto critico (per provocare un innesco) rispetto all'alcalinità della boiaccia; i secondi sono contenuti a prescindere nella miscela di calcestruzzo ma esistono rari casi riscontrati di depassivazione da ioni solfato.
- **alcalinità** nella malta d'iniezione, legata alla composizione della soluzione nei pori della malta stessa;
- **umidità**, o la **presenza di acqua condensata su superfici metalliche**, i quali risultano fattori essenziali per lo sviluppo dei processi elettrochimici che causano corrosione;

Riguardo all'alcalinità della malta da iniezione, il contenuto degli alcali nel cemento è determinabile, data la normativa UNI EN 196-21, con spettrofotometri su porzioni di legante disciolte in acido (vedi cap.2.3.2 per maggiori dettagli). Inoltre, la tipologia di cemento indica la quantità di alcalinità nella miscela: se si usa il cemento portland (uso consigliato dallo stesso Documento Operativo [4]), è garantito una maggiore alcalinità della miscela (per maggiori informazioni, vedi anche cap.2.3.2). Infine, l'alcalinità può essere usata come sostituto della misura del pH, in quanto più semplice da eseguire e di rapida valutazione per la verifica della probabilità di corrosione, ma non è la stessa cosa.

Riguardo all'umidità, essa si infila nei condotti tramite fessure o aperture e nelle zone di ancoraggio, specialmente se prossimi o coincidenti ai giunti. L'acqua, quando è all'interno delle guaine, non può né fuoriuscire né evaporare: unica eccezione accade quando, prima dell'iniezione della boiaccia, viene eliminata l'umidità tramite essiccazione artificiale; infiltrazioni successive, però, vanno a modificare la capacità protettiva della malta.

2.4.3. Valutazione tensione locale del calcestruzzo e dell'acciaio da precompressione

Per le valutazioni delle tensioni locali del calcestruzzo e delle tensioni dell'acciaio da precompressione, sono stati optati i seguenti metodi: metodo del rilascio tensionale (per la valutazione della tensione locale del calcestruzzo) e la diffrattometria a raggi X (per la valutazione della tensione dell'acciaio da precompressione).

2.4.3.1. Tensione locale del calcestruzzo: metodo del rilascio tensionale

Il metodo consiste nell'isolamento locale, tramite uno o più tagli rettilinei (o inclinati di un angolo intorno ai 45°) di una porzione di calcestruzzo, i quali tagli andranno a provocare una deformazione dell'elemento. Tale deformazione viene misurata tramite l'impiego di estensimetri elettrici. La deformazione appena misurata risulterà corrispondente, in modulo (ma con segno opposto), alla deformazione indotta da carichi preesistenti. Tramite la legge di Hooke e tramite la definizione del modulo elastico medio del calcestruzzo si può risalire alla tensione agente sull'elemento isolato prima dei tagli, la quale risulterà come la tensione di precompressione (oltre ad eventuali tensioni date da agenti esterni).

Il procedimento è il seguente:

- 1) in mezz'ora della trave, determinazione della direzione lungo la quale si andranno a determinare le tensioni del calcestruzzo scegliendo dei punti specifici per la misurazione;
- 2) stima del modulo elastico medio del calcestruzzo;
- 3) preparazione della prova, data da:
 - 3.1) individuazione della posizione dell'armatura ordinaria di rinforzo (tramite pacometro e/o GeoRadar);
 - 3.2) selezione dei punti dove eseguire i tagli (scelta fatta in base al punto (3.1) e al punto (1));
 - 3.3) preparazione della superficie tramite la pulizia manuale o tramite strumentazione meccanica leggera;
 - 3.4) incollaggio, collegamento e protezione dell'estensimetro lineare (per maggiore precisione consigliato installazione di 2 estensimetri paralleli affiancati lungo il lato maggiore mediando le deformazioni rilevate);
 - 3.5) calibrazione ed azzeramento della lettura dell'estensimetro;
- 4) esecuzione della prova tramite misurazioni in continuo con la zona dell'estensimetro "scaricata" (lo "scaricamento" avviene tramite i tagli sopra citati);
- 5) valutazione dello stato tensionale dalle misure di deformazione eseguite sin al rilascio tensionale.

I punti specifici per la misurazione selezionati nel punto (1) sono mostrati nella figura qui sotto:

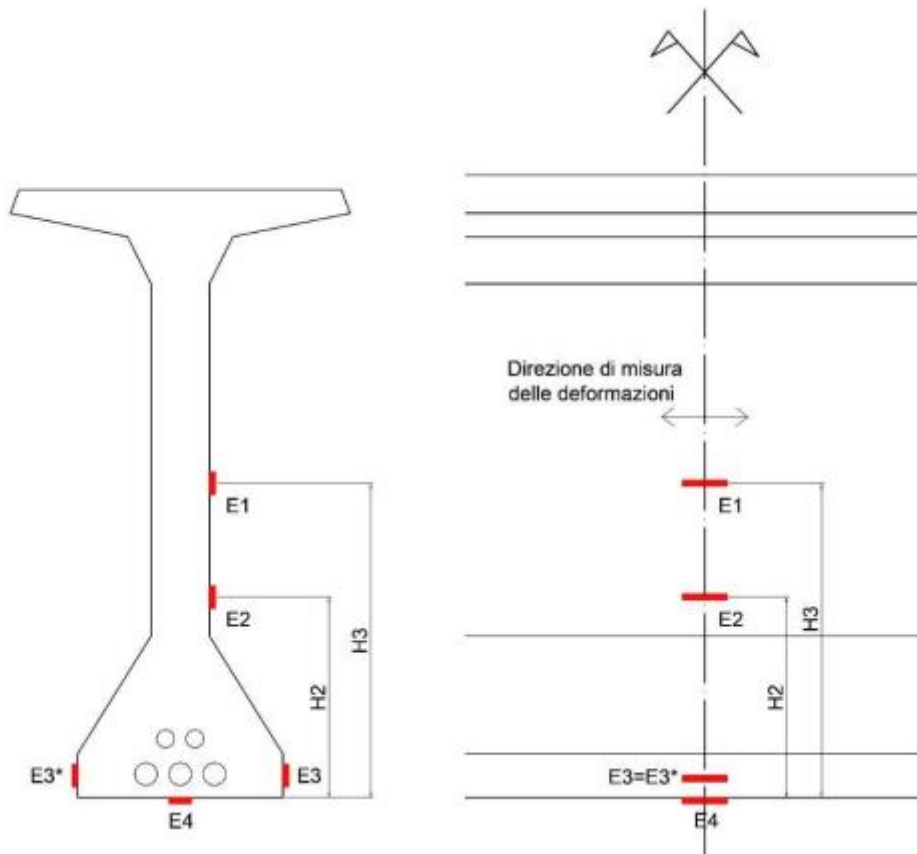


Figura 2.13: sezione (figura a sx) e vista laterale (figura a dx) della mezzeria della trave, indicati la direzione di misurazione delle deformazioni coincidente con la direzione longitudinale della trave; inoltre sono indicati i punti d'investigazione suggeriti (ricavata da [4]).

tra le posizioni sopra elencate, le più adeguate dove svolgere le indagini sono denominate E1, E2 ed E3. Nell'eventualità che in E3 non sia possibile eseguire il taglio si possono usare come posizioni E3* (stessa posizione di E3 ma dal lato opposto) oppure E4 se anche in E3* non è possibile eseguire il taglio. La prova deve comunque essere eseguita in almeno 2 dei 3 punti scelti, per poter avere misurazioni di confronto.

La stima del modulo elastico (punto (2)) è ottenuto da prove distruttive (per esempio prove di carotaggio) oppure anche da prove non distruttive (per esempio prove di estrazione o sonreb). Inoltre, si può fare riferimento ai valori delle resistenze misurati in precedenti campagne d'indagine.

L'applicazione dei tagli durante l'esecuzione della prova (punto (4)), per poter scaricare la zona dove è posto l'estensimetro, può essere di qualsiasi tipo. Le due soluzioni solitamente considerate sono: taglio trasversale rispetto all'asse dell'estensimetro, con secondo taglio al lato opposto al primo se il primo taglio non raggiunge lo stato di deformazione del calcestruzzo; quattro tagli con inclinazione di 45° e profondità di 30 mm eseguiti in sequenza, prima trasversali e poi paralleli all'asse. La soluzione usata per le prove svolte e considerate nelle analisi nel prossimo capitolo (cap.3.4.2) è la seconda.

2.4.3.2. Tensione dell'acciaio da precompressione: diffrazione a raggi X

La misurazione della tensione dell'acciaio da precompressione viene effettuata tramite l'utilizzo del Diffratometro a raggi X, strumento che sfrutta il concetto di diffrazione dei raggi X in un materiale cristallino (per la precisione il concetto è lo scattering elastico coerente, cioè la diffrazione risultante è la somma delle onde elettromagnetiche diffuse dagli atomi sulla stessa famiglia di piani reticolari).

Le zone scelte per l'esecuzione della prova sono solitamente quelle con i fili/trefoli non in condizioni ottimali e già esposti dal saggio diretto. Nell'eventualità che si scelga una zona non indagata tramite saggio diretto, si ripete lo stesso procedimento di "scoperchiatura" della trave.

Il procedimento è il seguente:

- 1) preparazione della superficie di prova e calibrazione della posizione dello strumento;
- 2) esecuzione della prova tramite misurazione diffrattometrica, effettuata in 3 diverse posizioni per ciascun filo indagato;
- 3) ripristino del cavo e della trave (stesso procedimento usato per il saggio diretto, vedi cap.2.4.1.1).

Le misurazioni ottenute (punto (2)) consentono di valutare il tasso di lavoro effettivo del trefolo/filo. Infatti, la tensione ricavata può essere confrontata con la tensione a rottura, la quale può essere calcolata tramite la prova "durometrica" (parte della valutazione accurata, vedi cap.2.6.2.2).

Un dettaglio importante relativo alle misurazioni riguarda l'influenza sulle tali dalla presenza di tensioni residue per via dei processi di lavorazione a cui sono sottoposti i fili. La tensione rilevata risulta come somma della tensione residua dal processo di fabbricazione e la tensione da sforzo di trazione all'armatura di precompressione durante la fase di tiro.



Figura 2.14: esempio di applicazione del Durometro portatile (foto presa da [4]).

2.5. Fase 3

Questa è una fase considerabile come "facoltativa", adoperabile quando non è possibile escludere sussistenza di condizioni tali da compromettere la statica dell'opera (o parte di essa) o quando si reputa necessaria una valutazione sul comportamento globale della struttura. Le indagini si concentreranno quindi sull'impatto del quadro di danno valutato localmente nelle precedenti fasi sul comportamento globale della struttura.

Le prove utilizzate nelle indagini per ricavare le informazioni sul comportamento globale della struttura possono essere di due tipologie: dinamiche o statiche. I due approcci hanno pregi e difetti complementari, risultando quindi utile in alcuni casi combinare entrambe le tecniche con l'obiettivo di ottenere un quadro più accurato delle condizioni globali della struttura.

2.6. Valutazione accurata

Come conseguenza delle analisi svolte nelle tre Fasi appena descritte, si sviluppa la valutazione accurata del sistema di post-tensione, quindi delle caratteristiche inerenti a tale sistema. Nel nostro caso, la caratteristica da reperire e valutare, tramite l'impiego di indagini e saggi, è la resistenza a snervamento dei cavi, che è pari alla tensione a snervamento (caratteristica intrinseca del materiale) per l'area trasversale residua del cavo (caratteristica geometrica del cavo). L'area trasversale residua è dipendente dallo stato di degrado del cavo, come corrosione ed ossidazione.

Il Fattore di Confidenza (FC) è introdotto per la valutazione della resistenza a snervamento. FC, che è legato al Livello di Conoscenza (LC), è usato come indice di scostamento tra la media campionaria e la media reale della caratteristica della popolazione studiata. Tale interpretazione è fattibile in quanto, da Normativa, il Fattore di Confidenza può essere usato per ridurre i valori dei parametri sui materiali. Perciò, alla base di tutto troviamo la correlazione tra FC con il numero d'indagini da eseguire per rilevare la tensione a snervamento dell'acciaio. Il Livello di Conoscenza, in base alla normativa EC8, dipende dal numero d'indagini eseguite sui dettagli costruttivi ed è interpretato come la stima della probabilità che l'ipotesi percentuale dei cavi difettosi nella popolazione considerata sia corretta.

2.6.1. Determinazione del numero di prove

Come per le analisi svolte nelle tre Fasi d'ispezione precedenti, è necessario determinare antecedentemente all'esecuzione delle indagini il numero di prove. Esistono due modalità diverse:

- 1) il numero di prove necessario per individuare con una certa probabilità la percentuale di elementi difettosi è definito tramite il metodo FHWA con distribuzione ipergeometrica del campo difettoso;
- 2) si assume FC per avere come target un numero di prove per poter stimare la tensione ultima a rottura dell'acciaio applicando a ritroso il metodo t di Student.

2.6.1.1. Determinazione della percentuale di cavi difettosi

La seguente equazione, per determinare la percentuale di campioni difettosi, ha come obiettivo quello di ottenere il numero minimo di campioni per avere almeno un elemento con la caratteristica prefissata.

$$P_d = 1 - CDF = 1 - P(i < k) = 1 - P(i < 1)$$

Nell'equazione viene usata la funzione cumulata di una distribuzione (CDF), che è la probabilità di trovare al massimo un numero i di elementi dotati della caratteristica ricercata, ponendo k come estremo superiore dell'insieme dei valori rappresentati in i . A k solitamente viene assegnato come valore 1, ma in realtà sarebbe $P_d = 1 - P(i = 0)$ in quanto non si possono avere un numero di elementi difettosi minore di zero. Perciò, per poter definire P_d basta definire $P(i=0)$. Data la definizione del valore di P_d , in base alle tabelle fornite da [4], si andrà a definire il numero delle prove, inserendo in tali tabelle il valore di P_d e il numero di cavi identificato. Infatti, la variazione di P_d porta proporzionalmente alla variazione della probabilità di trovare un elemento dotato della caratteristica ricercata. Tale variazione andrà ad incidere il numero di prove da eseguire (se aumenta P_d , aumenta la probabilità di trovare l'elemento con la caratteristica ricercata e quindi del numero di prove da eseguire). Le tabelle sopra citate sono tre, una per ciascun Livello di Conoscenza considerato (85%, 95% e 99% rispettivamente per LC1, LC2 e LC3).

Esiste però un procedimento partendo da “zero” (cioè senza l’ausilio di tabelle), il quale è il medesimo impiegato per la determinazione della Classe di Rischio R e del Grado d’Impatto I affrontato nella determinazione dei campioni d’indagine nella Fase 0 (vedi cap.2.2.4). Nel procedimento, si considera P_d come il numero minimo di campioni da indagare e verrà associata al Livello di Conoscenza LC che si vuole raggiungere, determinato da specifiche tabelle fornite dallo stesso Documento Operativo. Da questo procedimento si possono ottenere due probabili esiti: si avranno un certo numero di campioni difettosi, definendo quindi la percentuale degli elementi

difettosi per la fase di valutazione accurata come $m_f = \frac{i_a}{n_a} \cdot N$, con i_a equivalente al numero di campioni difettosi da valutazione accurata; se invece non vengono identificati elementi difettosi, oltre a non riscontrare anomalie nelle zone indagate da endoscopie e saggi, si assume che nessun elemento è difettoso, ma nell’eventualità si assume degli eventuali pericoli, calcolo della m_f come nel primo caso.

Se è stata eseguita l’intera procedura delle Ispezioni Speciali, descritta dal capitolo 2.2 al capitolo 2.5 nelle quattro Fasi d’investigazione, e risultati necessario la verifica accurata per via di situazioni di danneggiamento tali da intaccare il comportamento strutturale, si prosegue identificando un valore presumibile di elementi difettosi

$m_a = \frac{i_p}{n_p} \cdot N$, con i_p equivalente al numero di elementi difettosi identificati dalle campagne d’indagine (che, nella nostra situazione, risulta maggiore all’unità), n_p come l’ampiezza preliminare dei campioni da indagare ed N come la popolazione identificata totale. Tale valore è l’“input” per determinare l’ampiezza del campione d’indagine per la valutazione accurata come $N_a = N - n_p$. Questi due valori, tramite l’ausilio di tabelle fornite dalle Normative e da [4], vanno a definire l’ampiezza del campione d’indagine per la valutazione accurata n_a , il

quale va sommato a quello precedentemente indagato. Da tale somma si applica la formula $m'_a = \frac{i_a}{n_a} \cdot (N - n_p)$, dalla quale si cerca di avvicinarsi il più possibile al valore di m_a determinato ad inizio procedimento. Da tale confronto si avranno due soluzioni, dove in una i valori di m_a e m_{primo} sono coincidenti, ottenendo dai tali la percentuale di difettosità m_f . Se invece non c’è coincidenza, la determinazione di m_f avviene tramite la seguente

formula: $m_f = \left[\frac{i_p}{n_p} \cdot N + \frac{i_a}{n_a} \cdot (N - n_p) \right] \cdot \frac{1}{2}$.

2.6.1.2. Determinazione del numero di prove per la valutazione della tensione ultima dell’acciaio

In questo caso, come indicato ad inizio capitolo, viene applicato a ritroso il metodo test t di Student. Viene definito FC (fattore di confidenza) come indice di scostamento tra X_m (la media campionaria) e μ (la media della popolazione, sconosciuta), in modo tale da garantire l’opportuna riduzione della stessa media campionaria, restituendo un valore inferiore alla media della popolazione. FC, quindi, risulterà maggiore o uguale al rapporto tra X_m e μ : la stima del fattore di confidenza necessita della valutazione della media della popolazione.

La valutazione della popolazione può essere ottenuta dalla seguente formula, considerando come livello di confidenza $1-\alpha$ su un campione limitato ($n < 30$):

$$\mu_{1-\alpha} = X_m - \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_{1-\alpha; n-1}$$

Inserendo la formula sopra esposta nel rapporto tra X_m e μ si ottiene la seguente formula:

$$FC = \frac{X_m}{\mu_{1-\alpha}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot CV \cdot t_{1-\alpha; n-1}}$$

dove CV è il coefficiente di variazione del campione e risulta uguale al rapporto tra s (deviazione standard) e X_m (media campionaria).

Il numero di prove da eseguire dipende quindi dalla disponibilità delle informazioni reperibili e degli elaborati originali. Si distinguono due casi: assenza di informazioni (**No prior knowledge**) e presenza di informazioni (**Prior knowledge**). Poiché l'obiettivo rimane sempre di minimizzare il numero di prove necessarie per raggiungere un FC già prefissato, si ricerca l'ampiezza minima del campione, la quale stima è ottenuta tramite l'applicazione a ritroso del metodo t di Student usando la formula scritta sopra.

Considerando quindi l'ultima formulazione ottenuta per il Fattore di Confidenza, la ricerca del numero di campioni (n) avviene attraverso il seguente processo iterativo:

- 1) scelta del livello di conoscenza (LC);
- 2) scelta del fattore di confidenza (FC) da raggiungere;
- 3) scelta del valore iniziale di CV;
- 4) definizione del numero di prove (n) necessario per ottenere il valore di FC definito al punto (2);
- 5) esecuzione delle n prove e calcolo del valore effettivo di CV.

Se il valore di CV ottenuto risulta minore o uguale al valore di CV prefissato, il numero di prove scelto è idoneo. Altrimenti, è necessario ripartire dal punto (3).

Le differenze che sussistono tra le casistiche "No prior knowledge" e "Prior knowledge" vengono indicate attraverso la differente formulazione dei parametri statistici considerati. Infatti, la media campionaria diventa

$$X_{m,U} = \frac{n_0 \cdot X_{m0} + n_1 \cdot X_{m1}}{n_0 + n_1}, \text{ con:}$$

- valore medio delle tensioni ultime di rottura dei cavi da precompressione ricavati dagli elaborati progettuali (X_{m0});
- media campionaria dei valori di tensione di rottura ottenuti tramite applicazione del Durometro Portatile, procedimento illustrato al cap.2.6.2.2 (X_{m1});
- numero equivalente di prove associato a X_{m0} (n_0);
- numero di prove associate a X_{m1} (n_1).

L'associazione ad una delle due casistiche dipende dal valore che n_0 assume. Infatti, se n_0 risulta uguale a 0, cioè ci troviamo in assenza di specifiche da progetto, siamo nel caso di No prior knowledge, mentre se risulta maggiore di 0, prescindere dal numero effettivo (le quali possono essere $1 \cdot n_1$ o $2 \cdot n_1$ se si posseggono più documentazioni di prova e/o specifiche di progetto), siamo nel caso di Prior knowledge.

Il numero di prove da eseguire (n_1), invece, risulterà sempre maggiore o uguale di uno. Da tale considerazione si definisce il numero di prove da eseguire (in questo caso) tramite indagini mediante Durometro portatile in situ:

$n_1 = n - n_0$, dove n equivale al numero di prove necessarie per raggiungere il Livello di Conoscenza prefissato. L'LC viene scelto attraverso apposite tabelle fornite dallo stesso Documento Operativo. È anche possibile poter ridurre il numero di prove date dall'LC scelto: in questo caso, la riduzione è regolata da delle specifiche presenti direttamente nella normativa EC8 (riportate anche in [4]).

2.6.2. Procedimento per l'esecuzione delle prove

Le prove si focalizzano sulle due caratteristiche identificate da valutare, ovvero l'area residua e la tensione ultima dell'acciaio impiegato nelle armature da precompressione.

2.6.2.1. Area residua

L'identificazione dell'area residua segue lo stesso processo usato durante le Fasi di indagini delle Ispezioni Speciali:

- 1) Analisi preliminari per la localizzazione dei difetti (vedi Fase 1 o 2, da cap.2.3 a 2.4);
- 2) Analisi accurate per la quantificazione del difetto (vedi Fase 2 o 3, da cap.2.4 a 2.5);

Vengono esclusi dalla popolazione investigata i cavi con un quadro di difettosità tale da identificarli come elementi critici, i quali vanno considerati nella valutazione accurata nella loro effettiva posizione.

Al termine dell'esecuzione del processo sopra citato, si potrà ottenere una delle due seguenti condizioni:

- a) **uno o più elementi risultano difettosi:** viene definita la percentuale di elementi difettosi mf , dove l'area residua della popolazione difettosa verrà stimata attraverso l'applicazione del metodo t di Student a partire dal valore ottenuto del campione difettoso;
- b) **nessun elemento risulta difettoso e nessuna anomalia viene riscontrata da endoscopie e/o saggi diretti:** viene assunto quindi che nessun elemento risulta difettoso, con la possibilità (a discrezione del tecnico) di eseguire saggi diretti in altre zone critiche nell'eventualità ci sia ancora un dubbio, dai quali, se si riscontra un difetto, viene calcolato l'estensione del campione difettoso.

2.6.2.2. Tensione ultima dell'acciaio

La determinazione della tensione ultima dell'acciaio può essere ottenuta tramite l'applicazione delle cosiddette prove durometriche. Tali prove adoperano strumentazioni basate sulla tecnologia Leeb, cioè una massa mobile che urta la superficie dell'oggetto di misura. Nel nostro caso, viene impiegato un durometro Vickers, cioè un martello con la punta di diamante (per poter scalfire la superficie dei cavi d'acciaio indagati). Il procedimento è relativamente semplice: per prima cosa si prepara la superficie dell'acciaio investigata, la quale è scelta solitamente in una zona dove è già stato eseguito un saggio diretto (vedi Diffrattometria, cap.2.4.2.2) e pulita da intemperie; successivamente viene applicato il durometro eseguendo 6 misurazioni per ciascuno dei tre fili identificati per la misurazione; infine, come descritto nel cap.2.4.2.2 (e nel cap.2.4.1 relativo ai saggi diretti), si copre la superficie indagata.

Viene consigliato, prima di eseguire la prova durometrica, di procedere con la misurazione dell'area residua. Inoltre, nelle situazioni a seguire esposte, bisogna eseguire il saggio diretto appositamente per poter effettuare la prova durometrica:

- il campione risulta non difettoso, a seguito di analisi preliminari;
- verificarsi d punti, sui quali eseguire saggi diretti, non idonei per poter eseguire le prove durometriche (per esempio eccessiva corrosione di fili/trefoli).

2.6.3. Stima dell'area residua e della tensione ultima dell'acciaio da precompressione

Successive all'esecuzione delle indagini appena descritte, si ottengono le stime delle due caratteristiche ricercate. L'area residua (A_{res}) è uguale a $\mu_{1-\alpha}$, cioè il limite inferiore della media della popolazione per un prefissato LC in $1-\alpha$. Tale limite è calcolato tramite la formula $\mu_{1-\alpha} = X_m - \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_c$ con X_m come media campionaria, n come il numero dei campioni indagati, s come la deviazione standard e t_c come valore critico t di Student per $n-1$ gradi di libertà.

La tensione media a snervamento dell'acciaio (f_{ny}), invece, è ottenuta tramite correlazioni tecnico-sperimentali dalla tensione ultima a rottura (f_{pt}). Quest'ultimo è stimato a partire dalle indagini durometriche svolte in situ ed eventualmente anche dai valori di progetto, per poi essere stimata in ultima sede anch'esso dal parametro $\mu_{1-\alpha}$.

Tendenzialmente, l'LC per entrambi i valori è lo stesso ed è pari al 95%. Il valore di LC è dato da Normativa ed è pensato per la stima dei valori medi delle resistenze dei materiali coinvolti.

2.6.3.1. Area residua

Andando nel dettaglio nella determinazione della stima della media dell'Area residua, essa è valutata sui singoli campioni (vedi cap.2.4.1) e viene utilizzato il metodo t di Student applicato alla popolazione dei cavi difettosi. Questo metodo sembra, ed effettivamente risulta, poco facilmente praticabile, in quanto potrebbe essere che la popolazione dei campioni difettosi sia composta da un singolo elemento.

Da ciò si può quindi identificare diverse casistiche, dalle quali si possono suggerire procedimenti per la stima dell'area residua.

Il primo caso è quello dove risulta complicato applicare il metodo t ed è con un singolo elemento difettoso. Il valore medio da utilizzare in fase di verifica, e quindi da estendere alla percentuale stimata dei campioni difettosi, coincide con un unico valore misurato.

Il secondo caso, invece, prevede più di un elemento difettoso. Qui, il valore medio assunto è la media della popolazione $\mu_{1-\alpha}$, la quale è valutata tramite l'applicazione del metodo t di Student nel medesimo intervallo di confidenza inizialmente considerato. La valutazione avviene tramite la seguente formulazione:

$$A_{res,m} = \mu_{1-\alpha} = X_m - \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_{1-\alpha;n-1}$$

in questo modo la media dell'Area residua è valutata solamente sulla popolazione dei cavi difettosi.

Nel terzo caso, infine, si riscontra, ed assunto, nessun elemento difettoso nelle zone indagate già da saggi diretti e/o endoscopie. In questo caso, se sussistono condizioni con dubbia integrità dei cavi, o se viene ritenuto necessario (di solito dall'operatore), è consigliato eseguire ulteriori saggi diretti in altre zone critiche non ancora investigate con tale metodo. Se da queste prove emergono difettosità, bisogna seguire uno dei due casi precedenti.

2.6.3.2. Tensione ultima media dell'acciaio

Per prima cosa, la stima del valore viene effettuata a partire dagli esiti delle prove durometriche. Tali prove rilasciano gli indici di durezza in HV (poiché durezza Vickers). Tali valori necessitano quindi di essere convertiti, procedimento regolato da normativa UNI EN ISO 18265 Appendice 1 – “Non-alloy steel, low alloy steel, cast iron”. Dalle prove si ottengono n_1 valori di tensione a rottura e la media è stimata tramite la seguente formula:

$$f_{pt} = \mu_{1-\alpha} = X_{m,U} - \frac{s_U}{\sqrt{n_0 + n_1}} \cdot t_{1-\alpha;(n_0+n_1)-1}$$

Con $X_{m,U}$ come la media campionaria della tensione ultima a rottura in condizioni di Prior knowledge, s_U come la deviazione standard riferita a $X_{m,U}$, n_0 come il numero equivalente alle prove associate a X_{m0} e n_1 come numero di prove associate a X_{m1} .

Il valore così ottenuto può essere assimilato al valore caratteristico f_{ptk} , sempre secondo i criteri esposti al cap.6.3.4 delle Linee Guida. Supponendo che f_{ptk} trovato sia il limite inferiore dell'intervallo di confidenza (quindi $\mu_{1-\alpha}$), si può ottenere il valore caratteristico della resistenza allo snervamento (f_{pyk}) attraverso uno dei seguenti metodi, assumendo che la tensione a rottura f_p è uguale a f_{pt} :

1) riferimento ad indicazioni da letteratura, come l'aliquota della tensione a rottura f_{pt} ;

2) tramite il legame costitutivo tipico dell'acciaio da precompressione, nota f_{pt} e valori tipici, modulo elastico (E) e la deformazione di rottura (ε).

Dall'approccio (1) si possono sfruttare le indicazioni date da Normativa, dalle quali si ottiene la stima della tensione al limite di proporzionalità (f_{pp}), delle tensioni corrispondenti rispettivamente alla deformazione residua del 0,1% ($f_{p(0.1)}$) e del 0,2% ($f_{p(0.2)}$), e della tensione corrispondente alla deformazione totale dell'1% ($f_{p(1)}$). Una nota deve essere posta come, da tabella, f_{py} è prossimo ai valori di f_p , per tutte le deformazioni considerate (che siano residue o totali). Per questo motivo, è dimostrabile a vantaggio di sicurezza come $f_{py}=f_{p(1)}=0.85f_{pt}$.

Dall'approccio (2) si può invece stimare il valore di tensione a snervamento riferendosi al legame costitutivo di Ramberg-Osgood. Il legame è un metodo per descrivere analiticamente il diagramma sforzo-deformazione e vige

la formula $\varepsilon = \frac{\sigma}{E_p} + p \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_p}\right)^n$, con ε come la deformazione corrispondente alla tensione σ , σ_p come la tensione corrispondente ad uno dei residui di deformazione p elencati sopra (e quindi equivalente alla corrispettiva $f_{p(x)}$), E_p come modulo elastico iniziale ed infine n come parametro di definizione del diagramma sforzo-deformazione. Tale formulazione, però, può deviare dall'effettivo legame costitutivo: per tale motivo è possibile considerare una versione approssimata dell'equazione sopra citata considerando p uguale a 0.2%. Considerando questa approssimazione, ponendo la deformazione ripartita tra quella ultima (nota) e la deformazione associata alla p considerata e noti i valori di f_{pt} e di E_p possiamo definire la curva sforzo-deformazione, quindi stimare i valori.

Infine, se le prove durometriche non risultano significative, per pratiche difficoltà nell'esecuzione, si può sempre far riferimento a tipologie di acciaio da precompressione, generalmente indicate nelle documentazioni tra cui lo stesso Documento Operativo ([4]), prendendo quello associato all'acciaio più usato, oltre a selezionare in base alle informazioni date dalla documentazione del progetto.

3. Analisi statistica dei risultati delle prime ispezioni speciali condotte da SINA

3.1. Introduzione

Per poter avere una miglior comprensione dell'affidabilità ed efficacia dell'ispezione speciale appena descritta (cap. 2: Ispezione Speciale di ponti in c.a.p. a cavi post tesi), e quindi delle prove effettuate, è necessario dover indagare i risultati ottenuti da ciascuna prova. L'indagine verrà svolta attraverso l'analisi statistica dei dati raccolti dalle diverse ispezioni eseguite da parte di SINA s.p.a. in un periodo temporale di circa 10 mesi (nello specifico, nel periodo tra febbraio e ottobre). Le analisi saranno focalizzate sulle prove svolte appartenenti alle Fasi d'ispezione (dalla Fase 0 alla Fase 3) e alla Valutazione Accurata (vedi cap.2). Nello specifico, le prove considerate sono le prove Tomografiche e le prove video-endoscopiche relative alla Fase 1, le prove Diffrattometriche e di Rilascio Tensionale per la Fase 2 e le prove Durometriche per la Valutazione Accurata. Il motivo di tale scelta, oltre per ragioni pratiche legate alla scelta di esecuzione delle prove dettata da SINA, è molto semplice ed è legato alla natura delle fasi e delle prove appartenenti a tali fasi. Infatti, per le Fasi e Prove non analizzate:

-Per la Fase 0 (vedi cap.2.2), i risultati e le informazioni ottenute dalle prove, eccezion fatta per le prove di localizzazione dei cavi tramite il GeoRadar, non sono facilmente analizzabili tramite metodi statistici.

-Riguardo invece la prova di localizzazione tramite il GeoRadar, non è stata condotta alcuna analisi statistica in quanto le prove hanno sempre dato esito positivo, cioè il tracciato individuato è quasi sempre coincidente con quello da progetto, o comunque differenza di poco (errore possibilmente dato dalla vicinanza del cavo con altro/i cavo/i).

-Per la prova di saggio diretto, simile alle prove ed indagini svolte nella Fase 0 e data la natura della prova e dei risultati dati, non è fattibile poter sviluppare un'analisi statistica a riguardo.

Un altro fattore importante da tenere conto, come già citato al cap.2.2, è la ripetitività strutturale, data la natura di prefabbricazione della maggior parte, se non totale, degli elementi investigati. Detto ciò, come già accennato nel cap.1.5, le opere sono tutte provenienti dallo stesso periodo storico, oscillando tra gli anni 50 e gli anni 60. Tali opere presentano nella totalità dei casi un impalcato a graticcio con travi solitamente in c.a.p. e 4-5 traversi per sezione considerata. Sempre tenendo come riferimento quanto accennato nel capitolo 1.5 (dove viene spiegato il principale sistema di precompressione, e quindi di cavi, impiegato), le travi in c.a.p. a cavi post-tesi presenti nei graticci studiati hanno i cavi con andamento parabolico e ancorati in testata (tranne in alcuni casi dove sono ancorati nella soletta). Le travi impiegate sono al 99% a sezione ad I, mentre solo l'1% presenta una sezione a T. Dei cavi impiegati nelle travi indagate, sono state identificate 11 tipologie diverse, dove 10 sono cavi a fili paralleli (si differenziano nel numero e diametro dei fili impiegati, così come nel numero di cavi utilizzati) e una è costituita da cavi a trefoli.

3.2. Fase 0

La Fase 0, come descritta nel capitolo 2.2, ha lo scopo di impostare le successive fasi attraverso il processo conoscitivo dell'opera indagata, la quale porta alla determinazione del numero dei campioni d'indagine. A differenza delle prossime Fasi, e come già accennato nell'introduzione del cap.3, non è possibile poter eseguire analisi statistiche. L'unica prova dove i risultati possono essere almeno quantificati tramite valori analizzabili statisticamente è la prova per l'individuazione del tracciato dei cavi tramite Georadar. Nella seguente tabella si può vedere il numero di risultati raccolti per la prova con il Georadar:

Tabella 3.1: Tabella riassuntiva dei dati raccolti dalle prove appartenenti alla Fase 0 svolte sulle opere ispezionate

Indagini con il Georadar	Totale indagato [m]	1080 m
	Media per opera [m]	36 m

Nonostante sussiste la possibilità di analizzare i dati raccolti tramite le indagini con il Georadar, come già accennato nell'introduzione (cap.3.1), è stato optato di non analizzare tali dati in quanto il tracciato individuato dal Georadar coincide quasi sempre con quello di progetto, se non per piccole differenze date dalla vicinanza tra un cavo e l'altro, senza però sviare dall'andamento parabolico caratteristico delle travi indagate.

3.3. Fase 1

La Fase 1 ha lo scopo di analizzare gli elementi selezionati nella fase precedente per valutarne i rischi e riscontrare eventuali difetti. Come scritto nel capitolo precedente (vedi cap.2.3), esistono molte prove adatte per raccogliere queste informazioni. Tra queste, quelle che sono state valutate le più appropriate, e quindi impiegate, sono:

- Quantificazione difetti tramite "Video-Ispezioni" (o prove video-endoscopiche);
- Prova per la localizzazione difetti mediante Tomografo ad ultrasuoni (o prove tomografiche).

Nella seguente tabella si può vedere il numero di risultati raccolti per singola prova:

Tabella 3.2: Tabella riassuntiva dei dati raccolti dalle prove appartenenti alla Fase 1 svolte sulle opere ispezionate

Video Ispezioni	Numero Video Ispezioni Totali	1563
	Numero Video Ispezioni Medio per Opera	52
Indagini con il Georadar	Totale indagato [m]	1080 m
	Media per opera [m]	36 m
Indagini con Tomografo	Totale indagato	1942 m

Per le due prove sono stati presi degli accorgimenti per alcune, se non tutte, le analisi svolte. In primis, la famiglia di dati è stata suddivisa per tipologia di cavi di pretensionamento utilizzati nelle travi considerate (vedi cap.3.1). Oltre a questa suddivisione, per le Video Ispezioni è stato optato di suddividere i risultati raccolti per tipologia di difetto individuato, in modo tale da analizzare più nel dettaglio per ciascun tipo di difetto e per poterli mettere a confronto.

3.3.1. Video-Ispezioni

Iniziamo con l'analizzare i dati raccolti dalle video-ispezioni eseguite sulle travi ispezionate. I risultati ottenuti da tale prova informano sullo stato di conservazione degli elementi chiave del sistema di pretensionamento, partendo dalla conservazione degli "involucri" esterni quali il copriferro e la guaina fino allo stato di conservazione del cavo e lo stato di riempimento sempre della guaina. Per poter analizzare tali condizioni bisogna poter capire il posizionamento dei punti ispezionati sulla trave e l'entità dei difetti riscontrati in tali punti.

Per il problema relativo al posizionamento dei punti ispezionati, considerando che le travi presentano diverse lunghezze tra di loro, si è optato nel rappresentare ogni video-ispezione effettuata in una trave "standardizzata". Tale trave rappresenta una trave con lunghezza e altezza generica (rappresentata in percentuale, da 0 a 100), la quale permette di rappresentare le posizioni di ogni video-ispezione adimensionalmente. Queste posizioni, anch'esse "standardizzate", assumono pure loro un valore in percentuale da 0 a 100. Tale valore è la posizione dove è stata eseguita la video-ispezione in rapporto rispetto alle dimensioni della trave stessa.

Riguardo alla valutazione dell'entità dei difetti riscontrati invece, si è optato per rappresenta i difetti per ciascun elemento, per poi categorizzarli ed analizzarli per ciascuna entità individuata. Questo serve anche per poi poter confrontare tali difetti tra di loro, così come confrontare i diversi elementi considerati, in modo tale da confermare e/o individuare eventuali correlazioni tra difetti e/o tra elementi.

Le analisi, quindi, verranno suddivise in due fasi: per singolo elemento e per "analisi incrociate", cioè confrontando i vari elementi considerati (ed entità di difetto individuate per ciascun elemento). Sono diversi gli obiettivi delle due fasi delle analisi svolte. La prima, cioè quella per singolo elemento, si concentrerà nell'investigare l'efficienza della prova e la praticità dei punti investigati, in modo tale da poter aumentare la precisione e l'utilità nella scelta dei punti d'ispezione, oltre ad andare a visualizzare con più cura il quadro generale dello stato di conservazione delle travi investigate. La seconda, invece, ha come scopo quello di poter non solo trovare interconnessioni tra i diversi difetti individuati (e quindi identificare probabili processi esterni alla conservazione del cavo ma connessi al suo stato di conservazione) ma anche di poter verificare l'efficienza ed affidabilità di altre prove (una di queste è la prova tomografica).

3.3.1.1. Analisi per singolo elemento

3.3.1.1.1. Introduzione

Nella seguente analisi vengono studiate sia la scelta nel posizionamento dei punti video-ispezionati che le condizioni degli elementi indagati.

Per poter investigare al meglio le posizioni, come accennato in precedenza, si è optato di piazzare tutte le video ispezioni eseguite in una trave "standardizzata", dove sia la trave che le posizioni risultano adimensionali in un range da 0 a 100. I valori delle posizioni considerati sono in rapporto rispetto alla lunghezza della trave di appartenenza. Tale trave "standardizzata" è accompagnata da un grafico a colonne. Questo grafico permette di poter vedere la distribuzione all'interno di sezioni, in questo caso chiamate "quadranti", dei difetti riscontrati, suddivisi per tipologia e grado (tale classificazione è stata fatta specifica per ciascun elemento indagato dalle video ispezioni, tenendo sempre conto delle indicazioni date dalle norme tecniche di riferimento). Per la scelta dei quadranti, è stata optata una suddivisione della trave in 5 settori: due per ciascuna testata e una per la mezzeria. Per questione pratica, i due quadranti appartenenti alle testate e posizionati agli estremi (quindi i più esterni) sono stati nominati come pt.1, mentre i due quadranti appartenenti alle testate e posizionati più all'"interno" sono stati nominati come pt.2.

Gli elementi indagati dalle video ispezioni sono i seguenti:

- Copriferro: stato di conservazione;
- Guaina: stato di iniezione della malta cementizia (perciò controllo di presenza di eventuali vuoti all'interno) e stato di conservazione;
- Cavo: stato di conservazione.

3.3.1.1.2. Copriferro

Il copriferro è l'elemento più esterno del sistema di precompressione, perciò quello più verosimilmente a contatto con agenti esterni e più prone alla formazione e/o presenza di difetti. Tali difetti hanno la possibilità di influenzare le condizioni degli elementi più interni (ergo Guaina e Cavo).

Nei seguenti grafici è stata rappresentata la distribuzione delle video ispezioni eseguite, classificate per lo stato di conservazione osservato e/o difetti riscontrati. In questo caso la classificazione consiste, in ordine da meno difettoso a più difettoso: **integro**, **fessurato**, **delaminato**, **traccia di ossidi**, **traccia di umidità** e **vespai**. Gli ultimi tre in realtà non sono in ordine di difettosità in quanto sono difetti singoli e non necessariamente collegati tra di loro (a differenza dei primi tre considerati). Per comodità, quindi, sono stati classificati dopo la delaminazione, il quale risulta il difetto peggiore del primo gruppo di difetti considerato.

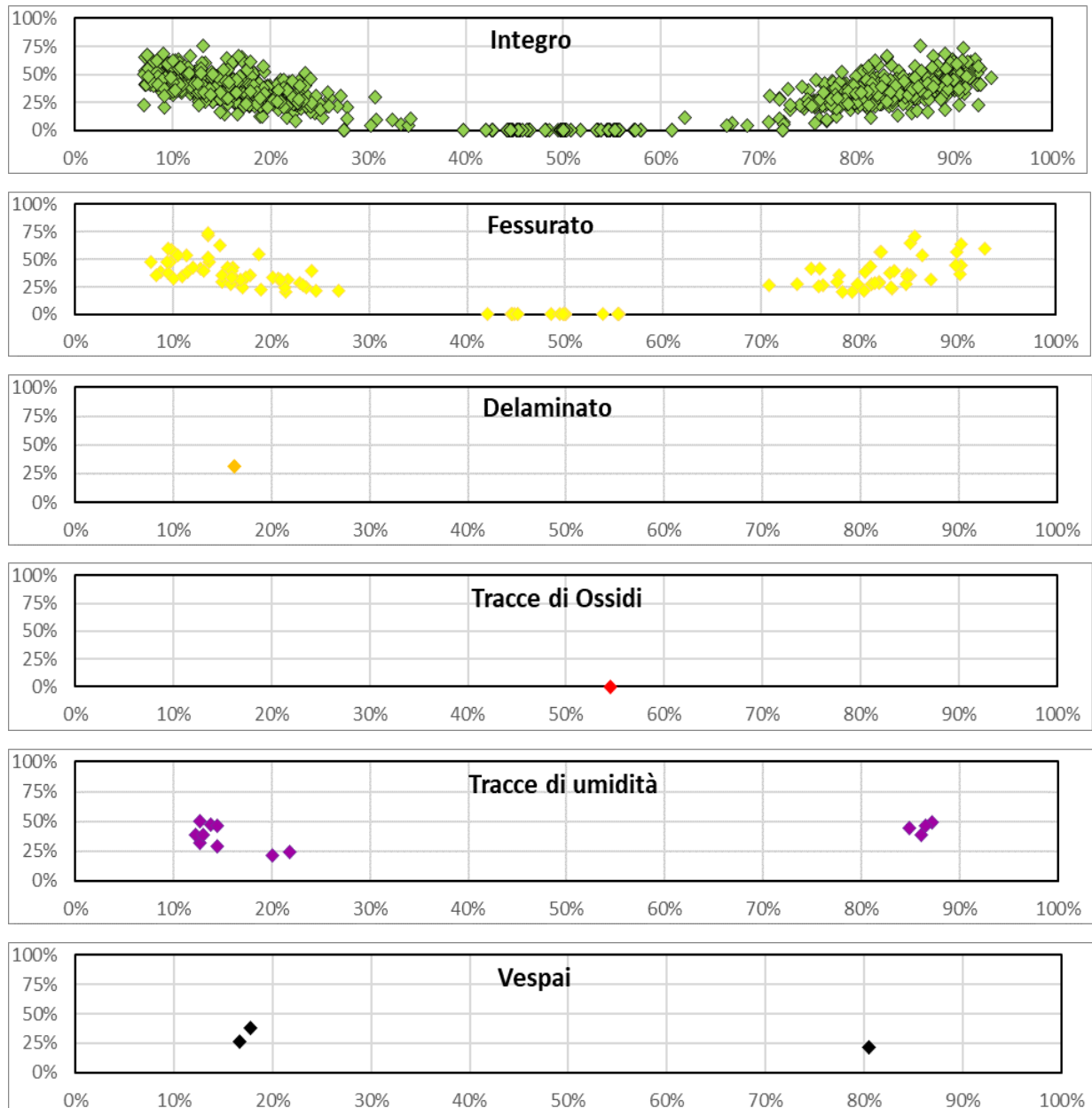


Figura 3.1: distribuzione in una trave "standardizzata" dei difetti rilevati sul copriferro per ciascuna entità (da minore a maggiore).

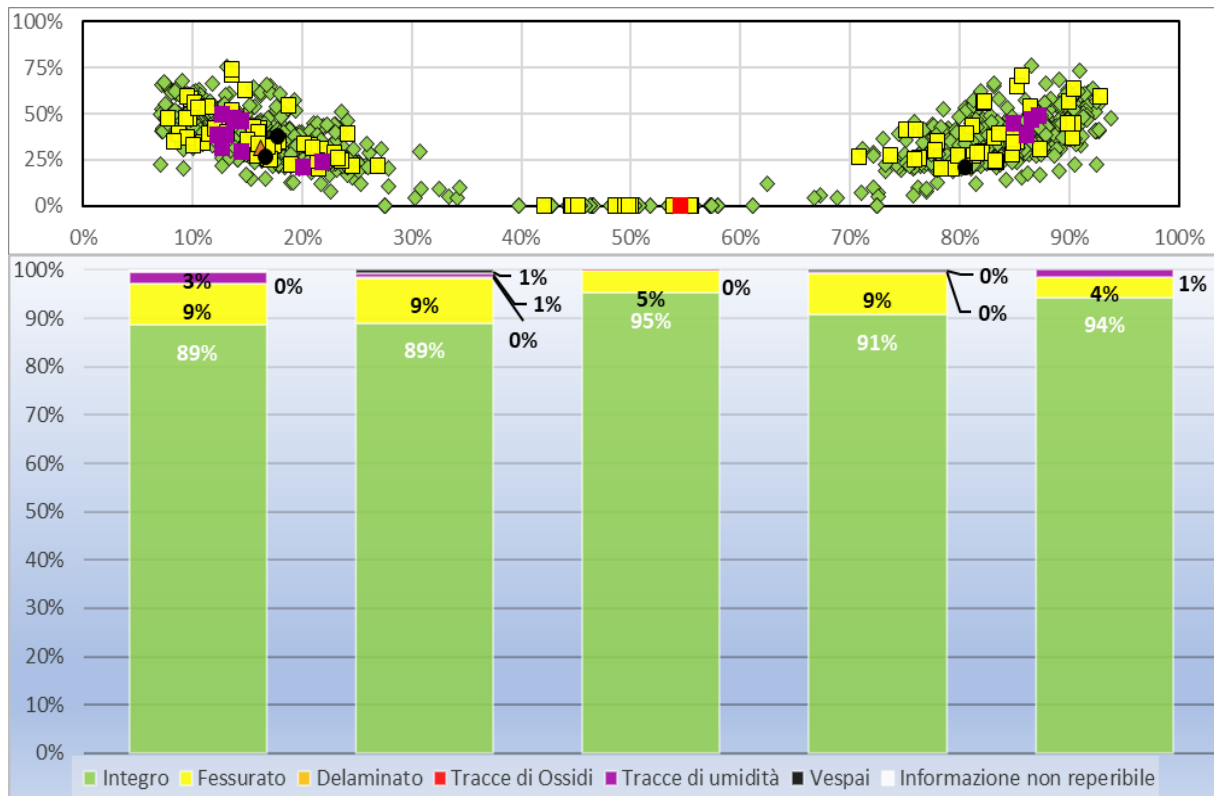


Figura 3.2: rappresentazione distribuzione dei difetti rilevati sul copriferro in una trave “standardizzata” e per “quadrante”

Da come si può constatare dai grafici appena mostrati, lo stato di conservazione del copriferro è per almeno l'89% dei casi considerati in buone condizioni, con una media del 7% tra i vari quadranti di casi con difetti presenti sul copriferro. La distribuzione dei difetti, inoltre, è abbastanza equa tra tutti i quadranti, con alcuni casi particolari (tipo presenza di Vespai e tracce di umidità) più nelle zone più esterne delle testate.

3.3.1.1.3. Guaina

Nel sistema di precompressione a cavi post-tesi, la guaina ricopre il duplice ruolo di canale di scorrimento e protezione da corrosione del cavo contenuto all'interno. La protezione è legata sia alle condizioni della guaina (guaina rovinata rende più semplice l'intrusione al suo interno di agenti esterni) che allo stato di iniezione della malta cementizia (iniezione non ottimale porta alla formazione di vuoti, e quindi ad agevolare la corrosione del cavo di precompressione contenuto nella guaina).

Dalle video ispezioni, quindi, si ottengono sia lo stato di conservazione della guaina che lo stato di iniezione all'interno della stessa guaina. I risultati da tali prove verranno studiati per entrambi i casi.

3.3.1.1.3.1. Stato di conservazione

Nei seguenti grafici è stata rappresentata la distribuzione delle video ispezioni eseguite, classificate per lo stato di conservazione osservato e/o difetti riscontrati. In questo caso la classificazione consiste, in ordine da meno difettoso a più difettoso: **non ossidato, lieve ossidazione, corrosa e disgregata.**

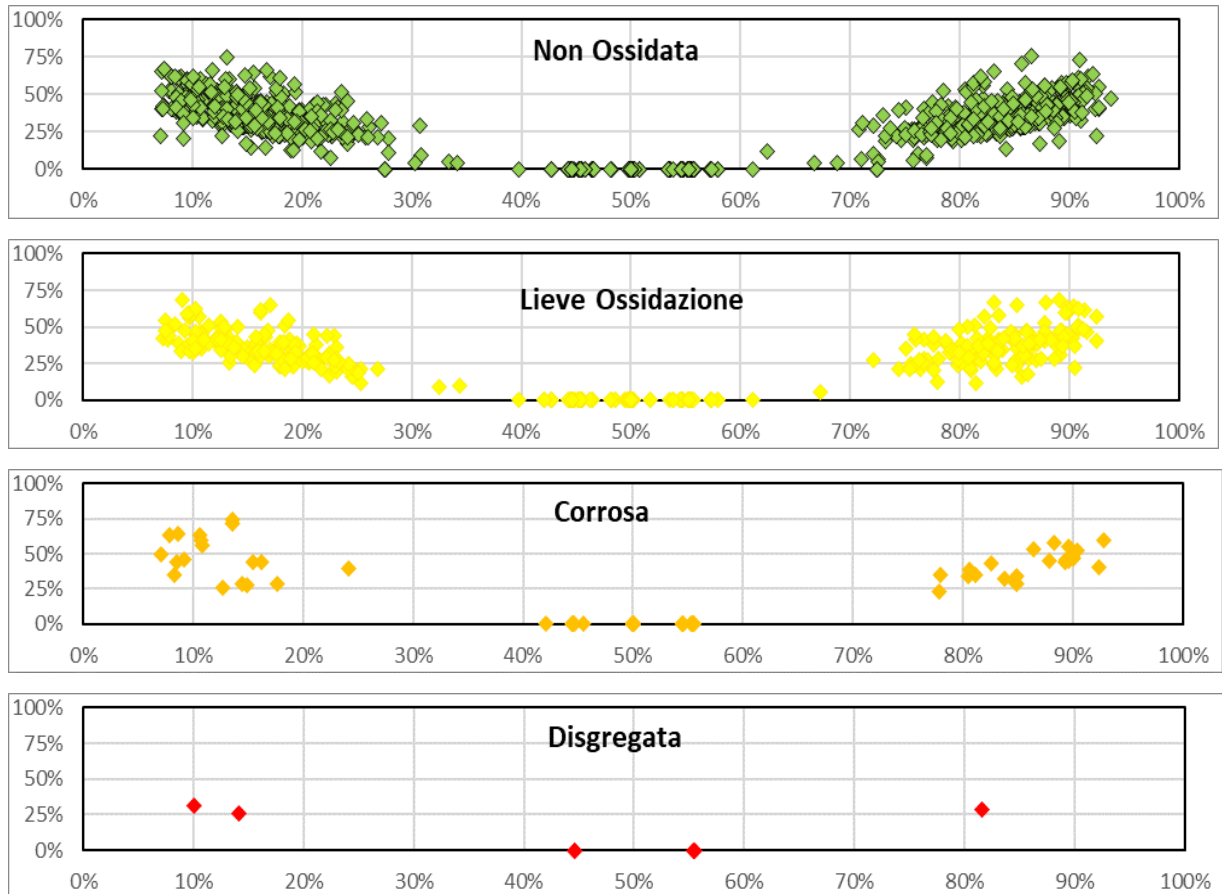


Figura 3.3: distribuzione in una trave "standardizzata" dei difetti rilevati sulla guaina per ciascuna entità (da minore a maggiore)

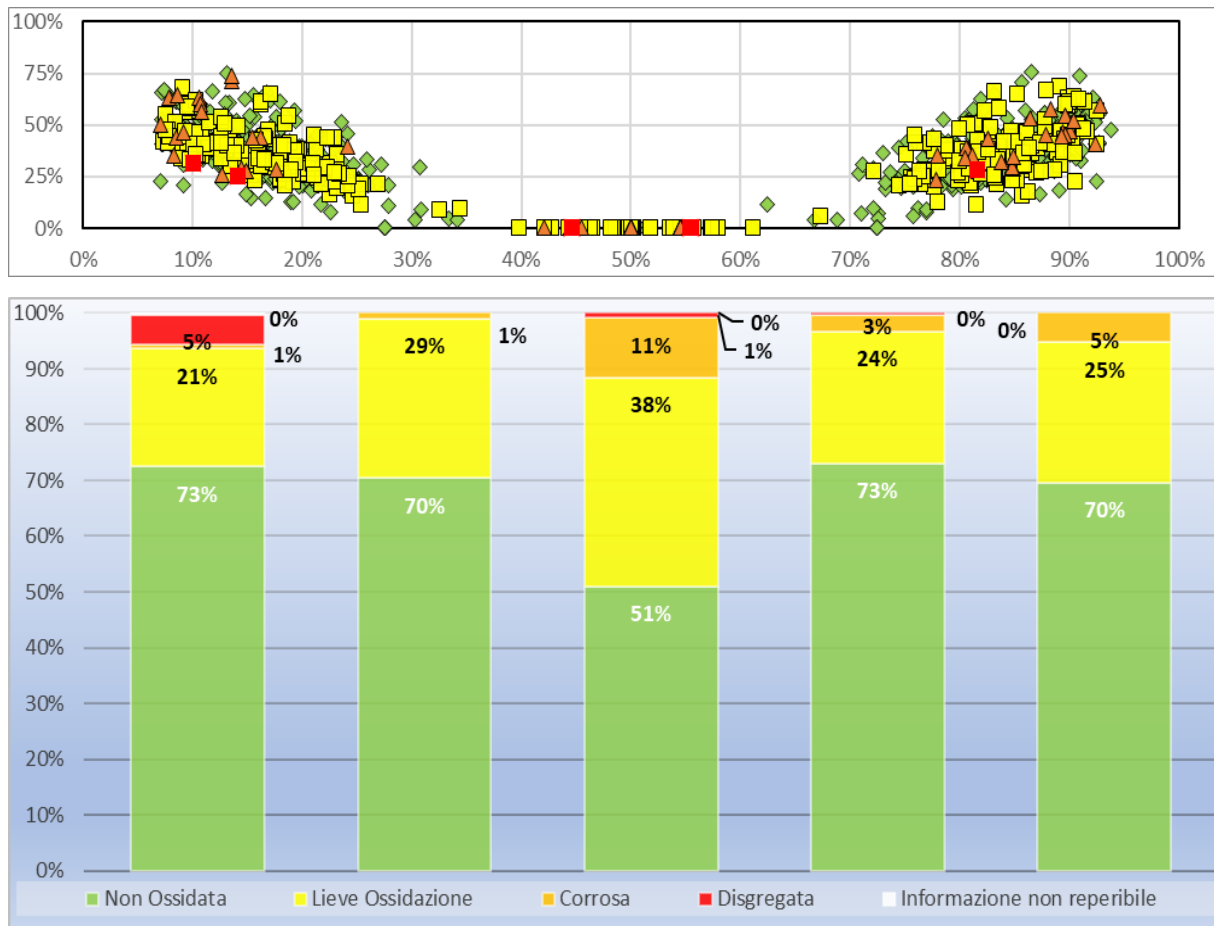


Figura 3.4: rappresentazione distribuzione dei difetti rilevati sulla guaina in una trave "standardizzata" e per "quadrante"

Da come si può notare dai grafici sopra mostrati le condizioni peggiori sono evidenziate nel quadrante di mezzeria, dove quasi il 50% dei casi considerati presenta, in diverse quantità, ogni grado di difettosità. Per le testate invece, almeno il 70% degli elementi ispezionati risultano integri. Le difettosità riscontrate sono principalmente lieve ossidazioni (media del 27% dei casi considerati per quadrante), mentre elementi corrosi risultano non oltre l'11% (caso peggiore in mezzeria). Nonostante le "buone" condizioni delle testate (in quanto presentano una maggiore popolazione di elementi integri rispetto alla mezzeria), sulla parte più esterna della testata di sinistra il 5% dei casi presenta una guaina disgregata.

3.3.1.1.3.2. Stato d'iniezione

Come già spiegato ai capitoli 1.3 e 1.4, è importante andare a verificare un corretto stato d'iniezione, in quanto la presenza di "vuoti" all'interno non permette alla malta cementizia iniettata di proteggere da corrosione (ed agenti esterni) i cavi da precompressione allocati nelle guaine.

Nei seguenti grafici è stata rappresentata la distribuzione delle video ispezioni eseguite, classificate per lo stato di conservazione osservato e/o difetti riscontrati. In questo caso la classificazione consiste, in ordine da meno difettoso a più difettoso: **completa**, **parziale > 75%**, **parziale 50-75%**, **parziale 20-50%** ed **assente**. Il livello di parzialità è stato considerato in percentuale, rispetto al volume disponibile, il volume occupato dalla malta cementizia all'interno della guaina.

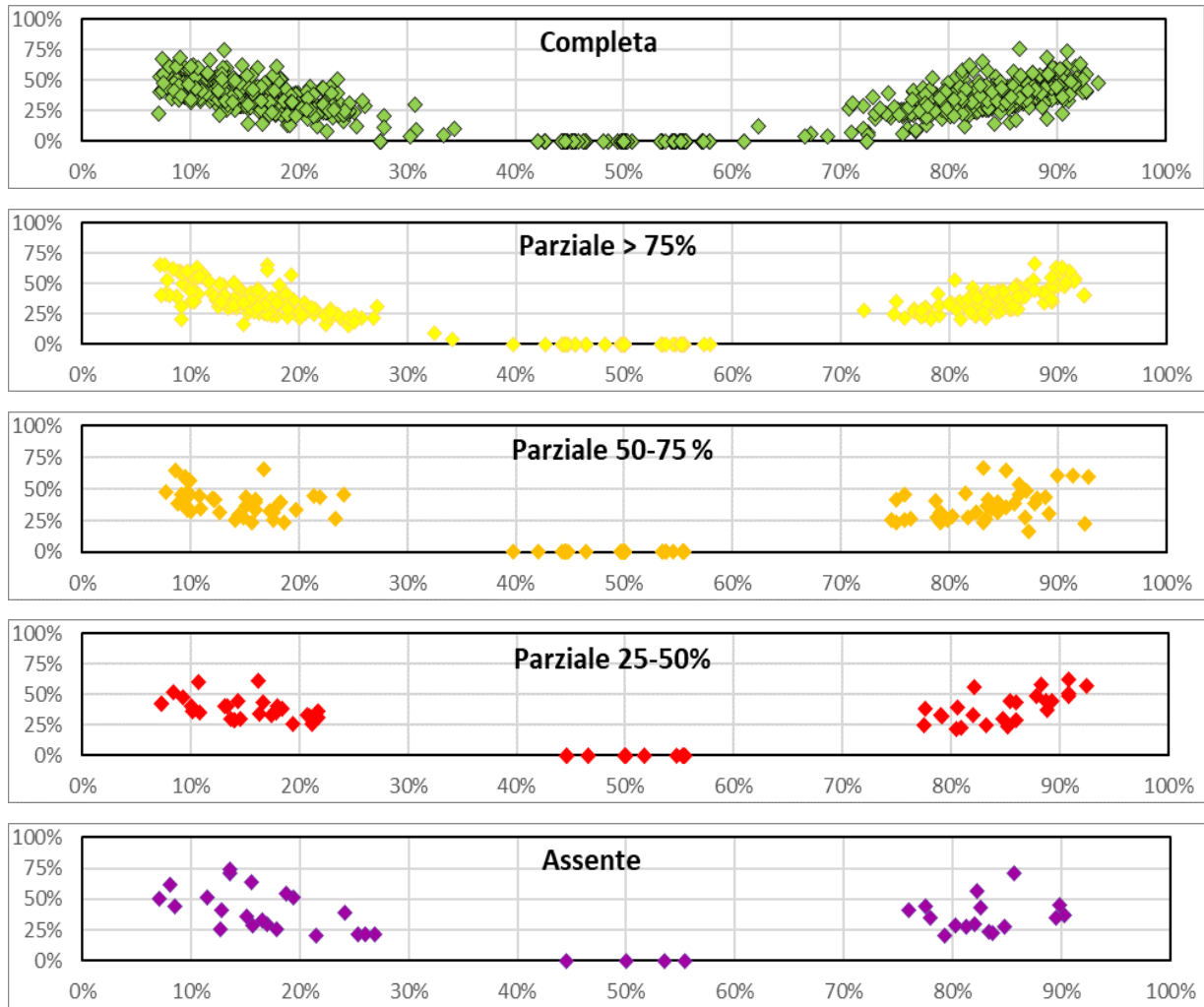


Figura 3.5: distribuzione in una trave "standardizzata" dei difetti rilevati riguardo allo stato d'iniezione nella guaina per ciascuna entità (da minore a maggiore)

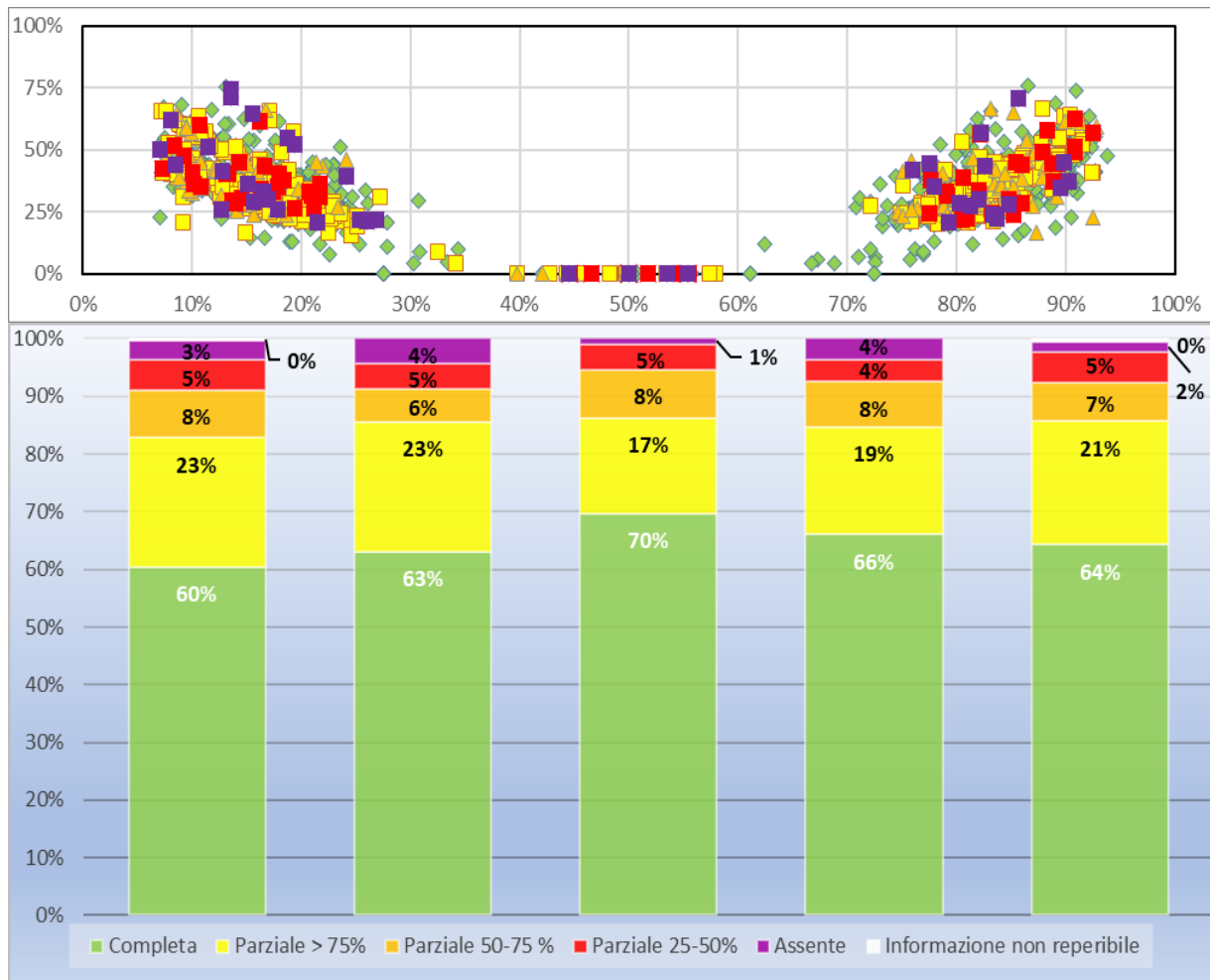


Figura 3.6: rappresentazione distribuzione dei difetti rilevati riguardo allo stato d'iniezione nella guaina in una trave "standardizzata" e per "quadrante"

Dai grafici sopra mostrati si può notare come almeno il 60% dei casi considerati presentano un'iniezione completa, con le condizioni "migliori" nel quadrante di mezzeria (70% dei casi). Dei difetti riscontrati, compaiono abbastanza distribuiti tutti quanti tra i vari quadranti, con il minor numero di difetti in mezzeria rispetto alle testate. La quantità dei difetti riscontrati decresce al crescere del livello di difettosità: circa il 20% dei casi presenta un'iniezione parziale > 75%, mentre circa il 3% dei casi riscontra un'assenza di iniezione.

3.3.1.1.4. Stato cavi

Lo stato di conservazione dei cavi è l'aspetto più importante delle video-ispezioni, in quanto fulcro centrale di tutta l'ispezione. Perciò è solo che naturale analizzare i dati raccolti dalle varie *endoscopie* riguardo alle condizioni dei cavi da precompressione.

Nei seguenti grafici è stata rappresentata la distribuzione delle video ispezioni eseguite, classificate per lo stato di conservazione osservato e/o difetti riscontrati. In questo caso la classificazione consiste, in ordine da meno difettoso a più difettoso: **integro**, **lieve ossidazione**, **corrosione superficiale** e **fili rotti**. I fili rotti compariranno solamente nel secondo grafico in quanto è solamente presente un caso in mezzeria.

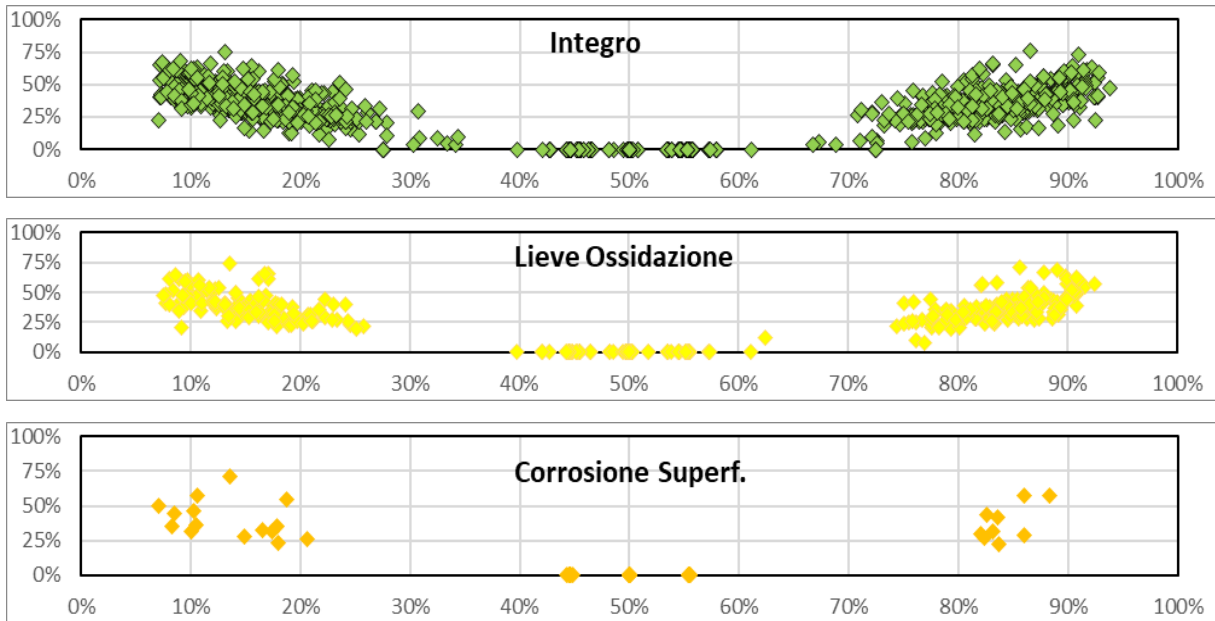


Figura 3.7: distribuzione in una trave "standardizzata" dei difetti rilevati sul cavo da precompressione per ciascuna entità (da minore a maggiore)

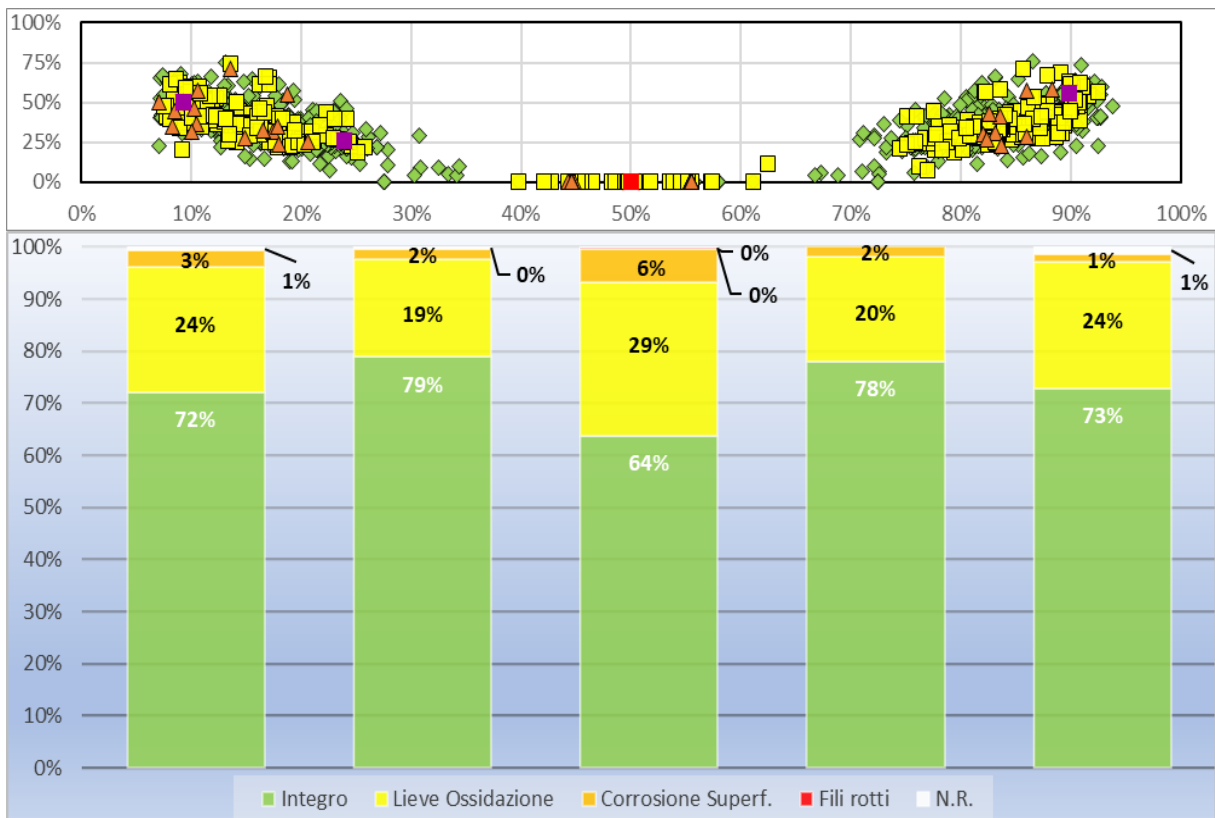


Figura 3.8: rappresentazione distribuzione dei difetti rilevati sul cavo da precompressione in una trave "standardizzata" e per "quadrante"

Dai grafici appena mostrati si può notare come nelle testate almeno il 70% dei cavi ispezionati risultano integri, con le condizioni migliori nei quadranti più interni (quelli nominati “pt.2”, rispettivamente 78% e 79% dei casi considerati), mentre il quadrante con il maggior numero di cavi con difetti è quello di mezzeria. I difetti riscontrati sono per la maggior parte di casi di cavi con una lieve ossidazione (circa il 23%), mentre i casi con corrosioni superficiali non superano il 6% dei casi considerati per quadrante (con il maggior numero di cavi con questa tipologia di difetto in mezzeria). Come accennato sopra, l’unico caso con la difettosità peggiore (fili rotti) si trova anch’essa in mezzeria.

3.3.1.2. Analisi Incrociate

Da tali analisi sulle v.i. effettuate, è possibile andare sia a determinare lo stato delle travi indagate sia le probabili correlazioni che si possono creare tra diversi difetti. Conoscere le correlazioni, tra l’altro, risulta molto utile in quanto si può andare a facilitare la valutazione della conservazione del sistema di precompressione. Un esempio può essere appunto la presenza di vuoti all’interno e dei danni sul copriferro: dalla tabella sopra si può già dire che con una buona probabilità il cavo è danneggiato. In tal modo si facilita una probabile scelta per andare ad investigare se codesto danno ha causato delle perdite in resistenza oppure no, o addirittura andare a valutare l’effettiva natura del materiale.

I casi selezionati sono: stato d’iniezione nella guaina-stato di conservazione dei cavi; stato di conservazione del copriferro-stato d’iniezione nella guaina-stato di conservazione dei cavi.

3.3.1.2.1. Correlazione tra difetti sullo stato d’iniezione e sullo stato di conservazione dei cavi

L’obbiettivo di questo primo confronto è quello di convalidare la correlazione tra la presenza di vuoti all’interno delle guaine e il sorgere di difetti sui cavi di precompressione (principalmente ossidazione per via degli agenti esterni infiltrati nei vuoti presenti nella guaina). Per analizzare tale correlazione sono stati impiegati due grafici a torta sulla totalità dei casi ispezionati dalle varie video ispezioni eseguite, per poi approfondire suddetta analisi per ciascuna delle tipologie di cavo individuate tra le travi ispezionate.

La prima analisi è stata effettuata considerando due “famiglie” di base: la prima rappresenta tutti i casi dove le iniezioni della guaina sono risultate complete, mentre la seconda rappresenta tutti i casi dove sono stati trovati iniezioni imparziali o assenti. Per ciascuna famiglia, è stato rappresentato la distribuzione dello stato di conservazione dei casi, divisi anch’essi in casi dove il cavo risulta integro e casi dove il cavo presenta una qualunque tipologia di difetto.

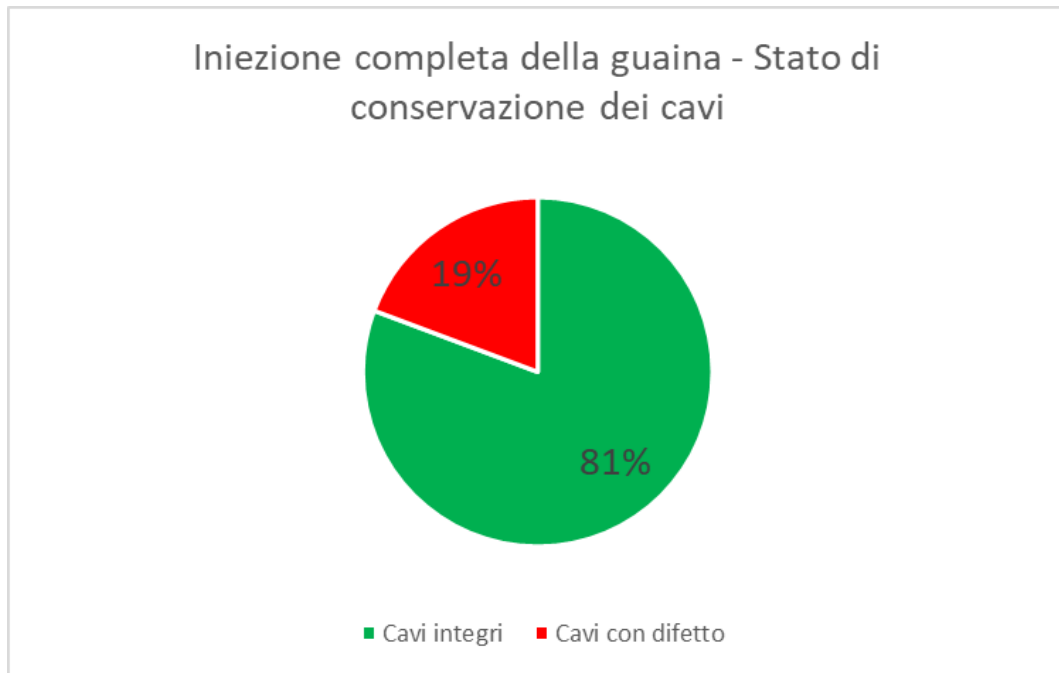


Figura 3.9: grafico a torta rappresentante la distribuzione dello stato di conservazione dei cavi rilevato dalle Video Ispezioni considerando lo stato di iniezione della guaina completa

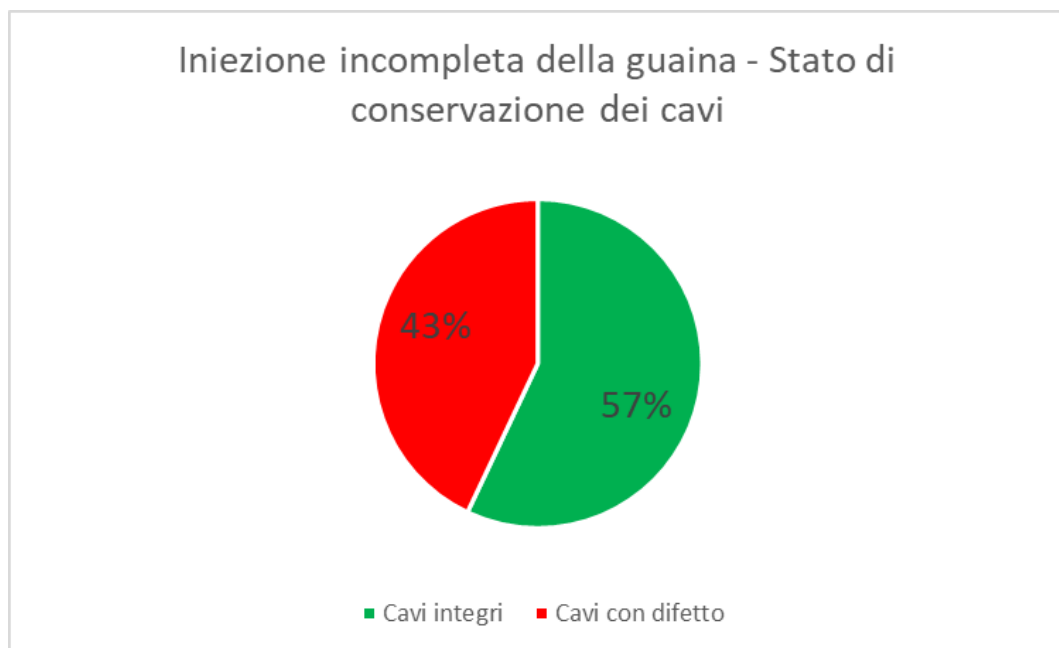


Figura 3.10: grafico a torta rappresentante la distribuzione dello stato di conservazione dei cavi rilevato dalle Video Ispezioni considerando lo stato di iniezione della guaina incompleta

Da come si può notare dai due grafici a torta sopra, l'iniezione completa della guaina garantisce di avere per almeno l'80% dei casi considerati un cavo in condizioni integre, mentre se l'iniezione è incompleta almeno il 40% dei cavi presenta un difetto. Si può dire, quindi, che il ruolo assunto dalla malta cementizia a livello teorico come protezione da agenti esterni causanti fenomeni di corrosione sui cavi è confermato dai risultati appena descritti, andando quindi a rimarcare l'importanza di effettuare una buona iniezione nei condotti per garantire un buono stato di conservazione dei cavi da precompressione.

Con la seconda analisi si va a sviluppare meglio il secondo caso, cioè la distribuzione dei cavi con difetto in corrispondenza dei vuoti individuati nella guaina. Per analizzare meglio questa distribuzione, si è optato di suddividere i casi selezionati per tipologia di cavi individuati tra le opere considerate, in modo tale da poter analizzare se le diverse dimensioni usate possano influire alla maggior formazione di vuoti nella guaina (e quindi ad avere un probabile difetto sul cavo). Le tipologie di cavi considerati, nello specifico, sono:

-N.1: FP, 1-32Φ6 + 2-44Φ6;

-N.2: FP, 2-30Φ6 + 1-10Φ6;

-N.3: FP, 4-44Φ6;

-N.4: FP, 4-44Φ6 + 1-32Φ6;

-N.5: FP, 5-32Φ7;

-N.6: FP, 6-32Φ7;

-N.7: FP, 6-44Φ6;

-N.8: FP, 7-18Φ7;

-N.9: FP, 7-24Φ7;

-N.10: FP, 7-32Φ7;

-N.11: T, 4-12Φ1/2" + 2-16Φ1/2";

Con FP = Fili Paralleli, T = trefoli e Φ + numero = dimensione del diametro del singolo filo in mm. Per il trefolo al posto della dimensione in mm è scritta la dimensione in pollici. È importante da ricordare che questa nomenclatura per le tipologie di cavi è usata anche nelle altre analisi svolte dove la famiglia di dati è stata suddivisa per tipologia di cavo.

L'analisi è stata svolta sia sulla totalità dei casi per ciascuna tipologia di cavo, sia per il numero di casi per quadrante considerato (due per ciascuna testata, una per la mezzeria, come fatto per le analisi sui singoli elementi, vedi cap. 3.3.2.1).

La scelta di mostrare la distribuzione dei cavi danneggiati per tipologia di cavo (nella Tabella x) ed ulteriormente per quadrante (nella Tabella x) ha molteplici scopi. In primis è stata verificata una possibile correlazione tra la tipologia dei cavi appartenenti all'armatura a precompressione e la numerosità di difetti riscontrati sugli stessi cavi. Inoltre, sempre considerando la tipologia di cavi, viene anche verificata un'eventuale correlazione tra il volume occupato dal cavo all'interno della guaina e la formazione di vuoti all'interno della stessa guaina, quindi una non efficiente iniezione di malta cementizia. Infine, partendo da quest'ultimo punto, sono state valutate le condizioni di iniezione e dello stato di conservazione del cavo per quadrante: visto che l'iniezione della boiaccia avviene da una delle due estremità (vedi cap.1.3), si va a verificare la distribuzione della malta per l'intera lunghezza della condotta.

I risultati sono stati raccolti nelle tabelle sottostanti.

Tabella 3.3 e 3.4: distribuzione elementi ispezionati con cavi difettosi e con sia cavi difettosi che vuoti all'interno della guaina per tipologia di cavo; nella Tabella 3.4 la distribuzione è effettuata anche per quadrante (vedi cap.3.3.2.1.1).

	Tipologie di cavi ispezionati																					
	N. 1		N.2		N.3		N.4		N.5		N.6		N.7		N.8		N.9		N.10		N.11	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
Tot elementi video ispezionati	18		94		39		708		48		226		18		187		92		122		11	
Elementi con Cavi difettosi	15	83%	17	18%	1	3%	200	28%	8	17%	57	25%	3	17%	89	48%	13	14%	15	12%	6	55%
Elementi con cavi difettosi e vuoti all'interno della guaina	7	47%	8	47%	0	0%	114	57%	5	63%	24	42%	1	33%	52	58%	6	46%	10	67%	3	50%

Tipologie di cavi ispezionati		N. 1		N.2		N.3		N.4	
Numero di casi di cavi difettosi (c.d.)		15		17		1		200	
		N	%	N	%	N	%	N	%
numero di casi di c.d. per quadrante	Testata dx pt1	0	0%	4	24%	0	0%	33	9%
	Testata dx pt2	4	27%	0	0%	0	0%	28	8%
	mezzeria	5	33%	5	29%	0	0%	85	24%
	Testata sx pt2	5	33%	2	12%	0	0%	32	9%
	Testata sx pt1	1	7%	4	24%	1	100%	22	6%
Numero di casi di c.d., in corrispondenza di vuoti, per quadrante	Testata dx pt1	-	-	4	100%	-	-	18	55%
	Testata dx pt2	3	75%	-	-	-	-	18	64%
	mezzeria	2	40%	2	40%	-	-	48	56%
	Testata sx pt2	1	20%	0	0%	-	-	20	63%
	Testata sx pt1	1	100%	2	50%	0	0%	11	50%

Tipologie di cavi ispezionati		N.5		N.6		N.7		N.8	
Numero di casi di cavi difettosi (c.d.)		8		57		3		89	
		N	%	N	%	N	%	N	%
numero di casi di c.d. per quadrante	Testata dx pt1	2	25%	8	14%	0	0%	21	24%
	Testata dx pt2	4	50%	8	14%	1	33%	9	10%
	mezzeria	1	13%	19	33%	2	67%	32	36%
	Testata sx pt2	0	0%	16	28%	0	0%	13	15%
	Testata sx pt1	1	13%	6	11%	0	0%	14	16%
Numero di casi di c.d., in corrispondenza di vuoti, per quadrante	Testata dx pt1	0	0%	4	50%	-	-	12	57%
	Testata dx pt2	4	100%	5	63%	1	100%	5	56%
	mezzeria	1	100%	2	11%	0	0%	16	50%
	Testata sx pt2	-	-	8	50%	-	-	9	69%
	Testata sx pt1	0	0%	5	83%	-	-	10	71%
Tipologie di cavi ispezionati		N.9		N.10		N.11			
Numero di casi di cavi difettosi (c.d.)		13		15		6			
		N	%	N	%	N	%		
numero di casi di c.d. per quadrante	Testata dx pt1	3	23%	1	7%	4	67%		
	Testata dx pt2	1	8%	4	27%	0	0%		
	mezzeria	5	38%	6	40%	0	0%		
	Testata sx pt2	1	8%	4	27%	0	0%		
	Testata sx pt1	3	23%	0	0%	2	33%		
Numero di casi di c.d., in corrispondenza di vuoti, per quadrante	Testata dx pt1	3	100%	1	100%	1	25%		
	Testata dx pt2	0	0%	2	50%	-	-		
	mezzeria	1	20%	4	67%	-	-		
	Testata sx pt2	1	100%	3	75%	-	-		
	Testata sx pt1	1	33%	-	-	2	100%		

Nella Tabella 3.4, i casi contrassegnati in giallo contengono almeno un caso di cavo corrosivo superficialmente, mentre i casi contrassegnati in arancione contengono almeno un caso di cavo con dei fili rotti.

Da quanto si può notare dalla Tabella 3.3, la metà dei campioni investigati appartengono alla tipologia N.4 di cavi identificata tra quelli ispezionati. Tale dato va preso in considerazione, soprattutto quando si vanno a identificare la quantità di cavi danneggiati tra i casi considerati per tipologia di cavo. Infatti, si può notare sempre dalla prima tabella che la percentuale più alta di casi di cavi danneggiati appartiene alla tipologia N.1 ma con 15 casi, su 18 considerati, con un cavo con difetto. Allo stesso tempo, se si guarda la tipologia N.3, nonostante sono stati considerati solamente 20 casi in più rispetto alla N.1, presenta una percentuale bassissima di casi con cavi difettosi (1 caso solo). Se invece si considerano i casi dove coincidono sia la difettosità sul cavo sia la presenza di vuoti nella guaina, il N.1 presenta molti meno casi, con una percentuale più bassa del 50% rispetto ai casi totali considerati per quella tipologia di cavo, mentre le percentuali più alte si trovano per le tipologie N.10 (67%), N.5 (63%) e la N.8 e N.9 (57 e 58%). Perciò si può dedurre che la possibilità della formazione di difetti sul cavo, nonostante tutti presentano un acciaio simile se non uguale, può essere influenzata di poco dalla tipologia di cavo impiegata.

Dalla Tabella 2, invece, si può notare come, in prossimità delle testate, la percentuale di casi con sia cavi con difetto e cavi vuoti (tra i casi con cavi con difetto considerati per quel quadrante) sia molto più alta in media rispetto alla mezzeria. Questo dato può essere una conferma di una iniezione non ottimale, portando quindi ad una delle due estremità una maggiore probabilità di vuoto, il quale porta più facilmente alla formazione di difetti (cioè al favorire l'ossidazione e la corrosione) sul cavo da precompressione.

3.3.2. Tomografia

In riferimento a quanto descritto nel capitolo precedente (cap.3.3.2), i risultati ottenuti dalle analisi svolte sui dati raccolti tramite le prove endoscopiche hanno portato alla luce la correlazione tra la presenza di vuoti nella guaina e la presenza di ammaloramenti sul cavo da precompressione.

La prova non distruttiva detta “prova tomografica”, quindi, si focalizza sulla rilevazione di vuoti all'interno della guaina, mediante l'impiego del Tomografo ad ultrasuoni, con lo scopo finale di poter individuare zone con difetti pure sui cavi senza dover accedere all'interno del cavo (vedi cap.2.3.1.1 per maggiori dettagli).

Nell'analizzare i dati ottenuti dalla prova tomografica, si è potuto impiegare quanto raccolto dalle prove di Video-Ispezione, le quali sono state eseguite nelle zone già indagate tramite l'impiego del tomografo. In questa maniera si può andare a verificare per ciascun vuoto identificato dallo strumento ad ultrasuoni se è riscontrabile tramite le video-endoscopie svolte nel medesimo punto, diventando di fatto un'ulteriore “analisi incrociata”.

L'analisi incrociata è stata eseguita su due livelli: il primo, considerando l'intera famiglia di risultati raccolti, confronta i vuoti rilevati da tomografo con quelli individuati dalle video ispezioni e viceversa attraverso dei grafici a torta; il secondo sviluppa il confronto generale per tipologia di cavo (le tipologie sono elencate nel capitolo 3.3.2.2 “Analisi Incrociate”).

Dalla prima analisi sono stati tirati fuori due grafici a torta. Il primo rappresenta la distribuzione dei risultati delle video ispezioni riguardo allo stato di iniezione delle guaine per una popolazione composta unicamente dalle rilevazioni di vuoti ottenute tramite il Tomografo portatile. Il secondo, invece, rappresenta sempre la distribuzione dei risultati delle video ispezioni ma su una famiglia comprendente le zone rilevate complete, o in assenza di vuoti, dal Tomografo.

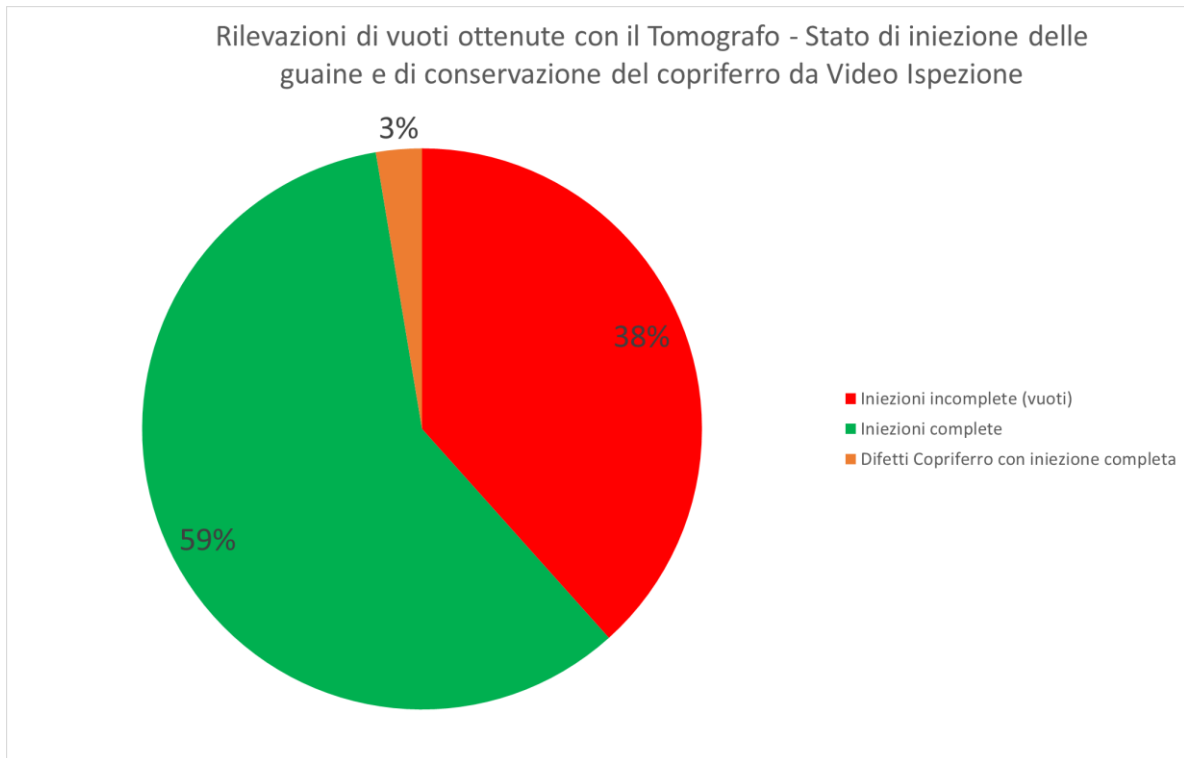


Figura 3.11: grafico a torta rappresentante la distribuzione dei difetti di iniezione rilevati tramite Video Ispezione su una famiglia di dati corrispondenti la rilevazione di vuoti tramite il tomografo.

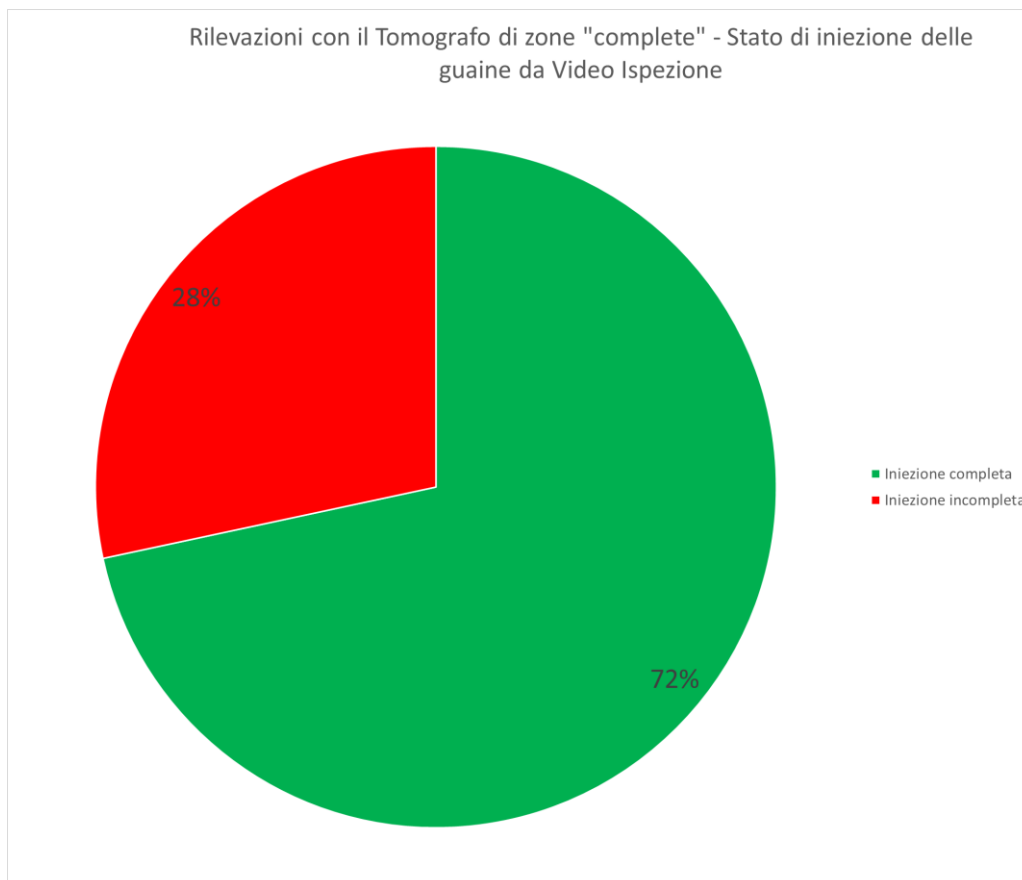


Figura 3.12: grafico a torta rappresentante la distribuzione dello stato di iniezione nella guaina rilevato tramite Video Ispezioni corrispondenti alle rilevazioni di cavi senza vuoti tramite il Tomografo

Dai grafici sopra esposti è possibile notare come le rivelazioni di vuoti da parte del tomografo sono confermate dalle video ispezioni per poco meno del 40% dei casi considerati. Nel caso invece del secondo grafico, le rilevazioni di iniezione completa è confermata per il 72% dei casi considerati, mentre il restante 28% il tomografo non ha individuato dei vuoti segnalati dalle Video Ispezioni. I risultati ottenuti, quindi, mostrano come, nonostante non sia ancora possibile considerare la prova del tutto affidabile (considerando che abbiamo comunque 60% dei casi dove le rivelazioni di vuoti del tomografo non sono confermate dalle video ispezioni), ci sia buon auspicio per futuri impieghi della strumentazione tomografica ad ultrasuoni, visto l'aumento di probabilità di individuare vuoti all'interno della guaina.

La seconda analisi prende sempre i dati raccolti dal Tomografo portatile e studia la distribuzione dei tali per tipologia di cavo individuata (vedi sempre cap.3.3.2.2 per la suddivisione delle tipologie di cavi) nella successiva tabella (Tabella 3.5). In questo modo possiamo andare a verificare se le dimensioni del cavo possono influire sull'iniezione della malta cementizia all'interno delle guaine o che possa ostacolare una rilevazione dei vuoti da parte del Tomografo portatile. Anche in questo caso è stato tenuto conto della correlazione tra i "vuoti" rilevati dalla prova Tomografica con i difetti d'iniezione segnalati dalle prove video-endoscopiche.

Tabella 3.5: distribuzione dei casi con difetti d'iniezione all'interno della guaina, tramite prova video-endoscopica e prova tomografica, per tipologia di cavo identificato.

Tipologie di cavi ispezionati		N. 1		N.2		N.3		N.4	
Numero tot di elementi ispezionati (o casi)		18		94		39		708	
		N	%	N	%	N	%	N	%
Casi di vuoti riscontrati da Tomografo		11	61%	36	38%	32	82%	434	61%
Casi di punti d'indagine in mezzeria		6	33%	30	32%	7	18%	198	28%
Casi di vuoti da tomografo riscontrati da Video Ispezioni		5	45%	15	42%	12	38%	185	43%
% Vuoti identificati da tomografo e confermati da video ispezione	con mezzeria	28%		16%		31%		26%	
	senza mezzeria	42%		23%		38%		36%	
Tipologie di cavi ispezionati		N.5		N.6		N.7		N.8	
Numero tot di elementi ispezionati (o casi)		48		226		18		187	
		N	%	N	%	N	%	N	%
Casi di vuoti riscontrati da Tomografo		18	38%	127	56%	12	67%	114	61%
Casi di punti d'indagine in mezzeria		18	38%	66	29%	6	33%	62	33%
Casi di vuoti da tomografo riscontrati da Video Ispezioni		4	22%	29	23%	4	33%	62	54%
% Vuoti identificati da tomografo e confermati da video ispezione	con mezzeria	8%		13%		22%		33%	
	senza mezzeria	13%		18%		33%		50%	
Tipologie di cavi ispezionati		N.9		N.10		N.11			
Numero tot di elementi ispezionati (o casi)		92		122		11			
		N	%	N	%	N	%		
Casi di vuoti riscontrati da Tomografo		31	34%	91	75%	3	27%		
Casi di punti d'indagine in mezzeria		30	33%	30	25%	0	0%		
Casi di vuoti da tomografo riscontrati da Video Ispezioni		10	32%	21	23%	1	33%		
% Vuoti identificati da tomografo e confermati da video ispezione	con mezzeria	11%		17%		9%			
	senza mezzeria	16%		23%		9%			

Considerando l'obiettivo posto nel distribuire i dati come mostrato nella Tabella 3.5, possiamo notare come la percentuale di difetti d'iniezione individuati dal Tomografo e confermati dalle Video Ispezioni rimane intorno alla percentuale individuata nel grafico a torta ad inizio capitolo (Fig.3.11). Perciò si può dedurre che la tipologia di cavo non influisce più di tanto sulla rilevazione dei difetti d'iniezione da parte del Tomografo. In compenso, se si concentra non più solo sulla correlazione tra le due prove ma anche sull'effettiva distribuzione dei "vuoti" tra tipologie di cavi, si può notare come per alcuni la percentuale di difetti individuata è molto bassa: se per la tipologia N.11 ci si può aspettare una percentuale del genere (poiché sono pochi gli elementi con quella tipologia di cavi ispezionati), per la tipologia N.6, invece, si ha una percentuale molto bassa nonostante l'alto numero di casi considerati.

Perciò, considerando le dimensioni associate a ciascuna tipologia di cavi identificati, è possibile identificare una parvenza di influenza della tipologia di cavo usata nella "formazione" di difetti d'iniezione.

3.4. Fase 2

La Fase 2 si concentra nell'ispezionare nel dettaglio le caratteristiche meccaniche dei materiali degli elementi più a rischio o con una presenza di difetti "allarmante". Viene quindi implementata se richiesta in base ai risultati ottenuti dalla Fase 1. Le prove svolte sono mirate a valutare le resistenze meccaniche del calcestruzzo e dell'acciaio, previo un controllo più accurato delle condizioni del cavo attraverso la prova di saggio diretto. Come indicato nel capitolo precedente (cap.2: Ispezione Speciale), tra le numerose prove possibili sono state eseguite, considerando il campione di dati disponibile:

- Quantificazione delle tensioni residue sulle armature da precompressione tramite l'uso del diffrattometro portatile
- Quantificazione della tensione residua sul CLS tramite metodo del rilascio tensionale

Come per la Fase 1, è stata fatta una tabella riassuntiva dei dati raccolti dalle varie prove (sempre nello stesso periodo temporale, cioè tra febbraio ed ottobre).

Tabella 3.6: riassunto famiglia di dati, raccolti dalle prove della Fase 2, investigata

Numero di Opere indagate		18
% Rispetto al numero totale di opere indagate nella Fase 1		60%
Rilascio Tensionale	Numero di Prove effettuate	60
Diffrattometria	Numero di Prove effettuate	144

I risultati delle prove sopra indicate sono stati analizzati in toto. Anche in questo caso, per alcune delle analisi svolte è stata considerata la stessa suddivisione in tipologie di cavi delle travi ispezionate usata nelle analisi svolte per la Fase 1 (vedi cap.3.3.2.2 per maggiori dettagli). Per le analisi svolte per le prove Diffrattometriche i valori di tensione considerati dai risultati delle prove effettuate sono le medie dei valori raccolti per filo. Il motivo di tale discretizzazione risiede nei valori di discostamento (quindi la deviazione standard e il CV) riscontrati, i quali risultano all'interno di valori ideali, cioè con un CV minore dell'8%, con alcune eccezioni, le quali non superano il 12%. Infine, i valori di tensione considerati saranno raggruppati in maniera tale da permettere confronti appropriati con altre prove (anche qui analisi incrociate).

3.4.1. Prove di Rilascio Tensionale

Tabella 3.7: valori medi delle deformazioni e tensioni misurate e stimate dalle prove con il metodo di Rilascio Tensionale.

Media Deformazioni [$\mu\epsilon$]	147
Media Tensioni (stima) [MPa]	5,25

Il metodo di Rilascio Tensionale, utilizzato per la valutazione della tensione di compressione del calcestruzzo nella zona indagata è mirata, appunto, alla quantità di tensione da precompressione rimanente nel conglomerato della trave indagata. Come descritto nel capitolo 2.4.3.1, la prova è eseguita in prossimità, se non coincidente, alla sezione di mezzera della trave investigata in tre punti diversi, detti E1 (a metà sezione), E2 (poco sopra il bulbo inferiore) ed E3 (all'intradosso del bulbo inferiore). In ciascuno di questi punti vengono applicati dei tagli attorno ad un estensimetro lineare (di cui due tagli paralleli all'asse dell'estensimetro e due perpendicolari allo stesso asse) in modo tale da scaricare la zona e leggere il valore di deformazione conseguente al processo di "scaricamento". La tensione, quindi, verrà ricavata dalle deformazioni così ottenute tramite appropriate equazioni, definite tramite la Normativa NTC2018.

Il procedimento per ricavare le tensioni di compressione dalle deformazioni misurate dall'estensimetro si basa sulla determinazione del modulo elastico E del calcestruzzo. Basandoci sulle indicazioni date dalla Normativa di riferimento, l'equazione risulta:

$$\sigma = \epsilon * E_{cm} * 10^{-6}$$

Con σ = tensione stimata, ϵ = deformazione rilevata ed E_{cm} = modulo elastico stimato del calcestruzzo. Il 10^{-6} è per accordare la deformazione, misurata in $\mu\epsilon$ dall'estensimetro, con l'unità di misura della costante elastica, e quindi della tensione, le quali sono in MPa.

Risulta quindi imperativo la determinazione del modulo elastico per poter stimare la tensione da compressione. Essendo questo una proprietà del calcestruzzo impiegato, sempre da Normativa si utilizzeranno le seguenti formule per ottenere E_{cm} :

$$R_{ck} = R_{cm} + 3,5; \quad f_{ck} = 0,83 \cdot R_{ck}; \quad f_{cm} = f_{ck} + 8; \quad E_{cm} = 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3}$$

Dove R_{ck} è il valore di resistenza caratteristica di un provino cubico del calcestruzzo, R_{cm} è la resistenza media di un provino cubico, f_{ck} e f_{cm} sono gli equivalenti dell' R_{ck} ed R_{cm} ma per un provino cilindrico. Il dato da dover inserire o da ricavare è l' R_{ck} ed è una proprietà intrinseca del calcestruzzo utilizzato.

Normalmente è facilmente ricavabile in base al tipo di calcestruzzo (è la seconda cifra della nomenclatura C xx/xx), però in questo caso, come scritto in precedenza, non è stato così facile da ricavare per via della poca reperibilità delle documentazioni originali relative alle opere indagate. Si è però riusciti ad ottenere per alcune opere due valori, scritti come R_c ed R_{c28} . Essi possono essere assunti, in maniera approssimativa e temporanea, equivalenti all' R_{cm28} segnato da normativa, cioè il valore di resistenza medio del provino cubico a 28 giorni, poiché non esiste alcuna conferma di tale correlazione. Considerando però la similitudine, ed essendo che non c'è assoluta necessità di dover ottenere i valori di tensione esatti, è stato optato per considerare i valori ricavati (cioè i famosi R_c ed R_{c28} dai materiali reperibili delle opere) come R_{cm} , per poi poter ricavare l' R_{ck} dalla prima equazione. Da tali R_{ck} viene poi ricavato un valore medio che verrà assegnato alle opere dove non è stato possibile ricavare alcun dato relativo al calcestruzzo.

Nelle seguenti tabelle sono riassunti i valori delle deformazioni raccolte e la loro media per trave indagata (Tabella 3.8) e successivamente le corrispettive tensioni stimate attraverso il procedimento sopra descritto (Tabella 3.9). Nell'elencare i dati è stato tenuto conto dell'ordine temporale di esecuzione delle prove (periodo tra fine Febbraio ed inizio Ottobre)

Tabella 3.8 e 3.9: elenco, in ordine temporale e per posizione misurata, delle deformazioni misurate tramite estensimetro e delle tensioni di compressione stimate tramite le formule da Normativa elencate sopra.

Opera	h trave	Quota da intradosso [cm]			Deformazione rilasciata [mc]			Periodo esecuzione prove
		E1	E2	E3	E1	E2	E3	
O1T1	180	110,0	72,0	12,0	307	219	292	21/02-25/02
O1T2	180	110,0	70,0	11,0	163	162	138	21/02-25/02
O2T1	180	88,0	50,0	13,0	121	154	207	21/02-25/02
O2T2	180	101,0	51,0	10,5	98	162	257	21/02-25/02
O3T1	180	92,0	56,0	10,5	161	174	185	7/03-11/03
O4T1	180	89	57	11	165	157	159	14/03-18/03
O5T1	165	81	47	10	207	223	233	21/03-01/04
O6T1	180	90	59	13	9	96	108	21/03-01/04
O7T1	180	90	45	10	-41	153	182	09/05-20/05
O8T1	180	90	45	10	52	147	198	09/05-20/05
O9T1	165	88	58	10	82	62	87	23/05-27/05
O10T1	190	86	60	10	239	75	107	06/06-10/06
O11T1	102	59	28	8	70	70	108	13/06-17/06
O12T1	225	108	76	14	-57	-64	11	20/06-24/06
O13T1	225	112	55	10	61	60	228	27/06-01/07
O14T1	185	102	81	10	29	-19	29	11/07-29/07
O15T1	180	84	45	8	-48	45	-123	01/08-04/08
O16T1	225	89	66	13	-23	24	109	08/08-09/09
O17T1	170	92	61	10	128	120	138	26/09-07/10
O18T1	170	91	62	11	183	198	198	26/09-07/10

Opera	h trave	Quota da intradosso [cm]			Valori tensione stimata			Periodo esecuzione prove
		E1	E2	E3	E1	E2	E3	
O1T1	180	110,0	72,0	12,0	10,69	7,63	10,17	21/02-25/02
O1T2	180	110,0	70,0	11,0	5,68	5,64	4,81	21/02-25/02
O2T1	180	88,0	50,0	13,0	4,21	5,36	7,21	21/02-25/02
O2T2	180	101,0	51,0	10,5	3,41	5,64	8,95	21/02-25/02
O3T1	180	92,0	56,0	10,5	5,61	6,06	6,44	7/03-11/03
O4T1	180	89	57	11	5,75	5,47	5,54	14/03-18/03
O5T1	165	81	47	10	7,08	7,62	7,97	21/03-01/04
O6T1	180	90	59	13	0,30	3,21	3,61	21/03-01/04
O7T1	180	90	45	10	-1,41	5,27	6,27	09/05-20/05
O8T1	180	90	45	10	1,81	5,12	6,89	09/05-20/05
O9T1	165	88	58	10	2,80	2,12	2,97	23/05-27/05
O10T1	190	86	60	10	8,60	2,70	3,85	06/06-10/06
O11T1	102	59	28	8	2,28	2,28	3,51	13/06-17/06
O12T1	225	108	76	14	-1,97	-2,22	0,38	20/06-24/06
O13T1	225	112	55	10	2,11	2,08	7,90	27/06-01/07
O14T1	185	102	81	10	1,04	-0,68	1,04	11/07-29/07
O15T1	180	84	45	8	-1,66	1,56	-4,26	01/08-04/08
O16T1	225	89	66	13	-0,80	0,83	3,78	08/08-09/09
O17T1	170	92	61	10	4,43	4,16	4,78	26/09-07/10
O18T1	170	91	62	11	6,34	6,86	6,86	26/09-07/10

Già da queste tabelle si possono notare alcune particolarità importanti.

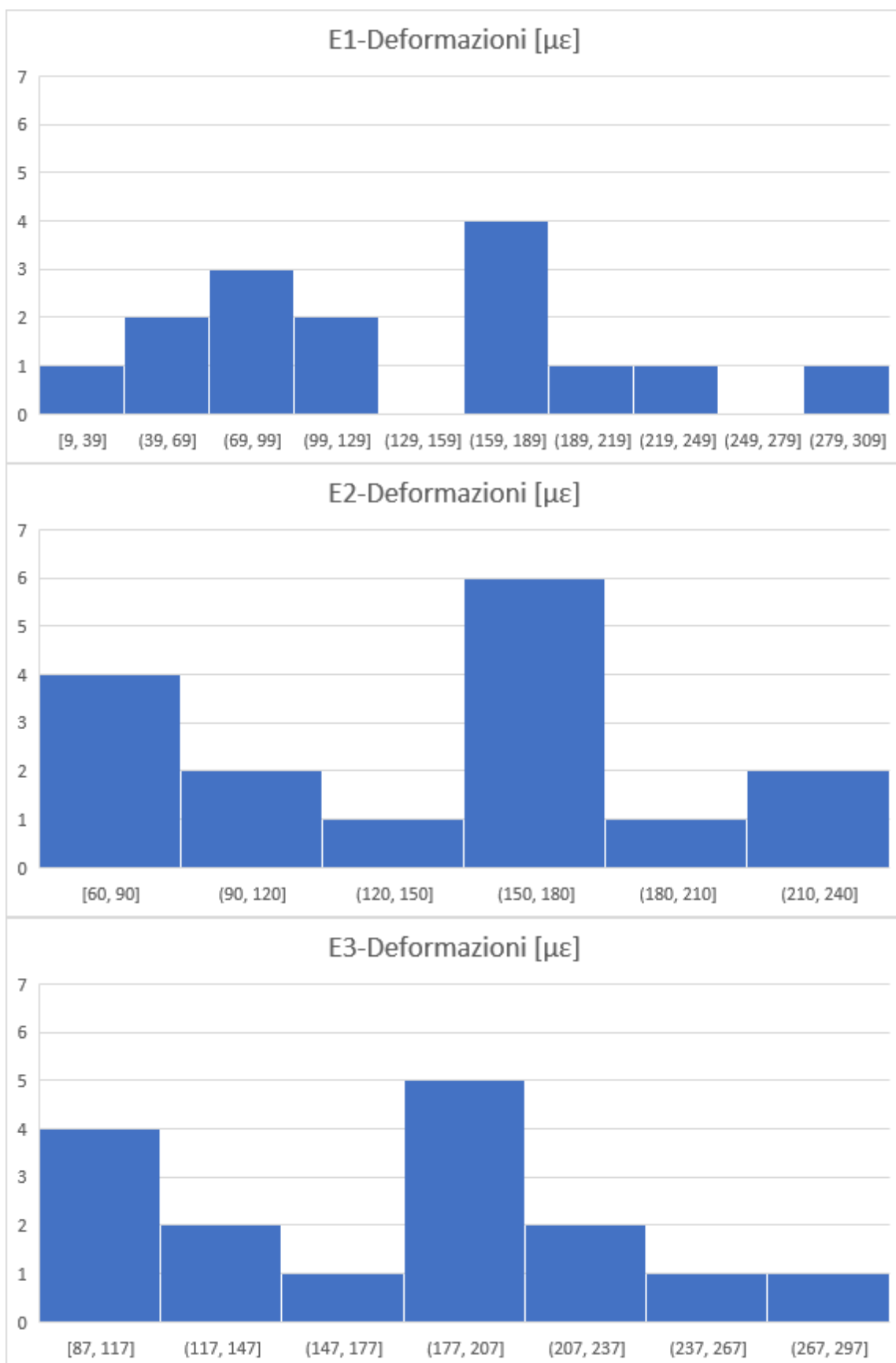
Innanzitutto, la famiglia di dati in considerazione, rispetto alle altre prove, è significativamente inferiore, rendendo quindi più difficile poter analizzare i risultati ottenuti dalla prova di Rilascio Tensionale. Inoltre, si può notare come alcuni valori misurati sono negativi. Se inizialmente questi valori possono essere valutati come valori non accettabili, in quanto, per via della natura della prova stessa, si ricercano delle deformazioni positive, che indica una presenza di uno stato di tensione nel calcestruzzo della trave, in realtà, tali valori potrebbero essere contemplati, in quanto in condizioni di carico (considerando anche carichi variabili quali il traffico) si può verificare una “condizione di decompressione” della trave. Tale condizione corrisponde al parzializzarsi della sezione della trave indagata, rendendola soggetta a tensioni di trazione, soprattutto all’intradosso delle travi, in quanto, già da quanto indicato sia nel capitolo 1.5 e sia nel capitolo 3.1, le travi sono travi appoggiate e (come già accennato ad inizio capitolo e nel capitolo 2.4.3) la sezione d’indagine è situata in mezzaria. Perciò diventa importante capire al meglio se questi valori sono accettabili oppure no. La nostra analisi, quindi, si concentrerà in questo, cioè nel verificare che i valori ottenuti dalla prova siano valori accettabili e descrittivi dello stato tensionale a compressione del calcestruzzo nel momento d’indagine.

Si può notare, sempre dalle Tabelle 3.8 e 3.9, che i valori negativi sono concentrati nel periodo tra giugno e settembre. Tale coincidenza è forviante e non impatta in maniera certa l’esecuzione della prova e il comportamento della strumentazione durante tale esecuzione. Per tale motivo verrà esclusa nelle considerazioni finali dei risultati ottenuti dalle successive analisi svolte.

Infine, osservando l'andamento medio dei valori raccolti nelle due tabelle, le tensioni mantengono l'andamento presente nei valori di deformazioni misurati. Entrambi gli andamenti rispecchiano verosimilmente i valori teorici attesi, nonostante le tensioni da compressione stimate risultino mediamente inferiori ai 6MPa. Il motivo per cui i valori risultano leggermente "sottostimati" (tendenzialmente, senza considerare fattori esterni particolari, le tensioni medie di compressione girano intorno ai 8-10 MPa, vedi riferimenti in [1], [2] e [3]) risiede nei valori "da progetto" utilizzati nel stimare le tensioni, in quanto gli R_{ck} di partenza considerati, nonostante sono verosimili considerando i corrispettivi valori ottenuti dai documenti reperibili, sono appartenenti tecnicamente alla fascia di resistenza medio-bassa, cioè non quella richiesta per la formazione di travi in c.a.p. a cavi post tesi da letteratura e dalle Normative attuali. Detto ciò, anche nel caso si considerasse un valore di R_{ck} più alto, quindi più appropriato, il valore medio aumenterebbe al massimo di 2 MPa circa. Nonostante sia comunque un aumento non da sottovalutare, per l'obbiettivo di questa analisi non è necessario da tenere conto.

Per l'analisi dei dati a disposizione si è optato per l'utilizzo di due grafici, entrambi svolti sia per le deformazioni misurate che per le tensioni corrispondenti di compressione stimate. Il primo è un istogramma, rappresentante la distribuzione dei valori studiati. L'istogramma è svolto uno per posizione, settando gli intervalli per l'asse x uguali per tutti e tre i grafici (1.5 per gli istogrammi sulle tensioni medie, 30 per gli istogrammi sulle deformazioni misurate). Il secondo è un grafico di dispersione, dove in y sono state messe le posizioni effettive nelle quali è stata eseguita la prova in percentuale rispetto all'altezza della trave indagata, mentre in x sono stati messi i valori studiati. Dal secondo grafico, attraverso la dispersione dei dati, possiamo valutare l'andamento dei valori studiati in base alla loro posizione tramite una linea d'interpolazione lineare.

Il motivo per cui verrà studiato l'andamento nei grafici a dispersione risiede nella verifica dell'andamento della combinazione delle tensioni presenti nella trave. Infatti, sempre in riferimento al capitolo 2.4.3.1, poiché stiamo ispezionando nella sezione in mezzera, le tensioni di compressione saranno decrescenti dall'alto verso il basso, con il picco di tensione in prossimità del bulbo inferiore (poiché i cavi da precompressione passano proprio là). La tensione di compressione va in combinazione però con le tensioni da carichi permanenti e di esercizio, le quali avranno un andamento lineare di trazione all'intradosso e di compressione all'estradosso.



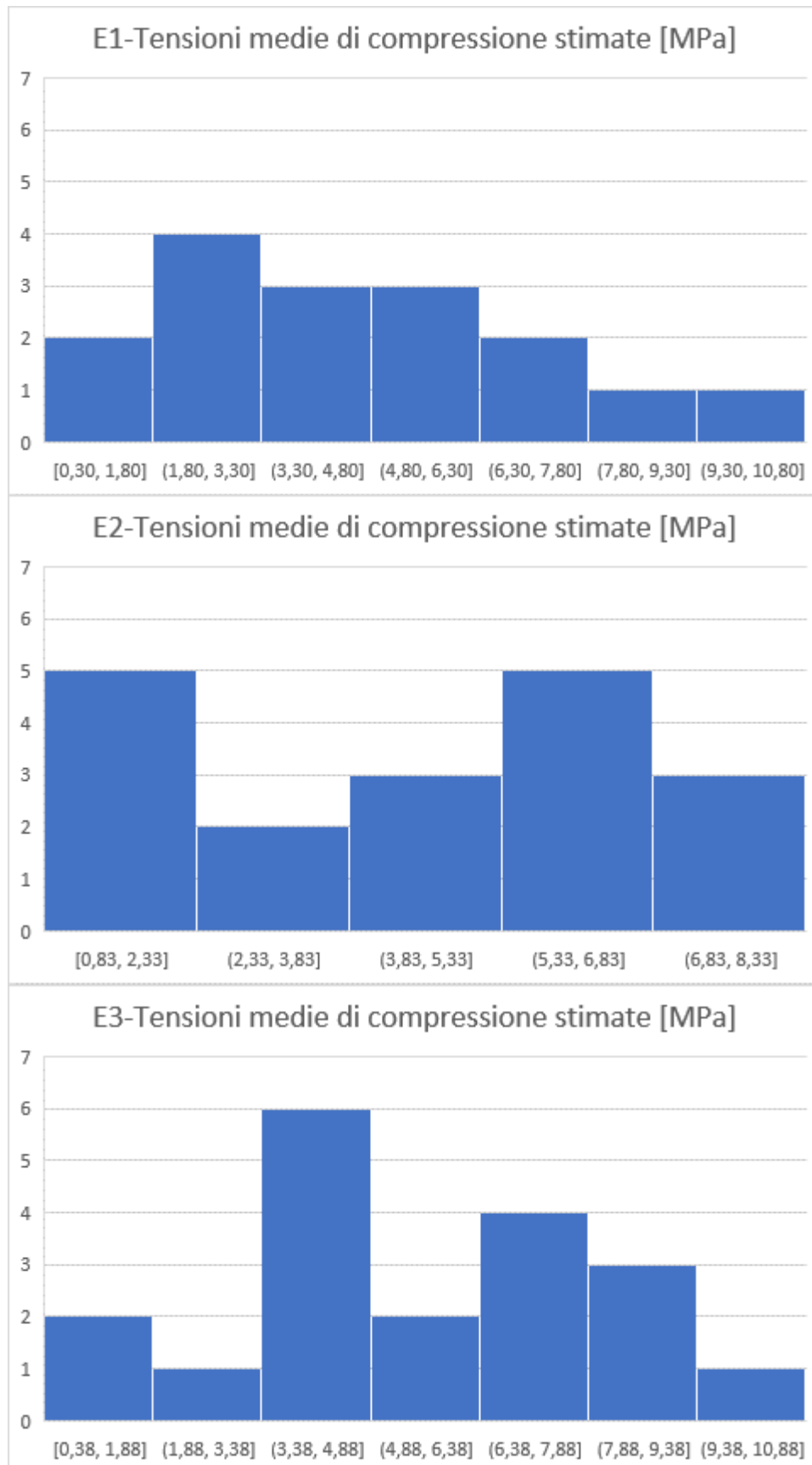


Figura 3.13-3.18: istogrammi per posizione rappresentante l'andamento dei valori di deformazione (figure 3.13-3.15) e di tensione da compressione stimate (figure 3.16-3.18) dalla prova di Rilascio Tensionale

Dagli Istogrammi relativi alle deformazioni misurate nei tre punti considerati della sezione indagata, si può notare come più della metà (12) dei valori ottenuti in E1 risultano inferiori o uguali a $180 \mu\epsilon$, mentre in E2 poco più della metà (9) risulta maggiore di $150 \mu\epsilon$, così come in E3 (sempre 9 valori maggiori di $177 \mu\epsilon$). Questo sembra andare a confermare come la maggior resistenza da compressione risulta presso il bulbo inferiore, ovvero dove sono presenti i cavi da precompressione. Si nota però un particolare tra le tre distribuzioni: in tutti e tre gli istogrammi, i picchi più alti rappresentanti (che equivale a dire la maggior parte dei valori nell'intervallo minimo scelto) risultano essere concentrate tra i 150 e i $210 \mu\epsilon$ (7 valori per E1 ed E2, 5 valori per E3). Tale intervallo risulta superiore alla media di tutte le deformazioni raccolte, che risulta uguale a $147 \mu\epsilon$. Questa situazione potrebbe essere una delle cause per cui non si riesce facilmente ad ottenere una crescita lineare dei valori di deformazione misurati dalla posizione E1 alla posizione E3.

Nel caso degli Istogrammi relativi alle tensioni stimate dalle deformazioni, tramite il procedimento descritto ad inizio capitolo e tratto dalla Normativa NTC2018, la distribuzione dei valori risulta leggermente diversa da quella mostrata negli istogrammi relativi alle deformazioni misurate. Ritroviamo la maggior parte dei valori medi di tensione di compressione in E1 minori di 6.3 MPa (12 valori), mentre in E2, così come in E3, più della metà risultano maggiori di 3.8 (11 valori per E2, circa 13 valori per E3). In questo caso, i picchi più alti non sono concentrati in uno stesso intervallo di valori, in quanto la concentrazione più alta in E1 risulta per valori di tensione inferiori rispetto a quelli nella concentrazione più alta in E3. Però si può notare come la concentrazione in E3 risulta per valori medi inferiori rispetto a quelli nella concentrazione più alta in E2. In generale, le distribuzioni vanno a confermare il valore di tensione di compressione medio complessivo, che è uguale a 5.25 MPa .

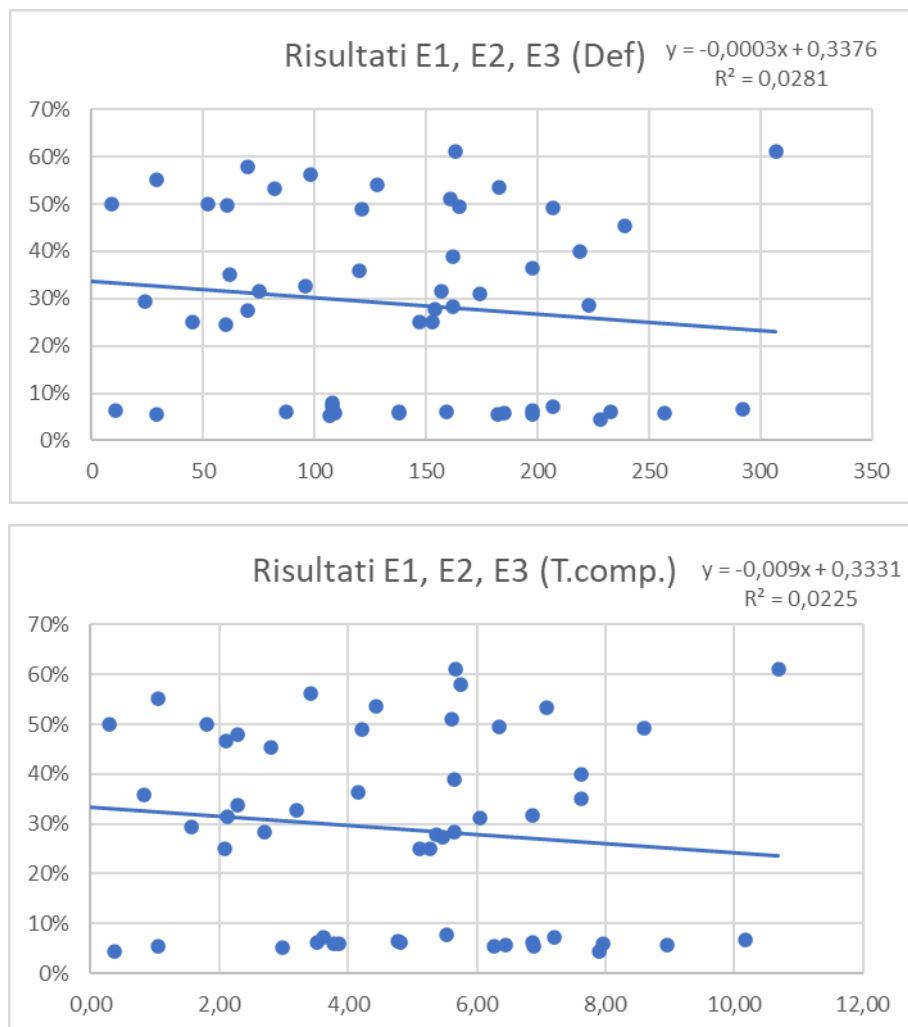


Figura 3.19 e 3.20: grafici di dispersione, con interpolazione lineare, per deformazioni (fig.3.19) e tensioni medie (fig.3.20) con tutti e tre punti d'indagine rappresentati nei grafici contemporaneamente.

Se dagli Istogrammi si poteva notare una certa parvenza di andamento crescente dei valori rappresentanti, tale andamento sembra rispecchiarsi nei grafici a dispersione. La retta interpolatrice, infatti, sembra avere graficamente una tendenza decrescente in y all'aumentare dei valori in x, ergo al diminuire delle altezze sembra ci sia un aumento dei valori misurati di deformazione, così come dei valori di tensione stimati. È però importante ricordare che l'entità dell'andamento è molto piccola: infatti, l'indice di correlazione R^2 è del 0,028 per i valori di deformazione e del 0,023 per i valori di tensione medi di compressione. Da tali indici non si può dire che esiste con certezza un andamento, anzi sembrerebbe non esserci un andamento vero e proprio.

3.4.2. Prove Diffratometriche

Tabella 3.10: valore medio delle tensioni misurate dal Diffratometro portatile, con la corrispettiva deviazione standard media e CV medio

Media valori di tensione medi [MPa]	788
Media deviazione standard [MPa]	41
Media CV [%]	5.2

La valutazione dello stato tensionale dell'acciaio da precompressione avviene tramite l'utilizzo del Diffratometro portatile. Lo stato tensionale misurato sarà relativo a quello individuato in sede di prova. L'approccio alla prova, simile alle prove durometriche (cap.3.5.1), si basa nell'identificazione dei valori di tensione per filo indagato, il quale risulta come il valore medio delle tensioni ottenute ad ogni prova. Infatti, come spiegato al capitolo 2.4.2.2, il numero di prove svolte sono mediamente tra le due e le tre per filo, dove l'impiego della terza (ed ulteriori prove) è solitamente nell'eventualità che uno dei due valori di tensione ottenuto dalle due prove iniziali risulti "anomalo", cioè molto distaccato dall'altro valore. I risultati "anomali" verranno quindi esclusi nella considerazione del valore medio per filo. Questa "regola" non è però sempre dimostrata. In alcuni casi, infatti, viene svolta una terza prova (o ulteriori prove) quando non risulta necessario, cioè con già due prove con due valori vicini, dove il risultato di questa terza prova risulta o ridondante (cioè, conferma i due valori precedenti misurati) o risulta notevolmente diverso, talvolta addirittura "anomalo" e quindi non viene considerato nel calcolo del valore medio. In altri invece i valori di tensione considerati presentano una notevole differenza tra di loro, portando quindi a considerare degli scarti che risultano notevoli. Tale situazione suggerirebbe un'ulteriore prova, la quale potrebbe risultare utile per confermare uno dei due risultati, ma per motivi non sempre precisati non è stata svolta. Queste situazioni potrebbero influire sulla precisione ed affidabilità della prova, andando a considerare scarti (sia normali che quadratici) particolarmente notevoli.

Come accennato ad inizio capitolo 3.3, le analisi saranno svolte solo per i dati raccolti dalle prove Diffratometriche e confrontando tali dati con altre prove svolte: un primo confronto verrà effettuato con i valori raccolti dalla prova di Rilascio Tensionale; successivamente, le tensioni ottenute dalle prove Diffratometriche verranno ulteriormente confrontate con i dati raccolti dalle video-ispezioni.

3.4.2.1. Analisi solo sulle prove Diffratometriche

Le analisi svolte unicamente sui dati raccolti dalle prove di valutazione dello stato tensionale dell'acciaio, tramite l'impiego del Diffratometro portatile, sono state suddivise in due diversi studi.

Il primo studio riguarda alla distribuzione dei valori di tensione medi ottenuti dalla prova. Come spiegato al capitolo 2.4.2.2 e nell'introduzione a questo capitolo (cap.3.3.3), tali valori sono appunto una media di ogni rilevazione effettuata per filo indagato, i quali di solito sono almeno tre fili per cavo considerato (e due cavi per trave ispezionata). La distribuzione dei valori medi di tensione è stata rappresentata tramite due istogrammi: il primo rappresenta la distribuzione di tutti i valori, mentre il secondo rappresenta il rapporto tra i valori medi ottenuti e i corrispettivi valori da progetto, che nel nostro caso risulta la tensione a t infinito dell'acciaio.

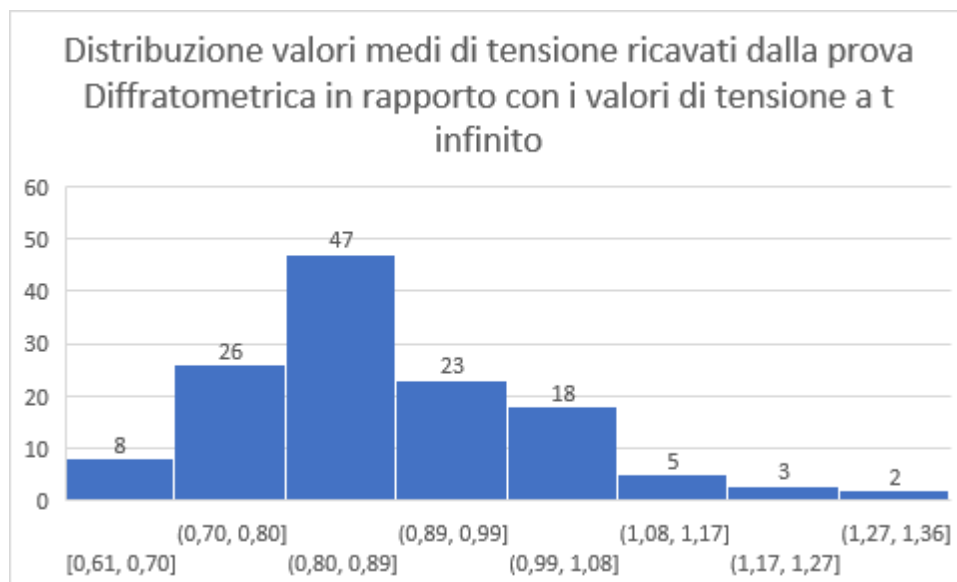
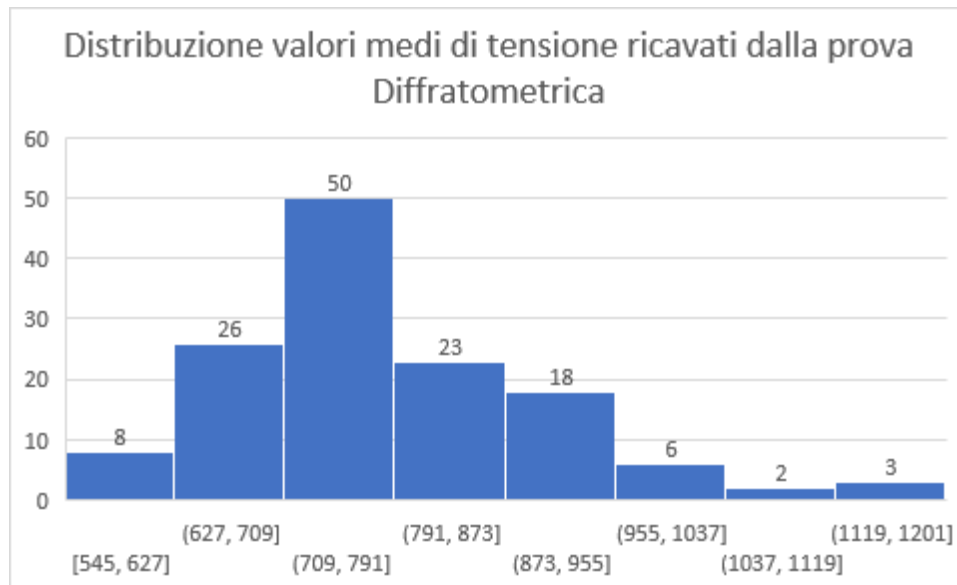


Figure 3.21 e 3.22: istogrammi rappresentanti la distribuzione dei valori medi delle tensioni misurate con il Diffratometro (fig.3.21) e la distribuzione dei rapporti tra i valori medi misurati e i corrispettivi valori da progetto nelle tensioni a t infinito (fig.3.22).

Dal primo istogramma, possiamo notare come la maggior parte delle tensioni medie si aggirano nell'intervallo tra 709 e 791 MPa (50 valori nell'intervallo). Come conferma si nota che il valore medio di tutte le tensioni è equivalente a 788 MPa, il quale rientra nell'intervallo con il maggior numero di valori. Si può anche notare come più della metà delle tensioni medie (84 valori) risultano inferiori o uguali a 791 MPa. Tale dato di può notare anche nel secondo istogramma, dove per 104 casi sui 132 considerati (cioè il 79% dei casi totali) i rapporti tra il valore medio di tensione stimato e quello di progetto risultano minori di 1, cioè tutti risultano inferiori al valore di progetto. Questi valori, però, si aggirano per la maggior parte (73 casi) tra 0.7 e 0.89, con quasi 50 casi superiori a 0.8. Tale dato indica come la differenza tra i valori medi stimati e i valori di progetto si aggirano tra circa i 175 e i 95 MPa. Si può quindi dedurre che i valori riportati dalla prova sono verosimili, riflettendo in generale delle buone caratteristiche meccaniche dell'acciaio impiegato anche dopo un certo ammontare di tempo dalla messa in opera.

Riguardo al secondo studio, l'analisi dell'andamento degli scarti è stata svolta temporalmente (cioè in ordine temporale relativo all'esecuzione delle prove) e si va a verificare l'affidabilità della prova. Per poter visualizzare al meglio l'andamento degli scarti è stato optato un grafico a dispersione con una linea interpolatrice sia per gli scarti massimi che per la deviazione standard. Entrambi gli scarti, come già accennato ad inizio di questo capitolo, sono equivalenti alla differenza tra il valore medio di tensione considerato per filo e i valori di tensione misurati per ciascuna prova eseguita su quel filo. Insieme al grafico è stata fatta una tabella riassuntiva, compresa anche dei valori di CV (coefficiente di variazione) sia relativo allo scarto massimo (chiamato CV Max) che per la deviazione standard (chiamato CV Ds).

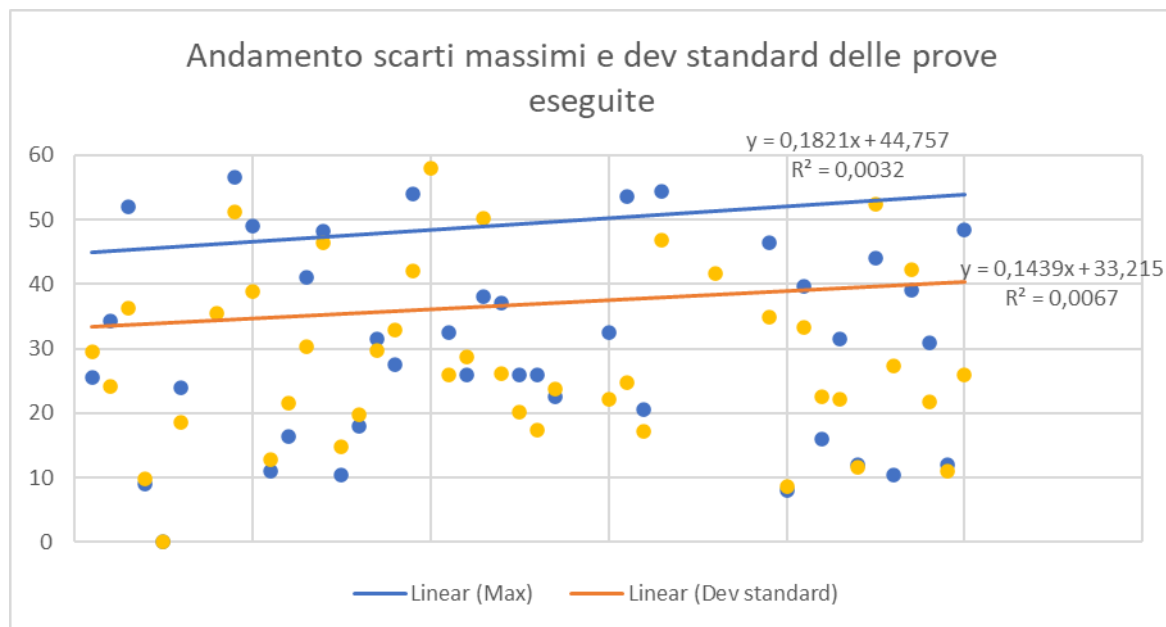


Figura 3.23: grafico di dispersione rappresentante l'andamento nel tempo degli scarti massimi e delle deviazioni standard misurate tra i valori medi considerati e i singoli valori di tensione misurati per ciascuna prova (scarti e deviazioni standard misurate per filo indagato e mediate per cavo indagato)

Tabella 3.11: Rappresentazione andamento medio degli scarti (massimi e deviazioni standard) e dei corrispettivi CV in dettaglio

Grafico scarti e dev standard									
Trave-Cavo-Filo	Scarti massimi e dev standard per cavo				Trave-Cavo-Filo	Scarti massimi e dev standard per cavo			
	Max	Dev standard	CV Max	CV Ds		Max	Dev standard	CV Max	CV Ds
	MPa	MPa	%	%		MPa	MPa	%	%
O1T1c1	26	29	3,2%	3,8%	O10T1c1	26	17	3,4%	2,2%
O1T1c2	34	24	4,3%	3,0%	O10T1c2	23	24	3,1%	3,3%
O1T2c1	52	36	7,0%	5,0%	O11T1c1	220	103	32,2%	16,0%
O1T2c2	9	10	1,1%	1,2%	O11T1c2	154	99	22,5%	13,5%
O1T2c3	0	-	0,0%	0,0%	O12T1c1	33	22	4,4%	3,0%
O2T1c1	24	19	2,8%	2,1%	O12T1c2	54	25	7,3%	3,5%
O2T1c2	183	99	20,8%	10,4%	O13T1c1	21	17	2,3%	1,9%
O2T2c1	61	36	8,5%	4,4%	O13T1c2	54	47	6,5%	5,7%
O2T2c2	57	51	7,2%	6,5%	(FP) Os1T1c1	139	82	19,7%	12,1%
O2T2c3	49	39	6,1%	4,9%	(FP) Os1T1c2	129	73	18,3%	10,4%
O3T1c1	11	13	1,4%	1,6%	O14T1c1	64	42	6,3%	3,8%
O3T1c2	17	22	2,4%	2,5%	O14T1c2	90	67	8,0%	5,8%
O3T1c3	41	30	5,3%	3,9%	(FP) Os2T1c1	151	111	22,8%	12,3%
O4T1c1	48	46	6,9%	6,7%	(FP) Os2T1c2	47	35	6,6%	5,0%
O4T1c2	11	15	1,3%	0,6%	(FP) Os2T1c3	8	9	1,3%	1,4%
O5T1c1	18	20	2,2%	2,4%	O15T1c1	40	33	4,9%	4,1%
O5T1c2	32	30	4,3%	4,4%	O15T1c2	16	23	2,1%	1,9%
O6T1c1	28	33	3,4%	4,1%	O16T1c1	32	22	3,9%	2,8%
O6T1c2	54	42	8,0%	6,3%	O16T1c2	12	12	1,7%	1,1%
O7T1c1	63	58	8,1%	4,4%	(FP) Os3T1c1	44	52	6,4%	7,8%
O7T1c2	33	26	3,8%	2,4%	(FP) Os3T2c1	11	27	1,6%	4,2%
O8T1c1	26	29	3,3%	2,6%	O17T1c1	39	42	4,0%	4,3%
O8T1c2	38	50	4,1%	2,7%	O17T1c2	31	22	3,1%	2,2%
O9T1c1	37	26	5,4%	4,0%	O18T1c1	12	11	1,7%	1,5%
O9T1c2	26	20	3,6%	1,4%	O18T1c2	49	26	5,3%	2,9%

Dal grafico (fig.3.23) si può notare come graficamente esista un leggero andamento crescente nel tempo, sia per lo scarto massimo che per la deviazione standard, al contrario di quanto dovrebbe essere atteso. In realtà, se si va a consultare le equazioni delle rette interpolatrici, entrambe presentano un indice di correlazione R^2 bassissimo, indicando quindi che quella parvenza grafica di andamento crescente in realtà non c'è. In generale, si può notare dalla tabella (Tabella 3.11) che in alcuni casi risultano dei picchi sia negli scarti massimi che nelle deviazioni standard, con i casi "peggiori" registrati per l'opera O11 (tale informazione sarà approfondita nel dettaglio nelle analisi incrociate nel prossimo capitolo, cioè cap.3.4.2.2).

Si può quindi considerare la prova affidabile e precisa nelle misurazioni delle tensioni residue. Nonostante ci sia una parvenza di andamento degli scarti crescente nel tempo, tale andamento risulta di entità così piccola da poter essere non considerato. Inoltre, i valori degli scarti sono sempre minori di 100 MPa, che sono relativamente piccoli rispetto ai valori di tensione media considerati: infatti, se si guarda al CV (coefficiente di variazione), che rappresenta il rapporto tra lo scarto e il valore medio di riferimento, in media risulta rispettivamente 6,5% per gli scarti massimi e 4,5% per le deviazioni standard, con pochi casi (più per gli scarti massimi rispetto alle deviazioni standard) che superano il 20% (per le opere denominate Os, per l'opera O11 come già segnalata e per l'opera O2 in corrispondenza del cavo c2 per la trave T1).

3.4.2.2. Analisi incrociate

Come già accennato, per via della natura dei risultati ottenuti dalla prova con Diffrattometro portatile è possibile impostare delle analisi incrociate sia con altre prove della Fase 2 (nello specifico con la prova di Rilascio Tensionale) sia con la Fase 1 (nello specifico con i dati raccolti dalle video ispezioni).

3.4.2.2.1. Confronto tra prove Diffrattometriche e prove di Rilascio Tensionale

Un modo alternativo, e in alcuni casi complementare, per poter verificare l'affidabilità della prova, oltre al verificare il comportamento in esercizio dei materiali coinvolti nel sistema di precompressione, è quello di mettere a confronto le tensioni medie dell'acciaio misurate tramite il Diffrattometro portatile e le tensioni medie di compressione stimate dalle deformazioni misurate dall'estensimetro lineare applicato tramite il metodo del rilascio tensionale (cap.3.4.1).

Il confronto è stato fatto attraverso l'applicazione di un'analisi di regressione tra i valori considerati. Per poter attuare tale analisi si è optato l'impiego di un grafico di regressione, ponendo arbitrariamente i valori di deformazione misurati dall'estensimetro lineare dalle prove di Rilascio Tensionale in x e i valori di tensione medi ottenuti dalle prove Diffrattometriche in y. Il motivo per cui si è optato di usare le deformazioni invece delle tensioni stimate di compressione risiede nel fatto che le tensioni stimate sono approssimative ed ottenute indirettamente, mentre le deformazioni sono ottenute direttamente dallo strumento. Perciò, per una verifica di correlazione risultano più adatte le deformazioni rilasciate dal calcestruzzo e misurate tramite estensimetro lineare.

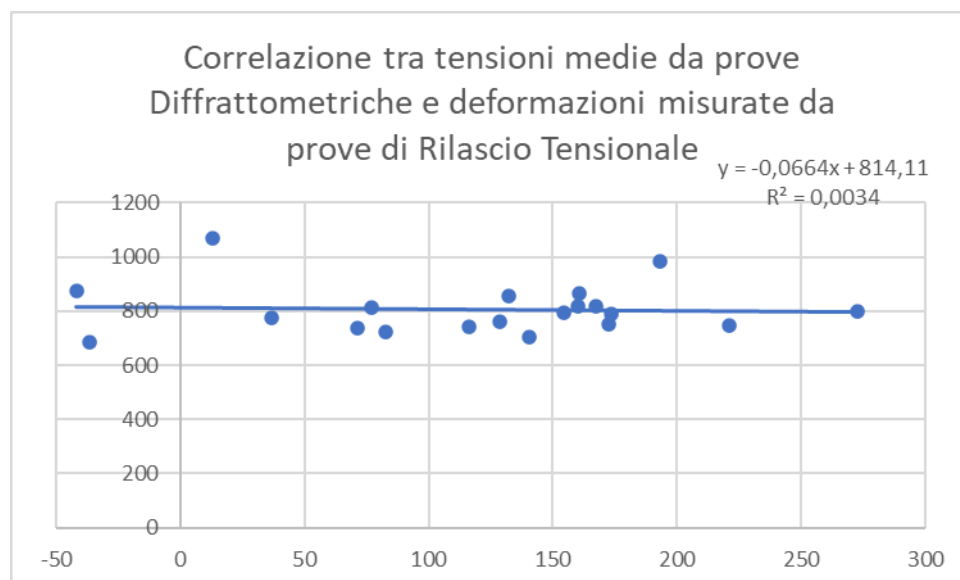


Figura 3.24: grafico di regressione lineare tra le tensioni medie dell'acciaio misurate dal Diffrattometro portatile, in y, e tra le deformazioni medie del calcestruzzo, in condizioni di scarico tensionale, dall'estensimetro portatile, in x.

Dal grafico di sopra si può notare come non esiste una vera e propria correlazione tra i due valori, ottenendo degli indici sia di regressione che di variazione (R^2) molto bassi se non nulli. Per confermare questo risultato, si è optato nel rifare lo stesso grafico invertendo però i valori posti nei due assi (quindi nelle ascisse abbiamo i valori di tensione medi dalle prove Diffraattometriche, nelle ordinate abbiamo le deformazioni misurate tramite il metodo di Rilascio Tensionale).

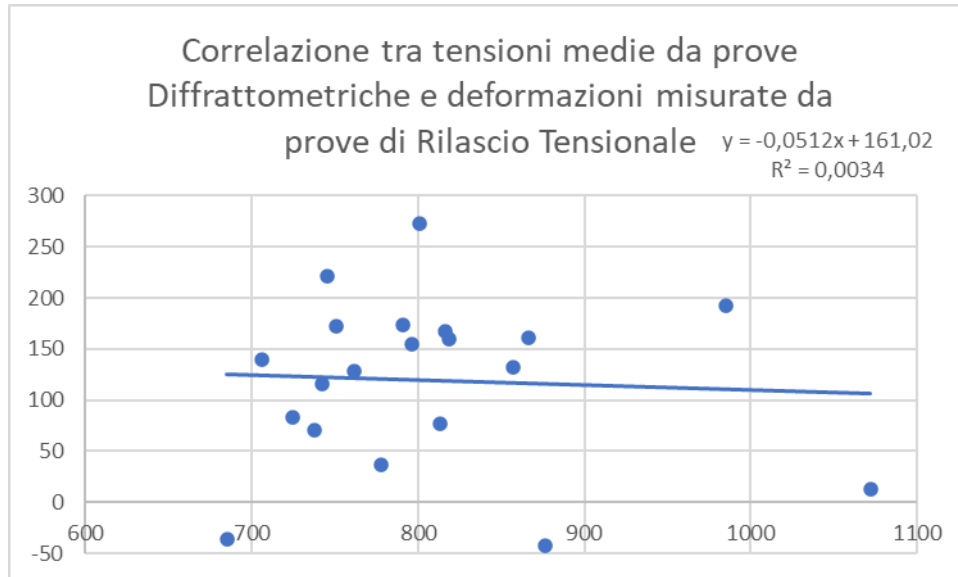


Figura 3.25: grafico di regressione lineare tra le tensioni medie dell'acciaio misurate dal Diffraattometro portatile, in x , e tra le deformazioni medie del calcestruzzo, in condizioni di scarico tensionale, dall'estensimetro portatile, in y .

Dal nuovo grafico si nota una parvenza di correlazione tra le due famiglie di valori, ma da quanto si può vedere l'indice R^2 continua ad essere molto piccolo. Si può dire quindi che questo metodo di confronto, per i dati raccolti fino ad ora, non risulta efficace per gli obiettivi posti.

3.4.2.2.2. Confronto tra valori di tensione stimati dal Diffraattometro e i difetti riscontrati dalle Video-Ispezioni

Questo confronto, invece, si concentra su come le difettosità presenti sul cavo di precompressione, riscontrate dalle Video Ispezioni, influiscono sul valore di tensione stimato dal Diffraattometro.

Prima di addentrarci nello svolgimento dell'analisi incrociata, nella seguente tabella viene mostrato un'anteprima dei dati analizzati distribuiti per tipologia di cavo. Sono stati considerati anche le lunghezze ed altezze delle travi, per vedere se una differenza nelle dimensioni della trave possano influire nei dati raccolti dalle prove indagate.

Tabella 3.12: Tabella illustrativa dei valori significativi, considerati in quest'analisi incrociata, per ogni trave indagata

Opera	Tipologia cavo	Lunghezza Trave [cm]	Altezza Trave [cm]	V.i.			Diffratometria			
				N. di V.I.	% cavi con difetto	% guaine con difetto d'iniezione	N.Tensioni medie per trave	Max [MPa]	Min [MPa]	Medio [MPa]
O25-11	N.2	2064	102	94	18%	26%	6	799	547	685
O3-4	N.4	2810	180	105	27%	55%	12	853	659	758
O23-9	N.8	2730	165	95	34%	45%	6	772	646	706
O5-19	N.8	2730	165	92	62%	51%	5	846	766	813
O6-20	N.4	2800	180	95	38%	42%	6	867	644	737
O7-21	N.4	2800	180	99	41%	39%	9	918	741	816
O22-8	N.4	2800	180	105	29%	40%	7	942	660	857
O1-2	N.4	2800	180	226	12%	35%	25	978	619	803
O28-29	N.1 (O29, nT1)	1960	180	18	83%	44%	-	-	-	-
	N.4 (O28, nT2; O29, nT2)	2795	180	78	58%	40%	-	-	-	-
	N.7 (O28, nT1)	3482	185	18	17%	28%	-	-	-	-
O24-10	N.6	3295	190	106	22%	10%	6	852	695	745
O14-26	N.6 (O14, nT2; O26, nT3)	3294	185	80	35%	39%	-	-	-	-
	N.11 (Trefoli; O14 nT1)	3294	185	11	55%	27%	6	1200	751	1072
O15-27	N.9	3170	180	92	14%	23%	6	892	671	778
O17-18	N.5 (O17, nT1; O18, nT2)	2620	170	48	17%	19%	-	-	-	-
	N.6 (O17, nT2; O18, nT1)	3220	170	40	15%	25%	12	1016	678	902

O13	N.10	4400	225	45	16%	44%	6	948	778	876
O12	N.10	4400	225	29	0%	7%	6	809	694	742
O30	N.3	3390	200	39	3%	31%	-	-	-	-
O16	N.10	4400	225	48	17%	13%	6	865	685	762

Si può notare subito come lunghezza ed altezza sono uniche per tipologia di cavo indagato, soprattutto se si considerano solamente le opere indagate in entrambe le fasi.

Possiamo quindi sviluppare l'analisi incrociata con il confronto tra le percentuali di difetti riscontrati per opera nello specifico, così come l'oscillazione dei valori di tensione stimata dal Diffrattometro, senza dover suddividere tali dati per le dimensioni delle travi. Tale confronto è utile per capire se effettivamente difetti sul cavo portano ad un restringimento della sezione reagente, quindi ad un decremento dei valori di tensione a tempo infinito stimati. Per indagare meglio questo confronto sono state sviluppate le seguenti tabelle.

Esse sono strutturate per trave indagata, indicando per ciascuna anche la tipologia di cavo appartenente al sistema di precompressione impiegato nell'elemento strutturale. Sono raccolte per trave le tensioni medie stimate dal Diffrattometro, con annesso lo scarto di tale valore dal valore di progetto e quanto il valore stimato è in percentuale rispetto alla tensione a tempo infinito da progetto. Tali valori sono accompagnati dai dati raccolti dalle video ispezioni. I dati sono suddivisi in difetti riscontrati sul cavo e vuoti presenti all'interno della guaina, dove sono indicati la quantità riscontrata per cavo sia numericamente sia in percentuale rispetto al numero totale di investigazioni effettuate per quella trave.

Tabella 3.13: tabella di confronto tra le tensioni medie ottenute dalla prova Diffrattometrica con i dati ricavati dalle Video Ispezioni

Opera (e Trave)		Tip. Cavo	Prove Diffrattometriche			Prove Video-Endoscopiche				
			Tensione Media [MPa]	Scarto con valore da progetto		Numero totale di "qde" eseguite	Difetti sui cavi		Difetti d'iniezione della malta cementizia nella guaina	
				Mpa	Rapporto Tensione Media - Valore da progetto [%]		N	% su tot qde eseguite	N	% su tot qde eseguite
O1	T1	N.4	801	82	91%	12	2	17%	3	25%
	T2		796	87	90%	16	1	6%	4	25%
O2	T1		867	16	98%	15	1	7%	6	40%
	T2		751	132	85%	14	0	0%	7	50%
O3			791	92	90%	10	3	30%	6	60%
O4			725	158	82%	11	4	36%	7	64%
O5	N.8	813	70	92%	12	4	33%	6	50%	
O6	N.4	737	146	84%	10	0	0%	4	40%	
O7		816	67	92%	12	8	67%	3	25%	
O8		857	26	97%	14	2	14%	5	36%	
O9	N.8	706	177	80%	11	3	27%	7	64%	
O10	N.6	745	138	84%	12	5	42%	2	17%	
O11	N.2	685	198	78%	12	1	8%	2	17%	
O12	N.10	742	152	83%	12	0	0%	2	17%	
O13		876	18	98%	10	0	0%	4	40%	
O14	N.11	1072	178	Maggiore	11	6	55%	3	27%	
O15	N.9	778	116	87%	10	2	20%	2	20%	
O16	N.10	762	132	85%	-	-	-	-	-	
O17	N.6	985	91	Maggiore	12	3	25%	3	25%	
O18		818	76	92%	11	0	0%	0	0%	

I dati raccolti dalle Video Ispezioni sono stati classificati in tre categorie: la prima corrispondente ad un numero di difetti riscontrati minori della media o uguali (per lo stato di conservazione dei cavi la media risulta 2, per i vuoti rilevati nella guaina invece risulta 4) con il colore verde, la seconda corrispondente ad un numero leggermente sopra alla media (per entrambi di 2 massimo sopra alla media, cioè 4 e 6) con il colore giallo mentre la terza corrispondente ad un numero ben superiore alla media (cioè 5 e 7) con il colore rosso.

I valori di tensione ottenuti tramite l'impiego del Diffrattometro portatile sono stati ordinati anch'essi in 3 categorie diverse: valori di tensione "alti" (cioè il valore medio risulta almeno l'85% del valore di progetto) con il

colore blu, valori di tensione “bassi” (cioè valore medio inferiore al 90% del valore di progetto) con il colore arancione e valori “anomali”, cioè con il colore oro scuro. L’anomalia consiste nella non coincidenza con i dati raccolti dalle video ispezioni rispetto al valore stimato per quella trave: per essere più precisi, se il valore di tensione risulta “alto”, ma sono presenti un certo numero di difetti sul cavo (un esempio può si può vedere per la trave O17T1) oppure il valore di tensione risulta “basso” ma non sono presenti, o in quantità ben inferiore rispetto a quanto ci si aspetta, difetti sul cavo.

Tali casi “anomali”, per studiarli nel dettaglio, sono stati sviluppati nelle seguenti tabelle. Nella prima sono presenti ogni tipologia di difetto ispezionata dalle video ispezioni e riscontrata sui cavi indagati della trave di riferimento, mentre nella seconda sono analizzati più nel dettaglio gli scarti delle tensioni medie considerate dai valori ottenuti direttamente dalle prove con il Diffratometro portatile e dai valori di progetto per la tensione a tempo infinito. Inoltre, per i valori di tensione stimati dal Diffratometro portatile, sono stati inseriti il valore massimo e minimo registrato per ciascuna trave, così come il massimo e minimo considerato per ciascun filo appartenente al cavo indagato della stessa trave.

Tabelle 3.13 e 3.14: casi anomali (indicati con i valori di tensione da Diffratometro in oro scuro nella Tabella 3.12)

Dati ricavati dalle Video Ispezioni																		
Tipologia di cavi	Opera e trave	Stato di conservazione del cavo				Difetti d’iniezione nella guaina					Stato di conservazione della guaina				Stato di conservazione del Copriferro			
		N.tot	lieve oss.	Corr. Sup.	fili rotti	N.tot	>75%	75>v>50	50>v>25	No vuoti	N.tot	ieve oss.	corrosa	disgregata	N.tot	fessurato	tracce di umidità	tracce oss.
N.4	O2 (T2)	0	-	-	-	7	5	1	1	-	1	1	-	-	3	-	3	-
N.4	O6	0	-	-	-	4	-	4	-	-	2	2	-	-	-	-	-	-
N.4	O7	8	8	-	-	3	3	-	-	-	5	5	-	-	1	1	-	-
N.2	O11	1	1	-	-	2	2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-
N.10	O12	0	-	-	-	2	2	-	-	-	3	3	-	-	0	-	-	-
N.11 (tr.)	O14	6	6	-	-	3	1	1	-	1	10	9	1	-	1	1	-	-
N.6	O17	3	3	-	-	3	1	-	2	-	6	5	1	-	0	-	-	-

Tipologia di cavi	Opera e Trave	Tensioni medie misurate [MPa]			Scarti misurati [MPa]					
		Max	Min	Medio	Tra tensione media misurata e il corrispettivo valore da progetto			Tra tensione media per cavo e i valori di tensione misurati per singola prova		
					Max	Min	Medio	Max	Min	Medio
N.4	O2 (T2)	887	619	751	264	4	134	61	6	31
N.4	O6	867	644	734	240	16	146	54	6	25
N.4	O7	918	741	817	143	4	80	63	0	30
N.2	O11	799	547	685	336	85	198	220	14	75
N.10	O12	809	694	743	189	74	141	54	6	17
N.11 (trefoli)	O14	1200	751	1072	306	133	224	90	2	38
N.6	O17	1016	950	985	122	56	91	23	39	1

Da quanto si può notare da queste tabelle, lo sviluppo dei difetti riscontrati dalle video ispezioni non è di particolare aiuto. Non si notano infatti casi particolari dove i pochi difetti riscontrati sul cavo sono “controbilanciati” da presenza sostanziale di difetti sulla (e nella) guaina e sul copriferro, e viceversa.

Non si può dire la stessa cosa per lo studio più approfondito dei risultati ottenuti dalle prove con il Diffrattometro portatile. Se è vero che per tutti i casi con un valore medio superiore al 90% del valore di progetto la tensione stimata sembra riflettere una buona resistenza del materiale (con differenze tra i valori registrati non eccessive, eccezion fatta per il valore calcolato per l'unico caso con il trefolo, cioè il N.11), variazioni più significative si notano per i casi con il valore di tensione medio inferiore al 90% del valore di progetto, con il minimo toccato dai cavi appartenenti alla tipologia N.2 (già nel cap. 3.4.2.1 era stato notato che l'opera ispezionata con la tipologia di cavi N.2 risultava con la tensione media stimata più bassa). Tali variazioni sostanziali, così come per il valore medio stimato molto più basso rispetto alla media di tensioni considerate, possono essere riferite ad un acciaio meno resistente, o per aver adoperato cavi con sezioni meno ingombranti (i cavi adoperati per la tipologia N.2 sono tendenzialmente i più piccoli in diametro). Potrebbe influire anche la sezione della trave: infatti è l'unica che presenta una sezione a T, rispetto alle altre travi che sono tutte a sezione ad I.

Si può quindi dire che l'anomalia può essere data dalle caratteristiche meccaniche intrinseche dell'acciaio adoperato e/o dalla geometria della trave stessa, e non da una riduzione data da eccessivi danni rilevati. Si può notare inoltre che, nonostante dalle Video Ispezioni ci siano stati dei danni segnalati sul cavo (dove per alcune travi sono stati individuati un gran numero di difetti riscontrati, anche se la massima gravità segnalata è per pochi casi di corrosione superficiale sul cavo), il materiale mantiene buone caratteristiche meccaniche, avendo almeno tre travi con buoni valori di tensione a tempo infinito. Inoltre, sembra confermare come i trefoli portano ad avere una maggiore resistenza meccanica, sia ad esercizio che in condizioni ultime di rottura (vedi risultati cap.3.4.2.1 e 3.5.1).

Un dettaglio importante da sottolineare riguarda alla distribuzione dei valori tra le varie tipologie di cavi, già notato nelle precedenti analisi sviluppate anch'esse per tipologia di cavo identificato. Se è vero che sono stati identificati 11 tipologie diverse tra i diversi casi ispezionati, sia per i dati raccolti nella Fase 1 che per la Fase 2 almeno la metà appartiene alla tipologia N.4, risultando quindi altamente numerosa rispetto ad altre con meno dati (per esempio la N.1). Questo fattore è da tenere conto nella valutazione della distribuzione in percentuale dei valori studiati.

3.5. Valutazione accurata

La Valutazione Accurata, come spiegato nel capitolo 2.6, si sviluppa come conseguenza delle Fasi componenti il processo investigativo. Nel nostro caso, la caratteristica valutata principalmente durante questo step è la resistenza a snervamento dei cavi tramite la Quantificazione delle caratteristiche meccaniche delle armature da precompressione tramite l'uso del durometro portatile (dette anche prove Durometriche o Durometria).

Tabella 3.15: riassunto famiglia di dati, raccolti dalle prove della Valutazione Accurata, investigata

Tot Opere Indagate		18
% Rispetto tot opere indagate nella Fase 1		60%
Durometria	Numero di Prove effettuate	129

Come per i dati analizzati per le prove appartenenti alle Fasi 1 e 2, tutti i valori acquisiti sono stati sottoposti ad analisi. Anche in questo caso, la suddivisione per tipologia di cavi, qualora risultasse necessario, è la stessa impiegata nelle analisi precedenti (vedi cap.3.3.2.2 per maggiori dettagli). Simile a quanto considerato per le prove Diffrattometriche (vedi cap.3.4 nella parte introduttiva), i valori di tensione considerati dai risultati delle prove effettuate sono le medie dei valori raccolti per filo (anche in questo caso dato dai valori di discostamento riscontrati). A differenza però dalle analisi svolte per le prove con il Diffrattometro portatile, e per via della natura della tipologia dei dati raccolti, non si svolgeranno confronti con altre prove.

3.5.1. Prove Durometriche

Tabella 3.16: valore medio delle tensioni misurate dal Durometro portatile, in HV e in MPa, con la corrispettiva deviazione standard media e CV medi (solo per i valori di tensione in MPa)

Media valori di tensione medi [HV]	428
Media valori di tensione medi [MPa]	1378
Media deviazione standard [MPa]	25
Media CV [%]	5.84

Le prove di valutazione della resistenza meccanica attraverso l'uso del Durometro portatile sono mirate alla valutazione delle tensioni ultime dell'acciaio. Vengono considerate le medie, per filo, delle singole tensioni rilevate dal Durometro. Per poter confermare l'efficacia ed affidabilità della prova sono state affrontate due analisi in maniera simile a quanto svolto per le analisi dei dati raccolti dalla prova Diffrattometrica (vedi cap.3.4.2): la prima, attraverso l'uso di Istogrammi, analizza la distribuzione dei valori di tensioni misurati dal Durometro portatile; la seconda, invece, valuta l'andamento nel tempo degli scarti, sia massimi che la deviazione standard. Come per la prova Diffrattometrica, gli scarti considerati sono la differenza tra il valore medio di tensione considerato per filo indagato con i valori di tensione ottenuti da ciascuna prova eseguita per filo.

Un'importante nota è necessaria riguardo all'unità di misura utilizzata. In entrambe le analisi, i valori sono stati considerati con l'unità di misura HV, in quanto le tensioni sono ottenute tramite prove di microdurezza Vickers (vedi cap.2.6.2 per maggiori dettagli). Nella prima analisi, nel confronto tra i valori medi di tensione ottenuti

dalla prova con i valori di tensione da progetto (nel nostro caso come tensione ultima), è stato necessario convertire i valori in nostro possesso da HV a MPa (in quanto unità di misura utilizzata per i valori da progetto). Tale conversione, fatta tramite apposite tabelle di conversione fornite da Normativa, andrà sicuramente ad impattare il confronto.

Partendo dalla prima analisi, la distribuzione dei valori di tensione medi ottenuti dalla prova Durometrica sono stati rappresentati in due Istogrammi, dove il primo considera i valori in HV, mentre il secondo considera i valori in MPa.

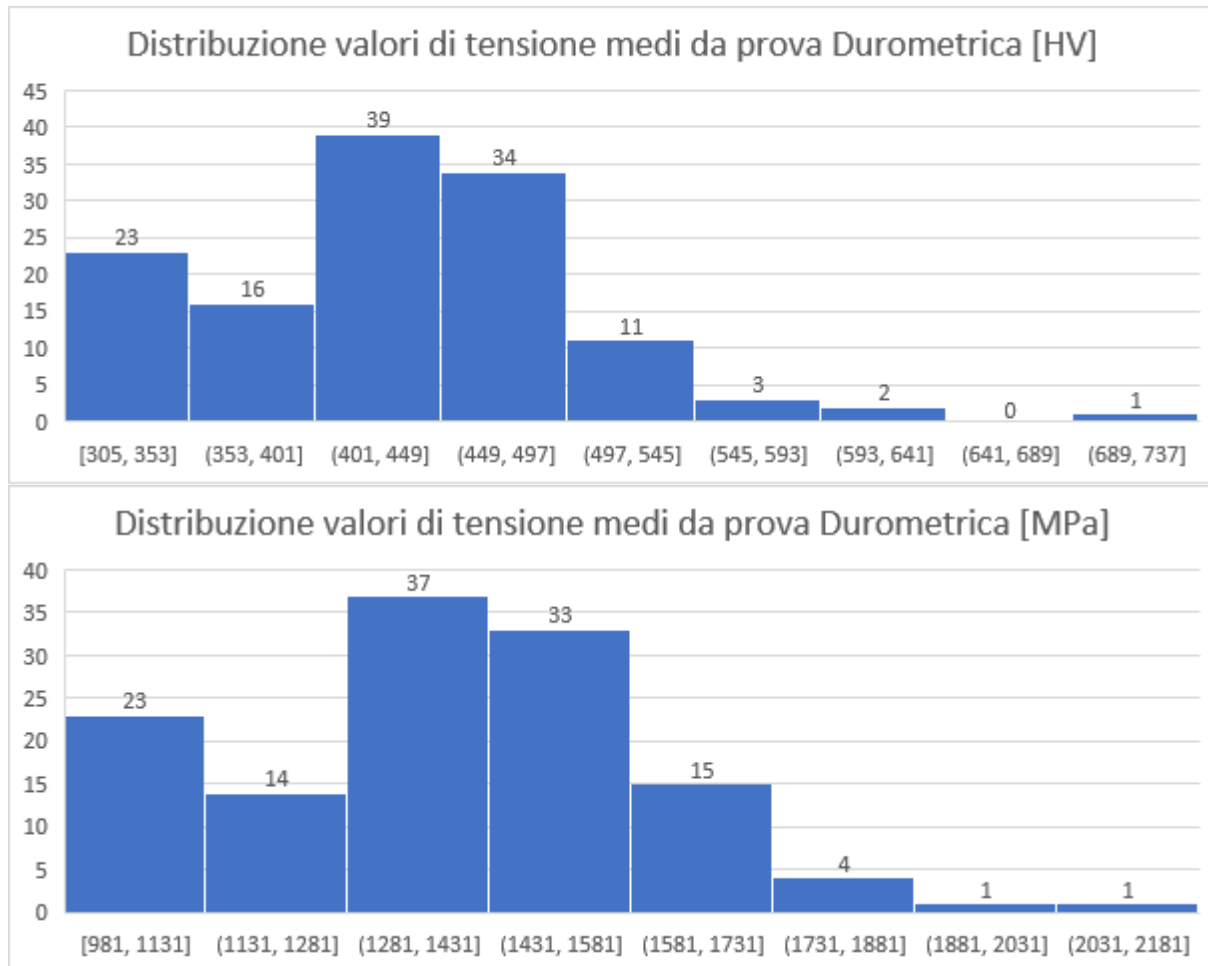


Figure 3.26 e 3.27: istogrammi rappresentanti la distribuzione dei valori medi delle tensioni misurate con il Durometro portatile in HV (fig.3.26) e i corrispettivi valori convertiti in MPa (fig.3.27).

La prima cosa che si può notare dai due istogrammi sopra mostrati è che la conversione sembra mantenere la stessa distribuzione dei valori di tensione medi. È da sottolineare come gli intervalli scelti sono stati per il primo di 50 HV mentre per il secondo di 150 MPa. Il cambio dell'ampiezza dell'intervallo minimo potrebbe mostrare una distribuzione diversa. La seconda cosa che si può notare dagli Istogrammi sopra mostrati riguarda come sono effettivamente distribuiti i valori di tensione medi valutati dalla prova Durometrica: nel primo, quasi tutti i valori considerati (116 valori) risultano inferiori a 505 HV; discorso simile per il secondo, con 107 valori inferiori a 1581 MPa. Gli intervalli con il maggior numero di valori racchiuso risultano tra 405 e 455 HV per il primo caso (41 valori), mentre per il secondo risulta tra 1281 e 1431 MPa (37 valori). Entrambi i "picchi" sono verificati se si considera la media complessiva dei valori misurati, la quale è 428 HV nel primo caso e 1378 MPa nel secondo.

Da tali risultati si può notare come, considerando i valori convertiti, essi risultano spesso inferiori ai valori di progetto di tensione ultima, i quali normalmente risultano sui 1600 MPa (nel nostro caso sono stati verificati due valori, uno di 1569 MPa e uno di 1618 MPa). Per verifica si può utilizzare il terzo istogramma rappresentante la distribuzione dei rapporti tra i valori di tensione medi misurati e i valori di tensione ultima da progetto. Tale rapporto, come già accennato ad inizio capitolo, è effettuato usando esclusivamente i valori di tensione medi convertiti in MPa (in quanto l'unità di misura utilizzata per i valori da progetto è in MPa).

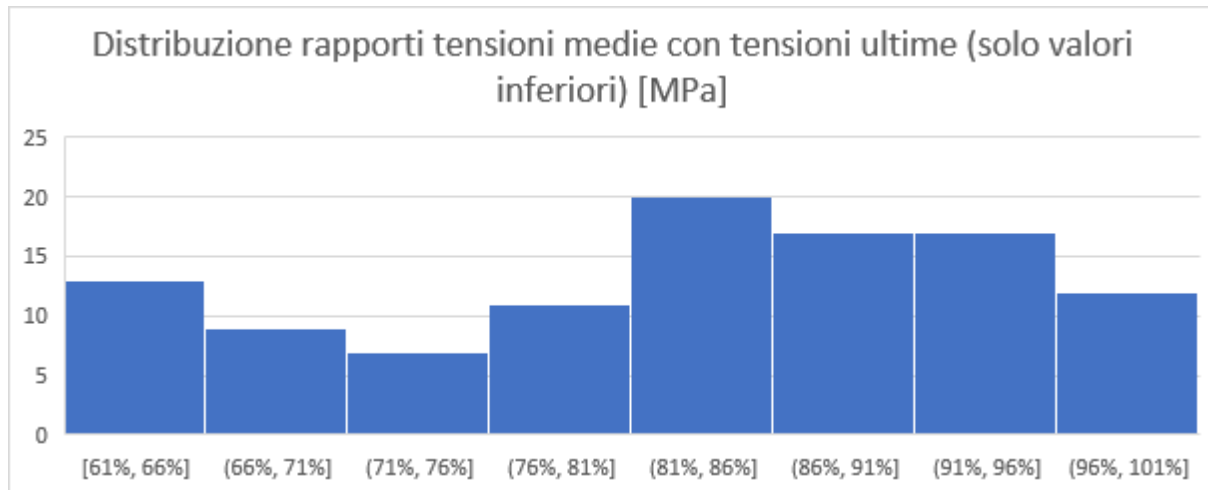


Figura 3.28: istogramma rappresentante la distribuzione dei rapporti tra i valori medi misurati e convertiti in MPa e i corrispondenti valori da progetto nelle tensioni ultime a rottura

Si nota dall'istogramma appena mostrato che è stata verificata la condizione sorta dalle distribuzioni precedentemente mostrate, ovvero che la maggior parte dei valori di tensione medi misurati e convertiti risultano sottostimati rispetto al valore da progetto. Infatti, risulta che 108 valori risultano inferiori ai corrispondenti valori di progetto.

Tale risultato non è un buon risultato, in quanto non è buono che il valore di tensione a snervamento risulti di media inferiore di circa 200 Mpa (se non di più) dal corrispondente valore da progetto, visto che di solito è atteso un valore di tensione medio misurato ben superiore al valore di tensione ultima. Tale sottostima può essere data dalla stessa conversione: infatti, le tabelle utilizzate sono generalmente applicate e calibrate per acciai da carpenteria e non per acciai armonici ad alta resistenza; inoltre, le prove di microdurezza sono molto influenzate dalla modalità di prova e qualità della superficie indagata, influenzabile da probabile ossidazione anche lieve, situazione facilmente riscontrabile nei cavi indagati; infine, le prove durometriche sono eseguite superficialmente per la determinazione della tensione a snervamento, la quale viene impiegata per valutare la resistenza meccanica a trazione, dove però questa è riferita non alla sola superficie ma all'intera sezione.

Riguardo invece alla seconda analisi svolta, l'obiettivo, come visto per le prove Diffrattonometriche (vedi cap.3.4.2.1), riguarda la verifica dell'affidabilità della prova tramite l'investigazione dell'andamento degli scarti nel tempo. L'analisi è stata svolta attraverso l'impiego di un grafico a dispersione con una linea interpolatrice sia per gli scarti massimi che per la deviazione standard. Entrambi gli scarti, come già accennato ad inizio di questo capitolo, sono equivalenti alla differenza tra il valore medio di tensione considerato per filo e i valori di tensione misurati per ciascuna prova eseguita su quel filo. Insieme al grafico è stata fatta una tabella riassuntiva, compresa anche dei valori di CV (coefficiente di variazione) sia relativo allo scarto massimo (chiamato CV Max) che per la deviazione standard (chiamato CV Ds).

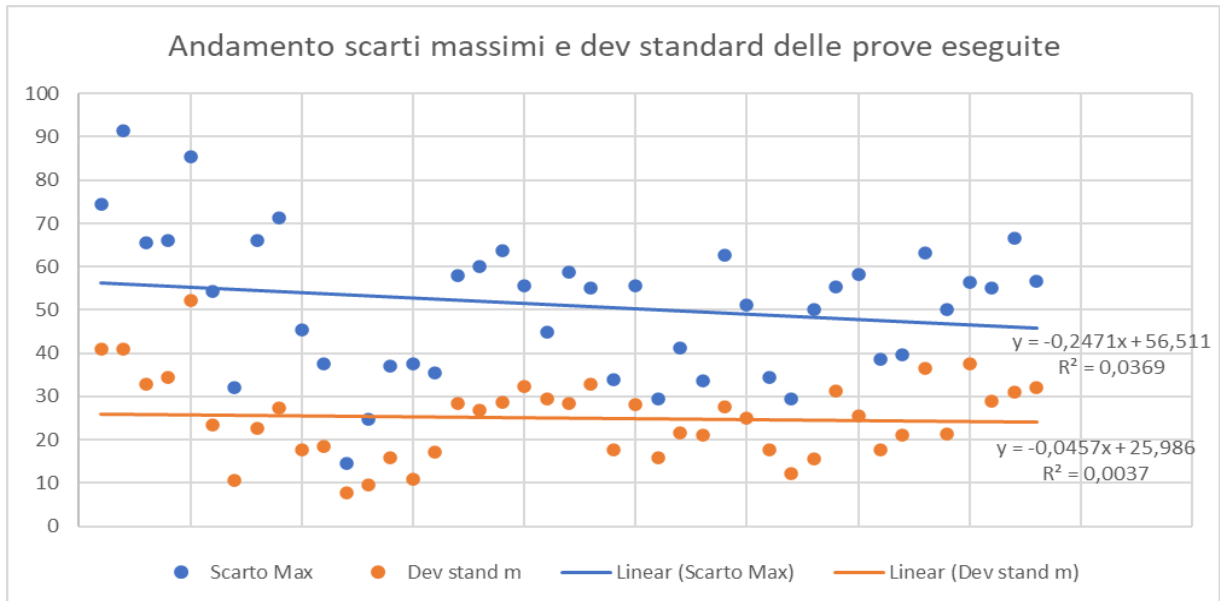


Figura 3.29: grafico di dispersione rappresentante l'andamento nel tempo degli scarti massimi e delle deviazioni standard misurate tra i valori medi considerati e i singoli valori di tensione misurati per ciascuna prova (scarti e deviazioni standard misurate per filo indagato e mediate per cavo indagato)

Tabella 3.17: Rappresentazione andamento medio degli scarti (massimi e deviazioni standard) e dei corrispettivi CV in dettaglio

Tabella andamento scarti Prove con Durometro portatile									
Opera-Trave-Cavo	Scarti e dev standard per cavo*				Opera-Trave-Cavo	Scarti e dev standard per cavo*			
	Max	Dev standard	CV max	CV Ds		Max	Dev standard	CV max	CV Ds
	HV	HV	%	%		HV	HV	%	%
O1T1c1	75	41	14%	8%	O8T1c2	55	33	14%	9%
O1T1c2	91	41	20%	9%	O9T1c1	34	18	9%	5%
O1T2c1	66	33	14%	7%	O9T1c2	56	28	15%	8%
O1T2c2	66	34	16%	8%	O10T1c1	30	16	7%	4%
O1T2c3	85	52	16%	10%	O10T1c2	41	22	9%	5%
O2T1c1	54	23	11%	5%	O11T1c1	34	21	7%	5%
O2T1c2	32	11	10%	3%	O11T1c2	63	28	15%	6%
O2T2c1	66	23	17%	6%	O12T1c1	51	25	12%	6%
O2T2c2	71	27	18%	6%	O12T1c2	34	18	10%	5%
O2T2c3	45	18	11%	4%	O13T1c1	30	12	7%	3%
O3T1c1	38	18	8%	4%	O13T1c2	50	16	12%	4%
O3T1c2	15	8	3%	2%	O14T1c1	55	31	13%	8%
O3T1c3	25	10	5%	2%	O14T1c2	58	26	14%	6%
O4T1c1	37	16	8%	3%	O15T1c1	39	18	12%	5%
O4T1c2	38	11	8%	2%	O15T1c2	40	21	13%	7%
O5T1c1	36	17	8%	4%	O16T1c1	63	37	13%	8%
O5T1c2	58	28	12%	6%	O16T1c2	50	21	10%	4%
O6T1c1	60	27	15%	7%	O17T1c1	57	37	12%	8%
O6T1c2	64	29	16%	7%	O17T1c2	55	29	12%	6%
O7T1c1	56	32	15%	8%	O18T1c1	67	31	16%	8%
O7T1c2	45	29	11%	7%	O18T1c2	57	32	14%	8%
O8T1c1	59	28	13%	6%					

Da quanto si può notare dal grafico (fig.3.29), si nota una parvenza di andamento decrescente da parte sia degli scarti massimi che per la deviazione standard, con un andamento un poco più accentuato per il primo. Nonostante ciò, gli indici di variazione R^2 sono molto bassi (circa 0.3 per gli scarti massimi, circa 0.03 per le deviazioni standard). A dare parzialmente conferma, però, dell'andamento leggermente decrescente notato graficamente tramite la linea d'interpolazione per gli scarti massimi, dalla tabella (Tabella 3.17) si può notare come i corrispettivi CV più alti risultano tra le prime misurazioni fatte. Stessa cosa la si nota pure per i CV relativi alla deviazione standard, anche se in entità minore rispetto ai CV relativi agli scarti massimi. Comunque, i CV calcolati non superano il 20% e rimangono in media sul 12% per gli scarti massimi e sul 6% per le deviazioni standard. Questo dato è particolarmente incoraggiante, andando a confermare una buona affidabilità della prova.

4. Commenti finali e Conclusioni

4.1. Commenti finali

I risultati delle analisi svolte nel capitolo precedente rappresentano un quadro tendenzialmente positivo, sia riguardo all'applicazione dell'ispezione speciale (procedimento generale e per ciascuna prova) sia nelle condizioni in cui si trovano le travi indagate.

Inoltre, una revisione dei risultati ottenuti dalle analisi compiute nel capitolo precedente mostra come ci sia, considerando l'ispezione sia nella sua interezza sia per ciascuna prova applicata, buon auspicio per garantire un monitoraggio all'altezza per garantire la stabilità strutturale dei vari viadotti appartenenti all'infrastruttura autostradale italiana (e non solo). Nonostante ciò, da tali risultati si notano alcuni particolari da dover evidenziare.

Partendo dalla Fase 0, le prove considerate risultano molto efficienti nel loro scopo. In particolar modo, il Geo-Radar dimostra di essere un ottimo strumento per l'individuazione del tracciato dei cavi, sia per identificare nel caso di mancata documentazione che per verificare quello dato da progetto. Infatti, i risultati ottenuti da tale strumento differiscono occasionalmente di così poco dal tracciato da progetto (se reperibile) che risulta trascurabile. Riguardo invece alla reperibilità delle documentazioni originali, è capitato in più di una occasione dove documenti utili (se non necessari) per poter comprendere meglio le condizioni delle travi investigate, così come poter approfondire nel dettaglio i materiali impiegati, non erano reperibili. Tale problema ha influenzato alcune prove nelle successive fasi, soprattutto nel momento in cui si necessitava conoscere le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo impiegato: per esempio ricavare i valori di resistenza meccanica per ottenere il modulo elastico del calcestruzzo per la valutazione delle tensioni di compressione dalle prove di Rilascio Tensionale.

La Fase 1 ha mostrato, tramite le prove utilizzate, come le travi indagate risultano in condizioni considerabili come buone. Questo è stato determinato principalmente tramite le prove video-endoscopiche, le quali sono risultate le più adatte per verificare le condizioni strutturali del sistema di precompressione. Unico dettaglio "negativo" relativo alle prove video-endoscopiche risultano nella distribuzione dei punti investigati, dove una maggiore attenzione potrebbe essere posta in prossimità delle testate, così come in mezzeria. È però necessario ricordare in questo caso che le posizioni considerate per le analisi sono state standardizzate in un'unica trave adimensionale. Tale processo potrebbe aver portato a delle piccole differenze tra la posizione reale e la corrispettiva standardizzata. Inoltre, un'indagine più dettagliata in testata e in mezzeria può risultare difficile per via della locazione, rendendo ostico l'accesso a tali aree. Riguardo invece alla prova Tomografica, i dati ottenuti mostrano come ci siano buone aspettative nella rilevazione dei vuoti all'interno delle travi, andando quindi a migliorare, sia nei tempi e costi così come nell'invasività dell'indagine, il processo di ispezione per la rilevazione preliminare dei difetti più ostici da rilevare, ovvero le condizioni interne alla guaina. Infatti, per il 38% dei casi considerati il tomografo ha evidenziato dei vuoti poi confermati dalle prove video endoscopiche. Riguardo invece alle rivelazioni di condizioni di iniezione completa, per più della metà dei casi tali rivelazioni sono state confermate dalle Video Ispezioni. Nonostante ciò, non è ancora possibile definire la prova come affidabile, richiedendo quindi maggiore sperimentazione, quindi un maggior numero di dati da analizzare.

La Fase 2 è risultata più complicata da analizzare. Come già accennato nel capitolo precedente, per le prove appartenenti a questa fase ed analizzabili (i saggi diretti non sono stati analizzati per la natura della prova stessa) la famiglia di dati disponibile è molto inferiore rispetto a quella disponibile per le prove della Fase 1. Nonostante ciò, è stato possibile determinare molti aspetti relativi a questa fase e alle prove presenti nella Fase 2.

Innanzitutto, le prove Diffrattometriche, utili per la valutazione della tensione residua dell'acciaio, sono risultate affidabili ed efficaci. Infatti, considerando la deviazione standard media relativa ai dati misurati dal Diffrattometro, essa si aggira intorno ai 41 MPa, portando quindi ad avere un CV medio molto basso (5,2%). L'unica nota negativa si è potuta notare nell'andamento degli scarti tra i valori medi considerati e i valori di ciascuna prova effettuata, dove si nota una leggerissima tendenza crescente degli scarti massimi accettati. Tale tendenza, però, è così bassa che può anche non essere considerata. Tale parvenza di andamento ha portato però a notare come in alcuni casi la scelta del numero delle prove non sia stata ideale, portando ad avere un eccesso di valori o una carenza in base alla situazione, portando quindi a scarti relativamente alti considerati come accettabili. Tali scarti, però, risultano molto inferiori ai valori medi di tensione misurati, a conferma, appunto, del loro impatto piccolo se non nullo nell'andamento degli scarti nel tempo.

Riguardo invece alla prova di rilascio tensionale, tale prova è caratterizzata da due problemi principali: scarsità di dati da confrontare ed analizzare, presenza tra i valori ottenuti di valori "anomali" (tali valori sono valori negativi). Il primo aspetto problematico ha limitato le tipologie di analisi da poter applicare su tale prova (infatti non ci sono né deviazioni standard né CV calcolati) ed è stato influenzato molto anche dalla scarsità dei valori da progetto relativo al calcestruzzo (già accennato nelle problematiche sorte nella Fase 0), risultando quindi in stime dei valori di deformazione ottenuti dalle prove in tensioni approssimative. La seconda problematica, invece, è legata alla carenza di un confronto teorico relativo alla prova stessa. Infatti, si suppone che i valori ottenuti dall'estensimetro devono essere positivi, in quanto rappresentano un'estensione del cls subito dopo aver subito il taglio, quindi rilasciando delle tensioni originariamente di compressione (che è il dato da verificare, vedi cap.2 e 3), ma la possibilità di ottenere valori negativi in realtà è ben superiore allo 0 (per via del fatto che le tensioni di precompressione possono essere state compensate dalle varie tensioni di trazione scaturite dalle azioni subite dall'oggetto nella sua vita, vedi cap.2.4.3.1 e cap.3.4.1). Detto ciò, dalle poche analisi svolte non si è riuscito ad ottenere molto. Solamente dal grafico di dispersione (dove in y abbiamo messo le posizioni di esecuzione delle prove e in x le corrispettive deformazioni misurate) si è potuto notare un leggero andamento decrescente, andando quindi ad avvalorare la teoria di un massimo di resistenza a compressione nel bulbo inferiore, poiché è dove sono allocati i cavi da precompressione (in quanto la sezione analizzata si trova in mezzzeria).

Infine, per l'unica prova svolta appartenente alla Valutazione Accurata, il Durometro portatile si è dimostrato affidabile e preciso. I valori raccolti hanno una deviazione standard media sui 25 MPa e con un coefficiente di variazione molto basso (5,8%). È sorto invece un problema relativo alla conversione dei valori di tensione misurati (in HV) in MPa, per poter confrontarli con i valori di progetto: tale conversione porta a generalmente a sottostimare i valori di tensione ottenuti rispetto alle tensioni ultime. Questo è unito anche alla sensibilità della prova (vedi cap.2.6.2 e cap.3.5.1).

4.2. Conclusioni

Dati i risultati, sopra commentati, ottenuti dalle analisi eseguite sull'Ispezione speciale per travi di ponti in c.a.p. a cavi post tesi (sia per l'intero procedimento che per ciascuna prova) è possibile trarre come conclusione che tale ispezione non presenta al giorno d'oggi (con i dati forniti) grosse problematiche tali da dover subire una completa modifica. È comunque importante considerare due aspetti a riguardo: tale ispezione è ancora in una fase "embrionale" o "sperimentale", in quanto da poco formulata e quindi da poco applicata nell'investigare travi in c.a.p. esistenti. Perciò, è scontato che ci si aspettano ulteriori cambiamenti, dato anche da un maggior numero di dati raccolti, che potranno andare ad illustrare problematiche non trovate nelle analisi che sono state svolte nel capitolo precedente di questo elaborato. Risulta, quindi, imperativo evidenziare le problematiche che sono state evidenziate (e commentate nel cap.4.1) e trovare delle soluzioni che permettano di rendere questa ispezione più agevole e più efficace.

Per prima cosa, la difficoltà per più di qualche opera nel recuperare le documentazioni originali durante la fase di analisi storico-critica della Fase 0, soprattutto le informazioni relative ai materiali impiegati (per la maggior parte relative al calcestruzzo, come notato durante le analisi delle prove di Rilascio Tensionale). Tale problematica necessiterebbe di prove investigative da applicare in alternativa alla mancanza della documentazione. Ma, considerando come analogia il rilevamento del tracciato dei cavi tramite GeoRadar, ora come ora non esistono prove con un ottimale metodo d'indagine non particolarmente invasivo da poter applicare. Una soluzione che si potrebbe intraprendere è quella di una prova di resistenza meccanica tramite carotaggio, ma risulta una prova molto costosa e molto invasiva, quindi non considerabile come soluzione effettiva.

Riguardo all'impiego del Tomografo portatile, è da tenere conto l'attuale poca affidabilità, nonostante le buone prospettive mostrate dai dati raccolti. Garantire l'efficienza ed affidabilità dello strumento sarebbe un passo positivo nell'impiego di metodi d'indagine meno invasive, ma con lo stesso effetto delle corrispettive indagini invasive. Esistono diversi esempi portati avanti dal governo americano (in riferimento alla rivista "Public Roads, Spring 2021, FHWA" riguardo all'articolo "Magnetic Flux Methods" di Hoda A. e Seung-Kyoung L.) che sfruttano il flusso magnetico per l'identificazione dei difetti interni alla trave e legati al sistema di precompressione, come appunto i vuoti all'interno della guaina. Tali esempi potrebbero diventare il futuro delle indagini degli elementi in c.a.p. a cavi post tesi. Quindi, risulta importante per tale scopo avere una prova come la prova Tomografica a sostegno nell'impiego di tali indagini per il monitoraggio delle strutture con elementi in c.a.p., promuovendo perciò qualsiasi soluzione nel rendere l'impiego del Tomografo più efficace ed affidabile possibile.

Per la prova di Rilascio Tensionale, dati i problemi legati all'ambiguità dei valori di deformazione (e quindi di tensione) negativi, sarebbe necessario dover investigare più a fondo quali valori ci si dovrebbe aspettare da una struttura esistente, soprattutto nelle condizioni nella quale si procede con la prova (e quindi non scarica completamente).

Per le ultime due prove rimaste che sono state affrontate ed analizzate in questa tesi, piccoli accorgimenti porterebbero a migliorare l'affidabilità e la precisione dei dati raccolti, già comunque ad un buon livello attualmente. Per esempio, l'introduzione di una tabella di conversione dei valori ricavati dal Durometro portatile porterebbe a poter verificare più facilmente i valori di tensione a snervamento misurati, potendoli effettivamente confrontarli con i valori da progetto. Questo sta già succedendo al giorno d'oggi, con una collaborazione tra Università italiane posta per la calibrazione delle procedure e della tabella di conversione.

Considerando invece la prova Difrattometrica, una soluzione per evitare di andare ad aumentare gli scarti massimi accettabili sarebbe quello di considerare un intervallo più stretto tra i due valori misurati nelle due prove eseguite per cavo, e di mantenere tale intervallo come accettabile. In questo modo si porterebbe anche a migliorare sotto il punto di vista di efficienza, andando a limitare le prove, e quindi i costi e le tempistiche della prova.

Infine, considerando l'intero processo, determinare con certezza se il percorso preso è quello corretto è ancora troppo presto, in quanto, come evidenziato sopra, ci sono ancora elementi e dettagli da ritoccare. Nonostante ciò, dai dati raccolti e dai risultati delle analisi, si può notare come ci siano i buoni propositi per percorrere la strada giusta per garantire un processo, che può essere di semplice ispezione come di un continuo monitoraggio, tale da poter investigare facilmente gli elementi in c.a.p. a cavi post-tesi. Perciò la continua applicazione, e sperimentazione, è consigliata per apportare sostanziali miglioramenti al processo ispettivo impiegato, che sia esattamente da manuale come, per esempio, la soluzione optata da parte di SINA.

5. Bibliografia

- [1] Leonhardt F., *Il precompresso : calcolo, verifiche, tecnologie*. Milano: Edizioni Tecniche, 1980.
- [2] Cestelli Guidi C., *Cemento armato precompresso : teoria, esperienze, applicazioni*. 4. ed. Milano: Hoepli, 1960.
- [3] Sigmund C., *Calcolo di elementi prefabbricati in cemento armato precompresso : secondo norme tecniche e eurocodici*. Palermo: Grafill, 2012.
- [4] Consorzio Fabre (2022), *Ispezioni speciali su ponti esistenti in c.a.p. a cavi scorrevoli ai sensi delle Linee Guida: la classificazione e la valutazione accurate: Definizione di un approccio per gradi successivi di approfondimento mirato alla classificazione, e/o al monitoraggio, e/o alla valutazione dei ponti esistenti*. Versione del 07/03/2022.
- [5] Sina S.p.A., *Capitolato Ispezioni Speciali su opere stradali con impalcato in c.a.p. a cavi post-tesi. – Ver.1 – Rev.2*