



Università degli Studi di Cagliari

DOTTORATO DI RICERCA

INGEGNERIA STRUTTURALE

Ciclo XXVIII

TITOLO TESI

***Giudizio immediato sullo stato di degrado dei
ponti in c.a. basato su indagini low-cost***

Settore scientifico disciplinare di afferenza

ICAR/09

Presentata da: MARIA LUISA FADDA

Coordinatore Dottorato FRANCESCO RAGNEDDA

Tutor FAUSTO MISTRETTA

Esame finale anno accademico 2014 – 2015

INDICE DELLA TESI

Introduzione.....	I
Sommario ed organizzazione della tesi.....	III
Capitolo I-Processo di ispezione e manutenzione.....	1
1.1. Attività di ispezione e manutenzione di un bene.....	2
1.2. Attività di ispezione e manutenzione delle opere d'arte stradali.....	3
1.3. Bridge Management System.....	5
1.4. Quadro normativo italiano.....	8
Capitolo II-Indagine visiva.....	13
2.1. Indagine visiva.....	14
2.2. Cause e tipologie di dissesti.....	18
2.3. Forme di degrado.....	32
2.4. Strumenti moderni come supporto alle operazioni di ispezione. I droni.....	34
2.5. Metodologie esistenti di valutazione delle condizioni.....	37
2.6. Confronto tra le metodologie di valutazione esistenti.....	48
Capitolo III-Indagine strumentale.....	53
3.1. Tecniche di indagine strumentale basso invasive.....	54
3.1.1. Velocità ultrasonica.....	56
3.1.2. Indice di rimbalzo.....	60
3.1.3. Indice sclerometrico e Velocità ultrasonica combinate.....	61
3.1.4. Prova di carbonatazione.....	62
3.1.5. Pull-out.....	62
3.2. Campagna sperimentale in laboratorio.....	65
3.2.1. Caratteristiche delle strumentazioni.....	67
3.2.2. Risultati sperimentali.....	70
3.2.3. Elaborazione dei dati tramite curve di correlazione.....	76
3.2.3.1. Indagine ultrasonica- Valutazione delle curve di correlazione.....	76
3.2.3.2. Indagine sclerometrica- Valutazione delle curve di correlazione.....	77
3.2.3.3. Metodo combinato- Valutazione delle curve di correlazione.....	78
3.3. Introduzione alle Reti Neurali.....	79
3.3.1.Elaborazione dei dati tramite Reti neurali.....	87
3.3.1.1.Indagine sclerometrica-Reti neurali.....	90
3.3.1.2.Indagine ultrasonica-Reti neurali.....	94
3.3.1.3.Metodo combinato-Reti neurali.....	99
3.4. Confronto tra resistenze reali e quelle stimate.....	105
Capitolo IV-Metodologia di indagine proposta.....	109
4.1. Metodologie di indagine proposta.....	110

4.2. Metodo di calcolo.....	114
4.3. Esempi applicativi.....	127
4.4. Schede di valutazione.....	132
Capitolo V-Casi di studio.....	143
5.1. Esempi applicativi della metodologia proposta.....	144
5.2. Attraversamenti del Rio Palaceris in località Pixina Manna, Pula.....	144
5.2.1. Attraversamento 1 del Rio Palaceris in località Pixina Manna, Pula.....	145
5.2.2. Attraversamento 2 del Rio Palaceris in località Pixina Manna, Pula.....	161
5.3. Ponte sito sulla SS.195, Cagliari.....	175
5.4. Ponte sito sulla SS.195, Cagliari: Simulazione di ripristino.....	210
Conclusioni.....	218

Introduzione

L'ingegnere strutturale è sempre più spesso chiamato ad esprimere un giudizio relativo allo stato di efficienza delle strutture esistenti.

Ciò è in parte dovuto al fatto che, in Italia, una cospicua parte del patrimonio edilizio in esercizio è stata realizzata prima della metà del secolo scorso. Infatti, analizzando i dati diffusi dall'Istat, relativi agli Edifici e alle Abitazioni rilevati in occasione del 14° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni 2001, per mezzo del quale sono stati censiti 12.774.131 edifici e 38.397 complessi di edifici, per un totale di 12.812.528 unità, emerge che il 19,2% (2.150.259) è stato costruito prima del 1919, il 12,3% tra il 1919 e il 1945, il 50,0% tra il 1946 e il 1981; l'11,5% dal 1982 al 1991 e il 7,0% dopo il 1991.

Oltre all'edilizia anche il campo delle infrastrutture stradali richiede particolare attenzione. Infatti in anni recenti l'efficienza delle infrastrutture è stata messa in crisi da vari fenomeni come l'aumento dei carichi da traffico, l'aumento della velocità di percorrenza, le modifiche delle normative di riferimento relative agli standard di sicurezza.

La funzionalità delle opere d'arte stradali dipende strettamente da una buona attività di ispezione, infatti la mancanza di una corretta e tempestiva manutenzione, comporta un aggravio del deterioramento e quindi maggiori costi di riparazione.

L'accertamento periodico delle condizioni di stabilità di dette opere rientra nella attività di manutenzione della strada ed incombe, pertanto, alle Amministrazioni, alle Società ed agli Enti proprietari, gestori, o concessionari delle strade di provvedervi. Essi sono dunque direttamente responsabili dei danni eventualmente subiti dagli utenti della strada in dipendenza di dissesti o crollo delle opere d'arte.

Si ha quindi l'esigenza di valutare il livello di affidabilità delle infrastrutture, rivolgendo particolare attenzione a quelle che, nonostante abbiano di gran lunga superato la loro soglia di Vita Utile, sono ancora in esercizio.

Negli ultimi decenni molti studiosi e diverse società di gestione di reti stradali hanno rivolto il loro interesse alla definizione di Sistemi di Bridge Management System (BMS).

Per BMS si intende l'insieme delle attività di ispezione, indagine, manutenzione, riparazione di un gruppo di opere, organizzate secondo criteri di priorità, con il supporto di banche dati informatiche e di algoritmi ordinatori. Lo stato di conservazione dell'opera viene caratterizzata attribuendo dei giudizi qualitativi. Alcuni BMS prevedono l'individuazione dell'estensione e l'intensità dei difetti, altri invece associano a ciascun elemento un indice qualitativo relativo alla condizione in cui ogni elemento versa. Dallo studio bibliografico è emerso che nessun metodo esistente considera la localizzazione del danno all'interno dell'elemento in cui esso si manifesta, pur essendo esso un parametro fondamentale per una corretta diagnosi in quanto strettamente legato al cinematiso di collasso.

L'obiettivo del mio lavoro di ricerca è stato quello di fornire un utile strumento di supporto decisionale durante la fase di analisi dei dati di ispezione, individuando una modalità di indagine low-cost ed immediata per ponti in cemento armato, che consente di ottenere rapidamente un resoconto attendibile sulla condizione statica della struttura ispezionata.

Si è data particolare attenzione alle strutture in cemento armato, il materiale più diffuso nel campo delle costruzioni civili. Fino ed oltre quaranta anni fa, esso veniva presentato come materiale a bassa manutenzione con durata pressoché illimitata. Ben diversa è la situazione che si presenta oggi agli operatori del settore, infatti notevole è la presenza sul territorio nazionale di strutture in calcestruzzo armato soggette a situazioni di dissesto per i quali è necessario effettuare approfonditi controlli per valutarne la resistenza.

Il procedimento che propongo si basa sia sull'osservazione visiva dell'opera che sull'analisi dei dati ottenuti per mezzo di test strumentali effettuati sul materiale da ispezionare. Partendo dal presupposto che per svolgere una buona diagnosi strutturale, bisogna trovare il giusto compromesso tra

significatività e invasività delle indagini, è stato privilegiato come criterio principale di indagine, quello basato su prove di tipo non distruttivo, cioè quel complesso di esami e rilievi che non modificano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura. In particolare, tra le varie tecniche non distruttive, ho scelto di utilizzare l'indagine sclerometrica e la prova ultrasonica come tecniche di indagine in loco. Al fine di verificare l'affidabilità del controllo non distruttivo, è stata predisposta una campagna di indagine sperimentale su una serie di miscele, confezionate con classe di cemento diverse per poter valutare un intervallo ampio di resistenze. Sono stati realizzati un totale di 100 provini cubici di lato 15 cm. Essi sono stati poi sottoposti alle prove non distruttive per la misurazione della velocità ultrasonica e dell'indice sclerometrico, ed in fine sono stati sottoposti ad una prova a rottura per la determinazione della resistenza a compressione. È stata quindi studiata la correlazione tra le prove non distruttive e la prova di compressione. L'approccio classico per lo studio della correlazione consiste nel tarare curve di regressione tra le grandezze indirette e le caratteristiche materiche e costruttive di interesse. La metodologia proposta è basata invece sull'impiego delle reti neurali, quale semplice e rapido strumento di correlazione fra le grandezze misurate e le proprietà meccaniche del materiale. Da questa applicazione pratica è stato possibile individuare le Reti Neurali come modalità migliore per predire il valore di resistenza del calcestruzzo investigato, partendo dall'impiego dei risultati ottenuti tramite le indagini basso invasive.

Nello specifico, il metodo di giudizio proposto può essere schematizzato nelle due fasi:

- Ispezione visiva: intesa come identificazione e classificazione degli eventuali degradi e dissesti presenti sulla struttura, deve essere mirata all'individuazione dei punti che presentano criticità e guidare nelle successive fasi di diagnostica strumentale. Durante l'ispezione visiva deve essere valutata la condizione di ogni singolo elemento strutturale, individuando estensione, intensità e localizzazione di tutte le tipologie di difetto presenti;
- Analisi strumentale: caratterizzazione meccanica del materiale basata su indagini basso invasive (Controlli Non Distruttivi).

Ad ogni parametro significativo viene attribuito un valore numerico che costituirà la base per il calcolo della funzione di giudizio del singolo elemento (F_e). Sommando la valutazione effettuata per i tutti i singoli elementi che compongono l'opera e riportando questo valore alla somma dei difetti che potenzialmente possono verificarsi nella struttura osservata, si ottiene la Funzione di valutazione dell'intera struttura (F_s).

I fattori che entrano in gioco per la valutazione della condizione della struttura sono dunque:

- I dati rilevabili durante le ispezioni visive, ragionamenti tecnici effettuati da personale esperto in merito allo schema statico della struttura da cui scaturisce la rilevanza che può avere la localizzazione del difetto all'interno dell'elemento su cui compare;
- I risultati delle prove strumentali effettuate sul materiale costituente l'opera.

In dettaglio, l'aspetto innovativo della proposta presentata, rispetto alle metodologie esistenti, è rappresentato dall'introduzione di due fattori tramite i quali è possibile valutare la localizzazione del danno (L_i), e utilizzare la caratterizzazione meccanica del materiale come parametro di giudizio (T_i). A corredo del metodo di calcolo ho proposto delle Schede di Valutazione da compilare durante le ispezioni visive per annotare schematicamente le varie osservazioni eseguite. In questo modo si può rendere chiaro come, partendo da ciò che è stato rilevato durante l'ispezione, per ogni elemento strutturale, è stato possibile emettere il giudizio finale.

L'applicabilità del metodo è stata verificata mediante dei casi studio su tre distinte strutture reali. Le prime due sono situate in località Pixina Manna (Pula) e la terza struttura si trova invece in provincia di Cagliari, lungo la Strada Statale 195.

Gli esempi applicativi riportati mostrano che il metodo costituisce un importante ausilio alla valutazione della struttura, fornendo un percorso guidato per il tecnico che deve svolgere l'indagine ed indirizzando ad una omogeneità di giudizio.

Sommario ed organizzazione della tesi

Il lavoro di tesi si articola in cinque capitoli, esso è composto da una parte teorica iniziale ed una parte applicativa, come di seguito sintetizzato:

Capitolo 1- Processo di ispezione e manutenzione

Nel primo capitolo si introduce l'argomento relativo ai processi di gestione, ispezione e manutenzione delle strutture e si analizza il quadro normativo italiano che regola le operazioni di ispezioni delle infrastrutture.

Capitolo 2- Indagine visiva

Nel secondo capitolo viene affrontato l'argomento dell'ispezione visiva, analizzando le varie cause e tipologie di dissesti oltre che le forme di degrado riscontrabili visivamente nelle strutture. Vengono poi introdotte le metodologie esistenti di valutazione delle condizioni strutturali e tra esse si esegue un confronto.

Capitolo 3- Indagine strumentale

Il terzo capitolo è dedicato alle tecniche di indagine strumentale basso invasive. Esse vengono introdotte in maniera generale e poi si descrive la campagna sperimentale eseguita in laboratorio al fine di verificare l'affidabilità del controllo non distruttivo e se ne analizzano i risultati ottenuti.

Capitolo 4- Metodologia di indagine proposta

Nel quarto capitolo si presenta il metodo di valutazione proposto.

Capitolo 5- Applicazione della metodologia proposta a casi reali

Nell'ultimo capitolo si mostra l'applicazione del metodo proposto a tre strutture reali.

Capitolo I

Processo di ispezione e manutenzione

Contenuto del capitolo:

- Attività di ispezione e manutenzione di un bene
- Attività di ispezione e manutenzione delle opere d'arte stradali
 - Bridge Management System
 - Quadro normativo italiano

1.1. Attività di ispezione e manutenzione di un bene

L'impiego più o meno corretto e più o meno prolungato di un bene, causa l'usura dello stesso, con una conseguente diminuzione progressiva delle sue prestazioni fino a interromperle. L'azione del tempo e dell'uso provoca nei confronti dei materiali di cui il bene è costituito un processo di invecchiamento ed uno scadimento di efficienza tecnica o obsolescenza tecnologica.

Nell'ambito della gestione, ispezione e manutenzione di impianti e macchine, la possibilità di effettuare misure di grandezze chimico-fisiche ha un ruolo fondamentale nel controllo nella sorveglianza del loro funzionamento. La misura in continuo o a intervalli prestabiliti di tali grandezze in forma automatica o semiautomatica permette di conoscere lo stato del sistema sotto controllo e quindi può fornire da un punto di vista manutentivo informazioni essenziali per l'effettuazione di politiche "su condizione" (1) [Furlanetto Luciano, Garetti Marco, Macchi Marco (2007). *Ingegneria della manutenzione. Strategie e metodi*. Franco Angeli].

Lo stesso approccio andrebbe applicato alle opere d'arte stradali in calcestruzzo, infatti così come impianti e macchinari vanno monitorati in continuo, anche le infrastrutture necessitano di ispezioni rigorose a intervalli regolari su tutti gli elementi costituenti.

Effettuare ispezioni, e dunque fornire un giudizio relativo alla condizione statica della struttura con una adeguata cadenza temporale, permette di conoscere lo stato dell'opera al momento (T_i) nel quale viene effettuata la valutazione e di tenere sotto controllo l'evolversi delle sue condizioni grazie al confronto che può essere fatto in tempi successivi ($T_i, T_{i+1}, T_{i+2}...$) (Figura 1.1)

L'attività di ispezione è un'azione che si inquadra nel tempo e non può limitarsi a constatazioni occasionali. Ogni ispezione deve fornire le maggiori informazioni possibili sullo stato del ponte in quel determinato istante di vita. La serie storica di queste informazioni consente di seguire l'evoluzione dello stato dell'opera (perdita di prestazioni).

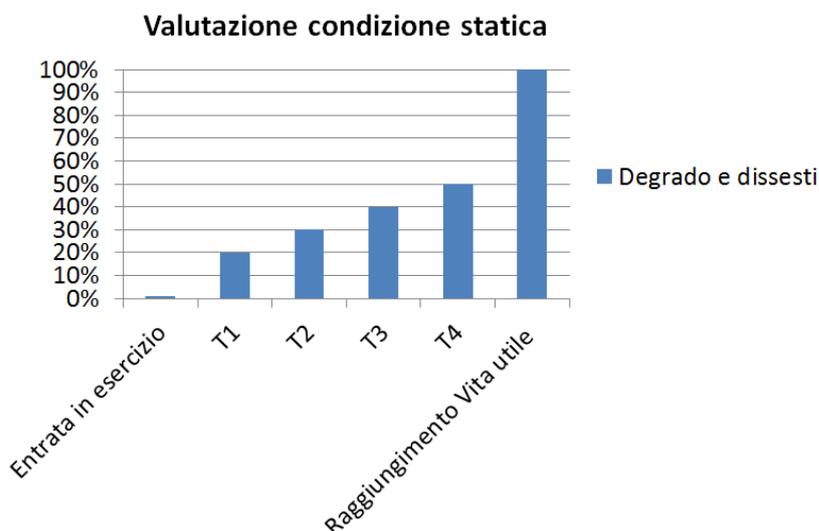


Figura 1.1 Valutazione condizione statica

L'obiettivo del mio lavoro di ricerca è stato quello di individuare una modalità di indagine low-cost ed immediata per ponti in cemento armato, che consenta di ottenere rapidamente un resoconto attendibile sulla condizione statica della struttura ispezionata.

Questo approccio può fornire quindi informazioni essenziali per ottimizzare le fasi di manutenzione della singola struttura ispezionata, i cui interventi possono essere commisurati alla condizione statica

ed all'eventuale evolversi del livello di degrado e, nell'ambito di un sistema a rete gestito da un BMS, stabilire le priorità di intervento tra le varie strutture ispezionate (Figura 1.2).

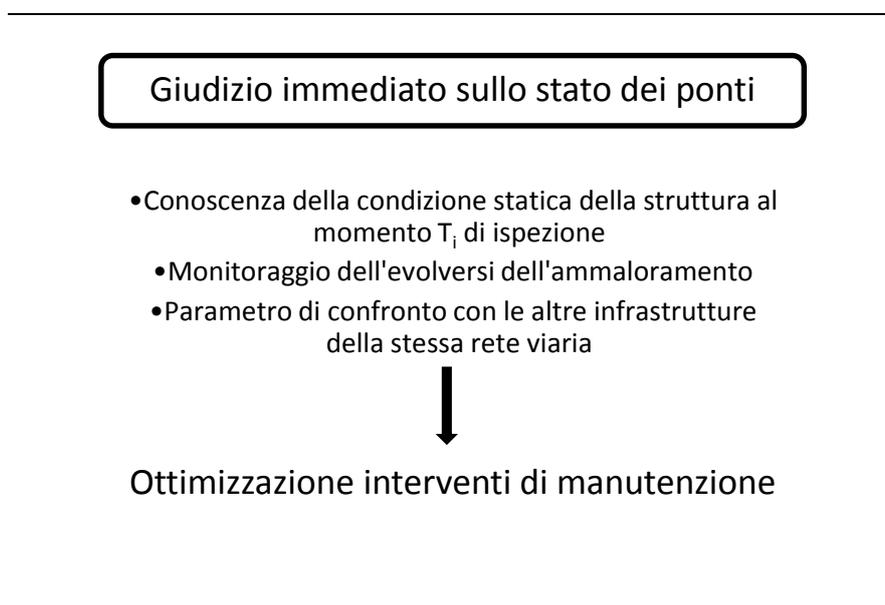


Figura 1.2 Giudizio immediato sullo stato dei ponti

La programmazione di una consono tempistica delle verifiche ispettive, assume particolare rilevanza in quanto il ritardo negli interventi comporta un peggioramento delle condizioni e dunque maggiori costi di riparazione, inoltre le conseguenze del degrado possono manifestarsi in maniera repentina portando, nei casi più gravi, anche al collasso definitivo.

1.2. Attività di ispezione e manutenzione delle opere d'arte stradali

I principali obiettivi delle attività di ispezione e di manutenzione effettuate sulle infrastrutture stradali, sono quelli di garantire, in termini probabilistici, la sicurezza nei confronti dell'incolumità dei singoli cittadini, la regolarità dei trasporti per un ordinato svolgimento delle attività produttive, commerciali e sociali (raggiungimento del posto di lavoro, di scuole, di ospedali, di attività ricreative e sportive) ed inoltre, in caso di calamità naturali (alluvioni, sisma, ecc.) o atti di terrorismo, una buona capacità della rete infrastrutturale a fornire alternative di transito (resilience), con primaria attenzione alle attività strategiche (protezione civile, ospedali, fornitura di energia, smaltimento rifiuti, etc.) (2) [Pier Giorgio Malerba (2015). *Ispezioni dei ponti: Contributo dei sistemi di rilievo a pilotaggio remoto*]. Un processo di valutazione può operare a due diversi livelli (Figura 1.3) (3) [C. Pellegrino, A. Pipinato, C. Modena. *A simplified management procedure for bridge network maintenance*. Vol.7, No.5, 341-351, May 2011]:

- **Project (Bridge) Level;**
- **Network Level.**

Nel primo livello si considera ogni singola struttura isolata dal contesto della rete di comunicazione stradale cui appartiene: l'obiettivo è quello di valutare la vita utile residua ed il grado di efficienza, dal punto di vista della funzionalità.

Il secondo livello è legato a questioni politiche, sociali ed economiche relative a ponti inseriti nella rete stradale globale; esso fornisce, come risultato di valutazione, un indice che permette il confronto

tra le varie strutture della rete. Lo scopo principale è quello di stabilire la priorità di intervento delle operazioni di manutenzione all'interno del patrimonio infrastrutturale, tenendo conto sia della condizione del singolo ponte, che della sua importanza rispetto alla rete stradale. Questo livello di valutazione è utile agli enti gestori delle infrastrutture che, a causa della limitatezza delle risorse, non hanno la possibilità di intervenire con rapidità sull'intero insieme di ponti e quindi hanno l'esigenza di stabilire una adeguata gerarchizzazione degli interventi.

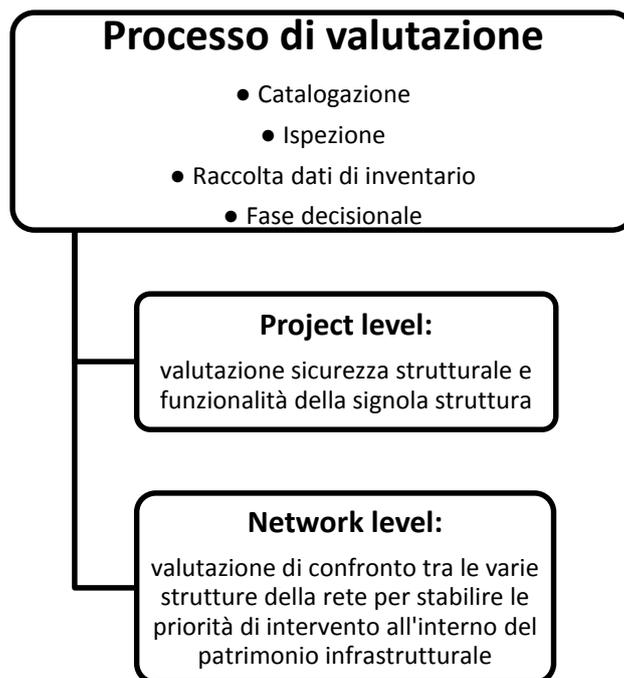


Figura 1.3 Processo di valutazione

La valutazione delle strutture esistenti viene definita come quell'insieme di attività svolte al fine di stabilire la reale condizione di una struttura esistente e verificare l'affidabilità per il suo uso futuro (4) [ISO 13822 (2010). *Basis for design of structures. Assessment of existing structures*].

Le attività di un processo di valutazione di una struttura in calcestruzzo (Figura 1.4), all'interno di un sistema di gestione e manutenzione, sono:

- Il monitoraggio di ogni opera, supportata da adeguata strumentazione;
- Ispezioni ordinarie a seguito delle quali si emette un giudizio sulla condizione statica (Condition rating).

Da ciò si otterrà un quadro rappresentativo di ogni struttura che permetterà di effettuare adeguati interventi manutentivi oppure farà emergere la necessità di effettuare ulteriori indagini di approfondimento (5) [C. Andrade & Co. *Management, maintenance and strengthening of concrete structures*. Fib (CEB-FIP) Bulletin 17, 2002].

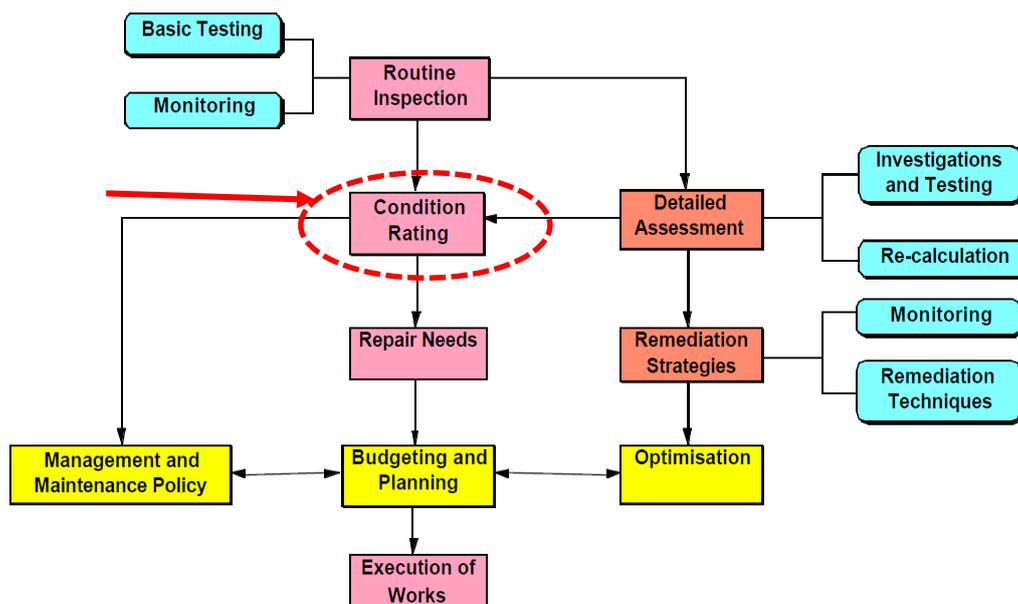


Figura 1.4 Principali attività di un processo di valutazione per una struttura in calcestruzzo in un sistema di gestione e manutenzione (5) [C. Andrade & Co. *Management, maintenance and strengthening of concrete structures*. Fib (CEB-FIP) Bulletin 17, 2002.]

1.3. Bridge Management System

Nelle moderne impostazioni delle attività ispettive, le informazioni acquisite vengono memorizzate e utilizzate come basi dati in sistemi di Bridge Management System (**BMS**). Per BMS si intende l'insieme delle attività di ispezione, indagine, manutenzione, riparazione di un gruppo di opere, organizzate secondo criteri di priorità, con il supporto di banche dati informatiche e di algoritmi ordinatori.

In forma schematica si può dire che un BMS è composto da (Figura 1.5):

- procedure per l'acquisizione e l'archiviazione dei dati;
- capacità di analisi dei dati sulla base di modelli di ammaloramento;
- un menù di modelli di costo;
- programmi di ottimizzazione, che sulla base delle precedenti valutazioni, pianifichino le tipologie e i tempi di intervento.

Un BMS è dunque uno strumento in grado di:

- monitorare e avere un quadro generale aggiornato dello stato delle opere che si hanno in carico;
- formulare programmi di manutenzione entro prefissati limiti di costo e pianificare gli interventi di conseguenza;
- pianificare le richieste e gli stanziamenti di fondi.

La procedura di valutazione delle infrastrutture, all'interno di un sistema di gestione e manutenzione, è divisa dunque in varie fasi (6) [R. J. Woodward. *Review of current practice for assessment of structural condition and classification of defects*. BRIME PL97-2220 Deliverable D2, Project funded by the European Commission under the Transport rtd. Program of the 4th Framework Program, March 1999]:

- Catalogazione del patrimonio infrastrutturale: consiste nella raccolta di tutte le informazioni che riguardano i ponti della rete (codice identificativo, localizzazione, dati anagrafici, tipologia strutturale, materiale, categoria di traffico);
- Ispezione: in questa fase viene valutato la condizione dei singoli elementi del ponte. La fase ispettiva parte da un controllo di tipo visivo, da essa può emergere la necessità di un approfondimento investigativo da eseguirsi con l'ausilio di apposita strumentazione (indagini sperimentali approfondite);
- Raccolta dei dati di inventario e di ispezione per ciascuna struttura: è mirata alla catalogazione dei dati ottenuti durante le ispezioni. Questi dati andrebbero aggiornati periodicamente a seguito di ogni ispezione visiva o strumentale. Un utile strumento per l'elaborazione dei dati è il "Condition Rating mark" Rc. Esso è un indicatore numerico per descrivere la condizione di una struttura che fa parte di una certa popolazione (la rete di ponti). Il Condition rating mark va calcolato per ciascun ponte, seguendo un metodo standard che si basa sui dati ottenuti durante l'ispezione visiva. Dal confronto del valore che assume l'Rc si ottiene un ordine di preferenza di intervento sulle opere che fanno parte della rete (gerarchizzazione degli interventi). Questo strumento consente di effettuare una valutazione se non oggettiva almeno omogenea sull'intero campione.
- Decisione: una volta che sono state chiaramente comprese cause e grado di deterioramento, si studiano diverse alternative e strategie di intervento, considerando vari aspetti come: condizioni attuali di servizio; residua capacità di carico; valutazione dello sviluppo del degrado; previsione della vita di servizio residua.

Il bridge management è dunque un approccio strategico volto a massimizzare i benefici ottenuti dalle risorse economiche utilizzate per preservare, mantenere in servizio ed espandere una rete di ponti.

L'implementazione del **BMS** in USA nacque come risposta al crollo del Silver Bridge in West Virginia nel 1967. LA FHWA istituì il Bridge Inventory Program stabilendo standard nazionali per:

- Procedure di ispezione;
- Frequenza di ispezione;
- Qualifiche del personale;
- Report di ispezione;
- Aggiornamento del National Bridge Inventory (NBI).

Nei primi anni '90 la FHWA ordinò a tutti gli Stati l'adozione di un Bridge Management System capace di raccogliere i dati di ispezione a livello di "elemento" per una ben determinata serie di elementi codificati costituenti il ponte.

Questa serie di elementi codificati prende il nome di Commonly Recognized (CoRe) Elements.

A ciascuno dei 50 Stati fu lasciata la possibilità di scegliere tra le seguenti opzioni:

- Pontis (Network Level Analysis);
- BRIDGIT (Project Level Analysis);
- Sviluppare un Sistema interno proprio (Opzione costosa).

Sia Pontis sia BRIDGIT divennero strumenti di BMS AASHTO, ma nel 2001 il BMS BRIDGIT viene abbandonato, mentre Pontis è attualmente utilizzato in più di 40 agenzie degli USA (7) [Prof. Ing. Donatella Mascia. *Una panoramica dello stato dell'arte del Bridge Management System. Manutenzione programmata delle infrastrutture e sicurezza AASHTO (2007)*].

All'interno di questo processo complesso, il mio lavoro di ricerca si è focalizzato sulla fase di valutazione dello stato di degrado delle strutture finalizzata a stabilire le priorità di intervento tra le diverse operazioni di manutenzione necessarie all'interno della rete infrastrutturale (Figura 1.5).

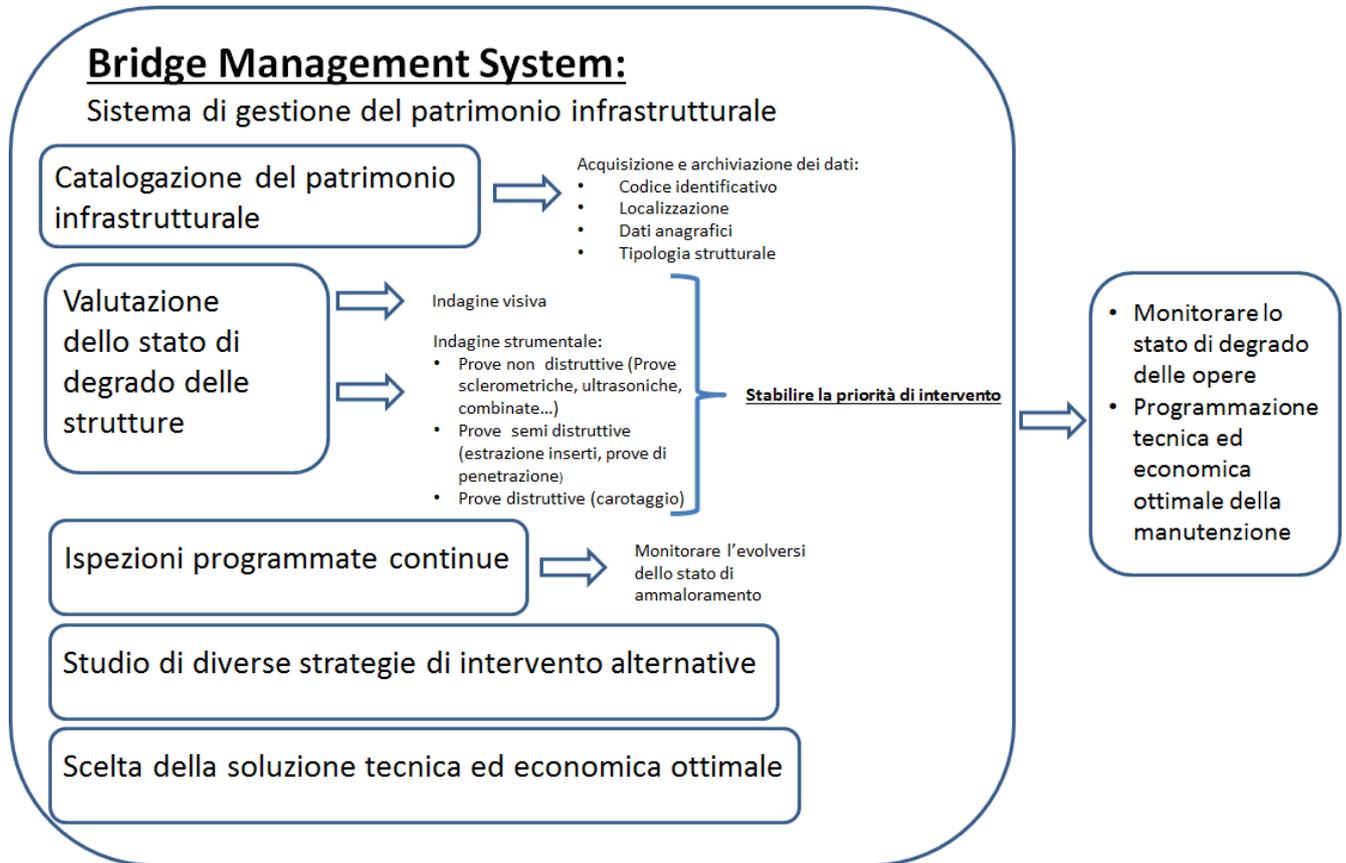


Figura 1.5 Bridge Management System

1.4. Quadro normativo italiano

La normativa italiana vigente, relativa all'ispezione e alla manutenzione dei ponti stradali, è così articolata:

- **Circolare del 19/07/1967 n.6736/61 A1. Ministero lavori pubblici. Controllo delle condizioni di stabilità delle opere d'arte stradali.** La circolare è stata emanata a seguito di gravi avvenimenti interessanti la stabilità di opere d'arte e manufatti stradali i quali hanno fatto nascere la necessità di organizzare in modo più efficiente il controllo periodico delle condizioni statiche delle opere stesse. Per controlli è da intendersi: l'accertamento periodico delle condizioni di stabilità delle varie strutture, ed in particolare di quelle portanti, e controllo dello stato di conservazione ai fini del mantenimento in efficienza delle stesse e delle altre parti accessorie. La vigilanza sullo stato di consistenza e sulla statica delle opere d'arte e dei manufatti stradali deve essere permanente. La vigilanza deve essere esplicata ai vari livelli dei dipendenti e dei funzionari addetti, con periodicità opportunamente rapportata al grado tecnico dell'accertamento. In altri termini se un controllo tecnico approfondito può avere una periodicità dell'ordine di un anno, le ispezioni minori dovranno essere programmate con frequenza almeno trimestrale. Il personale addetto alla manutenzione ispeziona durante la sua normale attività quotidiana i manufatti e le opere d'arte, mediante un esame di superficie delle strutture visibili (pile, pilastri, colonne, archi, volte, solette, travature, nervature, muri, ecc.) tendente ad accertare ogni fatto nuovo, l'insorgere di eventuali anomalie esterne, come lesioni, crepe, fessurazioni, rigonfiamenti dei parametri esterni, distacchi, cedimenti, movimenti, nonché scoscendimenti o franamenti del terreno presso le rive, le scarpate, il fondo valle, ecc., e deve immediatamente segnalare tali fatti all'Ufficio da cui dipende. Detto Ufficio, quando esistono segnalazioni del genere, da parte del predetto personale, dispone senza alcun indugio ogni ispezione o controllo che le dette informazioni dovessero suggerire o consigliare. Indipendentemente, però, dalle segnalazioni e dalle informazioni (eventuali) del personale addetto alla manutenzione, i capireparto, i geometri addetti alla zona, i tecnici di tronco o capizona, effettuano una volta almeno ogni trimestre un'ispezione a tutti i manufatti di loro pertinenza, per accertare lo stato di consistenza e di conservazione delle strutture, nonché eventuali dissesti che dovessero apparire alle parti visibili dei manufatti. A seguito di ogni ispezione trimestrale (o più frequente ove le circostanze lo richiedessero) deve essere redatto un rapporto sintetico quanto possibile ed esteso e particolareggiato quanto necessario, da conservare cronologicamente nell'apposito fascicolo intitolato "Controllo periodico stabilità opere d'arte" da istituire appositamente. Il controllo straordinario sulle condizioni statiche dei manufatti deve essere esperito anche ogni qualvolta qualche sintomo, notizia, fatto (oltreché i rapporti e le informazioni del personale addetto alla manutenzione, o dei tecnici di zona o di tronco) dia adito a convincimento (od anche a semplice supposizione) che qualcosa non sia normale nella stabilità delle strutture o nell'assetto del terreno e pertinenze circostanti. Il controllo straordinario è molto accurato e viene eseguito sotto la diretta responsabilità degli Ingegneri addetti alla zona od al tronco (capisezione e simili) che redigono al riguardo un apposito rapporto, da conservare anch'esso nell'apposito fascicolo relativo al controllo periodico della stabilità delle opere d'arte. Un esame generale e completo dei manufatti più importanti deve essere, poi, eseguito dai predetti ingegneri di zona o di tronco, almeno una volta all'anno, avuto riguardo anche alla vetustà delle opere ed al tipo di struttura resistente, mediante anche saggi ed ispezioni, ove occorran, alle parti non visibili ricadenti a quota

inferiore a quella del terreno (8) [Circolare 19/07/1967 n.6736/61 A1. Ministero lavori pubblici. *Controllo delle condizioni di stabilità delle opere d'arte stradali*].

- **Circ. Min. LL.PP., STC, n.220977 del 11.11.1980. Istruzioni relative alla Normativa Tecnica sui Ponti Stradali. Decreto Ministeriale 2 Agosto 1980.** Le presenti norme sono relative a quelle strutture che hanno la funzione di sostenere una piattaforma stradale quando questa, in conseguenza delle sue primarie esigenze plano-altimetriche, non può trovare diretto e continuo appoggio sul terreno, in relazione alla morfologia ed alla natura del terreno o per ostacoli da superare o per altri motivi. Con il termine generico di “ponti” si intendono anche tutte quelle opere che, in relazione alle loro diverse destinazioni, vengono normalmente indicate con nomi particolari, quali: viadotti, sottovia o cavalcavia, sovrappassi, sottopassi, strade sopraelevate, ecc. (9) [Circ. Min. LL.PP., STC, n.220977 del 11.11.1980. Istruzioni relative alla Normativa Tecnica sui Ponti Stradali. Decreto Ministeriale 2 Agosto 1980].
- **CM LP 34233 25 febbraio 1991. Istruzioni relative alla normativa tecnica dei ponti stradali:** essa stabilisce che le strutture da ponte inserite nella rete stradale nazionale devono presentarsi in permanente stato di agibilità tecnica, con riferimento, ovviamente, alle caratteristiche dei tronchi stradali cui esse sono a servizio. La gestione dei ponti stradali si esplica attraverso le seguenti operazioni: vigilanza; ispezione; manutenzione. Ordinaria-straordinaria; interventi statici: restauro-adeguamento-ristrutturazione. Per quanto riguarda la vigilanza sullo stato di conservazione dei ponti vengono riprese le medesime questioni della Circolare del 1967 ma con minore precisione in relazione alle tempistiche e cadenze periodiche. La vigilanza deve essere permanente. Il personale incaricato effettuerà con frequenza prestabilita visita ai manufatti, anzitutto per il controllo dello stato del piano viabile e poi per un esame di superficie delle strutture visibili degli impalcati e dei sostegni, onde accertare ogni fatto nuovo, l'insorgere di anomalie esterne, come fessurazioni, deformazioni anomale, armature scoperte, spostamenti relativi, movimenti del terreno, e dovrà immediatamente segnalare tali fatti all'Ufficio da cui dipende. Lo stesso personale, nel caso in cui riscontri gravi anomalie, prenderà provvedimento immediato di chiusura del ponte al traffico o di limitazione della carreggiata. Gli uffici tecnici delle amministrazioni proprietarie delle strade, o alle quali la gestione delle strade è affidata, devono predisporre un sistematico controllo delle condizioni statiche e di buona conservazione dei ponti. La frequenza delle ispezioni deve essere commisurata alle caratteristiche ed alla importanza dell'opera, nonché alle risultanze della vigilanza. Il controllo, da eseguire sulla base della documentazione disponibile, sarà volto ad accertare periodicamente le condizioni di stabilità dell'opera e dei suoi elementi strutturali e lo stato di conservazione delle strutture stesse e delle parti accessorie. Le ispezioni, di norma visuali, devono riguardare, oltre che le strutture e le pertinenze dell'opera, anche le fondazioni, lo stato dei pendii, le situazioni in alveo, con particolare riferimento a stati di erosione. L'esito di ogni ispezione deve formare oggetto di uno specifico rapporto da conservare insieme alla documentazione tecnica. A conclusione di ogni ispezione, inoltre, il tecnico incaricato deve, se necessario, indicare gli eventuali interventi a carattere manutentorio da eseguire ed esprimere un giudizio riassuntivo sullo stato dell'opera. In caso in cui l'opera presentasse segni di gravi anomalie, il tecnico dovrà promuovere ulteriori controlli specialistici e nel frattempo adottare direttamente, in casi di urgenza, eventuali limitazioni all'esercizio dell'opera. Per manutenzione deve intendersi il complesso di operazioni necessarie a mantenere l'opera nella sua piena efficienza, nel rispetto delle sue originarie caratteristiche. Le operazioni di manutenzione possono essere ordinarie o

straordinarie. Le operazioni di manutenzione ordinaria di regola comprendono: pulizia delle varie parti dell'opera compresi gli appoggi, anche con mezzi meccanici, al fine di asportare tutti i materiali estranei; sostituzione di elementi accessori deteriorati con operazioni di semplice smontaggio e montaggio; riparazioni localizzate superficiali delle parti strutturali, da effettuare anche con materiali speciali; riparazioni localizzate di impermeabilizzazione e pavimentazione; interventi localizzati contro la corrosione; operazioni di riparazione dei giunti di dilatazione. Le operazioni di manutenzione straordinaria di regola comprendono: ripristino di parti strutturali in calcestruzzo armato da eseguire anche con materiali speciali; protezione delle armature scoperte, estesa ad ampie zone; protezione dei calcestruzzi da azioni disgreganti (gelo, Sali solventi, ambiente aggressivo); con eventuale applicazione di film protettivi; sigillatura di fessure di strutture in c.a. o in c.a.p., che non richiedano interventi più specifici; interventi su bullonature, saldature o parti comunque danneggiate di saldature metalliche; protezione contro la corrosione su grandi superfici in strutture metalliche; ripristino di strutture di mattoni o pietra da taglio; protezione delle armature da azioni disgreganti (gelo, Sali, ambiente aggressivo); riparazione e ricostruzione di ampie porzioni o della totalità della pavimentazione e dell'impermeabilizzazione degli impalcati; sostituzione di giunti di dilatazione; interventi sugli appoggi e dispositivi di vincolo con messa in ripristino o sostituzione totale o parziale. Per restauro statico si intende il complesso di interventi volti al ripristino della capacità portante originaria di un ponte deteriorato. Per adeguamento si intende il complesso di interventi che, nel rispetto sostanziale della geometria e dello schema statico originario, pongano in grado la struttura di far fronte ad azioni maggiori o diverse da quelle del progetto originario. Per ristrutturazione si intende il complesso di interventi volti al ripristino od anche all'aumento della capacità portante, interventi comportanti peraltro una modifica delle caratteristiche geometriche (ad es. allargamento della sede stradale) o dello schema statico originario dell'opera. L'adeguamento e la ristrutturazione possono interessare ovviamente anche opere in buono stato di conservazione (10) [CMLP34233 25 febbraio 1991. *Istruzioni relative alla normativa tecnica dei ponti stradali*].

- **Decreto Ministero Infrastrutture del 14 gennaio 2008 e Circolare 2 febbraio 2009 n° 617/C.S.LL.PP. Norme tecniche per le Costruzioni.** La presente norma indica come effettuare la caratterizzazione delle proprietà dei materiali. Per quanto riguarda il calcestruzzo: la misura delle caratteristiche meccaniche si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove di compressione fino a rottura. Per l'acciaio la misura delle caratteristiche meccaniche si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove a trazione fino a rottura con determinazione della resistenza a snervamento e della resistenza e deformazione ultima, salvo nel caso in cui siano disponibili certificati di prova di entità conforme a quanto richiesto per le nuove costruzioni, nella normativa dell'epoca. La misura delle caratteristiche meccaniche di unioni in acciaio, si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove a trazione fino a rottura con determinazione della resistenza a snervamento e della resistenza e deformazione ultima. Sono ammessi metodi di indagine non distruttiva di documentata affidabilità, che non possono essere impiegati in completa sostituzione di quelli sopra descritti, ma sono consigliati a loro integrazione, purché i risultati siano tarati su quelli ottenuti con prove distruttive. Nel caso del calcestruzzo, è importante adottare metodi di prova che limitino l'influenza della carbonatazione degli strati superficiali sui valori di resistenza. (11) [Decreto Ministero Infrastrutture del 14 gennaio 2008 e Circolare 2 febbraio 2009 n° 617/C.S.LL.PP. *Norme tecniche per le Costruzioni*].

Dagli stralci riportati emerge che la normativa italiana impone la necessità di una conoscenza dettagliata di ciascuna opera e definisce le modalità di vigilanza del patrimonio infrastrutturale. Nonostante ciò, spesso queste prescrizioni non vengono adottate dagli enti gestori.

La Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n° 6736-61-A1 del 19/07/1967 indica le frequenze delle ispezioni ordinarie (una ogni tre mesi), e di quelle principali che è prescritto siano compiute da un ingegnere (una ogni anno); in entrambi i casi deve essere redatto un apposito rapporto sintetico. Per queste ispezioni, destinate al controllo dello stato di conservazione di ogni parte strutturale, non sono prescritti dalla Circolare controlli specifici al di fuori di quello visuale (la Circolare si limita a raccomandare l'accurata effettuazione delle ispezioni, in particolare di quella principale). Resta perciò l'opportunità di definire le modalità ed i tempi di un altro tipo di controlli, quelli strumentali, generalmente di tipo non distruttivo.

Bibliografia

- (1) Furlanetto Luciano, Garetti Marco, Macchi Marco (2007). *Ingegneria della manutenzione. Strategie e metodi*. Franco Angeli.
- (2) Pier Giorgio Malerba (2015). *Ispezioni dei ponti: Contributo dei sistemi di rilievo a pilotaggio remoto*.
- (3) C. Pellegrino, A. Pipinato, C. Modena. *A simplified management procedure for bridge network maintenance*. Vol.7, No.5, 341-351, May 2011.
- (4) ISO 13822 (2010). *Basis for design of structures. Assessment of existing structures*.
- (5) C. Andrade & Co. *Management, maintenance and strengthening of concrete structures*. Fib (CEB-FIP) Bulletin 17, 2002.
- (6) R. J. Woodward. *Review of current practice for assessment of structural condition and classification of defects*. BRIME PL97-2220 Deliverable D2, Project funded by the European Commission under the Transport rtd. Program of the 4th Framework Program, March 1999.
- (7) Prof. Ing. Donatella Mascia. *Una panoramica dello stato dell'arte del Bridge Management System*. Manutenzione programmata delle infrastrutture e sicurezza AASHTO (2007).
- (8) Circolare 19/07/1967 n.6736/61 A1. Ministero lavori pubblici. *Controllo delle condizioni di stabilità delle opere d'arte stradali*.
- (9) Circ. Min. LL.PP., STC, n.220977 del 11.11.1980. Istruzioni relative alla Normativa Tecnica sui Ponti Stradali. Decreto Ministeriale 2 Agosto 1980
- (10) CMLP34233 25 febbraio 1991. *Istruzioni relative alla normativa tecnica dei ponti stradali*.
- (11) Decreto Ministero Infrastrutture del 14 gennaio 2008 e Circolare 2 febbraio 2009 n° 617/C.S.LL.PP. *Norme tecniche per le Costruzioni*.

Capitolo II

Indagine visiva

Contenuto del capitolo:

- Indagine visiva
- Cause e tipologie di dissesti
 - Forme di degrado
- Strumenti moderni come supporto alle operazioni di ispezione. I droni
 - Metodologie esistenti di valutazione delle condizioni
 - Confronto tra le metodologie esistenti

2.1. Indagine visiva

Il bollettino *fib* n°17 (1) [C. Andrade & Co. *Management, maintenance and strengthening of concrete structures*. Fib (CEB-FIP) Bulletin 17, 2002] definisce l'ispezione visiva come il metodo più conveniente e importante di indagine perché fornisce una rapida panoramica delle condizioni della struttura e restituisce un risultato immediato. È il metodo più economico e, se effettuato da personale esperto, è anche sufficientemente affidabile. Si ritiene infatti che circa l'80% delle informazioni rilevanti possano essere fornite dalle ispezioni visive con circa il 20% dei costi totali di ispezione (vedi Figura 2.1).

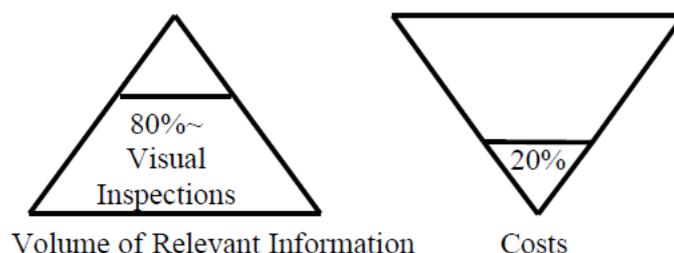


Figura 2.1 Importanza dell'ispezione visiva (1) [C. Andrade & Co. *Management, maintenance and strengthening of concrete structures*. Fib (CEB-FIP) Bulletin 17, 2002]

L'esame visivo (Figura 2.2) consiste nell'analisi delle fessurazioni degli elementi strutturali e/o accessori, delle deformazioni, dei difetti e nella identificazione e classificazione degli eventuali degradi e dissesti presenti sulla struttura.

Nello specifico, con il termine degrado si intende il cambiamento progressivo di uno stato iniziale del materiale in ragione del tempo ed in risposta all'aggressività ambientale, mentre con dissesto si indica la modifica di uno stato iniziale di equilibrio dell'assetto strutturale in risposta ad azioni imposte, forze e/o deformazioni, a variazioni termiche e mutazioni di natura reologica (2) [Stefano Bufarini, Vincenzo D'aria, Domenico Squillaciotti. *Collaudo Statico Prove di carico su solai ed impalcati*. Quaderni per la progettazione].

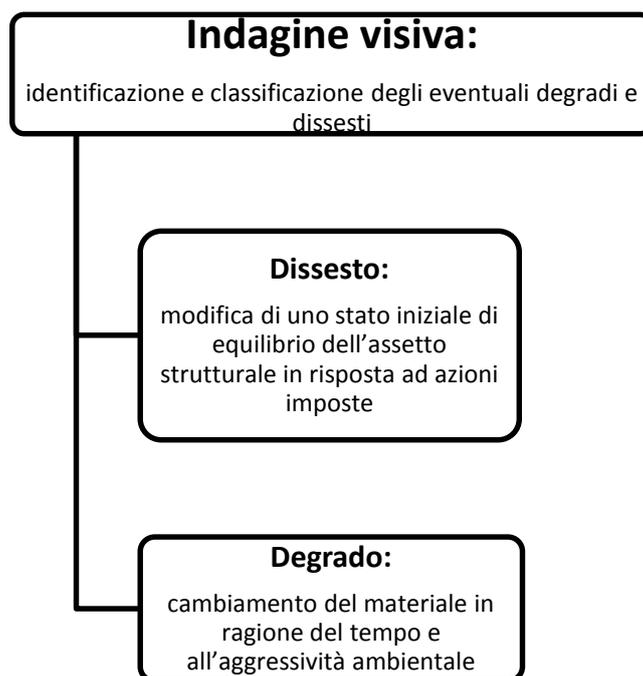


Figura 2.2 Indagine visiva

Durante le ispezioni devono essere dunque rilevati eventuali dissesti e degradi, in atto o stabilizzati, ponendo particolare attenzione all'individuazione dei quadri fessurativi, delle deformazioni e dei meccanismi di danno. Inoltre va rilevato se gli eventuali dissesti siano estesi, ed in quale entità, ad altre strutture limitrofe a quella presa in esame.

L'indagine visiva costituisce quindi la prima e imprescindibile fase di un processo di valutazione e va condotta in maniera rigorosa, seguendo un procedimento logico e schematico finalizzato al raggiungimento di un giudizio finale relativo allo stato funzionale della struttura. Essa deve infatti, nel caso di danni rilevanti, consentire di dichiarare immediatamente l'uscita di servizio dell'opera per manifesta carenza strutturale, oppure decretare lo stato di sicurezza della struttura o, ancora, guidare nelle eventuali successive fasi di approfondimento.

Affinché l'indagine visiva possa rappresentare l'esatta fotografia della situazione delle strutture, dei materiali costituenti e quella dei fenomeni di dissesto in atto, la raccolta delle informazioni deve essere sistematica, ripetibile ed esaustiva riguardo a tutte le possibili condizioni di degrado.

La Tabella 2.1 riassume alcune operazioni da effettuare per raccogliere e documentare lo stato di una struttura in cemento armato e inquadrare la tipologia del degrado osservato.

Tabella 2.1 Esempi di elementi utili da registrare durante il sopralluogo (3) [Luigi Coppola. *La diagnosi del degrado nelle strutture in calcestruzzo*. L'industria italiana del cemento armato 1993]

ESAME VISIVO	
Fessurazioni	
<ul style="list-style-type: none"> • Irregolari/Regolari • Frequenza (lunghezza cumulativa in mm/m²) • Geometria (ampiezza, lunghezza e profondità) • Estensione delle aree coinvolte • Posizione delle aree coinvolte in relazione all'ambiente (interno/esterno), ed alle condizioni micro-climatiche, geografiche e strutturali (intradossi, estradosso, ecc.) 	
Ferri di armatura	
Ferri scoperti	Macchie di ruggine
<ul style="list-style-type: none"> • Estensione delle aree coinvolte • Posizione delle aree coinvolte • Frequenza • Aspetto della corrosione (generalizzata/localizzata) • Riduzione del diametro dei ferri • Tipo di ruggine (compatta/porosa) • Spessore del copriferro 	<ul style="list-style-type: none"> • Estensione delle aree coinvolte • Posizione delle aree coinvolte • Frequenza • Forma delle macchie (circolare, oblunga, irregolare)
Delaminazione superficiale del calcestruzzo	
<ul style="list-style-type: none"> • Estensione delle aree coinvolte • Posizione delle aree coinvolte • Frequenza • Spessore • Aspetto del calcestruzzo delaminato (duro/incoerente) • Presenza di efflorescenze, sub-fluorescenze, incrostazioni 	
Distacchi del calcestruzzo	
<ul style="list-style-type: none"> • Spessore • Localizzazione (spigoli, superfici, ecc.) • Estensione delle aree coinvolte • Posizione delle aree coinvolte • Aspetto del calcestruzzo danneggiato (duro/incoerente) • Frequenza 	

Prima di effettuare una qualsiasi ispezione è comunque fondamentale effettuare una ricerca approfondita sulla storia passata della struttura da indagare. Nella Tabella 2.2 sono elencati i principali dati storici che possono costituire degli utili strumenti per l'emissione della diagnosi (3) [Luigi Coppola. *La diagnosi del degrado nelle strutture in calcestruzzo*. L'industria italiana del cemento armato 1993].

Tabella 2.2 Esempi di dati “storici” utili per la emissione della diagnosi (3) [Luigi Coppola. *La diagnosi del degrado nelle strutture in calcestruzzo. L’industria italiana del cemento armato 1993*]

RACCOLTA DEI DATI “STORICI”	
Periodo di costruzione	
Precisare le date di inizio e fine della costruzione segnalando le particolari condizioni climatiche in corso d’opera	
Caratteristiche dei materiali impiegati	
Calcestruzzo	Ferri di armatura
<ul style="list-style-type: none"> • R_{ck} • Lavorabilità • Composizione (dosaggio di cemento, ecc.) • Tipo di cemento • Tipo di aggregato • Tipo di additivo • Altre eventuali caratteristiche • Trattamenti superficiali 	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo • Dimensioni • Altre caratteristiche
Luogo	
<ul style="list-style-type: none"> • Posizione geografica • Condizioni climatiche 	
Data dei primi segni di degrado	
<ul style="list-style-type: none"> • Descrivere lo sviluppo temporale dei segni di degrado 	
Altre informazioni utili	
<ul style="list-style-type: none"> • Condizioni climatiche e trattamenti (per esempio sali disgelanti) in esercizio • Carichi statici e dinamici in esercizio • Ambiente circostante: terreni, acque, ecc. • Eventuali contestazioni in corso d’opera per i materiali e la esecuzione • Precedenti interventi di restauro 	

2.2.Cause e tipologie di dissesti

La presenza di dissesti denuncia un comportamento anomalo della struttura e richiede quindi apposite indagini per poter decidere se si tratta di una situazione di pericolo ed in quale misura.

Come detto, il primo passo di un processo di valutazione è costituito dall'ispezione visiva. Il tecnico addetto a questa operazione deve essere dunque preparato ad individuare i difetti e ad indagarli.

Essi possono essere di tipo:

- **Diretto:** quando coinvolgono gli elementi portanti e si manifestano generalmente con moti rigidi, deformazioni e fessurazioni. Talvolta si hanno dissesti dovuti solo a moti rigidi. In questo caso, la struttura si allontana dalla posizione originaria conservando la propria geometria;
- **Indiretto:** quando relativi agli elementi costruttivi secondari. Questi tipi di dissesti, anche se non incidono sulla sicurezza del complesso strutturale, costituiscono comunque una fonte di pericolo, ad esempio per la loro caduta, e possono leggersi come segni di conseguenze deformative derivanti dall'aver interessato il manufatto senza provocare su di esso danni strutturali.

I difetti riscontrabili nelle strutture in cemento armato possono essere dovuti a eventi risalenti alla fase di realizzazione dell'opera (difetti dovuti ad una scarsa manodopera come peeling, stratificazione, vespai, che sono dei micro vuoti di aria all'interno dell'impasto, difetti provocati in fase di esecuzione come: ritiro plastico, crepe plastiche di assestamento, crepe causate da collegamenti insufficienti) oppure alla fase di esercizio (fessure dovute al carico diretto oppure a deformazioni e confinamenti imposti).

I dissesti si evidenziano attraverso una serie di manifestazioni che nascono per effetto di stati tensionali che la struttura non è in grado di sopportare e che ne riducono la resistenza locale. Queste manifestazioni possono essere distinte in (Figura 2.3):

- **Fessurazioni:** soluzione di continuità del solido;
- **Deformazioni:** variazioni di forma geometrica delle strutture.

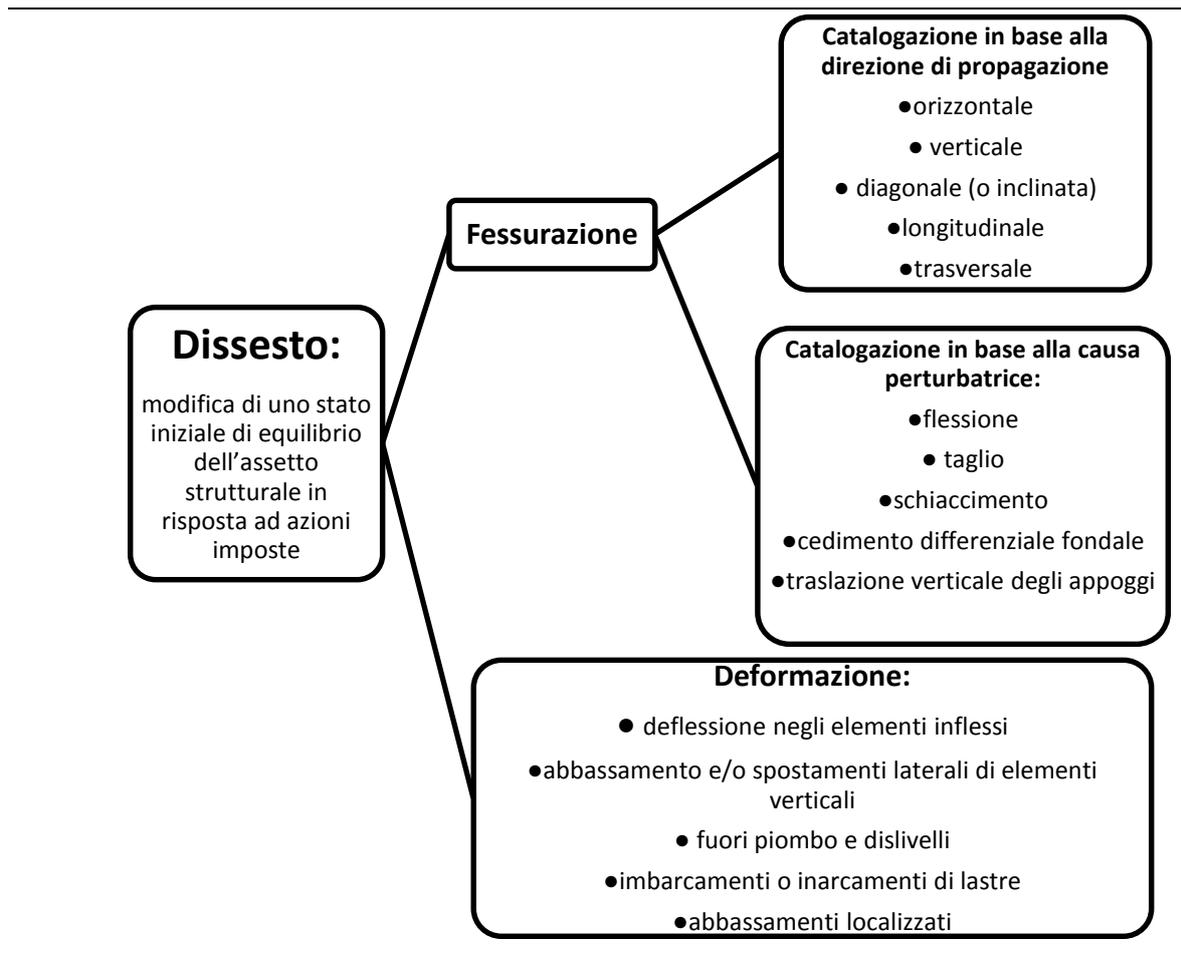


Figura 2.3 Tipologie di dissesto

Per quanto attiene la loro estensione rispetto ad un organismo strutturale, possono avere carattere (Figura 2.4):

- Locale: se interessano un elemento strutturale (e non si ripetono in quelli tipologicamente analoghi);
- Globale: se interessano il complesso degli elementi strutturali;
- Limitato: se interessano da 1/3 fino a 2/3 degli elementi strutturali.

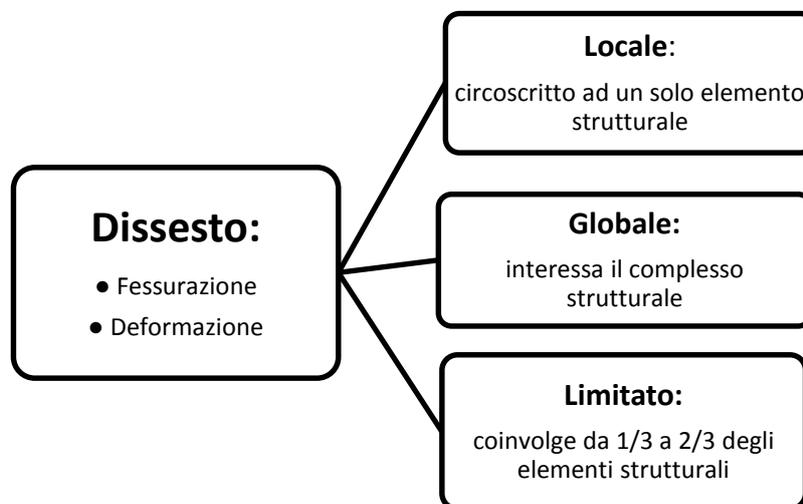


Figura 2.4 Estensione del dissesto rispetto all'organismo strutturale

Le deformazioni possono palesarsi come deflessioni negli elementi inflessi, abbassamento e/o spostamenti laterali di elementi verticali, fuori piombo e dislivelli, imbarcamenti o inarcamenti di lastre, abbassamenti localizzati con concavità verso l'alto di superfici in calcestruzzo non casserate (Figura 2.3).

Un dissesto si evidenzia anche attraverso la comparsa di fessure.

Esse sono conseguenti ad una modifica della stabilità di un elemento strutturale che crea, al progredire del dissesto, una progressiva variazione del regime tensionale interno, con naturali compressioni e dilatazioni discontinue da punto a punto, al fine di ricercare stati d'equilibrio del materiale costituente. La fase di originaria rottura nasce quando durante questi cambiamenti d'equilibrio, in un punto dell'elemento, la dilatazione è maggiore della tolleranza alla coesione del materiale. In quel punto si stabilisce una soluzione di continuità che si può propagare, via di seguito, per apparire in superficie sotto forma di fessurazione.

È chiaro quindi che le fessurazioni compaiono solitamente nelle fasi deformative inoltrate. Queste, in genere, sono precedute da lesioni compatibili con la continuità della massa che, prima di rompersi, subisce delle deformazioni elastiche e plastiche, queste ultime peraltro, di difficile visione. Le lesioni di una struttura sono gli effetti del suo dissesto e concorrono a determinarne il degrado.

È fondamentale quindi analizzare il quadro fessurativo e deformativo al fine di poter formulare una diagnosi. Dall'interpretazione delle manifestazioni di faticenza di una struttura definiamo la natura del dissesto statico e sulla base della conoscenza anche delle condizioni al contorno, determiniamo le cause perturbatrici e valutiamo le soluzioni progettuali più idonee per ripristinare le condizioni di stabilità (Figura 2.17).

Analisi del quadro deformativo e fessurativo

- Ispezione
- Interpretazione delle manifestazioni di dissesto
 - Definizione della natura del dissesto
 - Individuazione delle cause perturbatrici
 - Alternative progettuali di ripristino

Figura 2.5 Analisi del quadro deformativo e fessurativo

Con il termine “fessura” si indica il fenomeno di allontanamento delle parti costituenti un elemento. Una fessura presenta generalmente una parte centrale, denominata “ventre” o “gola”, ove è più evidente il distacco dei due cigli laterali, e della parti estreme più rastremate denominate “cuspidi” (vedi Figura 2.6).

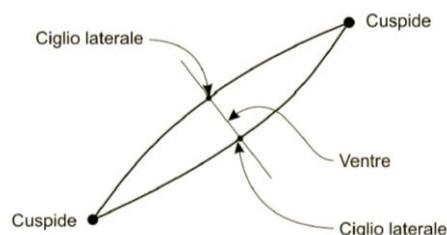


Figura 2.6 Schematizzazione della fessura (4) [Emanuele Massacci. *Manuale per i dissesti statici: cedimenti e soluzioni tecniche*. Notavek 201]

Nelle fessurazioni l'indagine va quindi eseguita partendo dall'individuazione di ventre e cuspidi per rilevare, rispettivamente, l'ampiezza e la propagazione/estensione (Figura 2.7).

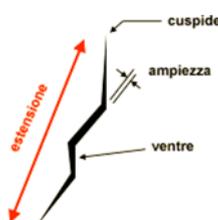


Figura 2.7 Estensione ed ampiezza di una frattura (5) [F. Doglioni. Seminario didattico. *Strutture nel tempo; Metodi e casi di studio*. Università degli studi di Venezia. 15 Marzo 2013]

La fessura può essere uniforme nelle dimensioni, nel caso in cui sia dovuta ad un allontanamento reciproco per traslazione, oppure può presentare una parte ampia che poi si restringe fino a scomparire, nel caso in cui sia dovuta ad una rotazione dell'elemento portante su cui si manifesta la lesione (6) [Ministro dell'interno. Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. *Costruzioni e dissesti statici*].

Circa la natura delle manifestazioni fessurative, si possono avere lesioni di trazione o di schiacciamento. La differente frequenza e pericolosità dipendono dal maggior valore della resistenza a compressione rispetto a quella a trazione esibita dal materiale nonché dai criteri di progettazione. Nella concezione statica infatti, sia della muratura che del conglomerato cementizio con armatura lenta, si fa affidamento solo sulla resistenza a compressione, per cui se questa viene a mancare può aversi il collasso dell'intera costruzione, mentre la resistenza a trazione può essere superata facilmente per qualsiasi fattore accidentale, senza che ciò, in generale, alteri in modo sostanziale il comportamento d'insieme. Le lesioni di trazione creano delle soluzioni della continuità preesistente nella compagine della struttura lasciando però con le proprie caratteristiche meccaniche le parti che ne vengono separate; pertanto se il processo non si estende e l'ampiezza della lesione resta contenuta, il fenomeno può considerarsi circoscritto. In tal caso, l'alterazione dello schema strutturale per l'apparire della lesione potrebbe essere considerato trascurabile.

Ove invece si riscontrasse che l'ampiezza della lesione va crescendo nel tempo, è da pensare ad un moto in atto, che non si è esaurito nell'apparire della lesione, la cui presenza ha anzi rappresentato l'inizio di un fenomeno in processo evolutivo, quale può essere, ad esempio, un cedimento fondale o anche lo schiacciamento di un elemento murario su cui insiste la struttura. Le lesioni di trazione si

verificano laddove si desta una tensione di trazione alla quale la struttura non è in grado di resistere, sono meno insidiose dello schiacciamento sia per la loro maggiore evidenza sia perché, come si è già accennato, segmentando la struttura in più elementi, consentono in genere ancora nuove situazioni di equilibrio.

In un materiale poco resistente a trazione, le prime manifestazioni si evidenziano nelle zone tese. Per individuare la direzione in cui si sviluppano le lesioni occorre tener conto delle isostatiche il cui andamento nella fase iniziale non si discosta da quello in regime elastico, anche se si è in un campo di comportamento non lineare del materiale. La linea fessurativa ci dà indicazione del luogo dei punti dove si è verificata la tensione massima, la direzione dello spostamento relativo dei cigli indica la direzione delle isostatiche di compressione in quei punti.

La lesione, infatti, nella fase iniziale, si innesca normalmente alle isostatiche della tensione principale di trazione di massimo, nel punto in cui questa supera quella ammissibile per il materiale. In tal punto detto di originaria rottura, il materiale subisce una frattura elementare Δf normale alla tensione σ_a e sovrapposta alla isostatica di minimo (Figura 2.8).

È importante individuare, oltre all'andamento della linea fessurativa, la direzione dello spostamento relativo fra i cigli di frattura. Le fessurazioni, durante la fase di rottura, hanno ampiezza piccolissima che aumenta passando da una fase capillare iniziale, a una fase capillare progredita, ma in mancanza di adattamenti plastici i suoi rami capillari iniziali conservano immutata la loro forma geometrica nel progredire del dissesto, tendendo ad accrescere prevalentemente le ampiezze fessurative più che le lunghezze. A partire dalla fase capillare progredita in un solido fessurato sono riconoscibili i due cigli fessurativi (Figura 2.8) f e f_1 e in questi si possono identificare i punti tra loro corrispondenti A e A_1 , B e B_1 . Nelle fasi iniziali fessurative le corde congiungenti $A A_1$, $B B_1$, individuano le linee di azione delle corrispondenti tensioni che provocano la rottura. Tali osservazioni sono utili per individuare il moto relativo delle due parti del solido separate dalla lesione (dissesto statico).

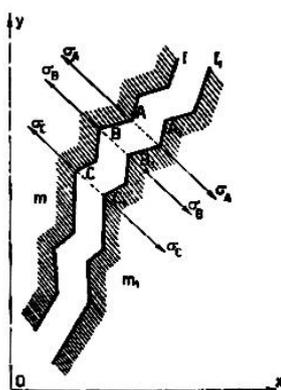


Figura 2.8 Spostamento relativo fra i cigli di frattura

Le fessurazioni vanno indagate in funzione di:

- Cronologia di comparsa: subito dopo il getto, allo scasso, dopo qualche mese/anno, in occasione di eventi particolari (urti, scoppi, sisma, incendio, esecuzione di scavi in adiacenza, realizzazione di edifici o strutture in adiacenza alla struttura interessata, in occasione di carichi eccezionali);
- Tipologia degli elementi strutturali coinvolti: pilastri, travi, solai, scale, pareti di taglio;

- Tipologia fessurativa nell'ambito di un determinato elemento strutturale: fessure flessionali, fessure prevalentemente taglianti, fessure miste flessione/taglio;
- Localizzazione delle fessure: in mezzeria o alle estremità di un elemento inflesso, a $\frac{3}{4}$ della luce della trave, in testa o al piede del pilastro, parallelamente o perpendicolarmente all'asse dei travetti o parallelamente alla direzione rampante della soletta o di gradini a sbalzo;
- Tipologia fessurativa in relazione all'ampiezza: massima ampiezza all'estradosso o all'intradosso, zona di ventre in corrispondenza dell'asse neutro, andamento delle cuspidi fessurative;
- Andamento in relazione alle particolarità costruttive: disposizione dei ferri d'armatura (parallelo, perpendicolare, a riprodurre l'intero disegno dei ferri), andamento in relazione a giunti di costruzione o sismici, andamento in relazione a possibili variazioni di geometria dell'elemento, sistematicità del quadro fessurativo nell'ambito di un determinato elemento strutturale;
- Andamento in relazione a possibili punti in cui si rilevano concentrazioni di sforzo;
- Posizione ed estensione in relazione alle condizioni di esposizione ambientale o microclimatiche.

Un metodo generale di classificazione delle fessure consiste nella valutazione della loro geometria, cioè in base alla loro larghezza, profondità e direzione.

In merito alla larghezza ed alla profondità si suole distinguere tra:

- Fratture sottili: distribuite sulla superficie, che si manifestano con piccoli spostamenti relativi di punti originariamente contigui. Derivano da una contrazione del volume del materiale in prossimità della superficie o da una dilatazione del volume del materiale in prossimità della superficie o da entrambe le cause. Più propriamente si parla di cavillature, se lievi, di crinature o pelature, se lievi o di forma generica sulla superficie. Talvolta le fratture appaiono come filature capillari (ampiezza dell'ordine di grandezza dei μm) o filature semplicemente (ampiezza $< 0,5$ mm) tanto piccole da non essere percepite ad occhio nudo. Le fratture, pur non rappresentando in genere un segno di dissesto, si rivelano nocive per la durabilità del materiale, specie in ambiente aggressivo (possono consentire l'ingresso di acque meteoriche, acqua, vapore, insetti, etc.). Esse costituiscono quindi un segno di degradazione;
- Lesioni: soluzioni di continuità, chiaramente visibili, per rottura del tessuto resistente.

Nella Tabella 2.3 le manifestazioni fessurative sono classificate secondo indicazioni di letteratura.

Tabella 2.3 Manifestazioni fessurative classificate secondo la loro ampiezza (7) [Giovanni Mendito. *Fessurazioni delle strutture*. Dario Flaccovio Editore]

FONTE	CLASSIFICA
BIDWELL	Sottile < 1,5 mm Medie 1, 5:10 mm Ampie >10 mm
RAINER	Molto sottili < 1 mm Esili 1:5 mm Moderate 1:15 mm Severe >15mm
KAMINETZKY	Trascurabili <0,1mm Molto leggere 0, 1:0,4 mm Leggere 0, 8:3,2 mm Moderate 3, 2:12,7 mm Estensive 12, 7:25,4 mm Molto estensive >25,4 mm

Secondo alcuni autori, con riferimento alla struttura in elevazione, l'entità del danno può essere così classificata:

- Grado A, lesioni lievi: lesioni semplici isolate di piccola ampiezza (<5 mm) dovute principalmente a flessione o a cause secondarie;
- Grado B, lesioni serie: molte lesioni flessionali, o lesioni da taglio isolate, ma di piccola ampiezza < 2,5 mm;
- Grado C, danni gravi: lesioni di rilevante ampiezza (>10 mm se verticali o di 5 mm se inclinate), disorganizzazione del tessuto, danni agli architravi, ai cordoli, etc.

In un elemento strutturale, in seguito alla formazione della prima lesione si ha una redistribuzione delle tensioni e conseguentemente una variazione delle isostatiche. Nello sviluppo successivo, tuttavia, una lesione può stabilizzarsi o continuare ad evolversi senza seguire necessariamente l'isostatica originaria in quanto, come si è detto, a seguito della variazione dello schema resistente conseguente all'apparizione della lesione, le isostatiche stesse si modificano.

Sulla base della direzione di propagazione (Figura 2.3), l'aspetto e la posizione, una data fessura in una struttura a trave può essere classificata come segue:

- Fessure orizzontali: sono parallele all'asse longitudinale della struttura a trave;
- Fessure verticali (o di respirazione): sono aperte quando l'elemento è sottoposto a trazione e chiuse quando la sollecitazione si inverte;
- Fessure diagonali (o inclinate): hanno un angolo rispetto all'asse longitudinale della struttura a trave;
- Fessure longitudinali: sono parallele all'asse longitudinale della struttura a trave e compaiono nella zona di massima sollecitazione;
- Fessure trasversali: sono perpendicolari all'asse longitudinale della struttura a trave.

Le fessure trasversali sono le più comuni e pericolose, perché possono ridurre la sezione trasversale dell'elemento e quindi abbassare la sua capacità portante. Le fessure longitudinali e inclinate sono meno comuni, ma non sono da sottovalutare perché possono influenzare la capacità torsionale di una struttura. Le fessure verticali di respirazione possono influenzare il comportamento strutturale esattamente come le trasversali.

In linea generale, per tutte le direzioni di propagazione si devono considerare le possibili evoluzioni sulla struttura, infatti anche se le lesioni iniziali possono essere causate da un singolo meccanismo, una volta che è il meccanismo stesso è stato creato, esso può innescare o accelerare altri processi che potrebbero causare la propagazione delle fessure. Nel calcestruzzo, ad esempio, una fessura meccanica può agire come canale per la penetrazione accelerata di sostanze chimiche, che può poi a sua volta facilitare la corrosione di ferri o reazioni alcali-silicati. La delaminazione del calcestruzzo a causa di ferri di armatura corrosa, riduce la capacità della sezione trasversale della struttura, che può portare all'apertura di una nuova frattura o di una sua crescita. Di conseguenza, tutte le fessure possono potenzialmente causare una drastica diminuzione della capacità strutturale e una riduzione della vita utile. È quindi importante rilevare ogni tipo di soluzione di continuità durante le fasi preliminari in modo che possano essere pianificati, tempestivamente ed in maniera efficace, eventuali interventi di manutenzione e di conservazione (8) [Yao et al 2014. *Structural Control and Health Monitoring*].

I fenomeni fessurativi assumono aspetti caratteristici diversi in base alle cause scatenanti. La rottura del materiale, supponendo l'omogeneità e l'isotropia del materiale, avverrà, come detto, secondo

piani normali alle forze di trazione. Si ha quindi l'esigenza di risalire alla direzione delle tensioni di trazione che hanno portato al quadro fessurativo evidenziato e quindi individuare lo stato sollecitativo che lo ha indotto. A questo punto si può cercare la causa che ha portato al dissesto in atto.

In Figura 2.9 viene mostrata una metodologia per rintracciare subito le direzioni delle tensioni massime di trazione (e quindi le fratture elementari ad esse perpendicolari): una volta individuata le direzioni in cui l'elemento lapideo fratturato si allunga, si può ragionevolmente ipotizzare che le lesioni primarie si svilupperanno ortogonalmente ad esse (9) [Giacomo Cusmano. *Tecniche & Prodotto Recupero. Fessure murarie: che fare?* Rivista BEMA Editrice-Milano. Gennaio/Febrero 2004].

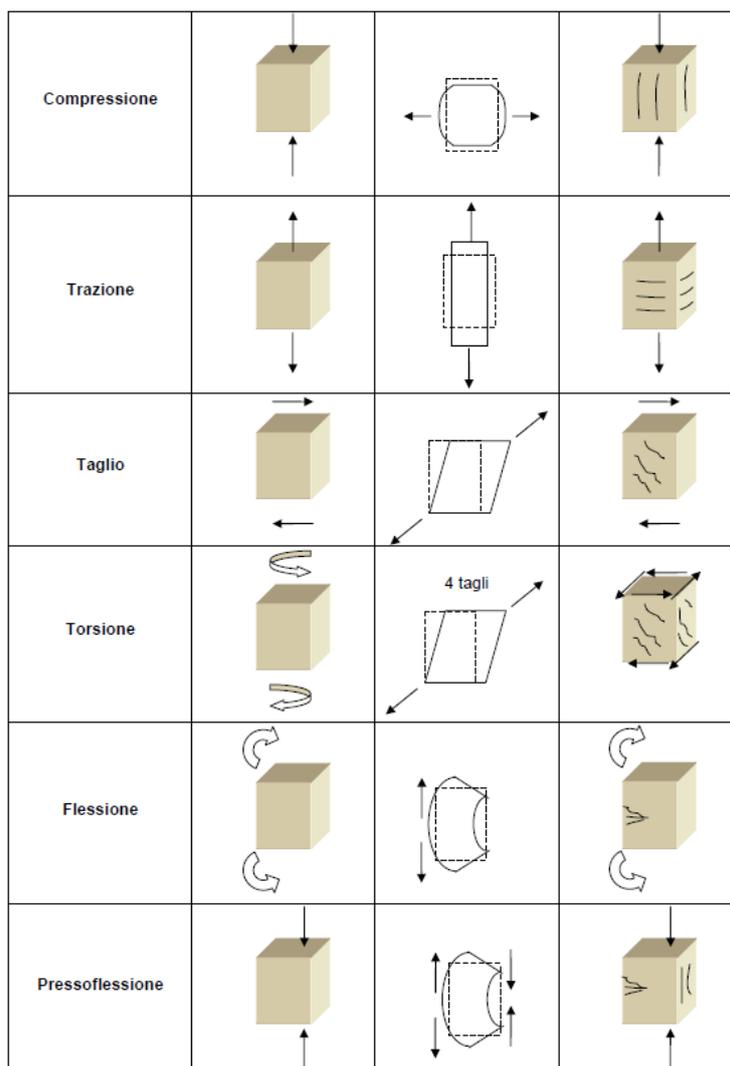


Figura 2.9. Schematizzazione delle tipiche fessure in funzione delle sollecitazioni imposte (10) [Ministero dell'interno, Dipartimento dei Vigili del Fuoco del soccorso pubblico e della difesa civile. Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. *Corso di Costruzioni, Dissesti e Puntellamenti*]

Per le strutture in conglomerato cementizio armato il quadro fessurativo può essere alterato da un'anomala distribuzione delle armature e dall'interferenza di elementi non strutturali.

La completa individuazione della distribuzione delle lesioni può ottenersi solo con un procedimento passo-passo in cui si tenga conto, di volta in volta, dell'effettivo schema resistente della struttura (7) [Giovanni Mendito. *Fessurazioni delle strutture*. Dario Flaccovio Editore].

In seguito all'analisi del quadro fessurativo, può essere fatta una catalogazione delle lesioni in relazione alla causa perturbatrice (Figura 2.3):

- Lesioni flessionali: di ampiezza crescente dalla zona compressa a quella tesa ed andamento concorde con quello dei momenti flettenti (Figura 2.10);
- Lesioni da taglio: con andamento perpendicolare alla direttrice dei momenti flettenti. Se dovute a difetto di staffatura hanno più specificatamente andamento parallelo inclinato a 45° e si manifestano più numerose a distanza da ogni appoggio pari a circa $\frac{1}{4}$ della luce della trave (Figura 2.10).
- Lesioni da schiacciamento: parallele allo sforzo di compressione ed accentuate in prossimità degli spigoli per probabili spostamenti nella posizione dei ferri e distacchi di calcestruzzo.
- Lesioni da cedimenti differenziali delle fondazioni: con forma a "V" sia all'intradosso che all'estradosso, ed andamento concorde con la somma dei momenti flettenti dovuti alle azioni esterne ed al cedimento fondale.
- Lesione da traslazione verticale degli appoggi: localizzate all'intradosso delle travi in corrispondenza dei pilastri ceduti, ed all'estradosso in corrispondenza del pilastro successivo.

(11) [Massimo Dringoli. *Durabilità dei materiali nell'architettura moderna*].

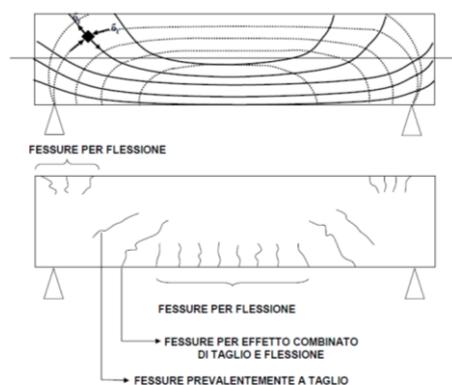


Figura 2.10. Tipologie fessurative negli elementi inflessi (12) [Luigi Coppola. *Dissesti delle strutture in c.a.*]

L'interpretazione dei segni esterni dei dissesti è strettamente legata al materiale costituente la struttura.

In Tabella 2.4 sono riassunti i più comuni tipi di fessure che si presentano nelle strutture in acciaio.

Tabella 2.4 Tipologie fessurative riscontrabili in strutture in acciaio (8) [Yao et al 2014. *Structural Control and Health Monitoring*]

	Cause meccaniche		Cause chimiche
	Carichi	Fatica	Corrosione
Cause	Carichi sollecitanti che superano lo snervamento	Cicli ripetuti di carico (specialmente in localizzazione di discontinuità o concentrazione di sforzi)	Esposizione simultanea a sollecitazione di trazione e ambiente corrosivo
Comparsa fisica	Perpendicolare alla direzione di massimo sforzo principale	Perpendicolare alla direzione di massimo sforzo principale	Crea una discontinuità fisica e si propaga lungo la superficie con sforzi residui alti
Dimensione e forma	Dimensione e forma delle fessure dipendono dai carichi	Fessurazioni iniziali minute. Lunghezza e profondità sono correlate: i fronti di frattura sono solitamente semi ellittici	Le fessure iniziali sono minute ma penetrano in profondità nel materiale
Conseguenze	Rottura duttile è graduale, rottura fragile è rapida e improvvisa	Rottura fragile per sollecitazioni ben inferiori allo snervamento	Rottura fragile (improvvisa e rapida)

In Tabella 2.5 sono riassunti i più comuni tipi di fessure che si presentano nelle strutture in calcestruzzo armato.

Tabella 2.5 Tipologie fessurative riscontrabili in strutture in calcestruzzo armato. (8) [Yao et al 2014. *Structural Control and Health Monitoring*]

	Cause meccaniche	Cause fisiche e chimiche	
	Carichi e fatica	Ritiro ¹ , gelo-disgelo ² , termica ³	Corrosione
Cause	Momento flettente provoca fessure flessionali (trasversali) Sollecitazioni di taglio provocano fessure di taglio (inclinate) Cicli ripetuti di carico provocano fessure da fatica	¹ Evaporazione causa essiccazione e ritiro plastico, idratazione e carbonatazione causano ritiro endogeno ² Saturazione dell'acqua (>91,7%) e temperature di congelamento ³ Gradiente di temperatura e espansione differenziale del materiale	Lisciviazione di soluzione da solfato e presenza di aggregati contaminati provocano reazione alcalino-solfati Barre di rinforzo esposte a penetrazione di cloruri corrodono e spandono
Comparsa fisica	Perpendicolare alla direzione di massimo sforzo principale	¹ Il ritiro provoca lievi fessure superficiali ² Gelo-disgelo provoca fessure superficiali e distacchi ³ La temperatura provoca quadri fessurativi superficiali e distacchi	Reazione alcali-silicati provoca quadri fessurativi superficiali, esfoliazione e distacchi Corrosione delle barre provoca fessure superficiali e distacchi
Dimensione e forma	Le larghezze delle fessure da carico variano in funzione del tipo di carico Le fessure da fatica sono minute inizialmente ma le fessure sviluppate possono avere ampie larghezze	¹ Le fessure da ritiro variano in lunghezza ma raramente superano 10 mm in profondità e 10 µm in larghezza ² Le dimensioni delle fessure superficiali da gelo-disgelo variano; i distacchi sono solitamente <100 mm diametro ³ Le fessure termiche variano in dimensione	Le fessure iniziali dovute alla reazione alcali-silicati sono tipicamente profonde 50-75 mm
Conseguenze	La rottura a flessione è graduale La rottura a taglio è improvvisa Le fratture a fatica possono portare a deformazioni eccessive, distacco del copriferro, e rottura fragile	^{1,2} Le fessure da ritiro e gelo-disgelo agevolano il deterioramento da gelo-disgelo e attacchi chimici ³ In aggiunta le fessure termiche possono causare perdite di calcestruzzo e riduzioni significative di capacità resistente	Perdita di calcestruzzo e significativa riduzione della capacità portante

Le superfici delle strutture in cemento armato sono spesso segnate da quadri fessurativi di varia natura. Una regola generale per la loro valutazione suggerisce che i modelli casuali di fessure di piccola entità sono spesso insignificanti, mentre le fessure che corrono in direzioni definite con maggiori grandezze possono indicare una carenza strutturale.

Le fessure a trama irregolare (Pattern cracking) sono caratterizzate da aperture sottili sulla superficie del calcestruzzo. Queste generalmente derivano da una diminuzione del volume del materiale vicino alla superficie oppure un aumento del materiale in profondità. Questo tipo di fessure sono strutturalmente significanti se seguono l'andamento dell'armatura sottostante oppure se comportano la separazione del materiale calcestruzzo. La Figura 2.11 associata alla Tabella 2.6 fornisce delle utili nozioni relative alle più ricorrenti tipologie di quadri fessurativi.

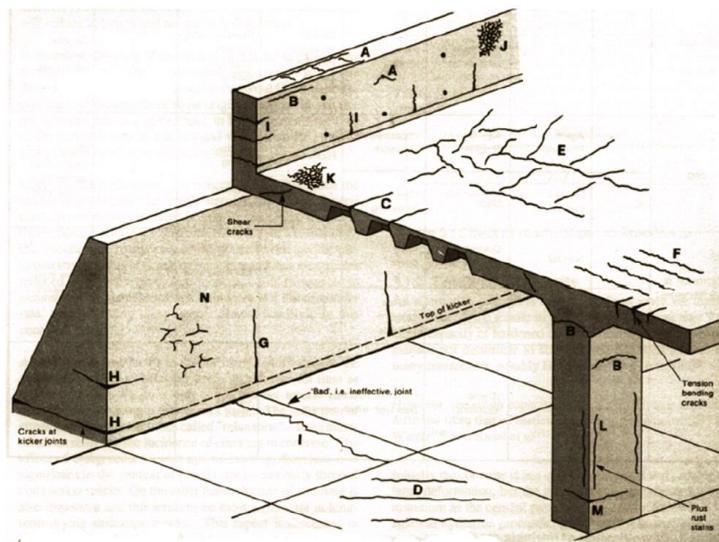


Figura 2.11 (13) [Non structural cracks in concrete]

Tabella 2.6 (13) [Non structural cracks in concrete]

Lettera	Tipo di fessura	Posizione	Localizzazione più comune	Cause primarie	Cause secondarie/fattori	Tempo di insorgenza
A	Assestamento plastico	In corrispondenza delle barre	Sezioni profonde	Acqua in eccesso	Condizioni di essiccazione rapida iniziale	Da 10 minuti a 3 ore
B		Arcuata	Sommità delle colonne			
C		Cambio di profondità	Piastre			
D	Ritiro plastico	Diagonale	Strade e lastre	Essiccazione rapida iniziale	Basso tenore d'acqua	Da 30 minuti a 3 ore
E		Casuale	Piastre in calcestruzzo armato			
F		In corrispondenza delle barre	Piastre in calcestruzzo armato			
G	Contrazioni termiche precoci	Vincoli esterni	Muri spessi	Generazione eccessiva di calore	Raffreddamento rapido	Dal primo giorno a tre/quattro settimane
H		Vincoli interni	Piastre spesse	Gradiente di temperatura eccessivo		
I	Ritiro da essiccazione a lungo termine		Lastre sottili e muri	Collegamenti insufficienti	Eccessivo ritiro e maturazione insufficiente	Qualche settimana o mese
J	Screpolatura	Contro casseforme	Calcestruzzo esposto al fuoco	Casseforme impermeabili	Mix design eccessivo	

K		Calcestruzzo liquido	Piastre	Sovraccarico	Maturazione insufficiente	Da un giorno a sette, a volte molto dopo
L	Corrosione delle barre	Naturale	Colonne e travi	Mancanza di copertura	Qualità del calcestruzzo scadente	Più di due anni
M		Cloruri	Calcestruzzo preconfezionato	Eccessivi cloruri		
N	Reazione alcali-aggregati		Luoghi umidi	Aggregati reattivi		Più di cinque anni

Le fessure singole continue con direzione e grandezza definita possono indicare una carenza strutturale. Esse sono di solito longitudinali, trasversali, diagonali, verticali o a spirale e spesso possono evolvere in lunghezza e profondità se la carenza strutturale non viene identificata e corretta (14) [Guide for visual Inspection of structural concrete buildings component].

Nelle travi, lesioni ortogonali all'asse di piccola entità (fessure minori ai limiti normati) non dovrebbero pregiudicare la sicurezza a rottura, vanno comunque tenute sotto controllo perché se esposte per lungo tempo ad ambienti aggressivi possono facilitare la corrosione delle barre e quindi diminuire la capacità portante.

Negli elementi strutturali verticali sono da considerare con attenzione le lesioni parallele all'asse, anche se di piccola ampiezza, perché potrebbero indicare fenomeni iniziali di schiacciamento. La situazione sarà meno grave se invece si riescono ad attribuire queste lesioni ad esempio ad aumenti di volume delle barre longitudinali, dovuti alla formazione di ossido con conseguente inizio dell'espulsione del copriferro.

Qualunque tipo di lesione, anche lieve, che si manifesti nei nodi è da valutare con accurata attenzione. Vale lo stesso per i fuori piombo.

Per quanto riguarda gli elementi a piastra, lesioni parallele ai traversi possono verificarsi per effetti di flessione differenziale, se le lesioni non si ripercuotono all'estradosso del solaio e quindi non c'è da temere una sconnessione dello stesso tale da pregiudicare la sua funzione di diaframma, allora lo schema statico originale della struttura si può ritenere non variato in maniera significativa. Occorre considerare con attenzione eventuali lesioni trasversali in corrispondenza dell'attacco dei traversi alle travi a spessore. Se si è innescata una lesione in tal punto e si riscontra l'impronta del traverso, è possibile che la continuità tra struttura principale e secondaria sia venuta meno, almeno in parte, e sia quindi opportuno predisporre delle puntellature provvisorie.

In caso in cui le lesioni assumano dimensioni maggiori bisogna assicurarsi che non vi sia verificata la plasticizzazione delle armature, che potrebbe aver portato ad esaurire in buona parte le risorse di duttilità locali delle sezioni interessate, provocando anche fenomeni di scorrimento acciaio/calcestruzzo ed eventuali limitati sbandamenti delle barre. Occorre anche porre attenzione alla possibilità che lesioni molto ampie abbiano eliminato alcuni meccanismi di trasmissione del taglio (ingranamento, effetto spinotto) e quindi abbiano ridotto significativamente la capacità delle travi di trasferire carico ai pilastri.

Vanno considerati adeguatamente anche i danni riscontrati su elementi che non fanno parte dell'organismo strutturale vero e proprio, perché anch'essi possono intervenire sul giudizio finale della sicurezza.

Nell'analisi di superfici in calcestruzzo armato bisogna essere in grado di riconoscere anche le forme di degrado attribuibili alla presenza dell'acciaio al suo interno. La corrosione è un fenomeno chimico che provoca il graduale deterioramento di un metallo per effetto di agenti esterni. In determinate condizioni ambientali alcuni metalli (come l'alluminio) reagiscono con l'ossigeno formando uno strato di ossido molto compatto, che funge da barriera protettiva, arrestando il processo corrosivo;

altri metalli (come il ferro) sono molto reattivi con l'ossigeno e le altre sostanze ossidanti e non trovano alcuna protezione sotto lo strato di ossido, consentendo al processo di corrosione di continuare fino al completo consumo del metallo.

A seconda del tipo di reazione che avviene tra metallo e gli agenti esterni, si parla di corrosione "chimica" o "elettrolitica". Nella prima la corrosione avviene per contatto diretto e reazione chimica con l'agente esterno. La seconda, invece, avviene quando siamo in presenza di due metalli (con potenziale elettrochimico diverso) ed un elettrolita (come l'umidità): in queste condizioni si creano delle correnti galvaniche che tendono a far corrodere il metallo meno nobile.

La Tabella 2.7 fornisce un supporto di diagnosi per difetti e deterioramenti riscontrabili in strutture in cemento armato.

Tabella 2.7 Diagnosi di difetti e deterioramento (15) [Handbook on repair and rehabilitation of rcc buildings]

Causa	Sintomi			Età di insorgenza	
	Fessurazione	Distacchi	Erosione	Breve termine	Lungo termine
Carenza strutturale	Si	Si	-	Si	Si
Corrosione delle armature	Si	Si	-	-	Si
Attacco chimico	Si	Si	Si	-	Si
Danno da gelo	Si	Si	Si	Si	-
Danno da fuoco	Si	Si	-	Si	-
Reazioni interne	Si	Si	-	-	Si
Effetti termici	Si	Si	-	Si	Si
Ritiro	Si	-	-	Si	Si
Scorrimenti	Si	Si	-	-	Si
Essiccazione rapida	Si	-	-	Si	-
Ritiro plastico	Si	-	-	Si	-
Danno fisico	Si	Si	Si	Si	Si

Le lesioni dovute a problemi fondali, spesso compaiono entro i primi cinque anni di vita dell'opera e possono proseguire sia con andamento costante che variabile nel tempo. La variabile nel tempo delle manifestazioni di faticenza è prerogativa ma non esclusiva, dei terreni coerenti mentre nei terreni incoerenti, generalmente i cedimenti sono immediati, tanto che si esauriscono, a meno di dilavamenti successivi, durante la costruzione dell'opera.

Se il complesso costruttivo non è interessato da frane, il movimento delle sue fondazioni è nella maggior parte dei casi verticale e/o con una più lieve componente orizzontale. Quando i moti sono verticali ed uniformi per tutta la fondazione della struttura, questa non evidenzia fessurazioni. È ben chiaro come spesso è il cedimento differenziale più che l'assoluto a provocare i dissesti per le opere. Le lesioni in una struttura in elevazione compaiono, quando la struttura fondale non è sufficientemente rigida per assorbire la differenza degli assestamenti del terreno su cui insiste.

Nella deformazione anticlinale (vedi Figura 2.12) si formano lesioni a V che tendono ad aprirsi verso l'alto; in quelle sinclinali si hanno nella parte alta delle fratture di schiacciamento (4) [Emanuele Massacci. *Manuale per i dissesti statici: cedimenti e soluzioni tecniche*. Notavek 201].

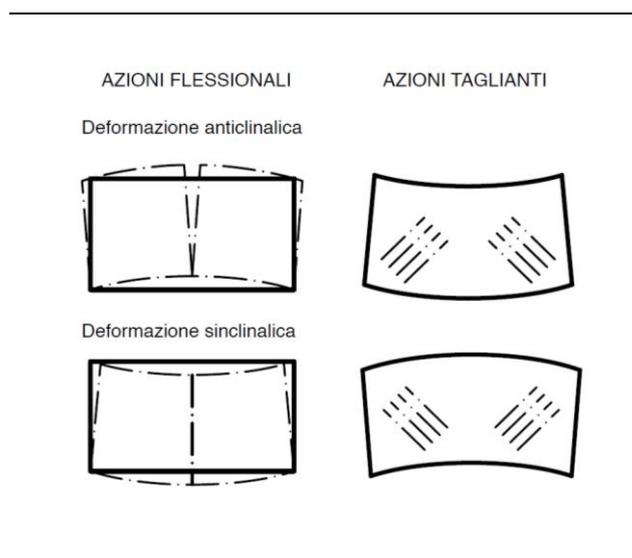


Figura 2.12. Fessurazioni tipiche di sintomi flessionali e taglianti dovuti a cedimenti differenziali delle strutture fondali (4) [Emanuele Massacci. *Manuale per i dissesti statici: cedimenti e soluzioni tecniche*. Notavek 201]

Un quadro fessurativo tipico di un dissesto di traslazione verticale, può essere dovuto a varie cause perturbatrici come: eccessiva compressibilità del piano di posa; schiacciamento delle strutture di base; carichi che aumentano le tensioni specifiche di base; scorrimento eccessivo di pali di fondazione. Perciò, se ogni lesione elementare corrisponde ad un unico dissesto elementare, non è vero che ad ogni dissesto elementare corrisponde una unica causa perturbatrice; spesso invece, queste ultime non intervengono isolatamente ma variamente combinate. Solo lo studio accurato di tutto il quadro fessurativo e le ricerche sperimentali sulla qualità dei materiali in opera, sulle sollecitazioni effettive cui sono soggette le strutture, sull'evolversi nel tempo del fenomeno, possono fornire valide indicazioni sulle cause perturbatrici e sul sistema di consolidamento, da progettare sempre in abbondanza, al quale dare preferenza. Il tecnico deve perciò coordinare le sue indagini e studi secondo il seguente ciclo: esaminare le strutture portanti; rilevare il quadro fessurativo nella sua interezza; riportare in grafici tutte le lesioni osservate; definire la natura del dissesto; eseguire prove sperimentali per definire l'evolversi del fenomeno nel tempo, ricercare i coefficienti di sicurezza degli elementi più dissestati, determinare le caratteristiche meccaniche dei materiali in opera; ricercare le cause perturbatrici; studiare le opere di rafforzamento (16) [*Collaudo e risanamento delle strutture*, Bruno Barbarito, Utet Libreria].

2.3. Forme di degrado

Il degrado dei materiali può essere causato da fenomeni chimici e da aggressioni fisico-meccaniche. Nelle opere murarie le forme chimiche di degrado sono dovute all'interazione tra i materiali originali e umidità con presenza di solfati. I prodotti che si possono originare per effetto di queste reazioni sono l'ettringite (solfo alluminato di calce) e la thaumasite (solfo silicato di calcio). Essi si presentano macroscopicamente attraverso un rigonfiamento del materiale originale che può arrivare allo sfaldamento o, addirittura, allo spappolamento del materiale stesso.

Per quanto riguarda il conglomerato cementizio armato le cause chimiche di degradazione consistono nell'azione che alcune sostanze aggressive (solfati, solfuri, cloruri, anidride carbonica, ecc.) possono esercitare sui costituenti della pasta di cemento, alterandone le proprietà, così da produrre un decadimento nelle prestazioni. Tali sostanze possono provenire dall'ambiente in cui il calcestruzzo lavora (acque naturali contenenti solfati o anidride carbonica aggressiva, ambienti industriali, liquidi di varia natura) oppure possono essere contenute nell'interno del materiale a causa di una scelta non oculata degli inerti (gessosi o contenenti silice reattiva).

In un calcestruzzo confezionato con aggregati reattivi si ha un rigonfiamento localizzato degli stessi che si manifesta nel tempo (generalmente non prima di 6 mesi dall'esecuzione delle opere) con fessurazioni di forma irregolare dalle quali fuoriesce un liquido gelatinoso e biancastro (silicato sodico). Alla fessurazione segue solitamente il distacco superficiale del calcestruzzo a causa dell'azione dirompente provocata dal rigonfiamento degli aggregati. Nel caso di strutture massive contenenti una quantità rilevante di aggregato reattivo distribuito con omogeneità nel conglomerato, si crea una tipica fessurazione diffusa a carta geografica o a ragnatela (Figura 2.13). Se gli aggregati reattivi sono pochi e situati in prossimità della superficie esposta all'umidità, il degrado si manifesta con il sollevamento e successiva espulsione di una piccola area di calcestruzzo che circonda l'inerte reattivo (pop-out).

Per strutture armate esposte all'aria ricca di anidride carbonica si ha la carbonatazione del calcestruzzo e la corrosione dei ferri di armatura.

Nelle strutture intelaiate l'ossidazione dei ferri si evidenzia con lesioni in corrispondenza delle barre di armatura ed espulsione del copriferro (Figura 2.14).

L'attacco solfatico si manifesta attraverso un rigonfiamento esagerato del conglomerato e la superficie assume l'aspetto indicato in Figura 2.15.

La carbonatazione è la formazione di un sale insolubile, carbonato di calce, prodotto dalla reazione al contatto con il gas carbonico contenuto nell'aria con la superficie del cemento. La carbonatazione se da una parte indurisce la superficie del calcestruzzo e ne riduce la porosità, dall'altro lato, diminuisce l'alcalinità naturale del cemento che ha lo scopo di proteggere l'armatura. In altri termini la carbonatazione mangia la calce e rende l'intorno più acido, lasciando l'armatura in un ambiente più aggressivo e corrosivo.

L'azione dei cloruri (di sodio o di calcio) sui ferri di armatura si esplica con un effetto incisivo e localizzato (pitting) che consiste nella rimozione dello strato di ossido ferrico, compatto e protettivo (passivante) che in presenza di cloruri diventa incoerente e consente l'ulteriore ossidazione del ferro.



Figura 2.13 Reazione alcali-aggregato

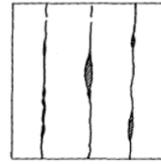


Figura 2.14 Corrosione delle barre

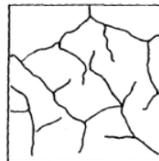


Figura 2.15 Attacco solfatico

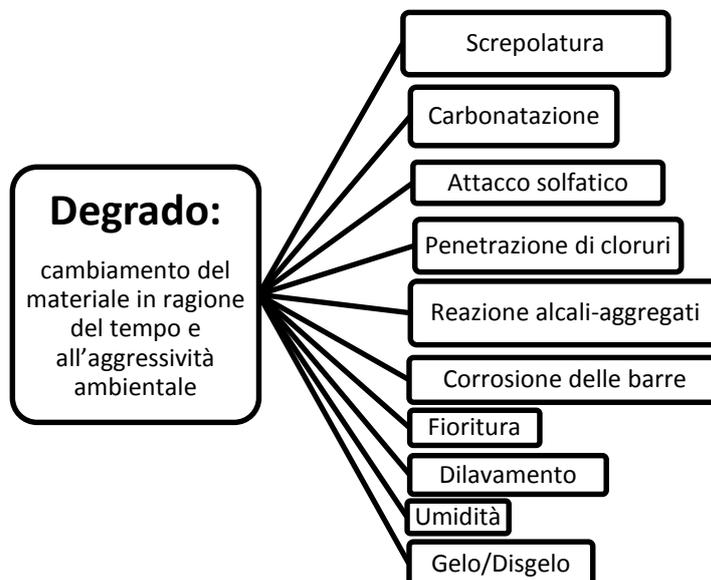


Figura 2.16 Forme di degrado del calcestruzzo

2.4. Strumenti moderni come supporto alle operazioni di ispezione. I droni

Le usuali tecniche di rilievo (Figura 2.17) possono essere migliorate sfruttando le maggiori prestazioni offerte dalle strumentazioni più moderne come ad esempio l'ortofotografia, il laser scanner, i software per il trattamento delle immagini, tecniche varie NDT (non destructive testing), e quindi impostando nuove strategie di rilievo.

Un contributo importante per affinare le attività di ispezione e per aumentare la prossimità dei rilievi, può essere ottenuto dall'impiego dei sistemi a pilotaggio remoto (I droni), che consentono appunto di visionare parti di strutture difficilmente raggiungibili (per esempio molto in alto) o nascoste, delle quali spesso non è chiara né la geometria, né soprattutto lo stato di conservazione (esempio parti scatolate di impalcati a piastra ortotropa in acciaio).

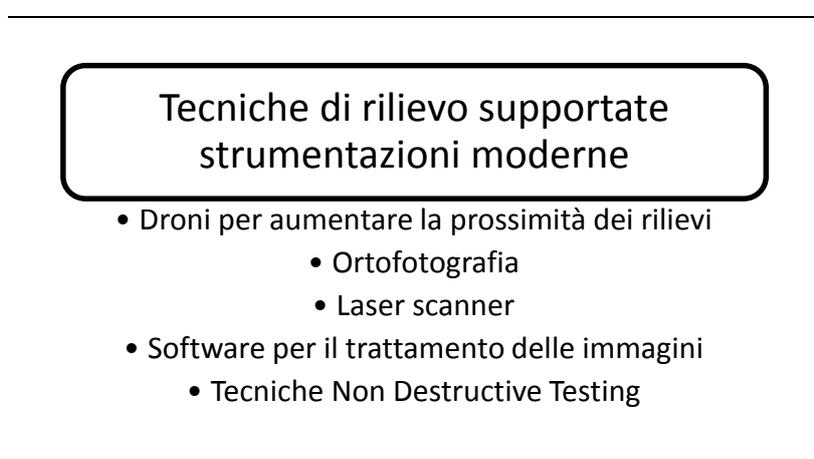


Figura 2.17 Tecniche di rilievo supportate da strumentazioni moderne

La parola “drone” non è altro che il nome comune, e forse improprio, per definire una speciale categoria di oggetti volanti: gli Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR). Così come suggerisce la definizione, si parla di dispositivi di varie dimensioni capaci di librarsi in cielo senza necessità di un pilota a bordo, che rimane a terra (o su un veicolo adiacente) armato di radiocomando per dirigerne i movimenti. Essi hanno forme e dimensioni mediamente contenute (per spiccare il volo, il dispositivo deve essere sufficientemente leggero) sul mercato si trovano tre grandi famiglie di drone:

- **Struttura a eliche:** si caratterizza per la presenza di una o più eliche, solitamente montate su bracci estraibili, che permettono al drone di comportarsi come un elicottero. Possono mantenere ferma la posizione a mezz'aria, effettuare virate repentine, volare in direzione obliqua;
- **Struttura planare:** più simili agli aeroplani che agli elicotteri, questi velivoli non sono dotati di eliche, bensì di grandi ali. Servono soprattutto per le medie distanze, perché possono sfruttare correnti e flussi d'aria;
- **Ibridi:** device non solo pensati per volare, ma anche per muoversi sul terreno grazie alla presenza di due o quattro ruote motrici. Allo stesso modo, esistono droni capaci di effettuare piccoli salti, così da superare agilmente scale o altri ostacoli.

I sistemi a pilotaggio remoto consentono un ampliamento della possibilità di ispezione e di rilievo, risolvendo il problema dell'ispezione ravvicinata di zone di difficile accesso e consentono inoltre di

inquadrare l'opera a diverse scale, dal rilievo zenitale di tutto il ponte, all'ispezione locale di un particolare costruttivo aprendo così la strada a strategie di indagine innovative.

Il ponte è un sistema che appartiene ad un contesto geomorfologico avente di solito dimensioni molto maggiori di quelle del ponte stesso. Rapportato al ciclo di vita del ponte (100:200 anni) il bacino geomorfologico che lo contiene subisce variazioni che possono influire sul suo comportamento statico. I materiali costituenti il ponte sono soggetti a processi di degrado più o meno veloci. I dispositivi cinematici (appoggi, giunti, sistemi convogliamento acque) sono soggetti a riduzioni di funzionalità che condizionano il corretto funzionamento del ponte e ne accelerano il degrado. L'attività di ispezione è un'azione che si inquadra nel tempo e non può limitarsi a constatazioni occasionali. Ogni ispezione deve fornire le maggiori informazioni possibili sullo stato del ponte a quel determinato istante di vita. La serie storica di queste informazioni consente di seguire l'evoluzione dello stato dell'opera (perdita di prestazioni).

La scala dei rilievi è costituita da vari livelli (Figura 2.18). Il primo è costituito dall'assetto geomorfologico in un intorno sufficientemente ampio del ponte. Andranno quindi predisposti rilievi relativi alla corografia e alla stabilità dei suoli e/o dei versanti. Se si tratta di una struttura di attraversamento di un corso d'acqua andranno rilevati i raccordi spondali, la configurazione dell'alveo, la corrente principale, secche sabbioni, depositi da trasporto solido e le linee di flusso.



Figura 2.18 Livelli di rilievo

Dai rilievi di questo primo livello si possono evincere ad esempio eventuali distorsioni. Il ponte o i sottoinsiemi del ponte (campate e pile di competenza) possono essere visti come oggetti contenuti in un involuppo. La misurazione della posizione dei punti notevoli di tale involuppo (es. se fosse un prisma, la posizione degli spigoli) consente di cogliere se l'opera nel suo complesso è soggetta a fenomeni distorcenti (es. rotazione relativa tra i riferimenti posti sulle spalle, moti relativi tra le pile in alveo e un riferimento fisso, moto relativo tra le imposte di un ponte ad arco).

Il rilievo effettuato con l'ausilio di droni non solo consente di effettuare l'ispezione, ma soprattutto di introdurre una correlazione con il contesto esterno.

Le attività di rilievo devono avere cadenza temporale ben scandita. Le variazioni di assetto dell'alveo possono essere svolte ad esempio ogni 5 anni. L'uso di droni semplifica e rende più accessibile l'effettuazione di riprese aeree da diverse prospettive come: riprese azimutali locali (pila per pila) del flusso a monte e a valle di una pila in alveo, riprese angolate e/o stereoscopiche per la misurazione del rigurgito ed il monitoraggio dell'accumulo stagionale di detriti da trasporto solido intercettati dalle pile e relative modificazioni del flusso.

In linea generale vanno sempre eseguiti controlli di assetto relativi alla verticalità delle pile e spalle e l'orizzontalità o regolarità della livelletta stradale. L'uso di droni consente più ampie valutazioni rendendo possibile il rilievo di stati distorcenti di assieme sulla scala dell'intera opera.

Il secondo livello di rilievo riguarda l'esame dell'opera per componenti. Esso va quindi specializzato alla tipologia di ponte: ponti a travata, ad arco, strallati, sospesi. In questo caso l'uso di aeromobili a pilotaggio remoto consente un ampliamento senza precedenti della possibilità di ispezione e di rilievo. In particolare essi risolvono il problema dell'ispezione ravvicinata di zone di difficile accesso.

Prendendo ad esempio il caso di ponte a struttura metallica in profili chiodati si ha assenza di spazi che consentano ispezione/pulizia/manutenzione/verniciatura tra un elemento e un altro. In queste zone si innescano e si sviluppano tra gli elementi composti per chiodatura, stati corrosivi importanti con formazione di placche di ruggine interstiziale. Tali placche continuano ad espandersi nel tempo. L'espansione dei prodotti di ossidazione (ruggine) dà luogo a rigonfiamenti tra una chiodatura e la successiva e distorce in modo permanente i profili metallici.

I droni costituiscono un buon supporto anche durante le ispezioni delle selle Gerber, un particolare costruttivo presente in molti ponti in CAP costruiti tra gli anni 60 e 80 con tipologia cantilever (stampelle con sbalzo, collegate da travi tampone). Quasi tutte le facce visibili hanno segni di colature piovana e di piattaforma. Molte presentano zone di ristagno. Queste superfici si rivelano ammalorate a vario grado mostrando: espulsioni locali di copriferro; perdite di tutto il copriferro; disgregazione superficiale e degli spigoli di calcestruzzo; segni visibili di corrosione delle armature.

Un fenomeno diffuso è un carente sistema di convogliamento, raccolta e smaltimento delle acque meteoriche e di piattaforma: tubi di scarico troppo corti o diretti in modo errato; tubi di scarico totalmente mancanti (staccati o rotti); imbocchi dei tubi mal sigillati, con sversamento dei liquidi all'esterno e non all'interno dei tubi, formazione di zone di ristagno in sezione e/o particolari sensibili (gole delle selle Gerber e relative armature, appoggi, giunti). Questi fenomeni provocano azioni di dilavamento continue e con alternanze (bagnato/asciutto) deleterie per le superfici in calcestruzzo.

Per effetto delle azioni di dilavamento accennate in precedenza, in molte sezioni di mezzeria si riscontrano segni visibili di colature di ruggine e/o di importanti distacchi di copriferro con ferri di armatura lenta corrosi in vista. In certi casi sono in vista anche le guaine che racchiudono i fili dei cavi di precompressione. In alcuni ponti il danno è generalizzato richiedendo massicci interventi di rinforzo con l'applicazione di piattabande di acciaio lungo i correnti inferiori di molte delle travi precomprese.

I droni permettono inoltre una più appropriata ispezione degli apparecchi di appoggio. La loro efficienza è fondamentale per un comportamento regolare del ponte. Diversamente, un malfunzionamento degli appoggi darebbe luogo a stati di sollecitazione anomali e quindi a danni. Ad esempio, se gli appoggi trattengono longitudinalmente gli estremi di una trave in CAP. Questa, per effetto del ritiro, viscosità e raffreddamento termico, subisce un regime di decompressione/trazione che porta all'insorgere di fessure ad andamento subverticale con tutte le successive conseguenze associate.

Il contributo di aeromobili a pilotaggio remoto consente dunque l'inquadramento delle ispezioni a diverse scale e apre la via a strategie di indagine innovative, permette l'ispezione ravvicinata di zone di difficile accesso e dunque favorisce un ampliamento delle possibilità di analisi dei Bridge Management System (17) [Pier Giorgio Malerba (2015). *Ispezioni dei ponti: Contributo dei sistemi di rilievo a pilotaggio remoto*].

2.5. Metodologie esistenti di valutazione delle condizioni

All'interno dei BMS (Bridge Management System), durante la fase di raccolta dei dati dell'ispezione visiva, lo stato di conservazione di ciascuna struttura della rete, viene caratterizzata attribuendo dei giudizi qualitativi. Ciò viene effettuato per mezzo del **Condition Rating mark** (indicatore numerico che descrive la condizione di una struttura che fa parte di una certa popolazione e viene calcolato seguendo un metodo standard che si basa sui dati ottenuti durante l'ispezione visiva).

Alcuni BMS prevedono l'individuazione, la valutazione dell'estensione e intensità dei difetti, altri invece associano a ciascun elemento un indice qualitativo relativo alla condizione in cui ogni elemento versa.

Di seguito si riporta una breve descrizione di alcuni metodi esistenti di valutazione delle condizioni strutturali e successivamente si effettuerà un confronto tra essi.

Dallo studio bibliografico è emerso che nessun metodo esistente considera la localizzazione del danno all'interno dell'elemento in cui esso si manifesta, pur essendo esso un parametro fondamentale per una corretta diagnosi in quanto strettamente legato al cinematiso di collasso.

2.5.1. Austria

Nel 1987 il Ministero Austriaco per gli affari economici ha emesso delle "Procedure per la valutazione delle condizioni dei ponti".

In questo documento viene descritta la procedura da seguire per ottenere un indicatore numerico rappresentativo dello stato del ponte (il "Condition Rating mark").

Esso rappresenta una valutazione numerica di tutti i tipi di danno che sono stati rilevati durante l'ispezione visiva e tiene conto della loro gravità ed estensione.

La condizione di una struttura da ponte viene valutata mediante l'impiego della seguente formula generale:

$$\text{Condition Rating Mark} = \sum G_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot K_{4i}$$

Dove:

G_i : tipo di danno. G_i può variare da 1 a 5 in funzione delle severità del danno;

K_{1i} : entità del danno. È espresso da un valore numerico variabile tra 0 e 1. Può essere descritto dalle parole: pochi o alcuni, frequenti e molto frequenti o grandi dimensioni. L'entità non è mai quantificata per mezzo di dimensioni del danno (lunghezza, area, ecc.);

K_{2i} : intensità del danno. È espresso da un valore numerico variabile tra 0 e 1. Può anche essere descritto con le parole: poco o insignificante, medio, pesanti e molto pesanti. La descrizione di intensità è di solito associata con la descrizione del danno (es. larghezza delle fessure ecc.);

K_{3i} : importanza dell'elemento strutturale. È espressa da un valore numerico variabile tra 0 e 1. I componenti strutturali sono classificati come primari, secondari e altre parti;

K_{4i} : urgenza di intervento. È espressa da un valore numerico variabile tra 0 e 10 e dipende dal tipo, gravità e rischio di collasso della struttura o di una sua parte;

I valori che può assumere il Condition Rating mark sono variabili tra 0 e 70.

In relazione al valore che si ottiene, la struttura viene classificata in una delle sei classi di danno riportate in Tabella 2.8.

Tabella 2.8 Classe di danno e valore del Condition Rating mark

Damage class	Definition	Condition Rating value
1	No or very little deterioration	0-3
2	Little deterioration	2-8
3	Medium to severe deterioration	6-13
4	Severe deterioration	10-25

5	Very severe deterioration	20-70
6	Very severe or total deterioration	>50

2.5.2. Danimarca

La metodologia utilizzata consiste nel valutare le condizioni per 15 tipologie standard di elementi (Figura 2.19), per ciascuna di queste componenti si assegna un valore compreso tra 0 e 5 (Figura 2.20) in funzione dello stato di degrado riscontrato.

Component	Description
1	Bridge in general
2	Wing walls (wing walls and possible retaining walls)
3	Slopes (slopes with slope protection, adjacent to the abutments and wing walls)
4	Abutments (abutment structure with back wall, bridge seat, visible parts of the footings)
5	Piers
6	Bearings (bearings on abutments and piers)
7	Slab
8	Waterproofing
9	Girders/beams (main girders, cross beams, diaphragms, bracings,...)
10	Parapet/railing (parapets, guard rails and railings)
11	Bridge surface (normally the surface between the curbs)
12	Crossing passage
13	Expansion joints (all components of expansion joints including special overlays adjacent to the joint)
14	Drainage system
15	Other elements (bridge components, which are not included in the previous mentioned 12 components)

Figura 2.19 Tipologie di elementi

category	Definition
0	No or insignificant damage
1	Small damage but no need of repair except routine maintenance
2	Some damage, repair needed when convenient. Component is still functioning as originally designed
3	Significant damage, repair needed very soon
4	Serious damage, repair needed at once
5	Ultimate damage, total failure or risk of total failure of the component

Figura 2.20 Classe di degrado

Il Condition Rating mark del ponte si assegna in base ai punteggi delle sue componenti strutturali. Esso coincide con la valutazione più alta assegnata ai suoi elementi, ma andrà considerato anche: l'importanza strutturale delle componenti danneggiate, il tipo di danno e la sua intensità nel tempo, l'effetto del danno sul flusso del traffico e la sicurezza dell'utente.

Il genere il Condition Rating mark di un ponte non dovrebbe essere superiore al valore assegnato alla componente più deteriorata e non deve essere inferiore al valore assegnato a uno qualsiasi dei componenti principali, es. pila.

2.5.3. Francia

In Francia si utilizza il metodo IQOA (Image Qualité des Ouvrages d'Art) che si basa su una classificazione delle strutture destinate a fornire un indicatore della condizione media di tutte le strutture, sulla base della valutazione di ogni singola struttura.

La struttura viene decomposta nelle sue parti costitutive, ognuna delle quali viene classificata. L'indicatore globale adottato per valutare la condizione della struttura è determinato in base al posizionamento della struttura in una delle categoria di Figura 2.21:

Score	Definition
1	Structure in good apparent condition requiring only <i>routine maintenance</i>
2	Structure in good condition or with some minor defects, requiring <i>specialized maintenance</i> No urgent action
2E	Equipment failures or minor structural damage. Urgent action required
3	Structural deterioration requiring <i>repair work</i> No urgent action
3U	Serious structural deterioration requiring <i>repair work</i> Urgent action required
NA	Not appraised

Figura 2.21 Classi di deterioramento della struttura

I difetti o disturbi già esistenti sono registrati in forma verbale durante l'ispezione visiva e conducono ad una valutazione delle parti dell'opera d'arte. La classificazione globale di una struttura in una data categoria corrisponde al peggior punteggio di una delle sue parti componenti. In funzione dello stato dell'opera che scaturisce dall'operazione di classificazione, saranno intraprese le azioni di manutenzione e riparazione ordinaria o straordinaria.

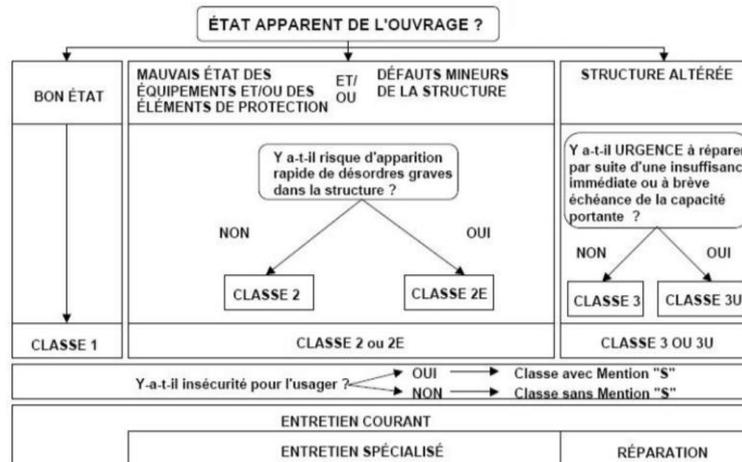


Figura 2.22 Processo di valutazione

2.5.4. Germania

Viene fatta una valutazione qualificata per ciascun difetto o effetto di danno. Ogni avvenimento deve essere valutato in base alle sue conseguenze per la sicurezza stradale, la stabilità e la durata nel tempo e vanno qualificati utilizzando termini come: piccolo, medio, grande. Dalle matrici di valutazione delle condizioni, riportate in Figura 2.23, viene valutato ciascun danno in rispetto alla stabilità (S), sicurezza del traffico (V) e la durabilità (D).

D=0		D=1	
4	4.0 4.0 4.0 4.0 4.0	4	4.0 4.0 4.0 4.0 4.0
3	3.0 3.2 3.4 3.6 4.0	3	3.1 3.3 3.5 3.6 4.0
S 2	2.1 2.2 2.3 2.7 4.0	S 2	2.2 2.3 2.4 2.8 4.0
1	1.2 1.3 2.1 2.6 4.0	1	1.5 1.7 2.2 2.7 4.0
0	1.0 1.1 2.0 2.5 4.0	0	1.1 1.3 2.1 2.6 4.0
	0 1 2 3 4		0 1 2 3 4
	V		V
D=2		D=3	
4	4.0 4.0 4.0 4.0 4.0	4	4.0 4.0 4.0 4.0 4.0
3	3.2 3.4 3.6 3.8 4.0	3	3.3 3.5 3.7 3.9 4.0
S 2	2.3 2.5 2.6 2.9 4.0	S 2	2.8 3.0 3.1 3.2 4.0
1	2.2 2.3 2.4 2.8 4.0	1	2.7 2.8 2.9 3.0 4.0
0	2.0 2.1 2.2 2.7 4.0	0	2.5 2.6 2.7 2.8 4.0
	0 1 2 3 4		0 1 2 3 4
	V		V
D=4			
4	4.0 4.0 4.0 4.0 4.0		
3	3.6 3.7 3.8 4.0 4.0		
S 2	3.3 3.5 3.6 3.7 4.0		
1	3.2 3.3 3.4 3.5 4.0		
0	3.0 3.1 3.2 3.3 4.0		
	0 1 2 3 4		
	V		

Figura 2.23 Matrici di valutazione

Il Condition Rating mark di una struttura Z_{ges} è determinata mediante l'applicazione di un metodo a tre stati di valutazione del danno: si usano i parametri S^V (per la sicurezza del traffico), S^S (stabilità), e S^D (durabilità), tiene in considerazione valutazioni come l'estensione totale di danno (U) e il numero di manifestazioni del danno (n).

$$Z_{ges} = f(S^V, S^S, U, n)$$

La struttura viene divisa in otto parti principali (Figura 2.24).

Main part of the bridge	Description	Main constituent parts
1	Superstructure	Slabs, voided slabs, girders, box girders, transverse beams, etc...
2	Substructure	Foundations, abutments, piers, columns
3	Bearings	Roller bearings, fixed bearings, reinforced elastomeric bearings, pot bearings, etc...
4	Expansion joints	Modular joints, rubber joints, waterproofing membrane, etc...
5	Bridge surface	Carriage-way, sidewalk, curbs, sealing joints, etc...
6	Safety structures	Safety barriers, parapet walls, etc...
7	Equipment/railings	Railings, drainage systems, signs, etc...
8	Moving structures	Lifting bridge, rolling bridge, etc...

Figura 2.24 Suddivisione della struttura in gruppi di componenti

Nella valutazione del Condition Rating mark per gruppi di componenti Z_{BG} si stabilisce un numero della condizione Z_1 per ciascun indice di danno. Il valore di Z_1 è corretto tramite il fattore ΔZ_1 che prende in considerazione l'estensione totale del danno (U) come indicato di seguito:

$$U = \text{"small"} \rightarrow \Delta Z_1 = -0,1$$

$$U = \text{"medium"} \rightarrow \Delta Z_1 = 0$$

$$U = \text{"large"} \rightarrow \Delta Z_1 = +0,1$$

Il Condition Rating mark del gruppo di componenti Z_{BG} è basato sul massimo valore di Z_1 che viene poi corretto dal fattore ΔZ_2 che prende in considerazione la frequenza di manifestazione del danno (n) all'interno del gruppo di componenti. Il valore di ΔZ_2 per i gruppi di componenti di sottostrutture sono:

$$n < 5 \rightarrow \Delta Z_2 = -0,1$$

$$5 \leq n \leq 15 \rightarrow \Delta Z_2 = 0$$

$$n > 15 \rightarrow \Delta Z_2 = +0,1$$

Per gli altri gruppi di componenti:

$$n < 3 \rightarrow \Delta Z_2 = -0,1$$

$$3 \leq n \leq 5 \rightarrow \Delta Z_2 = 0$$

$$n > 5 \rightarrow \Delta Z_2 = +0,1$$

Il Condition Rating mark della struttura (Z_{ges}) è basato sul più alto valore dei gruppi di componenti ($\max Z_{BG}$) corretto dal ΔZ_3 che prende in considerazione l'estensione del danno nei vari gruppi di componenti:

$$\text{Da 1 a 3 gruppi di componenti danneggiati} \rightarrow \Delta Z_3 = -0,1$$

$$\text{Da 3 a 7 gruppi di componenti danneggiati} \rightarrow \Delta Z_3 = 0$$

$$\text{Più di 7 gruppi di componenti danneggiati} \rightarrow \Delta Z_3 = +0,1$$

(Valori intermedi di ΔZ_3 vanno interpolati linearmente).

Nella tabella seguente si riportano le descrizioni delle classi di condizione (Figura 2.25):

Rating	Description of condition and actions required
1.0 - 1.4	Very good structural condition. The stability, durability and safe use of the structure are assured. Routine maintenance is required.
1.5 - 1.9	Good structural condition. The stability and safe use of the structure are assured. The durability of the structure might be impaired slightly in the long-term. Routine maintenance is required.
2.0 - 2.4	Satisfactory structural condition. The stability and safe use of the structure are assured. The durability of the structure may be impaired considerably in the long-term. It is possible that the proliferation of damage or the occurrence of consequential damage will, in the long-term, lead to a considerable reduction in stability and/or safety or structural condition. Routine maintenance is required. Repair work is required in the medium-term. Reconstruction works and/or the installation of warning signs to help maintain user safety might be necessary in the short-term.
2.5 - 2.9	Temporarily satisfactory structural condition. The stability of the structure is assured. Traffic safety may be impaired. The durability of the structure might be impaired considerably. It can be expected that the proliferation of damage or the occurrence of consequential damage will, in the long-term, lead to a considerable reduction in stability and/or safety or structural condition. Routine maintenance is required. Repair work is required in the short-term. Reconstruction works and/or the installation of warning signs to help maintain user safety might be necessary in the short-term.
3.0 - 3.4	Critical structural condition. The stability and/or user safety of the structure are impaired. The durability of the structure might no longer be assured. The proliferation of damage or the occurrence of consequential damage may reduce stability and/or user safety in the short-term. Routine maintenance is required. Repair work is required immediately. Reconstruction works and/or the installation of warning signs to help maintain user traffic safety and/or restrictions on use may be required as a matter of urgency.
3.5 - 4.0	Inadequate structural condition. The stability and/or user safety of the structure are considerably impaired or threatened. The durability of the structure might no longer be assured. The proliferation of damage or the occurrence of consequential damage may threaten stability and/or user safety in the short term, or lead to irreversible deterioration of the structure. Routine maintenance is required. Repair work or replacement is required immediately. Reconstruction works, the installation of warning signs to help maintain user safety and/or restrictions on use may be necessary as a matter of priority.

Figura 2.25 Classi di deterioramento e descrizione

2.5.5. Norvegia

Il grado di danno è misurato mediante una scala numerica utilizzata per dare una valutazione tecnica dell'entità del danno, per stabilire se le attività di manutenzione devono essere eseguite o meno, e se sì, con quale tempestività. Nella Figura 2.26 è indicato il sistema di Condition Rating mark utilizzato in Norvegia.

Code	Description
1	Slight damage/deficiency, no action required
2	Medium damage/deficiency, action needed during next 4 - 10 years
3	Serious damage/deficiency, action during the next 1-3 years
4	Critical damage/deficiency, immediate action required or within ½ year at the latest
9	Not inspected

Figura 2.26 Entità del danno

L'impatto del danno è rappresentato da una lettera (Figura 2.27) usata per indicare le conseguenze che i danni potrebbero avere su ponte, utenti e/o ambiente.

Code	Description of consequence
B	Damage/deficiency threatening load-carrying capacity
T	Damage/deficiency threatening user (traffic) safety
V	Damage/deficiency that may increase maintenance costs
M	Damage/deficiency that may affect the environment and/or aesthetics

Figura 2.27 Conseguenze che il danno può comportare

Nel "Inspections handbook for bridges" è descritta la modalità di intervento di manutenzione in base al grado di danno che può essere:

- Grado di danno 1: la condizione può essere accettata senza prevedere intervento di manutenzione;
- Grado 2-4: la condizione richiede un intervento a breve o a lungo termine.

2.5.6. Slovenia

Il Condition Rating mark della struttura è calcolato sommando le valutazioni di ogni singolo elemento costituente il ponte (18) [J. Appleton & Co. *Strategies for testing and assessment of concrete structures*. CEB Bulletin d'information n°243, May 1998].

$$\text{Rating Function} = R = \sum V_D = \sum B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot K_{4i}$$

R: Funzione di valutazione;

V_D : Valore del tipo di difetto;

B_i : Valore di base associato al difetto di tipo "i", che esprime l'effetto potenziale del danno tipo "i" sulla sicurezza e/o durabilità della componente osservata. Varia tra 1 e 4;

K_{1i} : Fattore dell'elemento strutturale, che fa parte di un macroelemento strutturale, in cui compare il tipo di difetto "i", rappresenta l'effetto dell'elemento sulla sicurezza e /o durabilità generale del macroelemento;

K_{2i} : Fattore indicante l'intensità/grado del difetto tipo "i";

K_{3i} : Fattore che considera l'estensione di propagazione del difetto tipo "i" sull'intero elemento o su tutti gli elementi dello stesso tipo;

K_{4i} : Fattore che sottolinea l'urgenza di un intervento nel caso in cui il tipo di danno "i" stia mettendo immediatamente a repentaglio la sicurezza dell'elemento o degli utenti.

$$\text{Condition Rating Mark} = Rc = \left(\frac{\sum V_D}{\sum V_{D,ref}} \right) \cdot 100$$

$\sum V_D$: Somma effettiva dei valori di difetto calcolati per la struttura o una sua parte (es. macroelemento del ponte), legata ai tipi di difetto rilevati (K_{2i} K_{3i} K_{4i} come assegnati durante l'ispezione);

$\sum V_{D,ref}$: Somma dei valori di difetto di riferimento ottenuta considerando tutti i tipi di danno, tra quelli elencati, che possono potenzialmente verificarsi nella struttura osservata o in una sua parte, moltiplicata per valori unitari dei valori di intensità ed estensione ($K_{2i}=K_{3i}=2$, $K_{4i}=1$);

$$\sum V_D = \sum_{m=1}^k K_{im} \cdot M_m$$

k = numero di elementi "m" all'interno della struttura osservata;

$$\sum V_{D,ref} = \sum_{m=1}^k K_{im} \cdot M_{m,ref}$$

$$M_m = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot K_{4i}$$

n = numero di tipi di difetti "i" rilevati e valutati nell'elemento "m";

$$M_{m,ref} = \sum_{i=1}^t B_i \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot K_{4i}$$

t = numero totale dei potenziali tipi di difetto, tra quelli elencati, nell'elemento "m".

2.5.7. Regno Unito

A seguito delle ispezioni si compila un rapporto in cui vengono valutati 33 tipi di elementi strutturali (es. fondazioni, pilastri o colonne, muri d'ala, muri di sostegno o rivestimenti, travi, traversi, diaframmi, lastre di cemento, impermeabilizzazione, pavimentazione, giunti di dilatazione...) basandosi sulla stima del costo, dimensione, gravità e priorità di intervento.

È stato sviluppato un metodo per determinare le priorità di ispezione e per garantire un grado di uniformità della valutazione dei ponti della rete. La cosiddetta valutazione complessiva totale TA viene effettuata con l'aiuto di 6 parametri diversi: R_a età del ponte, R_f tipologia strutturale, R_d elementi vulnerabili, volume di traffico R_v (media annuale del traffico giornaliero) e R_u (media annuale del flusso giornaliero nei pressi del ponte), R_i importanza della strada.

$$TA = 4 \cdot R_a + 2 \cdot R_f + R_d + R_v + R_u + R_i$$

Dove:

R_a : può variare tra 1 e 5 e dipende dall'anno di costruzione del ponte;

R_f : può variare tra 1 e 5 e dipende dal tipo di costruzione;

R_d : può variare tra 1 e 5 e dipende dal numero di dettagli vulnerabili (pochi 1, molti 5);

R_v e R_u : possono variare tra 1 (fino a 20000 VPD) e 5 (oltre 80000 VPD) dipendono dal flusso di traffico giornaliero in numeri di veicoli al giorno;

R_i : può variare tra 0 e 5 e dipende dall'importanza strategica del percorso.

Total assessment rating TA	Priority rating RA
43 - 50	1
36 - 42	2
29 - 35	3
22 - 28	4
8 - 21	5

Figura 2.28 Valori dell'indice di degrado e classi di priorità di intervento.

I ponti con RA pari a 1 sono quelli con priorità di ispezione.

2.5.8. Stati Uniti

L'ispezione si basa su vari fattori come età, caratteristiche del traffico, stato di manutenzione. La valutazione di questi fattori è responsabilità dell'incaricato dell'ispezione. Durante l'ispezione si assegna la valutazione complessiva a tre componenti principali del ponte (piastra, sovrastruttura e sottostruttura), per mezzo di un giudizio (buono, sufficiente, insufficiente, non giudicato) descrittivo delle carenze riscontrate sul singolo elemento. Per ogni elemento va descritto tipo, estensione, qualità e severità di danneggiamento. Il valore numerico del Condition Rating mark dovrebbe essere basato sulla condizione generale dell'intera struttura utilizzando la Figura 2.29.

Condition rating	Description
N	Not applicable
9	Excellent condition
8	Very good condition - no problems noted
7	Good condition - some minor problems
6	Satisfactory condition - structural elements show some minor deterioration
5	Fair condition - all primary structural elements are sound but may have minor section loss, cracking, spalling, or scour
4	Poor condition - advanced section loss, deterioration, spalling, or scour
3	Serious condition - loss of section, deterioration, spalling or scour have seriously affected primary structural elements. Local failures are possible. Fatigue cracks in steel or shear cracks in concrete may be present.
2	Critical condition - advanced deterioration of primary structural elements. Fatigue cracks in steel or shear cracks in concrete may be present or scour may have removed substructure support. Unless closely monitored it may be necessary to close the bridge until corrective action is taken.
1	Imminent failure condition - major deterioration or section loss present in critical structural components, or obvious vertical or horizontal movement affecting structure stability. Bridge is closed to traffic but corrective action may put bridge back in light service.
0	Failed condition - out of service; beyond corrective action.

Figura 2.29 Condizione di degrado della struttura.

2.5.9. Spagna

Si assegna un indice di valutazione per ogni ponte in base alle valutazioni fatte sui singoli elementi durante le ispezioni. Si assegna per ogni elemento un "Condition Mark" CM_{el} che può variare da 0 a 5 (più alto è il valore più severo è il danno), in funzione della natura, grado ed estensione del danno dell'elemento e anche in base all'effetto del danno sulla funzionalità dell'elemento stesso o di altri.

L'ispettore assegna, per ogni danno, una valutazione dei seguenti tre fattori:

- Danno (valore tra 0 e 3) è la somma dei valori attribuiti ai seguenti sottofattori: natura (0 se innocuo e 1 se dannoso); grado (0 se il danno si è sviluppato ad un livello basso e 1 se si è sviluppato ad un livello alto); estensione (0 se è esteso per meno del 50% dell'elemento e 1 se è maggiore);
- Funzionalità: 0 se l'elemento danneggiato mantiene la sua funzionalità, 1 in caso contrario;
- Implicazioni: 0 se non arreca danni ad altri elementi, 1 in caso contrario.

Il Condition Mark CM per ciascun danno, è dato dalla somma dei valori menzionati. Il valore varia tra 0 e 5 (maggiore è il valore più è serio il danno). Siccome l'andamento non è lineare (per es. una variazione di CM da 1 a 2 non equivale ad un cambiamento tra 3 e 4), il valore di CM è utilizzato per mezzo del Transformed condition mark ($TCM=2^{CM}$) per considerare la variazione non lineare in termini di sicurezza.

Il condition Mark (CM_{el}) per un particolare elemento è semplicemente il massimo CM di tutti i tipi di danno che lo influenzano. Il Condition Index di un elemento del ponte (CI_{el}) si ottiene dal prodotto tra CM_{el} e il fattore γ_{el} (il quale riflette l'importanza dell'elemento strutturale rispetto all'intera struttura).

Il Condition Index del ponte è semplicemente il massimo CI dei suoi elementi. L'indice di priorità (PI) del ponte è ottenuto come prodotto tra CI e il fattore peso γ_{bridge} (il quale riflette l'importanza del ponte rispetto alla rete a cui appartiene).

$$PI = \gamma_{bridge} \cdot \max(\gamma_{el} \cdot 2^{CM_{max}})$$

2.5.10. Svezia

La condizione funzionale di un ponte viene giudicata in base alla misura in cui i suoi elementi soddisfano i requisiti di progetto. Si considerano 14 elementi differenti e per ciascuno si assegna una delle seguenti classi:

- 3: denota che al momento dell'ispezione la funzionalità è compromessa;
- 2: indica la probabilità di comparsa di difetto nei 3 anni seguenti all'ispezione;
- 1: indica la probabilità di comparsa di difetto tra i 3 e 10 anni seguenti all'ispezione;
- 0: denota l'assenza di danno durante l'ispezione.

La classe di condizione totale si ottiene considerando la capacità di carico del ponte, sicurezza e durabilità. La classificazione è basata sulle classi di condizione dei singoli elementi che compongono il ponte. In Figura 2.30 sono indicati i pesi relativi ai vari elementi.

Function	Member number	Structural member	Weighting
BC	1	Foundations	4
BC	2	Earthwork slopes	3
BC	3	Supports	4
BC	4	Abutment and wing walls	3
BC	5	Bearings	4
BC	6	Primary load-bearing elements	4
BC	7	Other load-bearing elements	4
BC	8	Bridge deck	4
BC,S	9	Edge beam	4
D	10	Waterproofing	1
D	11	Surfacing	1
S	12	Parapet	2
D	13	Expansion joints	1
D	14	Drainage system	1

BC - Load-carrying capacity S - Safety (traffic users) D - Durability

Figura 2.30 Elementi strutturali e relativi pesi

L'intera struttura viene assegnata alla classe 3 quando uno o più elementi strutturali principali (con peso 4) sono assegnati alla classe di condizione 3.

2.5.11. Svizzera

In Svizzera si usa lo stesso sistema di Condition Rating mark sia per i ponti che per i suoi elementi (Figura 2.31) (19) [K. C. Brady & Co. *Procedures for Assessing Highway Structures*. COST345].

Joint report of Working Groups 2 and 3: Methods used in European States to inspect and assess the condition of highway structures, 2004.

Category	Description of condition	Description of damage and action required
1	Good	None, or minor
2	Acceptable	Insignificant
3	Defective	Considerable
4	Bad	Serious
5	Alarming	Safety endangered Remedial works required prior to next Principal Inspection, and/or action required as a matter of urgency
6	Not checkable	Components that cannot be inspected

Figura 2.31 Categoria di degrado degli elementi

2.5.12. Italia

CIAS

La prima ispezione è definita Ispezione Primaria e costituisce il riferimento per la valutazione e il confronto nel tempo dello stato complessivo dell'opera.

Il metodo proposto consente di riconoscere i tipi di degrado riscontrabili sulle strutture, riportandoli in apposite schede predisposte per elemento strutturale e tipo di materiale.

Le Schede di Valutazione forniscono un numero finale correlato con lo stato complessivo del degrado. Più alto è il numero e più grave è la condizione generale.

La valutazione numerica deriva dalla sommatoria dei pesi "G" attribuiti ai singoli difetti, moltiplicati per i coefficienti K_1 e K_2 , d'estensione ed intensità.

Si definisce Difettosità Relativa, D_R , il valore finale della valutazione fatta per singoli elementi strutturali e rappresenta l'indice dello stato di degrado.

$$D_R = \sum (G \cdot K_1 \cdot K_2)$$

Si definisce Difettosità Assoluta, D_A , il numero derivante dalla sommatoria dei difetti moltiplicati per il numero dei singoli elementi strutturali. D_A rappresenta l'indice complessivo del degrado ed indica, attraverso la sua grandezza, la dimensione dell'onere economico che si dovrà affrontare per un risanamento.

$$D_A = \sum (G \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot N)$$

Il valore attribuito a G deriva da una valutazione numerica, variabile da 1 a 5, del peso che il difetto assume rispetto alla gravità derivante dalle seguenti considerazioni:

- costituire un pericolo (rischio attuale);
- possibilità di ridurre le capacità portanti (rischio potenziale);
- costituire un innesco di altri difetti (rischio indotto);
- alto onere economico per il ripristino (rischio economico).

Il peso $G=5$ è attribuito solo a quei difetti che rispondono ai punti a) o b).

Il coefficienti K_1 di estensione e K_2 di intensità possono assumere il valore 0,2 – 0,5 – 1,0.

Attribuendo il valore 0,2 al coefficiente di estensione K_1 si intende che il difetto analizzato è "presente", ma che interessa solo una parte minima della zona o quantità di pertinenza.

Con 0,5 si intende che il difetto interessa tra il 30 ed il 70% della zona o quantità di pertinenza. Con 1,0 si intende che il difetto interessa l'intera zona o quantità di pertinenza.

Per zona o quantità di pertinenza si intende la superficie, lunghezza, numero che caratterizza l'elemento indagato. Le singole Schede Difettologiche individuano le specifiche zone o quantità di pertinenza.

Analogamente, il coefficiente di intensità K_2 , ha un valore variabile tra 0,2 – 0,5 – 1,0 in funzione dell'intensità o gravità assunta dallo specifico difetto.

I valori indicati nelle Schede di Valutazione Ispettiva sono riportati nel sistema informatico, che effettuerà automaticamente il calcolo di D_R e D_A .

Gli indici D_R e D_A hanno valore comparativo nel tempo.

La loro grandezza fornisce un'indicazione dello stato di degrado che non esime però da un'analisi attenta delle singole ispezioni, in particolar modo dei difetti con peso $G = 5$.

Il metodo della valutazione numerica è impostato sulla compilazione in campo di una serie di Schede di Valutazione divise per elemento strutturale e materiale costituente.

Sono predisposte schede per spalle, pile, giunti, piedritti, archi, travi e traversi, solette, elementi accessori, a loro volta suddivise secondo il materiale: calcestruzzo, muratura, acciaio, legno, per un totale di 18.

Ogni scheda riporta tutti i difetti riscontrabili sull'elemento strutturale di quel materiale.

La quantità di difetti controllati rispetto alla loro potenziale totalità produce il calcolo della percentuale di Completamento, valore che il sistema informatico, su cui sono inseriti i presenti dati, riporta assieme al D_R e D_A ad indicare il livello di Ispezione raggiunto (20) [M. Bruson, S. Martinello. *Valutazione della capacità portante di un ponte*. Cias, 4 EMME Service S.p.A, 2005.].

Pellegrino

Pellegrino et al. (2011) definiscono l'Indice di efficienza dell'elemento (ESR) e l'Indice di efficienza del ponte (TSR), che permettono di trattare il problema della gestione della manutenzione sia per quanto riguarda il Project Level sia per quanto riguarda il Network Level.

Nel primo livello si considera ogni singola struttura isolata dal contesto della rete di comunicazione stradale cui appartiene. L'obiettivo di questa valutazione è ottenere informazioni sulla sua capacità residua per assicurare che sia sicura ed efficiente, ed avere una stima della sua vita residua.

Il secondo livello è legato a questioni politiche, sociali ed economiche relative a ponti inseriti nella rete stradale globale; lo scopo principale è quello di stabilire la priorità di intervento di manutenzione, tenendo conto sia della condizione del singolo ponte che della sua importanza rispetto alla rete. Questo livello di valutazione è utile agli enti gestori delle infrastrutture che, a causa della limitatezza delle risorse, non hanno la possibilità di intervenire con rapidità sull'intero insieme di ponti e quindi hanno l'esigenza di stabilire una gerarchizzazione degli interventi.

L'Indice di efficienza dell'elemento (ESR) viene espresso attraverso la seguente relazione:

$$ESR = CF \cdot LF \cdot (RF \cdot NBI \cdot AF)$$

Dove:

CV: stato di condizione (Condition Value), il suo valore varia tra 0 e 5 (vedi Tabella 2.9);

Tabella 2.9 Valori del Condition Value

Defects	CV
No judgement	0
No meaningful defect	1
Minor defect that do not cause damage	2
Moderate defects that could cause damage	3
Severe defects that could cause damage	4
Non-functional or non-existent element	5

CF: fattore di condizione (Condition Factor), è in funzione di CV (vedi Tabella 2.10);

Tabella 2.10 Valori del Condition Factor in funzione del Condition Value

CV	0	1	2	3	4	5
CF	0	10	7	4	2	1

LF : fattore di posizione (Location Factor), che rappresenta l'importanza dell'elemento all'interno del ponte, il suo valore varia tra 10 (elementi principali) e 5 (elementi non strutturali);

RT : tipo di strada (Road Type) il suo valore varia tra 0.80 (nel caso di autostrade) a 1 (nel caso di strade comunali);

TI : traffico sul ponte (Traffic Index), il suo valore varia tra 0.90 (traffico elevato) a 1 (traffico basso);

RF : fattore stradale (Road Factor) funzione di RT e TI;

NBI : importanza del ponte all'interno della rete (Network Bridge Importance), tale parametro cerca di legare l'importanza del ponte con il disagio per un eventuale chiusura del ponte, il suo valore varia tra 0.96 (deviazione lunga su strada alternativa non adeguata) a 1 (deviazione breve su strada alternativa adeguata);

AF : età del ponte (Age Factor), il suo valore varia tra 0.97 (ponti costruiti prima del 1900) a 1 (ponti costruiti dopo il 1971);

PF : (RF · NBI · AF): fattore di penalizzazione.

L'ESR può assumere valori tra 1 e 100 e stabilisce l'urgenza dell'intervento a livello dei singoli elementi (Tabella 2.11).

Tabella 2.11 Valori di ESR e livelli di efficienza

Efficiency level	Urgency level of intervention	ESR
1	Maximum urgency in intervention	1-10
2	Short-term intervention	11-20
3	Medium-term intervention	21-30
4	Long-term intervention	31-100

Viene definito successivamente l'Indice di efficienza del ponte TSR:

$$TSR = \left(\frac{100 \cdot TSR_{real} + TSR_{min} \cdot CoF}{100 + CoF} \right)$$

Dove:

$$TSR_{real} = 10PF \left(\frac{\sum_{i=1}^t CF_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^t W_i} \right)$$

$$CoF = 100 \left(\frac{\sum_{i=1}^t W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right)$$

TSR_{min}: Valore del TSR nella situazione peggiore.

Il TSR può assumere valori tra 1 e 100 e stabilisce l'urgenza di intervento al livello del singolo ponte (Tabella 2.12) (21) [C. Pellegrino, A. Pipinato, C. Modena. *A simplified management procedure for bridge network maintenance*. Vol.7, No.5, 341-351, May 2011].

Tabella 2.12 Valori di TSR e livelli di efficienza

Efficiency level	Urgency level of intervention	TSR
1	Maximum urgency in intervention	1-30
2	Short-term intervention	31-40
3	Medium-term intervention	41-60
4	Long-term intervention	61-100

2.6. Confronto tra le metodologie di valutazione esistenti

Nei paragrafi precedenti sono stati introdotti dei metodi per il calcolo del Condition Rating mark, finalizzati alla valutazione di strutture da ponte, adottati in BMS di vari stati, quali: Austria, Danimarca, Francia, Germania, Norvegia, Slovenia, Regno Unito, Stati Uniti, Spagna, Svezia, Svizzera, Italia (Cias, Franchetti).

Questi metodi di calcolo del Condition Rating Mark sono stati analizzati e confrontati sulla base di alcune caratteristiche ritenute fondamentali per la validità del metodo stesso.

Si ritiene infatti che, per effettuare una valutazione efficace, il calcolo del Condition Rating mark deve prendere in considerazione:

- La condizione di tutti gli elementi che fanno parte della struttura;
- L'importanza che ogni elemento ha nei confronti del complesso strutturale;
- Tipologia di danno osservato (in relazione anche alla gravità e alla sua estensione (lunghezza, superficie, volume));
- Localizzazione di eventuali difetti all'interno dell'elemento in cui è stato rilevato.

Inoltre, un buon metodo di valutazione è tale se:

- Può essere impiegato per qualsiasi tipologia strutturale;
- Fornisce un indice globale rappresentativo dello stato di efficienza dell'intera struttura, tale da permettere il confronto rispetto ad altre strutture.

Per avere una panoramica delle caratteristiche dei metodi considerati, è stata costruita una tabella riassuntiva (vedi Tabella 2.13) nella quale ciascuna riga corrisponde ad un metodo e, nelle colonne, sono indicate le caratteristiche ritenute fondamentali per la validità del metodo stesso.

Tabella 2.13. Panoramica critica dei metodi esistenti

	Sub elementi strutturali ¹	Importanza del sub elemento ²	Tipi di danno ³	Indice Network level ⁴	Adattabile a varie tipologie strutturali ⁵	Posizione del danno all'interno dell'elemento ⁶
Austria	Si	Si	Si	No	Si	No
Danimarca	Si	Si	No	Si	Si	No
Francia	Si	No	No	Si	Si	No
Germania	Si	No	No	Si	Si	No
Norvegia	No	-	No	Si	Si	No
Slovenia	Si	Si	Si	Si	Si	No
Regno Unito	Si	No	Si	Si	Si	No
Stati Uniti	Si	No	No	Si	Si	No
Spagna	Si	Si	Si	Si	Si	No
Svezia	Si	Si	No	Si	Si	No
Svizzera	Si	No	No	Si	Si	No
Italia	CIAS	Si	No	Si	Si	No
	Franchetti	Si	Si	No	Si	No

¹: si effettua una valutazione per ogni elemento costituente la struttura;

²: si considera l'importanza dell'elemento rispetto al complesso strutturale;

³: il metodo consente di tenere in conto diverse tipologie di degrado osservato;

⁴: il metodo consente l'ottenimento di un indice di degrado comparativo con altre strutture e non solo un indice di degrado dei singoli elementi considerati;

⁵: adattabilità del metodo a varie tipologie strutturali;

⁶: si tiene conto della posizione della manifestazione di degrado rispetto all'elemento nel quale viene rilevato.

Dalla lettura della Tabella 2.13 emerge che nessun metodo esistente considera la localizzazione del danno, pur essendo esso un parametro fondamentale per una corretta diagnosi in quanto strettamente legato al cinematiso di collasso.

L'analisi dei metodi esistenti ha messo in luce che esistono due diversi tipi di approccio (22) [J.R. Casas. *Updated inventory on condition assessment procedures for bridges*. Background document SB3.2. Suitable Bridges. Poland. 2007] per valutare la condizione di una struttura da ponte:

- Approccio di tipo 1: si basa su una valutazione cumulativa. In questo caso il Condition Rating mark del ponte si ottiene dalla somma dei Condition Rating mark di ogni elemento che la compone (Slovenia, Cias, Pellegrino).
- Approccio tipo 2: utilizza come Condition Rating mark dell'intera struttura, il massimo riscontrato tra gli elementi che la compongono (Danimarca, Francia, Germania, Norvegia, Regno Unito, Stati Uniti, Spagna, Svezia, Svizzera). I risultati consentono di stabilire quanti ponti ci sono in ciascuna classe ma non consentono un confronto diretto tra le strutture.

Inoltre esiste una netta differenza tra i metodi nei quali la valutazione avviene assegnando all'elemento strutturale ispezionato un unico numero rappresentativo della condizione di degrado (Danimarca, Francia, Germania, Norvegia, Stati Uniti, Svezia, Svizzera, Pellegrino), e quelli dove il Condition Rating mark finale è ottenuto dal calcolo dei valori assegnati durante l'ispezione ai singoli tipi di danno (Austria, Slovenia, Regno Unito, Spagna, Cias).

Il secondo caso è sicuramente più rapido e semplice e fornisce i dati sufficienti per una valutazione a livello generale (network level), ma si ha mancanza di accuratezza di valutazione per permettere una validità anche al livello individuale (bridge level). Infatti i dati di input descrivono in modo generale lo stato dell'elemento ispezionato senza entrare nel merito del tipo di danno presente e le sue caratteristiche.

Partendo dal presupposto che requisiti essenziali sono: considerazione dell'importanza del subelemento e la valutazione di diversi tipi di danno, i metodi migliori (maggioranza di Si nella Tabella 2.13) sono quello della Slovenia e quello della Spagna.

Il metodo Spagnolo appartiene al gruppo di approccio tipo 2, che si ritiene più approssimativo rispetto all'approccio tipo 1.

Uno dei vantaggi offerti dal metodo utilizzato in Slovenia (anche il metodo Pellegrino) è il fatto che la valutazione è ottenuta come rapporto tra ciò che è stato valutato e una condizione di riferimento. Infatti il valore finale di Condition Rating mark è il rapporto tra la somma dei danni rilevati e la somma dei danni che possono potenzialmente manifestarsi in quella struttura (o elemento strutturale). Per queste ragioni si ritiene questo il metodo più completo e valido.

Il metodo Slovenia presenta però delle criticità:

- Il metodo non consente di tener in conto della pericolosità della localizzazione del danno;
- Il coefficiente K_4 (Fattore che sottolinea l'urgenza di un intervento nel caso in cui il tipo di danno "i" stia mettendo immediatamente a repentaglio la sicurezza dell'elemento o degli utenti) è dettato dal giudizio soggettivo dell'ispettore.

Infatti, mentre i valori da attribuire ai coefficienti B_i e K_1 (Figura 2.32 e Figura 2.33) sono stabiliti a priori e prescindono da ciò che viene rilevato durante l'ispezione e i valori da attribuire a K_2 e K_3 (Figura 2.34e Figura 2.35) sono rigorosamente tabellati in base a riscontri oggettivi eseguiti durante l'ispezione (misurazioni dei difetti, rapporto tra estensione del degrado e elemento intero), il coefficiente K_4 (Figura 2.36) è un parametro di pericolosità (Fattore che sottolinea l'urgenza di un intervento nel caso in cui il tipo di danno "i" stia mettendo immediatamente a repentaglio la sicurezza dell'elemento o degli utenti) dettato dal giudizio soggettivo dell'ispettore.

Cod.	Tipo di danno	B _i	Grado di difetto			
			I	II	III	IV
1.0 Spostamenti e deformazioni della struttura						
1.1	Sottostruttura					
1.11	Movimenti laterali	2	2 cm	2 to 5 cm	5 to 10 cm	>10 cm
1.12	Inclinazione, rotazione, fuori piombo	2	<1/100	1/100 to 3/100	1/100 to 5/100	>5/100
1.13	Cedimenti differenziali	3	<2 cm	2 to 5 cm	5 to 10 cm	>10 cm
1.14	Area scalzata sotto pile e spalle	4	<10 %	10 to 25%	25 to 50%	>50%
1.2	Sovrastruttura					
1.21	Freccia verticale	2	<L/1000	L/1000 to L/500	L/500 to L/300	>L/300
1.23	Rugosità, asperità	1	Criteri generali			

Figura 2.32 Valori coefficiente B

Macroelemento Strutturale	Elemento Strutturale	K _{1i}
Sottostrutture Tipo 1: Pile	Pali (quando ispezionabili)	0,2
	Fondazioni o parte superiore del palo	0,3
	Colonne o muro	0,4
	Parte superiore della pila	0,3
Sottostrutture Tipo 2: Spalle	Pali (quando ispezionabili)	0,2
	Fondazioni o parte superiore del palo	0,3
	Muro di spalla	0,4
	Backwall	0,1
	Wingwalls	0,2

Figura 2.33 Valori del coefficiente K₁

Classe	Grado	Criterio	K _{2i}
I	Basso, iniziale	Il difetto è di piccola dimensione, generalmente appare in singoli luoghi di un elemento	0,5
II	Medio, in propagazione	Il difetto è di media dimensione, ristretto o in singoli luoghi oppure il difetto è di piccola dimensione appare in pochi luoghi o in una piccola area di un elemento (esempio <2,5%)	1
III	Alto, in aumento	Il difetto è di grande dimensione, appare in molti luoghi o in una grande area dell'elemento (esempio 25 to 75%)	1,5
IV	Molto alto, critico	Il difetto è di dimensione molto grande, appare nella maggior parte dell'elemento (esempio > 50%)	2

Figura 2.34 Valori del coefficiente K₂

Criterio	K _{3i}
Il difetto è limitato rispetto all'unità di un elemento	0,5
Il difetto appare in qualche unità (esempio meno di 1/4) di uno stesso elemento	1
Il difetto appare in più unità (esempio 1/4 to 3/4) di uno stesso elemento	1,5
Il difetto appare nella maggior parte (esempio più di 3/4) di uno stesso elemento	2

Figura 2.35 Valori del coefficiente K₃

Criterio	K_{4i}
L'intervento non è urgente perché il difetto non mette in pericolo la sicurezza o durabilità totale (vita di servizio) della struttura del ponte e neanche la durabilità dell'elemento affetto	1
Il difetto va riparato in un periodo non superiore ai 5 anni per prevenire indebolimenti sulla sicurezza, utilizzo, durabilità totale della struttura, o unicamente la durabilità dell'elemento affetto dall'attacco aggressivo	2 to 3
È richiesto l'intervento immediato perché il difetto sta già compromettendo la sicurezza, utilizzo, durabilità dell'intera struttura (specialmente in ambienti aggressivi), o se c'è pericolo imminente per le persone che cadano pezzi di	3 to 5
È richiesto il puntellamento temporaneo o limitazione del carico da traffico	5

Figura 2.36 Valori del coefficiente K_4

Bibliografia

- (1) C. Andrade & Co. *Management, maintenance and strengthening of concrete structures*. Fib (CEB-FIP) Bulletin 17, 2002.
- (2) Stefano Bufarini, Vincenzo D'aria, Domenico Squillacioti. *Collaudo Statico Prove di carico su solai ed impalcati*. Quaderni per la progettazione.
- (3) Luigi Coppola. *La diagnosi del degrado nelle strutture in calcestruzzo*. L'industria italiana del cemento armato 1993.
- (4) Emanuele Massacci. *Manuale per i dissesti statici: cedimenti e soluzioni tecniche*. Notavek 201.
- (5) F. Doglioni. Seminario didattico. *Strutture nel tempo; Metodi e casi di studio*. Università degli studi di Venezia. 15 Marzo 2013.
- (6) Ministro dell'interno. Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. *Costruzioni e dissesti statici*.
- (7) Giovanni Mendito. *Fessurazioni delle strutture*. Dario Flaccovio Editore.
- (8) Yao et al 2014. *Structural Control and Health Monitoring*.
- (9) Giacomo Cusmano. *Tecniche & Prodotto Recupero. Fessure murarie: che fare?* Rivista BEMA Editrice-Milano. Gennaio/Febbraio 2004.
- (10) Ministero dell'interno, Dipartimento dei Vigili del Fuoco del soccorso pubblico e della difesa civile. Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. *Corso di Costruzioni, Dissesti e Puntellamenti*.
- (11) Massimo Dringoli. *Durabilità dei materiali nell'architettura moderna*.
- (12) Luigi Coppola. *Dissesti delle strutture in c.a.*
- (13) *Non structural cracks in concrete*.
- (14) Guide for visual Inspection of structural concrete buildings component.
- (15) *Handbook on repair and rehabilitation of rcc buildings*.
- (16) Bruno Barbarito. *Collaudo e risanamento delle strutture*. Utet Libreria.
- (17) Pier Giorgio Malerba (2015). *Ispezioni dei ponti: Contributo dei sistemi di rilievo a pilotaggio remoto*.
- (18) J. Appleton & Co. *Strategies for testing and assessment of concrete structures*. CEB Bulletin d'information n°243, May 1998.
- (19) K. C. Brady & Co. *Procedures for Assessing Highway Structures*. COST345. Joint report of Working Groups 2 and 3: Methods used in European States to inspect and asses the condition of highway structures, 2004.
- (20) M. Bruson, S. Martinello. *Valutazione della capacità portante di un ponte*. Cias, 4 EMME Service S.p.A, 2005.
- (21) C. Pellegrino, A. Pipinato, C. Modena,. *A simplified management procedure for bridge network maintenance*. Vol.7, No.5, 341-351, May 2011.
- (22) J.R. Casas. *Updated inventory on condition assessment procedures for bridges*. Background document SB3.2. Suitable Bridges. Poland. 2007.

Capitolo III

Indagine strumentale

Contenuto del capitolo:

- Tecniche di indagine strumentale basso invasive
 - Velocità ultrasonica
 - Indice di rimbalzo
 - Indice sclerometrico e Velocità ultrasonica combinate
 - Prova di carbonatazione
 - Pull-out
- Campagna sperimentale in laboratorio
 - Caratteristiche delle strumentazioni
 - Risultati sperimentali
- Elaborazione dei dati tramite curve di correlazione
 - Indagine ultrasonica- Valutazione delle curve di correlazione
 - Indagine sclerometrica- Valutazione delle curve di correlazione
 - Metodo combinato- Valutazione delle curve di correlazione
 - Introduzione alle Reti Neurali
 - Elaborazione dei dati tramite Reti neurali
 - Indagine sclerometrica - Reti neurali
 - Indagine ultrasonica - Reti neurali
 - Metodo combinato- Reti neurali
- Confronto tra resistenze reali e quelle stimate

3.1. Tecniche di indagine strumentale basso invasive

Obiettivo del presente lavoro di ricerca è quello di fornire una procedura di valutazione di sistemi strutturali esistenti che costituisca un utile strumento di supporto decisionale durante la fase di analisi dei dati di ispezione, individuando una modalità di indagine low-cost ed immediata per ponti in cemento armato.

Il calcestruzzo, che fino ad oltre quaranta anni fa veniva presentato come materiale bisognoso di bassa manutenzione e durata pressoché illimitata, ha mostrato poi negli anni le sue debolezze, infatti notevole è la presenza sul territorio nazionale di strutture in calcestruzzo armato soggette a situazioni di dissesto sulle quali è necessario effettuare dei controlli per la valutazione delle caratteristiche.

Nella gran parte dei casi le strutture sono prive di certificati di attestazione della qualità dei materiali ed in particolare dei calcestruzzi, quindi al tecnico si presenta l'esigenza di valutare in opera la qualità del calcestruzzo e di identificarne la resistenza meccanica.

I metodi di indagine più diffusi, per effettuare la caratterizzazione in opera dei calcestruzzi sono raggruppabili nelle tre seguenti categorie:

- Metodi distruttivi (Carotaggio);
- Semi-distruttivi (Estrazione di inserti, prove di penetrazione);
- Metodi Non-Distruttivi (Prove sclerometriche, Prove Ultrasonore, Prove Combinate).

Nella programmazione delle prove in sito bisogna considerare il fatto che non sempre è possibile effettuare le indagini distruttive. Il campionamento infatti ha lo svantaggio di essere particolarmente invadente. Si ha quindi la limitazione di rimuovere un numero minimo e indispensabile di campioni, che siano di dimensioni quanto più piccole possibile, ed assicurarsi di operare in posizioni meno vitali per la struttura. Le indagini distruttive, pur essendo indubbiamente più affidabili delle seconde, in quanto forniscono direttamente la grandezza di interesse (resistenza del materiale), possono arrecare danni irreversibili alla struttura sulle quali vengono effettuate.

Stando a quanto riportato dalle (1) *Linee Guida - Calcestruzzo strutturale - messa in opera e prove non distruttive* (Figura 3.1), Indice di rimbalzo e Velocità di propagazione ultrasonica sono le uniche prove che non apportano nessun danno alla struttura, comportano un basso costo di esecuzione ma, sono caratterizzate da una, rispettivamente, debole e moderata qualità della correlazione con la resistenza.

Metodo di prova	Costo	Velocità di esecuzione	Danno apportato alla struttura	Rappresentatività dei dati ottenuti	Qualità della Correlazione fra la grandezza misurata e la resistenza
Carotaggio	Elevato	Lento	Moderato	Moderata	Ottima
Indice di rimbalzo	Molto basso	Veloce	Nessuno	Interessa solo la superficie (1)	Debole
Velocità di propagazione di ultrasuoni	Basso	Veloce	Nessuno	Buona Riguarda tutto lo spessore	Moderata (2)
Estrazione di inserti	Moderato	Veloce	Limitato	Interessa solo la superficie	Buona
Resistenza alla penetrazione	Moderato	Veloce	Limitato	Interessa solo la superficie	Moderata

(1) Inoltre, la singola determinazione è influenzata dallo stato della superficie dell'area di prova (umidità, carbonatazione,...).

(2) La misura si correla bene con il modulo elastico del materiale, la bontà della correlazione, tra modulo elastico e resistenza meccanica, può dipendere dalle caratteristiche del conglomerato.

Figura 3.1 Vantaggi e svantaggi dei più comuni metodi di indagine [*Linee Guida-Calcestruzzo strutturale - messa in opera e prove non distruttive*]

La (2) EN 13791 (Valutazione della resistenza a compressione in sito) indica che durante la valutazione delle strutture e dei componenti prefabbricati di calcestruzzo, deve essere indagato il materiale al fine di stabilirne la qualità. In questa norma viene specificato che la relazione tra la

resistenza e l'indice sclerometrico è influenzata sia dalle caratteristiche del calcestruzzo sia dalle condizioni di prova. Lo stesso vale per quanto riguarda le misurazioni della velocità degli impulsi ultrasonici.

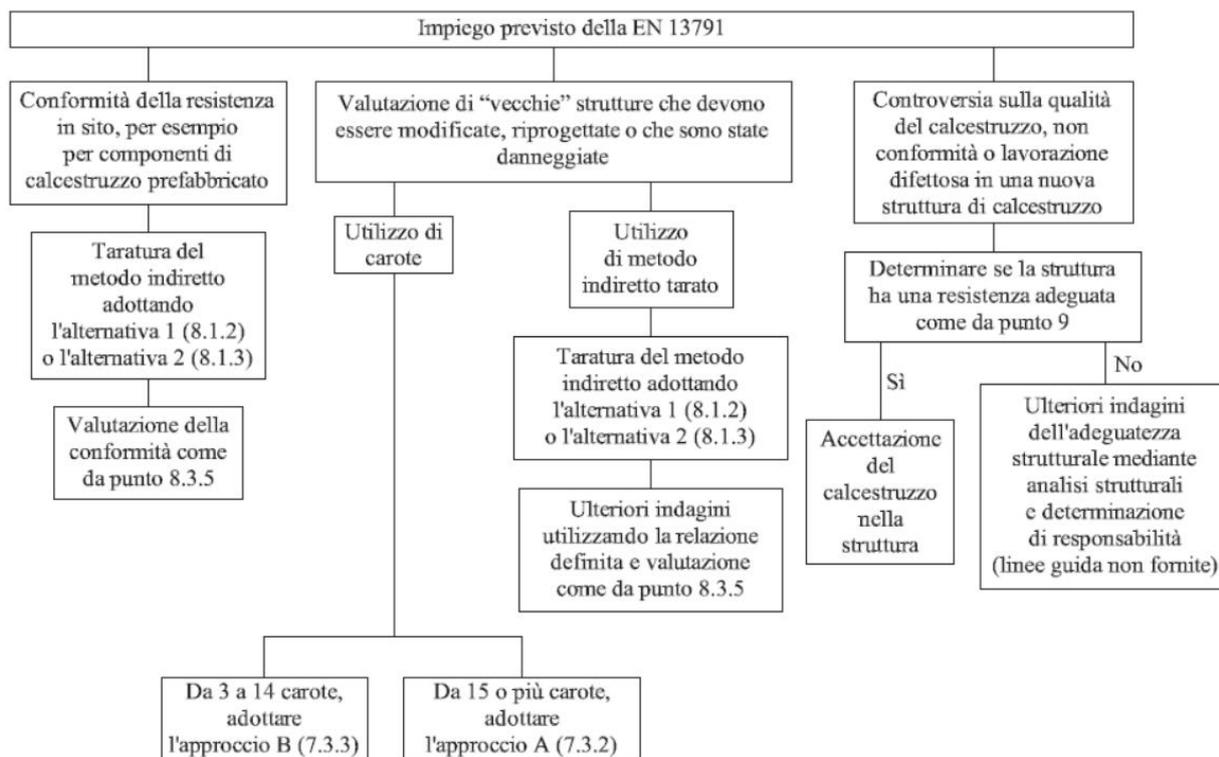


Figura 3.2 Diagramma di flusso (2) EN 13791

Nel campo delle tecniche di indagine, in questi ultimi anni, hanno assunto maggior peso quei metodi definiti non distruttivi rispetto alle prove distruttive eseguite in laboratorio su campioni prelevati in situ. In realtà le due tecniche di indagine, prove non distruttive e prove distruttive, non si escludono a vicenda: per un quadro diagnostico completo è opportuno utilizzarle entrambe. Infatti le prove non distruttive permettono di definire meglio dove è possibile prelevare campioni significativi dei vari elementi costituenti l'opera, localizzando eventuali zone degradate, al fine di poter rappresentare la situazione reale del manufatto analizzato. I parametri ricavati in laboratorio vanno poi comparati con quelli ottenuti da prove non distruttive, sempre di laboratorio, effettuate sugli stessi campioni, da impiegare come riferimento a taratura dei rilievi in situ. Ciò è utile in quanto la resistenza meccanica ricavata in laboratorio dalla rottura di provini può essere solo stimata con le prove non distruttive attraverso la misura di grandezze meccaniche diverse: in questo modo si individuano le curve di correlazione tra la resistenza meccanica e i parametri ottenuti dalla prova non distruttiva (3) [Atti di seminario sul tema *Sperimentazione su strutture*. 12-13 Febbraio 1993 Venezia, AICAP].

Prima di procedere ad una campagna di indagine che prevede il prelievo di campioni e relative prove in laboratorio, è opportuno valutare l'insieme dei dati emersi durante l'indagine visiva al fine di interpretarli tentativamente sulla base di tutte le possibili cause di degrado. In sostanza, è consigliabile disporre di più ipotesi, in alternativa tra loro, che possano giustificare il degrado registrato. In queste condizioni i prelievi e le relative prove di laboratorio dovranno essere finalizzate a sciogliere gli eventuali dubbi circa le ipotesi tra loro alternative ed a consolidare il meccanismo di degrado soprattutto in relazione alla sequenza ed alla complementarità delle varie cause. Una volta effettuate le prove si hanno a disposizione dei dati che devono essere elaborati opportunamente per ottenere la caratterizzazione del materiale.

Per svolgere una buona diagnosi strutturale bisogna senza dubbio trovare il giusto compromesso tra significatività e invasività delle indagini, cioè vanno scelte delle tecniche che permettano di conoscere lo stato reale della struttura ma senza alterarne la sua condizione.

Per queste ragioni nella presente ricerca, è stato privilegiato come criterio principale di indagine, quello basato su prove di tipo non distruttivo, cioè quel complesso di esami e rilievi che non modificano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura (Prove ultrasoniche; Sclerometro; Analisi chimica e rilevamento della profondità di carbonatazione) e ricorrere a prove semidistruttive (Pull-out) e prove distruttive solo in casi particolari, ad esempio quando i risultati delle prove non portano ad un giudizio unanime.

Al fine di verificare l'affidabilità dei metodi di indagine non distruttivi, è stata predisposta una campagna sperimentale su una serie di miscele, confezionate con classe di cemento diverse per poter valutare un ampio intervallo di resistenze. Sono stati realizzati un totale di 100 provini cubici di lato 15 cm. Essi sono stati sottoposti alle prove non distruttive per la misurazione della velocità ultrasonica e dell'indice sclerometrico, ed infine sono stati sottoposti ad una prova a rottura per la determinazione della resistenza a compressione. È stata quindi studiata la correlazione tra le prove non distruttive e la prova di compressione. L'approccio classico per lo studio della correlazione consiste nel tarare curve di regressione tra le grandezze indirette e le caratteristiche materiche e costruttive di interesse. La metodologia proposta è basata invece sull'impiego delle reti neurali, quale semplice e rapido strumento di correlazione fra le grandezze misurate e le proprietà meccaniche del materiale. Una rete neurale artificiale è un modello matematico ispirato alla struttura e agli aspetti funzionali delle reti neurali biologiche di elaborazione delle informazioni. Da questa applicazione pratica è stato possibile individuare le Reti Neurali come modalità migliore per predire il valore di resistenza del calcestruzzo investigato, partendo dall'impiego dei risultati ottenuti tramite le indagini basso invasive.

Di seguito si riporta una breve descrizione delle prove basso invasive menzionate.

3.1.1. Velocità ultrasonica

Le indagini ultrasoniche consentono la determinazione delle caratteristiche elastiche dei materiali quali in particolare il calcestruzzo e le rocce. Con esse si possono determinare il grado di omogeneità, la presenza di fessurazioni o cavità, il modulo di elasticità e la resistenza del materiale. La velocità di propagazione dell'impulso ultrasonico in un mezzo dipende dalla densità e dalle proprietà elastiche, che sono correlabili alla qualità e resistenza.

La sonda emettitrice produce degli impulsi sonici o ultrasonici (in funzione della frequenza) con frequenza prestabilita che, captati dalla sonda ricevente, consentono di misurare il tempo di transito mediante un contatore al quarzo. Noto lo spessore dell'elemento strutturale, il calcolo della velocità di propagazione è immediato.

La precisione della misurazione dipende da diversi parametri: densità del materiale attraversato, presenza di umidità nel materiale (l'acqua è un buon veicolo di propagazione delle onde ultrasoniche), presenza di armature metalliche (se possibile, si dovrebbero evitare misurazioni in prossimità delle barre di armatura, parallele alla direzione di propagazione degli impulsi), riflessioni multiple sulle superfici dell'elemento strutturale, cavità e superfici di discontinuità, porosità.

Questa metodologia di indagine ha però dei limiti, infatti la velocità di propagazione delle onde elastiche consente la determinazione del modulo elastico per materiali elastici isotropi ed omogenei. Poiché i materiali da costruzione soddisfano questi requisiti solo in parte, già la determinazione del modulo elastico del materiale risulta affetta da una certa approssimazione. La correlazione tra la resistenza a compressione del materiale ed il suo modulo elastico è discutibile in quanto pone in relazione una proprietà elastica (il modulo elastico) con una caratteristica del materiale (la resistenza) che si manifesta in avanzata fase non lineare. Secondo alcuni ricercatori, non è dunque possibile dedurre la resistenza a compressione dalla velocità di propagazione delle onde elastiche, il che limiterebbe la significatività delle prove soniche ed ultrasoniche ad una verifica di omogeneità del

materiale e, eventualmente, all'individuazione di superfici di discontinuità del materiale [Prove NDT MDT CLS Prof Brencich].

La (4) UNI EN 12504-4:2005 (*Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici*), stabilisce che al fine di ottenere una misurazione della velocità di propagazione degli impulsi che sia riproducibile e che dipenda essenzialmente dalle proprietà del calcestruzzo sottoposto a prova, è necessario considerare i vari fattori che possono influenzare la velocità di propagazione degli impulsi e la sua correlazione alle varie proprietà fisiche del calcestruzzo.

Il tenore di umidità ha due effetti sulla velocità di propagazione degli impulsi, uno chimico e uno fisico. Si tratta di effetti importanti nello stabilire correlazioni per la stima della resistenza del calcestruzzo. Anche tra un provino cubico o cilindrico appropriatamente maturato in condizioni normalizzate e un elemento di struttura realizzato con lo stesso calcestruzzo, può verificarsi una significativa differenza della velocità di propagazione degli impulsi. Tale differenza è dovuta, in gran parte, all'effetto delle diverse condizioni di maturazione sull'idratazione del cemento, mentre in piccola parte, è dovuta alla presenza di acqua libera nei vuoti.

Per quanto riguarda la temperatura, è stato riscontrato che variazioni tra i 10 °C e 30 °C non causano alcun cambiamento significativo, con assenza di corrispondenti variazioni della resistenza delle proprietà elastiche. Le correzioni alle misurazioni della velocità di propagazione degli impulsi dovrebbero essere effettuate solo per temperature al di fuori di questo intervallo.

La lunghezza di percorso sulla quale si misura la velocità di propagazione degli impulsi dovrebbe essere sufficientemente lunga da non essere influenzata in modo significativo dalla natura eterogenea del calcestruzzo. Le raccomandazioni sono che la lunghezza di percorso minima dovrebbe essere 100 mm per calcestruzzo con dimensione nominale massima dell'aggregato minore o uguale a 20 mm, e 150 mm per calcestruzzo con dimensione nominale massima dell'aggregato tra 20 mm e 40 mm. La velocità di trasmissione degli impulsi non è generalmente influenzata dalle variazioni della lunghezza di percorso, sebbene l'apparecchiatura elettronica di misura dei tempi possa indicare una tendenza della velocità a ridursi leggermente con l'aumentare della lunghezza di percorso. Ciò è dovuto al fatto che i componenti dell'impulso aventi frequenza più alta sono maggiormente attenuati rispetto a quelli di frequenza più bassa e la forma del fronte dell'impulso diventa più arrotondata con l'aumentare della distanza da percorrere.

Quando un impulso ultrasonico che attraversa il calcestruzzo incontra un'interfaccia calcestruzzo-aria, avviene una trasmissione quasi inesistente dell'energia attraverso tale interfaccia. Pertanto, eventuali fessurazioni piene di aria o vuoti che si trovano tra i due trasduttori, ostruiscono il raggio ultrasonico diretto quando la lunghezza proiettata del vuoto è maggiore della larghezza dei trasduttori e della lunghezza d'onda del suono utilizzata. Quando avviene ciò, il primo impulso che arriva al trasduttore ricevente sarà stato sottoposto ad una diffrazione attorno alla periferia del difetto e il tempo di transito risulterà maggiore rispetto ad un calcestruzzo simile privo di difetti.

In base alla distanza che separa i trasduttori è possibile utilizzare questo effetto per individuare fessure, vuoti o altri difetti maggiori di circa 100 mm di diametro o profondità. I difetti relativamente piccoli hanno tempi di trasmissione con effetti minimi o assenti sui tempi di trasmissione, ma allo stesso modo hanno probabilmente una minor rilevanza tecnica. Tracciando profili di velocità equivalenti spesso si ottengono delle informazioni significative relativamente alla qualità di un elemento di calcestruzzo. L'esame dell'attenuazione del segnale può, inoltre, fornire informazioni utili.

In elementi fessurati, nei quali le facce fessurate sono tenute in stretto contatto da forze di compressione, l'energia degli impulsi può passare senza ostacoli attraverso la fessurazione. Ciò può verificarsi, per esempio, in pilastri portanti verticali fessurati. Se la fessurazione è piena di liquido che trasmette l'energia ultrasonica, per esempio nelle strutture marine, o se la fessurazione è parzialmente riempita di particelle solide, tale fessurazione non è rilevabile utilizzando l'apparecchiatura di lettura digitale. In questi casi le misurazioni dell'attenuazione possono fornire informazioni utili.

Una indagine di misurazioni in punti a griglia sulle strutture di calcestruzzo consente di verificare una cavità di grandi dimensioni misurando i tempi di transito degli impulsi che passano tra i trasduttori qualora essi siano posizionati in modo che la cavità si trovi sul percorso diretto tra loro due. Le dimensioni di queste cavità possono essere stimate assumendo che gli impulsi percorrono il cammino più corto da un trasduttore all'altro aggirando la cavità. Le stime sono valide solo quando il calcestruzzo attorno alla cavità ha massa volumica uniforme e in tale calcestruzzo è possibile misurare la velocità di propagazione degli impulsi.

Le proprietà fisiche importanti dei materiali che influenzano la velocità di trasmissione degli impulsi sono il modulo elastico e la massa volumica. Nel calcestruzzo queste proprietà sono correlate al tipo di aggregato, alla loro proporzione e alle proprietà fisiche dell'impasto cementizio, che dipende, principalmente, dal rapporto acqua/cemento originario e dalla maturazione del calcestruzzo. D'altro canto, la resistenza del calcestruzzo è più correlata al rapporto acqua/cemento che al tipo di aggregato e alle proporzioni di aggregato e di pasta. Di conseguenza, le correlazioni tra la velocità di propagazione degli impulsi e la resistenza del calcestruzzo sono fisicamente indirette e devono essere stabilite per la miscela di calcestruzzo specifica. Per un calcestruzzo sconosciuto, la stima della resistenza, basata esclusivamente sulla velocità di propagazione degli impulsi, non è affidabile.

La (4) UNI EN 12504-4:2005 (*Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici*) indica, nell'Appendice C, le modalità per stabilire la correlazione tra la velocità di propagazione degli impulsi e la resistenza. Le correlazioni andrebbero essere stabilite confezionando provini appropriati, lasciati maturare in accordo alla (5) EN 12390-1 e alla (6) EN 12390-2. Da ciascun lotto di calcestruzzo dovrebbero essere confezionati almeno tre provini. La velocità di propagazione degli impulsi dovrebbe essere misurata tra una faccia e l'altra per i cubi oppure assialmente per cilindri o carote. In caso di travi è preferibile misurare la velocità di propagazione degli impulsi nel senso della lunghezza per ottenere una maggior accuratezza. Per ciascun provino dovrebbero essere effettuate almeno tre misurazioni distanziate tra la sommità e la base del provino. La variazione tra i tempi di transito misurati sui singoli provini dovrebbe rientrare nel $\pm 1\%$ del valore medio di queste tre misurazioni, altrimenti il provino dovrebbe essere rifiutato come anomalo. I provini dovrebbero essere quindi sottoposti a prova di resistenza in accordo alla (7) EN 12390-3. La velocità di propagazione media degli impulsi e la resistenza media ottenute da ciascuna serie di tre provini nominalmente identici fornisce i dati per la costruzione di una curva di correlazione. Una curva di correlazione prodotta in tal modo si riferisce solo ai provini prodotti, maturati e sottoposti a prova in modo simile; se alla maturazione in acqua si sostituisce la maturazione in aria si otterranno curve di correlazione diverse per gli stessi tipi di calcestruzzo.

Dallo studio bibliografico è emerso il lavoro svolto da diversi ricercatori riguardo il legame tra la velocità di propagazione delle onde elastiche e la resistenza a compressione (Tabella 3.1, Figura 3.3, Tabella 3.2, Tabella 3.3).

Tabella 3.1 Velocità di propagazione delle onde ultrasoniche e resistenza del calcestruzzo (8) [A. Zocca e M. Di Lena Istituto sperimentale F.S. 1986]

Velocità onde ultrasoniche	Resistenza stimata del cls
< 2400 m/s	< 15 MPa
2400-3000 m/s	15-20 MPa
3000-3600 m/s	20-25 MPa
4200-4600	25-30 MPa
> 4200 m/s	> 30 MPa

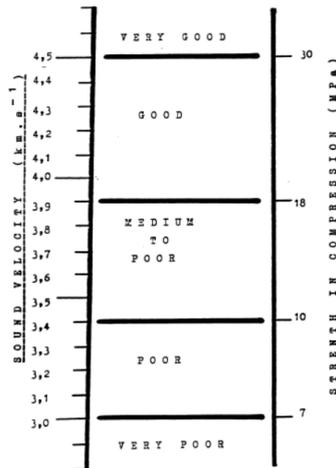


Figura 3.3 Slides on NDT in concrete (in Italian)

Tabella 3.2 (9) Concrete strength by combined non destructive methods simply and reliable predicted. Cement and concrete Research 2000

Qualità del calcestruzzo in funzione della Velocità ultrasonica					
Velocità ultrasonica	>4500	3500-4500	3000-3500	2000-3000	<2000
Qualità del calcestruzzo	Eccellente	Buona	Dubbia	Povera	Molto povera

Tabella 3.3 Classificazione della qualità del calcestruzzo sulla base della velocità ultrasonica (10) [Guidebook on non destructive testing of concrete structures. IAEA Vienna 2002 ISSN 1018-5518]

Velocità onde ultrasoniche [km/s 10 ³]	Qualità del calcestruzzo
> 4,5	Eccellente
3,5-4,5	Buona
3,0-3,5	Dubbia
2,0-3,0	Povera
<2,0	Molto povera

Le Linee Guida - Calcestruzzo strutturale - messa in opera e prove non distruttive prescrivono che al termine delle misure su ogni zona è necessario eseguire un controllo delle misure eseguite, verificando i valori medi della velocità di propagazione delle onde elastiche.

Il controllo dovrà essere effettuato come segue:

- Si dovrà verificare l'omogeneità dei valori di velocità (la differenza tra il valore massimo e minimo dovrebbe essere contenuta entro i $200 \div 300$ m/s);
- Si dovrà verificare il valore medio della velocità: misure su calcestruzzo che portano a velocità di trasmissione superiore a 4800 m/s o inferiori a 2500 m/s devono essere ulteriormente verificate, tenendo presenti i seguenti valori orientativi della velocità apparente V degli ultrasuoni:
 - Per calcestruzzi di cattiva qualità $V < 3000$ m/s,
 - Per calcestruzzi di media qualità $3000 \text{ m/s} < V < 4000$ m/s,
 - Per calcestruzzi di buona qualità $V > 4000$ m/s.

3.1.2. Indice di rimbalzo

Lo sclerometro è uno strumento per prove non distruttive speditive su calcestruzzo, roccia e muratura che stima la resistenza a compressione del materiale a partire dalla sua durezza superficiale.

Poiché solo il calcestruzzo vicino al punto dell'impatto influenza sensibilmente il valore dell'indice di rimbalzo, la metodologia di prova è sensibile alle condizioni locali, quali la presenza di grossi granuli e gli elementi grossi d'aggregati in prossimità della superficie oppure di vuoti. Per mitigare gli effetti di alcune delle cause che alterano le misure, è pertanto opportuno che nell'intorno d'ogni punto di prova siano eseguite più battute, adeguatamente distanziate fra di loro (1) [*Linee Guida - Calcestruzzo strutturale - messa in opera e prove non distruttive*].

L'indice di rimbalzo è correlato alla resistenza a compressione del calcestruzzo, ma è influenzato da numerosi altri fattori, tra cui:

- Le condizioni di umidità del calcestruzzo in superficie (una superficie umida conduce ad un indice di rimbalzo più basso);
- La presenza di uno strato superficiale carbonatato (aumenta l'indice di rimbalzo);
- La tessitura superficiale (una superficie ruvida fornisce generalmente un indice di rimbalzo più basso);
- L'orientazione dello strumento rispetto alla verticale (sono disponibili fattori di correzione approssimati);
- L'età del calcestruzzo;
- La dimensione e il tipo degli aggregati.

A causa dell'incertezza nella correlazione empirica tra resistenza a compressione e durezza superficiale, la prova sclerometrica è riconosciuta solo da alcune normative tecniche ed è da considerarsi come una prova a basso livello di dettaglio e di ridotta precisione.

Per quanto sia innegabile la velocità esecutiva della prova e la sua grande economicità, la correlazione tra la resistenza a compressione e la durezza superficiale del materiale è empirica e del tutto ingiustificata da un punto di vista teorico in quanto pone in relazione caratteristiche meccaniche essenzialmente diverse. Pertanto, è opportuno utilizzare la prova sclerometrica per una verifica diffusa di omogeneità del materiale per confronto tra i risultati delle prove in diverse parti della struttura; l'uso della prova sclerometrica in termini assoluti (determinazione della resistenza a compressione) è giustificata solo in un primo approccio di larga massima alla caratterizzazione del materiale ma non può costituire un dato progettuale (11) [UNI EN 12504-2:2012. *Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 2: Prove non distruttive-Determinazione dell'indice sclerometrico*] (12) [Prove NDT MDT CLS Prof Brencich].

Il risultato di questa prova può essere utilizzato per la valutazione dell'uniformità del calcestruzzo in sito, per delineare le zone o aree di calcestruzzo di scarsa o deteriorata qualità presenti nelle strutture. Lo sclerometro può essere utilizzato per prove comparative, in riferimento ad un calcestruzzo con resistenza nota o ad un calcestruzzo che è risultato provenire da un volume definito di calcestruzzo con una popolazione verificata come conforme a una particolare classe di resistenza.

Prima di eseguire la prova con lo sclerometro si effettua preliminarmente la pulizia delle superfici di calcestruzzo che saranno sottoposte all'impatto. Si procede verificando la taratura dello strumento da utilizzare, eseguendo almeno cinque impatti sull'incudine di riferimento e registrando le misure dei successivi cinque impatti. Se le misure degli ultimi cinque impatti non sono entro ± 3 del valore fornito dal fabbricante, bisogna pulire e/o regolare il martello in conformità alle istruzioni del fabbricante e ripetere quanto sopra.

Gli elementi di calcestruzzo da sottoporre a prova devono essere di almeno 100 mm di spessore e fissati all'interno di una struttura. Possono essere sottoposti a prova elementi o campioni più piccoli purché siano rigidamente supportati. Un'area di prova dovrebbe essere approssimativamente di 300 mm x 300 mm. Dovrebbero essere evitate aree che rivelano la presenza di nidi di ghiaia, sfaldature, tessitura grossolana o alta porosità. Nel selezionare l'area da sottoporre a prova si dovrebbero

considerare i fattori seguenti: resistenza del calcestruzzo, tipo di superficie (per esempio sagomata o non sagomata), tipo di calcestruzzo (per esempio normale o leggero), stato di umidità della superficie, carbonatazione (se appropriato), direzione della prova.

Servono almeno 9 punti di prova, e bisogna assicurarsi che la distanza tra due punti di impatto sia non meno di 25 mm e che nessuno sia a meno di 25 mm da un bordo.

Il risultato fornito dalla prova è l'indice sclerometrico dell'area di prova e deve essere calcolato come la media di tutte le misure, aggiustata se necessario in base all'orientamento dello sclerometro in conformità alle istruzioni del fabbricante. L'indice sclerometrico deve essere espresso come numero intero e se oltre il 20 % di tutte le misure si discosta dalla media di oltre il 30%, deve essere scartata l'intera serie di misure.

3.1.3. Indice sclerometrico e Velocità ultrasonica combinate

Alcuni ricercatori ritengono che combinando prove sclerometriche e ultrasoniche (Sonic +Rebound) è possibile compensare parzialmente l'errore sperimentale, ottenendo una stima più attendibile della resistenza del calcestruzzo. I limiti della procedura sono essenzialmente gli stessi delle prove sclerometriche e ultrasoniche disgiunte, ma si ha la possibilità di compensare alcuni errori delle due tecniche dovute alle loro caratteristiche intrinseche: il rimbalzo dello sclerometro è influenzato dalle proprietà dello strato superficiale; la velocità degli ultrasuoni è influenzata prevalentemente dalle proprietà della parte interna del materiale; l'umidità induce errori per difetto nello sclerometro e per eccesso nelle tecniche ultrasoniche.

Non sempre però le formulazioni presenti in letteratura tecnica risultano affidabili, soprattutto perché in alcuni casi sovrastimano sensibilmente le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo. Per tale ragione il professionista potrebbe trovarsi nell'incertezza di dover scegliere quale formulazione, tra tutte quelle disponibili in letteratura, restituisce una stima della R_{cub} prossima a quella reale. Il problema andrebbe quindi affrontato validando espressioni che presentino migliori capacità previsionali, e ciò andrebbe fatto calibrando le correlazioni sulla specifica struttura (materiale) da verificare.

Per la definizione di tali espressioni è possibile utilizzare l'analisi di regressione, che consente di trovare una relazione matematica fra una variabile dipendente ed una o più variabili indipendenti. Nel caso del metodo combinato SonReb la variabile dipendente è la R_{cub} mentre le variabili indipendenti sono rispettivamente l'indice sclerometrico medio I_s e la velocità di propagazione degli ultrasuoni V_{us} .

In letteratura tecnica esistono numerose formulazioni, di natura empirica, per la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo con il metodo combinato SonReb (Tabella 3.4).

Tabella 3.4 Formule Sonreb fornite dalla letteratura

Formula	Unità di misura	Fonte
$R_{cub}=7.695 \cdot 10^{-11} \cdot I_s^{1.4} \cdot V_{us}^{2.6}$	[Mpa, m/s]	(13)Giacchetti e Lacquaniti
$R_{cub}= 0.0286 \cdot I_s^{1.246} \cdot V_{us}^{1.85}$	[Mpa, km/s]	(14)Gasparik
$R_{cub}= 1.2 \cdot 10^{-9} \cdot I_s^{1.058} \cdot V_{us}^{2.446}$	[Mpa, m/s]	(15)Di Leo e Pascale

E' necessario sottolineare la notevole variabilità dei coefficienti delle interpolazioni Sonreb; se ne deduce che l'impiego dei coefficienti reperibili in letteratura deve essere considerato con molta prudenza.

In alternativa all'approccio di modellistica classica si può procedere applicando le Reti Neurali. Esse sono caratterizzate dalla capacità di apprendimento automatico di cui si mostrerà nel seguito l'applicazione pratica.

3.1.4. Prova di carbonatazione

La prova di carbonatazione è una tecnica di indagine semi-distruttiva allo scopo di misurare la profondità di carbonatazione dello strato superficiale di una struttura in calcestruzzo. La carbonatazione è un fenomeno chimico per cui l'idrossido di calcio, presente nel calcestruzzo, reagisce con l'anidride carbonica, formando così carbonato di calcio. La riduzione dell'idrossido di calcio determina un abbassamento del pH, creando in questo modo le condizioni favorevoli per l'innesco della corrosione dei ferri d'armatura: infatti, quando lo strato carbonato intacca il calcestruzzo che ricopre le armature, viene meno la protezione passivante creata dalla pasta cementizia, permettendo all'ossigeno e all'umidità di attaccare il ferro. Il fenomeno dell'ossidazione produce la diminuzione del copriferro o, più gravemente, la riduzione della sezione resistente del tondino. La prova deve essere effettuata subito dopo l'estrazione del campione di calcestruzzo tramite carotaggio, dal momento che, con il passare del tempo, l'anidride carbonica tende a "carbonatare" lo strato superficiale del conglomerato. Operativamente si procede immergendo il campione in una soluzione di fenolftaleina che contiene alcool etilico all'1%, provocando una colorazione viola nella zona non intaccata dalla carbonatazione. Il tratto "incolore", invece, indica la profondità di carbonatazione. La fenolftaleina vira al rosso a contatto con materiale il cui pH è $>9,2$ e rimane incolore per valori inferiori. La profondità di carotaggio non dovrebbe interessare più del doppio dello spessore di copriferro.

In prima approssimazione, si può affermare che il procedere dello strato carbonatato segue una legge del tipo $s = K \cdot \sqrt{t}$ e la progressione della penetrazione nel tempo assume pertanto un andamento parabolico.

Nel caso di strutture esistenti è possibile misurare la penetrazione della carbonatazione e quindi, nota l'età della struttura, risalire al coefficiente K. In tal modo risulta possibile prevedere il futuro andamento del fronte carbonatato.

Nel seguito si riportano alcuni valori di letteratura, indicativi del coefficiente di carbonatazione K:

- $2 < K < 6$: calcestruzzi molto compatti (basso A/C ben costipati e maturati, cemento > 350 kg/mc);
- $6 < K < 9$: calcestruzzi di media compattezza;
- $K > 9$: calcestruzzi porosi di bassa qualità (con cemento < 250 kg/mc).

Le norme di riferimento per questa tipologia di prova sono le seguenti: (16) UNI EN 14630:2007 *Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo Metodi di prova - Determinazione della profondità di carbonatazione di un calcestruzzo indurito con il metodo della fenolftaleina* e (17) UNI 9944:1992 *Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo*.

3.1.5. Pull-out

La prova di pull-out fa parte di quell'insieme di prove definite come moderatamente distruttive in quanto è una tipologia di indagine che richiede prelievi di piccole quantità di materiale in zone di estensione ridotta. Obiettivo di tutte le prove moderatamente distruttive è quello di ottenere stime affidabili delle proprietà dei materiali realizzando danni strutturali irrilevanti e danni funzionali di facile riparazione. Questo requisito impone, talvolta, di dedurre alcuni parametri meccanici in modo indiretto, come ad esempio la resistenza a compressione del calcestruzzo che la prova di pull-out stima sulla base di una misura diretta della resistenza a trazione del materiale. Le misurazioni hanno però carattere locale e valenza circoscritta alla zona della struttura nella quale si esegue la prova; la definizione di caratteristiche dei materiali medie globali, quindi, rimane una questione da definire a valle delle prove sperimentali.

Il metodo della prova di estrazione pull-out è basato sulla misura della forza necessaria ad estrarre dal calcestruzzo un inserto metallico standardizzato. La rottura della parte sottoposta a tensione avviene per compressione-taglio tra la parte allargata del tassello e la base del martinetto.

La forza di estrazione F , ricavabile dalla pressione misurata al martinetto, è correlabile alla resistenza del calcestruzzo (R_c) tramite una relazione lineare del tipo $R_c = A + B \cdot F$ in cui i coefficienti A ($\sim 4,4:4,5$) e B ($\sim 0,77$) devono essere calibrati con prove distruttive su carote.

La prova consiste nell'estrazione da un elemento strutturale in calcestruzzo di una barra metallica inserita nella struttura dopo il getto ed a questo ancorata mediante un tassello metallico ad espansione. La barra viene estratta insieme ad un cono di calcestruzzo, evidenziando come la condizione di collasso del materiale sia per superamento della resistenza a trazione sulla superficie laterale del cono di calcestruzzo. La prova, quindi, consiste in una misura diretta della resistenza a trazione da cui, con correlazioni essenzialmente empiriche, viene dedotta la resistenza a compressione del calcestruzzo. L'affidabilità della prova è fortemente influenzata da tutti i parametri che possano disturbare l'estrazione del cono di calcestruzzo, come la presenza di armature e di bordi liberi della struttura. Per questo motivo, la prova di pull out viene usualmente eseguita negli strati superficiali degli elementi strutturali potrebbe fornire dati falsati in presenza di degrado del materiale.

La forza di estrazione è rappresentativa di uno stato di sollecitazione complesso, ma il suo valore è correlabile con la resistenza a compressione. La correlazione tra forza d'estrazione e resistenza a compressione varia al variare della resistenza del calcestruzzo, ma è migliore delle correlazioni esistenti tra resistenza a compressione e indice di rimbalzo o velocità di propagazione delle onde elastiche (1) [*Linee Guida - Calcestruzzo strutturale - messa in opera e prove non distruttive*].

Le (18) UNI EN 12504-3:2005 (*Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 3: Determinazione della forza di estrazione*) indicano che la misurazione può essere utilizzata per stimare la resistenza in sito, per stabilire quando procedere al post tensionamento, quando rimuovere forme e puntelli, quando interrompere la protezione invernale e la manutenzione, oppure per effettuare prove comparative. Specifica inoltre che il metodo di prova non è da intendersi come alternativo per la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo (così come stabilito dalla (19) EN 12504-1) sebbene, con opportune correlazioni, possa fornire una stima della resistenza in sito.

È stato dimostrato che per un determinato tipo di apparecchiatura, la relazione tra la forza di estrazione e la resistenza a compressione è simile per una vasta gamma di calcestruzzi e che è possibile utilizzare una correlazione generale di sufficiente accuratezza. Una maggior accuratezza, tuttavia, può essere raggiunta se si ottiene una correlazione specifica per il tipo di calcestruzzo in esame.

Sono richieste correlazioni particolari per calcestruzzi leggeri o per altri tipi di calcestruzzi con costituenti meno comuni.

Quando si utilizza una correlazione generale, le stime di resistenza a compressione difficilmente rispettano limiti di confidenza al 95% migliori del $\pm 20\%$ della media di quattro risultati validi. Quando è disponibile una correlazione appositamente preparata per un determinato tipo di calcestruzzo, le stime possono rientrare nel $\pm 10\%$.

La resistenza all'estrazione può essere calcolata mediante la formula:

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

Dove:

f_p è la resistenza all'estrazione, espressa in megapascal o newton al millimetro quadrato;

F è la forza di estrazione, espressa in newton;

A è l'area della superficie di frattura, espressa in millimetri quadrati, ottenuta mediante la formula:

$$A = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (d_2 + d_1) \cdot [4h^2 + (d_2 - d_1)^2]^{1/2}$$

Dove:

d_1 è il diametro, espresso in millimetri, della testa dell'inserito per la prova di estrazione;

d_2 è il diametro interno, espresso in millimetri, dell'anello portante;

h è la distanza, espressa in millimetri, dalla testa dell'inserito per la prova di estrazione alla superficie del calcestruzzo.

La valutazione si ottiene correlando il valore della forza necessaria all'estrazione di un tassello, che può essere pre-annegato nel calcestruzzo (intervento preventivo) o inserito in una fase successiva al getto (intervento post-opera), con il valore della resistenza cubica determinata con il metodo tradizionale.

Prima di effettuare la prova occorre verificare che nella zona interessata dalla prova di estrazione non vi siano alvei o nidi di ghiaia dovuti al mancato costipamento o all'eventuale carenza di lavorabilità della miscela, oppure attribuibili all'effetto dilavante della pasta cementizia per un eccesso. Va inoltre verificata l'ortogonalità del tassello rispetto alla superficie del piano d'appoggio dell'estrattore (ci si deve accertare che l'angolo non superi 3-4 gradi rispetto alla verticale del piano).

In ogni area di misura si devono effettuare almeno 3 estrazioni e una volta individuata la corretta posizione di foratura, utilizzando se necessario un pacometro per evitare interferenze con l'armatura, si procede assemblando i componenti del set di foratura (punta svasatrice+campana), ed inserendo il tutto nel mandrino del trapano. Si posiziona ortogonalmente il trapano alla superficie e quindi si realizza la foratura in rotazione. Una volta pulito accuratamente il foro dalla polvere, si inserisce il tassello e con l'apposito percussore si effettua l'espansione. Le caratteristiche meccaniche del tassello utilizzato, consentono risultati assimilabili a quelli ottenibili con un tassello annegato. Si fissa il martinetto alla parete con apposito tirante al tassello. Durante l'operazione di estrazione, si dovrebbe cercare di mantenere costante la velocità di pompaggio onde evitare che incrementi bruschi della pressione possano creare una crisi prematura del calcestruzzo. Ad estrazione avvenuta si rileva il valore della pressione corrispondente all'apposito manometro.

3.2. Campagna sperimentale in laboratorio

Al fine di verificare l'affidabilità dei metodi di indagine non distruttivi come metodo di valutazione delle proprietà del calcestruzzo indagato, è stata predisposta una campagna di indagine sperimentale su una serie di miscele prodotte dall'azienda Unical Sardegna.

Sono stati realizzati un totale di 100 provini cubici di lato 15 cm. Essi sono stati sottoposti alle prove non distruttive per la misurazione della velocità ultrasonica e dell'indice sclerometrico, ed in fine sono stati sottoposti ad una prova a rottura per la determinazione della resistenza a compressione.

È stata quindi studiata la correlazione tra le prove non distruttive e la prova di compressione attraverso l'approccio di modellistica classico costituito dall'analisi di regressione ed in seguito applicando la teoria delle Reti Neurali. Nel documento si mostrerà il confronto tra i risultati ottenuti.

Lo scopo di questa campagna di indagine svolta in laboratorio è quello verificare l'affidabilità delle indagini sclerometriche e ultrasoniche per la stima della resistenza del materiale.

Da questa applicazione pratica è stato possibile individuare le Reti Neurali come modalità migliore per predire il valore di resistenza del calcestruzzo investigato, partendo dall'impiego dei risultati ottenuti tramite le indagini basso invasive.

Si riporta nella Tabella 3.5 e nella Tabella 3.6 la composizione di ciascuna miscela con le relative percentuali di materiale:

Tabella 3.5 Mix design Miscela 1

Componente	Unità di misura	Set 1 m	Set teorico	Set corr.	Dosato	Diff.	Err %	Umid %	Ass %
Sabbia fine	kg	463	1805	1977	1980	3	+0,2%	10,7	1,2
Risone	kg	200	780	787	780	-7	-0,9%	3	2,1
Graniglia	kg	690	2691	2691	2700	9	+0,3%	2	2
Sabbia Grossa	kg	430	1677	1677	1740	-44	-2,5%	7,5	1,1
		1783	6953	6953	7200	-39	-0,5%		
Cemento 425	kg	178	692	692	685	-7	-1%		
Cemento 425	kg	178	692	692	705	13	+1,9%		
Acqua	L	180	702	702	377	-39	-9,4%		
Additivi	L	3,20	12,48	12,48	12,54	+0,06	+0,5%		
		2321	9051	9051	8980	-72	-0,8%		
Acuqa prevista: 384		Aggiustamento: 0			Aggregati: 284				
Slump	12 cm	S3							

Tabella 3.6 Mix design Miscela 2

Componente	Unità di misura	Set 1 m	Set teorico	Set corr.	Dosato	Diff.	Err %	Umid %	Ass %
Sabbia fine	kg	560	1904	2072	2080	8	+0,4%	10	1,2
Risone	kg	190	646	652	680	28	+4,3%	3	2,1
Graniglia	kg	660	2244	2255	2240	-15	-0,7%	2,5	2
Sabbia Grossa	kg	320	1088	1159	1120	-39	-3,4%	7,6	1,1
		1730	5882	6138	6120	-18	-0,3%		
Cemento 325	kg	390	1326	1326	1320	-6	-0,5%		
Acqua	L	180	612	356	356				
Additivi	L	3,5	11,9	11,9	12,02	+0,12	+1,0%		
		2304	7832	7832	7808	-24	-0,3%		
Acuqa prevista: 373		Aggiustamento: 10			Aggregati: +254				
Slump	20 cm	S4							

Dalla Miscela 1 sono stati ottenuti 52 provini, mentre dalla seconda si sono ottenuti 48 provini.

Come si evince dall'analisi del mix design, l'unica variabile tra le due miscele è la classe di cemento (La miscela 1 è stata confezionata utilizzando il Cemento di classe 425 (Tabella 3.5), mentre si è impiegato il Cemento 325 per la Miscela 2 (Tabella 3.6)).

È stata fatta questa scelta perché il fine ultimo di questa campagna sperimentale è quello di trovare la correlazione tra i risultati ottenuti dalle prove non distruttive e la resistenza del materiale e ci si è posti quindi l'obiettivo di valutare un intervallo ampio di resistenze.

Si ritiene dunque di poter trattare le due miscele come una unica popolazione. Ciò rende possibile eseguire le operazioni di elaborazione con dati interni all'intervallo di Resistenza a compressione da un minimo di 35.4 N/mm^2 a un massimo di 56 N/mm^2 .

Sono stati confezionati un totale di 100 provini cubici (di lato 15 cm) conformemente a quanto stabilito nella (20)UNI EN 12390-2:2002. Il disarmo è avvenuto dopo 2 giorni dalla data del getto e la loro maturazione è avvenuta in acqua a temperatura costante. Intercorso il periodo di maturazione di 28 giorni sono iniziate le prove in laboratorio.

Su ogni provino è stata segnata una griglia per identificare i punti di prova. È stata costruita con tre rette, equidistanti tra loro, sia in direzione verticale che in direzione orizzontale, individuando dall'intersezione di esse nove punti e a questi è stato assegnato un numero progressivo da 1 a 9 (Figura 3.4).

In sintesi ciascun punto di prova sarà identificato tramite:

- Numero provino;
- Faccia provino;
- Numero punto.



Figura 3.4 Grigliatura del provino per l'esecuzione delle prove.

I tempi di propagazione degli impulsi ultrasonici sono stati rilevati con il rilevatore ad ultrasuoni portatile BOVIAR CMS mediante il metodo di trasmissione diretto, ovvero collocando il trasmettitore (generatore d'impulso) su una faccia del provino e il ricevitore del segnale su quella opposta. La prova è stata condotta conformemente alle indicazioni delle norme UNI EN 12504-4 2005. Di ogni provino sono state rilevate diciotto velocità di transito degli impulsi ultrasonori.

Le battute sclerometriche sono state eseguite con lo sclerometro GEI Concrete (in rispetto della UNI EN 12504-2:2012). Di ogni provino sono state considerate, ai fini delle misure, quattro facce, facendo attenzione ad escludere la faccia libera di getto. Su ogni faccia sono state effettuate 9 battute.

Infine, i provini sono stati sottoposti a prove di compressione mediante pressa idraulica MC8 Multifunctional Control Console, Controls Group.

3.2.1. Caratteristiche delle strumentazioni

Apparecchiatura ultrasonica

È stata usata l'apparecchiatura ultrasonica Ultrasonic System BOVIAR CMS per misurare il tempo di propagazione delle onde compressionali (onde P) nei materiali. La misura può essere effettuata per trasmissione diretta, semi-diretta o superficiale.

L'apparecchiatura ultrasonica BOVIAR CMS è costituita da una centralina di acquisizione dati e da una serie di sensori piezoelettrici con trasmettitore piezoelettrico ad alta potenza ($> 1,6 \text{ Kv}$) o con martello strumentato. Sia il trasmettitore che il ricevitore sono di tipo attivo, vale a dire che l'elettronica di eccitazione (trasmettitore) e di pre-amplificazione (ricevitore) sono all'interno del trasduttore. Questa soluzione consente di avere dei segnali in ricezione che vengono trasmessi alla centralina già pre-amplificati e condizionati, su cavi schermati, che quindi non vengono influenzati da disturbi esterni e permettono di utilizzare cavi di prolunga anche di notevole lunghezza (oltre 100 m). La potenza di trasmissione degli impulsi è regolabile via software tramite cursore, e la sensibilità dei ricevitori piezoelettrici di tipo attivo, con frequenza propria 55 KHz, consentono di effettuare misure sia in laboratorio, su provini anche di grandi dimensioni, in materiali quali calcestruzzo, rocce, materiali plastici, vetroresina, legno, sia presso cantieri, per indagini in sito su pilastri e travi in calcestruzzo o materiali lapidei, edifici civili o monumentali.

Il ricevitore di tipo piezoelettrico RSG-55, abbinato all'apparecchiatura sonica ed ultrasonica CMS, consente la ricezione dei segnali in un range di frequenza dei segnali da 1 KHz a 8 KHz, con picco a 6 KHz (30 V/g), tipico quando si effettuano indagini su strutture costituite da materiali non particolarmente veloci o per distanze tra i punti di misura elevate (edifici storici, materiali rocciosi degradati e/o fratturati) e per range di frequenza da 10 KHz a 70 KHz tipica per segnali ricevuti da campioni in calcestruzzo o rocce, sia per prove in sito che in laboratorio.

I trasmettitori di tipo piezoelettrico TSG-55, abbinati all'apparecchiatura sonica ed ultrasonica Cms, hanno elevata potenza di trasmissione dei segnali con frequenze centrate a 55 KHz. Il trasmettitore TSG-20 è di tipo "sandwich" con ceramiche precaricate e permette di generare impulsi con frequenza di circa 20 KHz, impiegabili per attraversare materiali particolarmente lenti o strutture di grandi dimensioni, in alternativa all'uso del martello strumentato, ottenendo frequenze in ricezione più elevate e quindi maggior grado di definizione. La centralina di acquisizione ha al suo interno, oltre che i circuiti per la generazione degli impulsi ad alta tensione del trasmettitore e il condizionamento del segnale proveniente dal ricevitore, una scheda di digitalizzazione a 12 bit con frequenza 1,25 MHz che permette di digitalizzare i segnali acquisiti (forma d'onda completa) e visualizzarli come un oscilloscopio con scale tempi-ampiezze. I segnali vengono visualizzati, elaborati e memorizzati direttamente da un PDA HP iPAQ 214 di ultima generazione dotato di interfaccia bluetooth sul quale è caricato il software PocketSonic che gestisce la visualizzazione, memorizzazione e l'elaborazione dei segnali (Figura 3.5).

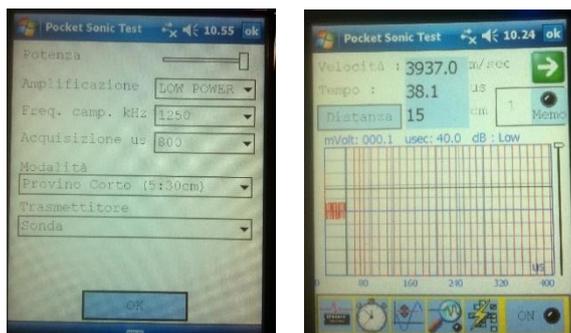


Figura 3.5 Interfaccia grafica su palmare dei dati acquisiti tramite Ultrasonic System BOVIAR CMS.

In Figura 3.5 sono visualizzate le seguenti informazioni:

- Velocità: rappresenta il valore di velocità calcolato come rapporto tra tempo misurato e lunghezza del provino o spessore del manufatto.
- Tempo: rappresenta il valore di tempo calcolato automaticamente o manualmente.
- Distanza: è la distanza tra i trasduttori di trasmissione e ricezione, cioè lo spessore del manufatto in esame. È modificabile premendo il tasto Distanza.
- Grafico del segnale: il grafico del segnale viene visualizzato con i tempi sulla scala orizzontale e le ampiezze su quella verticale. Sulla parte superiore del grafico sono visualizzate le scale delle ampiezze e dei tempi riferite ad ogni divisione ed il valore in deciBel del guadagno di amplificazione del sistema di ricezione.

Sclerometro meccanico

Lo sclerometro GEI Concrete è una incudine in acciaio di taratura IT GEI distribuiti dalla BOVIAR sono stati progettati e costruiti per poter operare nel rispetto della UNI EN 12504-2:2012 (*Prova sul calcestruzzo nelle strutture-Prove non distruttive-Determinazione dell'indice sclerometrico*) (Figura 3.6).



Figura 3.6 Sclerometro meccanico GEI Concrete.

Le prove sclerometriche sono utilizzate per stimare, con le dovute limitazioni del procedimento, la resistenza a compressione del calcestruzzo in strutture già realizzate.

Infatti la UNI EN 12504-2:2012 al punto 1, nota 2, prescrive che il metodo di prova non è inteso come una alternativa per la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo ma, con una opportuna correlazione, può fornire una stima della resistenza in sito. L'indice di rimbalzo dello sclerometro determinato mediante questo metodo può essere utilizzato per la valutazione

dell'omogeneità del calcestruzzo in sito, per delineare le zone o aree di calcestruzzo in sito, per delineare le zone o aree di calcestruzzo di scarsa qualità o deteriorato presenti nelle strutture.

Il principio di funzionamento dello strumento è che una massa scagliata da una molla colpisce un pistone a contatto con la superficie del calcestruzzo in esame ed il risultato della prova viene espresso in termini di distanza di rimbalzo della massa.

Per la verifica della taratura dello sclerometro l'incudine in acciaio IT GEI dovrà essere collocata su un piano rigido. Azionare lo strumento almeno tre volte prima di iniziare ad effettuare le letture all'incudine in acciaio di taratura, per assicurarsi che la macchina dello stesso funzioni correttamente. Successivamente si provvederà all'inserimento dello sclerometro nell'anello guida dell'incudine ed all'esecuzione di una serie di battute (≥ 10). La media degli indici di rimbalzo ottenuta con lo sclerometro all'incudine in acciaio di taratura deve essere $= 80 \pm 2$.

Gli elementi di calcestruzzo da sottoporre a prova devono essere di almeno 100 mm di spessore. Devono essere evitate aree che rivelano la presenza di nidi di ghiaia, sfaldature, tessiture grossolane o altre porosità ed in prossimità di grossi inerti. Si deve altresì evitare, effettuando una preliminare indagine magnetometrica (mediante pacometro), di eseguire le battute sclerometriche nelle aree interessate dal passaggio delle armature ed in vicinanza dei cavi e dei fili di precompressione. L'area da sottoporre a prova deve essere approssimativamente 300 x 300 mm. Assicurarsi che la distanza tra due punti di impatto sia di almeno 25 mm e che nessuno di essi sia meno di 25 mm dal bordo e dalle armature. La preparazione della prova viene eseguita utilizzando la pietra abrasiva in carburo di silicio, fornita a corredo dello strumento, per rettificare le superfici a tessitura ruvida o tenera o le superfici con residui di malta, fino a renderle lisce.

Per effettuare le misurazioni si procede premendo l'asta di percussione contro la superficie del calcestruzzo da esaminare, mantenendo l'apparecchio ortogonale alla superficie stessa. Bisogna applicare una pressione graduale e crescente fino ad ottenere lo sgancio del martello e mantenendo l'apparecchio fermamente premuto contro la superficie esaminata, si preme il nottolino di arresto laterale e si legge il valore dell'indice di rimbalzo. Andranno esaminate tutte le impronte lasciate sulla superficie dopo l'impatto e se ha frantumato o sfiorato a causa di un vuoto vicino alla superficie, si scarta il risultato. Si può quindi registrare l'indice di rimbalzo. Vanno utilizzate un minimo di nove misure per ottenere una stima affidabile dell'indice di rimbalzo di un'area di prova. Dopo ogni serie di battute, andrebbe rieseguita la verifica di taratura dello sclerometro utilizzando l'incudine in acciaio (la media degli indici di rimbalzo deve essere $= 80 \pm 2$). Se oltre il 20% di tutte le misure ritenute valide si discosta dalla media per più o meno di 6 unità, deve essere scartata l'intera serie di misure. L'indice sclerometrico dell'area di prova deve essere calcolato come la media di tutte le misure, aggiustata se necessario in base all'orientamento dello sclerometro in conformità alle istruzioni del fabbricante.

Prova a compressione

Per misurare la resistenza a compressione dei provini è stata utilizzata la macchina di compressione MC8 Multifunctional Control Console che opera in accordo alla EN 12390-4:2000 (Figura 3.7).



Figura 3.7 MC8 Multifunctional Control Console.

3.2.2. Risultati sperimentali

Per mezzo della campagna sperimentale svolta in laboratorio, è stato possibile raccogliere una serie di dati sufficientemente ampia e omogenea tale da poterne dedurre interessanti significati.

Per quanto riguarda i tempi di propagazione degli impulsi, essi sono stati misurati mediante il metodo di trasmissione diretto, ovvero collocando il trasmettitore (generatore d'impulso) su una faccia del provino e il ricevitore del segnale su quella opposta. Di ogni provino sono state rilevate diciotto velocità di transito degli impulsi ultrasonori i cui valori sono riportati nelle Tabella 3.7 e Tabella 3.8.

Tabella 3.7 Valore della velocità ultrasonica di ogni misurazione eseguita sui provini della Miscela 1.

		Velocità ultrasonica																	
Provino n°	Faccia A-B									Faccia C-D									
	Battuta 1	Battuta 2	Battuta 3	Battuta 4	Battuta 5	Battuta 6	Battuta 7	Battuta 8	Battuta 9	Battuta 1	Battuta 2	Battuta 3	Battuta 4	Battuta 5	Battuta 6	Battuta 7	Battuta 8	Battuta 9	
1	3092.78	3042.6	3042.6	3144.65	3198.29	3092.78	3092.78	3144.65	3144.65	2946.95	2994.01	2242.15	3042.6	3092.78	2857.14	3562.95	3092.78	2814.26	
2	3042.6	3144.65	3496.5	2994.01	3092.78	2994.01	2139.8	3631.96	3562.95	2269.29	2994.01	3703.7	3703.7	3703.7	2901.35	3092.78	2946.95	3703.7	
3	2994.01	2994.01	2901.35	2946.95	2814.26	2901.35	2901.35	3042.6	2139.8	3631.96	3092.78	3144.65	3042.6	2772.64	2732.24	2814.26	3562.95	3703.7	
4	3856.04	4021.45	4021.45	4021.45	3856.04	3856.04	3778.34	3562.95	3856.04	3937.01	4021.45	4021.45	3937.01	3856.04	3778.34	3778.34	3631.96	3937.01	
5	3856.04	3937.01	3937.01	3937.01	4109.59	3937.01	3937.01	3856.04	3856.04	3937.01	3937.01	4021.45	4021.45	3937.01	3778.34	3937.01	3856.04	3253.8	
6	3856.04	4021.45	3856.04	3703.7	3778.34	3937.01	3496.5	4021.45	3937.01	3937.01	4021.45	3937.01	3856.04	3937.01	3856.04	3937.01	4021.45	3856.04	
7	3937.01	4021.45	4201.68	3937.01	3856.04	4021.45	4021.45	3856.04	3631.96	3778.34	3937.01	4021.45	3937.01	4021.45	3937.01	3778.34	3562.95	3370.79	
8	3937.01	4021.45	4109.59	3937.01	3778.34	3856.04	3937.01	4021.45	4109.59	3937.01	3856.04	4021.45	4109.59	3937.01	4109.59	3937.01	4021.45	3937.01	
9	3631.96	3778.34	3562.95	3631.96	3856.04	3703.7	3631.96	3937.01	3856.04	3562.95	3856.04	3856.04	3778.34	3856.04	3778.34	3856.04	4021.45	4109.59	
10	3778.34	3856.04	3778.34	3856.04	3937.01	3778.34	3778.34	3778.34	3778.34	3778.34	3703.7	3562.95	3703.7	3778.34	3703.7	3778.34	3856.04	3631.96	
11	3937.01	3856.04	3856.04	3778.34	3778.34	3703.7	3778.34	3778.34	3703.7	3778.34	3937.01	3631.96	3937.01	3778.34	3703.7	3937.01	3778.34	3778.34	
12	3937.01	3856.04	3937.01	4021.45	3937.01	3856.04	4109.59	3937.01	3631.96	3937.01	3856.04	3778.34	4021.45	3856.04	3703.7	3937.01	3856.04	3937.01	
13	3703.7	3856.04	3778.34	3778.34	3937.01	3631.96	3703.7	3937.01	3937.01	3703.7	3562.95	3631.96	3703.7	3631.96	3631.96	3370.79	3856.04	3778.34	
14	3856.04	3856.04	3937.01	3856.04	3937.01	3937.01	3856.04	3703.7	3631.96	3937.01	3937.01	3778.34	3778.34	3562.95	3937.01	3562.95	3703.7	4021.45	
15	3856.04	3856.04	3937.01	3856.04	3856.04	4021.45	3937.01	3703.7	3856.04	3856.04	3937.01	3937.01	3703.7	3703.7	3856.04	3937.01	3703.7	3778.34	
16	3856.04	4021.45	3856.04	3778.34	3937.01	3856.04	3778.34	3703.7	3856.04	3778.34	3856.04	3856.04	3778.34	3703.7	3856.04	3778.34	3856.04	3856.04	
17	3631.96	3703.7	3703.7	3703.7	3631.96	3631.96	3703.7	3778.34	3631.96	3631.96	3856.04	3778.34	3703.7	3856.04	3856.04	3856.04	3856.04	3198.29	
18	3937.01	3937.01	3937.01	4109.59	3778.34	3856.04	3856.04	3856.04	3937.01	3856.04	4021.45	3856.04	3856.04	3856.04	3937.01	3703.7	3703.7	3937.01	
19	3856.04	3856.04	3937.01	3856.04	3937.01	3856.04	3937.01	3937.01	3856.04	3856.04	3937.01	3937.01	3937.01	3937.01	4021.45	3937.01	3937.01	3937.01	
20	3778.34	3856.04	3856.04	3856.04	3562.95	3703.7	3856.04	3562.95	3703.7	3778.34	3856.04	3778.34	3703.7	3631.96	3562.95	3703.7	3311.26	3631.96	
21	3937.01	3856.04	3937.01	4021.45	3703.7	3778.34	3778.34	3856.04	3937.01	3631.96	3937.01	4021.45	3703.7	4109.59	3778.34	3856.04	3937.01	3631.96	
22	3856.04	3937.01	3856.04	3856.04	3856.04	3778.34	3778.34	3778.34	3703.7	3778.34	3856.04	3856.04	3856.04	3778.34	3778.34	3856.04	3703.7	3856.04	
23	3703.7	3856.04	3856.04	3937.01	3856.04	3432.49	3856.04	3631.96	3631.96	3856.04	3937.01	3856.04	3937.01	3856.04	3937.01	3703.7	3856.04	3856.04	
24	3937.01	3937.01	3778.34	3856.04	4021.45	3703.7	3778.34	3937.01	3562.95	3778.34	3937.01	3856.04	3778.34	3856.04	3778.34	3778.34	3937.01	3937.01	
25	3778.34	3856.04	3937.01	3856.04	3856.04	3937.01	3778.34	3856.04	3937.01	3778.34	3937.01	3778.34	3631.96	3778.34	3778.34	3856.04	3370.79	3703.7	
26	3937.01	3937.01	3937.01	4021.45	3937.01	3937.01	3856.04	3856.04	3937.01	3778.34	3937.01	3703.7	3703.7	3856.04	4021.45	3703.7	3703.7	3856.04	
27	4021.45	3937.01	3856.04	3937.01	3937.01	4021.45	3937.01	4109.59	3856.04	3778.34	3937.01	3937.01	3937.01	4021.45	3856.04	3937.01	3856.04	3856.04	
28	3937.01	4021.45	4021.45	3856.04	4021.45	3856.04	3778.34	3631.96	3703.7	3856.04	4021.45	4021.45	3856.04	3937.01	3562.95	3703.7	3253.8	3856.04	
29											3937.01	3631.96	3496.5	3432.49	3092.78	3496.5	3253.8	3631.96	3778.34
30	3631.96	3937.01	3856.04	3856.04	3496.5	3778.34	3562.95	3370.79	3562.95	3631.96	3778.34	3703.7	3937.01	4021.45	4021.45	4109.59	4109.59	4021.45	
31	3311.26	3631.96	3703.7	3778.34	3778.34	3631.96	3778.34	3703.7	3778.34	3856.04	3778.34	3778.34	3703.7	3856.04	3703.7	3631.96	3856.04	3778.34	
32	3937.01	3856.04	4021.45	3937.01	3856.04	3778.34	3856.04	3856.04	3778.34	3856.04	4021.45	4021.45	3937.01	4021.45	4021.45	3937.01	4109.59	4109.59	
33	3092.78	3144.65	3631.96	2814.26	2772.64	2772.64	2901.35	2814.26	2772.64	3496.5	3092.78	3370.79	3496.5	3370.79	3496.5	3253.8	2814.26	3311.26	
34	3937.01	4021.45	3937.01	4021.45	3937.01	4021.45	4021.45	3937.01	3937.01	3937.01	3856.04	3778.34	3778.34	3856.04	3856.04	3778.34	3778.34	3856.04	
35	3703.7	3144.65	2901.35	2654.87	2901.35	2814.26	3370.79	2901.35	2654.87	3432.49	3562.95	3496.5	2857.4	2946.95	2814.26	3198.29	2857.14	3253.8	
36	4021.45	4021.45	3937.01	3937.01	4021.45	4021.45	4109.59	3937.01	3937.01	4109.59	3937.01	3937.01	3856.04	4021.45	3937.01	3856.04	4021.45	4021.45	
37	3778.34	3856.04	3778.34	3778.34	3703.7	3937.01	3937.01	3631.96	3778.34	3778.34	3778.34	3703.7	3856.04	3703.7	3856.04	3937.01	3778.34	3778.34	
38	3778.34	3703.7	3856.04	3856.04	3937.01	3370.79	3856.04	3703.7	3631.96	3778.34	3562.95	3496.5	3631.96	3311.26	3496.5	3778.34	3496.5	3496.5	
39	3703.7	3778.34	3778.34	3703.7	3856.04	3703.7	3631.96	3631.96	3937.01	3856.04	3778.34	3856.04	3856.04	3703.7	3631.96	3856.04	3631.96	3631.96	
40	3856.04	3937.01	3778.34	3703.7	3856.04	3631.96	3562.95	3631.96	3778.34	3937.01	4109.59	3856.04	4021.45	4021.45	3937.01	3631.96	3778.34	3856.04	
41	3631.96	3631.96	3311.26	3562.95	3092.78	3042.6	3631.96	3092.78	3703.7	2814.26	2994.01	3042.6	3092.78	3092.78	3432.49	3631.96	3631.96	3496.5	
42	3856.04	3937.01	3937.01	3937.01	4021.45	3778.34	4021.45	3937.01	3937.01	3937.01	3856.04	3856.04	3937.01	3937.01	3856.04	3937.01	3856.04	3937.01	
43	3778.34	3937.01	4021.45	3856.04	3778.34	4021.45	3856.04	4021.45	3937.01	3856.04	4021.45	3856.04	3496.5	3856.04	3631.96	3631.96	3937.01	3856.04	
44	3778.34	3856.04	3856.04	3937.01	3856.04	3856.04	3778.34	3937.01	3856.04	3937.01	3856.04	3778.34	3856.04	3937.01	3778.34	3937.01	3856.04	3856.04	
45	3937.01	4021.45	4021.45	3937.01	3937.01	4021.45	3937.01	3937.01	4021.45	3937.01	4021.45	3937.01	4109.59	4109.59	4398.83	3856.04	3937.01	3778.34	
46	3198.29	3144.65	3144.65	3144.65	3144.65	3144.65	3856.04	3856.04	3856.04	3092.78	3144.65	3144.65	3144.65	3144.65	3092.78	3631.96	3370.79	3778.34	
47	3937.01	3856.04	3937.01	4021.45	3856.04	3778.34	3856.04	3703.7	3562.95	4021.45	3937.01	3937.01	4109.59	4021.45	3937.01	3778.34	3856.04	3937.01	
48	3856.04	3937.01	3937.01	3937.01	3856.04	3856.04	3937.01	3856.04	3703.7	3856.04	3778.34	3937.01	3778.34	3778.34	3856.04	3856.04	3937.01	3856.04	
49	3042.6	3144.65	3631.96	3631.96	3856.04	3253.8	3092.78	3562.95	3432.49	3432.49	3092.78	3631.96	3496.5	3092.78	3370.79	3042.6	3631.96	3432.49	
50	3937.01	3856.04	4021.45	3937.01	3937.01	3703.7	3631.96	3432.49	3198.29										
51	3937.01	3937.01	3778.34	3856.04	3937.01	3778.34	3703.7	3778.34	3562.95	3937.01	3937.01	3856.04	3856.04	3856.04	3703.7	3631.96	3432.49	3778.34	
52	3856.04	3856.04	3937.01	3778.34	3778.34	3778.34	3703.7	3631.96	3778.34	3937.01	3856.04	3856.04	3856.04	3562.95	3778.34	3856.04	3703.7	3856.04	

Tabella 3.8 Valore della velocità ultrasonica di ogni misurazione eseguita sui provini della Miscela 2.

		Velocità ultrasonica																	
Provino n°	Faccia A-B									Faccia C-D									
	Battuta 1	Battuta 2	Battuta 3	Battuta 4	Battuta 5	Battuta 6	Battuta 7	Battuta 8	Battuta 9	Battuta 1	Battuta 2	Battuta 3	Battuta 4	Battuta 5	Battuta 6	Battuta 7	Battuta 8	Battuta 9	
1	3562.95	3042.6	3092.78	2857.14	2901.35	2857.14	2693	2901.35	2581.76	2814.26	3092.78	3042.6	3198.29	2814.26	3042.6	3092.78	2901.35	3092.78	
2	2772.64	2857.14	2139.8	2901.35	2814.26	2857.14	2857.14	2946.95	3042.6	2814.26	2901.35	2772.64	2946.95	2901.35	2814.26	2946.95	2994.01	2946.95	
3	2164.5	2901.35	3042.6	2946.95	2946.95	2994.01	2139.8	2994.01	2164.5	3042.6	2693	2946.95	2857.14	2732.24	3042.6	3092.78	2994.01	2994.01	
4	2901.35	2617.8	2857.14	2772.64	3092.78	2946.95	2732.24	3042.6	3042.6	2814.26	2901.35	2901.35	2946.95	2994.01	2617.8	2092.05	2994.01	2068.97	
5	2994.01	3042.6	2814.26	2732.24	3042.6	3144.65	3042.6	3144.65	3092.78	3144.65	2901.35	3042.6	3092.78	3092.78	3042.6	2242.15	2732.24	3370.79	
6	2479.34	2732.24	2654.87	2772.64	2654.87	2772.64	2189.78	2415.46	2479.34	2479.34	2654.87	2654.87	2814.26	2693	2617.8	2581.76	2772.64	2242.15	
7	2946.95	2857.14	2693	2994.01	2901.35	2772.64	2732.24	2732.24	2581.76	2772.64	2814.26	2581.76	2693	2772.64	2654.87	3311.26	2814.26	3562.95	
8	2857.14	2325.58	2814.26	2772.64	2732.24	2814.26	2772.64	2814.26	2617.8	2654.87	2901.35	2693	2772.64	2814.26	2693	2772.64	2901.35	2901.35	
9	2946.95	2994.01	2857.14	2946.95	2901.35	2946.95	2092.05	2901.35	2617.8	2994.01	3092.78	2946.95	2946.95	2994.01	3042.6	3042.6	2994.01	2814.26	
10	2732.24	2946.95	2772.64	2901.35	2946.95	2857.14	2814.26	2814.26	2814.26	2693	2857.14	2946.95	2857.14	2994.01	2732.24	2654.87	2814.26	2693	
11	2814.26	2994.01	2732.24	2994.01	3042.6	2693	2693	2994.01	2732.24	2617.8	2772.64	2164.5	2772.64	2857.14	2654.87	2139.8	2693	2732.24	
12	2732.24	2946.95	2857.14	2901.35	2857.14	2693	2946.95	2857.14	2857.14	2814.26	2415.46	2732.24	2901.35	2994.01	2654.87	2857.14	2814.26	2946.95	
13	2814.26	2654.87	2581.76	2693	2901.35	2772.64	2732.24	2772.64	2189.78	2857.14	2901.35	2772.64	2946.95	2772.64	2617.8	2901.35	2901.35	2479.34	
14	2215.66	2857.14	2092.05	2901.35	2946.95	2901.35	2857.14	2901.35	1981.51	2994.01	2946.95	2092.05	2946.95	2901.35	2946.95	2901.35	3496.5	2139.8	
15	2901.35	3042.6	3311.26	2994.01	3370.79	2215.66	3198.29	2732.24	3253.8	2994.01	3562.95	3311.26	3496.5	3562.95	3311.26	3496.5	3253.8	2946.95	
16	3042.6	2946.95	3092.78	3042.6	3042.6	3042.6	3092.78	3198.29	2857.14	3092.78	2772.64	3042.6	3042.6	2814.26	3042.6	3042.6	2901.35	2581.76	
17	2772.64	2994.01	2857.14	2946.95	2857.14	2732.24	2693	2857.14	2325.58	2512.56	2857.14	2732.24	2857.14	2994.01	3042.6	3042.6	2946.95	2814.26	
18	2814.26	2693	2189.78	3144.65	3144.65	4109.59	3144.65	2857.14	2946.95	3092.78	3198.29	3144.65	2814.26	2857.14	2732.24	3092.78	2772.64	2215.66	
19	2092.05	2814.26	2693	2732.24	2857.14	2814.26	2772.64	2814.26	2732.24	2772.64	2814.26	2693	2857.14	2814.26	2732.24	2814.26	2693	2546.69	
20	2814.26	2946.95	2814.26	2946.95	2994.01	2901.35	2946.95	2814.26	2994.01	2901.35	2857.14	2581.76	2814.26	2857.14	2617.8	2189.78	2901.35	2994.01	
21	3092.78	3042.6	2857.14	3042.6	2354.79	3144.65	3042.6	3092.78	2732.24	2994.01	3092.78	3092.78	3144.65	3092.78	3144.65	3144.65	3144.65	3092.78	
22	2693	2732.24	2068.97	1152.96	3631.96	1314.64	3092.78	3092.78	3144.65	2994.01	2946.95	3092.78	3562.95	2994.01	2215.66	2772.64	2901.35	-	
23	2732.24	3042.6	2189.78	2994.01	3042.6	3631.96	2946.95	2946.95	2092.05	2814.26	3042.6	2068.97	2814.26	2901.35	2901.35	2164.5	3092.78	2901.35	
24	3144.65	3198.29	3144.65	3144.65	3144.65	3042.6	3092.78	3092.78	3144.65	3092.78	3144.65	2946.95	3144.65	3092.78	3144.65	3144.65	3144.65	3092.78	
25	2946.95	3042.6	2693	3144.65	3144.65	3042.6	3092.78	3144.65	2814.26	3144.65	3092.78	3144.65	3092.78	3198.29	3144.65	2901.35	3092.78	3092.78	
26	3092.78	3144.65	2946.95	3042.6	3092.78	2994.01	2384.74	2946.95	2946.95	2772.64	3092.78	3042.6	2857.14	3144.65	2901.35	3144.65	3198.29	2814.26	
27	2994.01	3092.78	3092.78	2857.14	2857.14	2772.64	3042.6	3144.65	2581.76	3042.6	3311.26	3144.65	3092.78	3198.29	3144.65	3042.6	3092.78	3092.78	
28	3042.6	2946.95	3092.78	3144.65	3144.65	3144.65	3042.6	3144.65	2479.34	2857.14	3092.78	3144.65	3092.78	3311.26	3198.29	3092.78	3144.65	3856.04	
29	3042.6	3042.6	2772.64	2994.01	3144.65	3042.6	2994.01	3144.65	2901.35	2732.24	2946.95	2772.64	2994.01	2732.24	2946.95	2994.01	2814.26	2857.14	
30	3042.6	3092.78	2994.01	2946.95	2814.26	2189.78	2946.95	2946.95	2946.95	2384.74	2946.95	2994.01	3042.6	3042.6	3042.6	2901.35	2946.95	2068.97	
31	3042.6	3092.78	3144.65	3092.78	2994.01	3092.78	3042.6	3092.78	2901.35	3042.6	3092.78	2772.64	3092.78	3092.78	2994.01	3703.7	3144.65	3562.95	
32	3092.78	3144.65	3092.78	3144.65	3198.29	3144.65	3198.29	3144.65	3144.65	3092.78	3042.6	2994.01	3092.78	3144.65	3144.65	2732.24	3198.29	3144.65	
33	3092.78	3144.65	3092.78	3144.65	3092.78	3042.6	3092.78	3042.6	3144.65	3432.49	3144.65	3496.5	3144.65	3092.78	3144.65	3092.78	3144.65	3144.65	
34	3092.78	3092.78	3253.8	3144.65	3198.29	3144.65	3092.78	3856.04	3042.6	3144.65	3198.29	2857.14	3042.6	2994.01	2857.14	2269.29	1287.55	2269.29	
35	3311.26	3311.26	3092.78	3042.6	2994.01	2946.95	2139.8	3042.6	2857.14	2325.58	2772.64	3432.49	3253.8	2946.95	3042.6	3432.49	2946.95	3370.79	
36	3144.65	3144.65	3198.29	3144.65	3198.29	3496.5	3092.78	3144.65	3198.29	3092.78	3144.65	3092.78	3042.6	3092.78	2814.26	3092.78	3144.65	3092.78	
37	3370.79	3144.65	2139.8	2946.95	3370.79	2772.64	3198.29	3311.26	3092.78	3562.95	3311.26	2814.26	3042.6	3042.6	2732.24	3092.78	3042.6	2901.35	
38	3144.65	3496.5	3198.29	3144.65	3198.29	3092.78	3144.65	2269.29	2857.14	3092.78	3144.65	3092.78	3198.29	2512.56	3092.78	3144.65	3092.78	3092.78	
39	2732.24	2732.24	3092.78	2994.01	3042.6	3092.78	2814.26	2654.87	3042.6	3092.78	3042.6	2654.87	2946.95	2814.26	2772.64	3092.78	3144.65	3144.65	
40	3253.8	2946.95	2994.01	3092.78	3092.78	3253.8	2994.01	2901.35	2901.35	3144.65	3092.78	3198.29	3092.78	3432.49	2297.09	2946.95	3370.79	2994.01	
41	3092.78	2994.01	3092.78	3370.79	3042.6	2994.01	3198.29	3370.79	2946.95	2297.09	3042.6	2901.35	2994.01	2946.95	2994.01	2946.95	2946.95	2115.66	
42	2242.15	2994.01	2994.01	3042.6	3042.6	3042.6	2994.01	2901.35	2901.35	3042.6	3042.6	2139.8	2901.35	3042.6	2994.01	3042.6	2901.35	2901.35	
43	3092.78	3092.78	3144.65	3092.78	3144.65	3198.29	3144.65	3092.78	3856.04	3092.78	3144.65	3432.49	3092.78	3144.65	3198.29	3144.65	3144.65	3092.78	
44	3144.65	2732.24	3042.6	2814.26	3092.78	2857.14	3042.6	3042.6	2857.14	3042.6	2857.14	2946.95	3144.65	3092.78	3092.78	3092.78	3042.6	2772.64	
45	3144.65	2857.14	3042.6	3092.78	3092.78	3092.78	3092.78	3253.8	3144.65	3144.65	3092.78	3144.65	3042.6	3092.78	3092.78	3778.34	3778.34	3856.04	
46	2901.35	2946.95	2115.66	2857.14	2946.95	2946.95	2901.35	2946.95	3042.6	3432.49	2814.26	3311.26	3562.95	3042.6	3370.79	2139.8	3253.8	2215.66	
47	3092.78	2946.95	3042.6	3092.78	3144.65	2857.14	3856.04	3198.29	3703.7	3042.6	2772.64	2994.01	2772.64	2994.01	2732.24	3092.78	2814.26	3042.6	
48	3092.78	2994.01	3042.6	3092.78	3253.8	2654.87	3144.65	2857.14	3042.6	3042.6	3092.78	2946.95	3144.65	3042.6	3092.78	3144.65	3092.78	3144.65	

Le battute sclerometriche sono state eseguite operando nel rispetto della UNI EN 12504-2:2012. Di ogni provino sono state considerate, ai fini delle misure, quattro facce, facendo attenzione ad escludere la faccia libera di getto. Su ogni faccia sono state effettuate 9 battute i cui valori sono riportati nelle Tabella 3.9 e Tabella 3.10.

Tabella 3.9 Valore di indice sclerometrico di ogni battuta eseguita sui provini della Miscela 1.

		Indice sclerometrico																																					
		Faccia A								Faccia B								Faccia C								Faccia D													
Provino n°		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9		
		1		37	38	38	38	42	40	36	38	36	37	38	42	42	39	39	37	37	38	40	40	38	39	41	42	37	39	37	37	38	37	40	40	40	39	45	39
2		42	41	40	39	43	38	40	40	38	44	38	37	38	43	36	42	42	40	40	41	40	39	42	40	37	43	42	40	48	38	45	42	39	40	42	41		
3		43	42	39	40	40	42	40	42	39	40	43	40	41	43	40	38	40	39	42	40	38	36	40	39	37	38	38	40	40	38	40	40	38	40	38	37		
4		38	39	36	38	36	40	42	42	39	42	43	42	38	40	40	41	46	39	37	41	39	38	47	40	40	40	38	40	39	38	39	40	40	38	40	38		
5		41	43	38	41	42	40	42	41	41	40	41	36	41	42	39	41	41	40	40	42	37	38	43	41	40	42	38	42	37	42	43	44	44	41	38	37	42	39
6		39	41	38	38	40	38	37	39	38	36	38	36	38	38	41	46	42	36	41	41	39	40	44	42	38	42	37	42	43	44	44	41	38	37	42	39		
7		41	42	39	37	39	39	45	39	38	40	42	38	39	40	40	39	40	46	38	41	38	38	40	40	39	41	42	40	42	44	38	41	43	40	43	40		
8		41	41	41	41	42	41	38	42	39	41	40	41	40	42	40	39	42	40	41	44	39	40	42	39	39	41	36	38	37	40	42	40	42	39	42	37		
9		44	40	42	39	41	41	38	42	38	38	42	43	42	43	39	40	39	40	44	42	41	40	40	40	42	41	41	38	44	44	41	44	44	41	42	39		
10		39	37	41	39	42	38	38	40	41	38	44	39	39	42	40	40	42	38	40	41	42	39	40	36	38	40	39	36	45	39	38	43	39	39	42	40		
11		36	39	38	40	41	39	38	40	42	44	42	38	40	40	46	44	37	40	42	40	38	40	40	38	41	38	38	38	41	44	37	42	40	41	40	41		
12		42	41	42	39	39	39	38	40	39	39	42	40	40	40	37	40	40	42	38	36	42	39	38	43	38	42	38	37	42	41	39	40	38	40	38	39		
13		39	40	38	40	39	37	42	40	37	38	40	36	38	37	38	37	39	37	39	41	41	38	44	40	40	42	42	39	38	41	41	40	40	39	38	41		
14		39	42	38	44	40	41	39	39	40	37	38	38	40	41	50	39	40	38	38	39	44	38	42	39	46	41	36	39	42	39	43	41	38	38	40	40		
15		42	40	41	40	39	37	38	43	37	37	39	39	37	40	42	38	42	45	39	41	39	42	43	40	40	43	41	38	40	41	44	43	39	39	41	39		
16		41	45	40	40	42	43	42	45	38	42	43	40	42	37	38	38	42	43	42	41	41	43	44	44	39	42	43	37	40	44	38	44	42	39	43	37		
17		41	40	39	40	42	39	39	40	42	39	41	38	40	43	38	39	40	40	36	40	36	42	41	38	37	40	38	43	40	39	42	42	40	40	40	37		
18		45	46	44	45	45	42	41	42	40	42	44	43	40	42	42	40	40	38	42	43	44	41	43	42	40	42	40	43	45	46	44	42	42	42	41			
19		38	39	38	39	38	38	37	39	36	42	41	43	40	40	39	40	37	37	40	42	39	44	48	40	39	40	42	42	39	38	44	43	38	37	41	38		
20		42	45	40	40	42	42	39	41	40	38	43	38	38	42	43	40	43	38	44	43	42	41	43	42	45	40	43	43	42	39	41	43	40	41	43	46		
21		42	42	41	41	42	42	40	40	42	37	41	46	40	40	41	41	41	40	43	47	42	42	42	42	40	40	38	40	40	41	39	41	40	40	38	40		
22		41	44	42	42	44	43	42	44	40	38	41	41	41	41	41	45	42	41	41	42	40	39	41	40	40	42	43	39	40	39	39	42	41	41	44	38		
23		37	38	40	38	41	38	39	42	39	37	39	40	39	40	37	42	40	38	37	42	37	38	40	39	39	40	40	38	40	38	36	42	39	41	44	41		
24		42	46	41	41	43	41	39	42	39	40	42	40	40	40	40	39	40	38	45	41	39	43	41	41	38	44	38	39	44	38	40	42	39	37	42	38		
25		44	41	39	44	42	40	41	40	36	40	45	38	42	40	38	40	39	39	39	41	40	38	43	40	38	40	40	40	42	41	41	41	41	41	41	40	39	
26		42	43	41	42	42	40	40	42	37	41	46	40	40	41	41	41	41	40	43	47	42	43	43	42	41	44	42	44	42	48	43	43	43	43	46	42		
27		39	43	45	43	37	41	43	44	42	42	39	38	37	41	41	36	42	42	38	41	42	37	38	39	39	41	40	38	39	38	40	43	48	41	37	39		
28		38	43	38	39	42	38	41	39	37	37	39	38	41	38	38	38	42	39	41	42	41	40	42	43	41	44	41	41	43	41	40	42	43	41	44	43		
29		41	43	41	46	47	40	40	40	37	40	38	38	39	40	39	39	39	40	41	42	40	40	42	41	42	43	45	42	44	42	42	41	41	40	40	39		
30		38	43	39	44	41	41	40	41	38	39	39	39	42	41	39	38	38	39	39	41	40	40	42	41	38	45	43	43	40	40	39	41	41	44	42	40		
31		38	40	40	38	40	40	40	38	38	40	37	40	40	39	40	40	40	42	38	40	40	41	40	40	40	42	41	44	39	40	39	40	46	37	39	39		
32		39	38	39	42	38	46	38	42	36	38	39	38	44	42	40	42	40	43	40	40	40	37	39	40	38	41	39	39	39	36	40	40	40	42	42	36		
33		40	42	39	41	39	42	36	41	42	39	38	40	39	39	36	44	42	38	38	40	39	41	46	39	39	39	40	40	42	34	45	39	38	37	42	38		
34		42	44	43	41	45	44	41	42	42	38	43	42	40	46	44	40	44	44	42	42	42	42	43	41	41	42	41	42	46	40	40	43	40	40	45	44		
35		38	37	37	36	40	40	40	40	34	36	37	37	38	42	38	36	40	36	38	40	38	44	36	40	39	42	39	37	39	39	40	40	42	36	45	39		
36		38	42	41	41	40	42	38	42	42	39	38	40	41	40	38	37	42	38	40	40	41	40	40	40	39	39	41	39	39	42	40	42	42	38	42	40		
37		48	44	42	40	44	40	43	47	39	41	43	42	41	42	41	41	44	39	42	44	42	42	42	43	39	42	40	41	41	43	44	44	40	41	39	40		
38		37	48	44	39	42	39	39	38	39	38	44	43	40	42	40	42	42	39	42	42	38	39	40	39	42	40	38	37	44	39	42	39	40	37	39	42		
39		46	42	37	42	40	44	39	37	40	43	42	38	39	37	39	39	37	40	50	39	44	45	39	48	41	38	38	40	38	38	49	39	40	44	46			
40		39	44	38	39	40	38	38	42	37	39	42	40	40	42	40	38	39	38	41	42	43	46	40	39	38	45	41	40	38	39	40	41	40	43	42	41		
41		37	39	38	39	41	40	38	39	38	38	40	38	38	39	37	41	40	37	40	38	37	39	42	37	38	42	45	42	38	43	39	42	40	42	40	42		
42		39	37	38	40	40	41	40	40	38	40	38	38	38	39	38	37	38	36	41	42	42	43	40	39	39	40	38	39	41	43	41	42	40	40	42	39		
43		39	40	37	40	42	39	37	42	37	38	41	42	40	39	45	38	37	40	39	42	46	38	42	40	44	41	40	37	37	42	41	42	44	40	38	38		
44		44	47	41	42	49	42	42	40	40	49	44	40	44	48	40	43	40	38	41	43	43	42	42	45	40	47	42	40	40	43	34	42	40	38	43	43		
45		42	43	43	41	44	41	40	42																														

Tabella 3.10 Valore di indice sclerometrico di ogni battuta eseguita sui provini della Miscela 2.

		Indice sclerometrico																																				
		Faccia A									Faccia B									Faccia C									Faccia D									
Provino n°	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9		
1	31	35	35	35	35	34	32	41	36	34	44	33	45	38	31	31	37	35	40	37	37	39	43	38	39	40	39	38	38	38	38	42	38	40	43	38		
2	36	39	39	36	40	37	36	37	37	36	38	35	38	39	36	40	38	34	42	41	38	38	40	37	42	37	36	38	38	38	41	41	40	38	39	37		
3	33	36	35	37	35	32	33	33	33	33	35	31	34	34	31	30	31	31	31	35	32	34	36	37	30	40	33	33	34	30	35	36	33	32	34	32		
4	30	35	31	34	35	34	32	32	30	30	34	36	33	36	33	30	34	32	32	35	36	35	37	30	29	34	39	31	33	30	39	37	36	32	34	29		
5	32	36	32	30	36	34	29	33	30	31	34	36	31	34	32	32	32	29	30	36	35	34	38	36	36	34	35	33	36	34	35	35	33	35	32	29		
6	38	40	36	34	39	38	37	37	37	39	39	38	37	41	38	35	37	37	38	36	37	38	40	37	38	38	37	39	37	34	39	40	36	37	38	35		
7	39	38	38	39	39	37	36	40	38	37	35	35	38	39	37	39	39	37	38	38	38	40	42	38	40	38	37	39	41	37	43	42	38	38	40	38		
8	40	42	37	41	40	38	40	38	38	40	42	39	41	38	37	38	40	38	38	39	38	38	40	35	36	36	37	35	38	35	35	36	33	34	36	35		
9	35	36	34	35	36	37	34	36	39	32	34	39	31	39	34	33	36	35	35	36	37	37	37	37	35	36	37	34	39	35	35	40	37	36	37	38		
10	38	40	34	36	37	36	38	38	34	36	40	38	37	39	37	35	38	38	37	39	37	37	37	36	34	35	31	36	36	37	38	37	38	37	38	37	35	
11	40	43	37	37	40	40	39	39	39	39	42	38	40	38	39	38	40	40	36	39	40	37	39	36	36	37	37	36	37	37	38	38	37	35	41	35		
12	36	39	40	37	39	37	33	38	39	34	37	34	34	39	39	32	34	32	39	38	39	41	39	38	38	34	38	37	38	38	41	38	38	39	36	37		
13	38	39	35	40	39	36	40	40	37	38	37	33	37	38	36	37	40	35	36	38	36	37	37	35	37	40	37	36	39	37	37	39	38	39	38	37		
14	38	37	40	40	40	39	39	39	37	34	39	41	40	40	39	38	39	37	37	38	40	39	37	41	37	39	39	37	38	40	37	38	38	36	39	39		
15	34	36	37	34	37	35	36	35	36	34	35	34	36	37	33	35	38	42	35	35	36	38	38	36	32	37	37	38	38	35	30	35	35	30	34	32		
16	39	41	36	46	40	39	39	42	38	36	38	38	38	38	39	39	39	39	39	39	39	39	39	42	39	46	39	38	46	39	37	39	39	41	38	39		
17	39	36	35	35	38	36	39	38	34	36	38	35	36	39	35	39	36	32	37	41	38	38	40	38	38	39	36	42	39	38	42	38	38	40	39	38		
18	37	38	36	38	39	37	38	38	35	35	37	36	35	37	37	36	38	38	39	39	36	38	40	35	38	38	38	39	36	37	39	37	38	38	39	40		
19	38	39	38	38	39	35	36	38	36	34	36	34	38	37	37	37	38	36	37	38	37	36	39	37	37	40	38	38	37	35	37	38	37	38	40	37		
20	36	43	39	34	38	38	36	36	36	47	42	37	38	38	36	41	37	37	46	37	37	37	35	35	33	36	36	37	39	36	39	40	36	38	40	37		
21	36	37	37	36	38	36	36	38	35	36	38	34	46	38	40	35	36	32	35	39	37	40	44	36	33	36	36	35	36	33	38	40	40	34	37	34		
22	39	41	39	38	41	38	37	38	34	36	36	36	34	36	34	34	38	36	37	39	41	37	39	39	36	37	35	36	39	36	38	40	35	33	38	36		
23	38	36	37	37	36	37	34	40	36	35	33	33	35	37	37	38	34	34	40	40	39	37	40	40	37	40	39	38	40	37	38	40	37	38	42	36		
24	37	42	37	40	38	38	36	37	37	38	39	35	38	39	39	38	38	36	40	39	36	38	41	37	37	42	39	37	39	37	38	38	37	37	38	36		
25	35	37	34	38	38	36	35	36	34	37	40	36	36	37	34	37	33	34	38	37	37	37	38	39	38	38	37	38	37	36	43	39	35	37	39	36		
26	39	41	39	39	38	38	39	36	41	38	37	43	38	35	38	37	35	37	39	39	37	39	37	37	37	33	38	39	35	36	40	37	34	37	33			
27	37	38	37	38	39	35	37	33	34	36	38	40	39	38	36	34	37	34	39	39	37	38	39	37	35	36	34	38	38	37	37	39	35	38	37	34		
28	38	39	37	37	45	39	37	40	34	39	38	35	37	38	34	39	38	39	36	41	38	36	40	38	35	38	37	36	39	36	38	39	37	37	38	37		
29	38	38	38	38	40	37	39	40	40	36	35	35	35	40	36	38	40	38	38	38	36	40	40	39	40	42	38	37	38	36	41	39	40	39	39	38		
30	37	39	37	37	40	38	38	36	34	38	38	39	36	38	37	34	38	36	39	39	39	37	41	39	38	39	37	38	39	39	39	40	39	38	38	38		
31	39	39	37	44	39	37	37	36	40	40	37	39	40	46	40	38	34	38	39	38	38	40	38	42	40	37	38	39	36	41	36	37	39	36	38			
32	39	40	37	45	39	35	41	37	33	36	39	36	37	39	35	36	37	34	37	38	36	35	39	37	37	37	39	38	38	38	37	38	39	36	36	33		
33	35	38	37	35	35	36	34	37	37	34	36	33	35	37	39	38	38	36	35	37	35	36	38	37	34	36	38	35	36	36	33	38	41	36	40	36		
34	39	38	38	39	39	37	37	38	34	38	40	42	38	40	38	40	46	40	43	41	43	41	41	44	37	40	36	38	42	36	41	41	39	37	40	40		
35	38	41	37	38	44	37	37	39	36	37	38	38	37	38	36	34	38	35	38	38	35	37	42	38	39	39	38	38	40	38	38	38	36	38	40	37		
36	41	43	38	40	41	38	36	36	35	36	40	43	38	38	36	36	37	36	39	40	39	38	39	38	38	38	39	39	40	38	40	40	38	42	40	37		
37	39	40	38	40	39	39	40	40	40	38	38	38	36	40	37	39	39	36	38	40	36	38	41	39	36	40	39	37	40	37	37	38	38	37	40	36		
38	36	37	36	35	37	35	33	37	36	33	41	33	44	37	36	35	40	34	35	38	36	38	39	36	34	38	37	35	37	34	46	40	34	37	37			
39	42	41	39	40	42	38	40	43	39	39	40	42	40	41	37	39	42	39	32	33	34	36	37	36	35	34	34	40	42	39	40	41	38	41	40	39		
40	32	36	36	36	37	37	37	37	38	34	36	37	37	38	36	35	34	34	36	40	35	38	40	35	38	40	36	36	39	31	37	39	48	35	39	38		
41	37	37	35	32	38	33	40	35	36	35	38	34	37	36	35	38	36	37	36	39	39	39	40	38	39	38	38	38	41	39	37	40	39	37	39	35		
42	36	37	36	36	38	37	37	38	38	35	38	33	40	38	36	34	38	36	36	37	40	36	35	36	36	37	35	34	36	36	40	38	37	37	38	33		
43	37	37	36	38	37	37	37	38	36	35	39	38	40	40	35	37	38	33	38	40	38	38	38	37	38	38	38	36	37	36	39	35	43	38	39	37	38	36
44	37	38	37	37	41	38	38	37	36	37	42	36	39	39	36	37	39	35	38	40	36	38	40	37	38	38	38	36	37	36	39	40	36	37	40	37		
45	36	33	35	38	39	35	34	37	34	35	36	35	36	44	36	39	37	32	37	38	39	34	35	36	36	39	36	37	38	36	44	37	36	38	40	35</		

Tabella 3.11 Parametri distruttivi e non distruttivi di ciascun campionamento.

Miscela 1	Provino n°	Indice sclerometrico medio	Velocità ultrasonica media	Resistenza osservata
	-	-	[m/s]	[N/mm ²]
	1	39	2935	47.10
	2	41	3173	52.40
	3	40	3007	50.60
	4	40	3798	54.00
	5	40	3891	51.05
	6	40	3887	52.90
	7	40	3850	54.70
	8	40	3976	51.10
	9	41	3792	52.90
	10	40	3768	52.60
	11	40	3798	52.30
	12	40	3895	55.00
	13	39	3730	49.50
	14	40	3822	50.80
	15	40	3861	53.80
	16	41	3831	55.50
	17	40	3706	50.90
	18	42	3885	55.00
	19	40	3915	52.40
	20	42	3705	52.50
	21	40	3856	52.20
	22	41	3818	51.50
	23	39	3813	49.20
	24	41	3842	55.30
	25	40	3800	52.80
	26	42	3868	55.40
	27	40	3929	55.80
	28	41	3828	52.40
	29	41	3528	51.00
	30	41	3799	51.00
	31	40	3724	52.40
	32	40	3940	53.10
	33	40	3134	56.00
	34	42	3903	52.70
	35	39	3081	48.70
	36	40	3980	51.60
	37	42	3797	53.60
	38	40	3652	49.70
	39	41	3751	52.90
	40	40	3827	53.00
	41	40	3300	49.50
	42	40	3915	53.00
	43	40	3853	52.90
	44	42	3739	53.80
	45	42	3992	52.10
	46	42	3335	52.30
	47	42	3891	53.60
	48	42	3862	53.70
	49	40	3382	54.80
	50	41	3874	53.90
	51	40	3792	52.20
	52	41	3879	54.20

Miscela 2	Provino n°	Indice sclerometrico medio	Velocità ultrasonica media	Resistenza osservata
	-	-	[m/s]	[N/mm ²]
	1	37	2977	44.50
	2	38	2846	39.80
	3	33	2816	37.50
	4	33	2796	37.70
	5	33	2984	35.40
	6	38	2592	39.90
	7	38	2844	40.00
	8	38	2757	40.20
	9	36	2893	41.40
	10	37	2819	41.20
	11	38	2727	41.70
	12	37	2821	41.70
	13	37	2737	41.80
	14	38	2723	39.90
	15	35	3164	39.70
	16	39	2983	43.40
	17	38	2801	42.20
	18	37	2943	42.30
	19	37	2726	42.40
	20	38	2827	42.90
	21	37	3019	44.00
	22	37	2730	41.80
	23	37	2796	40.30
	24	38	2976	44.20
	25	37	3054	48.30
	26	38	3117	44.00
	27	37	3025	45.00
	28	38	3193	45.00
	29	38	2937	46.10
	30	38	2850	41.70
	31	39	3111	46.80
	32	37	3132	47.60
	33	36	3168	41.60
	34	39	3105	47.30
	35	38	3015	40.20
	36	39	3066	47.00
	37	38	3049	41.20
	38	37	3056	44.30
	39	39	2939	44.50
	40	37	3056	40.40
	41	37	2960	41.20
	42	37	2898	40.30
	43	37	3186	46.10
	44	38	2984	46.30
	45	37	3213	46.80
	46	38	2931	40.20
	47	37	3036	47.10
	48	37	3051	46.20

Delle due miscele sono state effettuate le analisi delle distribuzioni:

Tabella 3.12 Statistica descrittiva Miscela 1

MISCELA 1		Valore medio	Mediana	Deviazione standard	Varianza campionaria	Valore Minimo	Valore massimo	
		Is [-]	41	40	0.94	0.89	39	42
		Vus [m/s]	3729	3820	261.59	68430.14	2935	3992
		Rcub [N/mm ²]	52.6	52.7	1.91	3.67	47.1	56.0

Tabella 3.13 Statistica descrittiva Miscela 2

MISCELA 2		Valore medio	Mediana	Deviazione standard	Varianza campionaria	Valore Minimo	Valore massimo
	Is [-]	37	37	1.31	1.71	33	39
	Vus [m/s]	3946	2968	150.67	22701.17	2592	3213
	Rcub [N/mm ²]	42.7	42	2.98	8.90	35.4	48.3

Come evidenziato precedentemente, l'unica variabile tra le due miscele è la classe di cemento (La miscela 1 è stata confezionata utilizzando il Cemento di classe 425 (Tabella 3.5), mentre si è impiegato il Cemento 325 per la Miscela 2 (Tabella 3.6)). Si ritiene dunque di poter trattare le due miscele come una unica popolazione. Si riporta quindi in Tabella 3.14 la statistica descrittiva dell'insieme delle due miscele.

Tabella 3.14 Statistica descrittiva Miscela 1+ Miscela 2

MISCELA 1 + MISCELA 2		Valore medio	Mediana	Deviazione standard	Varianza campionaria	Valore Minimo	Valore massimo
	Is [-]	39	39	1.97	3.90	33	42
	Vus [m/s]	3353	3180	447.72	200456.19	2592	3992
	Rcub [N/mm ²]	47.8	49.0	5.52	30.49	35.4	56

La deviazione standard è una misura che indica quanto i valori si discostino dal valore medio (la media): $Dev. st = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}}$

La varianza della variabile aleatoria x è definita come il valore atteso del quadrato della variabile aleatoria centrata $x-\bar{x}$: $Var. campionaria = \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}$

3.2.3. Elaborazione dei dati tramite curve di correlazione

Per la definizione della correlazione è possibile utilizzare l'analisi di regressione, che consente di trovare una relazione matematica fra una variabile dipendente ed una o più variabili indipendenti. Nel caso specifico la variabile dipendente è la R_{cub} mentre le variabili indipendenti sono l'indice di rimbalzo Is e la velocità ultrasonica Vus.

La funzione di regressione utilizzata calcola le statistiche per una linea utilizzando il metodo dei minimi quadrati per calcolare la retta che meglio rappresenta i dati.

3.2.3.1. Indagine ultrasonica- Valutazione delle curve di correlazione

I dati sperimentali rilevati sono stati elaborati al fine di determinare le migliori correlazioni fra le diverse grandezze misurate, in particolare fra la resistenza cubica alla pressa e le misure provenienti dalle prove non distruttive. Queste correlazioni possono essere stabilite con una elaborazione statistica, utilizzando l'analisi di regressione, che consente di trovare una relazione matematica fra una variabile dipendente ed una o più variabili indipendenti. Nel caso specifico la variabile dipendente è la R_{cub} mentre la variabile indipendente è la velocità del segnale Vus.

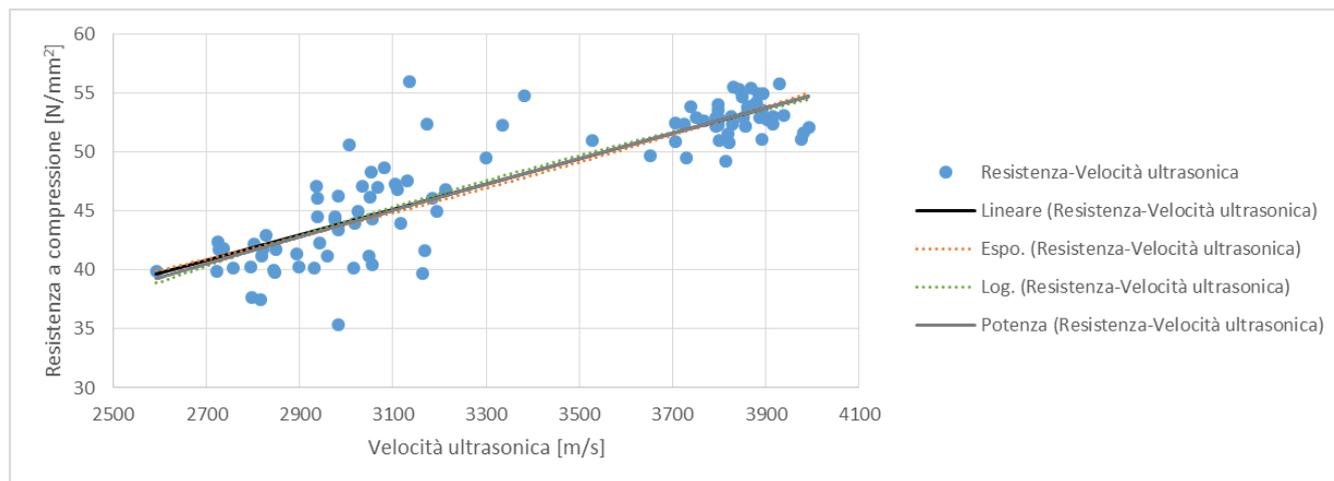


Figura 3.8 Rette di regressione per le variabili V_{us} e R_{cub} .

Tabella 3.15 Linee di regressione R_{cub} - V_{us} e relativo R^2

Tipologia Linea di tendenza	Formula	R^2
Esponenziale	$y=22.051 e^{0.0002x}$	0.75
Logaritmica	$y=36.1 \ln(x)-244.88$	0.77
Lineare	$y=0.0108x +11.746$	0.76
Potenza	$y=0.0935 x^{0.7684}$	0.76

In termini generali, la curva di regressione migliore è quella che più si avvicina all'insieme dei punti corrispondenti alle coppie dei valori (V_{us_i} , R_{cub_i}) (Tabella 3.15 e Figura 3.8).

R^2 è il coefficiente di determinazione. Esso confronta i valori y stimati con quelli effettivi e può avere un valore compreso tra 0 e 1. Se è uguale a 1, significa che esiste una correlazione perfetta nel campione, ovvero non sussiste alcuna differenza tra il valore stimato e il valore effettivo di y . Se invece il coefficiente di determinazione è uguale a 0, l'equazione di regressione non sarà di alcun aiuto nella previsione di un valore y .

La Tabella 3.15 mostra che la linea logaritmica è quella con valore di R^2 che più si avvicina all'unità.

3.2.3.2. Indagine sclerometrica- Valutazione delle curve di correlazione

È stata studiata la correlazione tra la variabile dipendente R_{cub} e l'indice di rimbalzo sclerometrico I_s (variabile indipendente).

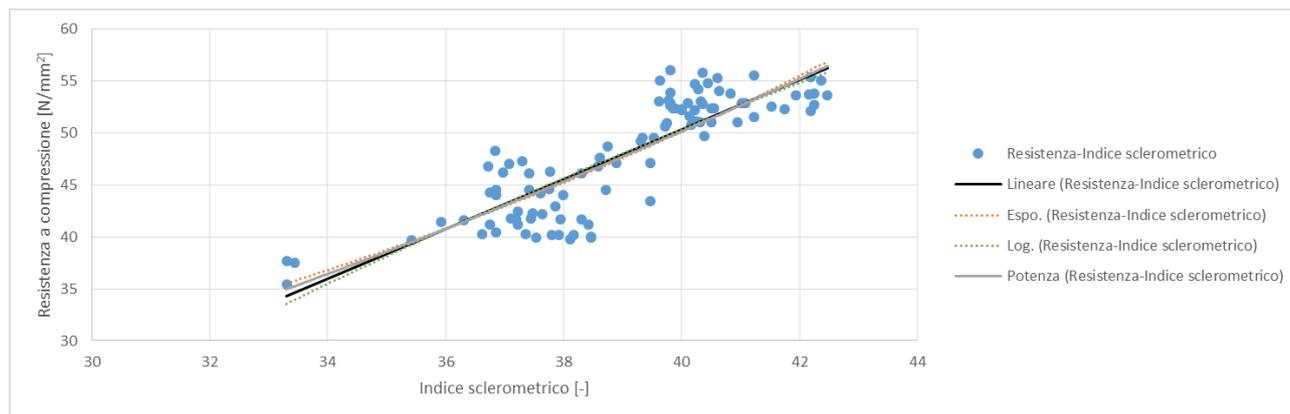


Figura 3.9 Rette di regressione per le variabili Is e Rcub.

Tabella 3.16 Linee di regressione Rcub-Is e relativo R^2

Tipologia Linea di tendenza	Formula	R^2
Esponenziale	$y=6.4236 e^{0.0513x}$	0.73
Logaritmica	$y=91.454 \ln(x)-287.03$	0.72
Lineare	$y=2.3906 x-45.333$	0.73
Potenza	$y=0.0354 x^{1.9668}$	0.73

La curva di regressione migliore è quella che più si avvicina all'insieme dei punti corrispondenti alle coppie dei valori $(Is_i, Rcub_i)$ (vedi Tabella 3.16 e Figura 3.9).

(R^2) è il coefficiente di determinazione. Esso confronta i valori y stimati con quelli effettivi e può avere un valore compreso tra 0 e 1. Se è uguale a 1, significa che esiste una correlazione perfetta nel campione, ovvero non sussiste alcuna differenza tra il valore stimato e il valore effettivo di y . Se invece il coefficiente di determinazione è uguale a 0, l'equazione di regressione non sarà di alcun aiuto nella previsione di un valore y .

3.2.3.3. Metodo combinato- Valutazione delle curve di correlazione

Alcuni ricercatori ritengono che combinando prove sclerometriche e ultrasoniche (Sonic +Rebound) è possibile compensare parzialmente l'errore sperimentale, ottenendo una stima più attendibile della resistenza del calcestruzzo.

Per la definizione di tali espressioni è possibile utilizzare l'analisi di regressione, che consente di trovare una relazione matematica fra una variabile dipendente ed una o più variabili indipendenti (Tabella 3.17). Nel caso del metodo combinato SonReb la variabile dipendente è la R_{cub} mentre le variabili indipendenti sono rispettivamente l'indice sclerometrico medio Is e la velocità di propagazione degli ultrasuoni V_{us} .

Tabella 3.17 Linee di regressione Sonreb e relativo R^2

Tipologia Linea di tendenza	Formula	R^2
Lineare	$y=0.2870+ 0.0084*V_{us}+ 0.5012*Is$	0.81
Potenza	$y=1.9970 * V_{us}^{0.1718} *Is^{0.4867}$	0.56

La Tabella 3.17 mostra che la linea di tendenza lineare è quella con valore di R^2 che più si avvicina all'unità.

3.3. Introduzione alle Reti Neurali

Le reti neurali artificiali (o artificial neural network) sono dei sistemi di elaborazione dell'informazione che cercano di riprodurre il funzionamento dei sistemi nervosi biologici che avvengono all'interno del cervello umano durante le fasi di apprendimento e di riconoscimento. Esse infatti hanno l'obiettivo di simulare i diversi aspetti legati al comportamento e alle capacità del cervello umano, quali: la capacità di elaborazione intelligente delle informazioni, elaborazione distribuita, elevato livello di parallelismo, facoltà di apprendimento, di generalizzazione e di adattamento, alta tolleranza ad informazioni poco precise o sbagliate.

La caratteristica più importante di questi sistemi è, appunto, quella di poter apprendere modelli matematico-statistici attraverso l'esperienza, ossia tramite la lettura dei dati sperimentali, senza dover determinare in modo esplicito le relazioni matematiche che legano le soluzioni al problema.

La rete neurale artificiale non viene quindi programmata, bensì “addestrata” attraverso un processo di apprendimento basato su dati empirici. Per addestrare una rete neurale artificiale esistono tre grandi paradigmi di apprendimento:

- L'apprendimento supervisionato (che sarà quello utilizzato per il trattamento dei dati raccolti durante le prove di laboratorio): si utilizzano opportuni algoritmi atti a minimizzare l'errore di previsione della rete su un insieme finito di esempi tipici ripartiti in coppie input-output. Questo insieme finito di esempi viene detto training set e viene usato nella fase di addestramento, la quale consiste nella presentazione alla rete di una serie di input, per ognuno dei quali si conosce il corrispondente output atteso (target), ed è così possibile determinare l'errore commesso dalla rete confrontando l'output atteso (target) con l'output calcolato. A partire dall'errore calcolato si determina la variazione da apportare ai pesi delle connessioni tra i neuroni (utilizzando algoritmi di back propagation o retropropagazione). Il processo, noto come retropropagazione dell'errore, è iterativo e gli input vengono forniti alla rete fino a che essa non converge ad uno stato di equilibrio per il quale le modifiche dei pesi sinaptici sono nulle o comunque inferiori ad una soglia fissata a priori. L'apprendimento può essere di tipo online, se la correzione avviene in modo incrementale utilizzando un esempio alla volta, o di tipo batch, se la correzione dei pesi sinaptici è effettuata sulla totalità dell'errore degli esempi; se l'addestramento ha successo la rete impara a riconoscere la relazione implicita che lega le variabili di ingresso a quelle di uscita ed è in grado di rispondere correttamente anche a stimoli che non erano presenti nell'insieme di addestramento;
- L'apprendimento per rinforzo (particolare tipo di apprendimento supervisionato): l'output delle rete viene interpretato solo come corretto o sbagliato;
- L'apprendimento non supervisionato: prevede che alla rete siano forniti solamente dei dati in input e venga richiesta una sorta di auto-organizzazione della rete sulla base di alcune strutture nascoste presenti nel campione di dati che si sta analizzando. Si ricevono le informazioni sull'ambiente esterno senza fornire alcuna indicazione sui valori di output, nel tentativo di raggruppare tali dati in cluster (gruppi), riconoscendo schemi (o patterns) impliciti.

Una rete neurale può essere caratterizzata da molti tipi di architettura tra loro diverse, ma i modelli più utilizzati nella pratica sono i cosiddetti “multi-layer perceptron” (MLP) (perceptrone multi livello). Un perceptrone multilivello è organizzato in layer (livelli) sequenziali, di cui il primo è quello dei dati di input e l'ultimo è quello dei parametri di output del modello. I layer intermedi sono detti “hidden” (nascosti), e possono essere uno o più di uno. Questo tipo di architettura rientra nella classificazione

di reti feedforward (connessioni in avanti), per le quali le connessioni tra i neuroni avvengono solo in una direzione, da un layer al successivo, partendo da quello di input, fino a quello di output. Non esistono connessioni tra i neuroni di uno stesso layer, né connessioni dirette in senso inverso e la loro schematizzazione logica e grafica è di tipo aciclica diretta. Le informazioni si propagano di layer in layer attraverso le connessioni fra i neuroni. Ogni neurone di un layer è connesso con tutti i neuroni del layer successivo: quindi, se al layer i si hanno n neuroni, e al layer $i+1$ se ne hanno m , si generano in totale $n \times m$ connessioni fra i due layer.

A ciascuna connessione è attribuito un peso, al fine di rendere più o meno rilevante l'informazione trasmessa tra due neuroni. In genere, il peso è un coefficiente numerico il cui valore è massimizzato o minimizzato automaticamente da appositi algoritmi della rete neurale stessa, a seconda che, in fase di "apprendimento", la rete si "renda conto" che l'informazione associata a una connessione sia più o meno rilevante ai fini della corretta stima del parametro (o dei parametri) di output. Perciò, l'input di ciascun neurone (detto "valore di attivazione") è costituito dalla somma pesata delle informazioni provenienti da tutti i neuroni del layer precedente, cioè dalla somma pesata degli output al layer precedente.

Una rete neurale di tipo feedforward può essere vista come una trasformazione non lineare, la quale è governata da alcuni parametri detti pesi, i cui valori vengono regolati da una serie di esempi dati al sistema. Il processo in cui si assegnano i valori ai suddetti parametri è detto training (addestramento), e può avvenire in modi diversi a seconda dell'algoritmo usato. Dopo aver assegnato i pesi in maniera consona, i nuovi dati potranno essere elaborati velocemente.

La fase di training comprende e in parte corrisponde a quella più specifica di "learning" (apprendimento). Tale fase viene così denominata proprio perché la rete "impara" dai valori sperimentali degli output che deve predire, come correggere i pesi ed elaborare le relazioni che legano gli input agli output. Dunque, la calibrazione della rete è basata sulla cosiddetta "Error Back Propagation Rule", che consiste nel:

- Scegliere una porzione di dati dell'intero database disponibile da impiegare come "training set" (insieme di addestramento); esso deve contenere dati relativi sia ai parametri di input che a quelli di output. La restante quota parte di dati del database sarà utilizzata come "testing set" (insieme di verifica);
- Ipotizzare dei valori iniziali degli elementi della matrice dei pesi e dei bias (che può essere visto come il peso dell'input x_0) per le connessioni tra i neuroni tra i due layer successivi;
- Calcolare l'errore commesso nella previsione dell'output dalla rete, confrontando tale valore di output calcolato con il corrispondente valore di output sperimentale (target); l'errore si propaga all'interno della rete secondo la regola di back-propagation (ovvero, dall'output all'indietro fino all'input); sulla base dell'errore, si apporta una correzione ai pesi, e si ripete il ciclo, misurando il nuovo errore commesso dalla rete, che deve essere inferiore rispetto al primo;
- Il ciclo viene ripetuto iterativamente fino a quando l'errore non si azzera completamente, oppure (caso molto più comune nella pratica) non si ottengono più ulteriori miglioramenti (ovvero diminuzioni sensibili dell'errore).

L'aggiustamento dei valori dei coefficienti di peso, passo dopo passo, è impostato su una minimizzazione dell'errore, inteso come funzione di performance. La funzione di performance è ciò che consente di stabilire quanto la predizione del modello è lontana dal valore sperimentale, e quindi quanto in generale il modello è lontano dalla produzione di soluzioni ottimali. Molto spesso, la

minimizzazione è operata sulla radice quadrata dei quadrati delle differenze tra valore predetto e valore misurato.

RETE NEURALE

- Scegliere una porzione di dati da usare come «training set»
 - Stabilire i valori iniziali dei pesi
- Calcolare l'errore commesso nella previsione dell'output della rete
 - Apportare correzioni ai pesi sulla base dell'errore commesso
- Ripetere iterativamente il ciclo fino a quando non si ottiene la precisione desiderata
 - Verificare risultati sulla restante parte dei dati (testing set)

Figura 3.10 Fasi di costruzione di una rete neurale

Il cervello umano è la struttura nota più complessa, e comprendere il suo funzionamento rappresenta una delle più sfide difficili ed emozionanti affrontate dalla scienza. Per completezza si descrivono in maniera semplificata le reti neurali biologiche.

Il cervello umano contiene circa 10^{11} cellule elettronicamente attive chiamate neuroni. Queste esistono in una grande varietà di forme diverse. L'albero ramificato dei dendriti fornisce una serie di ingressi al neurone, mentre l'assone agisce come uscita. La comunicazione tra i neuroni avviene agli estremi chiamati sinapsi. Ogni neurone è connesso generalmente con molte migliaia di altri neuroni, quindi il cervello ha in totale un numero di sinapsi superiore di 10^{14} .

Sebbene ogni neurone è un sistema di elaborazione dati relativamente lento (operante su scala temporale effettiva di circa 1 ms) il parallelismo massiccio di elaborazione delle informazioni delle molte sinapsi conduce contemporaneamente a una potenza di elaborazione efficace che supera di gran lunga quella degli attuali supercomputer. Esso porta anche ad un alto grado di tolleranza ai “guasti”, e dunque i neuroni che muoiono ogni giorno comportano uno scarso effetto negativo sulle prestazioni. I neuroni agiscono in modalità “del tutto” o “niente”, e quando essi sono “accesi” inviano un impulso elettrico (chiamato azione potenziale) che si propaga dal corpo cellulare lungo l'assone. Quando questo segnale raggiunge una sinapsi innesca il rilascio di neurotrasmettitori chimici che attraversano la giunzione sinaptica fino al neurone successivo. A seconda del tipo di sinapsi, questo può aumentare (sinapsi eccitatoria) o diminuire (sinapsi inibitoria) la probabilità dell'accensione del neurone successivo. Ogni sinapsi ha una forza associata (o peso) che determina l'entità dell'effetto di un impulso nel neurone post-sinaptico. Ciascun neurone quindi calcola una somma pesata degli ingressi da altri neuroni, e, se questo stimolo totale supera una certa soglia, il neurone si accende. Come vedremo in seguito, reti di tali neuroni hanno una capacità di elaborazione delle informazioni molto generale.

Una proprietà fondamentale di entrambi i sistemi neurali reali e artificiali è la loro capacità di modificare le loro risposte come risultato ai segnali esterni. Questo è generalmente indicato come l'apprendimento, e si verifica principalmente attraverso cambiamenti della forza delle sinapsi.

Il modello matematico del singolo neurone è stato introdotto nel 1943 in un documento di McCulloch e Pitts (21) [W. S. McCulloch and W. Pitts, Bull. Math. Biophys. 5, 115 (1943)]. Esso può essere considerato come una funzione non lineare che trasforma un insieme di variabili di ingresso x_i ($i=1, \dots, d$) in una variabile z uscita (vedi Figura 3.11).

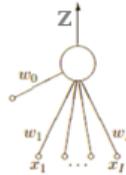


Figura 3.11 Modello matematico del Neurone

Nel modello McCulloch-Pitts, il segnale x_i di ingresso è prima moltiplicato per un parametro w_i noto come peso (che è analogo alla forza sinaptica in una rete biologica) e viene quindi aggiunto a tutti gli altri segnali di ingresso ponderati per inviare un input totale della forma (eq.1):

$$a = \sum_{i=1}^d w_i \cdot x_i + w_0 \quad (\text{eq.1})$$

dove il parametro w_0 si chiama bias (e corrisponde alla soglia di fatica del neurone biologico). Formalmente, il bias può essere considerato come un caso speciale di peso relativo ad un input aggiuntivo x_0 il cui valore è impostato in modo permanente + 1. Quindi possiamo scrivere l'(eq.1) nella forma:

$$a = \sum_{i=0}^d w_i \cdot x_i \quad (\text{eq.2})$$

Dove $x_0=1$.

Si noti che i pesi (e i bias) possono essere di entrambi i segni, in relazione al fatto che corrispondano a sinapsi eccitatorie o inibitorie. L'output z dell'unità (che può essere considerata come analoga alla forza di eccitazione di un neurone) si ottiene operando con una funzione di attivazione non lineare $g()$ in modo che:

$$z = g(a) \quad (\text{eq.3})$$

Analizziamo di seguito le reti di tipo feedforward (connessioni in avanti) tramite le quali è possibile costruire connessioni tra d variabili indipendenti x (x_1, \dots, x_d) (input) e c variabili dipendenti y (y_1, \dots, y_c) (output). Talvolta è conveniente raccogliere le variabili di input e output insieme per formare vettori di ingresso e di uscita che indicheremo con $x = (x_1, \dots, x_d)$ e $y = (y_1, \dots, y_c)$. L'esatta forma della funzione che mappa x a y è determinata sia dalla struttura interna (cioè, la topologia e la scelta di funzioni di attivazione) della rete neurale, e dai valori dei parametri di peso w_1, \dots, w_A . Ancora una volta, i pesi (e bias) possono convenientemente essere raggruppati insieme per formare un vettore $w = (w_1, \dots, w_A)$. Possiamo quindi scrivere la mappatura della rete nella forma $y = y(x; w)$, che indica che y è una funzione di x che è parametrizzato da w .

Effettuando una analogia tra le reti neurali ed una curva polinomiale semplice di ordine m , l'equazione dell'output può essere scritta nella forma:

$$y = w_m x^m + \dots + w_1 x + w_0 = \sum_{j=0}^m w_j x^j \quad (\text{eq.4})$$

La fase in cui si determinano i valori dei pesi di una rete neurale è chiamato "training". Indicando con l'indice $q=1, \dots, n$ un particolare valore del vettore x , esso potrà essere individuato come x^q e il valore di output desiderato sarà t^q . Questo output desiderato è chiamato "target". Al fine di trovare i valori dei pesi più adatti sarà dunque utile considerare l'errore tra il valore di output desiderato t^q , per un particolare input x^q , e il valore corrispondente predetto con $y(x^q, w)$. Ciò può essere espresso considerando come errore la somma dei quadrati dei residui:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^n \{y(x^q; w) - t^q\}^2 \quad (\text{eq.5})$$

Nel caso delle reti neurali, ciascun punto del vettore $x^q = (x^q_1, \dots, x^q_d)$ ha un valore corrispondente t^q . L'errore per l'output k è $y_k(x^q; w) - t^q_k$. L'errore totale per l'intero insieme può quindi essere definito come il quadrato degli errori individuali sommati di tutte le unità di uscita e tutti gli insiemi. Questo dà una funzione di errore, di forma:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^n \sum_{k=1}^c \{y_k(x^q; w) - t^q_k\}^2 \quad (\text{eq.6})$$

Abbiamo introdotto il concetto di un unico processo, descritto dalle equazioni (2) e (3). Se consideriamo un insieme m di unità di questo tipo, si arriva alle reti neurali a singolo layer con parametri adattabili (pesi). La variabile di output è indicata con z_j :

$$z_j = g\left(\sum_{i=0}^d w_{ji} x_i\right) \quad (\text{eq.7})$$

Dove w_{ji} è il peso dall'input i all'unità j , e $g()$ è la funzione di attivazione.

Le reti neurali single-layer come queste sono state largamente studiate negli anni '60 usavano funzioni step di attivazione $g()$ e venivano chiamate *perceptron learning algorithm*. Queste reti hanno una capacità computazionale limitata perché scegliendo come funzione di attivazione quella lineare, la rete si riduce ad una semplice moltiplicazione matriciale. Un potenziamento della rete si ottiene invece considerando layers successivi di unità di elaborazione. La soluzione del problema di addestramento di una rete a più livelli si ottiene usando la funzione sigmoidea di attivazione. Essa garantisce la non linearità e fa rimanere i segnali entro un certo intervallo.

La funzione sigmoidea nella forma di funzione logistica ha quindi equazione:

$$g(a) = \frac{1}{1+e^{-a}} \quad (\text{eq.8})$$

Più specificatamente la funzione logistica è molto usata perché possiede una relazione interessante cioè che $g'(a) = g(a)\{1-g(a)\}$. Questa rete è nota come *multilayer perceptrons*.

Le unità che si trovano negli strati intermedi sono chiamate unità nascoste perché il loro valore di attivazione non è direttamente accessibile dall'esterno della rete. L'attivazione di queste unità avviene come per le reti single-layer come mostrato dalla (eq.7). L'output della rete si ottiene operando su z con una seconda trasformazione che corrisponde al secondo livello di unità:

$$y_k = \tilde{g}(\sum_{j=0}^m \tilde{w}_{kj} z_j) \quad (\text{eq.9})$$

Dove \tilde{w}_{kj} indica il peso nel secondo livello che connette l'unità nascosta j all'unità output k .

Possiamo combinare l'(eq.7) e (eq.9) per ottenere una espressione completa della trasformazione operata dalla rete:

$$y_k = \tilde{g}(\sum_{j=0}^m \tilde{w}_{kj} g(\sum_{i=0}^d w_{ji} x_i)) \quad (\text{eq.10})$$

La funzione somma dei quadrati degli errori (6) può essere scritta come somma della funzione errore di tutti gli elementi oppure per ogni vettore separatamente:

$$E = \sum_{q=1}^n E^q, \quad E^q = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^c \{y_k(x^q; w) - t_k^q\}^2 \quad (\text{eq.11})$$

Consideriamo prima la derivata rispetto al peso nel secondo layer.

È utile usare l'annotazione introdotta all'inizio e scrivere le variabili di output della rete nella forma:

$$y_k = \tilde{g}(\tilde{a}_k), \quad \tilde{a}_k = \sum_{j=0}^m \tilde{w}_{kj} z_j \quad (\text{eq.12})$$

La derivata della funzione errore rispetto ai pesi dell'ultimo layer può essere scritta nella forma:

$$\frac{\partial E^q}{\partial \tilde{w}_{kj}} = \frac{\partial E^q}{\partial \tilde{a}_k} \cdot \frac{\partial \tilde{a}_k}{\partial \tilde{w}_{kj}} \quad (\text{eq.13})$$

Ora definendo:

$$\tilde{\delta}_k = \frac{\partial E^q}{\partial \tilde{a}_k} \quad (\text{eq.14})$$

Usando la (eq.12) possiamo scrivere la derivata nella forma:

$$\frac{\partial E^q}{\partial \tilde{w}_{kj}} = \tilde{\delta}_k z_j \quad (\text{eq.15})$$

Combinando le (eq.11) (eq.12) e la (eq. 14) si ottiene:

$$\tilde{\delta}_k = \tilde{g}'(\tilde{a}_k) \cdot \{y_k - t_k\} \quad (\text{eq.16})$$

Siccome $\tilde{\delta}_k$ è proporzionale alla differenza tra output e valore desiderato viene spesso individuato come errore. Per trovare una espressione corrispondente per la derivata relativa ai pesi del primo layer, iniziamo scrivendo l'attivazione dell'unità nascosta nella forma:

$$\tilde{z}_j = \tilde{g}(\tilde{a}_j), \quad \tilde{a}_j = \sum_{i=0}^d \tilde{w}_{ji} x_i \quad (\text{eq.17})$$

Si può scrivere la derivata nella forma:

$$\frac{\partial E^q}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial E^q}{\partial a_j} \cdot \frac{\partial a_j}{\partial w_{ji}} \quad (\text{eq.18})$$

Dall'equazione (eq.17) notiamo che $\frac{\partial a_j}{\partial w_{ji}} = x_i$

Definendo:

$$\delta_j = \frac{\partial E^q}{\partial a_j} \quad (\text{eq.19})$$

Possiamo scrivere la derivata nella forma:

$$\frac{\partial E^q}{\partial w_{ji}} = \delta_j x_i \quad (\text{eq.20})$$

E dunque:

$$\delta_j = \frac{\partial E^q}{\partial a_j} = \sum_{k=1}^c \frac{\partial E^q}{\partial \tilde{a}_k} \frac{\partial \tilde{a}_k}{\partial a_j} \quad (\text{eq.21})$$

Unendo le (eq.12) (eq.14) e la (eq. 17) si ottiene:

$$\delta_j = g'(a_j) \sum_{k=1}^c \tilde{w}_{ji} \tilde{\delta}_k \quad (\text{eq.22})$$

Sostanzialmente l'errore dell'unità di processo j , è data dalla somma degli errori $\tilde{\delta}_k$ negli output moltiplicati per il loro peso, da cui il nome backpropagation error.

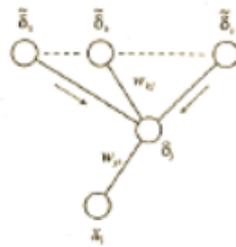


Figura 3.12 Diffusione del backpropagation error.

(22) [Chris M. Bishop (1994). *Neural networks and their applications*. Review of Scientific Instruments].

Quindi riassumendo quanto detto finora, i passi per valutare la derivata della funzione d'errore sono:

- Per ogni input e target nell'insieme di dati che si hanno a disposizione, si deve calcolare l'attivazione delle unità nascoste e di output, usando rispettivamente le equazioni (eq.12) e (eq.17);
- Trovare poi l'errore con l'equazione (eq.16);
- Valutare l'errore delle unità nascoste con l'equazione (eq.22);
- Valutare la derivata della funzione d'errore per la coppia in questione con le equazioni (eq.15) e (eq.20);
- Ripetere il procedimento per tutti i dati che si hanno a disposizione.

Ora che si hanno a disposizione il vettore gradiente, si è in grado di minimizzare la funzione d'errore. Per iniziare bisogna scegliere un punto nello spazio dei pesi da cui partire (potrebbe essere scelto anche a caso), in seguito viene aggiornato il vettore dei pesi muovendosi a piccoli passi nella direzione in cui il gradiente diminuisce più rapidamente. Iterando questo procedimento si troveranno una sequenza di vettore dei pesi, le cui componenti saranno date da:

$$w_{ji}^{\tau+1} = w_{ji}^{\tau} - \eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} \quad (\text{eq.23})$$

Dove η è un parametro che è detto fattore di apprendimento (Learning rate).

Teoricamente quindi, iterando questo procedimento si dovrebbe trovare una sequenza di pesi che converge in un punto in cui la funzione d'errore risulta avere un minimo. Il Learning rate η è un parametro delicato, poiché se viene preso troppo piccolo le variazioni saranno molto lente e quindi l'ottimizzazione avverrà in maniera poco efficiente. Ma se viene preso molto grande possono avere luogo oscillazioni divergenti che ci impediscono di portare a termine il procedimento con successo. L'ideale sarebbe poter cambiare il fattore di apprendimento a seconda della situazione in cui ci troviamo, e ciò è possibile introducendo un parametro nuovo μ , detto Momento, nell'equazione:

$$\Delta w_{ij}^{\tau} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{\tau}} + \mu_{ij} \Delta w_{ij}^{\tau-1} \quad (\text{eq.24})$$

Il parametro μ si può cambiare man mano ed è una costante nell'insieme $0 < \mu < 1$. La funzione esatta di questo parametro è quella di aumentare il fattore di apprendimento quando nella funzione si presenta una bassa curvatura, e di diminuirlo nelle zone di alta curvatura in modo da evitare oscillazioni. Per un metodo alternativo si può anche tenere conto che l'errore è la somma di vari termini corrispondenti al training set, quindi al posto di procedere direttamente sulla funzione d'errore complessiva, si può agire separatamente sui diversi pattern. Per quanto riguarda la conclusione dell'algoritmo non ci sono metodi fissi per decidere quando bloccarlo, dato che le funzioni d'errore non lineare possono essere molto complesse. Vengono utilizzati vari criteri per far ciò, per esempio bloccare l'algoritmo dopo un certo numero di iterazioni, dopo un certo tempo d'esecuzione oppure quando l'errore supera una certa soglia (23) [Chris M. Bishop (1995). *Neural networks for pattern recognition*, Clarendon Press- Oxford].

Per quanto riguarda le caratteristiche generali delle reti neurali, si può riassumere dicendo che esse sono in grado di:

- Apprendere per esempi, come si è detto parlando del paradigma di apprendimento supervisionato;
- Generalizzare le soluzioni apprese, ovvero rispondere correttamente a stimoli simili a quelli usati durante l'addestramento;
- Astrarre nuove soluzioni, ossia rispondere correttamente a stimoli diversi da quelli usati per l'addestramento;
- Trattare dati "rumorosi", ossia rispondere correttamente anche in presenza di dati alterati o parziali.
- Sono adatte per problemi che non chiedono risposte accurate, ma risposte approssimate con un grado di errore o di variazione;
- Sono facili da implementare, basta definire il neurone e poi crearne delle copie e creare i collegamenti tra i neuroni;
- Hanno un funzionamento veloce perché parallelo; ogni neurone usa solo il suo input;
- Determinano il risultato tenendo conto contemporaneamente di tutti gli input.

Mentre gli svantaggi sono:

- Incapacità di rendere conto dell'elaborazione: non si può capire perché ha dato quel risultato specifico;
- Non si può descrivere e localizzare la conoscenza memorizzata nella rete;
- Non sempre esiste una rete che risolve il problema, perché non sempre esiste un algoritmo di apprendimento che converge dando un output della rete con basso errore;
- I valori di output non sono precisi, ma hanno un margine in cui possono variare;
- Serve una casistica di esempi molto ampia per ottenere un buon apprendimento e un basso errore di output.

3.3.1. Elaborazione dei dati tramite Reti Neurali

Si mostra di seguito l'elaborazione tramite Reti Neurali dei dati ottenuti sperimentalmente. In questo modo si vuole fornire una alternativa all'approccio di modellistica classica, che consiste nel tarare curve di regressione tra le grandezze indirette e le caratteristiche materiche e costruttive di interesse, procedendo invece con applicazione delle Reti Neurali quale semplice e rapido strumento di correlazione fra le grandezze misurate e le proprietà meccaniche del materiale.

Lo scopo di questa metodologia applicativa è quella di ricavare la resistenza cubica del materiale partendo dai dati ottenuti dalle prove non distruttive.

La rete neurale, dopo essere stata addestrata per mezzo di un insieme di dati rappresentativo del problema, e cioè i dati ottenuti tramite prove non distruttive (nel nostro caso velocità ultrasonica e indice di rimbalzo sclerometrico), per la stima della resistenza a compressione del calcestruzzo, è in grado di elaborare i dati relativi alle sole prove non distruttive (che rappresenteranno gli input della rete), per ottenere il valore indicativo della resistenza a compressione del materiale investigato (che costituirà l'output della rete neurale).

Negli ultimi anni si sono sviluppate molte applicazioni delle reti neurali anche nel campo dell'ingegneria civile (si possono menzionare ad esempio: (24) Kostic Lazar. *Concrete Compressive Strength Test. An example of a multivariate data type classification problem using Neuroph*; (25) T.R. Neelakantan, S. Ramasundaram, R. Vinoth (2013). *Prediction of Concrete Strength Using Microwave Based Accelerated Curing Parameters by Neural Network*; (26) Reza Alavi¹ and Hamed Mirzadeh (2012). *Modeling the compressive strength of cement mortar nano-composites.*; (27) Wankhade M W and Kambekar A R (2013). *Prediction of Compressive Strength of Concrete using Artificial Neural Network*).

L'elaborazione dei dati sperimentali raccolti verrà eseguita per mezzo del programma Neuroph. Questa è una piattaforma Java adatta a sviluppare varie architetture di reti neurali perché contenente una libreria ben progettata di elementi per la loro costruzione.

Per la realizzazione della rete neurale bisogna eseguire in ordine i seguenti passi:

- Rescaling (o normalizzazione) dei dati;
- Creazione di un nuovo progetto interno al programma;
- Creazione del "training set" tramite il quale verrà addestrata la rete neurale;
- Creazione dell'architettura della rete neurale;
- Addestramento della rete neurale;
- Test della rete per verificare che sia stata addestrata adeguatamente, e cioè che l'errore nella stima dell'output sia entro limiti accettabili.

Le grandezze rappresentative del problema che si deve affrontare, e che quindi andranno considerate nella progettazione della rete neurale, sono le seguenti:

Tabella 3.18 Grandezze descrittive dei dati raccolti in laboratorio.

Nome	Tipo di dato	Unità di misura	Descrizione
Is	Indice di rimbalzo	[-]	Variabile input
Vus	Velocità ultrasonica	[m/s]	Variabile input
Rcub	Resistenza a compressione	[N/mm ²]	Variabile output

Il primo passo che si effettua è quindi un semplice rescaling lineare delle variabili input, per evitare che variabili assumano valori maggiori di altre, e quindi garantendo che tutti gli input abbiano valori simili.

In pratica la normalizzazione assicura che le variabili di input e gli output target varino tra 0 e 1, così come i loro pesi che potranno essere quindi inizializzati in modo tra loro conforme. Se non si procedesse alla normalizzazione, bisognerebbe trovare una soluzione per i valori iniziali dei pesi che sarebbero notevolmente differenti tra loro.

Prima della fase di addestramento quindi qualsiasi insieme di dati deve essere normalizzato.

L'operazione consiste nel convertire ogni singolo valore del dataset in un numero compreso tra 0 e 1. In questo caso specifico si può raggiungere l'obiettivo usando la seguente formula per ogni dato del dataset:

$$x_n = \frac{(x - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})}$$

Dove:

Il valore x è il valore del dato da normalizzare;

Il valore x_n è il valore normalizzato di x ;

Il valore x_{min} è il più piccolo valore che può assumere la variabile x ;

Il valore x_{max} è il più grande valore che può assumere la variabile x ;

I valori ottenuti tramite questa operazione sono riportati in Tabella 3.19.

Tabella 3.19 Parametri distruttivi e non distruttivi normalizzati di ciascun campionamento.

Dati normalizzati				
Miscela 1	Provino n°	Indice sclerometrico	Velocità ultrasonica	Resistenza osservata
		1	0.61	0.25
	2	0.79	0.42	0.83
	3	0.70	0.30	0.74
	4	0.71	0.86	0.90
	5	0.76	0.93	0.76
	6	0.71	0.93	0.85
	7	0.76	0.90	0.94
	8	0.76	0.99	0.76
	9	0.85	0.86	0.85
	10	0.71	0.84	0.83
	11	0.73	0.86	0.82
	12	0.69	0.93	0.95
	13	0.66	0.81	0.68
	14	0.75	0.88	0.75
	15	0.75	0.91	0.89
	16	0.86	0.89	0.98
	17	0.70	0.80	0.75
	18	0.99	0.92	0.95
	19	0.72	0.94	0.83
	20	0.90	0.80	0.83
	21	0.75	0.90	0.82
	22	0.86	0.88	0.78
	23	0.65	0.87	0.67
	24	0.80	0.89	0.97
	25	0.77	0.86	0.84
	26	0.97	0.91	0.97
	27	0.77	0.96	0.99
	28	0.78	0.88	0.83
	29	0.83	0.67	0.76
	30	0.78	0.86	0.76
	31	0.72	0.81	0.83
	32	0.71	0.96	0.86
	33	0.71	0.39	1.00
	34	0.98	0.94	0.84
	35	0.59	0.35	0.65
	36	0.75	0.99	0.79
	37	0.94	0.86	0.88
	38	0.77	0.76	0.69
	39	0.84	0.83	0.85
	40	0.77	0.88	0.85
	41	0.68	0.51	0.68
	42	0.69	0.95	0.85
	43	0.74	0.90	0.85
	44	0.98	0.82	0.89
	45	0.97	1.00	0.81
	46	0.92	0.53	0.82
	47	1.00	0.93	0.88
	48	0.97	0.91	0.89
	49	0.78	0.56	0.94
	50	0.82	0.92	0.90
	51	0.73	0.86	0.82
	52	0.80	0.92	0.91

Dati normalizzati				
Miscela 2	Provino n°	Indice sclerometrico	Velocità ultrasonica	Resistenza osservata
		1	0.45	0.27
	2	0.52	0.18	0.21
	3	0.02	0.16	0.10
	4	0.00	0.15	0.11
	5	0.00	0.28	0.00
	6	0.46	0.00	0.22
	7	0.56	0.18	0.22
	8	0.49	0.12	0.23
	9	0.28	0.21	0.29
	10	0.38	0.16	0.28
	11	0.55	0.10	0.31
	12	0.42	0.16	0.31
	13	0.45	0.10	0.31
	14	0.56	0.09	0.22
	15	0.23	0.41	0.21
	16	0.67	0.28	0.39
	17	0.47	0.15	0.33
	18	0.45	0.25	0.33
	19	0.43	0.10	0.34
	20	0.50	0.17	0.36
	21	0.39	0.30	0.42
	22	0.42	0.10	0.31
	23	0.44	0.15	0.24
	24	0.51	0.27	0.43
	25	0.38	0.33	0.63
	26	0.47	0.37	0.42
	27	0.39	0.31	0.47
	28	0.48	0.43	0.47
	29	0.55	0.25	0.52
	30	0.51	0.18	0.31
	31	0.58	0.37	0.55
	32	0.44	0.39	0.59
	33	0.33	0.41	0.30
	34	0.67	0.37	0.58
	35	0.50	0.30	0.23
	36	0.58	0.34	0.56
	37	0.56	0.33	0.28
	38	0.38	0.33	0.43
	39	0.59	0.25	0.44
	40	0.39	0.33	0.24
	41	0.43	0.26	0.28
	42	0.36	0.22	0.24
	43	0.45	0.42	0.52
	44	0.49	0.28	0.53
	45	0.37	0.44	0.55
	46	0.53	0.24	0.23
	47	0.41	0.32	0.57
	48	0.40	0.33	0.52

Nel seguito i dati relativi alle due miscele saranno trattati come appartenenti ad un'unica popolazione, così come è stato fatto precedentemente nella fase di taratura delle curve di regressione. Infatti, come si evince dall'analisi del mix design, l'unica variabile tra le due miscele è la classe di cemento (La miscela 1 è stata confezionata utilizzando il Cemento di classe 425 (Tabella 3.5), mentre si è

impiegato il Cemento 325 per la Miscela 2 (Tabella 3.6)). È stata fatta questa scelta perché il fine ultimo di questa campagna sperimentale è quello di trovare la correlazione tra i risultati ottenuti dalle prove non distruttive e la resistenza del materiale e ci si è posti quindi l'obiettivo di valutare un intervallo ampio di resistenze. Ciò rende possibile eseguire le operazioni di elaborazione con dati interni all'intervallo di Resistenza a compressione da un minimo di 35.4 N/mm^2 a un massimo di 56 N/mm^2 .

Nel seguito si riportano le architetture e i relativi risultati delle varie Reti Neurali che sono state costruite utilizzando prima il solo Indice di rimbalzo sclerometrico come input e come output la resistenza a compressione cubica, poi si è considerato come solo input la velocità di propagazione ultrasonica e relativa resistenza a compressione come output, ed infine è stata costruita una rete neurale a due input (Indice di rimbalzo sclerometrico e velocità di propagazione ultrasonica) e la resistenza a compressione cubica come output.

3.3.1.1. Indagine sclerometrica- Reti Neurali

La tipologia di rete adottata è la Multi Layer Perceptron con modalità di apprendimento supervisionata. Essa avrà una sola variabile di input, e cioè l'indice di rimbalzo sclerometrico, una sola variabile di output (resistenza a compressione cubica) e due neuroni nel layer nascosto. La funzione di trasferimento scelta è di tipo sigmoidea e l'apprendimento è di tipo backpropagation con parametri di learning rate pari a 0.2 e momento 0.2. Si è scelto di interrompere il processo iterativo al raggiungimento dell'errore massimo pari a 0.01. I parametri sono riportati in forma sintetica in Tabella 3.20.

Tabella 3.20 Parametri di costruzione della rete Neurale_Indice di rimbalzo Sclerometrico

Tipo rete neurale	Tipo apprendimento	N° Input	N° Output	N° Layer nascosti	N° Neuroni per layer nascosti
Multi Layer Perceptron con neurone bias	Supervisionata	1	1	1	2

Funzione di trasferimento	Learning rule	Momentum	Learnig rate	Criterio di interruzione
Sigmoidea	Back Propagation con momentum	0.2	0.2	Max error=0.01

In Figura 3.13 si riporta la rappresentazione grafica dell'architettura di rete. Una volta che è stata effettuata l'operazione di normalizzazione dei dati è stato creato il training set selezionando dall'insieme iniziale (Tabella 3.19) il 90 % dei dati e lasciando il restante 10 % per la fase di test.

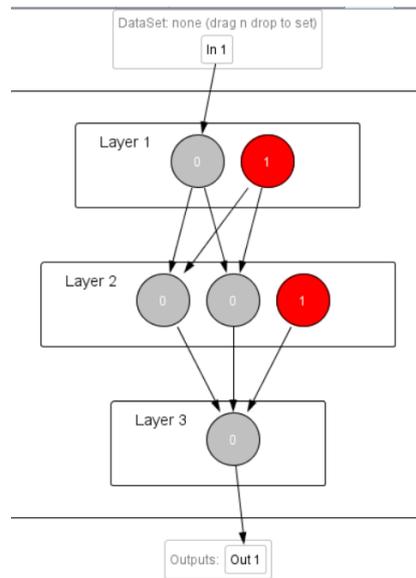


Figura 3.13 Rappresentazione grafica dell'Architettura della rete Indice di rimbalzo Sclerometrico.

Per il training set sono stati utilizzati 90 provini e i restanti 10 sono stati impiegati nella fase di test. Si riportano di seguito i risultati ottenuti (Tabella 3.21) e il grafico dell'errore nella stima dell'output (Figura 3.14).

Tabella 3.21 Risultati del test per la rete neurale Indice sclerometrico.

Test result	Input	Ouput predetto	Output sperimentale (target)
	0.39	0.3248	0.24
	0.44	0.3862	0.59
	0.47	0.426	0.33
	0.98	0.8525	0.84
	0.48	0.4395	0.47
	0.59	0.5878	0.44
	0.44	0.3862	0.24
	0.72	0.7261	0.83
	0.78	0.7704	0.76
0.86	0.8131	0.78	
Total mean square error			0.0114

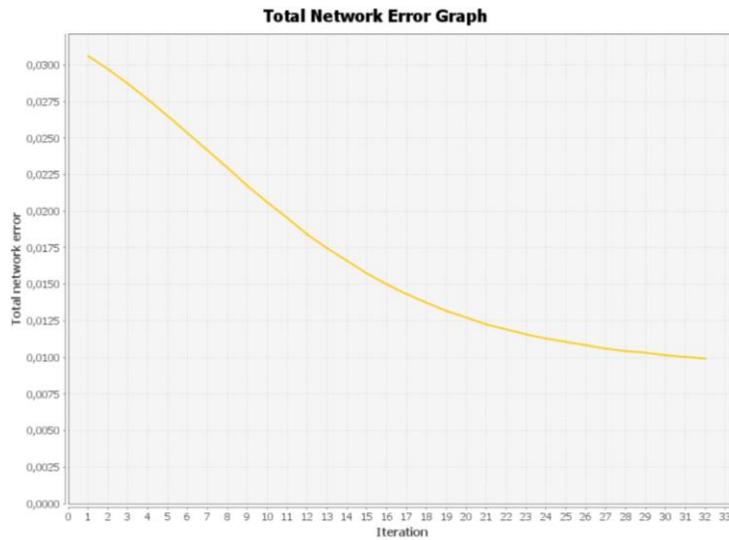


Figura 3.14 Grafico dell'errore commesso dalla rete neurale Indice di rimbalzo Sclerometrico.

In Figura 3.15 sono riportati numericamente i valori dei pesi associati alle connessioni tra neuroni di ciascun layer ed in Figura 3.16 vengono graficizzati per mezzo di un istogramma in 2D.

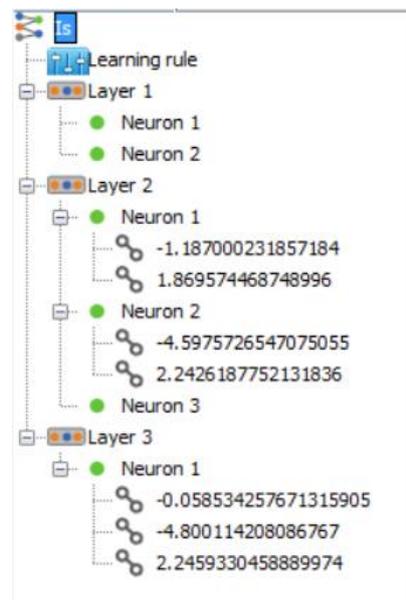


Figura 3.15 Valori dei pesi associati ad ogni neurone costituente la rete neurale Is.

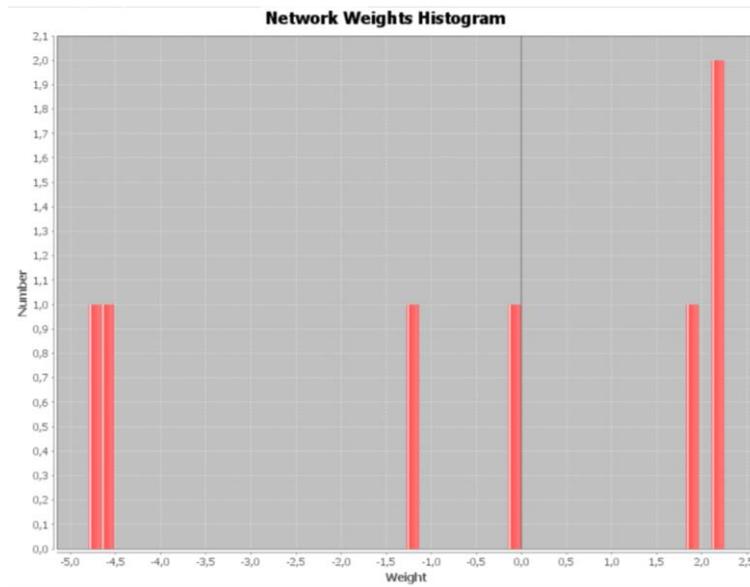


Figura 3.16 Istogramma 2D dei pesi della rete neurale Is.

La Figura 3.17 è un istogramma tridimensionale tra peso-connessione e livello della rete neurale.

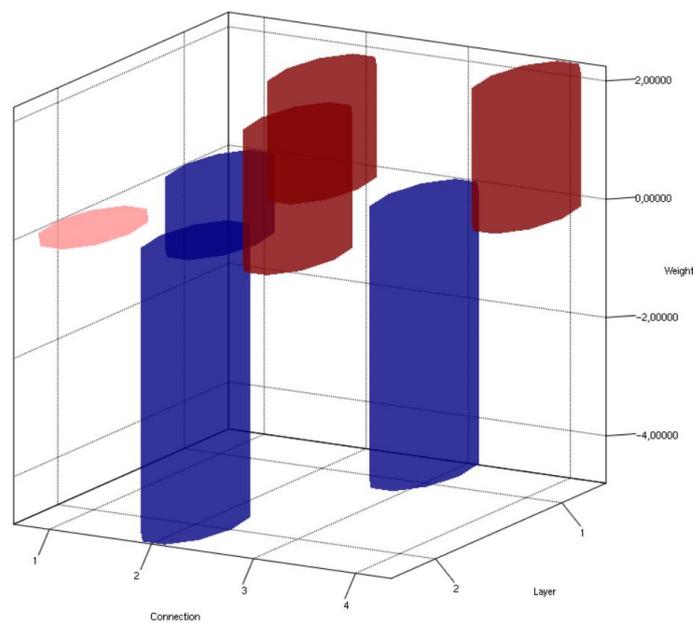


Figura 3.17 Istogramma 3D pesi-connessioni-livelli della rete neurale Is.

La Figura 3.18 è un grafico tridimensionale rappresentativo del legame tra peso, connessione e livello della rete neurale che ha per input i valori degli indici sclerometrici e per output la resistenza a compressione.

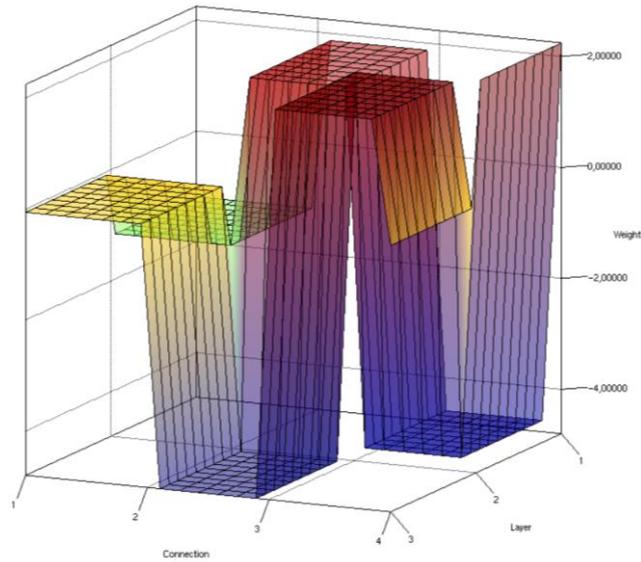


Figura 3.18 Rappresentazione 3D della superficie della rete neurale Is.

In Figura 3.19 sono graficizzati gli output dell'intera rete neurale durante la fase di addestramento.

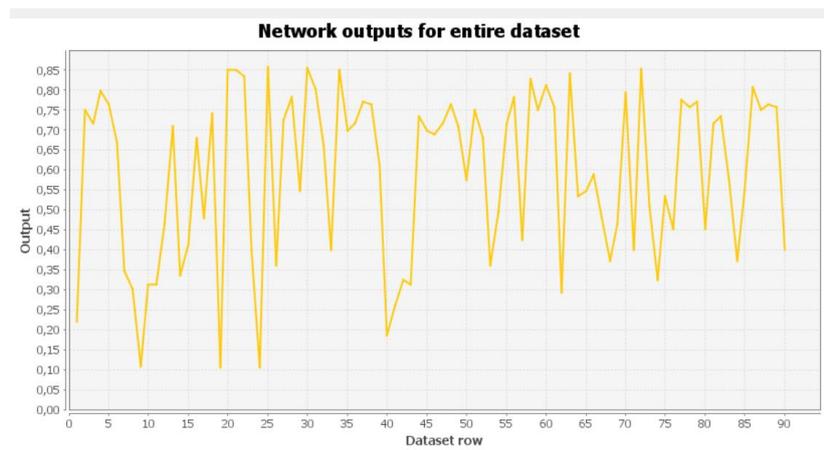


Figura 3.19 Grafico degli output della rete neurale Is.

3.3.1.2. Indagine ultrasonica- Reti Neurali

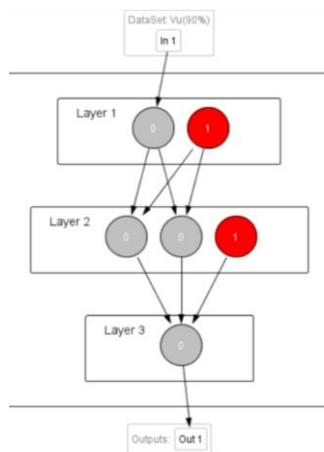
La tipologia di rete adottata è la Multi Layer Perceptron con modalità di apprendimento supervisionata. Essa avrà una sola variabile di input, e cioè la velocità di propagazione ultrasonica, una sola variabile di output (resistenza a compressione cubica) e due neuroni nel layer nascosto. La funzione di trasferimento scelta è di tipo sigmoidea e l'apprendimento è di tipo backpropagation con parametri di learning rate pari a 0.2 e momento 0.2. Si è scelto di interrompere il processo iterativo al raggiungimento dell'errore massimo pari a 0.01. I parametri sono riportati in forma sintetica in Tabella 3.22.

Tabella 3.22 Parametri di costruzione della rete Neurale_Velocità di propagazione ultrasonica

Tipo rete neurale	Tipo apprendimento	N° Input	N° Output	N° Layer nascosti	N° Neuroni per layer nascosti
Multi Layer Perceptron con neurone bias	Supervisionata	1	1	1	2

Funzione di trasferimento	Learning rule	Momentum	Learnig rate	Criterio di interruzione
Sigmoidea	Back Propagation con momentum	0.2	0.2	Max error=0.01

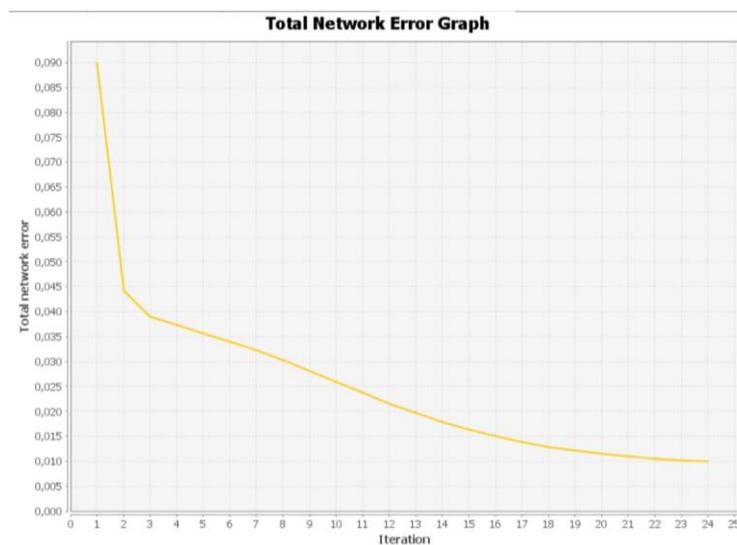
In Figura 3.20 si riporta la rappresentazione grafica dell'architettura di rete. Una volta che è stata effettuata l'operazione di normalizzazione dei dati è stato creato il training set selezionando dall'insieme iniziale (Tabella 3.19) il 90 % dei dati e lasciando il restante 10 % per la fase di test.

**Figura 3.20** Rappresentazione grafica dell'Architettura della rete Velocità di propagazione ultrasonica.

Per il training set sono stati utilizzati 90 provini e i restanti 10 sono stati impiegati nella fase di test. Si riportano di seguito i risultati ottenuti (Tabella 3.23) e il grafico dell'errore nella stima dell'output (Figura 3.21).

Tabella 3.23 Risultati del test per la rete neurale Velocità di Propagazione Ultrasonica.

Test results	Input	Ouput predetto	Output sperimentale (target)
	0.96	0.8115	0.86
	0.80	0.7711	0.75
	0.90	0.7991	0.85
	0.82	0.7776	0.89
	0.93	0.8057	0.85
	0.17	0.333	0.36
	0.76	0.7565	0.69
	0.37	0.4907	0.55
	0.91	0.8014	0.89
0.42	0.5344	0.52	
Total mean square error			0.0037

**Figura 3.21** Grafico dell'errore commesso dalla rete Velocità di propagazione ultrasonica.

In Figura 3.22 sono riportati numericamente i valori dei pesi associati alle connessioni tra neuroni di ciascun layer ed in Figura 3.22 vengono graficizzati per mezzo di un istogramma in 2D.

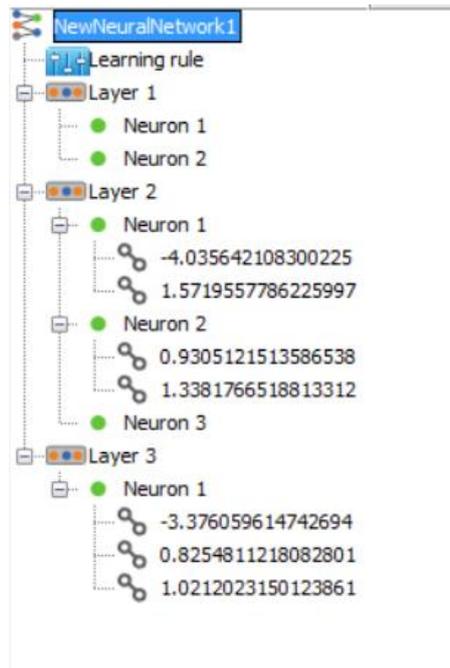


Figura 3.22 Valori dei pesi associati ad ogni neurone costituente la rete neurale Vus.

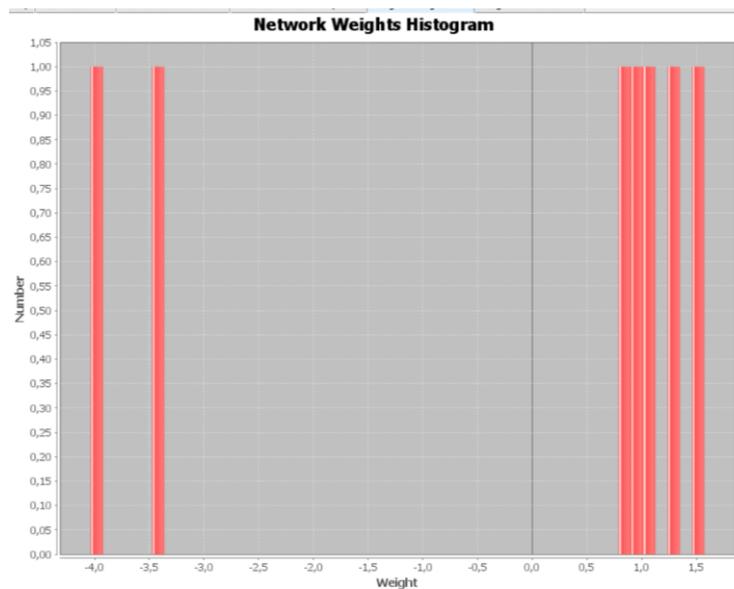


Figura 3.23 Istogramma 2D dei pesi della rete neurale Vus.

La Figura 3.24 è un istogramma tridimensionale tra peso-connessione e livello della rete neurale.

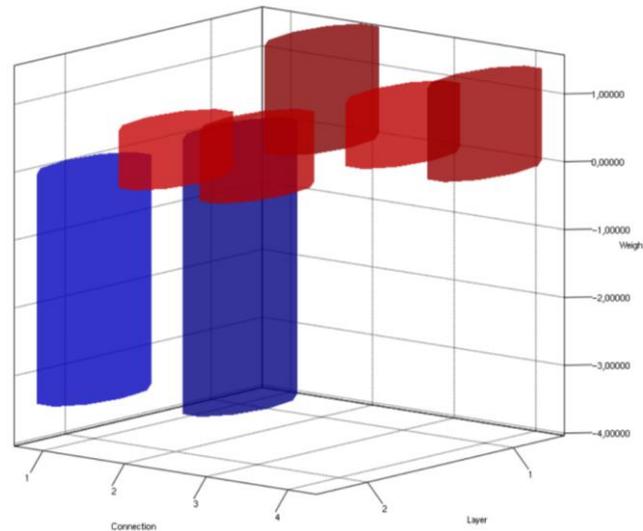


Figura 3.24 Istogramma 3D pesi-connessioni-livelli della rete neurale Vus.

La Figura 3.25 è un grafico tridimensionale rappresentativo del legame tra peso, connessione e livello della rete neurale che ha per input i valori della velocità ultrasonica e per output la resistenza a compressione.

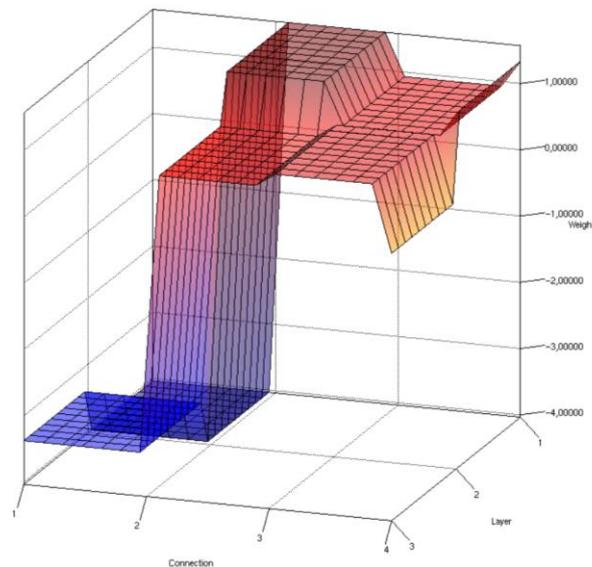


Figura 3.25 Rappresentazione 3D della superficie della rete neurale Vus.

In Figura 3.26 sono graficizzati gli output dell'intera rete neurale durante la fase di addestramento.

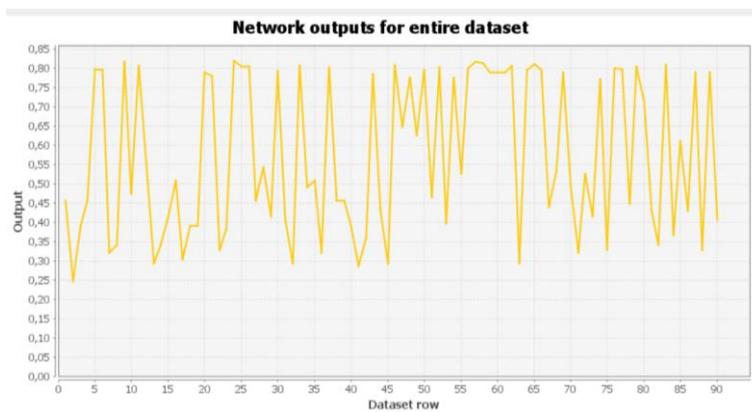


Figura 3.26 Grafico degli output della rete neurale Vus.

3.3.1.3. Metodo combinato- Reti Neurali

La tipologia di rete adottata è la Multi Layer Perceptron con modalità di apprendimento supervisionata. Essa avrà due variabili di input, e cioè l'indice di rimbalzo sclerometrico e la velocità di propagazione ultrasonica, una sola variabile di output (resistenza a compressione cubica) e due neuroni nel layer nascosto. La funzione di trasferimento scelta è di tipo sigmoidea e l'apprendimento è di tipo backpropagation con parametri di learning rate pari a 0.2 e momento 0.2. Si è scelto di interrompere il processo iterativo al raggiungimento dell'errore massimo pari a 0.01. I parametri sono riportati in forma sintetica in Tabella 3.24.

Tabella 3.24 Parametri di costruzione della rete Neurale_Indice di rimbalzo sclerometrico e Velocità di propagazione ultrasonica

Tipo rete neurale	Tipo apprendimento	N° Input	N° Output	N° Layer nascosti	N° Neuroni per layer nascosti
Multi Layer Perceptron con neurone bias	Supervisionata	2	1	1	2

Funzione di trasferimento	Learning rule	Momentum	Learnig rate	Criterio di interruzione
Sigmoidea	Back Propagation con momentum	0.2	0.2	Max error=0.01

In Figura 3.27 si riporta la rappresentazione grafica dell'architettura di rete. Una volta che è stata effettuata l'operazione di normalizzazione dei dati è stato creato il training set selezionando dall'insieme iniziale (Tabella 3.19) il 70 % dei dati e lasciando il restante 30 % per la fase di test.

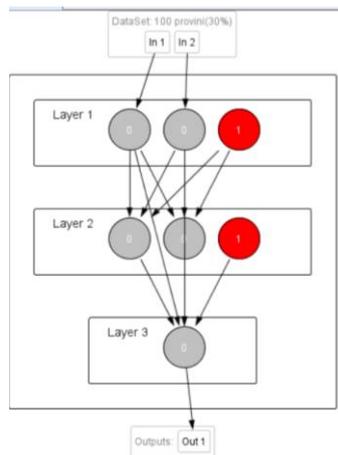


Figura 3.27 Rappresentazione grafica dell'Architettura della rete Indice di rimbalzo sclerometrico e Velocità di propagazione ultrasonica.

Per il training set sono stati utilizzati 70 provini e i restanti 30 sono stati impiegati nella fase di test. Si riportano di seguito i risultati ottenuti (Tabella 3.25) e il grafico dell'errore nella stima dell'output (Figura 3.28).

Tabella 3.25 Risultati del test per la rete neurale Indice di rimbalzo sclerometro e Velocità di Propagazione Ultrasonica.

Test results	Input 1 Indice sclerometrico	Input 2 Velocità ultrasonica	Ouput predetto	Output sperimentale (target)
	0.59	0.35	0.5069	0.65
	0.70	0.3	0.5252	0.74
	0.67	0.28	0.5025	0.39
	0.44	0.15	0.3433	0.24
	0.28	0.21	0.3128	0.29
	0.41	0.32	0.4177	0.57
	0.40	0.33	0.4189	0.52
	0.61	0.25	0.4621	0.57
	0.97	0.91	0.853	0.89
	0.55	0.25	0.4377	0.52
	0.75	0.99	0.8306	0.79
	0.75	0.91	0.807	0.89
	0.65	0.87	0.7682	0.67
	0.77	0.86	0.7959	0.84
	0.77	0.88	0.8024	0.85
	0.43	0.1	0.3156	0.34
	0.56	0.18	0.4051	0.22
	0.97	0.91	0.853	0.97
	0.94	0.86	0.8342	0.88
0.02	0.16	0.2083	0.1	
0.42	0.16	0.3406	0.31	
0.73	0.86	0.7859	0.82	
0.71	0.86	0.7807	0.9	
0.43	0.26	0.3946	0.28	
0.39	0.31	0.4045	0.47	
0.71	0.93	0.8038	0.85	
0.66	0.81	0.7488	0.68	
0.00	0.15	0.1992	0.11	
0.80	0.92	0.8214	0.91	
0.76	0.9	0.8063	0.94	
Total mean square error			0.0100	

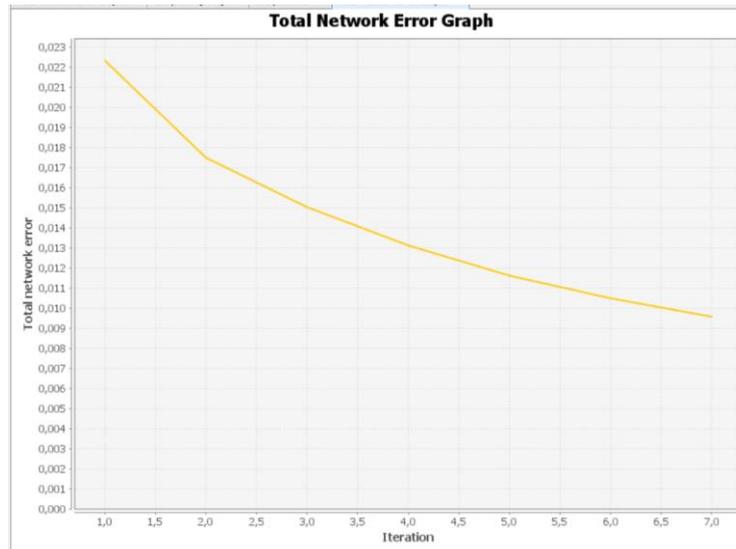


Figura 3.28 Grafico dell'errore commesso dalla rete Indice di rimbalzo sclerometrico e Velocità di propagazione ultrasonica.

In Figura 3.29 sono riportati numericamente i valori dei pesi associati alle connessioni tra neuroni di ciascun layer ed in Figura 3.30 vengono graficizzati per mezzo di un istogramma in 2D.

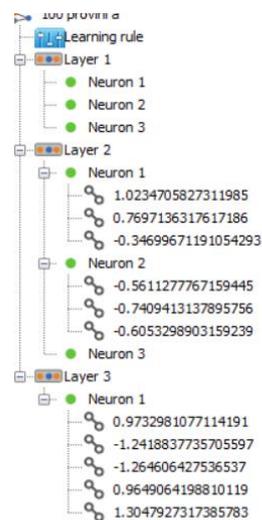


Figura 3.29 Valori dei pesi associati ad ogni neurone costituente la rete neurale Is-Vus combinate.

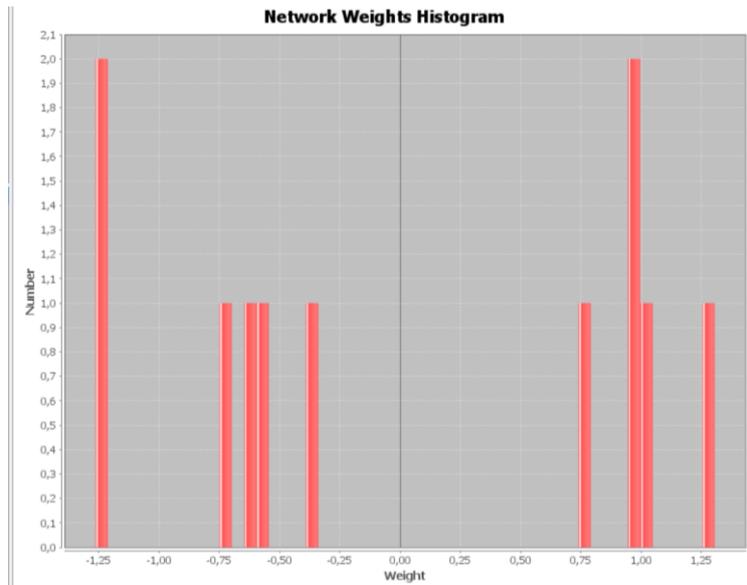


Figura 3.30 Istogramma 2D dei pesi della rete neurale Is-Vus combinate.

La Figura 3.31 è un istogramma tridimensionale tra peso-connesione e livello della rete neurale.

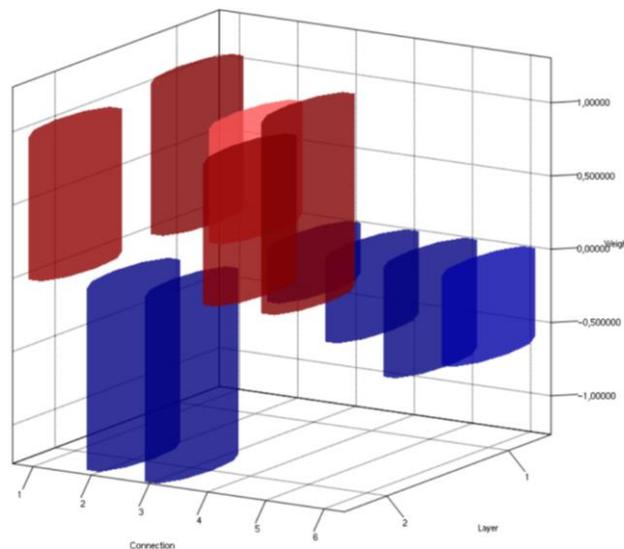


Figura 3.31 Istogramma 3D pesi-connesioni-livelli della rete neurale Is-Vus combinate.

La Figura 3.32 è un grafico tridimensionale rappresentativo del legame tra peso, connessione e livello della rete neurale che ha per input i valori della velocità ultrasonica e degli indici sclerometrici e per output la resistenza a compressione.

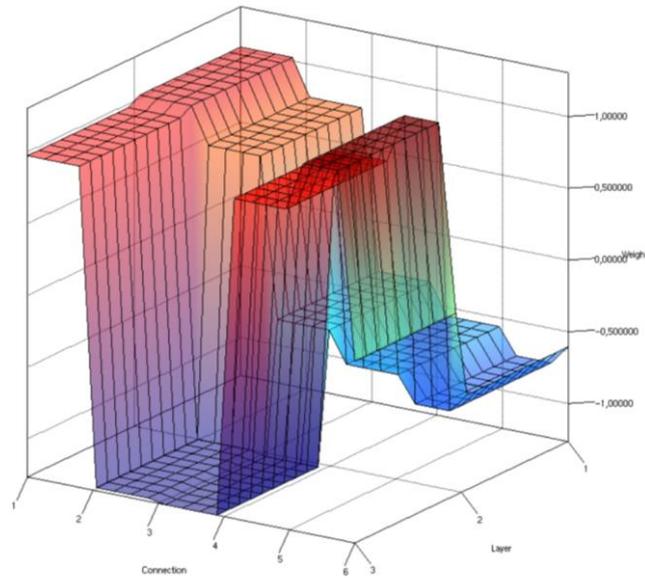


Figura 3.32 Rappresentazione 3D della superficie della rete neurale Is-Vus combinate.

In Figura 3.33 sono graficizzati gli output dell'intera rete neurale durante la fase di addestramento.

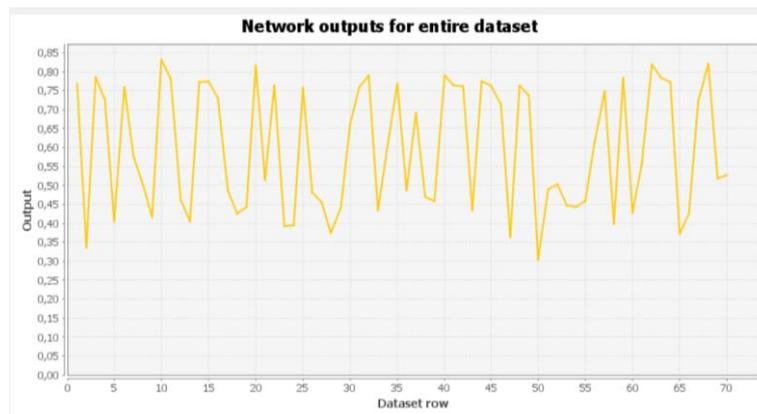


Figura 3.33 Grafico degli output della rete neurale Is-Vus combinate.

3.4. Confronto tra resistenze reali e quelle stimate

Il confronto tra le due analisi eseguite (Analisi di regressione e Reti neurali) viene mostrato in Tabella 3.26 attraverso il parametro R^2 . Esso è il coefficiente di determinazione. Esso confronta i valori y stimati con quelli effettivi e può avere un valore compreso tra 0 e 1. Se è uguale a 1, significa che esiste una correlazione perfetta nel campione, ovvero non sussiste alcuna differenza tra il valore stimato e il valore effettivo di y . Se invece il coefficiente di determinazione è uguale a 0, l'equazione di regressione non sarà di alcun aiuto nella previsione di un valore y .

La sua formula è la seguente:

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = 1 - \frac{RSS}{TSS}$$

Ove:

$$ESS = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

Rappresenta la devianza spiegata dal modello

$$TSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Rappresenta la devianza totale e

$$RSS = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Rappresenta la devianza residua.

y_i sono i dati osservati;

\bar{y} è la loro media;

\hat{y}_i sono i dati stimati.

Tabella 3.26 Confronto tra le stime effettuate per mezzo di Regressione e Reti neurali.

Tipo di indagine	Regressione	Reti neurali
Indagine sclerometrica	$R^2=0.73$	$R^2=0.78$
Indagine ultrasonica	$R^2=0.77$	$R^2=0.88$
Metodo combinato	$R^2=0.81$	$R^2=0.86$

Dal confronto dei risultati ottenuti per mezzo dei due approcci (Tabella 3.26) è possibile individuare le Reti Neurali come modalità migliore per predire il valore di resistenza del calcestruzzo investigato, partendo dall'impiego dei risultati ottenuti tramite le indagini basso invasive.

Il grafico in Figura 3.34 rappresenta il confronto tra la resistenza stimata con le reti neurali e il valore ottenuto per mezzo della regressione, impiegando come variabile indipendente l'indice sclerometrico.

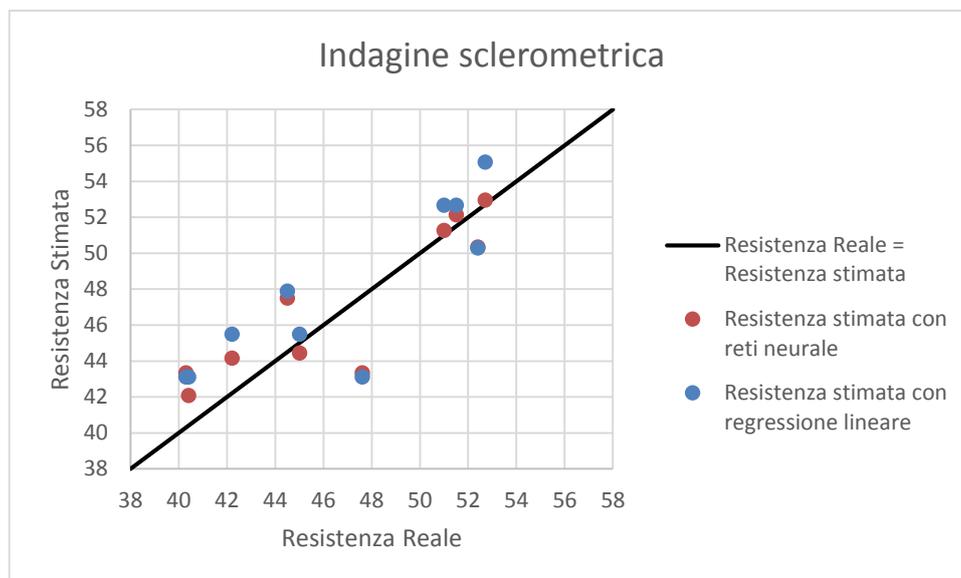


Figura 3.34 Confronta tra resistenza stimata con reti neurali e regressione con l'utilizzo della sola indagine sclerometrica.

Il grafico in Figura 3.35 rappresenta il confronto tra la resistenza stimata con le reti neurali e il valore ottenuto per mezzo della regressione, impiegando come variabile indipendente la velocità ultrasonica.

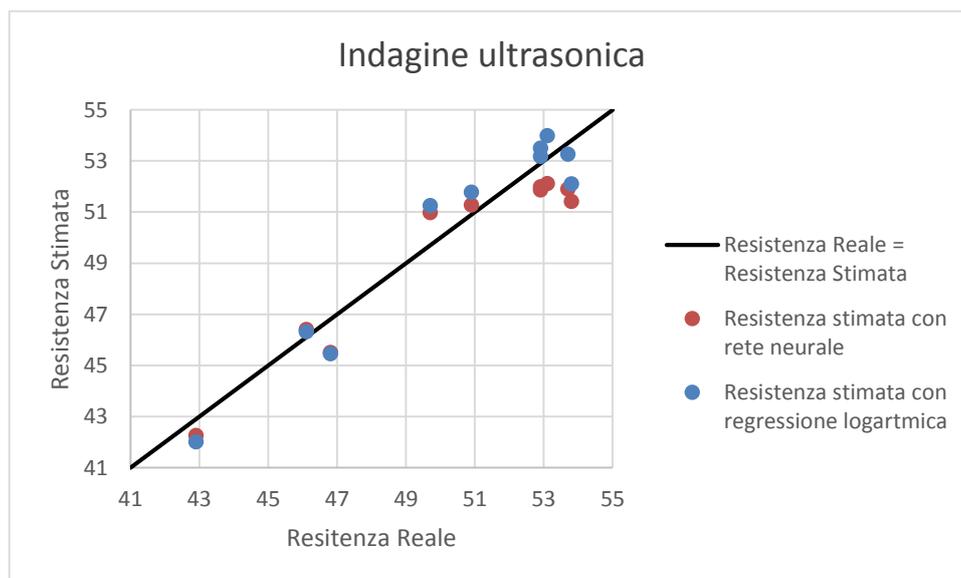


Figura 3.35 Confronta tra resistenza stimata con reti neurali e regressione con l'utilizzo della sola indagine ultrasonica.

Il grafico in Figura 3.36 rappresenta il confronto tra la resistenza stimata con le reti neurali e il valore ottenuto per mezzo della regressione, impiegando come variabili indipendenti l'indice sclerometrico e la velocità ultrasonica.

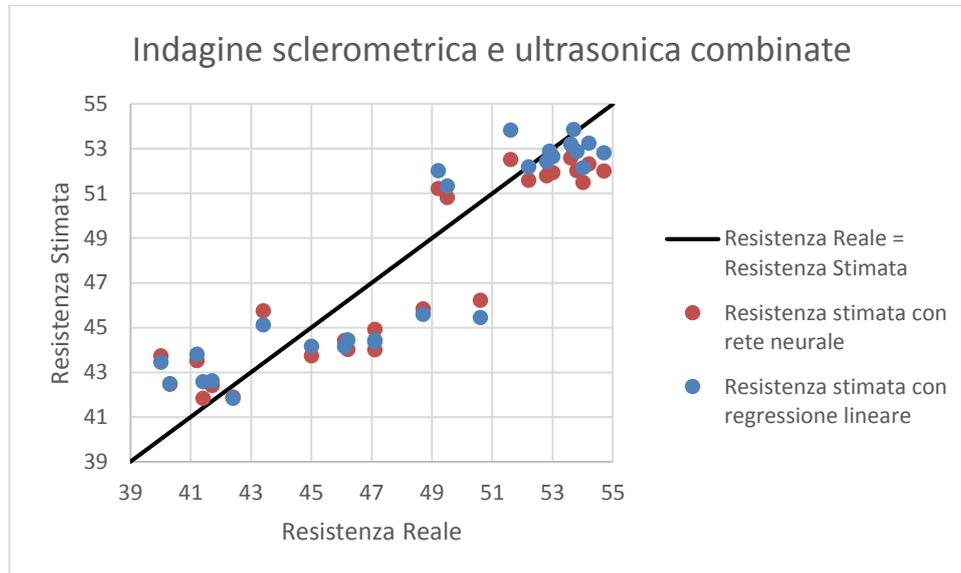


Figura 3.36 Confronta tra resistenza stimata con reti neurali e regressione con l'utilizzo dell'indagine sclerometrica e ultrasoniche combinate.

Bibliografia

- (1) *Linee Guida -Calcestruzzo strutturale - messa in opera e prove non distruttive.*
- (2) EN 13791.
- (3) *Atti di seminario sul tema Sperimentazione su strutture.* 12-13 Febbraio 1993 Venezia, AICAP.
- (4) UNI EN 12504-4:2005. *Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.*
- (5)EN 12390-1
- (6) EN 12390-2
- (7) EN 12390-3.
- (8) A. Zocca e M. Di Lena (1986) Istituto sperimentale F.S..
- (9)*Concrete strength by combined non destructive methods simply and reliable predicted.* Cement and concrete Research 2000.
- (10) *Guidebook on non destructive testing of concrete structures.* IAEA Vienna 2002 ISSN 1018-5518.
- (11) UNI EN 12504-2:2012. *Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 2: Prove non distruttive-Determinazione dell'indice sclerometrico.*
- (12) Prove NDT MDT CLS Prof Brencich.
- (13) Giacchetti R, Laquaniti L. (1980). *Controlli non distruttivi su impalcati da ponte in calcestruzzo armato.* Nota Tecnica 04, Università degli Studi di Ancona, Facoltà di Ingegneria, Istituto di Scienza e Tecnica delle Costruzioni, Ancona, 1980.
- (14) Gasparik J. (1992). *Prove non distruttive nell'edilizia.* Quaderno didattico AIPnD, Brescia, 1992.
- (15) Di Leo A., Pascale G. (1992). *Prove non distruttive sulle costruzioni in c.a..* Il giornale delle prove non distruttive, n. 4, 1992.
- (16) UNI EN 14630:2007. *Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo Metodi di prova - Determinazione della profondità di carbonatazione di un calcestruzzo indurito con il metodo della fenolftaleina.*
- (17) UNI 9944:1992. *Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo.*
- (18)UNI EN 12504-3:2005. *Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 3: Determinazione della forza di estrazione.*
- (19)EN 12504-1.
- (20)UNI EN 12390-2:2002.
- (21) W. S. McCulloch and W. Pit &, Bull. Math. Biophys. 5, 115 (1943).
- (22) Chris M. Bishop (1994). *Neural networks and their applications.* Review of Scientific Instruments.
- (23) Chris M. Bishop (1995). *Neural networks for pattern recognition,* Clarendon Press- Oxford.
- (24)Kostic Lazar. *Concrete Compressive Strength Test. An example of a multivariate data type classification problem using Neuroph.*
- (25)T.R. Neelakantan, S. Ramasundaram, R. Vinoth (2013). *Prediction of Concrete Strength Using Microwave Based Accelerated Curing Parameters by Neural Network.*
- (26)Reza Alavi1 and Hamed Mirzadeh (2012). *Modeling the compressive strength of cement mortar nano-composites.*
- (27)Wankhade M W and Kambekar A R (2013). *Prediction of Compressive Strength of Concrete using Artificial Neural Network.*

Capitolo IV

Metodologia di indagine proposta

Contenuto del capitolo:

- Metodologia di indagine proposta
 - Metodo di calcolo
 - Esempi applicativi
- Schede di valutazione

4.1. Metodologia di indagine proposta

Effettuare ispezioni, e dunque fornire un giudizio relativo alla condizione statica di una struttura con una adeguata cadenza, permette di conoscere lo stato dell'opera al momento (T_i) nel quale viene effettuata la valutazione e di tenere sotto controllo l'evolversi del suo stato grazie al confronto che può essere fatto tra le indagini relative a tempi diversi ($T_i, T_{i+1}, T_{i+2} \dots$) (Figura 4.1).

L'attività di ispezione è un'azione che si inquadra nel tempo e non può limitarsi a constatazioni occasionali. Ogni ispezione deve fornire le maggiori informazioni possibili sullo stato del ponte in quel determinato istante di vita. La serie storica di queste informazioni consente di seguire l'evoluzione dello stato dell'opera (perdita di prestazioni).

L'obiettivo del mio lavoro di ricerca è stato quello individuare una modalità di indagine low-cost per ponti in cemento armato, che consenta di ottenere rapidamente un resoconto attendibile sulla condizione statica della struttura ispezionata.

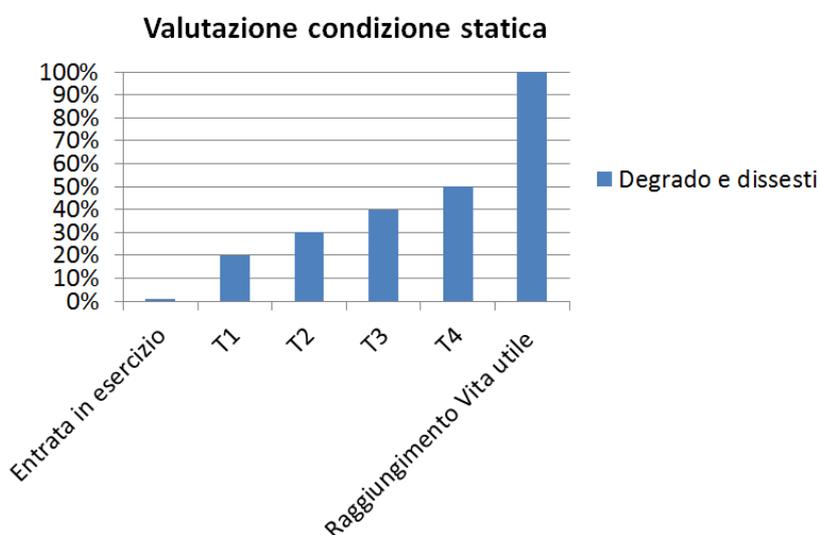


Figura 4.1 Valutazione condizione statica

Questo approccio può fornire quindi informazioni essenziali per ottimizzare le fasi di manutenzione, i cui interventi possono essere commisurati alla condizione statica della struttura ispezionata, all'eventuale evolversi del suo ammaloramento, ed anche allo stato in cui vertono le altre strutture della stessa rete (Figura 4.2).

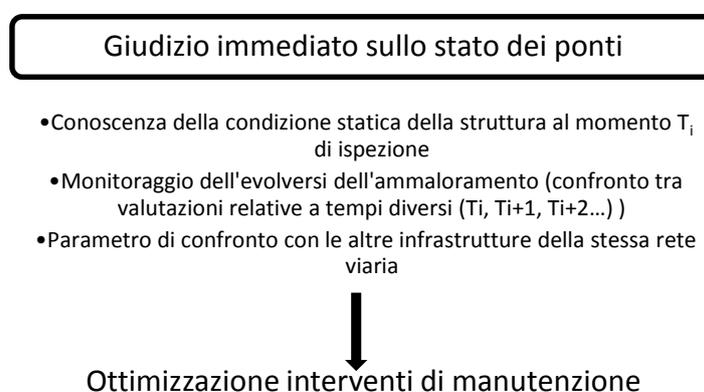


Figura 4.2 Giudizio immediato sullo stato dei ponti

Il procedimento che si propone è costituito da una prima parte legata all'osservazione visiva dell'opera ed una seconda che consiste nell'analisi dei dati ottenuti per mezzo di test strumentali effettuati sul materiale da ispezionare (Figura 4.4). I risultati che scaturiscono da questi due approcci vengono poi elaborati per ottenere un unico giudizio finale, relativo alla struttura, rappresentato dal Condition rating Mark (Fs).

La prima parte consiste essenzialmente nell'effettuare delle ispezioni visive accurate, durante le quali si effettua una raccolta di dati sistematica ed esaustiva riguardo a tutte le possibili condizioni di degrado. Affinché essa rappresenti l'esatta fotografia della situazione della struttura, dei materiali costituenti e quella dei fenomeni di dissesto in atto al momento del sopralluogo, il processo di valutazione tiene conto dei seguenti fondamentali aspetti:

- La condizione di tutti gli elementi che compongono la struttura;
- L'importanza che ogni elemento ha nei confronti del complesso strutturale;
- La tipologia di danno osservato;
- La gravità del danno;
- L'estensione del danno (lunghezza, superficie, volume);
- La localizzazione dei difetti rilevati all'interno dell'elemento ispezionato.

Come detto, una volta effettuata l'ispezione visiva, il metodo proposto prevede di passare alla fase di caratterizzazione meccanica del materiale. Partendo dal presupposto che, per svolgere una buona diagnosi strutturale bisogna trovare il giusto compromesso tra significatività e invasività delle indagini, cioè vanno adottate delle tecniche che permettano di conoscere lo stato reale della struttura senza alterarne la condizione, la ricerca ha privilegiato come criterio principale di indagine, quello basato su prove di tipo non distruttivo, cioè quel complesso di esami e rilievi che non modificano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura.

L'aspetto innovativo della proposta presentata, rispetto alle metodologie esistenti, è rappresentato dall'introduzione di due fattori tramite i quali è possibile valutare la localizzazione del danno (L_i), e utilizzare la caratterizzazione meccanica del materiale come parametro di giudizio (T_i).

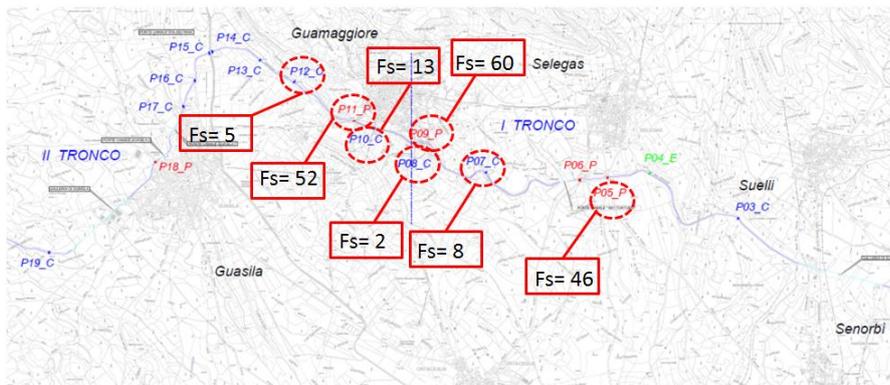
Il giudizio relativo all'intera struttura, rappresentato dal Condition rating mark (Fs), si ottiene sommando le valutazioni di ogni singolo elemento (F_e) costituente il ponte e riportando questo valore alla somma dei difetti che potenzialmente possono verificarsi nella struttura osservata.

Al termine dell'ispezione così condotta si dispone di un valore numerico (Fs), al quale corrisponde una Classe di deterioramento che permette di gerarchizzare l'urgenza di intervento con operazioni di ripristino sia all'interno della struttura che tra strutture distinte (Figura 4.3).

Inoltre ad ogni classe di deterioramento corrisponde una indicazione in merito alla tempistica della ispezione successiva o degli eventuali interventi di ripristino.

Il processo proposto consente di operare sia al Project Level che al Network Level.

Infatti la singola valutazione avviene considerando ogni struttura isolata dal contesto della rete di comunicazione stradale cui appartiene, per ottenere informazioni sulla capacità residua per assicurare che sia sicura strutturalmente, ed efficiente dal punto di vista della funzionalità. Queste informazioni vengono raccolte all'interno del Condition Rating Mark (Fs) che permette il confronto tra le varie strutture della rete in maniera tale da stabilire la priorità di intervento delle operazioni di manutenzione all'interno del patrimonio infrastrutturale, tenendo conto sia della condizione del singolo ponte che della sua importanza rispetto alla rete stradale. Questo livello di valutazione è utile agli enti gestori delle infrastrutture che, a causa della limitatezza delle risorse, non hanno la possibilità di intervenire con rapidità sull'intero insieme di ponti e quindi hanno l'esigenza di stabilire una adeguata gerarchizzazione degli interventi.



Ordine di intervento all'interno della rete infrastrutturale		
1°	P09	Fs=60
2°	P11	Fs=52
3°	P05	Fs=46
4°	P10	Fs=13
5°	P07	Fs=8
6°	P12	Fs=5
7°	P08	Fs=2

Figura 4.3 Esempio gerarchizzazione degli interventi di manutenzione all'interno di una rete infrastrutturale

La metodologia di indagine che si proporrà intende fornire un valido ausilio alla valutazione della condizione strutturale, definendo un percorso guidato per il tecnico che deve svolgere il sopralluogo e che indirizzi ad una omogeneità di giudizio.

A tale scopo verranno introdotte delle Schede di Valutazione che andranno compilate durante le ispezioni per annotare schematicamente le varie osservazioni eseguite. In questo modo si potrà rendere chiaro come, partendo da ciò che è stato rilevato durante l'ispezione, per ogni elemento strutturale e materiale costituente, sia stato possibile emettere il giudizio finale.

La realizzazione di una scheda ispettiva serve per mantenere traccia dell'ispezione effettuata e del relativo esito. Con questo procedimento si intende stabilire un linguaggio comune nella descrizione del danno e della vulnerabilità, fornire indicazioni per ottenere dagli elementi rilevati una valutazione di efficienza e consentire una migliore informatizzazione dei dati di ispezione.

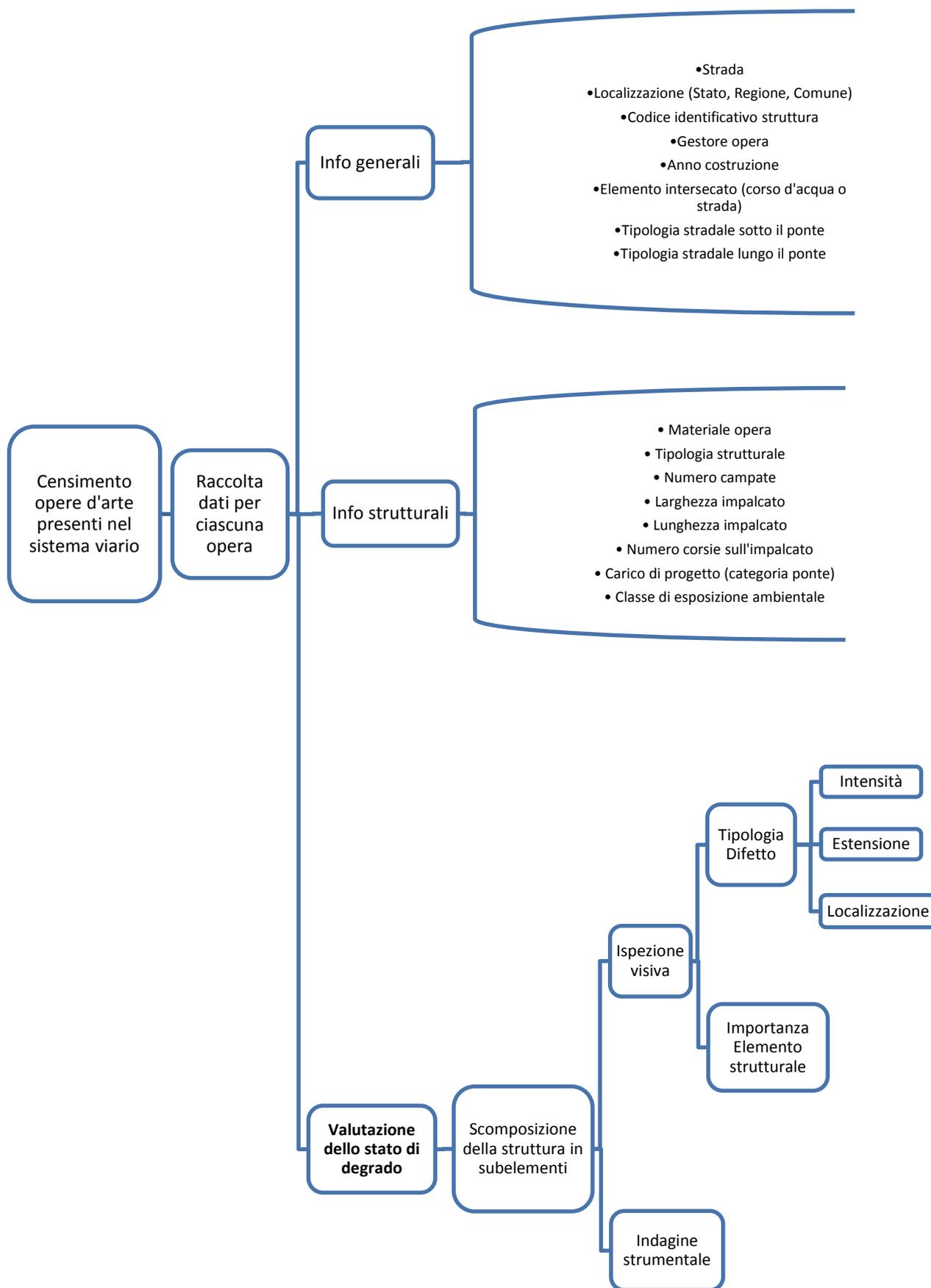


Figura 4.4 Metodologia di indagine proposta

4.2. Metodo di calcolo

Il giudizio relativo all'intera struttura, rappresentato dal Condition rating mark (Fs), si ottiene sommando le valutazioni di ogni singolo elemento costituente il ponte, il cui calcolo si effettua mediante la seguente formula:

$$F_e = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i \quad (\text{eq.1})$$

Dove:

Fe: Funzione di valutazione del singolo elemento;

F_D: Valore del tipo di difetto;

B_i: Valore di base associato al difetto di tipo "i", che esprime l'effetto potenziale del danno tipo "i" sulla sicurezza e/o durabilità dell'elemento osservato. Varia tra 1 e 4;

K_{1i}: Fattore dell'elemento strutturale in cui compare il tipo di difetto "i". Rappresenta l'effetto dell'elemento sulla sicurezza e /o durabilità generale della struttura;

K_{2i}: Fattore indicante l'intensità/grado del difetto tipo "i". Varia Tra 1 e 2;

K_{3i}: Fattore che considera l'estensione di propagazione del difetto tipo "i" sull'intero elemento. Varia tra 1 e 2;

L_i: Fattore per valutare la rilevanza della localizzazione del danno. Varia tra 1 e 2;

T_i: Fattore indicante la proprietà di resistenza meccanica del materiale. Varia tra 1 e 5.

Sommando la valutazione effettuata per tutti i singoli elementi che compongono l'opera e rapportando questo valore alla somma dei difetti che potenzialmente possono verificarsi nella struttura osservata, si ottiene la Funzione di valutazione dell'intera struttura:

$$F_s = \left(\frac{\sum_{m=1}^k F_{Dm}}{\sum_{m=1}^k F_{D,rifm}} \right) \cdot 100 \quad (\text{eq.2})$$

Dove:

F_s: Funzione di valutazione dell'intera struttura;

ΣF_D: È la somma effettiva dei valori di difetto calcolati per la struttura, legata ai tipi di difetto rilevati in essa (K_{2i}, K_{3i}, L_i, T_i come assegnati durante l'ispezione);

ΣF_{D, rif}: È la somma dei valori di difetto di riferimento. Si ottiene considerando tutti i tipi di danno, tra quelli elencati, che possono potenzialmente verificarsi nella struttura osservata, utilizzando come moltiplicatori i valori massimi per i fattori di intensità ed estensione e valori unitari per i fattori di localizzazione e caratterizzazione (K_{2i}=K_{3i}=2; L_i=T_i=1).

$$\sum_{m=1}^k F_{Dm} = \sum_{m=1}^k K_{1m} \cdot M_m \quad (\text{eq.3})$$

$$\sum_{m=1}^k F_{D,rifm} = \sum_{m=1}^k K_{1m} \cdot M_{rif,m} \quad (\text{eq.4})$$

$$M_m = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i \tag{eq.5}$$

$$M_{rif,m} = \sum_{i=1}^t B_i \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i \tag{eq.6}$$

k: numero di elementi "m" all'interno della struttura osservata;
 n: numero di tipi di difetti "i" rilevati e valutati nell'elemento "m";
 t: numero totale dei potenziali tipi di difetto, tra quelli elencati, nell'elemento "m".

Nell'ambito della gestione, ispezione e manutenzione delle infrastrutture, la possibilità di valutare numericamente la condizione statica (Figura 4.5) ha un ruolo fondamentale nel controllo nella sorveglianza della loro funzionalità e sicurezza. Adottare un tale procedimento a intervalli prestabiliti permette di conoscere lo stato dell'opera al momento(T_i) nel quale viene effettuata la valutazione e di tenere sotto controllo l'evolversi del suo stato di ammaloramento grazie al confronto che può essere fatto tra le valutazioni a tempi diversi (T_i, T_{i+1}, T_{i+2}...). Questo approccio può fornire da un punto di vista manutentivo informazioni essenziali per predisporre interventi "su condizione".

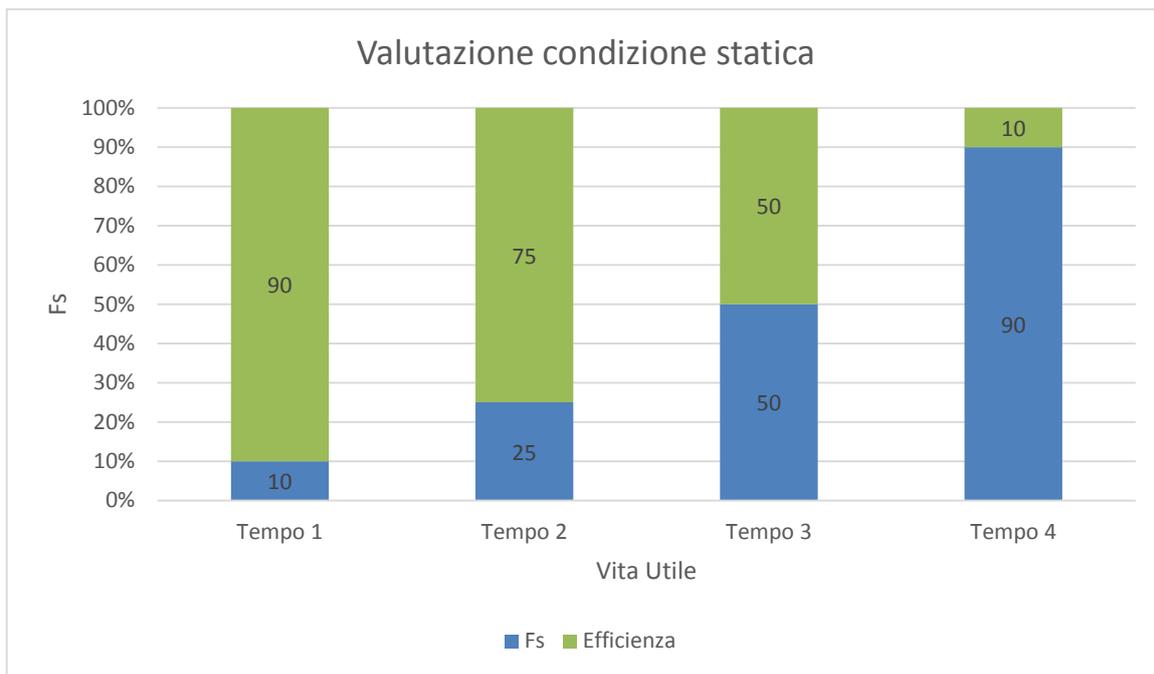


Figura 4.5 Valutazione condizione statica tramite il fattore di struttura Fs

Vediamo ora in dettaglio il significato dei singoli fattori di calcolo.

L'effetto potenziale di un generico danno "i" sulla sicurezza strutturale (o durabilità) di un elemento strutturale viene quantificato per mezzo del fattore B_i (Figura 4.6), il quale varia tra un minimo di 1 (difetto poco influente sulla sicurezza/durabilità dell'opera) e un massimo di 4 (difetto molto influente sulla sicurezza/durabilità dell'opera), secondo quanto riportato in Tabella 4.1.

$$Fe = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i$$

Figura 4.6 B_i valore di base associato al difetto “i”

Tabella 4.1 Tipi di difetto da valutare durante l’ispezione, associati ai valori di base B_i e a criteri spaziali per la valutazione del grado intensità) di alcuni tipi di danno

Cod.	Tipo di danno	B _i	Grado di difetto			
			I	II	III	IV
1.0 Spostamenti e deformazioni della struttura						
1.1	Sottostruttura					
1.11	Movimenti laterali	2	2 cm	da 2 a 5 cm	da 5 a 10 cm	>10 cm
1.12	Inclinazione, rotazione, fuori piombo	2	<1/100	da 1/100 a 3/100	da 1/100 a 5/100	>5/100
1.13	Cedimenti differenziali	3	<2 cm	da 2 a 5 cm	da 5 a 10 cm	>10 cm
1.14	Area scalzata sotto pile e spalle	4	<10 %	da 10 a 25%	da 25 a 50%	>50%
1.2	Sovrastruttura					
1.21	Freccia verticale	2	<L/1000	da L/1000 a L/500	da L/500 a L/300	>L/300

2.0 Calcestruzzo						
2.1	Difetti dovuti a manodopera scarsa: screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti.	1	Singolo difetto piccolo	Diversi difetti piccoli simultanei	Pochi difetti forti	Vari difetti forti
2.2	Difetti provocati in fase di realizzazione: ritiro plastico, crepe plastiche di assestamento, crepe causate da collegamenti insufficienti.	1	comparsa iniziale	piccolo	medio	grande
2.3	Copriferro inferiore a quello richiesto per le date condizioni ambientali	2	<1 cm	da 1 a 2 cm	da 2 a 3 cm	>3 cm
2.4	Fronte di carbonatazione (pH<10) in riferimento alla posizione delle barre	2	da 2 a 3 cm oltre	da 1 a 2 cm oltre	da 0 a 1 cm oltre	a livello
2.5	Penetrazione dei cloruri, in riferimento alla posizione delle barre	3	> 2 cm oltre	da 0,5 a 2 cm oltre	a livello	sotto il livello
2.6	Lesioni a ragnatela	1	comparsa iniziale	piccolo	medio	grande
2.7	Fessure orizzontali	3	singola <0,5 mm	diverse <0,5 mm	singola >0,5 mm	diverse >0,5 mm
2.8	Fessure verticali	3	singola <0,5 mm	diverse <0,5 mm	singola >0,5 mm	diverse >0,5 mm
2.9	Fessure diagonali	4	singola <0,5 mm	diverse <0,5 mm	singola >0,5 mm	diverse >0,5 mm
2.10	Fessure longitudinali	3	singola <0,5 mm	diverse <0,5 mm	singola >0,5 mm	diverse >0,5 mm
2.11	Fessure trasversali	4	singola <0,5 mm	diverse <0,5 mm	singola >0,5 mm	diverse >0,5 mm
2.12	Danni meccanici, erosione, urti	1	piccolo e singolo	piccoli e rari	medi	grandi
2.13	Fioritura, essudazione	1	comparsa iniziale	piccola	media	grande
2.14	Calcestruzzo dilavato/ammalorato	2	piccolo e singolo	piccoli e rari	medi	grandi
2.15	Macchie di umidità attiva	1	comparsa iniziale	piccola	media	grande
2.16	Macchie di umidità passiva	1	comparsa iniziale	piccola	media	grande
2.17	Gelo e disgelo	2	invecchiamento	fessurazione	espulsione superficiale	disintegrazione
2.18	Difetti del copriferro dovuti alla corrosione delle barre	2	macchie di ruggine, leggere	macchie di ruggine, gravi	fessure sopra le staffe	delaminazione sopra le staffe
2.19	Espulsione causata dalle barre corrose (barre e cavi o trefoli di precompressione)	3	fessure sottili lungo le armature o cavi negli angoli	fessure sottili lungo le armature o cavi, e/o fessure ampie longitudinali o armature esposte lungo gli angoli	ampie fessure lungo le barre e cavi o armature esposte	aree vuote e superficie espulsa
2.20	Giunti aperti tra elementi	2	≤ 1 mm	da 1 a 3 mm	da 3 a 5 mm	≥ 5 mm
2.21	Ripreso successive di getto deteriorate	1	lieve	piccola	media	grande

3.0 Acciaio lento e armonico						
3.1	Corrosione delle staffe	1	elettrolitica <10%	chimica localizzata < 10%	elettrolitica > 10%	chimica localizzata >10%
3.2	Corrosione delle armature principali, riduzione dell'area della sezione di acciaio (se in una sezione critica $L_i=2$)	3	elettrolitica <10%	chimica localizzata < 10%	elettrolitica > 10%	chimica localizzata >10%
3.3	Carenze del trefolo	2	corrosione esterna	vuoti locali, senza cloruri	vuoti più ampi senza cloruri	cloruri nei vuoti
3.4	Corrosione dei cavi di precompressione (se in una sezione critica $L_i=2$)	4	≤ 1 mm	da 0,1 a 0,3 mm	da 0,3 a 0,5 mm	≥ 5 mm

Il fattore K_{1i} rappresenta l'effetto dell'elemento sulla sicurezza e /o durabilità generale della struttura (Figura 4.7), i valori che esso assume possono essere attribuiti secondo quanto indicato in Tabella 4.2.

$$F_e = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i$$


Figura 4.7 K_1 effetto dell'elemento sulla sicurezza della struttura

Tabella 4.2 Fattore K_{1i} per valutare l'effetto dell'elemento sulla struttura

Macroelementi A: sottostrutture		
Macroelemento Strutturale	Elemento Strutturale	K_{1i}
Sottostrutture Tipo 1: Pile	Pali (quando ispezionabili)	0.2
	Fondazioni o parte superiore del palo	0.3
	Pilastro o muro	0.4
Sottostrutture Tipo 2: Spalle	Pali (quando ispezionabili)	0.2
	Fondazioni o parte superiore del palo	0.3
	Muro di spalla	0.4

Macroelementi B: sovrastrutture		
Macroelemento Strutturale	Elemento Strutturale	K _{1i}
Sovrastrutture Tipo 1: Travi	Travi	0.6
	Soletta	0.4
	Diaframmi di irrigidimento	0.2
Sovrastrutture Tipo 2: Traverse	Traverse	0.6
	Soletta	0.4
	Diaframmi di irrigidimento	0.2
Sovrastrutture Tipo 3	Solette piene o alleggerite	1.2
Sovrastrutture Tipo 4: Travi a cassone, Archi	Soletta superiore	0.4
	Soletta inferiore	0.3
	Telai	0.3
	Diaframmi di irrigidimento	0.2
Soletta	Marciapiede	0.1
	Barriera	0.2
	Parapetto	0.1

Il fattore K_{2i} indica l'intensità/grado del difetto tipo "i" (Figura 4.8), può assumere valori compresi tra 0.5 e 2 in base a quanto indicato nella seguente Tabella 4.3.

$$F_e = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i$$

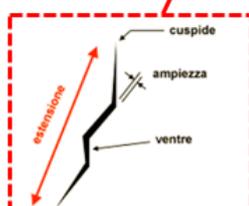


Figura 4.8 K₂ intensità del difetto tipo "i"

Tabella 4.3 Fattore K_{2i} criteri generali per il grado di un tipo di difetto

Classe	Grado	Criterio	K _{2i}
I	Basso, iniziale	Il difetto è di piccola dimensione	0.5
II	Medio, in propagazione	Il difetto è di media dimensione	1
III	Alto, in aumento	Il difetto è di grande dimensione	1.5
IV	Molto alto, critico	Il difetto è di dimensione molto grande	2

Il fattore K_{3i} consente di considerare l'estensione di propagazione del difetto tipo "i" sull'intero elemento (Figura 4.9). Può assumere valori compresi tra 0.5 e 2 in funzione di quante volte il difetto appare nella superficie dello stesso elemento (Tabella 4.4).

$$Fe = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i$$

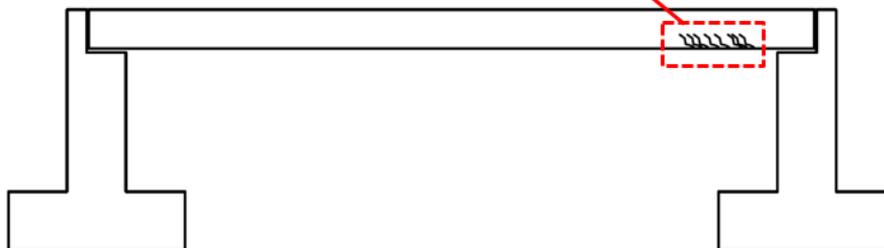


Figura 4.9 K₃ estensione del difetto tipo “i”

Tabella 4.4 Fattore K_{3i} criteri generali per l'estensione di un tipo di difetto

Criterio	K _{3i}
Il difetto è limitato rispetto all'unità di un elemento, generalmente appare in singoli luoghi di un elemento	0.5
Il difetto appare in una piccola area di uno stesso elemento (<25% della superficie dello stesso elemento)	1
Il difetto appare in molti luoghi o in una grande area dell'elemento (da 25 al 75% della superficie dello stesso elemento)	1.5
Il difetto appare nella maggior parte della superficie di uno stesso elemento (>75%)	2

Operativamente il valore di K₃ si attribuisce in funzione delle volte che, nella scheda difettologica, si riscontra la presenza del difetto e in base al suo grado di intensità. Si riportano di seguito alcuni esempi pratici (Figura 4.10).

Scheda 4-Scheda difettologica																	
Tipo Elemento:			TRAVE N° 1			Materiale			Calcestruzzo- Acciaio								
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale						Estremità destra	Mezzeria	Estremità sinistra									
						Grado di difetto	Grado di difetto	Grado di difetto									
						I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
						x											
Foto N°	Note	Difetto															
		Distacco del copriferro															
						$K_3=0.5$											
Tipo Elemento:			TRAVE N° 2			Materiale			Calcestruzzo- Acciaio								
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale						Estremità destra	Mezzeria	Estremità sinistra									
						Grado di difetto	Grado di difetto	Grado di difetto									
						I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
						x				x							
Foto N°	Note	Difetto															
		Distacco del copriferro															
						$K_3=1$											
Tipo Elemento:			TRAVE N° 3			Materiale			Calcestruzzo- Acciaio								
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale						Estremità destra	Mezzeria	Estremità sinistra									
						Grado di difetto	Grado di difetto	Grado di difetto									
						I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
						x				x				x			
Foto N°	Note	Difetto															
		Distacco del copriferro															
						$K_3=1.5$											
Tipo Elemento:			TRAVE N° 4			Materiale			Calcestruzzo- Acciaio								
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale						Estremità destra	Mezzeria	Estremità sinistra									
						Grado di difetto	Grado di difetto	Grado di difetto									
						I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
								x				x				x	
Foto N°	Note	Difetto															
		Distacco del copriferro															
						$K_3=2$											

Figura 4.10 Esempi pratici di attribuzione del coefficiente K_3 durante una ispezione

Il fattore L_i ha la funzione di valutare la rilevanza della localizzazione del danno nei confronti della sicurezza strutturale dell'elemento in cui compare (Figura 4.11). Esso può assumere valore pari a 1 nel caso in cui la localizzazione non sia critica, pari a 2 nel caso opposto.

È intuitivo infatti che, in dipendenza del punto in cui insorge il danno, esso determinerà una condizione di pericolo maggiore o minore e avrà quindi un peso differente se localizzato in una zona critica, come quella di formazione di una cerniera plastica, oppure no.

Ciò richiede dunque uno studio preliminare specifico per ogni struttura, infatti mentre nelle strutture isostatiche è noto il cinematicismo di collasso, nel caso di struttura iperstatica è fondamentale una contestualizzazione delle manifestazione di degrado negli elementi. Questo perché il meccanismo di collasso nelle strutture iperstatiche dipende, oltre che dalla geometria anche dall'entità e dalla disposizione dei carichi. Ogni elemento ha un proprio peso all'interno di un meccanismo di collasso e la rilevanza della manifestazione di degrado dipenderà dalla localizzazione dell'elemento strutturale e dall'importanza che l'elemento ha nell'insieme struttura.

Andrebbero fatte allora le seguenti valutazioni:

- Il difetto è localizzato in un elemento critico del ponte (Elemento che coinvolge la capacità di carico)?
- Il difetto è localizzato in un punto critico di questo elemento (Come il punto di momento massimo della trave, zona di formazione della cerniera plastica)?
- Se l'elemento collassa, ciò causerebbe il crollo del ponte?
- Ci sarebbero altri elementi portanti che garantirebbero un'adeguata resistenza per supportare il ponte?
- Il ponte dovrebbe essere chiuso al traffico per evitare qualunque tipo di catastrofe?

In base a quanto detto, il fattore L_i può assumere valore pari a (Tabella 4.5):

- 1 se la localizzazione di insorgenza del difetto non è ritenuta critica perché non compromette il funzionamento statico dell'elemento;
- 2 se la localizzazione del difetto è critica, ad es. vengono rilevate le tipiche fessure che descrivono una possibile crisi dell'elemento.

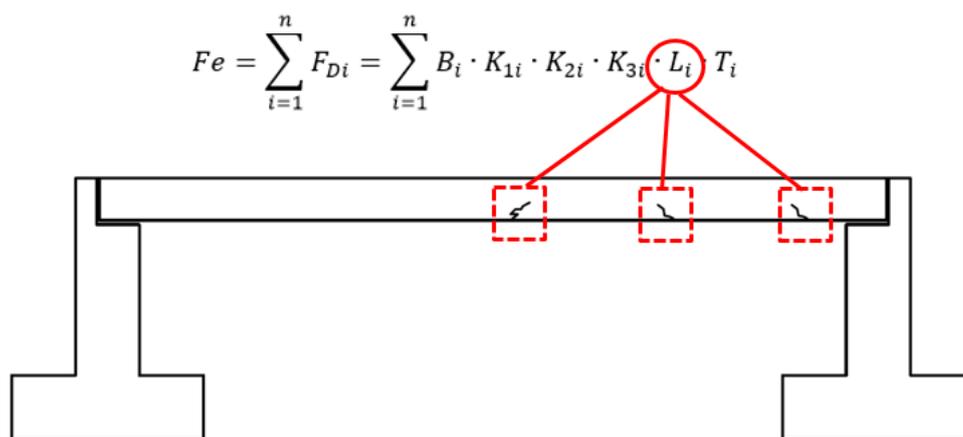


Figura 4.11 L_i rilevanza della localizzazione in cui insorge il danno

Tabella 4.5 Fattore L_i per valutare la rilevanza della localizzazione del danno.

Criterio	L_i
Il difetto non è localizzato in un punto critico dell'elemento	1
Il difetto è localizzato in un punto critico dell'elemento	2

Il fattore T_i è rappresentativo della resistenza meccanica del materiale (Figura 4.12). Esso può assumere valori compresi tra 1 e 5 (Tabella 4.6).

Per la valutazione del livello delle proprietà meccaniche del materiale, si considererà il rapporto tra la resistenza ottenuta per mezzo di prove non distruttive eseguite sul materiale e una resistenza di riferimento che sarà il valore di resistenza previsto in fase di progetto ed in caso non si disponesse di questo dato si utilizzerà la resistenza minima prescritta per la classe di esposizione dell'opera investigata (1) (Figura 4.13 e Figura 4.14).

$$F_e = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i$$



Figura 4.12 T_i caratterizzazione del materiale

In base al rapporto tra le due resistenze introdotte ($R_{cub\ test}/R_{cub\ rif}$) il fattore T_i assumerà uno dei valori indicati in Tabella 4.6.

Tabella 4.6 Fattore T_i indicante la proprietà di resistenza meccanica del materiale

Criterio	$R_{cub\ test}/R_{cub\ rif}$	T_i
Buona resistenza	>1	1
Scarsa resistenza	da 0.66 a 1	da 2 a 3
Pessima resistenza	da 0.33 a 0.66	da 3 a 5
Nessuna resistenza	da 0 a 0.33	5

Classi di esposizione

Denominazione della classe	Descrizione dell'ambiente	Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione
1 Assenza di rischio di corrosione o attacco		
X0	Per calcestruzzo privo di armatura o inserti metallici: tutte le esposizioni eccetto dove c'è gelo/disgelo, abrasione o attacco chimico. Per calcestruzzo con armatura o inserti metallici: molto asciutto.	Calcestruzzo all'interno di edifici con umidità dell'aria molto bassa
2 Corrosione indotta da carbonatazione		
Nel caso in cui il calcestruzzo contenente armature o inserti metallici sia esposto all'aria e all'umidità, l'esposizione sarà classificata nel modo seguente: Nota Le condizioni di umidità si riferiscono a quelle presenti nel copriferro o nel ricoprimento di inserti metallici, ma in molti casi si può considerare che tali condizioni riflettano quelle dell'ambiente circostante. In questi casi la classificazione dell'ambiente circostante può essere adeguata. Questo può non essere il caso se c'è una barriera fra il calcestruzzo e il suo ambiente.		
XC1	Asciutto o permanentemente bagnato	Calcestruzzo all'interno di edifici con bassa umidità relativa Calcestruzzo costantemente immerso in acqua
XC2	Bagnato, raramente asciutto	Superfici di calcestruzzo a contatto con acqua per lungo tempo Molte fondazioni
XC3	Umidità moderata	Calcestruzzo all'interno di edifici con umidità relativa dell'aria moderata oppure elevata Calcestruzzo esposto all'esterno protetto dalla pioggia
XC4	Ciclicamente bagnato ed asciutto	Superfici di calcestruzzo soggette al contatto con acqua, non nella classe di esposizione XC2
3 Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare		
Qualora il calcestruzzo contenente armature o altri inserti metallici sia soggetto al contatto con acqua contenente cloruri, inclusi i sali antigelo, con origine diversa dall'acqua di mare, l'esposizione sarà classificata come segue: Nota In riferimento alle condizioni di umidità vedere anche sezione 2 del presente prospetto.		
XD1	Umidità moderata	Superfici di calcestruzzo esposte a nebbia salina
XD2	Bagnato, raramente asciutto	Piscine Calcestruzzo esposto ad acque industriali contenenti cloruri
XD3	Ciclicamente bagnato ed asciutto	Parti di ponti esposte a spruzzi contenenti cloruri Pavimentazioni Pavimentazioni di parcheggi
4 Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare		
Qualora il calcestruzzo contenente armature o altri inserti metallici sia soggetto al contatto con cloruri presenti nell'acqua di mare oppure con aria che trasporta sali derivanti dall'acqua di mare, l'esposizione sarà classificata come segue:		
XS1	Esposto a nebbia salina ma non in contatto diretto con acqua di mare	Strutture prossime oppure sulla costa
XS2	Permanentemente sommerso	Parti di strutture marine
XS3	Zone esposte alle onde oppure alla marea	Parti di strutture marine

Figura 4.13 Classi di esposizione. (1) UNI EN 206-1:2006. Calcestruzzo-Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità

prospetto F.1 Valori limite raccomandati per la composizione e le proprietà del calcestruzzo

	Classi di esposizione																	
	Nessun rischio di corrosione o attacco	Corrosione da carbonatazione				Corrosione da cloruri						Attacco gelo/disgelo				Ambienti chimici aggressivi		
						Acqua marina			Altri cloruri (diversi dall'acqua di mare)									
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2
Rapporto massimo a/c	-	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45
Classe di resistenza minima	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Contenuto minimo di cemento (kg/m ³)	-	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
Contenuto minimo di aria (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0 ^{a)}	4,0 ^{b)}	4,0 ^{b)}	-	-	-
Altri requisiti												Aggregati in accordo alla EN 12620 con sufficiente resistenza al gelo/disgelo				Cemento resistente ai solfati ^{b)}		

a) Quando il calcestruzzo non contiene aria aggiunta, le sue prestazioni dovrebbero essere verificate conformemente ad un metodo di prova appropriato rispetto ad un calcestruzzo per il quale è provata la resistenza al gelo/disgelo per la relativa classe di esposizione.
 b) Qualora la presenza di SO₂ comporti le classi di esposizione XA2 e XA3, è essenziale utilizzare un cemento resistente ai solfati. Se il cemento è classificato a moderata o ad alta resistenza ai solfati, il cemento dovrebbe essere utilizzato in classe di esposizione XA2 (e in classe di esposizione XA1 se applicabile) e il cemento ad alta resistenza, ai solfati dovrebbe essere utilizzato in classe di esposizione XA3.

Figura 4.14 Valori limite raccomandati per la composizione e le proprietà del calcestruzzo. (1) UNI EN 206-1:2006. Calcestruzzo-Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità

Come detto, sommando la valutazione effettuata per i tutti i singoli elementi che compongono l’opera e rapportando questo valore alla somma dei difetti che potenzialmente possono verificarsi nella struttura osservata, si ottiene la Funzione di valutazione dell’intera struttura (Figura 4.15):

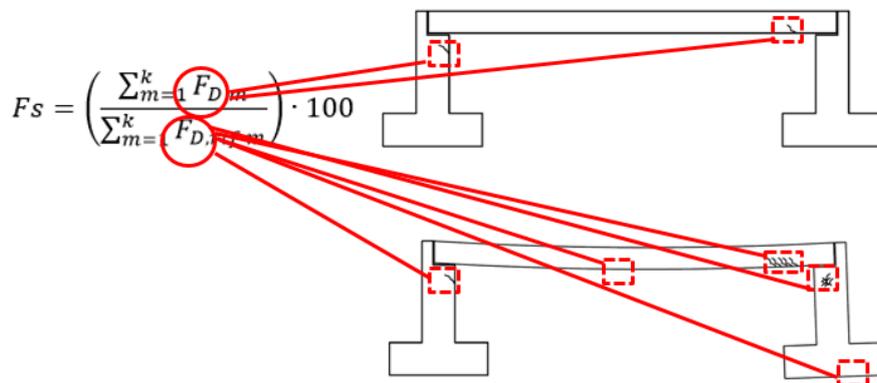


Figura 4.15 Funzione Fs di valutazione dell’intera struttura

Al termine dell’ispezione così condotta si dispone di un valore numerico al quale corrisponde una Classe di deterioramento che permette di gerarchizzare l’urgenza di intervento con operazioni di ripristino sia all’interno della struttura che tra strutture distinte.

Attraverso questa procedura di analisi dei dati di ispezione è possibile specializzare gli interventi all’interno della singola struttura. Infatti consente di decidere per esempio di sistemare solo una parte di un ponte (eliminando il difetto che incrementa maggiormente il valore del Condition Rating) e posticipando gli altri interventi (per esempio intervengo subito solo sul ripristino di una trave ammalorata e posticipo il risanamento delle altre ad una data futura, allocando le risorse sulle altre strutture e facendo quindi un’ottimizzazione economica spinta).

Inoltre ad ogni classe di deterioramento corrisponde una indicazione in merito alla tempistica della ispezione successiva o degli eventuali interventi di ripristino (2) secondo quanto indicato in Tabella 4.7.

Tabella 4.7 Classi di deterioramento, Relazione tra Fs e ispezione successiva

Classe di deterioramento	Descrizione della condizione, intervento necessario, esempi di deterioramento	Fs	Tempistica ispezione successiva
I	Nessun difetto o lievi. Nessuna riparazione necessaria, solo regolare manutenzione. Esempi: irregolarità geometrica, imperfezioni estetiche, decolorazione.	Da 0 a 5	Ispezione trimestrale ordinaria eseguita dal personale addetto alla manutenzione (Circolare 19/07/1967 n.6736/61 A1).
II	Basso grado di deterioramento che solo dopo un lungo periodo può essere causa di una riduzione di funzionalità o durabilità della componente affetta, se non riparata in tempo appropriato. Deterioramenti localizzati possono essere riparati a basso costo durante il lavoro di regolare manutenzione. Esempi: fratture locali, piccole mancanze dovute ad un cattivo betonaggio, copriferro localmente troppo sottile.	Da 5 a 10	Ispezione trimestrale ordinaria eseguita dal personale addetto alla manutenzione mirata alla valutazione delle eventuali evoluzioni dei difetti rilevati durante l'ispezione precedente (Circolare 19/07/1967 n.6736/61 A1).
III	Medio grado di deterioramento , che può essere la causa di riduzione di funzionalità e durabilità dell'elemento affetto, ma ancora non richiede nessuna limitazione d'uso della struttura. Riparazione in tempo ragionevolmente breve. Esempi: fessurazione, carenze maggiori dovute ad un cattivo betonaggio, copriferro molto sottile in aree prevalentemente bagnate, difetti nella impermeabilizzazione del ponte.	Da 10 a 15	Si raccomanda la programmazione di un controllo straordinario eseguito sotto la diretta responsabilità degli Ingegneri addetti alla zona. (Circolare 19/07/1967 n.6736/61 A1).
IV	Alto grado di deterioramento , riduce la funzionalità e la durabilità della struttura, ma ancora non richiede serie limitazioni d'uso. È richiesto immediato riparo per preservare la funzionalità e durabilità richiesta. Esempi: barre corrose nei principali elementi portanti, giunti aperti, grandi fessure dovute al sovraccarico.	Da 15 a 25	Intervento di ripristino tempestivo, si dà la priorità a strutture in Classi superiori.
V	Deterioramento molto grave , richiede la limitazione d'uso (esempio: restrizione sui pesi dei veicoli), puntellamento degli elementi più critici o altre misure di protezione. È richiesto immediato riparo e rinforzo della struttura o dovrebbe essere ridotta adeguatamente la capacità di carico. Esempi: grave corrosione delle barre o dei cavi di precompressione nei principali elementi portanti, larghe fessure dovute al sovraccarico, acqua nei trefoli di precompressione.	Da 25 a 35	Intervento di ripristino immediato, si dà la priorità a strutture in Classi superiori.
VI	Deterioramento critico , richiede immediato puntellamento della struttura e una forte limitazione d'uso. È richiesto lavoro immediato e intensivo di riabilitazione, tuttavia la funzionalità e uso di progetto della struttura nel servizio residuo non possono più essere raggiunti con costo economico.	≥35	Intervento di ripristino immediato, priorità su tutte le altre Classi.

4.3. Esempi applicativi

Al fine di verificare l'applicabilità del metodo introdotto, si propongono di seguito alcuni esempi nei quali si mostrerà l'influenza di ogni singolo fattore che concorre al giudizio della struttura ($B_i, K_1, K_2, K_3, L_i, T_i$) rispetto al risultato finale.

Fattore K_1 : rappresentativo dell'effetto dell'elemento sulla sicurezza e/o durabilità generale della struttura.

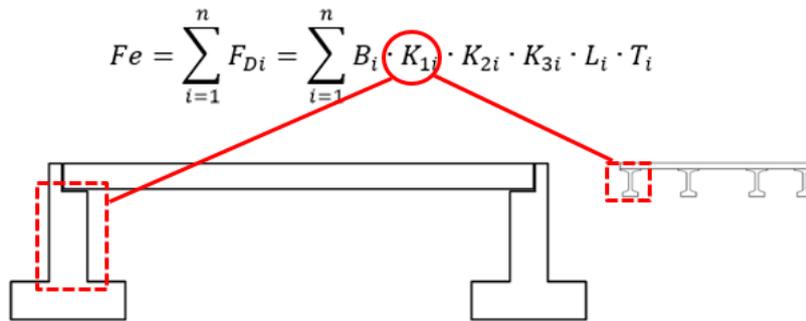


Figura 4.16. Variabilità del fattore K_1 in funzione dell'elemento considerato

Spalla: $K_1=0.4$

Trave: $K_1=0.6$

Sia per la Spalla che per la Trave si considera:

Tabella 4.8. Valori dei fattori assunti

Tipologia difetto	Lesione a ragnatela	B	1
Dimensione del difetto	Piccola dimensione	K_2	0.5
Estensione di propagazione del difetto	Limitata	K_3	0.5
Localizzazione danno	Punto non critico	L	1
Resistenza meccanica	Buona resistenza	T	1

$$Fe_{spalla} = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i = 1 \cdot 0.4 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 1 = 0.1$$

$$Fe_{trave} = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i = 1 \cdot 0.6 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 1 = 0.15$$

Dai risultati mostrati si rileva che, a parità di valore degli altri fattori (B_i, K_2, K_3, L_i, T_i), un elemento con effetto maggiore sulla sicurezza e/o durabilità generale della struttura avrà un valore di Fe maggiore.

Fattore B: rappresentativo dell'effetto potenziale di un generico danno “i” sulla sicurezza strutturale (o durabilità) di un elemento strutturale.

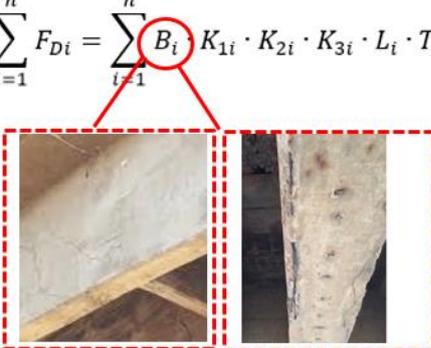
$$Fe = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i$$


Figura 4.17. Variabilità del fattore B in funzione del danno considerato

Lesione a ragnatela: B=1

Corrosione dei cavi di precompressione: B=4

Tabella 4.9. Valori dei fattori assunti

Elemento	Trave	K ₁	0.6
Dimensione del difetto	Piccola dimensione	K ₂	0.5
Estensione di propagazione del difetto	Limitata	K ₃	0.5
Localizzazione danno	Punto non critico	L	1
Resistenza meccanica	Buona resistenza	T	1

$$Fe_{trave, lesione a ragnatela} = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i = 1 \cdot 0.6 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 1 = 0.15$$

$$Fe_{trave, corrosione cavi prec} = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i = 4 \cdot 0.6 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 1 = 0.6$$

Dai risultati mostrati si rileva che, a parità di valore degli altri fattori (K₁, K₂, K₃, L_i, T_i), una trave che presenta un danno con effetto potenziale maggiore sulla sicurezza strutturale (o durabilità) avrà un valore di Fe maggiore.

Fattore K₂: rappresentativo dell'intensità/grado del difetto tipo "i".

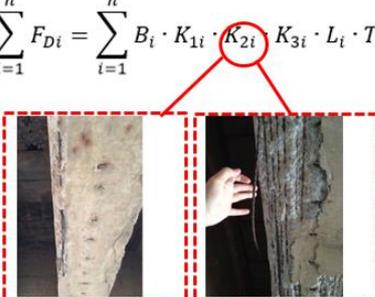
$$Fe = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i$$


Figura 4.18. Variabilità del fattore K₂ in funzione dell'intensità del danno

Difetto di piccola dimensione: $K_2=0.5$

Difetto di dimensione molto grande: $K_2=2$

Tabella 4.10. Valori dei fattori assunti

Tipologia difetto	Corrosione cavi di precompressione	B	4
Elemento	Trave	K_1	0.6
Estensione di propagazione del difetto	Limitata	K_3	0.5
Localizzazione danno	Punto non critico	L	1
Resistenza meccanica	Buona resistenza	T	1

$$\begin{aligned}
 Fe \text{ trave, corrosione cavi prec, dimensione piccola} &= \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i \\
 &= 4 \cdot 0.6 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 1 = 0.6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Fe \text{ trave, corrosione cavi prec, dimensione grande} &= \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i \\
 &= 4 \cdot 0.6 \cdot 2 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 1 = 2.4
 \end{aligned}$$

Dai risultati mostrati si rileva che, a parità di valore degli altri fattori (B, K_1, K_3, L_i, T_i), una trave che presenta un danno con dimensione maggiore (o durabilità) avrà un valore di Fe maggiore.

Fattore K_3 : rappresentativo dell'estensione di propagazione del difetto tipo "i" sull'intero elemento.

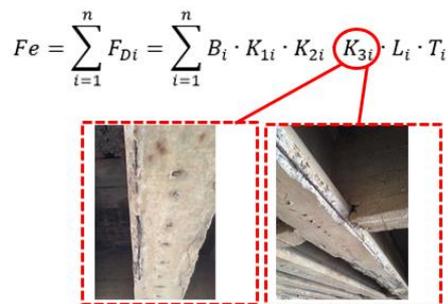


Figura 4.19. Variabilità del fattore K_3 in funzione dell'estensione del danno considerato

Difetto limitato: $K_3=0.5$

Difetto esteso: $K_3=2$

Tabella 4.11. Valori dei fattori assunti

Tipologia difetto	Corrosione cavi di precompressione	B	4
Elemento	Trave	K_1	0.6
Dimensione del difetto	Piccola dimensione	K_2	0.5
Localizzazione danno	Punto non critico	L	1
Resistenza meccanica	Buona resistenza	T	1

$$\begin{aligned}
 Fe \text{ trave, corrosione cavi prec, dimensione piccola, limitato} &= \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i \\
 &= 4 \cdot 0.6 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 1 = 0.6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Fe \text{ trave, corrosione cavi prec, dimensione grande, esteso} &= \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i \\
 &= 4 \cdot 0.6 \cdot 0.5 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 = 2.4
 \end{aligned}$$

Dai risultati mostrati si rileva che, a parità di valore degli altri fattori (B, K₁, K₂, L_i, T_i), una trave che presenta un danno con estensione maggiore (o durabilità) avrà un valore di Fe maggiore.

Fattore L: rappresentativo della localizzazione del danno all'intero dell'elemento.

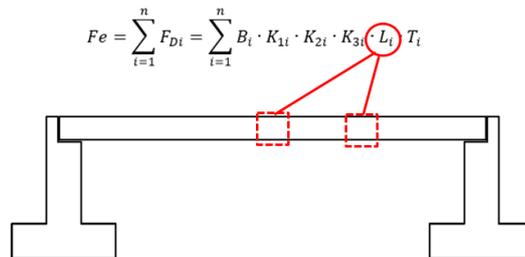


Figura 4.20. Variabilità del fattore L in funzione della localizzazione nell'elemento considerato

Punto non critico: L=1

Punto critico: L=2

Tabella 4.12. Valori dei fattori assunti

Tipologia difetto	Corrosione cavi di precompressione	B	4
Elemento	Trave	K ₁	0.6
Dimensione del difetto	Piccola dimensione	K ₂	0.5
Estensione di propagazione del difetto	Limitata	K ₃	0.5
Resistenza meccanica	Buona resistenza	T	1

$$\begin{aligned}
 Fe \text{ trave, corrosione cavi prec, dimensione piccola, limitato} &= \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i \\
 &= 4 \cdot 0.6 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 1 = 2.4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Fe \text{ trave, corrosione cavi prec, dimensione grande, esteso} &= \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i \\
 &= 4 \cdot 0.6 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot 2 \cdot 1 = 4.8
 \end{aligned}$$

Dai risultati mostrati si rileva che, a parità di valore degli altri fattori (B, K₁, K₂, K₃, T_i), una trave che presenta un danno localizzato in un punto critico (o durabilità) avrà un valore di Fe maggiore.

Fattore T: rappresentativo della resistenza meccanica del materiale.

$$Fe = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i$$

Figura 4.21. Variabilità del fattore L in funzione della localizzazione nell'elemento considerato

Buona resistenza: T=1

Nessuna resistenza: T=5

Tabella 4.13. Valori dei fattori assunti

Tipologia difetto	Corrosione cavi di precompressione	B	4
Elemento	Trave	K ₁	0.6
Dimensione del difetto	Piccola dimensione	K ₂	0.5
Estensione di propagazione del difetto	Limitata	K ₃	0.5
Localizzazione danno	Punto non critico	L	1

$$Fe_{trave, corrosione\ cavi\ prec, dimensione\ piccola, limitato} = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i$$

$$= 4 \cdot 0.6 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 1 = 0.6$$

$$Fe_{trave, corrosione\ cavi\ prec, dimensione\ grande, esteso} = \sum_{i=1}^n F_{Di} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot K_{1i} \cdot K_{2i} \cdot K_{3i} \cdot L_i \cdot T_i$$

$$= 4 \cdot 0.6 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 5 = 3$$

Dai risultati mostrati si rileva che, a parità di valore degli altri fattori (B, K₁, K₂, K₃, L_i), una trave con materiali scadenti (o durabilità) avrà un valore di Fe maggiore.

4.4.Schede di valutazione

Nel seguito si propongono delle Schede di Valutazione che andranno compilate durante le ispezioni per annotare schematicamente le varie osservazioni eseguite. In questo modo si rende chiaro come, partendo da ciò che è stato rilevato durante l'ispezione, per ogni elemento strutturale e materiale costituente, sia possibile emettere il giudizio finale.

La scheda in Figura 4.22 è utile al fine dell'individuazione della struttura, in essa vanno riportati tutti i dati rilevanti per la sua univoca identificazione (nome, ubicazione...).

Anno

N° (è il numero progressivo di censimento del ponte)

Rilevatore: Qualifica, Nome Cognome, reparto amministrativo o azienda esterna Data Rilievo: giorno, mese, anno

Scheda 1 - Individuazione struttura

Codice Ponte		Denominazione	
		Fonte	

Tronco canale		Località	
Progressiva stradale	Iniziale [m]	Finale [m]	Dato indicativo delle progressive tratte dal profilo del canale entro le quali è ricompresa la struttura.

Ubicazione

Comune		Provincia	
--------	--	-----------	--

Coordinate

Gauss-Boaga <small>Fonte CTR 1:10.000</small>	x [m]	-	
	y [m]	-	
Geografiche <small>Fonte Google Earth</small>	Lat. [°]	-	
	Long. [°]		

Viabilità

Denominazione	-
Centri Collegati	-
Tipologia	

Categoria (portata): (Categoria della strada (I,II,III), portata limite indicata su eventuali cartelli o delibere)

Immagine in sinistra idraulica da monte

Immagine in destra idraulica da valle

<i>Estratto Catastale</i>	Comune		Mappale	Dato indicativo del mappale prossimo alla struttura
	Foglio			

Estratto Google Earth

Figura 4.22 Scheda 1-Individuazione struttura

La Scheda 2 raccoglie tutte le informazioni costruttive dell'opera in esame (Figura 4.23).

Scheda 2-Caratteristiche costruttive	
Fondazioni:	Tipologia delle fondazioni ove visibili o certamente note: su pali, pile su roccia, platea...
Spalle:	Materiale costituente: calcestruzzo, muratura,...
Pile:	Materiale costituente: calcestruzzo, muratura,...
Impalcato:	Materiale costituente: calcestruzzo, acciaio,...
Travate:	Materiale costituente: calcestruzzo, acciaio,...
Spartitraffico:	Materiale e tipologia, guardrail, parapetto in ferro, New Jersey
Giunti:	Tipo di giunto:...
Appoggi:	Tipo di appoggio:...
Protezioni laterali:	Tipo di protezione: parapetti, sicurvia, reti, barriera antirumore,... (e tipo di materiale)
Pali luce:	N° di punti luce e materiale costituente (tubi in ferro, palo in calcestruzzo...)
Scarichi:	N° degli scarichi e tipo di raccolta delle acque: tubi di scarico centrali o laterali, scossalina di bordo, ...
Pavimentazioni:	Materiale di superficie della carreggiata e dei marciapiedi.
Servizi:	Passaggio di servizi in concessione: tubi del gas, dell'acqua, corrente elettrica, ...
Note:	

Figura 4.23 Scheda 2-Caratteristiche costruttive

In Figura 4.24 si riporta la scheda relativa alle caratteristiche geometriche della struttura (lunghezza, larghezza, n°campate...).

Scheda 3-Caratteristiche geometriche	
Lunghezza totale (m):	Lunghezza totale della struttura da spalla a spalla. Da esprimere fino alla secondo cifra decimale.
Larghezza impalcato (m):	Larghezza dell'impalcato in mezzeria. Da espimere fino alla seconda cifra decimale.
Larghezza carreggiata (m):	Larghezza della carreggiata da marciapiede/banchina a marciapiede/banchina. In presenza di spartitraffico farne la somma. Da esprimere fino alla seconda cifra decimale.
Tracciato:	Direzione dell'asse longitudinale del ponte rispetto all'ostacolo oltrepassato: rettilineo, curvilineo, pendente rettilineo, pendente
N° corsie:	N° delle corsie.
Altezza utile (m):	Nel caso esistesse va inidcato l'altezza limite di passaggio.
Marciapiede dx/valle (m):	Larghezza utile del marciapiede (esclusi parapetti o guardrail). Da espimere fino alla seconda cifra decimale.
Marciapiede sx/monte (m):	Larghezza utile del marciapiede (esclusi parapetti o guardrail). Da espimere fino alla seconda cifra decimale.
N° campate:	N° delle campate indipendentemente dalla loro luce
Luci (m):	Luci delle campate intese da asse ad asse pila e inizio spalle.
campata 1	
campata 2	
...	
...	
...	
...	
...	
...	
...	

Figura 4.24 Scheda 3-Caratteristiche geometriche

Si riportano di seguito le schede difettologiche per i vari elementi strutturali costituenti la struttura. (Spalla: Figura 4.25, Soletta: Figura 4.26, Trave: Figura 4.27, Traverso: Figura 4.28, Pilastro: Figura 4.29).

Scheda 4-Scheda difettologica

Tipo Elemento:				Materiale:			
SPALLA	N°	Posizione:	Monte	Muratura			

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità superiore				Mezzeria				Estremità inferiore			
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Foto N°	Difetto												
	Movimenti laterali												
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo												
	Cedimenti differenziali												
	Area scalzata sotto pile e spalle												
	Freccia verticale												
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti												
	Difetti provocati in fase di realizzazione												
	Copriferro inferiore a quello richiesto												
	Fronte di carbonatazione (pH<10)												
	Penetrazione dei cloruri												
	Lesioni a ragnatela												
	Fessure orizzontali												
	Fessure verticali												
	Fessure diagonali												
	Fessure longitudinali												
	Fessure trasversali												
	Danni meccanici, erosione, urti												
	Fioritura, essudazione												
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato												
	Macchie di umidità attiva												
	Macchie di umidità passiva												
	Gelo e disgelo												
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione delle barre												
	Espulsione causata dalle barre corrose												
	Giunti aperti tra elementi												
	Ripreso successive di getto deteriorate												
	Corrosione delle staffe												
	Corrosione delle armature principali												
	Carenza del trefolo												
	Corrosione di cavi di precompressione												

Figura 4.25 Scheda 4-Scheda difettologica: Spalla

Tipo Elemento:		Posizione:		Materiale	
SOLETTA		Intradosso		Calcestruzzo armato	

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Intradosso				Estradosso			
		Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali								
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo								
	Cedimenti differenziali								
	Area scalzata sotto pile e spalle								
	Freccia verticale								
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti								
	Difetti provocati in fase di realizzazione								
	Copriferro inferiore a quello richiesto								
	Fronte di carbonatazione (pH<10)								
	Penetrazione dei cloruri								
	Lesioni a ragnatela								
	Fessure orizzontali								
	Fessure verticali								
	Fessure diagonali								
	Fessure longitudinali								
	Fessure trasversali								
	Danni meccanici, erosione, urti								
	Fioritura, essudazione								
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato								
	Macchie di umidità attiva								
	Macchie di umidità passiva								
	Gelo e disgelo								
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione								
	Espulsione causata dalle barre corrose								
	Giunti aperti tra elementi								
	Ripreso successive di getto deteriorate								
	Corrosione delle staffe								
	Corrosione delle armature principali								
	Carenza del trefolo								
	Corrosione di cavi di precompressione								

Figura 4.26 Scheda 4-Scheda difettologica: Soletta

Tipo Elemento:																			
TRAVE		N°						Materiale		Calcestruzzo- Acciaio									
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale								Estremità destra		Mezzeria				Estremità sinistra					
								Grado di difetto		Grado di difetto				Grado di difetto					
Foto		Difetto						I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
		Movimenti laterali																	
		Inclinazione, rotazione, fuori piombo																	
		Cedimenti differenziali																	
		Area scalzata sotto pile e spalle																	
		Freccia verticale																	
		Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti																	
		Difetti provocati in fase di realizzazione																	
		Copriferro inferiore a quello richiesto																	
		Fronte di carbonatazione (pH<10)																	
		Penetrazione dei cloruri																	
		Lesioni a ragnatela																	
		Fessure orizzontali																	
		Fessure verticali																	
		Fessure diagonali																	
		Fessure longitudinali																	
		Fessure trasversali																	
		Danni meccanici, erosione, urti																	
		Fioritura, essudazione																	
		Calcestruzzo dilavato/ammalorato																	
		Macchie di umidità attiva																	
		Macchie di umidità passiva																	
		Gelo e disgelo																	
		Difetti del copriferro dovuti a corrosione																	
		Espulsione causata dalle barre corrose																	
		Giunti aperti tra elementi																	
		Ripreso successive di getto deteriorate																	
		Corrosione delle staffe																	
		Corrosione delle armature principali																	
		Carenza del trefolo																	
		Corrosione di cavi di precompressione																	

Figura 4.27 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave

Tipo Elemento:																			
TRAVERSO		N°						Materiale		Calcestruzzo- Acciaio									
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale								Estremità superiore		Mezzeria		Estremità inferiore							
								Grado di difetto		Grado di difetto		Grado di difetto							
Foto		Difetto						I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
		Movimenti laterali																	
		Inclinazione, rotazione, fuori piombo																	
		Cedimenti differenziali																	
		Area scalzata sotto pile e spalle																	
		Freccia verticale																	
		Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti																	
		Difetti provocati in fase di realizzazione																	
		Copriferro inferiore a quello richiesto																	
		Fronte di carbonatazione (pH<10)																	
		Penetrazione dei cloruri																	
		Lesioni a ragnatela																	
		Fessure orizzontali																	
		Fessure verticali																	
		Fessure diagonali																	
		Fessure longitudinali																	
		Fessure trasversali																	
		Danni meccanici, erosione, urti																	
		Fioritura, essudazione																	
		Calcestruzzo dilavato/ammalorato																	
		Macchie di umidità attiva																	
		Macchie di umidità passiva																	
		Gelo e disgelo																	
		Difetti del copriferro dovuti a corrosione																	
		Espulsione causata dalle barre corrose																	
		Giunti aperti tra elementi																	
		Ripreso successive di getto deteriorate																	
		Corrosione delle staffe																	
		Corrosione delle armature principali																	
		Carenza del trefolo																	
		Corrosione di cavi di precompressione																	

Figura 4.28 Scheda 4-Scheda difettologica: Traverso

Tipo Elemento:																			
PILASTRO		N°				Materiale		Calcestruzzo- Acciaio											
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale				Estremità				Mezzeria				Estremità							
				Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto							
Foto				Difetto				I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
				Movimenti laterali															
				Inclinazione, rotazione, fuori piombo															
				Cedimenti differenziali															
				Area scalzata sotto pile e spalle															
				Freccia verticale															
				Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti															
				Difetti provocati in fase di realizzazione															
				Copriferro inferiore a quello richiesto															
				Fronte di carbonatazione (pH<10)															
				Penetrazione dei cloruri															
				Lesioni a ragnatela															
				Fessure orizzontali															
				Fessure verticali															
				Fessure diagonali															
				Fessure longitudinali															
				Fessure trasversali															
				Danni meccanici, erosione, urti															
				Fioritura, essudazione															
				Calcestruzzo dilavato/ammalorato															
				Macchie di umidità attiva															
				Macchie di umidità passiva															
				Gelo e disgelo															
				Difetti del copriferro dovuti a corrosione															
				Espulsione causata dalle barre corrose															
				Giunti aperti tra elementi															
				Ripreso successive di getto deteriorate															
				Corrosione delle staffe															
				Corrosione delle armature principali															
				Carenza del trefolo															
				Corrosione di cavi di precompressione															

Figura 4.29 Scheda 4-Scheda difettologica: Pilastro

La Figura 4.30 riporta la scheda relativa alle indagini strumentali.

Scheda 5-Scheda di indagine strumentale			
Tipo Elemento:			
	N°		
Classe di esposizione:	Si fa riferimento alle: UNI EN 206-1:2006: Calcestruzzo-Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità.		
Valori limite raccomandati per le proprietà del calcestruzzo:	Si fa riferimento alle: UNI EN 206-1:2006: Calcestruzzo-Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità.		
Risultati prove			
Tipologia di prova:	Risultato di prova:	Rc [N/mm ²]	
Indice sclerometrico medio:			
Velocità di propagazione ultrasonica:			
Pull out:			
R cub Test		Rcub rif	Rcub test/Rcubrif
			Fattore T

Figura 4.30 Scheda5-Scheda di indagine strumentale

Bibliografia

- (1) UNI EN 206-1:2006. *Calcestruzzo. Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità.*
- (2) Circolare 19/07/1967 n.6736/61 A1. Ministero lavori pubblici. *Controllo delle condizioni di stabilità delle opere d'arte stradali.*

Capitolo V

Casi di Studio

Contenuto del capitolo:

- Esempi applicativi della metodologia proposta
- Attraversamento 1 del Rio Palaceris in località Pixina Manna, Pula
- Attraversamento 2 del Rio Palaceris in località Pixina Manna, Pula
 - Ponte sito sulla SS.195, Cagliari
- Ponte sito sulla SS.195, Cagliari: Simulazione di ripristino

5.1. Esempi applicativi della metodologia proposta

Nel presente capitolo si mostrerà l'applicazione del metodo di valutazione proposto, a tre distinte strutture reali. Le prime due sono situate in località Pixina Manna (Pula) a poca distanza l'una dall'altra, ciò ha permesso di condurre parallelamente le due indagini. La terza struttura si trova invece in provincia di Cagliari, lungo la Strada Statale 195.

Come si vedrà negli esempi applicativi riportati, il metodo costituisce un importante ausilio alla valutazione della struttura, fornendo un percorso guidato per il tecnico che deve svolgere l'indagine ed indirizzando ad una omogeneità di giudizio. Esso obbliga infatti ad effettuare una valutazione sui singoli elementi costruttivi, inducendo in questo modo l'attenzione dell'ispettore a particolari ragionamenti e quindi consente la maturazione di un giudizio complessivo sulla vulnerabilità della struttura più ponderato e consapevole.

La realizzazione di una scheda ispettiva serve per mantenere traccia dell'ispezione effettuata e del relativo esito. Con questo procedimento si intende stabilire un linguaggio comune nella descrizione del danno e della vulnerabilità, fornire indicazioni per ottenere dagli elementi rilevati una valutazione di efficienza e consentire una migliore informatizzazione dei dati di ispezione.

L'applicazione di questa metodologia durante una indagine permette di ottenere come output un giudizio relativo allo stato di conservazione della struttura investigata.

I parametri che entrano in gioco nel calcolo di questo giudizio sono i dati rilevabili durante le ispezioni visive, ragionamenti tecnici effettuati da personale esperto in merito allo schema statico della struttura da cui scaturisce la rilevanza che può avere la localizzazione del difetto all'interno dell'elemento su cui compare, e i risultati delle prove strumentali effettuate sul materiale costituente l'opera.

Al termine dell'ispezione così condotta si dispone di un valore numerico al quale corrisponde una Classe di deterioramento che permette di gerarchizzare l'urgenza di intervento con operazioni di ripristino sia all'interno della struttura che tra strutture distinte. Inoltre ad ogni classe di deterioramento corrisponde una indicazione in merito alla tempistica della ispezione successiva o degli eventuali interventi di ripristino.

5.2. Attraversamenti del Rio Palaceris in località Pixina Manna, Pula

La prima indagine svolta ha avuto per oggetto i due attraversamenti situati lungo la rete stradale che si estende all'interno dell'area del Parco Scientifico e Tecnologico in località Pixina Manna.

La sede centrale del Parco tecnologico della Sardegna sorge in un'area di circa 160 ettari, posta nella valle del Rio Palaceris, sulle ultime propaggini del massiccio montuoso del Sulcis, a circa 3 Km dalla costa sud-occidentale della Sardegna ed a circa 6 Km dal centro abitato di Pula (CA). L'area costituita da una fascia larga 500-600 metri risale il corso del Rio Palaceris per circa 3,5 Km a partire dall'incrocio delle due attuali strade di accesso.

I due manufatti hanno subito dei seri problemi di danneggiamento a seguito degli eventi alluvionali che hanno interessato la valle del Rio Palaceris nei mesi di aprile del 2005 e del 2007.

Per poter meglio capire l'entità dei danni cagionati alla zona in questione segue un'immagine fotografica (Figura 5.1) che evidenzia la portata degli eventi che hanno interessato l'area.



Figura 5.1 Immagine dell'evento alluvionale che ha interessato il Rio Palaceris.

5.2.1. Attraversamento 1 del Rio Palaceris in località Pixina Manna, Pula

La struttura in oggetto è un ponte stradale, avente funzione di superare un corso d'acqua (Rio Palaceris).

Durante la prima ispezione si è effettuata una mappatura della geometria e della consistenza degli elementi strutturali in calcestruzzo (soletta, travi e pilastro), mediante l'esecuzione di indagini pacometriche, indagine ultrasonica, prova sclerometrica, prova di resistenza ad estrazione pull-out. L'impalcato è costituito da una soletta piena avente spessore pari a circa 16cm e armata longitudinalmente con ϕ 22/15 sia superiormente che inferiormente, mentre trasversalmente con ϕ 7/15 (essendo l'armatura, in questi tratti esposti, molto corrosa si può supporre che in origine si trattasse di ϕ 8).

La soletta è sostenuta da doppie travi in acciaio IPE 240 rivestite in calcestruzzo, di forma rettangolare, appoggiate su spalle di muratura in pietra. L'impalcato del ponte è realizzato con tre travi, delle quali la trave centrale ha dimensioni 0.30 x 0.30 m e le travi esterne hanno dimensioni 0.40 x 0.30 m. È inoltre presente un pilastro inclinato di dimensioni 43x50cm, armato con 4 ϕ 24/25. Durante l'ispezione visiva è stato osservato ogni elemento costituente il ponte ed è stata compilata la relativa scheda difettologica. Ad essa è stata affiancata una indagine strumentale mirata alla caratterizzazione del calcestruzzo costituente l'opera.

La procedura adottata per la preparazione e per la determinazione della resistenza superficiale a compressione del calcestruzzo, mediante la misura dell'indice di rimbalzo è quella indicata dalla normativa (1) UNI EN 12504-2 2012.

Lo sclerometro (Figura 5.2) è uno strumento finalizzato ad accertare la stima della resistenza meccanica di elementi strutturali in calcestruzzo.

Il valore di rimbalzo, opportunamente parametrizzato in funzione anche dell'angolo di battuta, fornisce un'indicazione orientativa della resistenza del calcestruzzo.

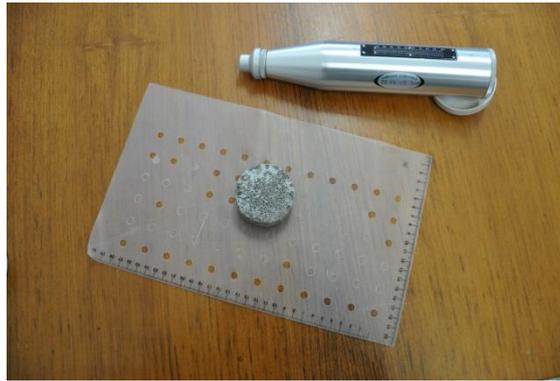


Figura 5.2 Strumentazione per prova sclerometrica.

Nel punto di indagine sono state eseguite un numero di battute pari a 12 (Figura 5.6). L'indice di battuta così ottenuto è stato riportato su una tabella apposita e successivamente si è provveduto prima a calcolarne la media e in seguito a stimarne la resistenza cubica media a compressione R_{cm} attraverso la curva di correlazione legata al tipo di sclerometro utilizzato (Figura 5.3).

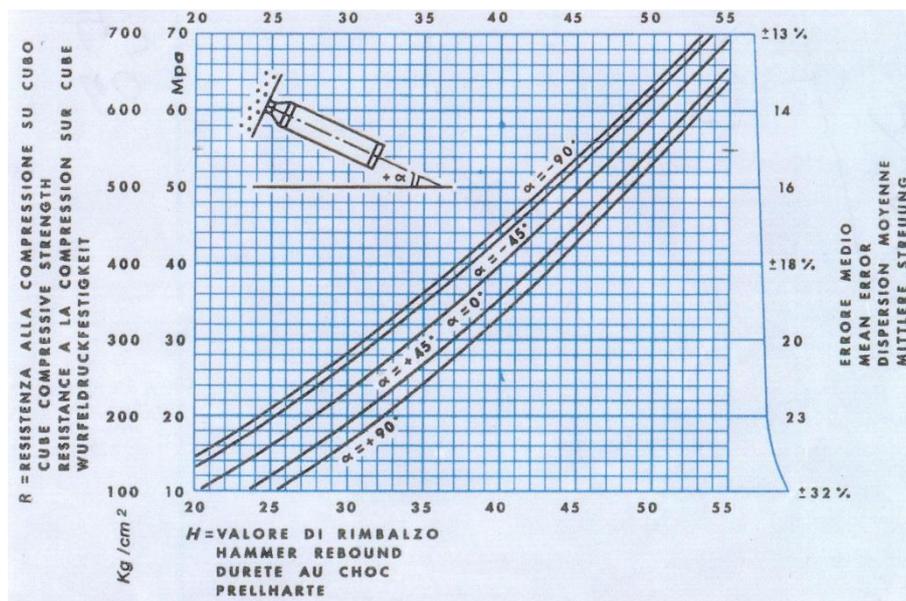


Figura 5.3 Sclerometro Boviar Gei Concrete.

I risultati ottenuti sono i seguenti (Tabella 5.1):

Tabella 5.1 Risultati indagine sclerometrica Attraversamento 1.

Localizzazione	Indice sclerometrico medio	Resistenza [N/mm ²]
Pilastro 1	32	26

Le procedure adottate per la preparazione e la realizzazione delle prove ultrasoniche sono state eseguite secondo la normativa (2) UNI EN 12504-4:2005.



Figura 5.4 Strumentazione ultrasuoni.



Figura 5.5 Trasmittitore TSG-55 (a sinistra) e Ricevitore RSG-55 (a destra)

Per effettuare la misurazione è stata preventivamente realizzata una griglia regolare di 12 punti (Figura 5.6). La prova è stata eseguita da 2 operatori posizionando trasmettitore e ricevitore nelle rispettive direzioni e utilizzando un campo di frequenza ≥ 20 kHz. A questo punto è stato possibile, dopo aver posizionato con precisione sui punti dell'elemento i due trasduttori, interponendo l'apposito gel di aderenza (che garantisce una perfetta trasmissione delle onde) e applicando su di essi una forte pressione in modo tale da favorire l'ampiezza del segnale, emettere l'impulso ultrasonico e rilevare il tempo di transito sul palmare in dotazione con la strumentazione.

L'acquisizione dei dati è stata effettuata con il metodo della misurazione diretta.

Di seguito si riporta la velocità media ottenuta:

Tabella 5.2 Risultati indagine ultrasonica Attraversamento 1.

Localizzazione	Metodo prova	Velocità media [m/s]
Pilastro 1	Diretta	3013

	<u>12.5</u>		
<u>12.5</u>	①	②	③
	④	⑤	⑥
	⑦	⑧	⑨
	⑩	⑪	⑫

Figura 5.6 Schema di rilievo per le prove sclerometriche e ultrasoniche effettuate sulla superficie del pilastro.

Le procedure adottate per la preparazione e la realizzazione delle prove di estrazione di Pull-out sono normate dalla (3) UNI EN 12504-3:2005. La prova di estrazione è un metodo di analisi semidistruttivo. La resistenza del calcestruzzo in sito viene determinata mediante la misurazione della forza necessaria per estrarre un inserto metallico inserito in apposito foro realizzato nel calcestruzzo. Il valore della forza così misurato viene utilizzato per la determinazione della resistenza a compressione tramite curve di taratura o in correlazione con altri metodi non distruttivi.

L'attrezzatura è composta dai seguenti elementi (Figura 5.7):

- Martinetto oleodinamico;
- Kit di tasselli;

- Trapano a rotopercolazione professionale;
- Punta da trapano con campana svasatrice per eseguire fori tronco-conici con diametro Φ 15;
- Pompa manuale dotata di manometro da 250 bar con indicatore di massima;
- Mazzetta;
- Percussore per alloggiare i tasselli;
- Tubo rinforzato per AP da 2,5 m;
- Stelo di estrazione tassello post-inserito.



Figura 5.7 Attrezzatura Pull Out.

La prova è stata eseguita con un tassello metallico del tipo post-inserito ad espansione geometrica. La pressione di estrazione così ottenuta è stata riportata su una tabella apposita e successivamente si è provveduto a stimarne la resistenza cubica a compressione R_c attraverso le curve di correlazione in riferimento alla tipologia di inserto metallico (tassello) utilizzato e il tipo di elemento strutturale considerato.

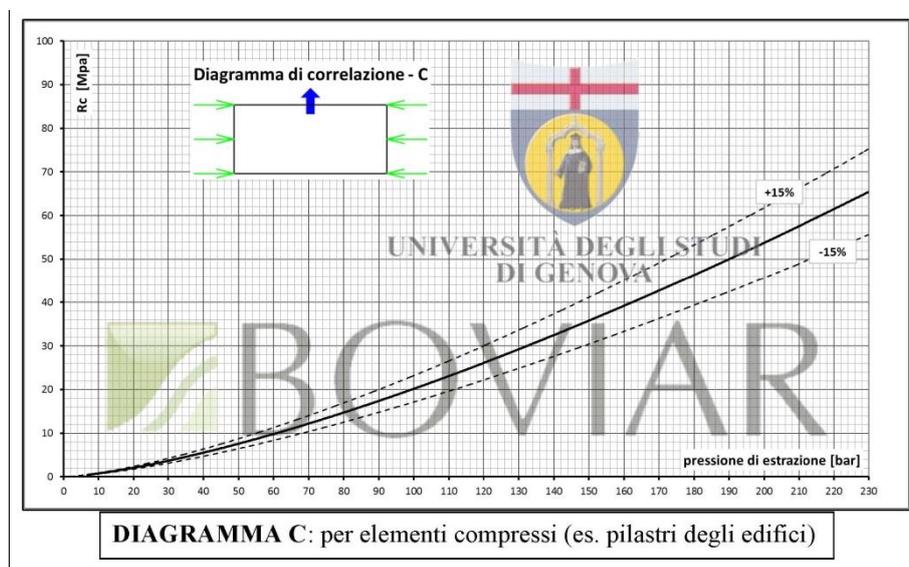


Figura 5.8 Curva di correlazione Pull Out (Pilastri)

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 5.3.

Tabella 5.3 Risultati indagine Pull-out Attraversamento 1.

Localizzazione	Media pressione di estrazione tassello [bar]	Resistenza cubica [N/mm ²]	Forze di estrazione [kN]
Pilastro 1	85	16	105

Si riportano di seguito le schede di ispezione compilate durante il sopralluogo (Figura 5.9, Figura 5.10, Figura 5.11, Figura 5.12, Figura 5.13, Figura 5.14, Figura 5.15, Figura 5.16, Figura 5.17, Figura 5.18, Figura 5.19).

Schede di ispezione

Attraversamento 1 del Rio
Palaceris in località Pixina
Manna, Pula

N° 1

Data Rilievo 09-lug-13

Scheda 1 - Individuazione struttura

Codice Ponte	1	Denominazione		Attraversamento 1	
		Località	Pixina Manna, Pula		
Progressiva stradale	Iniziale [m]	-	Finale [m]	-	Dato indicativo delle progressive tratte dal profilo del canale entro le quali è ricompresa la struttura.

Ubicazione

Comune	Pula	Provincia	Cagliari
--------	------	-----------	----------

Coordinate

Geografiche <small>Fonte Google Earth</small>	Lat. [°]	38°59'31.33"N
	Long. [°]	8°56'35.39"E

Viabilità

Denominazione	-
Centri Collegati	-
Tipologia	-

Categoria (portata): (Categoria della strada (I,II,II), portata limite indicata su eventuali cartelli o delibere)

Estratto Catastale	Comune	-	Mappale	-	Dato indicativo del mappale più vicino alla struttura
	Foglio	-			

Estratto Google Earth



Figura 5.9 Scheda 1-Individuazione struttura-Attraversamento 1.

Scheda 2-Caratteristiche costruttive	
Fondazioni:	-
Spalle:	Muratura in pietra
Pile:	-
Impalcato:	Calcestruzzo armato
Travate:	Calcestruzzo-acciaio
Spartitraffico:	-
Giunti:	-
Appoggi:	-
Protezioni laterali:	-
Pali luce:	-
Scarichi:	-
Pavimentazioni:	-
Servizi:	Passaggio di servizi di rete fognaria
Note:	-

Figura 5.10 Scheda 2-Caratteristiche costruttive-Attraversamento 1.

Scheda 3-Caratteristiche geometriche	
Lunghezza totale (m):	8
Larghezza impalcato (m):	4
Larghezza carreggiata (m):	-
Tracciato:	Rettilineo
N° corsie:	2
Altezza utile (m):	-
Marciapiede dx/valle (m):	-
Marciapiede sx/monte (m):	-
N° campate:	1
Luci (m):	
campata 1	8

Figura 5.11 Scheda 3-Caratteristiche geometriche-Attraversamento 1.

Scheda 4-Scheda difettologica

Tipo Elemento:				Materiale:			
SPALLA	N°1	Posizione:	Monte	Muratura			

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità superiore				Mezzeria				Estremità inferiore			
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Foto N°	Difetto												
	Movimenti laterali												
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo												
	Cedimenti differenziali												
	Area scalzata sotto pile e spalle												
	Freccia verticale												
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti												
	Difetti provocati in fase di realizzazione												
	Copriferro inferiore a quello richiesto												
	Fronte di carbonatazione (pH<10)												
	Penetrazione dei cloruri												
	Lesioni a ragnatela												
	Fessure orizzontali												
	Fessure verticali												
	Fessure diagonali												
	Fessure longitudinali												
	Fessure trasversali												
	Danni meccanici, erosione, urti											x	
	Fioritura, essudazione	x											
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato												
	Macchie di umidità attiva												
Macchie di umidità passiva													
Gelo e disgelo													
Difetti del copriferro dovuti a corrosione delle barre													
Espulsione causata dalle barre corrose													
Giunti aperti tra elementi													
Riprese successive di getto deteriorate													
Corrosione delle staffe													
Corrosione delle armature principali													
Carenza del trefolo													
Corrosione di cavi di precompressione													

Figura 5.12 Scheda 4-Scheda difettologica: Spalla 1-Attraversamento 1.

Tipo Elemento:							
SPALLA	N°2	Posizione:	Valle	Materiale:	Muratura		

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità superiore				Mezzeria				Estremità inferiore			
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali												
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo												
	Cedimenti differenziali												
	Area scalzata sotto pile e spalle										x		
	Freccia verticale												
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti												
	Difetti provocati in fase di realizzazione												
	Copriferro inferiore a quello richiesto												
	Fronte di carbonatazione (pH<10)												
	Penetrazione dei cloruri												
	Lesioni a ragnatela												
	Fessure orizzontali												
	Fessure verticali												
	Fessure diagonali												
	Fessure longitudinali												
	Fessure trasversali												
	Danni meccanici, erosione, urti												
	Fioritura, essudazione		x										
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato												
	Macchie di umidità attiva												
	Macchie di umidità passiva												
	Gelo e disgelo												
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione												
	Espulsione causata dalle barre corrose												
Giunti aperti tra elementi													
Riprese successive di getto deteriorate													
Corrosione delle staffe													
Corrosione delle armature principali													
Carenza del trefolo													
Corrosione di cavi di precompressione													

Figura 5.13 Scheda 4-Scheda difettologica: Spalla 2-Attraversamento 1.

Tipo Elemento:

SOLETTA

Posizione:

Intradosso

Materiale

Calcestruzzo armato

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Intradosso				Estradosso			
		Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali								
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo								
	Cedimenti differenziali								
	Area scalzata sotto pile e spalle								
	Freccia verticale								
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti								
	Difetti provocati in fase di realizzazione								
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				
	Fronte di carbonatazione (pH<10)								
	Penetrazione dei cloruri								
	Lesioni a ragnatela								
	Fessure orizzontali								
	Fessure verticali								
	Fessure diagonali								
	Fessure longitudinali								
	Fessure trasversali								
	Danni meccanici, erosione, urti				x				
	Fioritura, essudazione								
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato				x				
	Macchie di umidità attiva								
	Macchie di umidità passiva								
	Gelo e disgelo								
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione				x				
	Espulsione causata dalle barre corrose				x				
	Giunti aperti tra elementi								
	Riprese successive di getto deteriorate								
Corrosione delle staffe				x					
Corrosione delle armature principali				x					
Carenza del trefolo									
Corrosione di cavi di precompressione									

Figura 5.14 Scheda 4-Scheda difettologica: Soletta-Attraversamento 1.

Tipo Elemento:																								
TRAVE	N°	1		Materiale		Calcestruzzo- Acciaio																		
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale													Estremità destra				Mezzeria				Estremità sinistra			
													Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto												I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali																							
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo																							
	Cedimenti differenziali																							
	Area scalzata sotto pile e spalle																							
	Freccia verticale																							
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti																							
	Difetti provocati in fase di realizzazione																							
	Copriferro inferiore a quello richiesto																							
	Fronte di carbonatazione (pH<10)																							
	Penetrazione dei cloruri																							
	Lesioni a ragnatela																							
	Fessure orizzontali																							
	Fessure verticali																							
	Fessure diagonali																							
	Fessure longitudinali																							
	Fessure trasversali																							
	Danni meccanici, erosione, urti																							
	Fioritura, essudazione																							
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato																							
	Macchie di umidità attiva																							
	Macchie di umidità passiva																							
	Gelo e disgelo																							
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione															x				x				x
	Espulsione causata dalle barre corrose																							
	Giunti aperti tra elementi																							
	Riprese successive di getto deteriorate																							
Corrosione delle staffe																								
Corrosione delle armature principali																								
Carenza del trefolo																								
Corrosione di cavi di precompressione																								

Figura 5.15 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 1-Attraversamento 1.

Tipo Elemento:																							
TRAVE	N°	2		Materiale		Calcestruzzo- Acciaio																	
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale				Estremità destra		Mezzeria				Estremità sinistra													
				Grado di difetto		Grado di difetto				Grado di difetto													
Foto				Difetto				I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV				
				Movimenti laterali																			
				Inclinazione, rotazione, fuori piombo																			
				Cedimenti differenziali																			
				Area scalzata sotto pile e spalle																			
				Freccia verticale																			
				Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti																			
				Difetti provocati in fase di realizzazione																			
				Copriferro inferiore a quello richiesto																			
				Fronte di carbonatazione (pH<10)																			
				Penetrazione dei cloruri																			
				Lesioni a ragnatela																			
				Fessure orizzontali																			
				Fessure verticali																			
				Fessure diagonali																			
				Fessure longitudinali																			
				Fessure trasversali																			
				Danni meccanici, erosione, urti																			
				Fioritura, essudazione																			
				Calcestruzzo dilavato/ammalorato																			
				Macchie di umidità attiva																			
				Macchie di umidità passiva																			
				Gelo e disgelo																			
				Difetti del copriferro dovuti a corrosione							x				x				x				
				Espulsione causata dalle barre corrose																			
Giunti aperti tra elementi																							
Riprese successive di getto deteriorate																							
Corrosione delle staffe																							
Corrosione delle armature principali																							
Carenza del trefolo																							
Corrosione di cavi di precompressione																							

Figura 5.16 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 2-Attraversamento 1.

Tipo Elemento:															
TRAVE	N°	3		Materiale		Calcestruzzo- Acciaio									
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale				Estremità destra				Mezzeria				Estremità sinistra			
				Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto			I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali														
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo														
	Cedimenti differenziali														
	Area scalzata sotto pile e spalle														
	Freccia verticale														
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti														
	Difetti provocati in fase di realizzazione														
	Copriferro inferiore a quello richiesto														
	Fronte di carbonatazione (pH<10)														
	Penetrazione dei cloruri														
	Lesioni a ragnatela														
	Fessure orizzontali														
	Fessure verticali														
	Fessure diagonali														
	Fessure longitudinali														
	Fessure trasversali														
	Danni meccanici, erosione, urti														
	Fioritura, essudazione														
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato														
	Macchie di umidità attiva														
Macchie di umidità passiva															
Gelo e disgelo															
Difetti del copriferro dovuti a corrosione						x			x					x	
Espulsione causata dalle barre corrose															
Giunti aperti tra elementi															
Riprese successive di getto deteriorate															
Corrosione delle staffe															
Corrosione delle armature principali															
Carenza del trefolo															
Corrosione di cavi di precompressione															

Figura 5.17 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 3-Attraversamento 1.

Tipo Elemento:

PILASTRO	N°	1
-----------------	-----------	----------

Materiale	Calcestruzzo- Acciaio
-----------	-----------------------

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità superiore				Mezzeria				Estremità inferiore			
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali												
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo												
	Cedimenti differenziali												
	Area scalzata sotto pile e spalle												x
	Freccia verticale												
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti												
	Difetti provocati in fase di realizzazione												
	Copriferro inferiore a quello richiesto												
	Fronte di carbonatazione (pH<10)									x			
	Penetrazione dei cloruri												
	Lesioni a ragnatela												
	Fessure orizzontali												
	Fessure verticali												
	Fessure diagonali												
	Fessure longitudinali												
	Fessure trasversali												
	Danni meccanici, erosione, urti					x							x
	Fioritura, essudazione												
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato					x							x
	Macchie di umidità attiva												
	Macchie di umidità passiva												
	Gelo e disgelo												
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione					x							x
	Espulsione causata dalle barre corrose					x							x
	Giunti aperti tra elementi					x							
	Riprese successive di getto deteriorate												
	Corrosione delle staffe												
	Corrosione delle armature principali					x							
	Carenza del trefolo												
	Corrosione di cavi di precompressione												

Figura 5.18 Scheda 4-Scheda difettologica: Pilastro-Attraversamento 1.

Scheda 5-Scheda di indagine strumentale			
Tipo Elemento:			
PILASTRO	N°	1	
Classe di esposizione:	XC4 Si fa riferimento alle: UNI EN 206-1:2006: Calcestruzzo-Parte 1: Specificazione,		
Valori limite raccomandati per le proprietà del calcestruzzo:	C30/37 Si fa riferimento alle: UNI EN 206-1:2006: Calcestruzzo-Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità.		
Risultati prove			
Tipologia di prova:	Risultato di prova:		Rc [N/mm ²]
Indice sclerometrico medio:	32		26
Velocità di propagazione ultrasonica:	3013 m/s		-
Pull out:	85 bar		16
R cub Test= (Rc indice sclerometrico+ Rc pull out)/2		Rcub rif	Rcub test/Rcubrif
21		37	0.57
			Fattore T
			4

Figura 5.19 Scheda 5-Scheda di indagine strumentale: Pilastro-Attraversamento 1.

Sulla base delle schede di valutazione compilate in loco è stato possibile procedere al calcolo della Funzione di valutazione di ogni elemento costituente la struttura (Fe) e il corrispondente Condition Rating dell'intera struttura (Fs). Di seguito si riportano le schede di calcolo (Figura 5.20, Figura 5.21, Figura 5.22, Figura 5.23, Figura 5.24, Figura 5.25, Figura 5.26).

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif					F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{ref} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{Dref} = K ₁ x M _{ref}		
Spalla 1	0.4	2.12	I	1	0.5	0.5	1	1	0.25	0.5	0.2	1.11	2	8	124	49.6	0.40	I
		2.13	I	1	0.5	0.5	1	1	0.25			1.12	2	8				
												1.13	3	12				
												1.14	4	16				
												2.7	3	12				
												2.8	3	12				
												2.9	4	16				
												2.10	3	12				
												2.11	4	16				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				

Figura 5.20 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Spalla 1-Attraversamento 1.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Spalla 2	0.4	1.14	I	4	0.5	0.5	1	1	1	1.25	0.5	1.11	2	8	124	49.6	1.01	I
		2.13	I	1	0.5	0.5	1	1	0.25			1.12	2	8				
		1.13	3	12														
		1.14	4	16														
		2.7	3	12														
		2.8	3	12														
		2.9	4	16														
		2.10	3	12														
		2.11	4	16														
		2.12	1	4														
		2.13	1	4														
		2.15	1	4														

Figura 5.21 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Spalla 2-Attraversamento 1.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Soletta	0.4	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	112	44.8	1.21	2	8	180	72	62.22	VI
		2.12	IV	1	2.0	2.0	2	1	8			2.1	1	4				
		2.14	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.2	1	4				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.3	2	8				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.4	2	8				
		3.1	IV	1	2.0	2.0	2	1	8			2.5	3	12				
		3.2	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.6	1	4				
		2.7	3	12														
		2.8	3	12														
		2.9	4	16														
		2.10	3	12														
		2.11	4	16														
		2.12	1	4														
		2.13	1	4														
		2.14	2	8														
		2.15	1	4														
		2.16	1	4														
		2.18	2	8														
2.19	3	12																
2.21	1	4																
3.1	1	4																
3.2	3	12																

Figura 5.22 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Soletta-Attraversamento 1.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 1	0.6	2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	16	9.6	1.21	1	4	68	40.8	23.53	IV
		2.4	2	8	2.5	3	12											
		2.12	1	4														
		2.13	1	4														
		2.15	1	4														
		2.16	1	4														
		2.18	2	8														
		2.19	2	8														
		2.20	2	8														
		2.21	1	4														

Figura 5.23 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 1-Attraversamento 1.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 2	0.6	2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	16	9.6	1.21	1	4	68	40.8	23.53	IV
		2.4	2	8	2.5	3	12											
		2.12	1	4														
		2.13	1	4														
		2.15	1	4														
		2.16	1	4														
		2.18	2	8														
		2.19	2	8														
		2.20	2	8														
		2.21	1	4														

Figura 5.24 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 2-Attraversamento 1.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento					
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{ref} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{Dref} = K ₁ x M _{ref}	
Trave 3	0.6	2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	16	9.6	1.21	1	4	68	40.8	23.53	IV	
		2.4											2.4	2					8
		2.5											2.5	3					12
		2.12											2.12	1					4
		2.13											2.13	1					4
		2.15											2.15	1					4
		2.16											2.16	1					4
		2.18											2.18	2					8
		2.19											2.19	2					8
		2.20											2.20	2					8
		2.21											2.21	1					4

Figura 5.25 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 3-Attraversamento 1.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{ref} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{Dref} = K ₁ x M _{ref}
Pilastro	0.4	1.14	IV	4	2	1.5	2	4	96	536	214.4	1.11	2	8	164	65.6	326.8	VI
		2.4	IV	2	2	1.5	2	4	48			1.12	2	8				
		2.12	IV	1	2	2	2	4	32			1.14	4	16				
		2.14	IV	2	2	2	2	4	64			2.1	1	4				
		2.18	IV	2	2	2	2	4	64			2.2	1	4				
		2.19	IV	3	2	2	2	4	96			2.3	2	8				
		2.2	IV	2	2	2	2	4	64			2.4	2	8				
		3.2	IV	3	2	1.5	2	4	72			2.5	3	12				
												2.10	3	12				
												2.11	4	16				
												2.12	1	4				
												2.14	2	8				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	3	12				
								2.20	2	8								
								2.21	1	4								
								3.1	1	4								
								3.2	3	12								

Figura 5.26 Calcolo della Funzione di valutazione Fe il Pilastro-Attraversamento 1.

L'attività ispettiva svolta sull'Attraversamento 1 del Rio Palaceris in località Pixina Manna a Pula, ha permesso di concretizzare la valutazione relativa allo stato di conservazione del manufatto in un unico giudizio numerico espresso dal Condition rating mark (Fs):

$$F_s = \left(\frac{\sum_{m=1}^k F_{D,m}}{\sum_{m=1}^k F_{D,rif,m}} \right) \cdot 100 = 80$$

Come mostrato nella Tabella 7 "Classi di deterioramento, Relazione tra Fs e ispezione successiva" del Capitolo 8 "Metodologia di indagine proposta", strutture aventi valori di Fs > 30 rientrano nella Classe di deterioramento VI contenente strutture con deterioramento critico, le quali necessitano di un intervento di ripristino immediato, con priorità su tutte le altre Classi.

F _s	Classe della struttura
80	VI

In seguito alle indagini eseguite, si ritiene che l'opera in questione necessiti delle seguenti attività di ripristino:

- Trattamento dei ferri e ripresa dei copriferris in distacco delle solette e del pilastro inclinato;
- Incamiciamento del pilastro con calcestruzzo additivato collaborante;
- Rasature consolidanti e protettive del calcestruzzo delle solette e del pilastro;
- Consolidamento e protezione delle spalle murarie in pietra, di appoggio delle solette in c.a.

5.2.2. Attraversamento 2 del Rio Palaceris in località Pixina Manna, Pula

La struttura in oggetto è un ponte stradale, realizzata al fine di superare un corso d'acqua (Rio Palaceris). Le sue dimensioni, tipologia strutturale e materiali costituenti sono molto simili a quelli dell'Attraversamento 1 precedentemente descritto e valutato.

Durante la prima ispezione si è effettuata una mappatura della geometria e della consistenza degli elementi strutturali in calcestruzzo (soletta e travi), mediante l'esecuzione di indagini pacometriche, indagine ultrasonica, prova sclerometriche, prova di resistenza ad estrazione pull-out.

L'impalcato è costituito da una soletta piena avente spessore pari a circa 16 cm, armata longitudinalmente con $\phi 22/15$ sia superiormente che inferiormente, mentre trasversalmente con $\phi 7.5/15$ (essendo l'armatura, in questi tratti esposti, molto corrosa si può supporre che in origine fosse almeno un $\phi 8$).

La soletta è sostenuta da doppie travi in acciaio IPE240 rivestite in calcestruzzo, di forma rettangolare, appoggiate su muratura in pietra. L'impalcato del ponte è realizzato con quattro travi di dimensioni 0.30 x 0.25 m.

Durante il sopralluogo è stata effettuata l'ispezione visiva di ogni elemento costituente il ponte ed è stata compilata la relativa scheda difettologica. Ad essa è stata affiancata una indagine strumentale mirata alla caratterizzazione del calcestruzzo costituente l'opera.

La procedura adottata per la preparazione e per la determinazione della resistenza superficiale a compressione del calcestruzzo, mediante la misura dell'indice di rimbalzo è quella indicata dalla normativa (1) UNI EN 12504-2 2012.

Nel punto di indagine sono state eseguite un numero di battute pari a 12 (Figura 5.27).

L'indice di battuta così ottenuto è stato riportato su una tabella apposita e successivamente si è provveduto prima a calcolarne la media e in seguito a stimarne la resistenza cubica media a compressione R_{cm} attraverso la curva di correlazione legata al tipo di sclerometro utilizzato (Figura 5.3 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

I risultati ottenuti sono i seguenti (Tabella 5.4):

Tabella 5.4 Risultati indagine sclerometrica Attraversamento 2.

Localizzazione	Indice sclerometrico medio	Resistenza [N/mm ²]
Soletta	38	41

Le procedure adottate per la preparazione e la realizzazione delle prove ultrasoniche seguono la normativa (2) UNI EN 12504-4:2005, esattamente come descritto nelle modalità di prova dell'Attraversamento n°1.

L'acquisizione dei dati è stata effettuata con il metodo della misurazione diretta.

Di seguito si riporta la velocità media ottenuta (Tabella 5.5):

Tabella 5.5 Risultati indagine ultrasonica Attraversamento 2.

Localizzazione	Metodo di prova	Velocità media [m/s]
Soletta	DIRETTA	2447

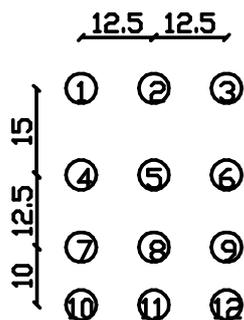


Figura 5.27 Schema di rilievo per le prove sclerometriche e ultrasoniche effettuate sull'estradosso della soletta.

Le procedure adottate per la preparazione e la realizzazione delle prove di estrazione sono normate dalla (3) UNI EN 12504-3:2005, così come lungamente descritto nel paragrafo precedente.

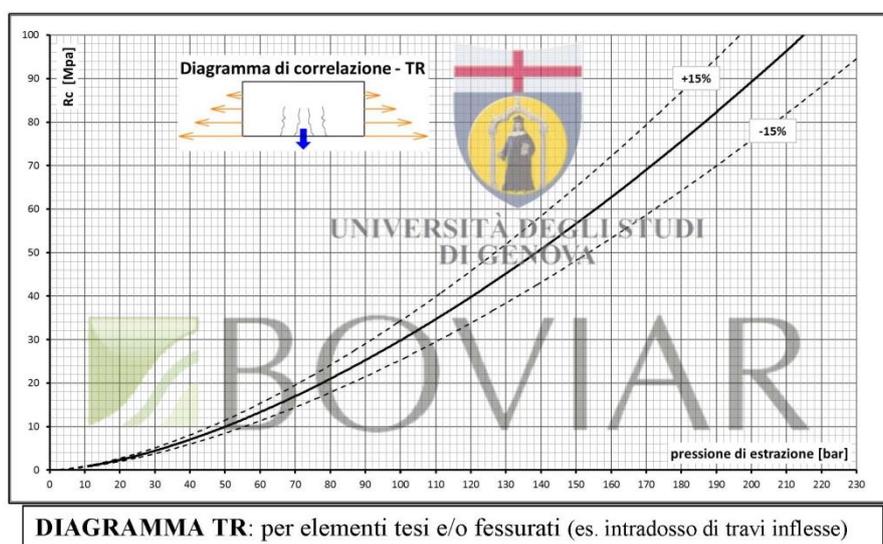


Figura 5.28 Curve di correlazione Pull Out (Travi)

I risultati sono stati i seguenti (Tabella 5.6):

Tabella 5.6 Risultati indagine Pull-out Attraversamento 2.

Localizzazione	Media pressione di estrazione tassello [bar]	Resistenza cubica [N/mm ²]	Forze di estrazione [kN]
Soletta	120	40	264

Durante la visita in loco sono state compilate le schede di valutazione per ogni elemento costituente il ponte (Figura 5.29, Figura 5.30, Figura 5.31, Figura 5.32, Figura 5.33, Figura 5.34, Figura 5.35, Figura 5.36, Figura 5.37, Figura 5.38, Figura 5.39).

Schede di ispezione

Attraversamento 2 del Rio Palaceris in località Pixina Manna, Pula		N° 2	
		Data Rilievo	09-lug-13
Scheda 1 - Individuazione struttura			
Codice Ponte	2	Denominazione	Attraversamento 1
		Località	Palma Manna, Pula
Progressiva stradale	Iniziale (m)	Finale (m)	Dato indicativo della progressiva tratta del profilo del canale ottenuto in un GIS a partire dalla struttura.
Ubicazione			
Comune	Pula	Provincia	Cagliari
Coordinate			
Geografiche	Lat. [°]	38°59'29.07"N	
Fonte Google Earth	Long. [°]	8°56'23.31"E	
Viabilità			
Denominazione	-		
Centri Collegati	-		
Tipologia	-		
Categoria (portata): (Categoria della strada (L,II,II), portata limite indicata su eventuali cartelli o delibere)			
Estratto Catastale		Comune	
	Foglio	Mappale	Dato indicativo del mappale presente sulle cartografie.
Estratto Google Earth			
			

Figura 5.29 Scheda 1-Individuazione struttura-Attraversamento 2.

Scheda 2-Caratteristiche costruttive	
Fondazioni:	-
Spalle:	Muratura in pietra
Pile:	-
Impalcato:	Calcestruzzo armato
Travate:	Calcestruzzo-acciaio
Spartitraffico:	-
Giunti:	-
Appoggi:	-
Protezioni laterali:	-
Pali luce:	-
Scarichi:	-
Pavimentazioni:	-
Servizi:	Passaggio di servizi di rete fognaria
Note:	-

Figura 5.30 Scheda 2-Caratteristiche costruttive-Attraversamento 2.

Scheda 3-Caratteristiche geometriche	
Lunghezza totale (m):	8
Larghezza impalcato (m):	4
Larghezza carreggiata (m):	-
Tracciato:	Rettilineo
N° corsie:	2
Altezza utile (m):	-
Marciapiede dx/valle (m):	-
Marciapiede sx/monte (m):	-
N° campate:	1
Luci (m):	
campata 1	8

Figura 5.31 Scheda 3-Caratteristiche geometriche-Attraversamento 2.

Scheda 4-Scheda difettologica

Tipo Elemento:				Materiale:			
SPALLA	N°1	Posizione:	Monte	Muratura			

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità superiore				Mezzeria				Estremità inferiore			
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Foto	Difetto												
	Movimenti laterali												
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo												
	Cedimenti differenziali												
	Area scalzata sotto pile e spalle									x			
	Freccia verticale												
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti												
	Difetti provocati in fase di realizzazione												
	Copriferro inferiore a quello richiesto												
	Fronte di carbonatazione (pH<10)												
	Penetrazione dei cloruri												
	Lesioni a ragnatela												
	Fessure orizzontali												
	Fessure verticali												
	Fessure diagonali												
	Fessure longitudinali												
	Fessure trasversali												
	Danni meccanici, erosione, urti												
	Fioritura, essudazione												
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato												
	Macchie di umidità attiva												
Macchie di umidità passiva													
Gelo e disgelo													
Difetti del copriferro dovuti a corrosione													
Espulsione causata dalle barre corrose													
Giunti aperti tra elementi													
Riprese successive di getto deteriorate													
Corrosione delle staffe													
Corrosione delle armature principali													
Carenza del trefolo													
Corrosione di cavi di precompressione													

Figura 5.32 Scheda 4-Scheda difettologica: Spalla 1-Attraversamento 2.

Tipo Elemento:							
SPALLA	N°2	Posizione:	Valle	Materiale:	Muratura		

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità superiore				Mezzeria				Estremità inferiore			
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali												
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo												
	Cedimenti differenziali												
	Area scalzata sotto pile e spalle												
	Freccia verticale												
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti												
	Difetti provocati in fase di realizzazione												
	Copriferro inferiore a quello richiesto												
	Fronte di carbonatazione (pH<10)												
	Penetrazione dei cloruri												
	Lesioni a ragnatela												
	Fessure orizzontali												
	Fessure verticali												
	Fessure diagonali												
	Fessure longitudinali												
	Fessure trasversali												
	Danni meccanici, erosione, urti												
	Fioritura, essudazione		x										
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato												
	Macchie di umidità attiva												
	Macchie di umidità passiva												
	Gelo e disgelo												
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione												
	Espulsione causata dalle barre corrose												
	Giunti aperti tra elementi												
	Riprese successive di getto deteriorate												
Corrosione delle staffe													
Corrosione delle armature principali													
Carenza del trefolo													
Corrosione di cavi di precompressione													

Figura 5.33 Scheda 4-Scheda difettologica: Spalla 2-Attraversamento 2.

Tipo Elemento:
SOLETTA

Posizione:	Intradosso
------------	------------

Materiale	Calcestruzzo armato
-----------	---------------------

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Intradosso				Estradosso			
		Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali								
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo								
	Cedimenti differenziali								
	Area scalzata sotto pile e spalle								
	Freccia verticale								
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti								
	Difetti provocati in fase di realizzazione								
	Copriferro inferiore a quello richiesto								
	Fronte di carbonatazione (pH<10)								
	Penetrazione dei cloruri								
	Lesioni a ragnatela								
	Fessure orizzontali								
	Fessure verticali								
	Fessure diagonali								
	Fessure longitudinali								
	Fessure trasversali								
	Danni meccanici, erosione, urti								
	Fioritura, essudazione								
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato					x			x
	Macchie di umidità attiva								
	Macchie di umidità passiva								
	Gelo e disgelo								
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione					x			
	Espulsione causata dalle barre corrose					x			
Giunti aperti tra elementi									
Riprese successive di getto deteriorate									
Corrosione delle staffe					x				
Corrosione delle armature principali					x				
Carenza del trefolo									
Corrosione di cavi di precompressione									

Figura 5.34 Scheda 4-Scheda difettologica: Soletta-Attraversamento 2.

Tipo Elemento:															
TRAVE	N°	1		Materiale		Calcestruzzo- Acciaio									
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale				Estremità destra		Mezzeria				Estremità sinistra					
				Grado di difetto		Grado di difetto				Grado di difetto					
Foto	Difetto			I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali														
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo														
	Cedimenti differenziali														
	Area scalzata sotto pile e spalle														
	Freccia verticale														
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti														
	Difetti provocati in fase di realizzazione														
	Copriferro inferiore a quello richiesto														
	Fronte di carbonatazione (pH<10)														
	Penetrazione dei cloruri														
	Lesioni a ragnatela														
	Fessure orizzontali														
	Fessure verticali														
	Fessure diagonali														
	Fessure longitudinali														
	Fessure trasversali														
	Danni meccanici, erosione, urti														
	Fioritura, essudazione														
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato														
	Macchie di umidità attiva														
	Macchie di umidità passiva														
	Gelo e disgelo														
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione							x							
Espulsione causata dalle barre corrose															
Giunti aperti tra elementi															
Riprese successive di getto deteriorate															
Corrosione delle staffe															
Corrosione delle armature principali															
Carenza del trefolo															
Corrosione di cavi di precompressione															

Figura 5.35 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 1-Attraversamento 2.

Tipo Elemento:															
TRAVE	N°	2		Materiale		Calcestruzzo- Acciaio									
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale				Estremità				Mezzeria				Estremità			
				Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto			I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali														
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo														
	Cedimenti differenziali														
	Area scalzata sotto pile e spalle														
	Freccia verticale														
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti														
	Difetti provocati in fase di realizzazione														
	Copriferro inferiore a quello richiesto														
	Fronte di carbonatazione (pH<10)														
	Penetrazione dei cloruri														
	Lesioni a ragnatela														
	Fessure orizzontali														
	Fessure verticali														
	Fessure diagonali														
	Fessure longitudinali														
	Fessure trasversali														
	Danni meccanici, erosione, urti														
	Fioritura, essudazione														
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato														
	Macchie di umidità attiva														
	Macchie di umidità passiva														
	Gelo e disgelo														
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione						x								
	Espulsione causata dalle barre corrose														
	Giunti aperti tra elementi														
	Riprese successive di getto deteriorate														
Corrosione delle staffe															
Corrosione delle armature principali															
Carenza del trefolo															
Corrosione di cavi di precompressione															

Figura 5.36 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 2-Attraversamento 2.

Tipo Elemento:															
TRAVE	N°	3		Materiale		Calcestruzzo- Acciaio									
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale				Estremità				Mezzeria				Estremità			
				Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto			I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali														
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo														
	Cedimenti differenziali														
	Area scalzata sotto pile e spalle														
	Freccia verticale														
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti														
	Difetti provocati in fase di realizzazione														
	Copriferro inferiore a quello richiesto														
	Fronte di carbonatazione (pH<10)														
	Penetrazione dei cloruri														
	Lesioni a ragnatela														
	Fessure orizzontali														
	Fessure verticali														
	Fessure diagonali														
	Fessure longitudinali														
	Fessure trasversali														
	Danni meccanici, erosione, urti														
	Fioritura, essudazione														
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato														
	Macchie di umidità attiva														
	Macchie di umidità passiva														
	Gelo e disgelo														
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione						x								
	Espulsione causata dalle barre corrose														
	Giunti aperti tra elementi														
Riprese successive di getto deteriorate															
Corrosione delle staffe															
Corrosione delle armature principali															
Carenza del trefolo															
Corrosione di cavi di precompressione															

Figura 5.37 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 3-Attraversamento 2.

Tipo Elemento:															
TRAVE	N°	4		Materiale		Calcestruzzo- Acciaio									
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale				Estremità				Mezzeria				Estremità			
				Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto			I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali														
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo														
	Cedimenti differenziali														
	Area scalzata sotto pile e spalle														
	Freccia verticale														
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti														
	Difetti provocati in fase di realizzazione														
	Copriferro inferiore a quello richiesto														
	Fronte di carbonatazione (pH<10)														
	Penetrazione dei cloruri														
	Lesioni a ragnatela														
	Fessure orizzontali														
	Fessure verticali														
	Fessure diagonali														
	Fessure longitudinali														
	Fessure trasversali														
	Danni meccanici, erosione, urti														
	Fioritura, essudazione														
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato														
	Macchie di umidità attiva														
Macchie di umidità passiva															
Gelo e disgelo															
Difetti del copriferro dovuti a corrosione						x									
Espulsione causata dalle barre corrose															
Giunti aperti tra elementi															
Riprese successive di getto deteriorate															
Corrosione delle staffe															
Corrosione delle armature principali															
Carenza del trefolo															
Corrosione di cavi di precompressione															

Figura 5.38 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 4-Attraversamento 2.

Scheda 5-Scheda di indagine strumentale				
Tipo Elemento:				
SOLETTA				
Classe di esposizione:	XC4 Si fa riferimento alle: UNI EN 206-1:2006: Calcestruzzo-Parte 1: Specificazione,			
Valori limite raccomandati per le proprietà del calcestruzzo:	C30/37 Si fa riferimento alle: UNI EN 206-1:2006: Calcestruzzo-Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità.			
Risultati prove				
Tipologia di prova:	Risultato di prova		Rc [N/mm ²]	
Indice sclerometrico medio:	38		41	
Velocità di propagazione ultrasonica:	2447 m/s		-	
Pull out:	120 bar		40	
R cub Test= (Rc indice sclerometrico+ Rc pull out)/2		Rcub rif	Rcub test/Rcubrif	Fattore T
40.5		37	1.09	1

Figura 5.39 Scheda 5-Scheda di indagine strumentale: Soletta-Attraversamento 2.

Sulla base delle schede di valutazione compilate in loco è stato possibile procedere al calcolo della Funzione di valutazione di ogni elemento costituente la strutture (Fe) e il corrispondente Condition Rating dell'intera struttura (Fs). Di seguito si riportano le relative schede di calcolo (Figura 5.40, Figura 5.41, Figura 5.42, Figura 5.43, Figura 5.44, Figura 5.45, Figura 5.46).

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento			
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{ref} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,ref} = K ₁ x M _{ref}		
Spalla 1	0.4	1.14	1	4	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	0.4	1.11	2	8	124	49.6	0.81	I
														1.12	2	8				
														1.13	3	12				
														1.14	4	16				
														2.7	3	12				
														2.8	3	12				
														2.9	4	16				
														2.10	3	12				
														2.11	4	16				
														2.12	1	4				
														2.13	1	4				
														2.15	1	4				

Figura 5.40 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Spalla 1-Attraversamento 2.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Spalla 2	0.4	2.13	I	1	0.5	0.5	1	1	0.25	0.25	0.1	1.11	2	8	124	49.6	0.20	I
		1.12	2	8														
		1.13	3	12														
		1.14	4	16														
		2.7	3	12														
		2.8	3	12														
		2.9	4	16														
		2.10	3	12														
		2.11	4	16														
		2.12	1	4														
		2.13	1	4														
		2.15	1	4														

Figura 5.41 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Spalla 2-Attraversamento 2.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Soletta	0.4	2.14	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	88	35.2	1.21	2	8	180	72	48.89	VI
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16									
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24									
		3.1	IV	1	2.0	2.0	2	1	8									
		3.2	IV	3	2.0	2.0	2	1	24									
		2.4	2	8														
		2.5	3	12														
		2.6	1	4														
		2.7	3	12														
		2.8	3	12														
		2.9	4	16														
		2.10	3	12														
		2.11	4	16														
		2.12	1	4														
		2.13	1	4														
		2.14	2	8														
		2.15	1	4														
		2.16	1	4														
2.18	2	8																
2.19	3	12																
2.21	1	4																
3.1	1	4																
3.2	3	12																

Figura 5.42 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Soletta-Attraversamento 2.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 1	0.6	2.18	IV	2	2.0	0.5	1	1	2	2	1.2	1.21	1	4	68	40.8	2.941	I
		2.4	2	8														
		2.5	3	12														
		2.12	1	4														
		2.13	1	4														
		2.15	1	4														
		2.16	1	4														
		2.18	2	8														
		2.19	2	8														
		2.20	2	8														
		2.21	1	4														

Figura 5.43 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 1-Attraversamento 2.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 2	0.6	2.18	IV	2	2.0	0.5	1	1	2	2	1.2	1.21	1	4	68	40.8	2.941	I
		2.4	2	8														
		2.5	3	12														
		2.12	1	4														
		2.13	1	4														
		2.15	1	4														
		2.16	1	4														
		2.18	2	8														
		2.19	2	8														
		2.20	2	8														
		2.21	1	4														

Figura 5.44 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 2-Attraversamento 2.

5.3. Ponte sito sulla SS.195, Cagliari

La struttura in oggetto è un ponte stradale di prima categoria in cemento armato precompresso a travata semplice, sito in una strada statale (SS195) a pochi chilometri da Cagliari, atto a superare un corso d'acqua. Il manufatto è stato realizzato nei primi anni sessanta, si sviluppa in un'unica campata di luce netta pari a 17 m. L'impalcato è largo 10.10 m ed è costituito da 14 travi (tipo TAS 80/32) precomprese e una soletta di completamento gettata in opera, presumibilmente collaborante, avente spessore pari a 0.20 m. L'irrigidimento trasversale dell'impalcato è assicurato da 3 traversi intermedi (0.25 x 0.90 m) e due di testata (0.50 x 0.90 m) gettati in opera, e dalla stessa soletta di completamento. La sovrastruttura, comprende sia la massicciata che lo strato d'usura in asfalto, che da progetto doveva avere uno spessore variabile dagli 0.08 ai 0.20 m. Quanto alle singole travi, stando al progetto e alla relazione di calcolo originaria, la maschera di precompressione risulta costituita da 82 trecce in acciaio armonico 3x24/10. Oltre al numero delle trecce e la posizione del cavo risultante, i documenti in possesso non forniscono ulteriori informazioni sull'effettiva distribuzione interna delle armature di precompressione o lente, sebbene si sia potuto verificarne direttamente la posizione all'intradosso, perché in parte visibili nel corso delle indagini effettuate. Strutturalmente l'impalcato è stato ideato come semplicemente appoggiato su spalle in calcestruzzo non armato di 1.20 m di spessore e corredate da muri d'ala di 0.40 m. L'opera è fondata, su pali troncoconici battuti in c.a. centrifugato di diametro in testa pari a 0.35 m. Quanto alla classe del calcestruzzo gettato in opera, data l'età del progetto, si fa unicamente riferimento alla miscela che prevede l'uso di 350 Kg/m³ di cemento "730", l'attuale CEM I 42,5. Si ritiene che tale indicazione debba corrispondere come minimo ad una classe C32/40. L'impalcato prevede inoltre un guard-rail in acciaio posizionato su entrambi i lati su un cordolo di 0.30 m.

L'opera d'arte è soggetta ad un traffico veicolare intenso, inoltre è stata oggetto di dissesti e riparazioni. Una recente alluvione, ha prodotto lo scalzamento delle fondazioni e il danneggiamento delle spalle, a seguito dei quali si è reso necessario un intervento di ripristino d'emergenza. L'intervento è consistito nell'esecuzione di getti di calcestruzzo per tamponare i vuoti creati dall'onda di piena durante l'alluvione. L'episodio alluvionale ha destato l'attenzione sulle condizioni dell'impalcato che presenta un diffuso e profondo stato di degrado dei materiali. In questo contesto si inserisce il processo diagnostico, con un'indagine preliminare di seguito illustrata, comprensiva di esame visivo, analisi sclerometrica, prove di Pull-Out e per la determinazione della profondità di carbonatazione.

L'esame ha messo in luce uno stato di degrado diffuso del calcestruzzo. Sia per l'esiguità del copriferro (variabile tra 5 e 15 mm), che per l'effetto della carbonatazione, appaiono del tutto compromesse le trecce di precompressione, per lo meno quelle degli strati superficiali. Alcune di esse sono lasche o addirittura recise. Considerando inoltre che la struttura è situata in un ambiente fortemente aggressivo come quello marino, appare evidente la condizione allarmante (5).

La prova sclerometrica è stata effettuata per mezzo dello sclerometro tipo Schmidt marca SEB; le prove sono state condotte in accordo con la norma UNI EN 12504-2:2012. Le misurazioni effettuate forniscono i seguenti valori di resistenza media (Tabella 5.7):

Tabella 5.7 Risultati prova sclerometrica

Trave	Indice sclerometrico	Resistenza [N/mm ²]
2	42	42
7	47	51
10	42	42
14	50	58

La prova di pull-out è regolamentata dalla norma UNI EN 12504-3:2005. Si è usato il metodo degli inserti post-inseriti, effettuando una foratura ed inserendo successivamente un tassello meccanico d'acciaio. Il valore della forza di trazione necessaria ad estrarre il suddetto tassello è indicativa della resistenza a compressione. I risultati della prova sono riepilogati di seguito (Tabella 5.8); nell'ultima colonna compaiono i valori di resistenza a compressione dedotti secondo la formula danese:

$$P = 2.2 + 0.75 R_c$$

Tabella 5.8 Risultati prova Pull-out

Trave	Letture [kN]	Rc [N/mm ²]
2	31	38.4
7	55	70.4
10	31	38.4
14	49	62.4

Sui campioni di calcestruzzo ottenuti mediante la prova di pull-out è stato effettuato il test colorimetrico con la fenoltaleina all'1% in alcol etilico, che consente di distinguere le zone di calcestruzzo normalmente sane da quelle carbonatate.

La prova di carbonatazione, normata dalla (6) UNI EN 14630:2007 e dalla (7) UNI 9944:1992, è una tecnica di indagine semi-distruttiva allo scopo di misurare la profondità di carbonatazione dello strato superficiale di una struttura in calcestruzzo. La carbonatazione è un fenomeno chimico per cui l'idrossido di calcio, presente nel calcestruzzo, reagisce con l'anidride carbonica, formando così carbonato di calcio. La riduzione dell'idrossido di calcio determina un abbassamento del pH, creando in questo modo le condizioni favorevoli per l'insorgere della corrosione dei ferri d'armatura: infatti, quando lo strato carbonato intacca il calcestruzzo che ricopre le armature, viene meno la protezione passivante creata dalla pasta cementizia, permettendo all'ossigeno e all'umidità di attaccare il ferro. Il fenomeno dell'ossidazione produce la diminuzione del copriferro o, più gravemente, la riduzione della sezione resistente del tondino. La prova deve essere effettuata subito dopo l'estrazione del campione di calcestruzzo tramite carotaggio, dal momento che, con il passare del tempo, l'anidride carbonica tende a "carbonatare" lo strato superficiale del conglomerato. Operativamente si procede immergendo il campione in una soluzione di fenoltaleina che contiene alcool etilico all'1%, provocando una colorazione viola nella zona non intaccata dalla carbonatazione. Il tratto "incolore", invece, indica la profondità di carbonatazione.

Dalle analisi effettuate si deducono i valori di penetrazione (Tabella 5.9), ampiamente superiori all'esiguo copriferro misurato sulle travi (15 mm).

Tabella 5.9 Risultati analisi della profondità di carbonatazione

Trave	Nome campione	Profondità [mm]
2	31	28
7	55	19
10	55	28
10	31	27
14	49	15

In seguito alle ispezioni visive svolte in loco è stato possibile compilare le seguenti schede di valutazione (Figura 5.47, Figura 5.48, Figura 5.49, Figura 5.50, Figura 5.51, Figura 5.52, Figura 5.53, Figura 5.54, Figura 5.55, Figura 5.56, Figura 5.57, Figura 5.58, Figura 5.59, Figura 5.60, Figura 5.61, Figura 5.62, Figura 5.63, Figura 5.64, Figura 5.65, Figura 5.66, Figura 5.67, Figura 5.68, Figura 5.69, Figura 5.70, Figura 5.71, Figura 5.72, Figura 5.73, Figura 74, Figura 5.75):

Schede di ispezione

Ponte Prima Categoria SS 195,
Cagliari

N°3

Data Rilievo 05-dic-13

Scheda 1 - Individuazione struttura

Codice Ponte	3	Denominazione	Ponte Prima Categoria SS 195, Cagliari	
		Località	Cagliari	
Progressiva stradale	Iniziale [m]	-	Finale [m]	-
				<small>Dato indicativo delle progressive tratte dal profilo del canale entro le quali è ricompresa la struttura.</small>

Ubicazione

Comune	Cagliari	Provincia	Cagliari
--------	----------	-----------	----------

Coordinate

Geografiche <small>Fonte Google Earth</small>	Lat. [°]	39°10'25.17"N
	Long. [°]	9° 2'19.36"E

Viabilità

Denominazione	-
Centri Collegati	-
Tipologia	Campata unica
Categoria (portata):	Prima Categoria

Estratto Google Earth



Figura 5.47 Scheda 1-Individuazione struttura-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Scheda 2-Caratteristiche costruttive	
Fondazioni:	-
Spalle:	Calcestruzzo
Pile:	-
Impalcato:	Calcestruzzo armato
Travate:	Calcestruzzo armato precompresso
Spartitraffico:	-
Giunti:	-
Appoggi:	-
Protezioni laterali:	-
Pali luce:	-
Scarichi:	-
Pavimentazioni:	-
Servizi:	-
Note:	-

Figura 5.48 Scheda 2-Caratteristiche costruttive-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Scheda 3-Caratteristiche geometriche	
Lunghezza totale (m):	17
Larghezza impalcato (m):	10.1
Larghezza carreggiata (m):	-
Tracciato:	Rettilineo
N° corsie:	2
Altezza utile (m):	-
Marciapiede dx/valle (m):	-
Marciapiede sx/monte (m):	-
N° campate:	1
Luci (m):	
campata 1	17

Figura 5.49 Scheda 3-Caratteristiche geometriche-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Scheda 4-Scheda difettologica

Tipo Elemento:				Materiale:			
SPALLA	N°1	Posizione:	Monte	Calcestruzzo			

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità superiore				Mezzeria				Estremità inferiore			
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto N°	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali												
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo												
	Cedimenti differenziali												
	Area scalzata sotto pile e spalle										x		
	Freccia verticale												
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti												
	Difetti provocati in fase di realizzazione												
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x				x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)												
	Penetrazione dei cloruri												
	Lesioni a ragnatela												
	Fessure orizzontali												
	Fessure verticali												
	Fessure diagonali												
	Fessure longitudinali												
	Fessure trasversali												
	Danni meccanici, erosione, urti				x								x
	Fioritura, essudazione												
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato												
	Macchie di umidità attiva												
Macchie di umidità passiva													
Gelo e disgelo													
Difetti del copriferro dovuti a corrosione delle barre				x								x	
Espulsione causata dalle barre corrose													
Giunti aperti tra elementi													
Riprese successive di getto deteriorate													
Corrosione delle staffe				x								x	
Corrosione delle armature principali				x								x	
Carenza del trefolo													
Corrosione di cavi di precompressione													

Figura 5.50 Scheda 4-Scheda difettologica: Spalla 1-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:				Materiale:			
SPALLA	N°2	Posizione:	Valle	Calcestruzzo			

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità superiore				Mezzeria				Estremità inferiore			
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali												
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo												
	Cedimenti differenziali												
	Area scalzata sotto pile e spalle										x		
	Freccia verticale												
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti												
	Difetti provocati in fase di realizzazione												
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x				x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)												
	Penetrazione dei cloruri												
	Lesioni a ragnatela												
	Fessure orizzontali												
	Fessure verticali												
	Fessure diagonali												
	Fessure longitudinali												
	Fessure trasversali												
	Danni meccanici, erosione, urti				x								x
	Fioritura, essudazione												
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato												
	Macchie di umidità attiva												
	Macchie di umidità passiva												
	Gelo e disgelo												
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione				x								x
Espulsione causata dalle barre corrose													
Giunti aperti tra elementi													
Riprese successive di getto deteriorate													
Corrosione delle staffe				x								x	
Corrosione delle armature principali				x								x	
Carenza del trefolo													
Corrosione di cavi di precompressione													

Figura 5.51 Scheda 4-Scheda difettologica: Spalla 2-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:
SOLETTA

Posizione: Intradosso

Materiale: Calcestruzzo armato

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Intradosso				Estradosso			
		Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali								
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo								
	Cedimenti differenziali								
	Area scalzata sotto pile e spalle								
	Freccia verticale								
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti								
	Difetti provocati in fase di realizzazione								
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				
	Fronte di carbonatazione (pH<10)								
	Penetrazione dei cloruri								
	Lesioni a ragnatela								
	Fessure orizzontali								
	Fessure verticali								
	Fessure diagonali								
	Fessure longitudinali								
	Fessure trasversali								
	Danni meccanici, erosione, urti								
	Fioritura, essudazione								
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato					x			
	Macchie di umidità attiva								
	Macchie di umidità passiva					x			
	Gelo e disgelo								
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione								
Espulsione causata dalle barre corrose					x				
Giunti aperti tra elementi									
Riprese successive di getto deteriorate									
Corrosione delle staffe									
Corrosione delle armature principali									
Carenza del trefolo									
Corrosione di cavi di precompressione									

Figura 5.52 Scheda 4-Scheda difettologica: Soletta-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:															
TRAVE	N°	1	Calcestruzzo armato precompresso												
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale			Estremità destra				Mezzeria				Estremità sinistra				
			Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto				
Foto	Difetto		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
	Movimenti laterali														
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo														
	Cedimenti differenziali														
	Area scalzata sotto pile e spalle														
	Freccia verticale														
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti														
	Difetti provocati in fase di realizzazione														
	Copriferro inferiore a quello richiesto					x				x					x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)					x				x					x
	Penetrazione dei cloruri														
	Lesioni a ragnatela														
	Fessure orizzontali														
	Fessure verticali														
	Fessure diagonali														
	Fessure longitudinali														
	Fessure trasversali														
	Danni meccanici, erosione, urti														
	Fioritura, essudazione														
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato														
	Macchie di umidità attiva														
	Macchie di umidità passiva														
	Gelo e disgelo														
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione					x				x					x
	Espulsione causata dalle barre corrose					x				x					x
	Giunti aperti tra elementi														
	Riprese successive di getto deteriorate														
	Corrosione delle staffe														
Corrosione delle armature principali															
Carenza del trefolo															
Corrosione di cavi di precompressione					x				x					x	

Figura 5.53 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 1-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:														
TRAVE	N°	2	Calcestruzzo armato precompresso											
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale			Estremità destra				Mezzeria				Estremità sinistra			
			Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali													
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo													
	Cedimenti differenziali													
	Area scalzata sotto pile e spalle													
	Freccia verticale													
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti													
	Difetti provocati in fase di realizzazione													
	Copriferro inferiore a quello richiesto					x				x				x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)					x				x				x
	Penetrazione dei cloruri													
	Lesioni a ragnatela													
	Fessure orizzontali													
	Fessure verticali													
	Fessure diagonali													
	Fessure longitudinali													
	Fessure trasversali													
	Danni meccanici, erosione, urti													
	Fioritura, essudazione													
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato													
	Macchie di umidità attiva													
	Macchie di umidità passiva													
Gelo e disgelo														
Difetti del copriferro dovuti a corrosione					x				x				x	
Espulsione causata dalle barre corrose					x				x				x	
Giunti aperti tra elementi														
Riprese successive di getto deteriorate														
Corrosione delle staffe														
Corrosione delle armature principali														
Carenza del trefolo														
Corrosione di cavi di precompressione					x				x				x	

Figura 5.54 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 2-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:				
TRAVE	N°	3	Materiale	Calcestruzzo armato precompresso

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità destra				Mezzeria				Estremità sinistra			
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali												
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo												
	Cedimenti differenziali												
	Area scalzata sotto pile e spalle												
	Freccia verticale												
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti												
	Difetti provocati in fase di realizzazione												
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x				x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)				x				x				x
	Penetrazione dei cloruri												
	Lesioni a ragnatela												
	Fessure orizzontali												
	Fessure verticali												
	Fessure diagonali												
	Fessure longitudinali												
	Fessure trasversali												
	Danni meccanici, erosione, urti												
	Fioritura, essudazione												
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato												
	Macchie di umidità attiva												
	Macchie di umidità passiva												
Gelo e disgelo													
Difetti del copriferro dovuti a corrosione				x				x				x	
Espulsione causata dalle barre corrose				x				x				x	
Giunti aperti tra elementi													
Riprese successive di getto deteriorate													
Corrosione delle staffe													
Corrosione delle armature principali													
Carenza del trefolo													
Corrosione di cavi di precompressione				x				x				x	

Figura 5.55 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 3-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:

TRAVE	N°	4
--------------	-----------	----------

Materiale	Calcestruzzo armato precompresso
-----------	----------------------------------

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità				Mezzeria				Estremità				
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto				
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
	Movimenti laterali													
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo													
	Cedimenti differenziali													
	Area scalzata sotto pile e spalle													
	Freccia verticale													
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti													
	Difetti provocati in fase di realizzazione													
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x					x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)				x				x					x
	Penetrazione dei cloruri													
	Lesioni a ragnatela													
	Fessure orizzontali													
	Fessure verticali													
	Fessure diagonali													
	Fessure longitudinali													
	Fessure trasversali													
	Danni meccanici, erosione, urti													
	Fioritura, essudazione													
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato													
	Macchie di umidità attiva													
	Macchie di umidità passiva													
	Gelo e disgelo													
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione				x				x					x
	Espulsione causata dalle barre corrose				x				x					x
	Giunti aperti tra elementi													
	Riprese successive di getto deteriorate													
	Corrosione delle staffe													
Corrosione delle armature principali														
Carenza del trefolo														
Corrosione di cavi di precompressione				x				x					x	

Figura 5.56 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 4-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:				
TRAVE	N°	5	Materiale	Calcestruzzo armato precompresso

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità				Mezzeria				Estremità			
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali												
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo												
	Cedimenti differenziali												
	Area scalzata sotto pile e spalle												
	Freccia verticale												
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti												
	Difetti provocati in fase di realizzazione												
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x				x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)				x				x				x
	Penetrazione dei cloruri												
	Lesioni a ragnatela												
	Fessure orizzontali												
	Fessure verticali												
	Fessure diagonali												
	Fessure longitudinali												
	Fessure trasversali												
	Danni meccanici, erosione, urti												
	Fioritura, essudazione												
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato												
	Macchie di umidità attiva												
	Macchie di umidità passiva												
	Gelo e disgelo												
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione				x				x				x
Espulsione causata dalle barre corrose				x				x				x	
Giunti aperti tra elementi													
Riprese successive di getto deteriorate													
Corrosione delle staffe													
Corrosione delle armature principali													
Carenza del trefolo													
Corrosione di cavi di precompressione				x				x				x	

Figura 5.57 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 5-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:			Calcestruzzo armato precompresso	
TRAVE	N°	7		
			Materiale	

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità				Mezzeria				Estremità			
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali												
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo												
	Cedimenti differenziali												
	Area scalzata sotto pile e spalle												
	Freccia verticale												
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti												
	Difetti provocati in fase di realizzazione												
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x				x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)				x				x				x
	Penetrazione dei cloruri												
	Lesioni a ragnatela												
	Fessure orizzontali												
	Fessure verticali												
	Fessure diagonali												
	Fessure longitudinali												
	Fessure trasversali												
	Danni meccanici, erosione, urti												
	Fioritura, essudazione												
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato												
	Macchie di umidità attiva												
	Macchie di umidità passiva												
	Gelo e disgelo												
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione				x				x				x
Espulsione causata dalle barre corrose				x				x				x	
Giunti aperti tra elementi													
Riprese successive di getto deteriorate													
Corrosione delle staffe													
Corrosione delle armature principali													
Carenza del trefolo													
Corrosione di cavi di precompressione				x				x				x	

Figura 5.59 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 7-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:			Calcestruzzo armato precompresso	
TRAVE	N°	8		
			Materiale	

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità				Mezzeria				Estremità				
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto				
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
	Movimenti laterali													
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo													
	Cedimenti differenziali													
	Area scalzata sotto pile e spalle													
	Freccia verticale													
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti													
	Difetti provocati in fase di realizzazione													
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x					x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)				x				x					x
	Penetrazione dei cloruri													
	Lesioni a ragnatela													
	Fessure orizzontali													
	Fessure verticali													
	Fessure diagonali													
	Fessure longitudinali													
	Fessure trasversali													
	Danni meccanici, erosione, urti													
	Fioritura, essudazione													
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato													
	Macchie di umidità attiva													
	Macchie di umidità passiva													
	Gelo e disgelo													
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione					x				x				x
	Espulsione causata dalle barre corrose					x				x				x
Giunti aperti tra elementi														
Riprese successive di getto deteriorate														
Corrosione delle staffe														
Corrosione delle armature principali														
Carenza del trefolo														
Corrosione di cavi di precompressione					x				x				x	

Figura 5.60 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 8-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:						
TRAVE	N°	9				
			Calcestruzzo armato precompresso			
			Materiale			

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità				Mezzeria				Estremità				
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto				
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
	Movimenti laterali													
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo													
	Cedimenti differenziali													
	Area scalzata sotto pile e spalle													
	Freccia verticale													
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti													
	Difetti provocati in fase di realizzazione													
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x					x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)				x				x					x
	Penetrazione dei cloruri													
	Lesioni a ragnatela													
	Fessure orizzontali													
	Fessure verticali													
	Fessure diagonali													
	Fessure longitudinali													
	Fessure trasversali													
	Danni meccanici, erosione, urti													
	Fioritura, essudazione													
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato													
	Macchie di umidità attiva													
	Macchie di umidità passiva													
	Gelo e disgelo													
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione					x				x				x
	Espulsione causata dalle barre corrose					x				x				x
Giunti aperti tra elementi														
Riprese successive di getto deteriorate														
Corrosione delle staffe														
Corrosione delle armature principali														
Carenza del trefolo														
Corrosione di cavi di precompressione					x				x				x	

Figura 5.61 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 9-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:															
TRAVE	N°	10	Calcestruzzo armato precompresso												
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale			Estremità				Mezzeria				Estremità				
			Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto				
Foto	Difetto		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
	Movimenti laterali														
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo														
	Cedimenti differenziali														
	Area scalzata sotto pile e spalle														
	Freccia verticale														
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti														
	Difetti provocati in fase di realizzazione														
	Copriferro inferiore a quello richiesto					x				x					x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)					x				x					x
	Penetrazione dei cloruri														
	Lesioni a ragnatela														
	Fessure orizzontali														
	Fessure verticali														
	Fessure diagonali														
	Fessure longitudinali														
	Fessure trasversali														
	Danni meccanici, erosione, urti														
	Fioritura, essudazione														
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato														
	Macchie di umidità attiva														
	Macchie di umidità passiva														
	Gelo e disgelo														
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione					x				x					x
	Espulsione causata dalle barre corrose					x				x					x
Giunti aperti tra elementi															
Riprese successive di getto deteriorate															
Corrosione delle staffe															
Corrosione delle armature principali															
Carenza del trefolo															
Corrosione di cavi di precompressione					x				x					x	

Figura 5.62 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 10-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:

TRAVE	N°	11
--------------	-----------	-----------

Materiale	Calcestruzzo armato precompresso
-----------	----------------------------------

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità				Mezzeria				Estremità				
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto				
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
	Movimenti laterali													
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo													
	Cedimenti differenziali													
	Area scalzata sotto pile e spalle													
	Freccia verticale													
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti													
	Difetti provocati in fase di realizzazione													
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x					x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)				x				x					x
	Penetrazione dei cloruri													
	Lesioni a ragnatela													
	Fessure orizzontali													
	Fessure verticali													
	Fessure diagonali													
	Fessure longitudinali													
	Fessure trasversali													
	Danni meccanici, erosione, urti													
	Fioritura, essudazione													
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato													
	Macchie di umidità attiva													
	Macchie di umidità passiva													
	Gelo e disgelo													
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione					x				x				x
Espulsione causata dalle barre corrose					x				x				x	
Giunti aperti tra elementi														
Riprese successive di getto deteriorate														
Corrosione delle staffe														
Corrosione delle armature principali														
Carenza del trefolo														
Corrosione di cavi di precompressione					x				x				x	

Figura 5.63 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 11-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:			Calcestruzzo armato precompresso	
TRAVE	N°	12	Materiale	

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità				Mezzeria				Estremità			
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali												
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo												
	Cedimenti differenziali												
	Area scalzata sotto pile e spalle												
	Freccia verticale												
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti												
	Difetti provocati in fase di realizzazione												
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x				x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)				x				x				x
	Penetrazione dei cloruri												
	Lesioni a ragnatela												
	Fessure orizzontali												
	Fessure verticali												
	Fessure diagonali												
	Fessure longitudinali												
	Fessure trasversali												
	Danni meccanici, erosione, urti												
	Fioritura, essudazione												
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato												
	Macchie di umidità attiva												
	Macchie di umidità passiva												
	Gelo e disgelo												
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione				x				x				x
	Espulsione causata dalle barre corrose				x				x				x
	Giunti aperti tra elementi												
	Riprese successive di getto deteriorate												
	Corrosione delle staffe												
Corrosione delle armature principali													
Carenza del trefolo													
Corrosione di cavi di precompressione				x				x				x	

Figura 5.64 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 12-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:				
TRAVE	N°	13	Materiale	Calcestruzzo armato precompresso

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità				Mezzeria				Estremità				
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto				
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
	Movimenti laterali													
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo													
	Cedimenti differenziali													
	Area scalzata sotto pile e spalle													
	Freccia verticale													
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti													
	Difetti provocati in fase di realizzazione													
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x				x	
	Fronte di carbonatazione (pH<10)				x				x				x	
	Penetrazione dei cloruri													
	Lesioni a ragnatela													
	Fessure orizzontali													
	Fessure verticali													
	Fessure diagonali													
	Fessure longitudinali													
	Fessure trasversali													
	Danni meccanici, erosione, urti													
	Fioritura, essudazione													
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato													
	Macchie di umidità attiva													
	Macchie di umidità passiva													
	Gelo e disgelo													
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione					x				x				x
Espulsione causata dalle barre corrose					x				x				x	
Giunti aperti tra elementi														
Riprese successive di getto deteriorate														
Corrosione delle staffe														
Corrosione delle armature principali														
Carenza del trefolo														
Corrosione di cavi di precompressione					x				x				x	

Figura 5.65 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 13-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:															
TRAVE	N°	14	Materiale Calcestruzzo armato precompresso												
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale			Estremità				Mezzeria				Estremità				
			Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto				
Foto	Difetto		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
	Movimenti laterali														
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo														
	Cedimenti differenziali														
	Area scalzata sotto pile e spalle														
	Freccia verticale														
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti														
	Difetti provocati in fase di realizzazione														
	Copriferro inferiore a quello richiesto					x				x					x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)					x				x					x
	Penetrazione dei cloruri														
	Lesioni a ragnatela														
	Fessure orizzontali														
	Fessure verticali														
	Fessure diagonali														
	Fessure longitudinali														
	Fessure trasversali														
	Danni meccanici, erosione, urti														
	Fioritura, essudazione														
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato														
	Macchie di umidità attiva														
	Macchie di umidità passiva														
	Gelo e disgelo														
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione					x				x					x
Espulsione causata dalle barre corrose					x				x					x	
Giunti aperti tra elementi															
Riprese successive di getto deteriorate															
Corrosione delle staffe															
Corrosione delle armature principali															
Carenza del trefolo															
Corrosione di cavi di precompressione					x				x					x	

Figura 5.66 Scheda 4-Scheda difettologica: Trave 14-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:

TRAVERSO	N°	1
-----------------	-----------	----------

Materiale	Calcestruzzo armato
-----------	---------------------

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità				Mezzeria				Estremità			
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto			
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Movimenti laterali												
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo												
	Cedimenti differenziali												
	Area scalzata sotto pile e spalle												
	Freccia verticale												
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti												
	Difetti provocati in fase di realizzazione												
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x				x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)												
	Penetrazione dei cloruri												
	Lesioni a ragnatela												
	Fessure orizzontali												
	Fessure verticali												
	Fessure diagonali												
	Fessure longitudinali												
	Fessure trasversali												
	Danni meccanici, erosione, urti												
	Fioritura, essudazione												
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato												
	Macchie di umidità attiva												
	Macchie di umidità passiva												
	Gelo e disgelo												
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione				x				x				x
	Espulsione causata dalle barre corrose				x				x				x
	Giunti aperti tra elementi												
	Riprese successive di getto deteriorate												
Corrosione delle staffe				x				x				x	
Corrosione delle armature principali													
Carenza del trefolo													
Corrosione di cavi di precompressione													

Figura 5.67 Scheda 4-Scheda difettologica: Traverso 1-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:

TRAVERSO	N°	2
-----------------	-----------	----------

Materiale	Calcestruzzo armato
-----------	---------------------

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità				Mezzeria				Estremità				
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto				
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
	Movimenti laterali													
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo													
	Cedimenti differenziali													
	Area scalzata sotto pile e spalle													
	Freccia verticale													
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti													
	Difetti provocati in fase di realizzazione													
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x					x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)													
	Penetrazione dei cloruri													
	Lesioni a ragnatela													
	Fessure orizzontali													
	Fessure verticali													
	Fessure diagonali													
	Fessure longitudinali													
	Fessure trasversali													
	Danni meccanici, erosione, urti													
	Fioritura, essudazione													
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato													
	Macchie di umidità attiva													
	Macchie di umidità passiva													
	Gelo e disgelo													
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione				x				x					x
Espulsione causata dalle barre corrose				x				x					x	
Giunti aperti tra elementi														
Riprese successive di getto deteriorate														
Corrosione delle staffe				x				x					x	
Corrosione delle armature principali														
Carenza del trefolo														
Corrosione di cavi di precompressione														

Figura 5.68 Scheda 4-Scheda difettologica: Traverso 2-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:

TRAVERSO	N°	3
-----------------	-----------	----------

Materiale	Calcestruzzo armato
-----------	---------------------

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità				Mezzeria				Estremità				
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto				
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
	Movimenti laterali													
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo													
	Cedimenti differenziali													
	Area scalzata sotto pile e spalle													
	Freccia verticale													
	Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti													
	Difetti provocati in fase di realizzazione													
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x					x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)													
	Penetrazione dei cloruri													
	Lesioni a ragnatela													
	Fessure orizzontali													
	Fessure verticali													
	Fessure diagonali													
	Fessure longitudinali													
	Fessure trasversali													
	Danni meccanici, erosione, urti													
	Fioritura, essudazione													
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato													
	Macchie di umidità attiva													
	Macchie di umidità passiva													
	Gelo e disgelo													
	Difetti del copriferro dovuti a corrosione					x				x				x
Espulsione causata dalle barre corrose					x				x				x	
Giunti aperti tra elementi														
Riprese successive di getto deteriorate														
Corrosione delle staffe					x				x				x	
Corrosione delle armature principali														
Carenza del trefolo														
Corrosione di cavi di precompressione														

Figura 5.69 Scheda 4-Scheda difettologica: Traverso 3-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:

TRAVERSO	N°	4
-----------------	-----------	----------

Materiale	Calcestruzzo armato
-----------	---------------------

Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale		Estremità				Mezzeria				Estremità				
		Grado di difetto				Grado di difetto				Grado di difetto				
Foto	Difetto	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
	Movimenti laterali													
	Inclinazione, rotazione, fuori piombo													
	Cedimenti differenziali													
	Area scalzata sotto pile e spalle													
	Freccia verticale													
	Scropolatura, stratificazione, vespai, vuoti													
	Difetti provocati in fase di realizzazione													
	Copriferro inferiore a quello richiesto				x				x					x
	Fronte di carbonatazione (pH<10)													
	Penetrazione dei cloruri													
	Lesioni a ragnatela													
	Fessure orizzontali													
	Fessure verticali													
	Fessure diagonali													
	Fessure longitudinali													
	Fessure trasversali													
	Danni meccanici, erosione, urti													
	Fioritura, essudazione													
	Calcestruzzo dilavato/ammalorato													
	Macchie di umidità attiva													
	Macchie di umidità passiva													
Gelo e disgelo														
Difetti del copriferro dovuti a corrosione				x				x					x	
Espulsione causata dalle barre corrose				x				x					x	
Giunti aperti tra elementi														
Riprese successive di getto deteriorate														
Corrosione delle staffe				x				x					x	
Corrosione delle armature principali														
Carenza del trefolo														
Corrosione di cavi di precompressione														

Figura 5.70 Scheda 4-Scheda difettologica: Traverso 4-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Tipo Elemento:																		
TRAVERSO		N°		5		Materiale		Calcestruzzo armato										
Localizzazione del rilievo nell'elemento strutturale						Estremità		Mezzeria		Estremità								
						Grado di difetto		Grado di difetto		Grado di difetto								
Foto		Difetto				I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
		Movimenti laterali																
		Inclinazione, rotazione, fuori piombo																
		Cedimenti differenziali																
		Area scalzata sotto pile e spalle																
		Freccia verticale																
		Screpolatura, stratificazione, vespai, vuoti																
		Difetti provocati in fase di realizzazione																
		Copriferro inferiore a quello richiesto							x			x						x
		Fronte di carbonatazione (pH<10)																
		Penetrazione dei cloruri																
		Lesioni a ragnatela																
		Fessure orizzontali																
		Fessure verticali																
		Fessure diagonali																
		Fessure longitudinali																
		Fessure trasversali																
		Danni meccanici, erosione, urti																
		Fioritura, essudazione																
		Calcestruzzo dilavato/ammalorato																
		Macchie di umidità attiva																
		Macchie di umidità passiva																
		Gelo e disgelo																
		Difetti del copriferro dovuti a corrosione							x			x						x
		Espulsione causata dalle barre corrose							x			x						x
Giunti aperti tra elementi																		
Riprese successive di getto deteriorate																		
Corrosione delle staffe							x			x						x		
Corrosione delle armature principali																		
Carenza del trefolo																		
Corrosione di cavi di precompressione																		

Figura 5.71 Scheda 4-Scheda difettologica: Traverso 5-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Scheda 5-Scheda di indagine strumentale			
Tipo Elemento:			
TRAVE	N°	2	
Classe di riferimento:		C32/40	
Risultati prove			
Tipologia di prova:	Risultato di prova:		Rc [N/mm ²]
Indice sclerometrico medio:	42		42
Velocità di propagazione ultrasonica:	-		-
Pull out:	31		38.4
R cub Test= (Rc indice sclerometrico+ Rc pull out)/2	Rcub rif	Rcub test/Rcubrif	Fattore T
40.2	40	1.01	1

Figura 5.72 Scheda 5-Scheda di indagine strumentale: Trave 2-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Scheda 5-Scheda di indagine strumentale			
Tipo Elemento:			
TRAVE	N°	7	
Classe di riferimento:		C32/40	
Risultati prove			
Tipologia di prova:	Risultato di prova:		Rc [N/mm ²]
Indice sclerometrico medio:	47		51
Velocità di propagazione ultrasonica:	-		-
Pull out:	55		70.4
R cub Test= (Rc indice sclerometrico+ Rc pull out)/2	Rcub rif	Rcub test/Rcubrif	Fattore T
60.7	40	1.52	1

Figura 5.73 Scheda 5-Scheda di indagine strumentale: Trave 7-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Scheda 5-Scheda di indagine strumentale

Tipo Elemento:		
TRAVE	N°	10
Classe di riferimento:	C32/40	
Risultati prove		
Tipologia di prova:	Risultato di prova:	Rc [N/mm ²]
Indice sclerometrico medio:	42	42
Velocità di propagazione ultrasonica:	-	-
Pull out:	31	38.4

R cub Test= (Rc indice sclerometrico+ Rc pull out)/2	Rcub rif	Rcub test/Rcubrif	Fattore T
40.2	40	1.01	1

Figura 74 Scheda 5-Scheda di indagine strumentale: Trave 10-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Scheda 5-Scheda di indagine strumentale

Tipo Elemento:		
TRAVE	N°	14
Classe di riferimento:	C32/40	
Risultati prove		
Tipologia di prova:	Risultato di prova:	Rc [N/mm ²]
Indice sclerometrico medio:	50	58
Velocità di propagazione ultrasonica:	-	-
Pull out:	49	62.4

R cub Test= (Rc indice sclerometrico+ Rc pull out)/2	Rcub rif	Rcub test/Rcubrif	Fattore T
60.2	40	1.51	1

Figura 5.75 Scheda 5-Scheda di indagine strumentale: Trave 14-Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Sulla base delle schede di valutazione compilate in loco è stato possibile procedere al calcolo della Funzione di valutazione di ogni elemento costituente la struttura (Fe) e il corrispondente Condition Rating dell'intera struttura (Fs). Di seguito si riportano le schede di calcolo (Figura 5.76, Figura 5.77, Figura 5.78, Figura 5.79, Figura 5.80, Figura 5.81, Figura 5.82, Figura 5.83, Figura 5.84, Figura 5.85, Figura 5.86, Figura 5.87, Figura 5.88, Figura 5.89, Figura 5.90, Figura 5.91, Figura 5.92, Figura 5.93, Figura 5.94, Figura 5.95, Figura 5.96, Figura 5.97).

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Spalla 1	0.4	1.14	I	4	0.5	0.5	1	1	1	59	23.6	1.11	2	8	156	62.4	37.82	VI
		2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			1.12	2	8				
		2.12	IV	1	2.0	1.5	2	1	6			1.13	3	12				
		2.18	IV	2	2.0	1.5	2	1	12			1.14	4	16				
		3.1	IV	1	2.0	1.5	2	1	6			2.3	2	8				
		3.2	IV	3	2.0	1.5	2	1	18			2.7	3	12				
												2.8	3	12				
												2.9	4	16				
												2.10	3	12				
												2.11	4	16				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.18	2	8				
								3.1	1	4								
								3.2	3	12								

Figura 5.76 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Spalla 1- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Spalla 2	0.4	1.14	I	4	0.5	0.5	1	1	1	59	23.6	1.11	2	8	156	62.4	37.82	VI
		2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			1.12	2	8				
		2.12	IV	1	2.0	1.5	2	1	6			1.13	3	12				
		2.18	IV	2	2.0	1.5	2	1	12			1.14	4	16				
		3.1	IV	1	2.0	1.5	2	1	6			2.3	2	8				
		3.2	IV	3	2.0	1.5	2	1	18			2.7	3	12				
												2.8	3	12				
												2.9	4	16				
												2.10	3	12				
												2.11	4	16				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.18	2	8				
								3.1	1	4								
								3.2	3	12								

Figura 5.77 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Spalla 2- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Soletta	0.4	2.3	IV	2	2.0	1.0	2	1	8	32	12.8	1.21	2	8	180	72	17.78	IV
		2.14	IV	2	2.0	1.0	2	1	8			2.1	1	4				
		2.15	IV	1	2.0	1.0	2	1	4			2.2	1	4				
		2.19	IV	3	2.0	1.0	2	1	12			2.3	2	8				
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.6	1	4				
												2.7	3	12				
												2.8	3	12				
												2.9	4	16				
												2.10	3	12				
												2.11	4	16				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.14	2	8				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
								2.19	3	12								
								2.21	1	4								
								3.1	1	4								
								3.2	3	12								

Figura 5.78 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Soletta- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{ref} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{Dref} = K ₁ x M _{ref}
Trave 1	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	104	62.4	1.21	1	4	92	55.2	113	VI
		2.4	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.5	3	12				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.12	1	4				
		3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32			2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.3	2	8								
								3.4	4	16								

Figura 5.79 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 1- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{ref} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{Dref} = K ₁ x M _{ref}
Trave 2	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	104	62.4	1.21	1	4	92	55.2	113	VI
		2.4	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.5	3	12				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.12	1	4				
		3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32			2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.3	2	8								
								3.4	4	16								

Figura 5.80 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 2- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{ref} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{Dref} = K ₁ x M _{ref}
Trave 3	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	104	62.4	1.21	1	4	92	55.2	113	VI
		2.4	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.5	3	12				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.12	1	4				
		3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32			2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.3	2	8								
								3.4	4	16								

Figura 5.81 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 3- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{ref} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{Dref} = K ₁ x M _{ref}
Trave 4	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	104	62.4	1.21	1	4	92	55.2	113	VI
		2.4	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.5	3	12				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.12	1	4				
		3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32			2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.3	2	8								
								3.4	4	16								

Figura 5.82 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 4- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 5	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	104	62.4	1.21	1	4	92	55.2	113	VI
		2.4	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.5	3	12				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.12	1	4				
		3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32			2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.3	2	8								
								3.4	4	16								

Figura 5.83 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 5- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 6	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	104	62.4	1.21	1	4	92	55.2	113	VI
		2.4	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.5	3	12				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.12	1	4				
		3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32			2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.3	2	8								
								3.4	4	16								

Figura 5.84 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 6- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 7	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	104	62.4	1.21	1	4	92	55.2	113	VI
		2.4	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.5	3	12				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.12	1	4				
		3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32			2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.3	2	8								
								3.4	4	16								

Figura 5.85 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 7- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 8	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	104	62.4	1.21	1	4	92	55.2	113	VI
		2.4	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.5	3	12				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.12	1	4				
		3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32			2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.3	2	8								
								3.4	4	16								

Figura 5.86 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 8- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 9	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	104	62.4	1.21	1	4	92	55.2	113	VI
		2.4	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.5	3	12				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.12	1	4				
		3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32			2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.3	2	8								
								3.4	4	16								

Figura 5.87 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 9- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 10	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	104	62.4	1.21	1	4	92	55.2	113	VI
		2.4	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.5	3	12				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.12	1	4				
		3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32			2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.3	2	8								
								3.4	4	16								

Figura 5.88 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 10- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 11	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	104	62.4	1.21	1	4	92	55.2	113	VI
		2.4	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.5	3	12				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.12	1	4				
		3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32			2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.3	2	8								
								3.4	4	16								

Figura 5.89 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 11- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref			B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 12	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	104	62.4	1.21	1	4	92	55.2	113	VI
		2.4	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.5	3	12				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.12	1	4				
		3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32			2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.3	2	8								
								3.4	4	16								

Figura 5.90 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 12- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 13	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	104	62.4	1.21	1	4	92	55.2	113	VI
		2.4	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.5	3	12				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.12	1	4				
		3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32			2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.3	2	8								
								3.4	4	16								

Figura 5.91 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 13- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 14	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	104	62.4	1.21	1	4	92	55.2	113	VI
		2.4	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.5	3	12				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.12	1	4				
		3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32			2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.3	2	8								
								3.4	4	16								

Figura 5.92 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 14- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Traverso 1	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	64	38.4	1.21	1	4	84	50.4	76.19	VI
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.5	3	12				
		3.1	IV	1	2.0	2.0	2	1	8			2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.1	1	4								
								3.2	3	12								

Figura 5.93 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Traverso 1- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Traverso 2	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	64	38.4	1.21	1	4	84	50.4	76.19	VI
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.5	3	12				
		3.1	IV	1	2.0	2.0	2	1	8			2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
								2.21	1	4								
								3.1	1	4								
								3.2	3	12								

Figura 5.94 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Traverso 2- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{ref} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{Dref} = K ₁ x M _{ref}
Traverso 3	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	64	38.4	1.21	1	4	84	50.4	76.19	VI
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.5	3	12				
		3.1	IV	1	2.0	2.0	2	1	8			2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.1	1	4				
												3.2	3	12				

Figura 5.95 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Traverso 3- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{ref} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{Dref} = K ₁ x M _{ref}
Traverso 4	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	64	38.4	1.21	1	4	84	50.4	76.19	VI
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.5	3	12				
		3.1	IV	1	2.0	2.0	2	1	8			2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.1	1	4				
												3.2	3	12				

Figura 5.96 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Traverso 4- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B ₁	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{ref} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{Dref} = K ₁ x M _{ref}
Traverso 5	0.6	2.3	IV	2	2.0	2.0	2	1	16	64	38.4	1.21	1	4	84	50.4	76.19	VI
		2.18	IV	2	2.0	2.0	2	1	16			2.4	2	8				
		2.19	IV	3	2.0	2.0	2	1	24			2.5	3	12				
		3.1	IV	1	2.0	2.0	2	1	8			2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.1	1	4				
												3.2	3	12				

Figura 5.97 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Traverso 5- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari.

L'attività ispettiva svolta sul Ponte Prima Categoria SS195 (Cagliari) ha permesso di concretizzare la valutazione relativa allo stato di conservazione del manufatto in un unico giudizio numerico espresso dal Condition rating mark (Fs):

$$F_s = \left(\frac{\sum_{m=1}^k F_{D,m}}{\sum_{m=1}^k F_{D,ref,m}} \right) \cdot 100 = 92$$

Come mostrato nella Tabella 7 “Classi di deterioramento, Relazione tra Fs e ispezione successiva” del Capitolo 8 “Metodologia di indagine proposta”, strutture aventi valori di Fs > 30 rientrano nella Classe di deterioramento VI la quale contiene strutture con deterioramento critico, le quali necessitano di un intervento di ripristino immediato, con priorità su tutte le altre Classi.

F _s	Classe della struttura
92	VI

In seguito alle indagini eseguite, si ritiene che l'opera in questione necessiti delle seguenti attività di ripristino:

- Trattamento dei ferri e ripresa dei copriferri in distacco delle solette e delle travi;
- Rasature consolidanti e protettive del calcestruzzo delle solette, delle travi e delle traverse;
- Consolidamento e protezione delle spalle.

5.4. Ponte sito sulla SS.195, Cagliari: Simulazione di ripristino

Al fine di dimostrare la validità del metodo si ritiene utile fare una simulazione di ripristino, intervenendo su un solo difetto. Questo esempio serve per valutare se con poche risorse si potrebbe ripristinare una funzionalità media e procrastinare gli altri interventi.

Si mostra di seguito la valutazione relativa allo stato di conservazione del Ponte sito sulla SS.195, ipotizzando che sia stata condotta l'attività di ripristino dei copriferri. Di seguito si riportano le schede di calcolo:

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B × K ₂ × K ₃ × L × T	M = ∑ B × K ₂ × K ₃ × L × T	F _D = K ₁ × M	Cod. Difetto ref			B ₁	B × K ₂ × K ₃ × L × T	M _{Rif} = ∑ B × K ₂ × K ₃ × L × T	F _{D,Rif} = K ₁ × M _{Rif}
Spalla 1	0.4	1.14	I	4	0.5	0.5	1	1	1	43	17.2	1.11	2	8	156	62.4	27.56	V
		2.12	IV	1	2.0	1.5	2	1	6			1.12	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	1.5	2	1	12			1.13	3	12				
		3.1	IV	1	2.0	1.5	2	1	6			1.14	4	16				
		3.2	IV	3	2.0	1.5	2	1	18			2.3	2	8				
												2.7	3	12				
												2.8	3	12				
												2.9	4	16				
												2.10	3	12				
												2.11	4	16				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.18	2	8				
								3.1	1	4								
								3.2	3	12								

Figura 5.98 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Spalla 1- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B × K ₂ × K ₃ × L × T	M = ∑ B × K ₂ × K ₃ × L × T	F _D = K ₁ × M	Cod. Difetto ref			B ₁	B × K ₂ × K ₃ × L × T	M _{Rif} = ∑ B × K ₂ × K ₃ × L × T	F _{D,Rif} = K ₁ × M _{Rif}
Spalla 2	0.4	1.14	I	4	0.5	0.5	1	1	1	43	17.2	1.11	2	8	156	62.4	27.56	V
		2.12	IV	1	2.0	1.5	2	1	6			1.12	2	8				
		2.18	IV	2	2.0	1.5	2	1	12			1.13	3	12				
		3.1	IV	1	2.0	1.5	2	1	6			1.14	4	16				
		3.2	IV	3	2.0	1.5	2	1	18			2.3	2	8				
												2.7	3	12				
												2.8	3	12				
												2.9	4	16				
												2.10	3	12				
												2.11	4	16				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.18	2	8				
								3.1	1	4								
								3.2	3	12								

Figura 5.99 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Spalla 2- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi							Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento				
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B × K ₂ × K ₃ × L × T	M = ∑ B × K ₂ × K ₃ × L × T	F _D = K ₁ × M	Cod. Difetto ref			B ₁	B × K ₂ × K ₃ × L × T	M _{Rif} = ∑ B × K ₂ × K ₃ × L × T	F _{D,Rif} = K ₁ × M _{Rif}
Trave 1	0.6	3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32	32	19.2	1.21	1	4	92	55.2	34.78	V
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.3	2	8				
												3.4	4	16				

Figura 5.100 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 1- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 2	0.6	3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32	32	19.2	1.21	1	4	92	55.2	34.78	V
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.3	2	8				
												3.4	4	16				

Figura 5.101 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 2- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 3	0.6	3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32	32	19.2	1.21	1	4	92	55.2	34.78	V
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.3	2	8				
												3.4	4	16				

Figura 5.102 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 3- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 4	0.6	3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32	32	19.2	1.21	1	4	92	55.2	34.78	V
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.3	2	8				
												3.4	4	16				

Figura 5.103 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 4- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 5	0.6	3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32	32	19.2	1.21	1	4	92	55.2	34.78	V
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.3	2	8				
												3.4	4	16				

Figura 5.104 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 5- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 6	0.6	3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32	32	19.2	1.21	1	4	92	55.2	34.78	V
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.3	2	8				
												3.4	4	16				

Figura 5.105 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 6- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 7	0.6	3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32	32	19.2	1.21	1	4	92	55.2	34.78	V
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.3	2	8				
												3.4	4	16				

Figura 5.106 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 7- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 8	0.6	3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32	32	19.2	1.21	1	4	92	55.2	34.78	V
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.3	2	8				
												3.4	4	16				

Figura 5.107 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 8- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 9	0.6	3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32	32	19.2	1.21	1	4	92	55.2	34.78	V
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.3	2	8				
												3.4	4	16				

Figura 5.108 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 9- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 10	0.6	3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32	32	19.2	1.21	1	4	92	55.2	34.78	V
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.3	2	8				
												3.4	4	16				

Figura 5.109 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 10- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 11	0.6	3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32	32	19.2	1.21	1	4	92	55.2	34.78	V
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.3	2	8				
												3.4	4	16				

Figura 5.110 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 11- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 12	0.6	3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32	32	19.2	1.21	1	4	92	55.2	34.78	V
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.3	2	8				
												3.4	4	16				

Figura 5.111 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 12- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 13	0.6	3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32	32	19.2	1.21	1	4	92	55.2	34.78	V
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.3	2	8				
												3.4	4	16				

Figura 5.112 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 13- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Trave 14	0.6	3.4	IV	4	2.0	2.0	2	1	32	32	19.2	1.21	1	4	92	55.2	34.78	V
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.3	2	8				
												3.4	4	16				

Figura 5.113 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Trave 14- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Traverso 1	0.6	3.1	IV	1	2.0	2.0	2	1	8	8	4.8	1.21	1	4	84	50.4	9.524	II
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.1	1	4				
												3.2	3	12				

Figura 5.114 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Traverso 1- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

Elemento	K ₁	Valori effettivi										Valori Rif				F _e	Classe di deterioramento del singolo elemento	
		Cod. Difetto	Grado di Difetto	B ₁	K ₂	K ₃	L	T	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M=Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T	F _D = K ₁ x M	Cod. Difetto ref	B _i	B x K ₂ x K ₃ x L x T	M _{Rif} =Σ B x K ₂ x K ₃ x L x T			F _{D,Rif} = K ₁ x M _{Rif}
Traverso 2	0.6	3.1	IV	1	2.0	2.0	2	1	8	8	4.8	1.21	1	4	84	50.4	9.524	II
												2.4	2	8				
												2.5	3	12				
												2.12	1	4				
												2.13	1	4				
												2.15	1	4				
												2.16	1	4				
												2.18	2	8				
												2.19	2	8				
												2.20	2	8				
												2.21	1	4				
												3.1	1	4				
												3.2	3	12				

Figura 5.115 Calcolo della Funzione di valutazione Fe per la Traverso 2- Ponte Prima Categoria SS195, Cagliari: Simulazione di ripristino.

copriferri. L'appartenenza ad una Classe di deterioramento V rispecchia il fatto che la struttura verte comunque in condizioni di pericolo, visto che vi è ancora la presenza delle armature corrose. Ciò dimostra che il metodo di valutazione descrive adeguatamente la condizione in cui verte la struttura.

Bibliografia

- (1) UNI EN 12504-2:2012. *Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 2: Prove non distruttive-Determinazione dell'indice sclerometrico.*
- (2) UNI EN 12504-4:2005. *Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.*
- (3) UNI EN 12504-3:2005. *Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 3: Determinazione della forza di estrazione.*
- (4) Circolare 19/07/1967 n.6736/61 A1. Ministero lavori pubblici. *Controllo delle condizioni di stabilità delle opere d'arte stradali.*
- (5) B. De Nicolo, D. Meloni, A. Cabboi (2014) *Analysis and retrofitting design of a single-span r.c. bridge.*
- (6) UNI EN 14630:2007. *Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo.*
- (7) UNI 9944:1992. *Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 3: Determinazione della forza di estrazione.*

Conclusioni

La valutazione delle strutture esistenti viene definita come quell'insieme di attività svolte al fine di stabilire la reale condizione di una struttura esistente e verificare l'affidabilità per il suo uso futuro.

Negli ultimi decenni molti studiosi e diverse società di gestione di reti stradali hanno rivolto il loro interesse alla definizione di Sistemi di Bridge Management System (BMS).

Per BMS si intende l'insieme delle attività di ispezione, indagine, manutenzione, riparazione di un gruppo di opere, organizzate secondo criteri di priorità, con il supporto di banche dati informatiche e di algoritmi ordinatori.

L'attività di ispezione è un'azione che si inquadra nel tempo e non può limitarsi a constatazioni occasionali. Ogni ispezione deve fornire le maggiori informazioni possibili sullo stato del ponte a quel determinato istante di vita. La serie storica di queste informazioni consente di seguire l'evoluzione dello stato dell'opera (perdita di prestazioni). Effettuare ispezioni con una adeguata cadenza, permette di conoscere lo stato dell'opera al momento (T_i) nel quale viene effettuata la valutazione e di tenere sotto controllo l'evolversi del suo stato di ammaloramento grazie al confronto, che può essere fatto tra le indagini relative a tempi diversi ($T_i, T_{i+1}, T_{i+2} \dots$).

L'obiettivo del mio lavoro di ricerca è stato quello di sviluppare un processo di valutazione razionale e sistematico per guidare il professionista nell'esprimere un giudizio in merito al livello di sicurezza di una certa struttura esistente. Nello specifico è stata proposta una modalità di indagine low-cost ed immediata per ponti in cemento armato, che consente di ottenere rapidamente un resoconto attendibile sulla condizione statica della struttura in esame.

Si è data particolare attenzione alle strutture in cemento armato, il materiale più diffuso nel campo delle costruzioni civili.

Il procedimento proposto è costituito da una prima parte legata all'osservazione visiva dell'opera ed una seconda che consiste nell'analisi dei dati ottenuti per mezzo di test strumentali effettuati sul materiale da ispezionare. I risultati che scaturiscono da questi due approcci vengono poi elaborati per ottenere un unico giudizio finale, relativo alla struttura, indicato per mezzo del Condition rating Mark. I parametri che entrano in gioco per il calcolo del giudizio di stabilità della struttura, nel metodo proposto, sono i dati rilevabili durante le ispezioni visive, ragionamenti tecnici effettuati da personale esperto in merito allo schema statico della struttura da cui scaturisce la rilevanza che può avere la localizzazione del difetto all'interno dell'elemento su cui compare, e i risultati delle prove strumentali effettuate sul materiale costituente l'opera. Partendo dal presupposto che per svolgere una buona diagnosi strutturale, bisogna trovare il giusto compromesso tra significatività e invasività delle indagini, è stato privilegiato come criterio principale di indagine, quello basato su prove di tipo non distruttivo, cioè quel complesso di esami e rilievi che non modificano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura.

In dettaglio, l'aspetto innovativo della proposta presentata rispetto alle metodologie esistenti, è rappresentato dall'introduzione di due fattori tramite i quali è possibile valutare la localizzazione del danno (L_i), e utilizzare la caratterizzazione meccanica del materiale come parametro di giudizio (T_i).

Il giudizio relativo all'intera struttura, rappresentato dal Condition rating mark (F_s), si ottiene sommando le valutazioni di ogni singolo elemento (F_e) costituente il ponte e rapportando questo valore alla somma dei difetti che potenzialmente possono verificarsi nella struttura osservata.

Al termine dell'ispezione così condotta si dispone di un valore numerico (F_s), al quale corrisponde una Classe di deterioramento che permette di gerarchizzare l'urgenza di intervento con operazioni di ripristino sia all'interno della struttura che tra strutture distinte. Inoltre ad ogni classe di deterioramento corrisponde una indicazione in merito alla tempistica della ispezione successiva o degli eventuali interventi di ripristino.

A corredo del metodo di calcolo ho proposto delle Schede di Valutazione, che dovranno comunque essere adattate alla singola opera oggetto di valutazione, da compilare durante le ispezioni per annotare schematicamente le varie osservazioni eseguite. In questo modo si può rendere chiaro come,

partendo da ciò che è stato rilevato durante l'ispezione, per ogni elemento strutturale e materiale costituente, è stato possibile emettere il giudizio finale. La realizzazione di una scheda ispettiva serve per mantenere traccia dell'ispezione effettuata e del relativo esito.

Nell'ultimo capitolo si mostra l'applicazione del metodo di valutazione proposto, a tre distinte strutture reali. Le prime due sono situate in località Pixina Manna (Pula) e la terza struttura si trova invece in provincia di Cagliari, lungo la Strada Statale 195.

Gli esempi applicativi riportati dimostrano come il metodo costituisce un importante ausilio alla valutazione della struttura, fornendo un percorso guidato per il tecnico che deve svolgere l'indagine ed indirizzando ad una omogeneità di giudizio. Esso obbliga infatti ad effettuare una valutazione sui singoli elementi costruttivi, inducendo in questo modo l'attenzione dell'ispettore a particolari ragionamenti e quindi consente la maturazione di un giudizio complessivo sulla vulnerabilità della struttura più conscio.

Con questo procedimento si intende stabilire un linguaggio comune nella descrizione del danno e della vulnerabilità, fornire indicazioni per ottenere dagli elementi rilevati una valutazione di efficienza e consentire una migliore informatizzazione dei dati di ispezione. Questo approccio può fornire quindi informazioni essenziali per ottimizzare le fasi di manutenzione, i cui interventi possono essere commisurati alla condizione statica della struttura ispezionata, all'eventuale evolversi del suo ammaloramento, ed anche allo stato in cui vertono le altre strutture della stessa rete.