



Ponti, viadotti e cavalcavia
Specifiche per redazione di interventi di
manutenzione evolutiva

Specifica Tecnica: Ponti, viadotti e cavalcavia. Specifiche per redazione di interventi di manutenzione evolutiva.

Gruppo di Lavoro

Ing. Paolo Anfoso – Autostrade per l'Italia - Business Unit Operations and Maintenance – Coordinatore Gruppo di Lavoro

Prof. Ing. Alessio Lupoi – Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica – Università La Sapienza – Responsabile Scientifico

Ing. Francesca Buttarazzi – Autostrade per l'Italia - Business Unit Ingegneria e Realizzazione

<i>Revisione n.</i>	<i>Motivo della revisione</i>	<i>Data</i>
00	Prima emissione	30/11/2022
01	Integrazione nuovi tipologici	28/02/2023
02	Revisione esito parere preliminare asseverazione	26/06/2023

Sommario

Sommario	3
Premessa: finalità e ambito di applicazione	5
1 La rete di Autostrade per l'Italia: lo stato dell'arte	6
1.1 Ubicazione.....	6
1.2 Epoca di realizzazione.....	7
1.3 Materiali e tipologie strutturali prevalenti.....	8
1.4 Schemi statici.....	9
2 Gli interventi sulle opere esistenti: cause e tipologie ricorrenti	11
3 I nuovi obiettivi degli interventi manutentivi a carattere evolutivo nell'attuale contesto normativo	15
4 Strategia d'intervento	18
5 Criteri di progettazione degli interventi	20
5.1 Materiali ad alte prestazioni.....	21
5.2 Durabilità.....	29
5.2.1 Durabilità dei singoli interventi	29
5.2.2 Durabilità dell'opera nel suo complesso	30
5.3 Manutenibilità.....	35
5.4 Estensione intervento.....	35
5.5 Sostenibilità ambientale.....	36
5.6 Combinazione degli interventi.....	37
5.7 Incremento della sicurezza.....	37
5.8 Indagini preventive.....	37
5.9 Piano di Manutenzione e monitoraggio predittivo.....	38
6 Tipologici degli interventi	40
7 Bibliografia	41
Allegati	43
A1. Focus meccanismi di degrado del calcestruzzo	43
A2. Tipologici degli interventi di manutenzione evolutiva	49

Premessa: finalità e ambito di applicazione

La presente Specifica Tecnica ridefinisce gli obiettivi, la strategia ed i criteri di progettazione e realizzazione degli interventi manutentivi delle opere d'arte della rete di Autostrade per l'Italia.

Tale documento costituirà riferimento tecnico anche per la realizzazione dell'ingente piano di investimenti per l'ammodernamento di ponti e viadotti previsto da ASPI per il prossimo quadriennio e per gli anni a venire, in considerazione della volontà di definire il carattere evolutivo di tali interventi sia a livello di progettazione che di realizzazione.

Il documento è organizzato nei seguenti Capitoli:

- Il capitolo 1 illustra la consistenza delle opere presenti sulla rete in gestione ad ASPI;
- Il capitolo 2 fornisce un quadro sulle cause e le tipologie ricorrenti degli interventi manutentivi storicamente eseguiti sulla rete ASPI;
- Il capitolo 3 definisce gli obiettivi degli interventi manutentivi orientati al prolungamento della vita utile delle opere (interventi di manutenzione evolutiva);
- Il capitolo 4 indica la strategia di esecuzione degli interventi elaborata in accordo alle indicazioni normative;
- Il capitolo 5 fornisce i criteri per la progettazione degli interventi di manutenzione evolutiva;
- Il capitolo 6 riporta i tipologici degli interventi di manutenzione evolutiva, rappresentati nelle tavole allegate al presente documento.

1 La rete di Autostrade per l'Italia: lo stato dell'arte

Questo capitolo ha come obiettivo quello di aggregare, sintetizzare e visualizzare in maniera organica le caratteristiche principali delle opere della rete gestita da Autostrade per l'Italia. Il fine ultimo è quello di fornire una panoramica delle caratteristiche strutturali delle opere d'arte ed evidenziarne le eventuali correlazioni con condizioni al contorno quali a titolo esemplificativo e non esaustivo l'anno di progettazione, il posizionamento geografico e la tipologia strutturale. Tutti questi parametri, infatti, concorrono in misura più o meno evidente alla presenza delle difettosità che determinano la valutazione di un intervento di manutenzione.

1.1 Ubicazione

Di seguito si presenta la distribuzione geografica dei ponti e viadotti di luce maggiore di 10 metri e la relativa numerosità nelle 9 Direzioni di Tronco (di seguito, indicate con DDT) che gestiscono le diverse tratte autostradali:

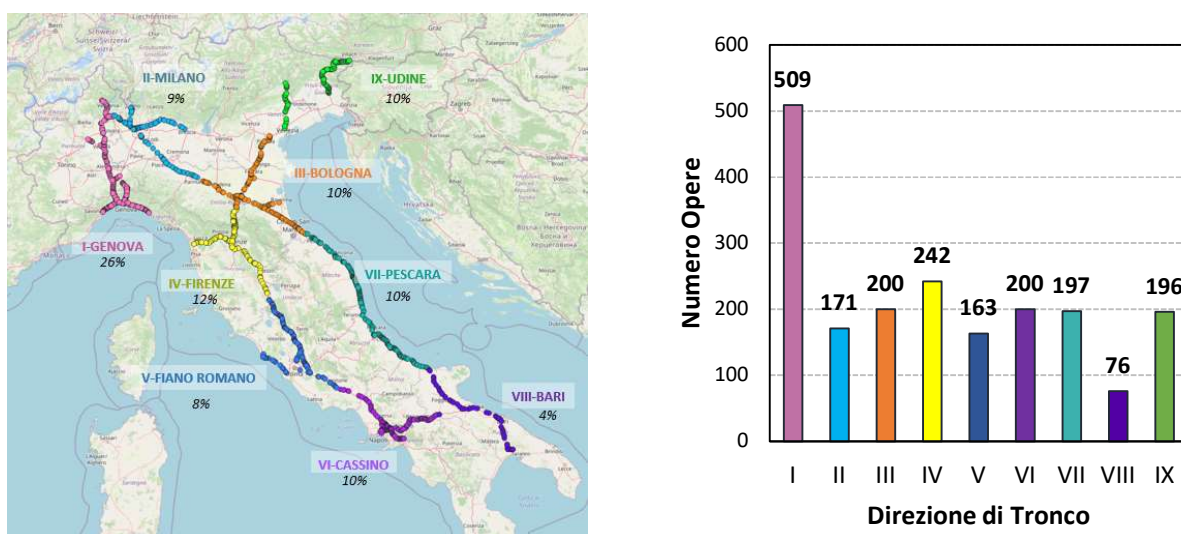


Figura 1-1: Numero di ponti e viadotti suddivisi per DDT

L'allocazione geografica non è tuttavia uniforme, come si può notare in Figura 1-1, in particolare:

- La DT1 - Genova presenta la **maggior concentrazione di opere** rispetto alle altre DT, con circa il **26%** di ponti e viadotti;
- Le DT2 – Milano, DT3 – Bologna, DT4 – Firenze, DT5 – Fiano Romano, DT6 – Cassino, DT7 – Pescara, DT9 – Udine presentano una concentrazione di opere circa **analoga tra loro** e compresa nel range **8-12%**;
- La DT8 - Bari presenta la **minore concentrazione di opere** rispetto alle altre DDT, con circa il **4%** di ponti e viadotti.

Analizzando la heat-map, che mostra la concentrazione delle opere sul territorio nazionale, è possibile osservare una distribuzione geografica non uniforme delle opere, sia su scala nazionale, sia su scala territoriale e sia a livello di tronco stesso. Infatti, osservando ad esempio le opere rientranti nella competenza di DT1, la quasi totalità dei manufatti si concentra intorno alla città di Genova. Stessa valutazione può essere estesa sia alla DT4, dove è possibile osservare un'elevata concentrazione di opere nel tratto che collega Firenze con Bologna, sia alla DT6, dove si evidenzia una maggiore presenza di opere d'arte in corrispondenza di Napoli.

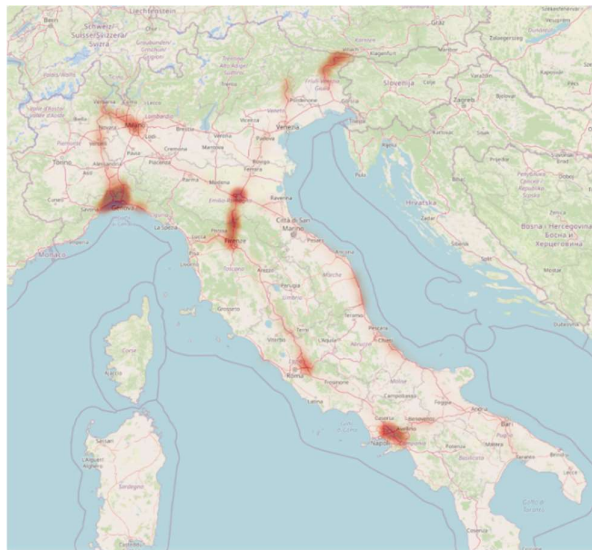


Figura 1-2: Heat-map ponti e viadotti

1.2 Epoca di realizzazione

Con riferimento alla Figura 1-3, è possibile osservare la distribuzione delle opere della rete ASPI rispetto all'anno di apertura al traffico. In particolare, si rileva che circa l'**8%** delle opere della rete ASPI è stato realizzato **prima del 1960** mentre la maggior parte delle opere, circa il **75%**, è stata realizzata **tra il 1960 e il 1980**: in particolare il 44% di esse è stato realizzato tra il 1960 e il 1970, mentre il 31% circa nel decennio successivo. Il **18%** delle opere è stato realizzato **dopo il 1980**.

È importante notare come, dal punto di vista anagrafico, più del 50% di ponti e viadotti (circa 1000) ha oramai superato i 50 anni di vita – cioè la vita nominale convenzionalmente assunta a base del progetto originario – invece, il 30% circa ha superato i 40 anni di vita.

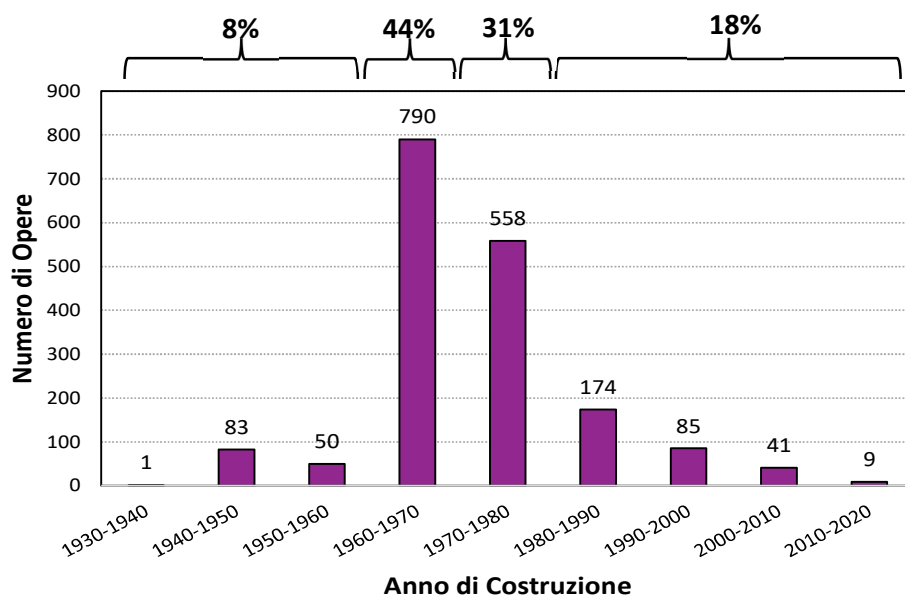


Figura 1-3: Opere ASPI suddivise per epoca di costruzione

1.3 Materiali e tipologie strutturali prevalenti

Sotto l'aspetto della **tipologia di materiale** impiegata per gli impalcati, **circa il 50%** delle opere risulta essere realizzato in Cemento Armato Ordinario (**C.A.O.**) e Cemento Armato Precompresso (**C.A.P.**), di cui quest'ultime comprendono oltre **770 impalcati a cavi post-tesi** (cioè circa il **40%** di quelli totali in cemento armato precompresso).

La **tipologia strutturale** prevalente è quella con impalcati a travata in semplice appoggio, essendo questo lo schema statico di riferimento per **più del 75%** delle opere della rete ASPI; le infrastrutture con travata continua sono ancora una minoranza (**meno del 15%**) e sono concentrate in prevalenza sulle stesse tratte in cui è presente la tipologia a cassone (A1 Bologna-Firenze; A10 e A12 in Liguria; alta A26 e A23; bretella A1 a Roma); le opere a telaio mancano in Liguria (A10 e A12) e in A14, mentre sono distribuite in maniera uniforme sul resto della rete; le opere ad arco si concentrano prevalentemente sui tracciati più datati. Quest'ultima configurazione strutturale è stata impiegata principalmente negli anni che vanno dal 1930 al 1950 dopodiché è stata progressivamente abbandonata.

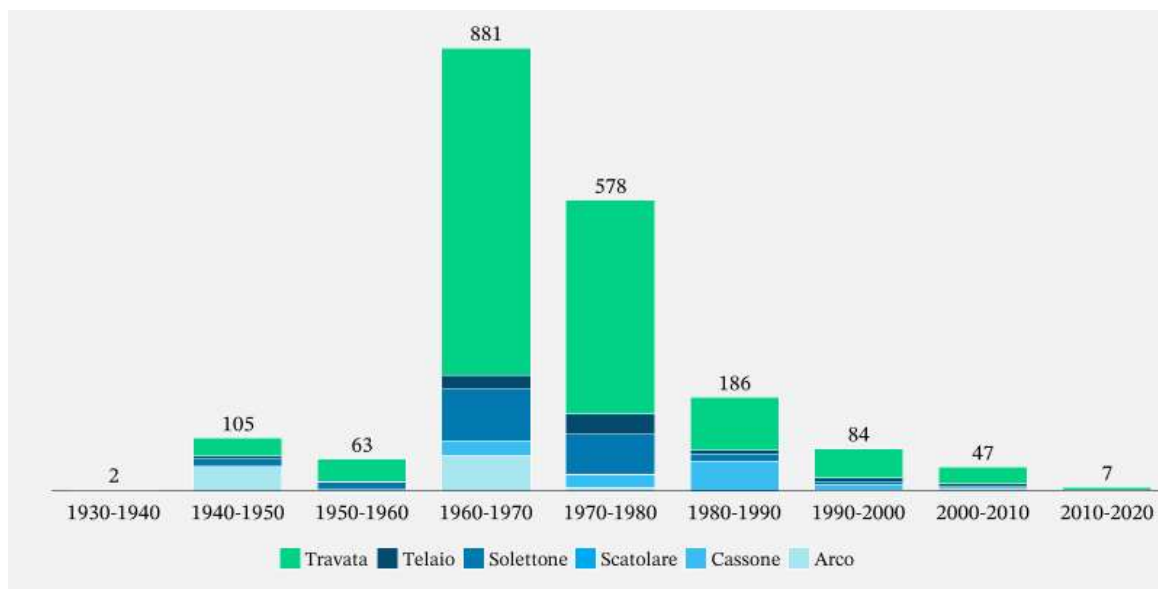


Figura 1-4: Tipologia strutturale impalcati ponti e viadotti: distribuzione in funzione di anno apertura traffico

Relativamente agli impalcati a travata in semplice appoggio, molte delle opere sono caratterizzate da luci di campata medio-piccole, con infatti l'**88%** delle opere che ha campate con **luci fino a 35 m**, e il **57%** con luci fino a soli 25 m.

Nel dettaglio, nella figura seguente, le opere in **C.A.O.** hanno luci inferiori (valore medio 17 m) rispetto a quelle in **C.A.P.** (valore medio 32 m).

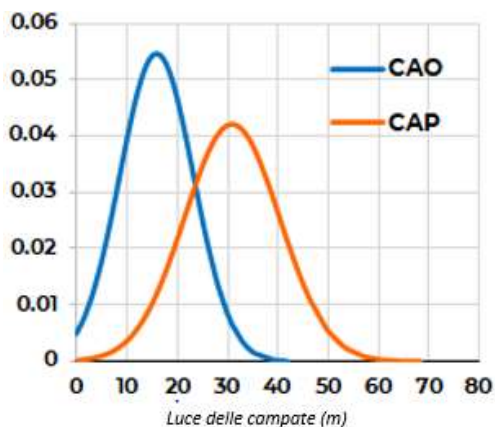


Figura 1-5: Distribuzione delle luci degli impalcati a travata in c.a.o. /c.a.p.

1.4 Schemi statici

Gli schemi statici più utilizzati per le opere d'arte descritte precedentemente sono principalmente tre ovvero: lo schema statico appoggiato, continuo e a sella Gerber. Attualmente circa l'**80%** delle opere è realizzato con schema statico appoggiato, mentre la restante parte è realizzata con schema statico continuo o sella Gerber.

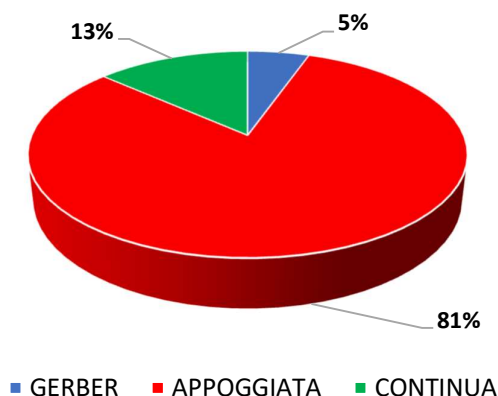


Figura 1-6: distribuzione tipologia appoggi opere ASPI

Osservando l'evoluzione temporale relativa all'impiego delle tre diverse tipologie di schemi statici, con riferimento alla Figura 1-7, si può notare come lo schema statico continuo abbia iniziato ad essere ampiamente utilizzato a partire dagli anni '80 mentre la tipologia sella Gerber sia stata utilizzata più o meno uniformemente dagli anni '50 al 2000.

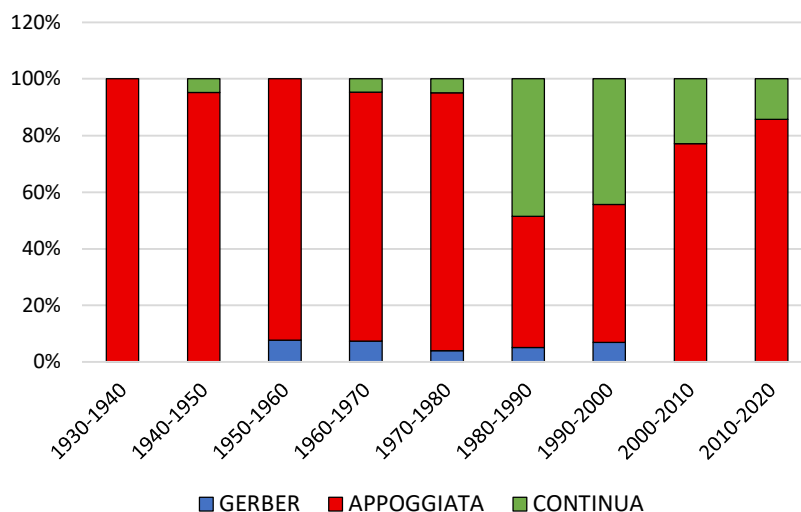


Figura 1-7: andamento temporale schemi statici

Le opere in semplice appoggio risultano essere diffuse uniformemente su tutta la rete, vista anche la numerosità di queste ultime. Peraltro, è possibile notare che le opere che presentano selle Gerber risultano concentrate lungo alcune direttrici autostradali e in particolare lungo la A1 nel tratto compreso tra Napoli e Bologna e lungo A10, A12, A26 nei tratti intorno a Genova. Infine, si rileva una concentrazione delle opere con schema statico in appoggio continuo nei tratti A1 Bologna-Firenze, Liguria (A10, A12), A23, A26.

2 Gli interventi sulle opere esistenti: cause e tipologie ricorrenti

Le reti infrastrutturali di qualsiasi tipo richiedono interventi di *manutenzione* affinché si mantengano inalterati nel tempo le caratteristiche prestazionali ed il livello di sicurezza di progetto¹. Tale *esigenza* si manifesta in misura rilevante per le reti stradali, in quanto esposte a condizioni ambientali spesso sfavorevoli e soggette a ripetuti cicli di carico.

Le cause che storicamente hanno portato ad intervenire su ponti e viadotti possono essere ricondotte al **degrado** rilevato sulle opere. L'approccio tradizionalmente utilizzato nella progettazione degli interventi è stato quello di intervenire localmente per eliminare i "difetti" rilevati sull'opera ripristinando le condizioni originali di progetto. Tali interventi sono stati quindi inquadrati come **risanamenti o ripristini conservativi** ed ascritti a manutenzione ordinaria. Essi costituiscono, per numerosità ed importo lavori, la parte rilevante degli interventi effettuati sulle opere esistenti.

Più di recente, ed in particolare a seguito dell'emanazione della O.P.C.M 3274 del 2003 [1] che ha sancito l'obbligo di valutare la sicurezza sismica delle opere, si è proceduto ad eseguire **interventi di adeguamento sismico** delle opere, la cui programmazione è definita in funzione delle risultanze delle valutazioni di sicurezza.

Tali interventi hanno carattere intrinsecamente *evolutivo* in quando determinano un incremento delle prestazioni e del livello di sicurezza dell'opera rispetto alle condizioni iniziali di progetto. Per le opere sismicamente non adeguate la vigente normativa non sancisce l'obbligo di intervento immediato, ma la programmazione temporale in funzione del livello del deficit rilevato; ad oggi, gli interventi di *adeguamento sismico* eseguiti sulle opere costituiscono un campione limitato rispetto alla totalità degli interventi svolti.

L'obbligo di adeguamento delle opere rispetto ai carichi da traffico è stato sancito solo recentemente dalle Linee Guida Ponti del C.S.LL.PP. del 17 aprile 2020 [2] (in seguito LG Ponti), rese cogenti mediante D.M. n. 587 del 17 dicembre 2020 e, successivamente, con D.M. n.204 del 01/07/2022 (che ha esteso l'adozione delle LG Ponti anche ad enti diversi da Anas S.p.A. e concessionari autostradali ed ha sancito le modalità di applicazione delle LG stesse in relazione ai tempi di attuazione). Anche in questo caso si tratta di interventi intrinsecamente *evolutivi*. L'orizzonte temporale entro il quale vi è obbligo di intervenire si ponti non *adeguati* ai sensi delle LG Ponti è funzione del livello di prestazione individuato mediante lo svolgimento di una valutazione accurata di sicurezza (Livello 4 del processo multilivello previsto dalle LG Ponti) (VAL4), ed è pari a 30 anni per i ponti che risultano *operativi*, ed a 5 anni per i ponti che risultano *transitabili*. Gli **interventi di adeguamento statico** delle opere ad oggi eseguiti sono numericamente limitati rispetto alla totalità delle opere presenti sulla rete ASPI, ma comunque significativi rispetto al limitato lasso temporale intercorso dall'entrata in vigore delle LG Ponti.

¹ Il livello di sicurezza non deve comunque mai risultare inferiore alla soglia minima implicitamente definita dalle Norme, al di sotto della quale è necessario prendere provvedimenti sull'utilizzo dell'opera.

Vi è poi una limitata categoria di interventi la cui causa è riconducibile a *casi fortuiti*, come ad esempio un danneggiamento da urto. La progettazione degli interventi conseguenti è stata tipicamente condotta adottando gli stessi criteri adottati per il caso del degrado, ovvero interventi localizzati che mirano al ripristino delle condizioni originali di progetto, e sono ascritti a *manutenzione straordinaria*.

Per i fini della presente Specifica è necessario comprendere l'origine e la natura del degrado, ed in particolare se esso sia ascrivibile ad una naturale e prevista evoluzione dello stato di conservazione dell'opera oppure se sia dovuto a condizioni non previste in fase di progetto e/o ad errori di progettazione e/o di costruzione.

A tal fine è utile distinguere tra **degrado "esogeno"**, cioè alterazione delle caratteristiche fisiche o dei materiali costituenti l'opera strutturale a seguito di agenti esterni e/o sollecitazioni meccaniche e **degrado "endogeno"**, cioè alterazione *naturale* del materiale di cui è composta la struttura e/o gli elementi accessori.

Tipicamente, il degrado esogeno è identificabile a vista, e viene rilevato attraverso l'ordinaria attività ispettiva; il degrado endogeno invece, non alterando la configurazione dell'opera, generalmente non è rilevabile a vista ma solo attraverso indagini.

Nell'ambito del degrado "endogeno" possono essere ricompresi gli effetti fisiologici della **vetustà** dell'opera, ossia il *decadimento* delle caratteristiche prestazionali dovuto al naturale invecchiamento dei materiali indipendente da agenti esterni o sollecitazioni meccaniche.

La vetustà è intrinsecamente collegata al concetto di vita nominale di progetto dell'opera (vita utile), "convenzionalmente definita come il numero di anni nel quale è previsto che l'opera, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali" (§2.4.1 NTC18). Il raggiungimento della vita nominale di progetto non è di per sé condizione necessaria e sufficiente per ritenere un'opera *vetusta*; pur tuttavia, la norma stessa prevede la necessità di eseguire interventi per prolungare la vita nominale dell'opera, andando così a perdere ogni connotazione di carattere "biologico" (CIR19 §C2.4.1 [12]), come specificato nel successivo paragrafo §4. La *vetustà* è quindi un elemento oggettivo che, in accordo con le indicazioni normative, può e deve essere tenuto in conto nell'ambito della manutenzione delle opere. La vetustà, intesa come fisiologico decadimento delle caratteristiche dei materiali, è un fenomeno intrinsecamente *non visibile*.

Ciò premesso, le cause del degrado dei ponti esistenti sono in larga parte riconducibili alle condizioni ambientali che hanno avuto effetti sui materiali, calcestruzzo ed acciaio, più impattanti rispetto alle previsioni progettuali. Ciò è dovuto ad un insieme di fattori, i più rilevanti dei quali sono: il diverso livello di conoscenza dei fenomeni chimici che causano il degrado del cls e dell'acciaio al tempo della progettazione delle opere (anni '50 e '60); la qualità dei materiali utilizzati, certamente inferiore rispetto a quella corrente; errata concezione dei dettagli costruttivi; difetti di realizzazione, dovuti all'impiego di maestranze non specializzate e/o ai processi di costruzione del tempo.

Relativamente a quest'ultimo aspetto, basti pensare ai ridotti copriferri che tipicamente presentano le travi in c.a.p..

Gli esempi più frequenti di degrado esogeno per fattori ambientali *visibile* nei ponti sono l'ammaloramento del calcestruzzo con distacco del copriferro, l'ossidazione e la corrosione delle barre di armatura o degli elementi in carpenteria metallica. Un esempio di degrado esogeno per fattori ambientali conseguenti e concorrenti a difetti di costruzione *non visibile*, di particolare impatto ai fini della sicurezza, è l'ammaloramento dei cavi da precompressione negli elementi post-tesi.

Il degrado endogeno è più raro da riscontrare nei ponti. Quali esempi di vetustà si richiamano i fenomeni di indurimento degli elastomeri negli appoggi, i fenomeni di fessurazione dovuti al rilassamento naturale dei cavi di acciaio armonico.

Ci sono poi anche cause di precoce deterioramento riconducibili agli effetti dei carichi da traffico significativamente superiori rispetto alle previsioni di progetto. Oltre agli effetti *non visibili*, quali la diminuzione delle prestazioni per fatica (ad esempio, nelle saldature in elementi in carpenteria metallica), ve ne sono di immediatamente apprezzabili, e quantificabili, quali ad esempio l'anticipato degrado e rottura dei giunti. Tale circostanza assume particolare rilevanza in quanto il degrado del giunto determina la percolazione delle acque di piattaforma che a sua volta causa l'ammaloramento di tutti gli elementi sottostanti, quali retro-travi, apparecchi di appoggio, pulvini e fusti pila. L'usura delle pavimentazioni, direttamente collegata con i volumi di traffico, è un altro esempio di anticipato degrado per maggior traffico.

Simili considerazioni valgono per il sistema di smaltimento delle acque di piattaforma, e per le impermeabilizzazioni degli impalcati, spesso anche assenti. Il precoce degrado di questi elementi "accessori" (non strutturali) è causa di ammaloramento degli elementi strutturali, come ad esempio le porzioni di trave in corrispondenza di pluviali rotti e le solette in assenza o malfunzionamento dell'impermeabilizzazione dell'impalcato.

Le considerazioni di cui sopra portano a comprendere che anche gli interventi di risanamento e ripristino non siano necessariamente da ascrivere ad ordinaria manutenzione, ma possano ed in taluni casi debbano essere ascritti a manutenzione straordinaria dell'opera. In particolare, se si tiene conto che la quasi totalità delle opere esistenti è stata progettata senza indicazioni specifiche relative alla manutenzione da effettuare, ha superato la vita nominale di progetto, ed alcuni elementi sono oggi *vetusti*.

Partendo da tali presupposti, si è oggi giunti alla conclusione, ed alla consapevolezza, che **tutti gli interventi di manutenzione delle opere esistenti debbano essere necessariamente pensati come interventi volti al prolungamento della vita utile delle opere, quindi intrinsecamente evolutivi.**

Le nuove conoscenze maturate negli ultimi trent'anni dei fenomeni fisici e dei loro effetti sui materiali da costruzione, lo sviluppo di materiali cementizi ed acciai con caratteristiche prestazionali di gran lunga superiori rispetto a quelle dei materiali utilizzati nella costruzione e da cui sono costituite le opere, lo sviluppo di nuovi materiali, quali ad esempio i calcestruzzi fibrorinforzati e le armature in composito, la definizione di ben definiti e testati protocolli di esecuzione degli interventi volti ad assicurare l'efficacia e la durabilità degli interventi di ripristino, ed in ultimo, ma non

ultima, la disponibilità di materiali con certificazione ESG per la sostenibilità ambientale, sociale e di governance, tutti questi elementi se applicati correttamente e con logica unitaria nella progettazione e nell'esecuzione degli interventi possono effettivamente traghettare e garantire il prolungamento delle vita utile delle opere esistenti.

I criteri di progettazione degli interventi manutentivi proposti nella presente Specifica hanno la finalità di garantire una discontinuità rispetto a quanto fatto nel passato, grazie all'impiego di materiali e tecnologie di più recente sviluppo. In tal senso, i progetti d'intervento su opere esistenti dovranno eseguire preventivamente un'analisi storico-critica sulla singola opera d'arte al fine di ricostruire sia le cause di degrado presenti, sia la natura di eventuali interventi di manutenzione conservativa eseguiti nel passato, integrando, ove necessario, la documentazione messa a disposizione dalla Committente con indagini specifiche. Di quanto sopra si dovrà dare evidenza in uno specifico capitolo nella Relazione Generale di progetto.

3 I nuovi obiettivi degli interventi manutentivi a carattere evolutivo nell'attuale contesto normativo

Le considerazioni presentate nel paragrafo precedente hanno portato all'individuazione del nuovo paradigma di intervento manutentivo sulle opere esistenti: **il prolungamento della vita utile dell'opera**. Esso riguarda ed interessa vari aspetti: l'ottimale conservazione dell'opera nel tempo, quindi manutenibilità e durabilità; l'adeguamento normativo; la sostenibilità dell'intervento. Può quindi essere definita una pluralità di obiettivi di seguito elencati che gli interventi manutentivi a carattere evolutivo devono soddisfare *in toto* o in parte:

- Incremento delle **prestazioni**, in termini di sicurezza strutturale e di funzionalità;
- Miglioramento delle condizioni di **manutenibilità** dell'opera e/o di parti d'opera;
- **Durabilità** di materiali e dispositivi, dell'intervento e dell'opera nel complesso;
- **Estensione** dell'intervento all'intera opera e/o a sotto porzioni unitarie di essa;
- **Combinazione** di interventi per eliminare le cause di precoce degrado, inclusi gli interventi sugli elementi accessori quali giunti e sistema di smaltimento delle acque;
- **Sostenibilità ambientale** dell'intervento, facendo riferimento ai criteri di economia circolare ed ai criteri ambientali minimi (CAM).

Tutte le fasi del processo, progettazione ed esecuzione, sono interessate per il raggiungimento degli obiettivi sopra delineati. In particolare, è opportuno ricordare che la corretta esecuzione di qualsiasi intervento manutentivo, seguendo scrupolosamente le procedure previste, è determinante per la buona riuscita dello stesso, sia in termini di prestazioni che di durabilità.

La progettazione degli interventi deve essere preceduta dalle necessarie indagini conoscitive volte a comprendere le cause e l'estensione dei difetti riscontrati, così da poter individuare gli appropriati *rimedi*.

Il progetto deve essere corredato da indicazioni operative per la Direzione dei Lavori in termini di controlli, prescrizioni e indicazioni esecutive in opera, come riportato nelle tavole tipologiche allegate.

A valle dell'esecuzione degli interventi devono essere previste le necessarie prove sperimentali volte a controllare la buona riuscita dell'intervento.

Il primo riferimento normativo utile ai fini della progettazione, dell'esecuzione e del controllo degli interventi di manutenzione per le **strutture in c.a.** è rappresentato dalla **UNI 1504** "*Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture in calcestruzzo: definizione, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità. Principi generali per l'uso dei prodotti e dei sistemi*". Esse:

- Definiscono le procedure di intervento;
- Definiscono le prestazioni minime dei prodotti;
- Introducono elementi volti alla durabilità e manutenibilità degli interventi;
- Forniscono strumenti per ottimizzare gli interventi.

La norma consiste di 10 parti, ognuna delle quali approfondisce uno specifico argomento. Per ciascuna tipologia di intervento sono previste specifiche prove per l'accettazione dei materiali e per il controllo sull'esecuzione. Un elenco è fornito di seguito:

EN 1504-2	Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 2: Surface protection systems for concrete	2 - Protezione superficiale
EN 1504-3	Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 3: Structural and non-structural repair	3 - Riparazione strutturale
EN 1504-4	Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 4: Structural bonding	4 - Incollaggio strutturale
EN 1504-5	Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 5: Concrete injection	5 - Iniezioni
prEN 1504-6	Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 6: Anchoring of reinforcing steel bar	6 - Ancoraggio barre
prEN 1504-7	Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 7: Reinforcement Corrosion Protection	7 - Protezione dalla corrosione
EN 1504-8	Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 8: Quality control and evaluation of conformity	8 - Controllo qualità e valutazione conformità prodotto
ENV 1504-9	Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 9: General principles for the use of products and systems	9 - Principi generali
EN 1504-10	Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions - Requirements - Quality control and evaluation of conformity - Part 10: Site application of products and systems, and quality control of the works	10 - Controllo qualità lavoro finito

Figura 3-1: Estratto UNI EN 1504, ambiti di applicazione della normativa

Relativamente al contesto normativo italiano, il riferimento principale è rappresentato dalle **"Norme Tecniche per le Costruzioni"** (di seguito NTC 2018) [3].

La **vita nominale** di progetto V_N di un'opera "è convenzionalmente definita come il numero di anni nel quale è previsto che l'opera, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali" (§2.4.1).

I valori minimi di V_N da adottare per la progettazione delle nuove opere sono riportati nella Tab. 2.4.1 della suddetta normativa in funzione del tipo di costruzione.

Per **durabilità** di una struttura (§2.2.4) si intende invece "la capacità della costruzione di mantenere, nell'arco della vita nominale di progetto, i livelli prestazionali per i quali è stata progettata, tenuto conto delle caratteristiche ambientali in cui si trova e del livello previsto di manutenzione" (§2.1).

Si comprende quindi come le norme vigenti assegnino alla manutenzione delle opere un ruolo essenziale per il mantenimento nel corso del tempo dei livelli di affidabilità e di sicurezza prevista dalla norma stessa.

La norma, nel paragrafo §11.2.11 dedicato alla durabilità dei materiali per uso strutturale specifica, inoltre, che "Per garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato ordinario o precompresso, esposte all'azione dell'ambiente, si devono adottare i provvedimenti atti a limitare gli effetti di degrado indotti dall'attacco

chimico, fisico e quelli derivanti dalla corrosione delle armature e dai cicli di gelo e disgelo. A tal fine, valutate opportunamente le condizioni ambientali del sito ove sorgerà la costruzione o quelle di impiego, ...*omissis*... , in fase di progetto dovranno essere indicate le caratteristiche del calcestruzzo da impiegare in accordo alle Linee Guida sul calcestruzzo strutturale ...*omissis*... facendo anche, in assenza di analisi specifiche, utile riferimento alle norme UNI EN 206 [4] e UNI 11104 [5]. Inoltre, devono essere rispettati i valori del copriferro nominale di cui al punto 4.1.6.1.3, nonché le modalità e la durata della maturazione umida in accordo alla UNI EN 13670:2010 [6], ...*omissis*..." (§11.2.11).

Infine, nel capitolo 8 dedicato alle costruzioni esistenti, nel paragrafo 8.2 "Criteri Generali" si stabilisce che "Le disposizioni di carattere generale contenute negli altri capitoli della presente norma costituiscono, ove applicabili, riferimento anche per le costruzioni esistenti *omissis* ...".

Per gli **apparecchi d'appoggio** la normativa di riferimento è la **UNI EN 1337** del 2005 [7], articolata in n. 11 distinti documenti (il primo di carattere generale, gli altri specifici per ciascuna tipologia di vincolo). Gli apparecchi d'appoggio dovranno essere conformi alla marchiatura CE. Per gli apparecchi di appoggio esistenti di vecchia concezione il quadro normativo di riferimento è la CNR 10018 del 1999 [8].

Per i **dispositivi antisismici** la norma di riferimento è la **UNI EN 15129** [9], che ha finalità di armonizzare i requisiti funzionali e le regole generali di progettazione in situazioni sismiche e non sismiche, le caratteristiche dei materiali, i requisiti di fabbricazione e di esecuzione delle prove, nonché i criteri per la valutazione e verifica di costanza della prestazione, di installazione e di manutenzione. Fornisce anche i criteri per la marcatura CE.

Per i **giunti di dilatazione** si fa riferimento alle *Linee Guida di benessere tecnico europeo ETAG 032* [10], articolate in n. 8 distinti documenti (il primo di carattere generale, gli altri specifici per ciascuna tipologia di giunto di dilatazione) le quali valgono anche per le modalità di esecuzione delle prove di accettazione.

Per le **impermeabilizzazioni** la norma di riferimento è la **UNI EN 14695:2010** [11] che fornisce definizioni e caratteristiche di membrane flessibili e membrane bituminose armate per impalcato da ponte in calcestruzzo e altre superfici di calcestruzzo soggette a traffico.

Per i **sistemi di smaltimento acque** il quadro legislativo, per gli interventi da realizzarsi in ambito delle costruzioni esistenti, risulta frammentato e non omogeneo; tuttavia si richiama quanto disciplinato dalle NTC2018 al § 5.1.7.4 "Smaltimento dei liquidi provenienti dall'impalcato", secondo cui "*Lo smaltimento dei liquidi provenienti dall'impalcato deve effettuarsi in modo da non arrecare danni o pregiudizio all'opera stessa, alla sicurezza del traffico e ad eventuali opere ed esercizi sottostanti il ponte*".

4 Strategia d'intervento

Il prolungamento della vita utile dell'opera mediante l'esecuzione di interventi di manutenzione evolutiva può essere perseguito con differenti strategie.

In proposito, la Circolare Applicativa delle NTC18 del 2019 [12] prevede due strategie alternative, rappresentate nel grafico seguente che riporta in ordinata l'affidabilità dell'opera R , dove R_{min} è il livello minimo al di sotto del quale non è ammesso scendere e R_t è il livello che si ottiene progettando le opere nel rispetto delle prescrizioni normative (che garantiscono un livello di affidabilità superiore al minimo proprio per tener conto dell'inevitabile degrado che la costruzione subisce nel tempo) ed in ascissa la vita spesa t :

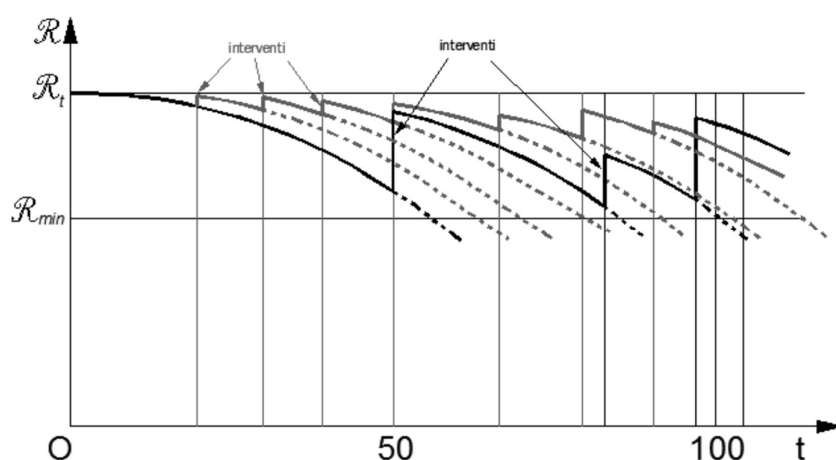


Figura 4-1: Circolare NTC18, figura C.2.1

- 1) Si interviene sull'opera al termine della Vita Nominale di progetto, quando si presume che il livello di affidabilità abbia raggiunto la soglia minima accettabile di affidabilità R_{min} , con un intervento di riparazione o di manutenzione straordinaria che riporta il livello di affidabilità ad un valore prossimo a R_t ripristinando sostanzialmente la Vita Nominale di progetto;
- 2) Si realizzano interventi più contenuti e più ravvicinati nel tempo, prima del raggiungimento della Vita Nominale di progetto, che mantengono il livello di affidabilità sempre prossimo al valore iniziale di progetto.

Indipendentemente dalla strategia adottata, "la vita nominale di progetto viene così a perdere ogni connotazione di carattere "biologico", perché essa sostanzialmente si rinnova a seguito degli interventi di riparazione o di manutenzione straordinaria" (CIR19 §C2.4.1 [12]).

L'obiettivo degli interventi di manutenzione evolutiva è appunto quello di prolungare *rinnovandola* la vita utile dell'opera.

Una volta conseguito questo obiettivo, per il futuro si prevede di adottare la strategia 2, che prevede interventi contenuti e ravvicinati nel tempo. A tal fine un ruolo strategico è affidato alla sorveglianza delle opere, che deve indicare con accuratezza

e tempestività l'insorgere di difetti, strutturali e non, che possono determinare una riduzione del livello di affidabilità dell'opera, circostanza che deve attivare un intervento di riparazione o di manutenzione a seconda del difetto rilevato.

In questo contesto, si prevede di adottare strategie di *manutenzione predittiva*, basate sui seguenti criteri:

- *Condition-based maintenance*: le componenti strutturali vengono ripristinate o rimpiazzate in base alla loro condizione, sulla base delle informazioni che provengono da un sistema di controlli prestabilito che consenta di monitorare la struttura e le singole componenti, quali le ispezioni periodiche e/o un apposito sistema di monitoraggio;
- *Time-based maintenance*: alcune componenti critiche preventivamente individuate, per le quali è possibile pre-definirne la *vita utile*, vengono ripristinate o rimpiazzate dopo un periodo di tempo stabilito a priori, indipendentemente dallo stato della componente (ad esempio, apparecchi di appoggio, giunti, sistema di smaltimento delle acque, etc.).

Un parametro *globale* per misurare l'efficacia degli interventi di manutenzione evolutiva è la *difettosità strutturale e fondazionale* dell'opera introdotta dalle LG Ponti, confrontandone i livelli *ante-intervento* e *post-intervento*.

La vita di riferimento di nuovi elementi e/o sistemi costruttivi impiegati negli interventi evolutivi, opportunamente riferita alle specifiche condizioni ambientali e di utilizzo (cicli di carico), è un ulteriore parametro che fornisce una misura quantitativa dell'efficacia dell'intervento.

5 Criteri di progettazione degli interventi

Il nuovo paradigma della *manutenzione evolutiva* delineato nei paragrafi precedenti che mira al prolungamento della vita utile delle opere determina un sostanziale cambiamento nell'approccio alla progettazione degli interventi sulle opere esistenti. In particolare, le singole soluzioni progettuali e l'intervento nel suo complesso dovranno essere sviluppati secondo i seguenti criteri:

- **Alte prestazioni** dei materiali, significativamente migliori di quelle di progetto;
- **Durabilità** degli interventi e dell'opera, nel suo complesso e/o in specifiche porzioni e/o elementi;
- **Manutenibilità** dell'opera, con miglioramento del livello di servizio (LOS);
- **Estensione** dell'intervento all'intera opera o a complete porzioni/elementi d'opera;
- **Sostenibilità ambientale** dell'intervento nel suo complesso;
- **Combinazione** di più interventi, per eliminare tutte le cause degli ammaloramenti e/o difettosità riscontrate sull'opera;
- **Adeguamento/potenziamento** dell'opera, per raggiungere i livelli di ponte operativo o adeguato ai sensi delle LG Ponti.

Attualmente non è disponibile una metrica quantitativa per misurare l'efficacia dell'intervento in termini di prolungamento della vita utile dell'opera. D'altronde le stesse norme tecniche non prevedono di esplicitare il livello di affidabilità conseguito progettando una nuova opera nel rispetto delle prescrizioni normative, valore (R_t nel grafico Figura 4-1) che resta implicito (in ciò consiste la sostanziale differenza tra norme prescrittive, come le NTC18, e norme prestazionali che si basano sul calcolo esplicito del rischio). Tuttavia, è ragionevole ritenere che un intervento progettato nel rispetto dei criteri di cui sopra, che quindi non si limita al mero ripristino delle condizioni di progetto ma migliora, potenzialmente anche in misura significativa, le caratteristiche prestazionali e funzionali dell'opera, consenta di portare il livello di affidabilità ad un valore anche superiore rispetto a quello di progetto e quindi determini il rinnovo della vita utile dell'opera, in coerenza con la visione delle vigenti norme tecniche rappresentata nel grafico di Figura 4-1. Sulla base di tali considerazioni si può sostenere il carattere evolutivo degli interventi.

Nell'ambito della progettazione degli interventi risulta necessario indicare con chiarezza quali sono le caratteristiche delle soluzioni adottate che soddisfano i criteri base di cui sopra. Nel seguito si forniscono, per ciascun criterio base, indicazioni di carattere metodologico su materiali e soluzioni tecniche che possono essere adottate per il raggiungimento degli obiettivi prefissati; ciò consente di far "evolvere" un intervento tradizionalmente considerato di ordinaria manutenzione (conservativo) in intervento di manutenzione a carattere evolutivo.

Tali indicazioni sono state applicate nello sviluppo dei tipologici di intervento presentati nel capitolo successivo e rappresentati nelle tavole allegate alla presente relazione.

Preventivamente all'avvio della progettazione è sempre necessario eseguire un'analisi critica dello stato di fatto e delle cause degli ammaloramenti rilevati sull'opera, prevedendo specifiche indagini se ritenuto utile per la comprensione dei fenomeni osservati, i cui esiti possono essere anche di supporto nella scelta delle appropriate tecniche per l'esecuzione degli interventi e dei materiali da utilizzare. Di quanto sopra si dovrà dare evidenza nella Relazione Generale di progetto, come già anticipato nel Capitolo 2.

I progetti devono, inoltre, essere corredati da un Piano di Manutenzione che non si limiti a riportare gli eventuali interventi che devono essere eseguiti nel tempo per garantire il buono stato di conservazione dell'opera ma contengano anche, per quanto possibile, indicazioni sui controlli da effettuare volti a predire il deterioramento dell'opera e/o parti di essa al fine di anticipare l'esecuzione degli eventuali interventi manutentivi. Ciò comporta oggettivi vantaggi in termini sia di sicurezza che di costi di manutenzione, contribuendo a impostare la gestione delle opere con una logica di Manutenzione Predittiva.

Dal punto di vista normativo, in linea generale gli interventi di manutenzione evolutiva possono essere inquadrati come *"interventi di riparazione o locali: interventi che interessino singoli elementi strutturali e che, comunque, non riducano le condizioni di sicurezza preesistenti"* (§ 8.4 NTC 2018). Per essi, come da Circolare applicativa alle NTC2018 e da Norme Edilizie collegate, non è richiesta la valutazione della sicurezza globale dell'opera (es. verifica sismica globale), nè il deposito della pratica sismica, nè il collaudo statico finale, ma soltanto la valutazione della eventuale variazione (incremento) del livello locale di sicurezza.

Nel caso in cui interventi locali di manutenzione evolutiva siano combinati con interventi globali di adeguamento dell'opera, se ne terrà conto nella dovuta misura nello svolgimento delle verifiche di sicurezza previste per questa tipologia di interventi dalle NTC18.

5.1 Materiali ad alte prestazioni

Gli interventi devono essere caratterizzati dall'utilizzo di materiali da costruzione ad alte prestazioni in termini di caratteristiche meccaniche e durabilità, anche in relazione alle specifiche condizioni ambientali e di utilizzo. Ci si riferisce primariamente ai materiali cementizi ed a quelli compositi, il cui utilizzo si sta via via diffondendo in varie applicazioni e con diverse funzioni anche strutturali.

Materiali cementizi

I materiali cementizi sono utilizzati per gli interventi di ripristino delle porzioni di calcestruzzo ammalorate.

Avendo indicato con D_{max} la dimensione massima degli aggregati utilizzati per realizzare il prodotto, questi materiali si distinguono in:

- malte $D_{max} = 5\text{mm}$
- betoncini $D_{max} = 10\text{mm}$
- calcestruzzo $D_{max} > 10\text{mm}$

Il loro utilizzo dipende dallo spessore da ripristinare, come mostrato, ad esempio, nella Tabella 5-1.

Tabella 5-1: Categoria e Tecnica di applicazione dei prodotti cementizi in funzione dello spessore da ripristinare (da: ing. Lorenzo De Carli, Seminario Tecnico DT7 11/10/22)

Spessore ripristino (mm)		DEGRADO													
		Lieve			Medio				Profondo					Molto profondo	
		1	3	8	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	>100
TECNICHE APPLICAZIONE	Iniezione	Boliacche cementizie e formulati con resine													
	Rasatura	Malte fini tixotropiche													
	Spruzzo o rinzafo				Malte tixotropiche										
	Colaggio				Malte colabili				Betoncini colabili					Calcestruzzi (S4)-S5 vibrati o SCC colato	

malte

DMax
5 mm

betoncini

DMax
10 mm

cls

malte **DMax 5 mm** betoncini **DMax 10 mm** cls

Tabella 5-2: Requisiti prestazionali dei materiali cementizi secondo EN 1505-3

Caratteristiche essenziali	Metodo di prova	Requisiti prestazionali secondo EN 1504 – 3				NOTE
		strutturale		non strutturale		
		Classe R4	Classe R3	Classe R2	Classe R1	
Resistenza a compressione	EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa	
Contenuto di ioni cloruro	EN 1015-17	≤ 0,05%				Requisito non pertinente alla riparazione di cls non armato
Aderenza	EN 1542	≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (carico di rottura min = 0,5 MPa se c'è difetto di coesione)		Substrato tipo MC(0,40) secondo EN 1766
Ritiro / Espansione impediti	EN 12617-4	Larghezza media max di una incrinatura ≤ 0,05mm (senza incrinature ≥ 0,1mm) Assenza delaminazione Forza di legame: nessun valore singolo < 75% del requisito minimo			Nessun requisito	Se sottoposto a cicli termici, questa prova aggiuntiva non è richiesta
		≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa		
Resistenza alla carbonatazione	EN 13295	d_k ≤ calcestruzzo di riferimento tipo MC(0,45) (Riferimento cls EN 1766)			Nessun requisito (non idoneo per la protezione contro la carbonatazione)	Requisito non pertinente alla riparazione di cls non armato
Modulo elastico	EN 13412	≥ 20 GPa	≥ 15 GPa	Nessun requisito		
Compatibilità termica Gelo-disgelo	EN 13687-1	Larghezza media max di una incrinatura ≤ 0,05mm (senza incrinature ≥ 0,1mm) Assenza delaminazione Forza di legame dopo 50 cicli: nessun valore singolo < 75% del requisito minimo			- Ispezione visiva dopo 50 cicli - Larghezza media max di una incrinatura ≤ 0,05mm (senza incrinature ≥ 0,1mm)	La scelta del metodo dipende dalle condizioni di esposizione. Se un prodotto soddisfa la parte 1, si suppone che soddisfi anche le parti 2 e 4.
		≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa		
Compatibilità termica Temporali	EN 13687-2	Larghezza media max di una incrinatura ≤ 0,05mm (senza incrinature ≥ 0,1mm) Assenza delaminazione Forza di legame dopo 30 cicli: nessun valore singolo < 75% del requisito minimo			- Ispezione visiva dopo 30 cicli - Larghezza media max di una incrinatura ≤ 0,05mm (senza incrinature ≥ 0,1mm)	
		≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa		
Compatibilità termica Cicli a secco	EN 13687-4	Larghezza media max di una incrinatura ≤ 0,05mm (senza incrinature ≥ 0,1mm) Assenza delaminazione Forza di legame dopo 30 cicli: nessun valore singolo < 75% del requisito minimo			- Ispezione visiva dopo 30 cicli - Larghezza media max di una incrinatura ≤ 0,05mm (senza incrinature ≥ 0,1mm)	
		≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa		
Assorbimento capillare	EN 13057	≤ 0,5 kg·m ⁻² ·h ^{0,5}			≤ 0,5 kg·m ⁻² ·h ^{0,5}	Nessun requisito
Reazione al fuoco		Euroclasse dichiarata				

In Tabella 5-2 sono riportate le caratteristiche prestazionali dei materiali cementizi secondo l'EN 1505-3.

La tecnica di applicazione delle malte, a spruzzo o colabili, dipende dalle specifiche situazioni e deve essere attentamente valutata in quanto determinate ai fini della buona riuscita e della durabilità dell'intervento.

Per risanamenti profondi è necessario prevedere l'uso di malte espansive o additivi che compensino il ritiro del calcestruzzo ed evitino l'insorgere di fenomeni di fessurazione nel materiale di ripristino.

I principali fattori che contrastano l'espansione, e di cui bisogna tener conto nella progettazione degli interventi di risanamento, sono: stagionatura umida, aderenza dell'armatura, adesione al substrato, presenza di reti.

Materiali cementizi fibrorinforzati

Il calcestruzzo fibrorinforzato è un materiale composito caratterizzato da una matrice cementizia e da fibre discrete (discontinue). La matrice è costituita da calcestruzzi, betoncini o malte normali o ad alte prestazioni. Le fibre possono essere corte non strutturali (poliacrilonitrile, poliammide, polipropilene, ecc.), per contrastare la formazione delle fessure dovute al ritiro plastico, oppure con funzione strutturali (acciaio, vetro, polipropilene, ecc.), per incrementare la resistenza del materiale. Le fibre sono sempre marcate CE.

Le caratteristiche delle diverse tipologie di fibre e un diagramma qualitativo di raffronto tra calcestruzzi o betoncini ordinari e fibrorinforzati sono mostrati in Figura 5-1.

I calcestruzzi fibrorinforzati possono arrivare ad avere resistenze a compressione superiori a 100MPa ed a trazione superiori a 10MPa. La percentuale delle fibre incide anche sulla duttilità del materiale.

Il riferimento tecnico per la progettazione, l'esecuzione di interventi con calcestruzzi fibrorinforzati sono le CNR DT 204/2006 [14].

Fibre	Diametro (µm)	Lunghezza (mm)	Modulo Elastico (MPa)	Resistenza a trazione (MPa)
Polivinilalcol	10	6-12	20.000	1.500
Polipropilene	500-400	20-75	<8.000	400
Acciaio inox	10-330	10-60	160.000	2.100

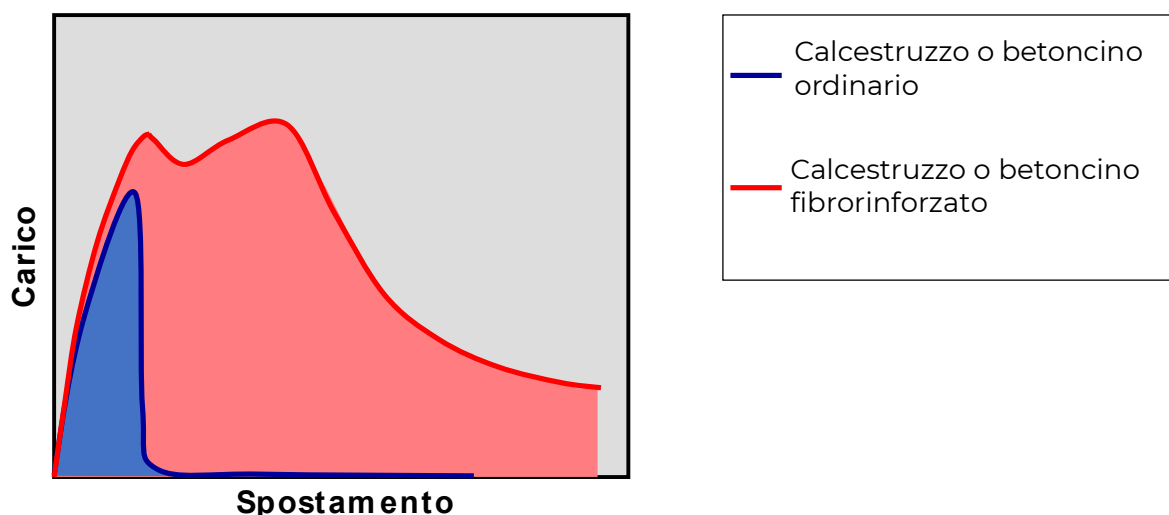


Figura 5-1. Caratteristiche delle fibre e comportamento meccanico (fonte Mapei)

Materiali compositi fibrorinforzati

I materiali compositi fibrorinforzati sono costituiti da tessuti e lamine (FRP) o da reti realizzate con fibre di diversi materiali: carbonio, acciaio, basalto o vetro. I tessuti e le lamine vengono applicati mediante resine epossidiche (sistemi a matrice organica). Essi possono essere impregnati in situ (tessuti) o preformati (lamine). Il riferimento tecnico per la progettazione, l'esecuzione di intervento con compositi fibrorinforzati sono le CNR-DT 200 R1/2013 [15].

Le reti vengono applicate con malte, betoncini o calcestruzzi (sistemi a matrice inorganica).

Il comportamento meccanico delle diverse tipologie di fibre è mostrato in Figura 5-2 in cui è riportato anche, a titolo di confronto, il legame costitutivo dell'acciaio.

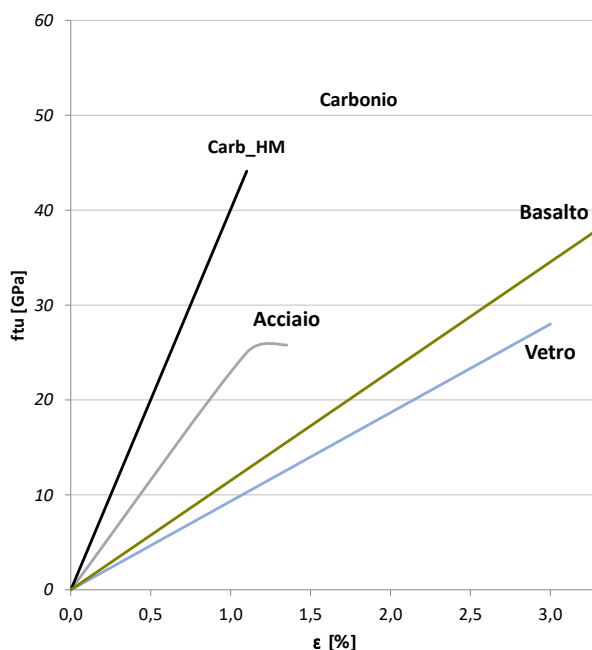


Figura 5-2. Comportamento meccanico delle fibre (fonte Mapei)

Barre di armatura in materiali compositi

Nell'ambito degli interventi di risanamento di elementi in calcestruzzo ammalorati si sta diffondendo l'utilizzo di barre di armatura e reti in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) realizzate con resina di vinilestere e fibre di vetro in E-GR.

Le barre sono realizzate da fibre impregnate in resina polimerica. Nel processo di produzione ciascun materiale mantiene le sue caratteristiche iniziali, e le caratteristiche del prodotto finito sono superiori a quelle dei singoli componenti. Le fibre di vetro rispetto alle altre tipologie (carbonio, basalto, aramide) rappresentano un buon compromesso in termini di costi e resistenza. Le resine in vinilestere presentano, rispetto a quelle in poliestere ed epossidiche, buone caratteristiche di adesione al calcestruzzo e resistenza agli alcali.

I vantaggi dell'utilizzo di barre in GFRP rispetto alle tradizionali armature metalliche sono i seguenti:

- Resistenza alla corrosione
- Elevata resistenza meccanica
- Peso ridotto
- Resistenza alla fatica
- Non-magnetismo
- Bassa conduttività termica ed elettrica

Gli svantaggi sono invece una rottura di tipo fragile ed un elevato costo iniziale.

In Italia attualmente le barre in GFRP possono essere utilizzate solo con funzione non strutturale; in altri paesi sono invece già accettate anche per l'utilizzo con funzione strutturale.

Negli Stati Uniti, in particolare, sono presenti vari documenti tecnici e normativi a riguardo, tra cui i principali sono il Rapporto della Commissione 440 dell'American Concrete Institute (ACI 440.1R-06) e la seconda edizione del "LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete" dell'American Association for State Highway and Transportation Officials (AASHTO) del dicembre 2018. Negli Stati Uniti ci sono varie realizzazioni di ponti con utilizzo esclusivo di armature in GFRP in completa sostituzione rispetto a quelle metalliche.

Documenti normativi a riguardo sono in via di sviluppo anche in Italia ed è verosimile ritenere che nel breve periodo sarà possibile estenderne l'utilizzo.

Ad oggi, l'utilizzo di barre in GFRP è stato adottato dall'Anas per il rifacimento dei cordoli bordo ponte.

La produzione di tali elementi rispetta i criteri ambientali più elevati. Esse possono essere dotate di certificato EPD (Environmental Product Declaration) ai sensi delle ISO 14025 e delle EN15804:2012 + A2:2019.

Riprese di getto e inghisaggi

Relativamente alle riprese di getto ed agli inghisaggi il contesto normativo di riferimento ha vissuto negli ultimi anni una rapida evoluzione che ha portato in prima istanza all'adozione dell'EC2-4, e successivamente l'introduzione di specifici rapporti tecnici EOTA (TR 066 e TR 069), tali da prospettare ai professionisti incaricati un contesto di riferimento sia in termini di riferimenti tecnici per la progettazione di comprovata validità ai sensi del capitolo 12 delle NTC2018 sia in termini di specifiche per l'identificazione e la qualificazione dei materiali come disciplinato al paragrafo 11.1 delle stesse NTC 2018.

Di seguito si riporta il quadro normativo di riferimento in ragione della tipologia di intervento:

- a) Eurocodice 2-4 [16]: "Progettazione degli attacchi per utilizzo nel calcestruzzo" – Estensione e aggiunta di elementi in calcestruzzo con armature sovrapposte.
- b) TR069 [17]: Design method for anchorage of post-installed reinforcing bars (rebars) with improved bond-splitting behavior as compared to EN 1992-1-1 - Estensione e aggiunta di elementi in calcestruzzo senza armature sovrapposte.
- c) TR066 [18]: Design and requirements for construction works of post-installed shear connection for two concrete layers – Ringrosso sezionale con sovrapposizione di strati di calcestruzzo.

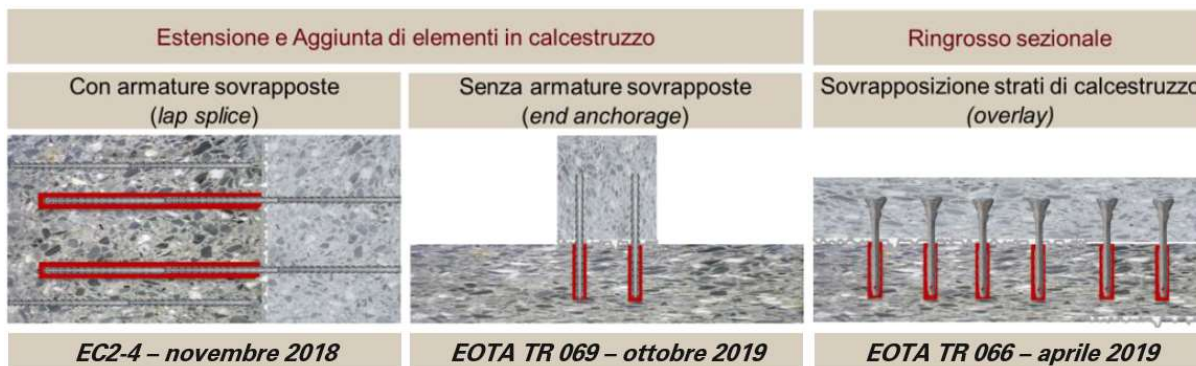


Figura 5-3: Evoluzione del contesto normativo sul tema riprese di getto e inghisaggi

Il nuovo rapporto tecnico EOTA TR 069 introduce il dimensionamento e l'esecuzione di riprese di getto per connessioni calcestruzzo-calcestruzzo resistenti alla flessione, in assenza di sovrapposizioni. Stando al precedente riferimento normativo previsto dall'EC2-4, era possibile dimensionare le armature di collegamento post-installate esclusivamente eseguendo sovrapposizioni con le stesse armature. Ciò comportava numerosi svantaggi tra cui:

- un giunto con sovrapposizione deve essere preventivamente pianificato nella nuova costruzione e anche essere presente nella posizione prevista, non sempre ciò risultando possibile quando si interviene sull'esistente;
- la capacità di carico tra due barre con differente comportamento di adesione è limitata dalla capacità di carico della barra "più debole", ovvero quella gettato in opera, senza quindi poter sfruttare a pieno il potenziale del sistema di resina ad iniezione;
- interventi su strutture esistenti obbligano alla rimozione locale del calcestruzzo per poter realizzare la ripresa mediante barra post-installata, comportando dispendio in termini di tempo, economicità e sicurezza.

Con il regolamento EOTA TR069 è stato introdotto un ulteriore metodo di dimensionamento, sfruttando le forze di ritenuta. La qualifica di una resina basata sul documento di valutazione europeo EAD 332402-00-0601 [19] permette di sfruttare i valori prestazionali del sistema di resina utilizzato (resistenza ad adesione), consentendo una soluzione economica con sufficiente sicurezza della connessione in funzione dei vincoli geometrici e delle condizioni specifiche dei materiali. In sostanza, EAD 332402-00-0601 disciplina la valutazione dell'effettiva resistenza a sfilamento ed a splitting di un sistema di resina.

TR 069

Tipo di connessione	Rigida con sovrapposizione			Rigida o flessibile senza sovrapposizione				
Elemento	1 	2 	3 	4 	5 	6 	7 	8
Metodo di progettazione	EC2			TR 069 / EC2				

Figura 5-4: Applicazioni di connessione con armature di ripresa oggetto secondo EC2 vs. EAD 334202 (TR 069)

La resistenza legata all'aderenza si abbassa in presenza di copriferri sottili. Il cedimento dell'ancoraggio post-installato in presenza di copriferro sottile avviene per perdita di adesione, mentre quando questo è più spesso il cedimento è dovuto a sfilamento. Resine che rispondono ai requisiti prestazionali della EOTA TR069 e della EAD 332402-00-0601 migliorano significativamente la resistenza di adesione rispetto alle armature gettate in opera a parità di condizioni al contorno. Questo vantaggio consente di ottimizzare la progettazione del sistema di connessione.

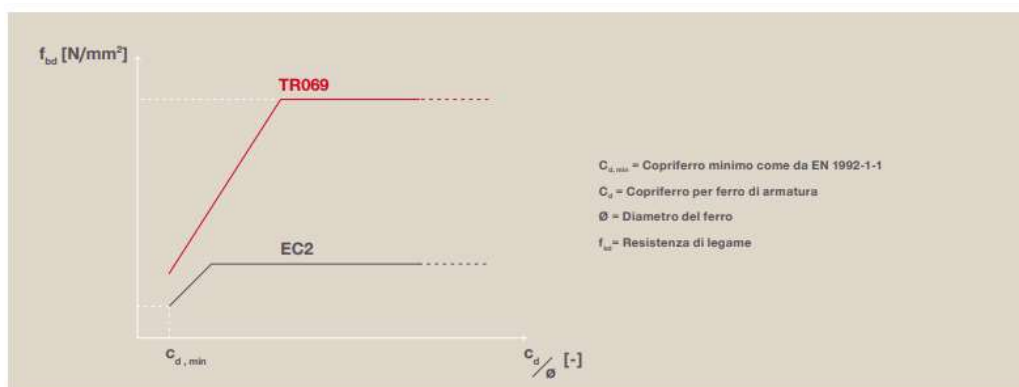


Figura 5-5: Resistenza di adesione in rapporto allo spessore del copriferro/diametro delle barre post-installate per determinare a lunghezza di installazione e resistenza del calcestruzzo in base al modello di frattura di cui all'EC2-4 e al TR 069.

5.2 Durabilità

Per garantire la durabilità di un'opera è necessario ragionare ed intervenire a diversi livelli:

- i singoli interventi;
- l'opera o parti d'opera nel complesso.

Il primo aspetto attiene agli specifici materiali, al loro combinato utilizzo, alle procedure di posa in opera ed alla corretta esecuzione di uno specifico intervento. Emblematico è l'intervento di ripristino di porzioni di calcestruzzo ammalorato con barre di armatura esposta, ossidate e corrose.

Il secondo aspetto riguarda invece gli "elementi" dell'opera preposti alla corretta conservazione della stessa, che principalmente sono costituiti dal copriferro, per le opere in c.a., e dalle "opere accessorie" quali giunti, sistema di smaltimento delle acque e impermeabilizzazioni.

5.2.1 Durabilità dei singoli interventi

Di seguito si riportano indicazioni relative al conseguimento di un'adeguata durabilità per gli interventi più diffusi in ambito di manutenzione evolutiva.

Interventi di ripristino del calcestruzzo

I rispristini di porzioni di calcestruzzo ammalorato eseguiti a partire dagli anni '80 utilizzando prodotti e tecniche dell'epoca hanno mostrato evidenti limiti in termini di efficacia e di durabilità. Tali interventi oggi si presentano spesso in distacco, con l'armatura sottostante ossidata e corrosa; il *fallimento* dell'intervento può essere dovuto alla mancata passivazione dei ferri (non si è quindi arrestato il processo di corrosione originariamente in atto) oppure alla cattiva aderenza tra il supporto costituito dal *vecchio* calcestruzzo originale ed il *nuovo* materiale di ripristino, o ad entrambi i fattori.

Sulla base dell'esperienza, la buona riuscita di un intervento di risanamento del calcestruzzo è strettamente legata alla corretta esecuzione dell'intervento, ed in particolare:

- Adeguata preparazione del sottofondo mediante scarifica che può essere eseguita con diverse tecniche (a mano, mezzi meccanici, idroscarifica). La superficie deve risultare sufficientemente ruvida e nel caso di ripristini che interessano anche l'armatura esistente essa deve essere messa a nudo.
- Passivazione dei ferri di armatura.
- Applicazione del materiale di ripristino avendo opportunamente preparato il sottofondo (saturazione dei pori) ed in condizioni ambientali idonee (temperatura).
- Scelta delle corrette modalità di applicazione in funzione dello spessore del ripristino e delle condizioni ambientali, geometriche e fisiche.

- Scelta del tipo di materiale.
- Applicazione dello strato di finitura al fine di ottenere uno strato protettivo della superficie del calcestruzzo.

Inghisaggi

I moderni prodotti per la realizzazione degli inghisaggi, qualora conformi alla sopraccitata normativa tecnica di riferimento, sono provvisti di certificazione di conformità CE e/o di benessere tecnico europeo ETA, requisiti conseguibili esclusivamente previa qualifica secondo i più moderni standard e tali da garantire una vita nominale non inferiore a 50 anni.

5.2.2 Durabilità dell'opera nel suo complesso

In linea generale le opere realizzate negli anni '60 e '70 o prima sono state progettate secondo requisiti normativi sostanzialmente differenti se non assenti rispetto a quelli previsti dalle vigenti norme tecniche. Ciò vale non solo per i requisiti minimi di sicurezza strutturale, ma anche relativamente a quelli attinenti alla durabilità dell'opera. Basti pensare ai copriferri, i cui valori minimi per le strutture in c.a. fino al 1976 erano di soli 2 cm per le membrature principali e 0,8 cm per le solette (addirittura di soli 1,5cm per il c.a.p. a fili pre-tesi) a prescindere dalle condizioni di esposizione, valori confermati anche dal D.M. 16 giugno 1976 [20] ad eccezione per le strutture esposte a salsedine marina (ambienti aggressivi) per le quali essi venivano portati a 2 cm per le solette e a 4 cm per le altre membrature.

Per quanto riguarda le opere accessorie, specifiche prescrizioni sono state introdotte solo a partire dal D.M. del 2 agosto 1980 [21]; pertanto per la maggior parte delle opere tali parti accessorie sono dimensionate sulla base di regole pratiche e di buon senso, con caratteristiche costruttive e prestazionali significativamente inferiori a quelle previste dalle norme attualmente vigenti.

Si fa presente che le opere accessorie hanno rilevanza non solo ai fini della buona conservazione dell'opera, ma anche per la sicurezza statica e degli utenti: *giunti* correttamente dimensionati per assorbire le deformazioni indotte dalle forze di frenatura e/ sismiche, che sono significativamente incrementate rispetto a quelle di progetto previste dalle norme dell'epoca; *sistemi di smaltimento delle acque e/o pendenze* correttamente dimensionati per il deflusso delle acque di piattaforma, anche in relazione alle mutate condizioni climatiche rispetto all'epoca del progetto delle opere.

Per quanto sopra riportato, risulta evidente che gli interventi su copriferri ed opere accessorie progettati per rispettare gli standard normativi vigenti determinano non solo un allungamento della vita utile dell'opera ma anche un incremento dei livelli di sicurezza e di durabilità della stessa e, pertanto, siano a tutti gli effetti ascrivibili a interventi di manutenzione evolutiva.

Nel seguito si esaminano alcuni interventi volti a garantire la durabilità dell'opera nel suo complesso ovvero degli elementi interessati dagli interventi di manutenzione evolutiva.

Ripristino del copriferro

Gli interventi di manutenzione evolutiva devono prevedere in via preferenziale la ricostruzione dei copriferri con uno spessore in accordo a quanto previsto dalle vigenti normative, che prevedono un vero e proprio progetto per determinarne il valore minimo in funzione dei materiali e della classe di esposizione.

Ovviamente tale soluzione non è sempre percorribile per ragioni di natura sia tecnica che economica. Tale circostanza è ben nota al legislatore che, infatti, nel capitolo dedicato alle costruzioni esistenti stabilisce che *"Le disposizioni di carattere generale contenute negli altri capitoli della presente norma costituiscono, ove applicabili, riferimento anche per le costruzioni esistenti"* (§8.2). Lo spessore del copriferro ricade tra le prescrizioni di carattere generale.

In tali circostanze, è possibile utilizzare prodotti specifici che, applicati alla superficie dell'elemento, realizzano uno spessore equivalente di copriferro in calcestruzzo. Resta inteso che tale soluzione dovrà essere sempre corredata da una relazione che dimostri l'equivalenza dello spessore realizzato rispetto allo spessore in calcestruzzo e che fornisca indicazioni sulla vita utile e sulle certificazioni CE del prodotto prescelto.

Impermeabilità agli agenti aggressivi

La protezione delle strutture in calcestruzzo armato attraverso l'impiego di protettivi di nuova generazione, quale a titolo esemplificativo rasature cementizie elastiche, assicura un'adeguata impermeabilità delle superfici agli agenti aggressivi.

In particolare, la velocità di penetrazione dell'anidride carbonica nel calcestruzzo può essere rappresentata con una legge ad andamento parabolico del tipo:

$$x = K \cdot t^{1/2}$$

dove:

- x è lo spessore di calcestruzzo penetrato dalla CO₂;
- K è il coefficiente di diffusione della CO₂;
- t il tempo di esposizione all'atmosfera contenente CO₂.

Si precisa come il valore di K dipende, principalmente, dalle caratteristiche del calcestruzzo (tipo di cemento, eventuali aggiunte, rapporto a/c, stagionatura ...) e dai fattori ambientali (temperatura, umidità, concentrazione di CO₂). A titolo esemplificativo, confrontando il coefficiente di diffusione K del calcestruzzo ordinario con quello di un protettivo per calcestruzzo in ambiente aggressivo (es. malta bicomponente elastica) si osserva un rapporto di 1:30 circa, che, applicato alla legge di penetrazione della CO₂, porta a poter equiparare l'effetto di 2 mm di malta con l'applicazione di più di 50mm di copriferro realizzato con calcestruzzo ordinario.

Analogamente a quanto detto per il fenomeno della carbonatazione, l'impiego di protettivi di nuova generazione fornisce un'elevata resistenza alla penetrazione di soluzioni saline (cloruri) tali da garantire, con 2,5mm di spessore, un valore di protezione equivalente a quello di 30mm di copriferro realizzato con un calcestruzzo ordinario.

Sistemi di protezione superficiale del calcestruzzo

La protezione superficiale del calcestruzzo può essere realizzata con diverse tecniche:

- **Impregnazione idrofobica**, consistente in un trattamento del calcestruzzo finalizzato ad ottenere una superficie idrorepellente. I pori e le capillarità sono rivestiti internamente, ma non riempiti. Non vi è pellicola sulla superficie del calcestruzzo e l'aspetto varia poco o niente;
- **Impregnazione**, consistente nel trattamento del calcestruzzo finalizzato a ridurre la porosità della superficie e a rinforzare la superficie stessa. I pori e le capillarità sono parzialmente o totalmente riempiti (film);
- **Rivestimento**, consistente in un trattamento finalizzato ad ottenere uno strato protettivo continuo sulla superficie con spessori variabili tra 0,1 e 5 mm.

Il riferimento normativo è la EN 1504-2 [22].

Protezione delle armature dalla corrosione

La protezione delle armature dalla corrosione può essere realizzata mediante:

- rivestimenti attivi, che contengono pigmenti attivi che grazie alla loro alcalinità possono fungere da inibitori e creare una protezione catodica localizzata;
- rivestimenti barriera, che isolano le armature dall'umidità contenuta nei pori del calcestruzzo.

Il riferimento normativo è la EN 1504-7 [23].

La protezione delle armature può anche essere realizzata con sistemi di protezione catodica galvanica mediante sistemi ad anodi sacrificali interni o esterni.

Nel sistema ad anodi interni si utilizzano elementi composti da un'anima multistrato di zinco puro al 99,9% ad elevata superficie, ricoperti da una speciale pasta conduttiva che li mantiene attivi nel tempo.

Nel sistema ad anodi esterni si utilizzano lamine in zinco puro al 99,9% di spessore 250 o 450 µm accoppiate ad un gel adesivo/conduttore.

Entrambi i sistemi non necessitano né di manutenzione né di fonti di energia esterne.

Il riferimento normativo è la ISO EN 12696 [24].

Giunti

Il coprighiunto, comunemente chiamato "giunto o giunto di dilatazione", è l'elemento di collegamento tra due impalcati contigui il cui compito è quello di garantire la continuità della sede stradale.

Esso da un lato deve consentire il movimento naturale degli impalcati, assorbendo azioni verticali e orizzontali senza opporre particolare resistenza. Dall'altro deve garantire sicurezza e confort all'utenza che lo percorre.

Inoltre, il giunto deve essere impermeabile, caratteristica fondamentale per salvaguardare gli elementi sottostanti quali solette, testate delle travi, appoggi, baggioli e pulvini.

Esistono differenti categorie di giunti che si possono sinteticamente riassumere in:

- Giunto sotto pavimentazione generalmente ubicato in corrispondenza degli appoggi fissi;
- Giunto viscoelastico o comunemente detto "a tampone" utilizzato per escursioni massime di 5 cm;
- Giunto elastomerico o "acciaio-gomma" utilizzato per escursioni fino a 40 cm;
- Giunti a grandi escursioni (lamellari o a pettine) utilizzati per escursioni superiori a 40 cm.

Indipendentemente dal tipo di giunto da installare le lavorazioni prevedono sempre:

- demolizione del giunto esistente, eventualmente corredato dalla rimozione della pavimentazione 2 m prima e dopo il giunto;
- pulizia dell'estradosso della soletta da oli, grassi e polvere, liscio e pulito da eventuali residui di lavorazioni;
- eventuale demolizione della soletta per adattare la dimensione del giunto agli spostamenti richiesti dalla struttura soggetta alle sollecitazioni di progetto previste dalle vigenti normative;
- esecuzione di un getto di livellamento delle superfici in modo da avere una superficie liscia e omogenea;
- posa in opera di un primo strato di impermeabilizzazione della porzione di soletta esposta;
- inserimento della scossalina per la raccolta delle acque;
- posa in opera del nuovo giunto, in questa fase a seconda del tipo di giunto potranno essere necessari getti di massetti e/o cordoli per l'ancoraggio dell'elemento;
- posa in opera dei drenaggi e di un secondo strato di impermeabilizzazione;
- rifacimento della pavimentazione stradale.

Particolare cura deve essere posta nelle fasi di realizzazione dell'impermeabilizzazione del giunto nonché nella scelta dei materiali per realizzarla in quanto la permeabilità del giunto è una delle prime cause di degrado degli elementi presenti al di sotto di esso.

Per i giunti di dilatazione la conformità alle norme di prodotto (Linee Guida di benessere tecnico europeo ETAG 032 [10]) garantisce le prestazioni del prodotto stesso ed il loro mantenimento nel tempo, riguardando una vita nominale V_N di 50 anni.

Sistema di smaltimento delle acque

Per garantire un'elevata prestazione del sistema di smaltimento delle acque si utilizzano tubi in polipropilene a tre strati (PP3) caratterizzati da:

- uno strato esterno che garantisce un'ottima protezione meccanica e resistenza all'abrasione;

- uno strato intermedio realizzato con una miscela di polipropilene e cariche minerali che offre elevata resistenza meccanica anche alle basse temperature;
- uno strato interno costituito da uno strato estremamente liscio di polipropilene bianco.

Le bocchette sono provviste di flange ben posizionate, rivolte verso l'esterno, che, forzando elasticamente sulla superficie interna del tubo di scarico assicurano alla bocchetta una proprietà antirigurgito ed una perfetta tenuta. Infatti, nell'inserimento del tubo di scarico le flange subiscono una flessione verso l'alto e conseguentemente alla pressione esercitata, garantiscono una perfetta aderenza con qualsiasi tipo di tubo. Si ottiene così l'annullamento dei passaggi di vapori acquei e di eventuali masse liquide (di rigurgito).

L'utilizzo di tubi in PP3 garantisce un'elevata resistenza ad eventuali agenti chimici. In particolare, lo strato interno caratterizzato da una superficie estremamente liscia previene l'accumulo di depositi interni e gli insediamenti di flore batteriche. La particolare geometria della guarnizione e della sede dell'innesto garantiscono, inoltre, la tenuta idraulica ed assecondano i movimenti della tubazione, compresi quelli dovuti alle dilatazioni termiche. Grazie al suo basso coefficiente di dilatazione termica, i giunti a innesto sono in grado di assorbire le variazioni di lunghezza del tubo senza necessità di particolari accorgimenti.

L'inserimento di parafoglie al di sopra della bocchetta antirigurgito e la presenza della griglia prevengono la presenza di materiale grossolano che potrebbe ostruire il foro di scarico. L'utilizzo delle membrane bituminose garantisce una maggiore impermeabilità del sistema. La superficie interna liscia e di colorazione bianca dello strato interno del tubo in PP3 semplifica eventuali operazioni di video ispezione. L'innesto a bicchiere permette un facile smontaggio ed eventuale sostituzione di parte della tubazione.

Impermeabilizzazioni

Il manto impermeabile degli impalcati stradali ha il compito di preservare l'opera in calcestruzzo sia dall'attacco chimico dell'anidride carbonica, che per carbonatazione del cemento ne altera le caratteristiche meccaniche, sia dall'azione disagregatrice dell'acqua che si infila nelle fessure del calcestruzzo e lo disagrega durante i cicli di gelo e disgelo. Il manto impermeabile serve anche a proteggere le armature metalliche del calcestruzzo dalla corrosione, causata sia dalla carbonatazione che ne altera l'ambiente basico protettivo sia dall'azione corrosiva dei sali antigelo sparsi nella stagione invernale. Da quanto sopra si evince l'importanza del ruolo del manto impermeabile sulla durata dell'opera, ed è pertanto essenziale che questo rimanga inalterato nel tempo.

Il sistema di impermeabilizzazione si differenzia in funzione della tipologia di impalcato. In particolare, per le superfici cementizie esso si può realizzare come di seguito indicato:

- pulizia del piano di posa da oli, grassi e polvere, liscio e pulito da eventuali residui di lavorazioni;

- trattazione della superficie con una mano di primer bituminoso di adesione, steso in ragione di 350-500gr/m² e lasciato in applicazione per almeno 24h;
- incollaggio a fiamma di membrana impermeabilizzante bitume distillato polimero elastoplastomerica, con marcatura CE conforme UNI EN 14695 armata con un "tessuto non tessuto" isotropo di fibra poliestere da filo continuo posizionato asimmetricamente rispetto allo spessore del foglio.

Per gli impalcati da ponte in acciaio, esso si può realizzare come di seguito indicato:

- pulizia del piano di posa da oli, grassi e polvere, liscio e pulito da eventuali residui di lavorazioni;
- trattazione della superficie con una mano di primer bituminoso di adesione, steso in ragione di 200-300gr/m² e lasciato in applicazione per almeno 24h;
- incollaggio a fiamma di membrana impermeabilizzante bitume distillato polimero composita, con marcatura CE conforme UNI EN 14695, costituita da uno strato superiore in bitume APP elastoplastomerico, resistente allo shock termico e dotato di un punto di rammollimento di 150°C, che riveste e protegge lo strato inferiore elastomerico a base di bitume distillato ed SBS copolimero a blocchi stirolo butadiene radiale, dotato di un allungamento a rottura del 2.000% e una flessibilità a freddo di -25°C.

In ogni caso è di fondamentale importanza raccordare la membrana in prossimità degli elementi di discontinuità come giunti, pluviali di scarico, rilievi e marciapiedi onde garantire la continuità del manto impermeabile.

5.3 Manutenibilità

Nella progettazione degli interventi devono essere prese tutte le necessarie accortezze tecniche affinché le future attività di manutenzione siano, per quanto possibile, ridotte (in termini di frequenza) e comunque risultino di semplice esecuzione. Si riportano di seguito alcuni esempi:

- predisposizione agganci per martinetti su cavi precompressione esterna;
- installazione protezione catodica su armatura;
- predisposizione per futuri sollevamenti degli impalcati nell'ambito degli interventi di sostituzione dei dispositivi di appoggio;
- utilizzo di armature in materiale composito non soggetto a corrosione.

5.4 Estensione intervento

In linea di principio l'effettivo allungamento della vita utile di un'opera si realizza se i necessari interventi di manutenzione sono estesi a tutti gli elementi da cui essa è costituita. Ciò non è sempre tecnicamente possibile, né necessariamente conveniente dal punto di vista tecnico-economico, ed infatti la norma stessa prevede, anzi suggerisce, l'esecuzione di interventi più contenuti e più ravvicinati nel tempo (§4).

È comunque opportuno che un intervento interessi quantomeno un'intera parte d'opera, ad esempio un impalcato o una singola pila, nell'ottica di eliminare tutte le difettosità presenti e di adeguarlo ai requisiti normativi sia di sicurezza che di

durabilità così da non rendere necessario un nuovo intervento in tempi antecedenti alla manutenzione prevista.

Per definire correttamente l'estensione dell'intervento è indispensabile conoscere l'effettivo stato di conservazione dell'elemento e dei materiali da cui esso è costituito. Ad esempio, porzioni di copriferro apparentemente integre e ben conservate potrebbero essere affette da carbonatazione profonda per cui in tempi brevi potrebbe attivarsi il processo di ossidazione e corrosione delle barre di armatura sottostanti; in tale situazione, nell'ottica di un intervento evolutivo che mira ad allungare la vita utile dell'opera è opportuno agire preventivamente ed estendere l'area di intervento anche sulle porzioni carbonatate di copriferro non limitandolo alle sole zone dove sono presenti ammaloramenti evidenti, come tipicamente avviene. A tal fine devono essere eseguire le opportune indagini conoscitive come indicato al successivo §5.8.

Nell'ambito della definizione delle porzioni di opera su cui intervenire, un aspetto da non trascurare è l'impatto in termini sia economici che di disagio alla circolazione delle opere provvisorie e di cantierizzazione necessarie, che è tipicamente rilevante, per cui può risultare conveniente estendere gli interventi di manutenzione al maggior numero di elementi possibile.

Il progetto di intervento deve obbligatoriamente contenere una valutazione esplicita e quanto più analitica possibile che giustifichi la scelta di estensione dell'intervento sulla base dei criteri sopra enunciati.

5.5 Sostenibilità ambientale

ASPI ha intrapreso un percorso di trasformazione, in linea con gli obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite, verso un modello di gestione integrata della mobilità basato sulla sicurezza e resilienza delle infrastrutture e l'impegno per il contrasto ai cambiamenti climatici.

È in atto una trasformazione culturale ovvero una diffusione della cultura della sostenibilità in linea con i principi dell'ESG: ambientale, sociale ed economica (Environment, Social, Governance) in un'ottica di inclusione, trasparenza e legalità.

Questa trasformazione passa anche dalla ricerca sul mercato di materiali a basso impatto ambientale, con particolare attenzione al controllo dell'intero ciclo di vita di produzione (Life Cycle Assessment, LCA) e sulla scelta oculata delle materie prime, in modo da abbattere i kg di CO₂ equivalenti prodotti.

La sostenibilità di un prodotto si traduce in:

- Garantire la salute e la sicurezza dell'applicatore e del consumatore finale;
- Minimizzare gli impatti ambientali, in fase di produzione e confezionamento, applicazione, utilizzo e dismissione (LCA), tra cui appunto la riduzione di kg CO₂-eq.

Le normative internazionali di riferimento sono le ISO 14040 [25] e 14044 [26].

Nella progettazione degli interventi di manutenzione evolutiva si dovrà prediligere l'utilizzo di materiali, di tecnologie e di processi costruttivi con le migliori caratteristiche di sostenibilità ambientale.

Un ulteriore riferimento nella progettazione degli interventi sarà costituito dal documento *Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'affidamento dei servizi di progettazione, di direzione ed esecuzione dei lavori per la costruzione, manutenzione e adeguamento funzionale delle infrastrutture stradali* di prossima emanazione da parte del Ministero della Transizione Ecologica.

5.6 Combinazione degli interventi

Un intervento di manutenzione evolutiva deve mirare ad eliminare tutte le cause che hanno generato o che potrebbero generare il precoce degrado dell'opera.

Di conseguenza, oltre agli interventi direttamente volti all'eliminazione dei difetti che interessano gli elementi strutturali, devono essere inclusi anche gli interventi di riparazione delle opere accessorie difettose quali giunti, sistema di smaltimento delle acque di piattaforma ed impermeabilizzazione dell'impalcato, i cui malfunzionamenti sono spesso la primaria origine dei degradi osservati sugli elementi strutturali.

5.7 Incremento della sicurezza

Tutti gli interventi di manutenzione devono mirare al miglioramento delle *prestazioni* dell'opera, non solo in termini di durabilità e manutenibilità ma anche, per quanto possibile, in termini di sicurezza, non solo in riferimento al rischio strutturale ma anche a quello trasportistico.

Tale ultimo obiettivo può essere raggiunto anche da interventi tradizionalmente ritenuti meramente *conservativi*, come ad esempio il risanamento del calcestruzzo ammalorato, se si impiegano i materiali ad alte prestazioni decritti in precedenza che possono determinare un incremento di resistenza e/o di duttilità degli elementi interessati.

Anche la sostituzione dei giunti, se adeguatamente dimensionati come indicato nel precedente §5.2.2, determina un incremento della sicurezza strutturale.

Il rifacimento del sistema di smaltimento delle acque ed eventualmente delle pendenze, come indicato al già citato §5.2.2, determina un incremento della sicurezza per gli utenti.

5.8 Indagini preventive

L'adeguata conoscenza dell'effettivo stato di conservazione degli elementi interessati dagli interventi di manutenzione è un requisito fondamentale per la corretta progettazione dell'intervento stesso.

Come già anticipato in precedenza, la conoscenza non deve limitarsi alle porzioni ammalorate che saranno certamente oggetto di intervento ma deve riguardare anche le porzioni all'apparenza integre. Relativamente a quest'ultime, l'obiettivo è stabilire, con ragionevole certezza, se tali porzioni abbiano mantenuto la geometria e le caratteristiche dei materiali di progetto, affinché l'elemento "conservi inalterate funzionalità, aspetto estetico e resistenza" (§4.2.10 NTC18). In tal caso, non è

necessario prevedere interventi; in caso contrario è invece necessario prevedere interventi che ristabiliscano quanto meno le condizioni di progetto, riportando i livelli di affidabilità alle condizioni iniziali, o le migliorino, così rinnovando la vita utile dell'opera come da considerazioni di cui al precedente §4.

Tali indagini dovranno riguardare, ad esempio, lo stato di conservazione del copriferro riguardo a tutti i fenomeni chimici che possono averne alterato la capacità di preservare le armature sottostanti. Le superfici all'apparenza integre dovranno essere oggetto di verifica a contatto per controllarne l'adesione.

In presenza di indizi che possano far ritenere avviato il processo di ossidazione delle barre di armatura, si dovranno prevedere saggi a campione per verificarne l'effettivo stato di conservazione.

In caso di ripristini effettuati in passato, in assenza di idonea documentazione tecnica sull'intervento effettuato, qualora vi siano elementi tali da far ritenere che l'intervento non sia stato eseguito a regola d'arte, con particolare riferimento al trattamento delle barre d'armatura, si procederà con saggi a campione.

Per quanto attiene agli apparecchi d'appoggio in acciaio interessati da fenomeni di ossidazione e/o corrosione superficiale, si procederà con sabbiatura degli apparecchi per accertare l'effettivo stato di conservazione del dispositivo.

Le necessarie indagini saranno definite, caso per caso, in funzione dell'oggetto dell'intervento e dello stato di conservazione degli elementi interessati.

Al fine di ridurre tempi e costi di esecuzione delle indagini ed i disturbi alla circolazione, i rilevamenti degli ammaloramenti e del quadro fessurativo potranno essere eseguiti mediante l'uso di droni di ultima generazione, in grado di restituire la posizione, la dimensione, la descrizione ed immagini ad alta definizione degli ammaloramenti, la posizione e la dimensione delle fessure. In ogni caso, i dati così ottenuti dovranno essere tarati mediante verifiche dirette a campione.

Tutti i risultati delle indagini, riportati in rapporti opportunamente redatti, dovranno far parte della documentazione di progetto in modo tale da lasciare traccia dello stato di conservazione degli elementi indagati per futura memoria. Tale aspetto riveste fondamentale importanza.

5.9 Piano di Manutenzione e monitoraggio predittivo

Il progetto degli interventi dovrà essere corredato da un Piano di Manutenzione redatto in conformità con i requisiti normativi vigenti.

In aggiunta agli usuali contenuti, il Piano di Manutenzione dovrà contenere anche indicazioni su controlli preventivi di carattere predittivo volti ad individuare con anticipo i fenomeni di degrado di singoli elementi e/o parti d'opera.

Tale aspetto costituisce elemento novativo rispetto alla prassi usuale e si inserisce nel più generale modello di Manutenzione Predittiva delle opere che ASPI sta sviluppando e sperimentando sulle opere della rete.

Al fine di valutare l'evoluzione dello stato di conservazione dell'opera, ed in particolare dei fenomeni di degrado che interessano elementi non direttamente ispezionabili, quali tipicamente le armature negli elementi in c.a., è possibile prevedere in progetto l'installazione di idonei sistemi di monitoraggio *predittivi*.

Si rimanda ai documenti normativi e tecnici di riferimento sul monitoraggio per tutti i necessari approfondimenti.

6 Tipologici degli interventi

I difetti di natura “non strutturale”, ovvero quelli che non determinano una apprezzabile riduzione della resistenza degli elementi resistenti e/o che interessano elementi accessori, che si presentano con maggior frequenza sulle opere d’arte sono i seguenti:

- Efflorescenze e macchie di umidità;
- Calcestruzzo dilavato o ammalorato, in superficie o in profondità;
- Armatura ordinaria scoperta e/o ossidata;
- Cavi di precompressione scoperti ed ossidati;
- Baggioli degradati;
- Appoggi ossidati, fuori piombo;
- Rottura parziale o totale dei giunti;
- Rottura degli elementi del sistema di smaltimento delle acque.

Tali difetti sono stati tradizionalmente trattati nell’ambito della manutenzione *ordinaria*, quindi con interventi a carattere locale che *eliminavano* il difetto ripristinando la condizione di progetto.

Seguendo il nuovo paradigma della manutenzione evolutiva, la *risoluzione* di tali difetti sarà eseguita prevedendo interventi progettati secondo i criteri esposti al capitolo precedente.

A tal fine, è stata redatta una serie di **tipologici di intervento** allegati alla presente relazione che coprono i ricorrenti interventi di manutenzione storicamente effettuati sulle opere. Ciascun tipologico definisce le caratteristiche dei materiali, le modalità esecutive, i controlli di accettazione, i costi parametrici, indicazioni manutentive.

I tipologici sviluppati non si limitano agli interventi di manutenzione ma includono anche i principali e ricorrenti interventi di rinforzo per adeguamento statico e sismico. Per una esaustiva classificazione dei difetti, inclusi quelli a valenza strutturale, si rimanda al Catalogo dei Difetti ASPI [27] e all’allegato C delle LG Ponti.

L’elenco dei tipologici ad oggi sviluppati è fornito in allegato A2. I tipologici saranno aggiornati ed integrati nel tempo alla luce dei nuovi sviluppi tecnologici e normativi.

7 Bibliografia

- [1] O.P.C.M n. 3274/2003 - Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica, 20 marzo 2003.
- [2] C.S.LL.PP. Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti. n.88/2019, 17/04/2020.
- [3] D.M. 17/01/2018. Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni". Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale" n. 42, Serie Generale, pubblicazione in G.U 20 febbraio 2018.
- [4] UNI EN 206-1 Calcestruzzo. Specificazione, prestazione, produzione e conformità.
- [5] UNI 11104 Calcestruzzo. Specificazione, prestazione, produzione e conformità. Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1.
- [6] UNI ENV 13670-1 Esecuzione di strutture in calcestruzzo. Requisiti comuni, 2010.
- [7] UNI EN 1337:2005 - Appoggi strutturali.
- [8] CNR 10018: Apparecchi di appoggio per le costruzioni. Istruzioni per l'impiego, 1999.
- [9] UNI EN 15129:2018 - Dispositivi antisismici.
- [10] European Organisation for Technical Approvals, ETAG n° 032 Expansion Joints for road bridges, 2013.
- [11] UNI EN 14695:2010 - Membrane flessibili per impermeabilizzazione - Membrane bituminose armate per l'impermeabilizzazione di impalcati di ponte di calcestruzzo e altre superfici di calcestruzzo soggette a traffico - Definizioni e caratteristiche.
- [12] CIRCOLARE 21 gennaio 2019 , n. 7 C.S.LL.PP - Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.
- [13] UNI EN 1504-3:2006 - "Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità – Parte 3: Riparazione strutturale e non strutturale".
- [14] CNR DT 204/2006 - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato.
- [15] CNR-DT 200 R1/2013 - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati.
- [16] EC2 UNI EN1992-4:2018: Progettazione degli attacchi per utilizzo nel calcestruzzo, novembre 2018.
- [17] Rapporto Tecnico EOTA TR 069: Design method for anchorages of postinstalled reinforcing bars (rebars) with improved bond-splitting behaviour as compared to EN 1992-1-1, ottobre 2019.
- [18] Rapporto Tecnico EOTA TR 066: Design and requirements for construction works of post-installed shear connection for two concrete layers, aprile 2019.

- [19] Documento di valutazione europeo EOTA EAD 332402-000601 - Post-installed reinforcing bar (rebar) connections with improved bondsplitting behaviour under static loading..
- [20] D.M. 16/06/1976: "Norme tecniche per la esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche", supplemento ordinario alla G.U., n.214 del 14 agosto 1976.
- [21] D.M. 2/08/1980: Criteri generali e prescrizioni tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo di ponti stradali, pubblicato in G.U. il 10 novembre 1980.
- [22] UNI EN 1504-2:2005 - Sistemi di protezione della superficie di calcestruzzo.
- [23] UNI EN 1504-7:2007 - Protezione contro la corrosione delle armature.
- [24] UNI EN ISO 12696:2022 - Protezione catodica dell'acciaio nel calcestruzzo.
- [25] UNI EN ISO 14040:2021 - Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento.
- [26] UNI EN ISO 14044:2021 - Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida.
- [27] Autostrade per l'Italia SpA. Opere d'arte maggiori – Catalogo dei difetti – Aprile 2022.

Allegati

A1. Focus meccanismi di degrado del calcestruzzo

Il degrado è sempre presente nelle opere esistenti e inizia dal momento stesso della costruzione dell'opera. I fenomeni di degrado sono indotti da molteplici fattori e possono essere sinteticamente individuati in cause di natura ambientale, di non idonea esecuzione o per raggiungimento della vita utile della struttura. I difetti tipici delle costruzioni in calcestruzzo riguardano i materiali che le compongono, calcestruzzo ed armature.

I difetti tipici del calcestruzzo possono essere di origine chimica, meccanica o fisica; la corrosione nelle armature può essere dovuta a tipicamente a carbonatazione o a contaminanti corrosivi, più raramente a correnti vaganti.

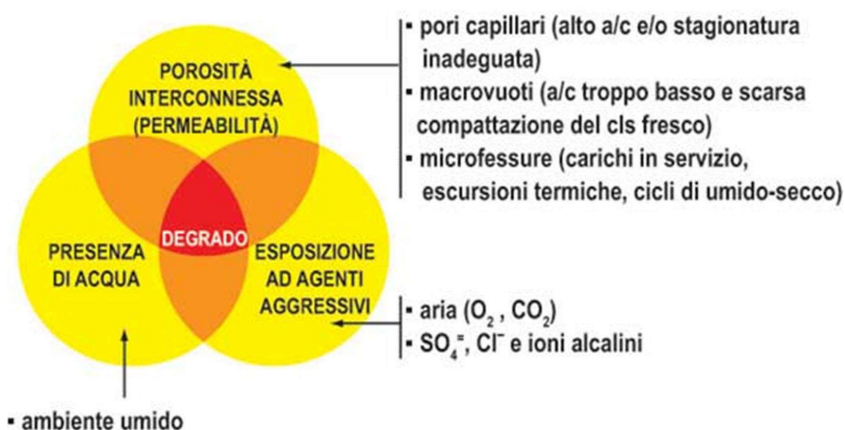


Figura A1- 1: Il nuovo calcestruzzo VI edizione, M. Collepari – S. Collepari – R. Troli

Tali meccanismi vengono di seguito esposti singolarmente per permettere un approfondimento puntuale sulle cause e conseguenze di ognuno di essi nella consapevolezza della necessità di corredare tali analisi con informazioni quantitative relative al calcolo strutturale, al quadro fessurativo e alle condizioni esistenti al momento della realizzazione delle strutture, alle modalità e tempistiche di maturazione ed infine ai relativi piani di monitoraggio e manutenzione.

a. Definizione degli ambienti di esposizione delle strutture:

In base a quanto sopra premesso, vi è la necessità di adottare provvedimenti tanto più stringenti quanto maggiore è il rischio a cui le opere sono esposte al degrado in modo da garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato.

Le norme UNI EN 206 e UNI 11104 permettono la caratterizzazione dell'ambiente in cui la struttura è in servizio, definendo sei classi di esposizione ambientale in funzione

dell'aggressività a cui è esposta l'opera, individuando quindi il corrispondente meccanismo di degrado prevalente delle strutture, secondo quanto segue:

Tabella A1- 1: Classi di esposizione ambientale in accordo alla UNI EN 206 e alla UNI 11104

MECCANISMI DI DEGRADO PREVALENTI		
CLASSE DI ESPOSIZIONE	X0	Strutture non armate con rischio di degrado nullo
	XC	Strutture armate soggette a corrosione delle armature promossa dalla carbonatazione
	XD	Strutture armate soggette al rischio di corrosione indotta dai cloruri non provenienti dall'acqua di mare
	XS	Strutture armate in ambiente marino soggette a corrosione promossa dai cloruri provenienti dall'acqua di mare
	XF	Strutture in calcestruzzo soggette all'azione dei cicli di gelo-disgelo con o senza di sali disgelanti
	XA	Strutture in calcestruzzo soggette all'aggressione ad opera di sostanze chimiche presenti nei terreni e nelle acque

b. Carbonatazione – le strutture in classe di esposizione XC

La carbonatazione è un processo di degrado per il quale l'anidride carbonica penetrando attraverso il copriferro della struttura reagisce con l'idrossido di calcio presente nella matrice cementizia formando molecole di carbonato di calcio e acqua e determinando una notevole riduzione del pH del calcestruzzo a valori prossimi a 9. In queste condizioni viene meno il film protettivo (depassivazione) che l'armatura mantiene in condizioni di basicità (pH maggiori di 11).

Come conseguenza della perdita dell'impermeabilità della pellicola, i metalli restano direttamente esposti al contatto con l'ambiente che li circonda, e attraverso la porosità della superficie del calcestruzzo da cui avviene l'apporto di ossigeno e acqua, si instaura una reazione chimica di ossido-riduzione in cui il metallo agisce da catodo a seguito della formazione di ruggine che comporta un aumento di volume pari a circa 7 volte quello iniziale occupato dalla barra. Tale aumento di volume non può che provocare tensioni interne di compressione sul calcestruzzo e tensioni di trazione in superficie, causando fessure superficiali in direzione parallela alle barre di armature che culminano con l'espulsione totale del copriferro negli spigoli (fenomeno dello spalling) o con la sua delaminazione nelle superfici piane e verticali.

La profondità di carbonatazione segue una legge parabolica ed è proporzionale tramite una costante K alla radice quadrata del tempo, da cui si evince che raddoppiando lo spessore del copriferro, il tempo di innesco del fenomeno della carbonatazione quadruplica, sottolineando il fondamentale contributo dello spessore del copriferro.

Il coefficiente K esprime la velocità con cui avanza la carbonatazione e dipende sia da fattori ambientali (umidità, temperatura, contenuto di anidride carbonica) sia da fattori legati al calcestruzzo stesso (alcalinità e porosità).

c. Attacco da cloruri – le strutture in classe di esposizione XD e XS

La corrosione causata dal cloruro è una delle principali e più diffuse cause di dissesto delle strutture in calcestruzzo armato, attraverso la presenza di tale ione nei sali disgelanti, nelle salamoie derivanti da lavorazioni industriali e nell'acqua di mare.

L'intensità del fenomeno è direttamente proporzionale al tenore di ossigeno che perviene in prossimità delle barre di armatura, pertanto, sono prevalentemente esposte le strutture aeree al contrario di quelle immerse o interrate che difficilmente raggiungono significative concentrazioni di cloruro in prossimità delle barre durante la vita nominale delle strutture.

In presenza di cloruri, l'acciaio da armatura subisce una corrosione localizzata, denominata pitting, in forma di crateri ("pit") di dimensioni variabili tra 1 e 10mm e può raggiungere valori di velocità corrosiva piuttosto significativi: in presenza di umidità e con contenuto elevato di cloruri in prossimità delle armature, si possono raggiungere velocità di penetrazione di 1÷1,5 mm/anno.

Il meccanismo con cui avanza la corrosione tende a stabilizzare la localizzazione dell'attacco, poiché si crea una concentrazione di cloruri e un abbassamento del pH all'interno della zona di corrosione, e a rinforzare il film passivo in quella circostante. Si comprende quindi come la morfologia dell'attacco sia quella tipica della forma di corrosione localizzata con la comparsa di "crateri". Infatti, il fenomeno di corrosione localizzata, precedentemente richiamato, è meglio noto come pitting (dall'inglese "pit" = "cratere") e può raggiungere valori di velocità corrosiva piuttosto significativi; in calcestruzzo umido e con elevato contenuto di cloruri in prossimità delle armature, si possono anche raggiungere velocità di penetrazione di 1÷1,5 mm/anno.

Pur essendo lo stesso meccanismo di corrosione promosso dai cloruri, a prescindere dalla loro provenienza, la classificazione delle norme UNI EN 206 e UNI 11104 divide l'attacco da cloruri in due classi differenti: XS, se proveniente da acqua di mare oppure XD, se proveniente da altre fonti, come da vasche di processi industriali, piscine, infrastrutture viarie sottoposte ai sali disgelanti.

Il motivo è ascrivibile a specifiche peculiarità dell'ambiente marino. Il tempo necessario al cloruro per raggiungere, in prossimità delle barre, una concentrazione critica sufficiente per innescare il processo corrosivo dipende dalla porosità della matrice cementizia e dallo spessore del copriferro: calcestruzzi con rapporti a/c relativamente bassi e spessore sufficientemente elevati del copriferro possiedono una eccellente durabilità nei confronti di questi ioni aggressivi. Inoltre, la penetrazione del cloruro nel calcestruzzo può essere ulteriormente rallentata ricorrendo all'impiego di cementi pozzolanici e d'altoforno, i cui prodotti di idratazione sono capaci di adsorbire parzialmente il cloruro allungando il tempo necessario perché in prossimità delle barre si raggiunga la concentrazione critica.

d. Ciclo Gelo e Disgelo – Le strutture in classe di esposizione XF

Per una struttura in calcestruzzo anche le variazioni di temperatura sono causa di degrado, in quanto a seguito di un aumento della temperatura, l'elemento si dilata, mentre si contrae in caso di diminuzione. In una struttura iperstatica, quali sono generalmente gli elementi che costituiscono l'ossatura portante di un'opera, l'impedimento alla libera contrazione provoca la nascita di stati tensionali di trazione che, essendo di gran lunga superiori alla resistenza a trazione del calcestruzzo, inducono la comparsa di fessurazioni.

Il degrado delle strutture in servizio, inoltre, può essere esaltato dalle oscillazioni cicliche della temperatura intorno a 0°C, a seguito dell'incremento della pressione dell'acqua presente nei pori capillari del calcestruzzo capace di provocare tensioni distruttive sia nei confronti della matrice cementizia che degli aggregati. È noto che l'abbassamento di temperatura al di sotto di 0°C, provoca la trasformazione dell'acqua liquida in ghiaccio con un corrispondente incremento di volume pari a circa il 9%.

Il punto di congelamento dell'acqua liquida si abbassa all'aumentare delle forze di attrazione superficiale e, quindi, al diminuire della dimensione dei pori. Le forze di attrazione superficiale sono determinate dal fenomeno dell'adsorbimento che è attribuibile, per l'acqua presente nei pori capillari, a legami di tipo solido-vapore (adsorbimento di Wan der Waals).

Se il grado di saturazione del calcestruzzo è superiore al 91,7% (grado di saturazione critica) l'aumento di volume dell'acqua provocato dal congelamento non è più in grado di essere contenuto all'interno nei pori non ancora saturi di acqua. In queste condizioni si generano all'interno del conglomerato delle pressioni capaci di distruggere progressivamente il calcestruzzo, soprattutto se il fenomeno si ripete ciclicamente, per effetto di una tipica rottura a fatica. Il fenomeno degradante si manifesta sotto forma di fessurazioni, sfaldamenti e distacchi superficiali. Se il grado di saturazione è < 91,7%, nell'ipotesi di completo congelamento dell'acqua liquida presente nel poro, il volume di ghiaccio formatosi non sarebbe sufficiente a riempirlo completamente e, conseguentemente, non ci sarebbe acqua in eccesso che verrebbe espulsa.

Ad ogni modo, se il grado di saturazione è < 85%, le pressioni che insorgono per effetto dei cicli di gelo-disgelo non sono sufficienti per superare la resistenza del materiale e, conseguentemente, per produrre un degrado ingegneristicamente significativo.

Il degrado in climi rigidi è ulteriormente esaltato in presenza di sali disgelanti e si manifesta a seguito di diversi processi (chimici, fisici ed elettrochimici) che si manifestano simultaneamente nelle strutture reali in funzione della tipologia di sale utilizzato. I sali disgelanti più comunemente impiegati per la rimozione del ghiaccio o per prevenirne la formazione nel settore stradale e autostradale e nelle pavimentazioni esterne sono costituiti generalmente da cloruro di calcio oppure da miscele di questo

sale con cloruro di sodio, eventualmente mescolati con pietrisco di frantumazione per aumentare l'aderenza degli pneumatici al fondo stradale.

Essi provocano un severo degrado delle strutture in calcestruzzo per effetto del maggior grado di saturazione conseguente allo scioglimento del ghiaccio, a cui si sommano effetti di natura termica ed osmotica.

e. Attacco chimico – le strutture in classe di esposizione XA

Gli aggressivi chimici di origine naturale (non derivanti, cioè da processi industriali) che sono in grado di promuovere il degrado del calcestruzzo possono essere presenti sia nei terreni che nelle acque. Per questo motivo, il progettista che si accinge a progettare una struttura interrata o idraulica deve richiedere che venga effettuata un'analisi chimica finalizzata ad accertare l'eventuale presenza di sostanze aggressive per il calcestruzzo sia nell'acqua che nel terreno a contatto, poiché questo tipo di ammaloramento è più diffuso di quanto non si creda e investe le strutture a contatto con acque o terreni contenenti sostanze chimiche in grado di reagire con alcuni componenti presenti nella pasta di cemento idratata.

Sono innumerevoli le sostanze chimiche che possono promuovere i processi di degrado delle strutture in calcestruzzo e, in linea generale, caratterizzano prevalentemente gli ambienti acidi. Il magnesio (Mg^{++}) e l'ammonio (NH_4^+), generalmente presenti nei più diffusi fertilizzanti usati in agricoltura, danno luogo ad una reazione con lo ione calcio dei prodotti di idratazione del cemento generando sali solubili di calcio che vengono facilmente rimossi dall'azione delle acque. Il magnesio, in particolare, si sostituisce ai composti che garantiscono la resistenza meccanica generando un silicato idrato responsabile della perdita parziale delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo.

L'anidride carbonica libera (cioè non combinata in forma di carbonati o bicarbonato) presente nelle acque sotto forma di acido carbonico (H_2CO_3), reagisce inizialmente con la calce della pasta di cemento formando carbonato di calcio il quale, successivamente, può ulteriormente reagire con l'acido carbonico circostante formando il bicarbonato di calcio; quest'ultimo, per la sua elevata solubilità, viene asportato dalla pasta di cemento. Esiste nelle acque una concentrazione (teorica) di CO_2 libera che è in grado di garantire l'equilibrio, evitando la formazione del bicarbonato di calcio. L'anidride carbonica "aggressiva" rappresenta l'eccesso di anidride carbonica libera nelle acque rispetto al valore di equilibrio, da cui consegue la formazione del bicarbonato che viene facilmente dilavato dall'acqua a contatto con la struttura. In pratica, la matrice cementizia subisce una perdita di massa con conseguente aumento della porosità e riduzione delle prestazioni meccaniche.

Il più diffuso e pericoloso effetto di degrado della classe XA è senza dubbio rappresentato dai solfati presenti nei terreni e nelle acque a contatto con le strutture. Il solfato può provenire dagli scarichi industriali (artificiale) o dalla decomposizione biologica (naturale) di sostanze organiche contenenti zolfo, come avviene per le piante o per i concimi. I terreni alluvionali e quelli coerenti, inoltre, possono contenere pirite

(solfuro di ferro) che in alcune situazioni può dare origine alla formazione massiccia di gesso (CaSO_4).

In ultimo occorre segnalare che gli impianti fognari, le vasche di depurazione e quelle per la raccolta dei liquami sono un ricettacolo di solfati; in questi casi è facile reperire le analisi chimiche effettuate con regolarità dalle Società di gestione, andando immediatamente a individuare la classe di appartenenza.

Gli effetti di degrado causati dall'attacco solfatico si manifestano sotto forma di espansioni o disallineamenti delle strutture, a cui consegue la nascita di quadri fessurativi e di espulsioni di parti dell'elemento; in condizioni estreme si giunge alla completa disgregazione della matrice legante che all'aspetto si presenta come una terra incoerente.

f. Altre forme di degrado – Reazioni Alkali-Aggregato (ASD)

Questo tipo di fenomeno degenerativo del calcestruzzo è determinato da una reazione di alcuni tipi di aggregati reattivi che contengono una particolare forma di silice che reagisce con gli alcali (ioni Na^+ e K^+) presenti nel cemento, in presenza di umidità. La reazione produce silicati di sodio o di potassio, poco cristallizzati, che acquisiscono acqua con effetti espansivi in grado di danneggiare il calcestruzzo con microfessurazioni o sollevamenti di piccoli coni nello strato corticale (pop-out).

A2. Tipologici degli interventi di manutenzione evolutiva

Si allegano alla presente specifica i tipologici ritenuti più significativi, di cui si riporta di seguito l'elenco:

Tabella A2-1: Elenco tipologici di intervento – Parte 1

PONTI, VIADOTTI E CAVALCAVIA		
#	Tipologico Intervento	Codice Tipologico
1.	Guida per la scelta dell'intervento e l'impiego dei materiali	3RE-GEN-00
2.	Ravvivatura e Trattamento Protettivo	3RE-GEN-01
3.	Risanamento standard	3RE-GEN-02
4.	Risanamento Profondo e Ripristino Volumetrico	3RE-GEN-03
5.	Ripristino con FRP	3RE-GEN-04
6.	Ripristino-rinforzo testate travi e teste di ancoraggio cavi	3RE-TRA-01
7.	Rinforzo Travi con Fibre in FRP	3RE-TRA-02
8.	Risanamento corticale	3RE-TRA-03
9.	Cicli protettivi	3RE-TRA-04
10.	Precompressione esterna	3RE-TRA-05
11.	Risanamento corticale intradosso	3RE-SOL-01
12.	Risanamento corticale intradosso	3RE-SBZ-01

Tabella A2-2: Elenco tipologici di intervento – Parte 2

PONTI, VIADOTTI E CAVALCAVIA		
#	Tipologico Intervento	Codice Tipologico
13.	Ringrosso con inghisaggi-spinottature	<i>3RE-BAG-01</i>
14.	Ringrosso con incamiciatura esterna	<i>3RE-PIL-01</i>
15.	Rinforzo con fibre in FRP	<i>3RE-PIL-02</i>
16.	Realizzazione di nuovo giunto a tampone viscoelastico	<i>3RE-GNT-01</i>
17.	Realizzazione nuovo giunto acciaio gomma	<i>3RE-GNT-02</i>
18.	Realizzazione nuovo giunto a grande escursione	<i>3RE-GNT-03</i>
19.	Realizzazione di un nuovo sistema di smaltimento acque	<i>3RE-SSA-01</i>
20.	Impermeabilizzazione manufatti e successiva ripavimentazione	<i>3RE-IMP-01</i>
21.	Prescrizioni materiali - Materiali cementizi	<i>3RE-MAT-01</i>
22.	Prescrizioni materiali - Materiali vari 1 di 2	<i>3RE-MAT-02</i>
23.	Prescrizioni materiali - Materiali vari 2 di 2	<i>3RE-MAT-03</i>