



**Sull'Autostrada A3 nel tratto Napoli-Pompei-Salerno,  
un intervento di recupero di viadotti autostradali  
per rimediare ai danni e per garantire la vita residua richiesta all'opera**

## INDAGINE, DIAGNOSI E TECNICHE DI INTERVENTO PER IL RISANAMENTO DI VIADOTTI AUTOSTRADALI

Ponti & Viadotti

Vito Alunno Rossetti\*  
Antonella Ferraro\*\*

In questa nota si vuole descrivere lo studio di un intervento di restauro di viadotti autostradali nel quale, sulla base della lettura e dell'analisi dei risultati delle indagini, della diagnosi dei fenomeni di degrado, del rilievo della diffusione dei vari fenomeni, si è progettato l'intervento di recupero con l'obiettivo non solo di rimediare ai danni presenti ma anche di garantire la vita residua richiesta all'opera che dopo il ripristino rimarrà a contatto dell'ambiente aggressivo.

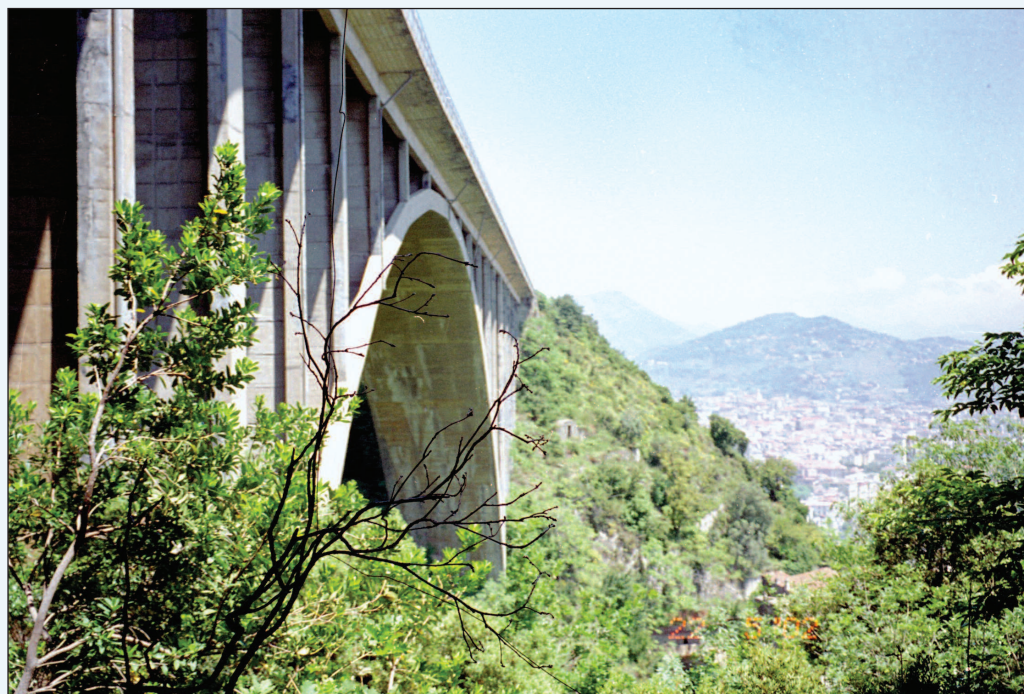


Foto 1 - Il viadotto ad arco

### Introduzione

L'approccio abituale al problema del restauro del calcestruzzo armato è basato essenzialmente sulla valutazione delle condizioni macroscopiche dell'opera. Raramente, prima dell'intervento di ripristino, si procede ad un'indagine approfondita.

Pertanto l'intervento si traduce nella sostituzione di materiale degradato e incoerente con materiale sano - in genere malta a ritiro compensato - con risultati non sempre soddisfacenti per quanto riguarda la durabilità del ripristino. Nell'ambito di un processo di riparazione ingegnerizzato e razionalizzato, l'indagine costituisce la fase chiave e la sua importanza è sottolineata anche dalle Norme UNI EN 1504. Esse consentono di individuare la natura e le conseguenze dei processi di degrado, in particolare la profondità di contaminazione del calcestruzzo: conoscendo tali aspetti, si effettua la scelta delle tecniche di intervento e si individuano le proprietà dei prodotti da impiegare. Inoltre, anche dal punto di vista economico, l'indagine e la successiva interpretazione dei risultati costituiscono le fasi più importanti dell'intervento, poiché permettono di impegnare correttamente le risorse ottenendo nel contempo un ripristino mirato e durevole, così da evitare il "restauro del restauro".

### Il significato del lavoro

L'aspetto peculiare delle attività svolte e lo scopo della presente nota consistono nel tentativo di collegare e rendere dipendenti i metodi, le tecniche e la scelta dei materiali dall'analisi dei risultati dell'indagine. Nell'impostazione delle attività e delle procedure sono state seguite di massima le linee guida proposte dalla Norma UNI EN 1504-9 [1] e altre parti.

### I dodici viadotti sull'A3

Lo studio dell'intervento di restauro ha interessato dodici viadotti in calcestruzzo armato costruiti negli anni Cinquanta, sul tratto Cava dei Tirreni-Salerno dell'Autostrada A3 Napoli-Reggio Calabria.

La struttura principale per sette di essi è costituita da uno o due archi nervati e pile con pilastri e setti su cui poggia l'impalcato (Foto 1); per quanto riguarda gli altri viadotti due di essi sono strutturalmente analoghi ai viadotti già descritti tranne che per l'assenza dell'arco in un caso e anche dei setti nell'altro (Foto 2), mentre i restanti presentano un impalcato formato da travi a cassoni bicellulari o tricellulari su pile (Foto 3).



Foto 2 - Il viadotto a cassoni

## L'indagine: scopo e tecniche

Per la notevole omogeneità di materiali e tecniche esecutive utilizzate per la loro realizzazione, i dodici manufatti sono stati considerati parti di un'unica opera. In effetti il loro invecchiamento è proceduto di pari passo e i segni di degrado presentano caratteristiche analoghe sui diversi manufatti.

A seguito di un'ispezione preliminare è stato elaborato per ognuno dei dodici viadotti un piano di indagini, definendo un certo numero di "punti di prova" (distribuiti sui vari elementi strutturali e in numero variabile da viadotto a viadotto) in ciascuno dei quali eseguire una "serie di prove" come illustrato nelle tabelle seguenti (Tabelle 1 e Foto 4).

Le indagini sono relative essenzialmente ad aspetti legati alla corrosione, poiché non si sono riconosciuti altri fenomeni, come attacchi chimici o effetto di cicli di gelo-disgelo.



Foto 3 - Il viadotto su pile (senza arco e setti)

Misura di potenziale di corrosione con elettrodo rame-solfato di rame, UNI 10174, sui nodi di un reticolo tracciato sulla superficie di  $1 \text{ m}^2$  del calcestruzzo: complessivamente 36 valori/ $\text{m}^2$ .

Misure di resistenza di polarizzazione con corrosimetro (GECOR-6) ricavando localmente (mediante una misura per ogni punto di prova di cui sopra) la densità di corrente di corrosione,  $I_{\text{corr}}$ , il potenziale di corrosione  $E_{\text{corr}}$ , la resistenza elettrica del calcestruzzo  $R$  e la resistività  $\dots$

Misura di copriferro mediante pacometro: su tutti gli elementi di armatura presenti nel punto di prova. Preventivamente si sono eseguiti saggi per individuare il diametro dei ferri di un certo tipo, ad esempio ferri verticali dei pilastri, staffe dei pilastri.

La prova di pull-off è eseguita praticando sul calcestruzzo un taglio cilindrico mediante carotatrice; senza rompere la carota, si incolla sulla superficie una piastrina metallica alla quale può essere applicata una forza tramite un estrattore azionato da una manovella e dotato di dinamometro. La forza porta a rottura per trazione diretta della carota. Il valore misurato è rapportato all'area ricavando quindi la resistenza a trazione in  $\text{N}/\text{mm}^2$ .

È utile per valutare una resistenza a trazione diretta del supporto esistente e quindi l'applicabilità della malta di ripristino. Infatti le malte da ripristino di buona qualità presentano un'elevata aderenza che può risultare inutile se il supporto non è adeguato.

La prova di pull-out consiste nella determinazione della forza necessaria ad estrarre da un elemento di calcestruzzo, un inserto metallico. La forza di estrazione può essere utilizzata, tramite una curva di taratura, per valutare la resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo in situ.

La misura della profondità di carbonatazione è stata effettuata in situ su campioni cilindrici di calcestruzzo (carote) mediante il procedimento riportato nella norma UNI 9944 per valutare se l'armatura è o no in calcestruzzo passivante.

La determinazione del contenuto di cloruri totali nel calcestruzzo è stata eseguita sulle carote prelevate in situ, in conformità alla norma UNI 9944. Le carote sono state tagliate ortogonalmente al loro asse longitudinale alle profondità richieste ottenendo così tre differenti porzioni di calcestruzzo. I segmenti di carota ottenuti hanno lunghezza variabile in funzione dello spessore del copriferro e a seconda che la carota sia passante o non passante (il primo tratto è sempre di 2 cm, il secondo e il terzo sono variabili fino a circa 12 cm).

Tabella 1 - Serie di prove e punto di prova.

Con "serie di prove" si intende la seguente serie di misure effettuate su una superficie di circa  $1 \text{ m}^2$  designata "Punto di prova"

I punti di prova sono stati scelti in genere per indagare su un calcestruzzo apparentemente sano (per esempio ai due lati delle cavillature trasversali, in prossimità di colature ed efflorescenze e nelle zone che presentano ristagni di acqua) o comunque poco degradato (con pochi ferri scoperti). Infatti, sarebbe stato poco significativo concentrare le prove nelle zone in cui le condizioni sono gravi ed il degrado fosse già ad un livello avanzato.

In base alla situazione corrosivistica sono state quindi definite le tecniche di intervento nelle zone prive di fenomeni di degrado avanzato; è evidente peraltro che le zone visivamente e macroscopicamente degradate devono essere tutte riparate; le modalità di intervento proposte tengono conto sia di queste situazioni sia dei risultati ottenuti sul calcestruzzo apparentemente sano.

## L'interpretazione dei risultati

Nei paragrafi che seguono si analizzano e si interpretano i risultati delle indagini allo scopo di:

- ◆ valutare le condizioni della struttura;
- ◆ individuare i fenomeni chimico-fisici all'origine del degrado;
- ◆ scegliere i principi per la riparazione, le modalità di intervento e, in particolare, la quantità del materiale da rimuovere e sostituire;
- ◆ definire delle linee guida per una corretta esecuzione dei lavori di ripristino per i diversi elementi strutturali;
- ◆ precisare le caratteristiche e requisiti dei materiali da utilizzare.

## Il potenziale di corrosione

I potenziali delle armature sono in relazione con le condizioni di corrosione.

Ciò ha permesso di individuare intervalli tipici di potenziale in funzione delle condizioni di corrosione fatti propri da diverse Normative come la UNI 10174 [2] e la ASTM C 876-91 [3].

Alcune Norme associano ad ogni intervallo di potenziale una probabilità di trovare corrosione. La ASTM C 876-91, prevede una probabilità di corrosione trascurabile (< 10%) se  $E > -200$  mV e una probabilità di corrosione molto elevata (> 90%) se  $E < -350$  mV (tale criterio è in parte riproposto anche nella Norma UNI 10174). Per valori di potenziale tra  $-200$  e  $-350$  mV non si ha certezza dello stato di corrosione (probabilità del 50%).

Anziché riportare tutti i dati, nel grafico di Figura 1 sono stati considerati il valore minimo e il valore massimo dei potenziali relativi a ciascuna mappatura (misure ottenute con elettrodo rame-solfato di rame, su aree di  $1 \text{ m}^2$  secondo la UNI 10174).

Si è riscontrato che:

- ◆ su aree limitate ci sono forti variazioni di potenziale (la massima oscillazione è  $-746$  mV, da  $173$  a  $-573$  mV);
- ◆ i valori di potenziale non sono molto bassi. In particolare, solo in pochi casi, quattordici valori su centocinquantesette mappature, sono stati ottenuti valori minimi minori di  $-350$  mV che indicano una probabilità molto alta di corrosione;
- ◆ settantatre valori (circa il 46% dei risultati), risultano maggiori di  $-200$  mV indicando quindi una probabilità molto bassa (< 10%) di attività di corrosione;
- ◆ settanta valori (45% dei risultati) ricadono nell'intervallo  $-200$ – $-350$  mV che, secondo la Norma ASTM, costituisce un intervallo di incertezza sulla presenza o meno di fenomeni di corrosione, circa 50% di probabilità.

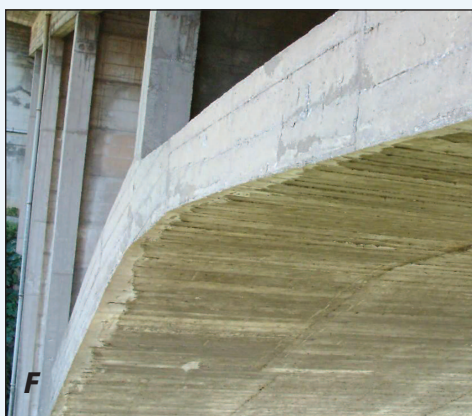
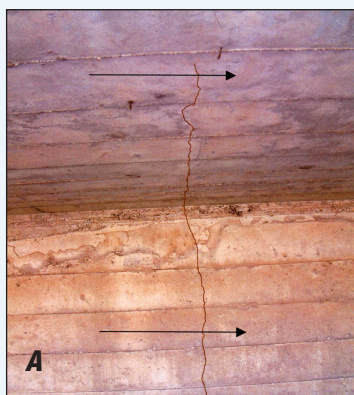


Foto 4A, 4B, 4C, 4D, 4E, 4F, 4G - Tipologie dei "punti di prova"

A - Cavillature su trave e soletta - Calcestruzzo apparentemente sano; B - Colature ed efflorescenze, senza ferri scoperti - Calcestruzzo apparentemente sano; C - Pila con alcuni ferri scoperti. Si osservi una delle caratteristiche "forchette" situate in corrispondenza dei giunti; D - Intradosso arco; E - Estradosso arco; F - Faccia verticale arco lato mare

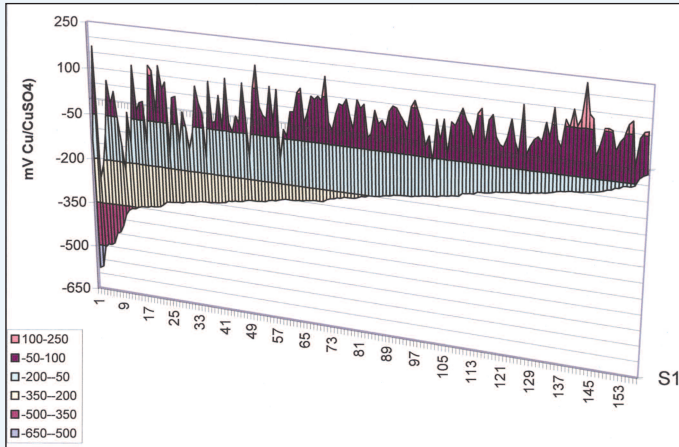


Figura 1 - I valori minimi e massimi di potenziale corrispondenti a ciascuna mappatura (di area di 1 m<sup>2</sup>)

## Le velocità di corrosione

Le misure di velocità di corrosione nelle aeree in cui sono stati misurati i potenziali, indicano che:

- ◆ per valori di potenziali bassi si hanno valori di velocità di corrosione elevate ( $> 0,171 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , valore al di sopra del quale la velocità di penetrazione raggiunge il valore critico di  $2 \mu\text{m}/\text{anno}$ );
- ◆ diversi valori di velocità di corrosione superiore al valore critico si hanno anche in corrispondenza di valori di potenziale non particolarmente bassi (già da  $-150$  e soprattutto per potenziali  $< -200$ ). Questo conferma come ad uno stesso valore di potenziale misurato alla superficie possono corrispondere condizioni diverse di corrosione in funzione di alcuni fattori quali le condizioni di umidità, il contenuto di cloruri, il copriferro e il processo di carbonatazione.

## Il confronto tra velocità e potenziale di corrosione

Confrontando i valori di potenziale e velocità di corrosione misurati, si può verificare l'affidabilità delle probabilità associate ai diversi intervalli di corrosione indicate dalla Norma ASTM C 876-91.

I valori di potenziale e velocità di corrosione (entrambi misurati con il Gecor) sono riportati in Figura 2; alla luce dei limiti indicati nella Norma ASTM, è possibile osservare che:

- ◆ i dati ottenuti confermano che - a valori di potenziale minori di  $-350$  mV - corrisponde una probabilità di corrosione maggiore del 90%; infatti per tali valori tutte le velocità di corrosione sono superiori al limite critico (indicato sul grafico con la retta orizzontale rossa);
- ◆ in corrispondenza di potenziali maggiori di  $-200$  mV sono state ottenute velocità di corrosione che superano solo in pochi casi il va-

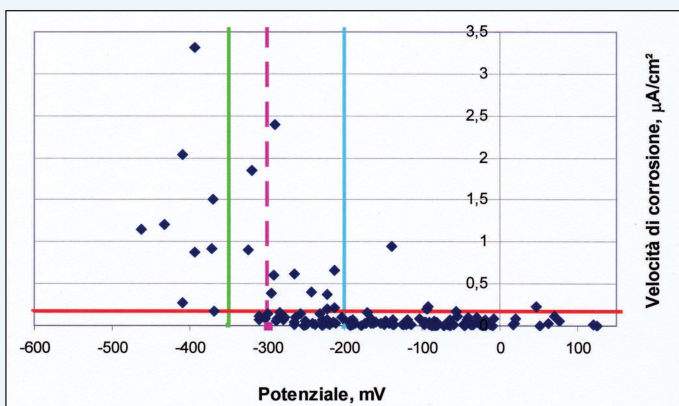


Figura 2 - Il potenziale di corrosione in relazione alla velocità di corrosione e agli intervalli indicati dalla ASTM C 876-91

lore critico (cinque volte su settantatre misure); anche in questo caso risulta ottimamente confermata la probabilità associata a tale intervallo espressa dalla Norma (probabilità di corrosione minore del 10%);

- ◆ per i valori di potenziale compresi nell'intervallo tra  $-350$  e  $-200$  mV, solo sette volte su settanta è stata riscontrata una velocità di corrosione superiore al valore limite critico; questo risultato indica che la probabilità di corrosione è nettamente inferiore a quella proposta dalla ASTM (50%);
- ◆ in base a questi risultati il limite di probabilità elevata di corrosione in atto si potrebbe portare a  $-300$  mV (indicato sul grafico con la retta tratteggiata).

## La resistività

I valori di resistività sono in generale molto bassi. Infatti, cinquantuno valori su un totale di centoquarantadue risultano inferiori a  $20 \text{ k}\Omega\text{cm}$  (trentadue addirittura al di sotto di  $10 \text{ k}\Omega\text{cm}$ ) e centoquattro valori inferiori a  $50 \text{ k}\Omega\text{cm}$ , con solo undici misure superiori a  $100 \text{ k}\Omega\text{cm}$ . Poiché si suppone che per il confezionamento del calcestruzzo sia stato utilizzato un cemento Portland, considerando quanto riportato in letteratura (Tabella 2) si ritiene che questi valori siano caratteristici di un calcestruzzo molto umido e bagnato periodicamente dalla pioggia.

$\rho$ k $\Omega\text{cm}$	Cemento Portland
5-20	Molto umido, immerso, zona degli spruzzi
10-40	Esterno, bagnato dalla pioggia
20-50	Esterno, riparato dalla pioggia, rivestito, idrorepellente, non carbonatato
100 o più	Come sopra ma carbonatato
300 o più	Clima interno, carbonatato

Tabella 2 - I valori di riferimento per la resistività elettrica del calcestruzzo in opere con età maggiore di dieci anni [4]

Se si osservano inoltre i valori di velocità di corrosione ( $I_{\text{corr}}$ ) in funzione alla resistività (Figura 3) si può notare che non sempre a bassi valori di resistività corrispondono velocità di corrosione elevate. Le correlazioni tipiche riportate in letteratura (Tabella 3) per questo campo di resistività non necessariamente risultano verificate.

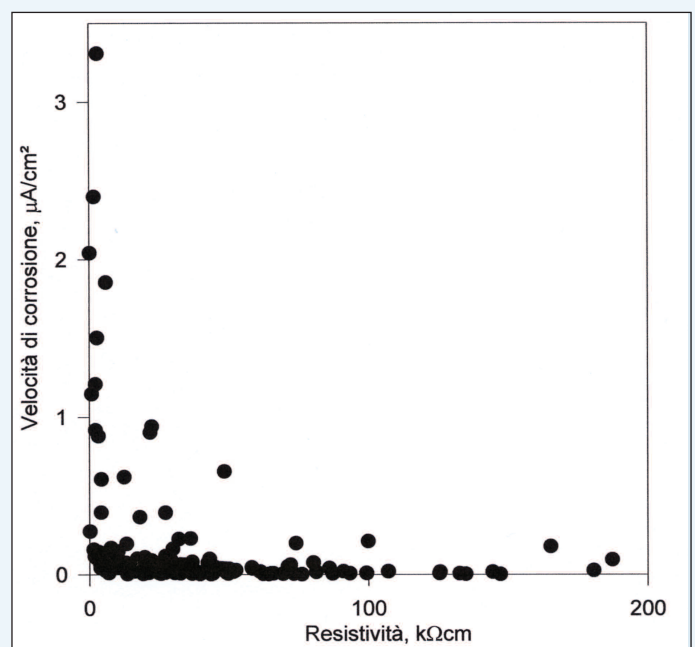


Figura 3 - Le velocità di corrosione in funzione della resistività

$\rho$	$i_{corr}$
> 100 k $\Omega$ -cm	Trascurabile (< 0,171 $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )
100-50	Bassa
50-10	Moderata
< 10	Alta

Tabella 3 -  
La correlazione tra  
resistività elettrica e  
velocità di corrosione [5]

## Le misure di distribuzione dello ione cloruro

I valori ottenuti sul calcestruzzo sono stati espressi come percentuale in peso sul cemento (si è ipotizzato un dosaggio di cemento di 300 kg e un calcestruzzo di massa volumica di 2.350 kg) per verificare se il valore di concentrazione superasse lo 0,4% in peso sul cemento in prossimità dell'armatura, valore massimo tollerabile prima che intervengano i fenomeni di corrosione. I valori medi per i tre settori delle carote, riportati nella Tabella 4, evidenziano in molti casi un calcestruzzo contaminato da cloruri, specialmente per quei manufatti che si trovano più vicini al mare. In alcuni viadotti sono stati riscontrati valori massimi delle concentrazioni di cloruro particolarmente rilevanti, fino a 5,3% in un caso e maggiore dell'1% su tre manufatti. In diversi casi valori superiori al valore critico 0,4% sono stati riscontrati anche a profondità elevate (circa 10 cm), maggiori dello spessore del copriferro. Le concentrazioni medie più elevate in alcuni casi si trovano negli strati interni, in altri negli strati centrali delle carote (Tabella 4). In base ai valori medi, ottenuti alle tre profondità per ciascun viadot-

Viadotto	Percentuale media dei cloruri (in peso sul cemento) [%]		
	Esterno	Centrale	Interno
Rotolo (undici misure)	0,424	0,346	0,310
Surdolo (sei misure)	0,183	0,261	0,182
S. Liberatore (una misura)	0,313	0,548	0,509
Svincolo Vietri (tre misure)	0,183	0,196	0,117
Vietri (tre misure)	0,196	0,587	0,222
Madonna degli Angeli (dodici misure)	0,378	0,196	0,228
Caiafa (tredici misure)	0,542	0,584	0,337
Olivieri (undici misure)	0,239	0,175	0,076
Madonna del Monte (tredici misure)	0,577	0,216	0,144
Canalone (sette misure)	0,420	0,122	0,235
Orfanotrofo (quattro misure)	1,605	1,233	0,362
S. Eremita (tre misure, unico prelievo)		0,292	

Tabella 4 - I valori medi per ciascun viadotto delle concentrazioni di cloruri alle diverse profondità

to, è stato possibile calcolare la diffusività degli ioni cloruro nel calcestruzzo di questi manufatti.

A tal fine si è impiegata la seconda legge di Fick che esprime la diffusione ionica in un mezzo eterogeneo

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

dove:

C è la concentrazione dello ione cloruro in peso rispetto al cemento;

x è la profondità del calcestruzzo rispetto alla superficie esterna;

t è il tempo in secondi;

D è il coefficiente di diffusione del cloruro nel calcestruzzo (cm<sup>2</sup>/s).

Per i casi semplici rispetto alla geometria del manufatto [6], assumendo D e la concentrazione alla superficie C<sub>0</sub> costanti e, nell'ipotesi che all'interno del calcestruzzo tale concentrazione sia all'inizio nulla, la soluzione dell'equazione è:

$$C_c(x,t) = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$

dove:

C(x,t) = la concentrazione alla profondità x al tempo t;

erf = la funzione di errore.

Considerando che l'età delle opere al momento del prelievo è cinquant'anni, dalla serie dei valori sperimentali di x (valori di profondità di prelievo) e dei corrispondenti valori di concentrazione, si sono ricavati i valori:

D = 3,294\*10<sup>-8</sup> cm<sup>2</sup>/s;

C<sub>0</sub> = 0,493% (in peso sul cemento).

Con tali valori è stato possibile calcolare, al variare del tempo, la profondità in corrispondenza della quale la concentrazione di cloruro raggiunge il valore di 0,4% in peso sul cemento (Figura 4).

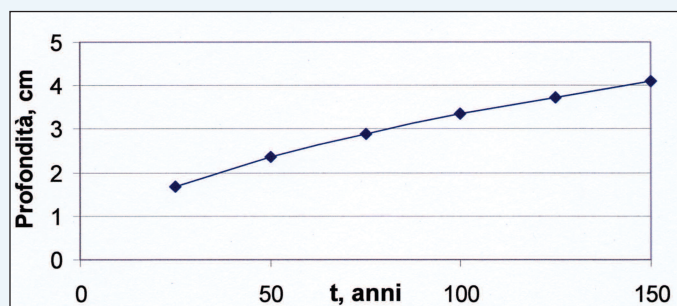


Figura 4 - Le profondità raggiunte dalla concentrazione limite degli ioni cloruro (0,4% in peso sul cemento) nel tempo

La Figura 4 mostra che se nella realizzazione delle opere fosse stato assicurato un copriferro almeno di 3,5 cm (come richiesto dalla Norma del 1939), secondo il nostro studio i manufatti non avrebbero avuto problemi di degrado causati dall'ingresso dei cloruri dell'ambiente per almeno cento anni. Per i dodici manufatti i valori medi del copriferro variano da 2,5 a 3,6 cm con valori anche molto bassi (si veda la distribuzione in Figura 5). In effetti si è riscontrato che i manufatti con un copriferro medio maggiore presentano un migliore stato di conservazione.

L'Eurocodice 2 per opere di classe di esposizione XS1 (classe cui possono essere assegnate le opere in questo caso) assume prescrizioni molto più restrittive: di 5,5 cm nel caso di cento anni (vita utile prevista per questa classe di opere), mentre dal nostro calcolo per lo stesso tempo è sufficiente un copriferro di 3,3 cm.

## Le misure di carbonatazione e il copriferro

I valori delle profondità di carbonatazione variano in un campo molto ampio, compreso tra 2 mm e 130 mm, con valori medi di circa 20 mm sui viadotti che si trovano in genere in uno stato di degrado non grave e valori medi compresi tra 30 e 40 mm per i viadotti che presentano uno stato di degrado mediamente avanzato e di 55 mm nel caso di viadotti di degrado molto avanzato.

Per ciascun viadotto, la profondità di carbonatazione è più pronunciata sulle spalle, abbastanza superficiale sugli archi (per i viadotti ad arco) e sugli altri elementi strutturali risulta in linea con i valori medi.

In molti casi il fronte di carbonatazione ha raggiunto e superato le armature.

Riportando su un grafico (Figura 5) la distribuzione delle misure delle profondità di carbonatazione e degli spessori dei copriferro, è possibile osservare come la carbonatazione, essendo un fenomeno fi-



sico correlato a calcestruzzi di caratteristiche poco variabili, interessa per lo più profondità di 5-40 mm. Invece, gli spessori dei copriferro - influenzati dall'operato della manovalanza - presentano una distribuzione delle misure più ampia e più vicina ad una distribuzione normale (copriferro medio 32 mm deviazione standard 19 mm, carbonatazione media 24 mm deviazione standard 19 mm). Anche in questo caso, come si può vedere dalla Figura 5, se il copriferro fosse effettivamente risultato di 3,5 cm, nella grande maggioranza dei casi il fronte di carbonatazione non avrebbe raggiunto l'armatura.

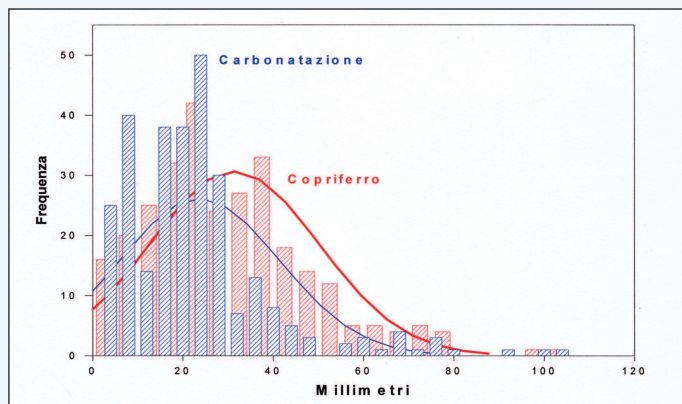


Figura 5 - Distribuzione delle profondità di carbonatazione e degli spessori del copriferro

## Le resistenze meccaniche

I risultati ottenuti dalle prove di pull-out e pull-off evidenziano un calcestruzzo con caratteristiche meccaniche generalmente buone. In particolare, i valori medi di resistenza a compressione variano in genere da circa 40 a circa 50 MPa. Tuttavia, in alcuni casi sono stati riscontrati anche dei valori minimi particolarmente bassi, fino a 15 MPa. I valori medi di resistenza a trazione sono generalmente buoni (considerando che si tratta di misure di resistenza a trazione diretta), compresi per la maggior parte tra circa 2,1 MPa e 3,0 MPa e solo in quattro viadotti sono stati ottenuti valori medi compresi tra 1 e 2 MPa. Tuttavia, in diversi casi i valori minimi sono risultati particolarmente bassi (< 0,5 MPa e in un paio di casi non è stato possibile rilevare la resistenza). Tali valori sono stati ottenuti in genere in corrispondenza dei

valori bassi di resistenza a compressione e, per diversi viadotti, specialmente sulle spalle. Occorre quindi sottolineare che generalmente i valori di resistenza a trazione ottenuti mostrano un supporto compatibile con l'aderenza delle tipiche malte da ripristino, salvo in alcuni casi che per lo più si presentano sulle spalle.

## I principi e le tecniche di intervento

Nei viadotti esaminati il degrado è provocato principalmente dalla corrosione, dovuta in alcuni viadotti, al solo processo di carbonatazione e, nella maggior parte di essi, anche alla presenza di concentrazioni elevate di cloruri. Le situazioni che si presentano, anche nell'ambito di uno stesso manufatto, sono svariate: si riscontra infatti un fronte di carbonatazione che per la maggior parte dei casi non supera lo spessore del copriferro, in molti altri la profondità di carbonatazione supera le armature (di non oltre 20 mm), in alcuni casi la profondità di carbonatazione supera l'armatura di oltre 20 mm. Per una situazione di questo tipo, con differenze da punto a punto, sono impraticabili le metodiche schematizzate nel Rilem 124 SRC [7].

## La Norma tecnica UNI ENV 1504-9

La Norma tecnica UNI ENV 1504-9 [8] propone principi e metodi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo che hanno subito o potrebbero subire danni o deterioramenti e fornisce una guida alla scelta di prodotti e sistemi che siano appropriati per l'uso previsto. Per i manufatti indagati, ci interessano i principi e metodi proposti sia per una struttura soggetta alla corrosione da carbonatazione sia da carbonatazione e da cloruri e in ogni caso volti alla ricostituzione delle sezioni originarie degli elementi strutturali di calcestruzzo, assicurando per la vita residua richiesta alla struttura prevenzione e protezione nei confronti di successivi fenomeni di degrado. Le possibili tecniche di intervento selezionate, anche in funzione dell'entità del degrado sono basate sui principi elencati nella Tabella 5 (dedotti dalla Norma citata). In particolare, nel caso dei viadotti dove la corrosione già in atto è dovuta alla perdita chimica di alcalinità del calcestruzzo nel copriferro (carbonatazione) o comunque esiste un rischio di corrosione futuro dovuto a questi fenomeni e nel caso di perdita fisica del copriferro, sono stati considerati, come base dei metodi applicati, i principi 1, 2, 3, 7, 8 e 9 della Tabella 5. I suddetti metodi sono stati adattati in funzione dell'estensione, dello stato di degrado e delle caratteri-

Principio e sua definizione	Metodo
1. Protezione contro l'ingresso. Riduzione o prevenzione dell'ingresso di agenti aggressivi.	1.4 Riempimento delle fessure. 1.5 Trasformare le fessure in giunti.
2. Controllo dell'umidità	2.1 Impregnazione idrofobica. 2.3 Protezione o rivestimento.
3. Ripristino del calcestruzzo originale di un elemento della struttura nella forma e alla funzione specificate originariamente.	3.3 Applicazione a spruzzo o per colaggio di calcestruzzo o malta, locale o generalizzata.
7. Conservazione e ripristino della passività. Creazione delle condizioni chimiche in cui la superficie dell'armatura viene mantenuta o riportata ad una condizione di passività.	7.2 Sostituzione parziale del calcestruzzo contaminato o carbonatato. 7.3 Ricalcinizzazione elettrochimica del calcestruzzo carbonatato. 7.4 Ricalcinizzazione del calcestruzzo carbonatato ottenuta mediante parziale ripassivazione per contatto e diffusione di idrossido, ottenuta con un rivestimento di malta ricca di cemento e contenente espansivo a base di CaO. 7.5 Estrazione elettrochimica dei cloruri.
8. Aumento della resistività elettrica del calcestruzzo	8.1 Limitazione del contenuto di umidità mediante trattamenti di superficie, rivestimenti o ripari.
9. Controllo catodico	9.1 Limitazione del contenuto di ossigeno (al catodo) mediante rivestimento della superficie.
10. Protezione catodica	10.1 Applicazione di un potenziale elettrico.
11. Controllo delle aree anodiche. Creazione delle condizioni in cui le aree potenzialmente anodiche dell'armatura sono impossibilitate a rendere parte alla reazione di corrosione.	11.3 Applicazioni di inibitori al calcestruzzo.

Tabella 5 - I principi e i metodi considerati per il ripristino dei viadotti (dedotti dalla UNI ENV 1504-9)



stiche meccaniche del supporto, definendo le opportune tecniche di intervento. Nei viadotti in cui il calcestruzzo risulta oltre che generalmente carbonatato anche contaminato da cloruri, i metodi di elezione sarebbero la rimozione dei cloruri o la protezione catodica che però richiedono investimenti consistenti in aggiunta agli interventi per la ricostituzione delle sezioni originarie, nonché costi di manutenzione. D'altra parte non si può ignorare lo stato avanzato di corrosione riscontrato e il rischio a cui si va incontro se si ricorre ad intervento a toppe: una ripresa a breve termine dei fenomeni di corrosione. Pertanto, escludendo gli interventi più indicati perché costosi, si è ritenuto attuabile per questi manufatti il controllo delle aree anodiche mediante la combinazione dell'applicazione di inibitori di corrosione a base di silani [9] (metodo 11.3) e la riduzione della circolazione di corrente mediante applicazione di un sistema protettivo ed essiccante (metodi 2.3 e 8.1) in aggiunta ai silani, che pure hanno effetto essiccante. Per ciascun elemento strutturale, a seconda dei casi, sono state scelte le modalità operative e l'impiego dell'inibitore [10] di corrosione e del materiale più appropriato (malta o betoncino o calcestruzzo) allo scopo di ricreare complessivamente le condizioni chimiche che favoriscono il ripristino di passività della superficie dell'armatura e di ricostituire la sezione. Di seguito vengono mostrati la schematizzazione delle fasi dell'intervento di restauro, un esempio degli interventi previsti per un viadotto ed un esempio di scheda di intervento per un elemento strutturale; per ciascun prodotto vengono altresì indicate le caratteristiche e prestazioni previste per l'applicazione.

Elemento strutturale	Tipologia dei materiali
Pile in corrispondenza dei giunti - Pilastrini esterni	Inibitore di corrosione, malta tipo A + sistema protettivo filmogeno poliuretano elastico
Pilastrini interni e sette pilastrini (Pile situate non in corrispondenza dei giunti)	Inibitore di corrosione, malta tipo E 2 + sistema protettivo filmogeno poliuretano elastico
Testate travi e testate solette	Inibitore di corrosione, betoncino tipo G
Arco	...

Tabella 6 - L'elenco degli interventi previsti per i vari elementi strutturali per il viadotto Caiata

Pile in corrispondenza dei giunti - Pilastrini esterni	
<b>Metodo di ripristino</b>	
L'intervento di ripristino delle pile in corrispondenza dei giunti - pilastrini esterni, attuando i principi 2, 3, 7, 8 e 11 e relativi metodi come previsto nella tabella 6, prevede l'impiego (sull'intera superficie) di un <i>inibitore di corrosione</i> organico a base silanica ad azione penetrante ed idrorepellente spruzzabile. Si procede l'intervento con una <i>malta di tipo A</i> apportando uno spessore medio di 3 cm e successiva applicazione di un <i>sistema protettivo</i> di spessore complessivo pari a 250 µm di film secco. Si dovrà eliminare il materiale impiegato nei precedenti interventi di ripristino	
<b>Fasi esecutive dell'intervento</b>	
Scarifica meccanica del calcestruzzo	
Riposizionamento dei ferri di armatura affioranti, sostituzione dei ferri risultanti particolarmente corrosi e aggiunta di nuove armature	
Pulizia delle superfici	
Applicare l'inibitore di corrosione mediante spruzzo a bassa pressione in tre mani	

Tabella 7 - Un esempio di scheda tecnica di intervento su un elemento strutturale

Tipo malta	Caratteristiche
Malta tipo A	Malta cementizia, premiscelata, bicomponente, ad espansione contrastata con maturazione in aria, tixotropica, fibrorinforzata con fibre metalliche flessibili ed inossidabili e fibre sintetiche poliacriliche
Malta tipo C	Malta cementizia, premiscelata, reoplastica, a ritiro compensato, colabile, fibrorinforzata con fibre metalliche rigide in acciaio a basso tenore di carbonio

Tabella 8 - L'elenco e descrizione sintetica generale dei materiali previsti

## Conclusioni

Per affrontare il problema del restauro del calcestruzzo armato in modo razionale e consapevole come sottolineato anche dalle UNI ENV 1504-9, non si può prescindere da un'accurata ed estesa indagine. Questa fase costituisce una parte essenziale della progettazione di un intervento poiché solo in questo modo è possibile individuare i fenomeni del degrado e le caratteristiche dei materiali del ripristino con l'obiettivo di realizzare interventi durevoli ed evitare il "restauro del restauro". In questa nota si è descritto lo studio di un intervento di restauro di viadotti autostradali il cui scopo principale è stato di tentare di collegare e rendere dipendenti dall'analisi dei risultati dell'indagine, i metodi, le tecniche e la scelta dei materiali. Sulla base della lettura e dell'analisi dei risultati, oltre a formulare la diagnosi dei fenomeni di degrado e valutare le condizioni delle varie parti dei manufatti, si è progettato l'intervento di recupero con l'obiettivo sia di rimediare ai danni presenti sia di garantire la vita residua richiesta all'opera che dopo il ripristino rimane a contatto dell'ambiente aggressivo. ■

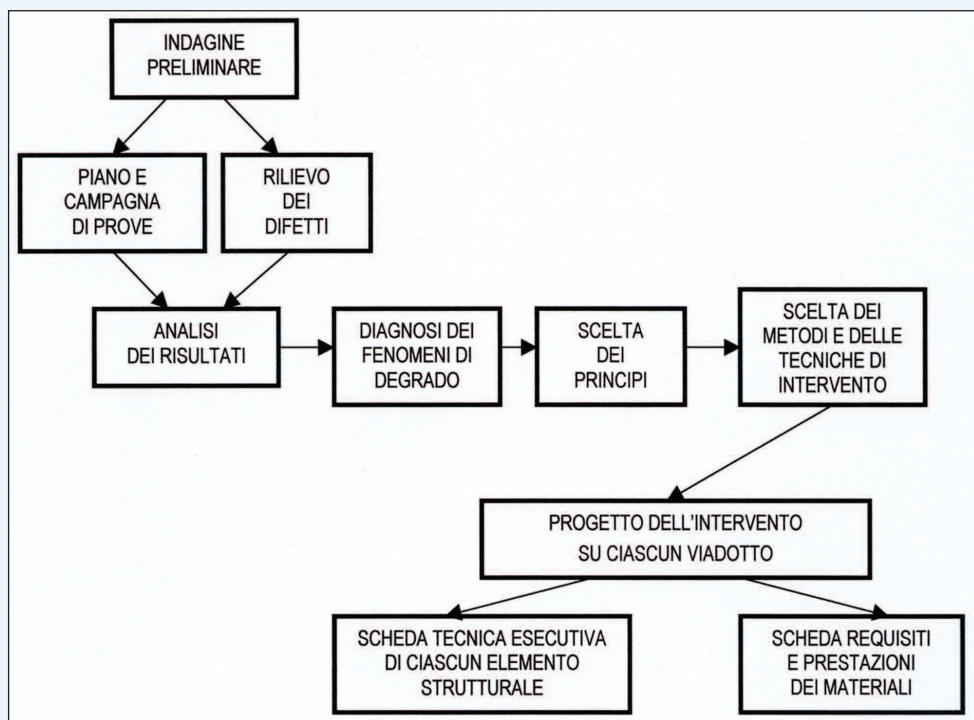


Figura 6 - La schematizzazione delle fasi dell'intervento di restauro



## Prodotto Tipo A

Malta cementizia, premiscelata, bicomponente, ad espansione contrastata con maturazione in aria, tixotropica, fibrorinforzata con fibre metalliche flessibili ed inossidabili. Le fibre presenti in quantità > 0,9% in peso sulla malta, sono caratterizzate da un rapporto di aspetto l/d pari a 125, lunghezza pari a 30 mm e da una resistenza a trazione > 1.900 MPa. Tale malta contiene anche fibre sintetiche poliacriliche in quantità > 0,08%, di diametro di 16 µm e lunghezza di 8 mm.

Requisiti	Descrizione
Spandimento, %	Consistenza, secondo UNI 7044, > 70% ottenuta con il 20% d'acqua di impasto
Espansione contrastata, % un giorno	Espansione contrastata, secondo UNI 8147, > 0,04% a un giorno
Espansione contrastata con stagionatura all'aria, % un giorno	Espansione contrastata con maturazione in aria, secondo UNI 8147 modificata, > 0,04% a un giorno
Esito del Test di inarcamento/imbarco in aria	Inarcamento C
Aderenza al calcestruzzo, MPa	Aderenza secondo UNI EN 1766 al calcestruzzo trattato con inibitore a base di silani $\geq 1.5$ MPa a ventotto giorni
Aderenza ai ferri d'armatura, MPa	Aderenza all'acciaio $\geq 20$ MPa secondo Rilem CEB-FIP RC 6-78
Resistenza a compressione, MPa un giorno, tre giorni, ventotto giorni	Resistenza a compressione $\geq 25$ MPa a un giorno $\geq 35$ MPa a tre giorni e $\geq 60$ MPa a ventotto giorni, secondo UNI EN 196/1
Resistenza a flessione, MPa un giorno, tre giorni, ventotto giorni	Resistenza a flessione $\geq 8$ MPa a un giorno, $\geq 9$ MPa a tre giorni e $\geq 11$ MPa a ventotto giorni, secondo UNI EN 196/1
Modulo elastico statico, MPa	Modulo elastico $\geq 23.000$ MPa, secondo UNI 6556
Profondità media di penetrazione dell'acqua, mm	Profondità media di penetrazione dell'acqua secondo ISO EN 7031-94, < 5 mm
Resistenza cicli di gelo-disgelo, numero di cicli	Nessun degrado dopo un numero di cicli di gelo-disgelo > 50, secondo EN 104-840-3
Permeabilità allo ione Cl <sup>-</sup> , m <sup>2</sup> /s	Coefficiente di diffusione dello ione Cl <sup>-</sup> < $10^{-12}$ m <sup>2</sup> -s <sup>-1</sup> , secondo metodo TEL
Resistenza ai solfati, numero di cicli	Nessun degrado dopo quindici cicli, secondo ASTM C88
Spessore carbonatato in dieci anni	Spessore carbonatato < 2 mm a dieci anni, secondo UNI 9944
Prova di fessurabilità, centottanta giorni	Nessuna fessura a centottanta giorni. Resistenza alla fessurazione > di centottanta giorni, secondo O Ring test

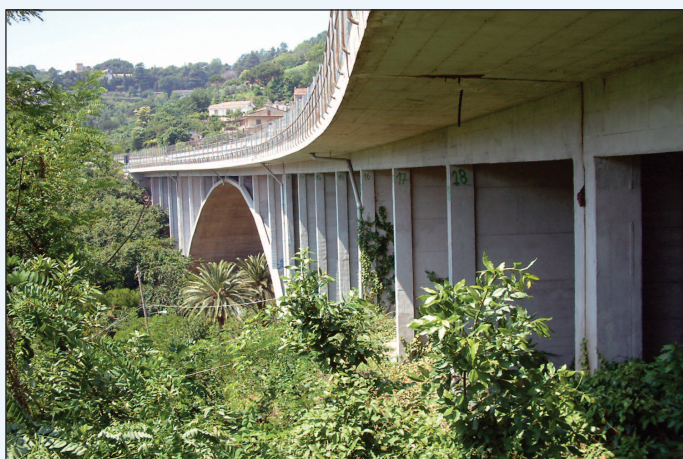
Tabella 9 - Un esempio di scheda prestazionale dei requisiti

\* Professore di Chimica Applicata e Tecnologia dei Materiali della Facoltà di Ingegneria dell'Università "La Sapienza" di Roma

\*\* Ingegnere della Facoltà di Ingegneria dell'Università "La Sapienza" di Roma

## Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare la committente SPEA, in particolare l'Ing. G. Nebbia, l'Ing. F. Cecchi e il Geom. D. Russino, per la collaborazione e l'assistenza.



## BIBLIOGRAFIA

- [1]. V.A. Rossetti - Restauro del ponte Tové - Applicazione della UNI ENV 1504-9, Strade & Autostrade, pagg. 54-59, 6-2001.
- [2]. UNI 10174:1993 - Istruzioni per l'ispezione delle strutture di cemento armato esposte all'atmosfera mediante mappatura di potenziale.
- [3]. ASTM C876-91(1999) - Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
- [4]. A. Bazzoni, B. Bazzoni, L. Lazzari, L. Bertolini, P. Pedeferrì - Field Application of Cathodic Prevention on Reinforced concrete Structures, Corrosion 96, NACE, Houston, paper 312, 1996.
- [5]. Strategic Highway Research Program (SHRP), 2001 - Corrosion Rate Based on Polarization Resistance.
- [6]. V.A. Rossetti - Il calcestruzzo - Materiali e tecnologia, Ed. McGraw-Hill, 2003.
- [7]. RILEM, Technical Recommendation 124 SRC - Guidelines to Repair Strategies for Concrete Structures Damaged by Reinforcement Corrosion, 1993.
- [8]. UNI ENV 1504-9:1999 - Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità - Principi generali per l'uso dei prodotti e dei sistemi.
- [9]. H. Saricimen, M. Mohammad, A. Quddus, M. Shameem, M.S. Barry - Effectiveness of concrete inhibitors in retarding rebar corrosion, Cement & concrete Composites (2002), 24, 89-100.
- [10]. G. Batis, A. Routoulas, E. Rakanta - Effects of migrating inhibitors on corrosion of reinforcing steel covered with repair mortar, Cement & Concrete Composites (2003), 25 (1), 109-115.