

PROF. VITO ALUNNO ROSSETTI
Università degli Studi di Roma La Sapienza
Facoltà di Ingegneria

DOTT. ING. ANTONELLA FERRARO
Libero professionista

DOTT. ING. PIETRO MAZZOLI
Direttore dell'area Ingegneria dell'Impresa Pizzarotti & C. S.p.A.

**“OPERE PER IL COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE DI
CONNESSIONE TRA BRESCIA, BERGAMO E MILANO:
DURABILITÀ DEI CALCESTRUZZI”**

Opere per il collegamento autostradale di connessione tra Brescia, Bergamo e Milano: durabilità dei calcestruzzi

1. Premessa

L'aspetto durabilità ha assunto negli ultimi anni sempre più rilevanza, tanto che anche nelle nuove Norme Tecniche si richiede, per la prima volta, di tener conto delle classi di esposizione ambientale di cui alla norma UNI EN 206-1: 2006.

Per un'opera complessa, dove i microclimi e i requisiti strutturali da soddisfare sono molteplici, il numero dei tipi di calcestruzzo che ne scaturisce può essere cospicuo. Il lavoro di analisi e sintesi per contenere in un insieme limitato le miscele da adottare che soddisfino i requisiti di durabilità e di resistenza strutturale può essere molto laborioso.

Occorre inoltre evidenziare che attualmente si ha la tendenza a costruire con resistenze e dosaggi di cemento elevati (derivanti anche dal soddisfacimento dei limiti per le classi di esposizione), che se da un lato dovrebbero assicurare la durabilità, dall'altro esaltano i fenomeni termici del calcestruzzo che sono tra le prime cause della formazione di fessure, specialmente su particolari manufatti lunghi o massivi. La presenza di fessure, facili vie preferenziali per agenti aggressivi ambientali, mette gravemente a repentaglio la durabilità dell'opera.

La Concessionaria Bre.Be.Mi. per la realizzazione del collegamento autostradale di connessione tra Brescia, Bergamo e Milano, ha affidato al General Contractor Consorzio BBM le attività di progettazione esecutiva e costruzione dell'opera. Il consorzio è formato da Impresa Pizzarotti & C. S.p.A. e dal CCC (Consorzio Cooperative Costruzioni).

Per la realizzazione delle opere gli scriventi, mettendo a fuoco le problematiche di cui sopra, hanno studiato dal punto di vista della durabilità gli aspetti tecnologici e progettuali delle opere, in particolare dei viadotti, adottando in alcuni casi accorgimenti non consueti nella pratica corrente, quali soluzioni alternative o migliorative rispetto al Capitolato, allo scopo di garantire la vita nominale, designata anche vita in servizio nelle Linee Guida sul calcestruzzo strutturale.

2. Analisi delle tipologie di calcestruzzi e attribuzione della classe di esposizione

La complessità dell'opera, 62 km di tracciato autostradale, la varietà dei microclimi riconoscibili per le varie parti costruttive e la combinazione con le varie resistenze previste per i requisiti strutturali avrebbe portato alla definizione di numerose tipologie di conglomerati cementizi.

La prima parte dello studio ha quindi riguardato la rielaborazione dell'assegnazione delle classi di esposizione, tenendo conto anche dei prevedibili problemi di fessurazione di origine termica derivanti dall'impiego di miscele ad elevato dosaggio di cemento, di eventuali situazioni di attacco chimico e anche della necessità di contenere

il numero delle miscele in grado di soddisfare in modo ottimale i diversi requisiti, consentendo una gestione semplificata del sistema di produzione del calcestruzzo.

In particolare è stata valutata accuratamente la scelta della classe di esposizione rispetto all'attacco dei cicli di gelo/disgelo. Poiché l'aggiunta d'aria necessaria per eliminarne gli effetti riduce la resistenza di circa due classi, per soddisfare il requisito strutturale di progetto possono essere richieste resistenze del calcestruzzo prima dell'aggiunta d'aria molto elevate, con forti dosaggi di cemento e corrispondenti aumenti della temperatura di picco del calcestruzzo.

Di conseguenza, per evitare che un calcestruzzo dotato di durabilità anche in condizioni climatiche molto avverse presenti sistematicamente la formazione di fessure, capaci di generare degrado nel cemento armato, si è valutata con attenzione la reale opportunità di attribuire la classe XF2 o la classe XF4 esaminando le condizioni climatiche prevalenti. La stessa attenzione è stata rivolta all'attribuzione della classe XF1 o della classe XF2.

Poiché i fattori che determinano l'intensità dell'azione aggressiva dei fenomeni di gelo-disgelo sono essenzialmente la temperatura raggiunta durante il congelamento e il numero dei cicli, come prima cosa sono stati analizzati i dati orari di temperatura registrati nella stazione meteo di Bergamo Stezzano (rappresentativa del clima della zona). Si è constatato che il numero totale di gelate¹ registrato negli ultimi 10 anni (74, con una temperatura minima di -9,8 °C) è decisamente irrisorio tenendo presente anche che la UNI EN 206-1 è una norma europea e si riferisce a condizioni medie tra quelle estreme dei paesi scandinavi e quelli mediterranei²⁻³.

Sulla base delle considerazioni di cui sopra si è ritenuto che l'attribuzione della classe XF2 in alcuni manufatti quali le elevazioni muri ad U, a muri e spalle, potesse portare a consistenti fenomeni fessurativi. Si è considerata pertanto necessaria e ammissibile l'attribuzione della classe di esposizione XF1 per questi manufatti.

La classe XF4 si è ritenuta adeguata solo per manufatti di piccole dimensioni, in cui non si ritiene significativo l'aspetto della fessurazione di origine termica e per parti di opere in prossimità dei giunti, in considerazione dell'elevato livello di degrado che si riscontra correntemente su parti di opere dello stesso tipo ed esposizione.

Nei casi cui non si è potuto fare a meno di attribuire la classe XF4 nonostante il rischio fessurazione, come ad esempio nei cordoli, sono stati previsti degli specifici accorgimenti di cui si parlerà nel seguito.

¹ Ricordando che la temperatura di congelamento del calcestruzzo non è pari a 0°C, sia a causa dell'abbassamento crioscopico dovuto ai sali disciolti nella soluzione acquosa che permea la pasta di cemento, sia alle dimensioni ridotte dei pori, sia infine a fenomeni di super raffreddamento (M.J. Setzer "Action of frost and deicing chemicals - basic phenomena and testing" in Freeze thaw durability of concrete - Rilem Proceedings n. 30, pag. 3), si è cautelativamente assunta come gelata un periodo in cui sono state registrate continuativamente temperature inferiori a -3 °C per almeno sei ore.

² Ad esempio, J.K. Kaufmann dell'EMPA (Laboratorio Federale Svizzero di Prove e Ricerche sui Materiali), non molto più a nord di Bergamo, ritiene che "i cicli più frequenti di gelo-disgelo (**50-70 per anno**) sono indotti dalle variazioni giorno/notte" (Cement and Concrete Research, 34 (2004) 1421-1427)

³ Naturalmente le precedenti considerazioni devono essere adattate alle quote effettive: ad esempio in Appennino, a quote superiori ai 600 m slm, per manufatti esposti al sole, si può verificare per periodi prolungati un ciclo al giorno.

Problematiche analoghe sono state riscontrate per i manufatti in classe XC4, in particolari quelli caratterizzati da lunghezze tipicamente maggiori di 10 m, ed assegnabili allo schema tipico muro basamento, ad esempio muri, piedritti, solettone.

La classe assegnata è corretta ed in grado di garantire una vita di esercizio dei manufatti in linea con le previsioni della Norma UNI EN 206-1. Tuttavia il dosaggio di cemento previsto, è tale da rendere certi i tipici i fenomeni fessurativi, ovvero fessure verticali di ampiezze fino a circa 0,8 mm, spesso passanti: è evidente che tali fessure non possono che risultare negative ai fini della durabilità. Anche per questi manufatti sono stati previsti accorgimenti e soluzioni appropriate descritte in seguito.

In alcuni casi si è attribuita sia la classe XC4 sia la XF4 (parti con elevata saturazione e presenza di agente antigelo). La resistenza richiesta è C32/40 per XC4 e C28/35 (con aria) per la classe di esposizione XF4. Per la combinazione, si potrebbe supporre di dover usare un calcestruzzo avente sia la resistenza massima delle due classi (C40) sia l'aggiunta d'aria.

Tuttavia, per i calcestruzzi con Rck da progetto pari a 35 MPa, si è ritenuto corretto adottare un calcestruzzo C35 aerato e non C40 aerato, in considerazione del fatto che la durabilità rispetto ai cicli gelo-disgelo si ottiene con l'aggiunta d'aria, mentre per quanto riguarda i problemi di corrosione, la durabilità si ottiene con il corretto rapporto acqua/cemento.

Ne deriva che, soddisfacendo il requisito del rapporto acqua/cemento non maggiore di 0,45 per la classe XF4, viene rispettato anche quello della classe XC4 (rapporto acqua/cemento non maggiore di 0,50).

A conclusione del lavoro sono state individuate in base alla classe di resistenza per il progetto esecutivo, 7 tipologie di calcestruzzo (5 normali e 2 con aria aggiunta).

3. Aspetti particolari di durabilità

La vita nominale dell'opera, intesa come numero di anni nel quale la struttura deve poter essere utilizzata per lo scopo al quale è destinata, in base alla normativa deve essere di almeno 100 anni.

Nelle condizioni di esposizione prese in considerazione per i viadotti (opere più importanti) della Bre.Be.Mi, i principali problemi di durabilità prevedibili si riferiscono alla corrosione dell'armatura e a problemi correlati alla formazione di fessure. Sono stati analizzati diversi aspetti:

- stato limite di corrosione, coincidente con la carbonatazione del copriferro,
- stato limite di concentrazione di cloruri in prossimità dell'armatura,
- i fenomeni di ritiro termico in particolare per le solette e per i cordoli,
- i fenomeni di espansione termica nelle pile, che generano reticoli di fessure sulla loro superficie.

3.1 Corrosione e copriferro: studio con modelli di previsione

In fase di progettazione la scelta del copriferro (40 mm) è stata effettuata applicando direttamente quanto previsto dalla normativa sul cemento armato e dalla UNI EN 1991.1.1.

In questa seconda fase di studio si è proceduto ad una verifica del copriferro applicando modelli di previsione messi a punto e affinati nell'ultimo decennio, ovvero dopo l'adozione dell'Eurocodice, allo scopo di verificare che, con le miscele adottate e nelle specifiche condizioni ambientali dei siti, lo stato limite di servizio venga raggiunto solo dopo il compimento della vita nominale dell'opera.

3.1.1 Risultati ottenuti con il modello di previsione della carbonatazione del calcestruzzo

Per il calcolo della carbonatazione si è utilizzato il modello proposto nel Model Code for Service Life Design 2006 della *fib* (fédération internationale du béton, creata da CEB e FIP), sviluppato nell'ambito del progetto DuraCrete, e revisionato nel progetto di ricerca DARTS finanziati dall'Unione Europea.

Nell'eseguire le simulazioni si è tenuto conto di alcuni fattori particolarmente importanti che possono condizionare lo sviluppo dei fenomeni:

- umidità relativa dell'ambiente di esercizio,
- durata del curing (o maturazione protetta) dei manufatti,
- rapporto acqua/cemento del calcestruzzo,
- probabilità di bagnatura dei manufatti.

I dati di umidità sono stati ottenuti dall'analisi degli archivi dell'ARPA Lombardia (più di 85.000 dati orari di UR nel periodo dal 23 Agosto 1999 al 24 Agosto 09. La stazione meteo di Capralba (CR) è la più vicina a Caravaggio, parte centrale del tronco).

Sono state effettuate diverse prove, variando:

- il rapporto acqua/cemento corrispondente ai valori minimo, medio e massimo derivanti dai mix-design (0.37, 0.47 e 0.56),
- la probabilità di struttura bagnata nei giorni di pioggia,
- il tempo di stagionatura protetta (1, 2 e 3 d),
- il tipo di cemento.

Nelle seguenti figure sono raccolti i risultati ottenuti: ciascun grafico è riferito a un tipo di cemento e ad un rapporto acqua/cemento e riporta i valori di $x(t)$ (spessore carbonatato nel tempo) per i tre tempi di stagionatura e per le due probabilità di struttura bagnata (zero ed uno).

Dai risultati ottenuti si osserva come solo nel caso di $a/c = 0.37$ e nel caso di miscela con il Cem I sia molto probabile che la carbonatazione non superi il copriferro di 40 mm.

Si osserva inoltre come sia importante la durata del curing nei casi in cui le parti di opere siano sempre asciutte.

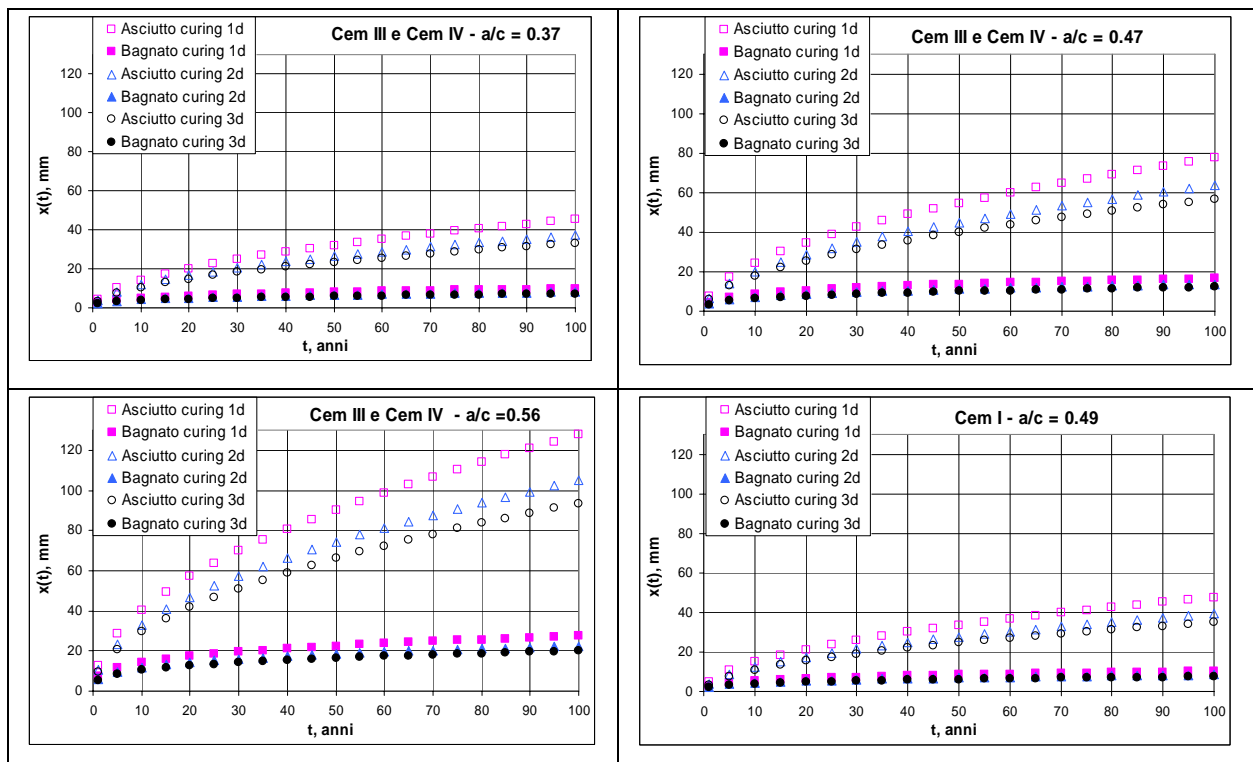


Figura 1 - Andamento dello spessore carbonatato nel tempo, per i diversi tipi di cemento e di rapporto a/c, in funzione della durata del curing e del fatto che calcestruzzo sia bagnato o asciutto

3.1.2 Previsione mediante modello della corrosione dovuta ai cloruri

La seconda principale causa di depassivazione delle armature e la loro conseguente corrosione, è costituita dalla penetrazione di cloruri e dalle reazioni che questi ioni sviluppano a contatto del film di ossido passivante.

È noto che la migrazione dei cloruri segue la legge di diffusione di Fick e secondo il citato Model Code, per essere lontani dalla condizione limite, si deve verificare che in ogni situazione si abbia:

$$c_{cr} \geq c(x, t)$$

dove :

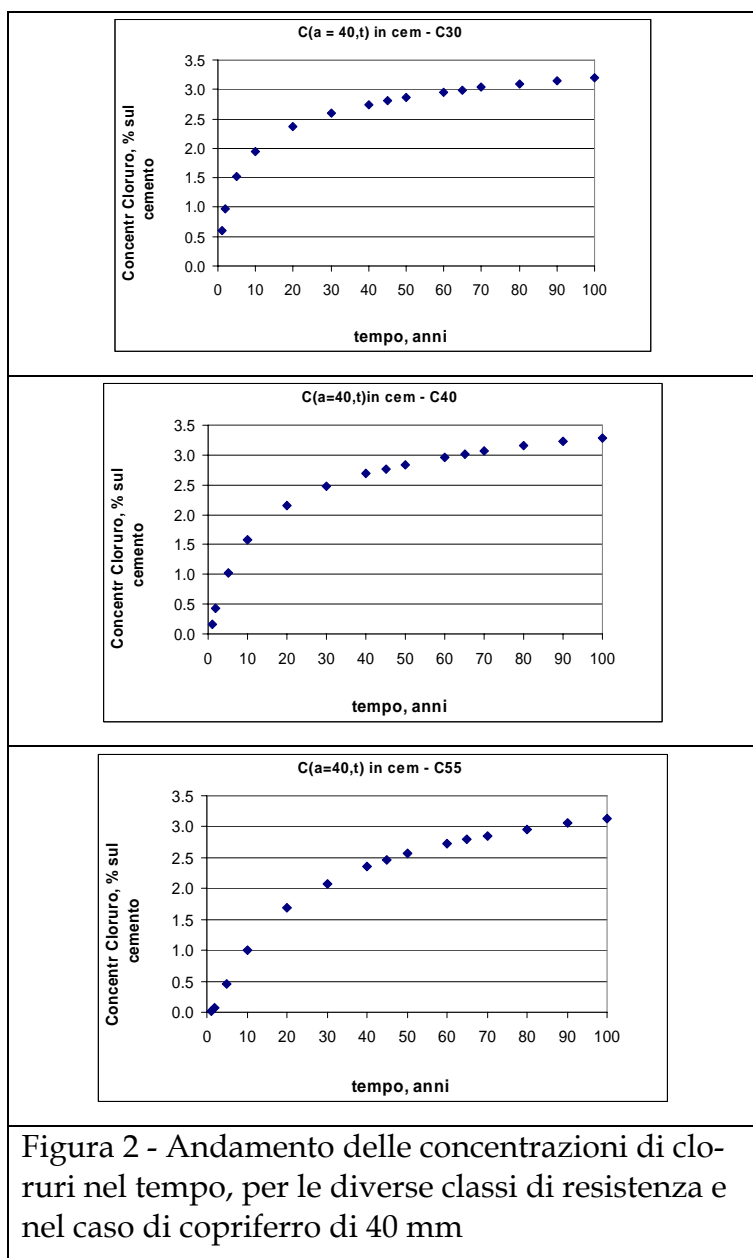
c_{cr} è la concentrazione critica di cloruri sull'armatura

$c(x, t)$ è la concentrazione di cloruri in funzione del tempo (t) e del copriferro (a).

I valori del coefficiente di diffusione $D_{app,C}(t)$ e di concentrazione superficiale di cloruri C_s (che figurano nella legge di Fick) sono stati determinati mediante analisi chimiche, in corrispondenza di palesi colature di acqua dai giunti, su una spalla/pila facente parte di opere autostradali che corrono in prossimità dell'opera da realizzare (A4): i nuovi manufatti probabilmente si troveranno nelle medesime condizioni climatiche e sottoposte allo stesso tipo di operazioni invernali (salature).

Si riportano di seguito i risultati ottenuti. Questi rendono evidente un apprezzabile rischio di corrosione, a partire già da appena dopo la realizzazione delle opere, reso più significativo dalla possibile formazione di fessure; la situazione non migliora apprezzabilmente passando ad una classe di calcestruzzo con un rapporto a/c inferiore.

In queste condizioni, si è visto che affinché la concentrazione critica dell'0.4% (valore cautelativo) non raggiunga le armature, il copriferro dovrebbe essere di 135 mm di spessore! E' evidente la necessità di provvedimenti atti ad evitare la penetrazione dei cloruri.



3.2 Problemi di fessurazione di origine termica

Dato l'elevato dosaggio di cemento e la morfologia di alcuni manufatti, si è dovuto prevedere la presenza sia di fenomeni di espansione termica (pile) sia di ritiro termico (in particolare, solette e cordoli).

Contemporaneamente al ritiro termico si è considerato anche il ritiro da essiccamento: entrambi, anche se con tempistiche diverse, contribuiscono alla fessurazione dei manufatti.

Le pile sono costituite da elementi massicci di notevoli dimensioni (diametro 4 metri) e con dosaggio di cemento di almeno 350 kg/m³.

Si è prevista quindi la presenza di consistenti aumenti di temperatura nel nucleo e differenziali elevati tra nucleo e zona corticale, anche in funzione del tipo di cassero usato (di legno o metallico).

4. Soluzioni migliorative finalizzate ad accrescere la vita in servizio dei viadotti

Come si è visto ai punti precedenti, esistono le condizioni perché si producano fenomeni in grado di produrre degrado in tempi alquanto inferiori alla vita nominale dell'opera. In particolare, la rapida carbonatazione del calcestruzzo, il raggiungimento di concentrazioni di ione cloruro superiori al valore critico, la formazione di fessure dovute al ritiro da essiccamento e/o a fenomeni termici che facilitano la penetrazione degli aggressivi.

La penetrazione degli aggressivi può essere ostacolata con vari metodi. Il primo e più ovvio sembrerebbe quello di ridurre il rapporto acqua/cemento, anche al di sotto dei valori richiesti dalla normativa. In realtà questa strada, come già detto, non è percorribile, infatti, come si è visto in precedenza, tanto più basso è il rapporto acqua/cemento tanto più elevato dovrà risultare il dosaggio di cemento e di conseguenza si aggraverebbero i problemi legati ai fenomeni termici.

4.1 Impiego di sistemi protettivi pellicolari

È possibile ridurre grandemente la possibilità di permeazione degli aggressivi sopracitati utilizzando protettivi pellicolari, in modo da ritardare il tempo necessario per la depassivazione dell'armatura. I prodotti sono stati scelti in base a precisi criteri prestazionali, riferiti principalmente all'impermeabilità agli aggressivi, alla permeabilità al vapore, alla capacità di deformazione elastica (per gli elementi strutturali che la richiedono, in particolare quelli soggetti a deformazioni elastiche ripetute e in presenza di fessure), alla durabilità nelle condizioni di esercizio.

La capacità dei protettivi di ostacolare la penetrazione dei cloruri e dell'anidride carbonica, è molto più elevata di quella del calcestruzzo. L'applicazione di questi prodotti è pertanto risolutiva, a patto che la loro durabilità sia certamente sufficiente. Poiché i protettivi, anche della migliore qualità, hanno una durabilità minore di quella delle opere progettate sono stati previsti piani di ripristino: generalmente un protettivo di buona qualità può durare almeno 40 anni senza dover essere rinnovato.

4.2 Maturazione prolungata

Come già sottolineato in precedenza, è evidente l'importanza di assicurare una "maturazione protetta" (curing) degli elementi strutturali, come peraltro previsto anche dalla normativa e dalla UNI EN 13670.

In base alle precedenti considerazioni, si comprende che la penetrazione degli aggressivi dalla superficie all'interno dei manufatti, è facilitata se non si cura a sufficienza la maturazione protetta del conglomerato. Il Consorzio BBM ha accettato di

garantire tempi di maturazione protette superiori di almeno il 50% a quelli della norma citata, utilizzando le procedure previste dalla UNI citata, singolarmente o in sequenza.

Tale provvedimento viene attuato limitatamente ai seguenti elementi strutturali:

- spalle,
- pile,
- pulvini,
- cordoli.

Non sono stati inclusi i conci prefabbricati dei Viadotti Adda, Oglio e Serio nell'elenco, perché è stato ritenuto di non perseguire un aumento dei tempi della maturazione.



4.3 Sistema di additivazione per contrastare la fessurazione

In analogia a quanto ormai largamente sperimentato ed associato sulla possibilità di usare additivi espansivi per prevenire il ritiro da essiccamento, che trova un utilizzo molto diffuso nelle malte da restauro, si è fatto uso di questi materiali anche per prevenire il ritiro termico.

Infatti, l'aggiunta dell'espansivo produce una dilatazione del conglomerato che, essendo ostacolata dall'armatura presente nell'elemento strutturale, causa uno stato di coazione, con il calcestruzzo compresso, eliminando quindi le tensioni di trazione che producono le fessure⁴.

⁴ V. Alunno Rossetti, A. Ferraro, G.Ranzo, F. Zenone, S. Zampaletta: "Utilizzo di additivi espansivi per fronteggiare i fenomeni di fessurazione da ritiro termico" In Concreto 88.

Lo stesso tipo di additivazione, è stato utilizzato anche nel caso dei problemi di dilatazione termica (che si riscontrano per lo più nelle pile).

I fenomeni fessurativi considerati ai punti precedenti, dovuti al riscaldamento del conglomerato, sono sempre aggravati dallo sviluppo del ritiro da essiccamento (detto anche ritiro idraulico o igrometrico).

Per fronteggiare questi fenomeni ci si è avvalsi di uno sviluppo recente della tecnologia del calcestruzzo che prevede l'uso combinato di:

- additivi liquidi riduttori di ritiro denominati SRA (Shrinkage Reducing Admixtures), che a lungo termine possono dimezzare il ritiro da essiccamento,
- di additivi solidi espansivi che, secondo il meccanismo sopra indicato, possono annullare le conseguenze dell'espansione termica.

Prodotti di questo tipo sono stati previsti per tutti i manufatti caratterizzati da lunghezza notevole, incluse solette e cordoli, oppure massicci quali elevazione pile e spalle. Vengono inclusi tra questi manufatti anche i baggioli e ritegni sismici che, seppur di dimensioni minori, presentano spessori minimi rilevanti dal punto di vista dei fenomeni termici.

Per i conci invece, essendo elementi strutturali precompressi, la miglioria prevede solo l'uso di riduttori di ritiro.

Nella tabella seguente vengono riassunti gli interventi di miglioria che vengono attualmente eseguiti sui viadotti della Bre.Be.Mi.

	Azione	Pila	Spalle	Pulvini	Baggioli e Ritegni sismici	Impalcati		
						Conci*	Velette	Cordoli
Aggressione chimica	Maturazione prolungata	x	x	x	x			x
	Verniciatura/trattamento protettivo delle superfici dei manufatti	x	x	x	x	x	x	x
Fenomeni termici	Additivazione specifica (espansivi+SRA) della miscela di calcestruzzo per la riduzione della fessurazione	x	x	x	x	x		x

* Per i conci si prevede solo l'additivo antiritiro

5. Conclusioni

Per un'opera complessa come il collegamento autostradale Brescia-Milano, garantire la durabilità può essere un impegno gravoso. Innanzitutto, è importante un'accurata assegnazione delle classi di esposizione delle varie parti dell'opera, che tenga conto anche dei dati ambientali reali del sito e dei fenomeni termici connessi agli elevati dosaggi di cemento. Inoltre, vista la varietà dei microclimi riconoscibili per le varie parti costruttive e i diversi requisiti strutturali, c'è da considerare anche la necessità

di contenere il numero delle miscele che consenta una gestione semplificata del sistema di produzione del calcestruzzo.

Per alcune parti di opere, anche a causa di inevitabili dosaggi elevati di cemento, è risultata assai probabile la formazione di fessure: si potrebbe affermare che la norma per la durabilità contiene il germe della fessurazione e della perdita di durabilità !

Il ricorso a soluzioni tecnologiche innovative, ovvero l'impiego di additivazione mirata a contrastare gli effetti dei fenomeni di espansione o ritiro termico, ha però consentito limitare il fenomeno, con risultati del tutto soddisfacenti.

Si è constatato inoltre, che un copriferro progettato secondo le Norme Tecniche e la UNI EN 1991.1.1, in determinate condizioni di esposizione potrebbe essere insufficiente a contrastare i fenomeni di corrosione da carbonatazione o da cloruri per la durata della vita nominale dell'opera. Per evitare tali rischi sono stati adottati tempi di maturazione protetta superiori a quelli della normativa e della UNI EN 13670, e l'impiego di protettivi pellicolari su tutti i viadotti.