



I QUADERNI TECNICI

PER LA SALVAGUARDIA DELLE INFRASTRUTTURE

VOLUME IV



I QUADERNI TECNICI

PER LA SALVAGUARDIA
DELLE INFRASTRUTTURE

VOLUME IV

PREFAZIONE

Il quarto volume dei quaderni tecnici di ANAS prosegue l'attività di standardizzazione dei lavori di recupero delle opere d'arte in gestione affrontando, per la prima volta, il problema degli interventi di ripristino ed impermeabilizzazione in galleria ed estendendo lo studio dei fenomeni di degrado a ulteriori elementi strutturali tipologici dei ponti.

In particolare, il presente volume raccoglie quattro quaderni tecnici, dal n. 13 al n. 16, che esaminano dettagliatamente le tecniche di intervento di ripristino in galleria, i ripristini delle solette dei ponti in c.a. e quelli sugli impalcati a sezione mista acciaio-calcestruzzo.

Nel quaderno n. 13 si esaminano le tecniche di intervento di ripristino strutturale del rivestimento delle gallerie e nel quaderno n. 14 si affronta il problema dell'impermeabilizzazione delle gallerie illustrando dettagliatamente l'utilizzo di diversi materiali.

Nel quaderno n. 15 viene trattato il tema degli interventi di ripristino delle condizioni di sicurezza delle solette in c.a. dei ponti, la trattazione teorica è corredata dall'illustrazione dettagliata dei risultati delle prove a rottura - che simulano l'urto sulla barriera di sicurezza- condotte su elementi in scala reale, eseguite presso il laboratorio prove dell'Università di Roma "Tor Vergata"

Nel quaderno n. 16 si concentra l'attenzione sugli interventi di ripristino degli impalcati a struttura mista acciaio-calcestruzzo, come di consueto il tema è trattato con particolare attenzione alla esemplificazione concreta di casi di danneggiamento e relative tecniche di intervento di riparazione, nel testo si sottolinea l'importanza dell'attività di sorveglianza e ispezione dei ponti. Tale tema è ormai stato completamente codificato dalle nuove procedure formalizzate da questa Direzione Operation e Coordinamento Territoriale.

Per la realizzazione e la pubblicazione dei quaderni tecnici raccolti nel presente volume, si ringrazia l'Ing. Paolo Mannella, Responsabile Ponti Viadotti e Gallerie Area Centro-Sud della Direzione Operation e Coordinamento Territoriale, l'Ing. Massimo Simonini, Dirigente dell'Ufficio Ponti Viadotti e Gallerie della medesima Direzione, l'Ing. Fulvio Maria Soccodato, Vice Direttore DOCT - Assetto Infrastrutturale Rete, i Coordinatori territoriali ed i Responsabili delle Aree Compartimentali.

Si auspica che il presente manuale possa risultare utile ai tecnici impegnati nella progettazione, esecuzione e collaudo dei lavori cui esso si riferisce, tenendo presente che nella sua redazione si è cercato di fornire indicazioni il più possibile operative.

Saranno, inoltre, ben accetti i contributi da parte di tutti per l'aggiornamento delle tematiche affrontate.

**Il Direttore Operation
e Coordinamento Territoriale**
Ing. Ugo Dibennardo

Indice generale

Quaderno Tecnico N. 13 - Interventi di ripristino in galleria	5
Quaderno Tecnico N. 14 - Interventi di impermeabilizzazione in galleria	41
Quaderno Tecnico N. 15 - Interventi di ripristino delle condizioni di sicurezza di solette in C.A.	67
Quaderno Tecnico N. 16 - Interventi sugli impalcati a struttura mista acciaio-calcestruzzo	97

QUADERNO TECNICO N. 13

Interventi di ripristino in galleria

Indice Quaderno N. 13

1.	Introduzione	7
2.	Rilievo quadro fessurativo e condizioni del supporto	9
3.	Principali tipologie di prodotti per iniezione	12
4.	Principi per la protezione e la riparazione	13
5.	Classificazione secondo UNI EN 1504	17
6.	Classificazione dei prodotti per iniezione	28
7.	Marcatura CE	29
8.	Preparazione del supporto ed applicazione in opera	31
9.	Compiti del Direttore Lavori	32
10.	Compiti del Progettista ed indicazioni progettuali	33
11.	Tecniche di intervento	33
11.1.	Danno A1 - Assenza di acqua, fessura di piccola entità	34
11.2.	Danno A2 - Assenza di acqua, fessura di larghezza maggiore	35
11.3.	Danno B1 - Presenza di acqua, fessure bagnate, puntuali	37
11.4.	Danno B2 - Presenza di acqua, fessure bagnate, diffuse	38
11.5.	Danno C1 - Presenza di acqua, fessure con flusso di acqua, puntuali	38
11.6.	Danno C2 - Presenza di acqua, fessure con flusso di acqua, diffuse	39
11.7.	Presenza di vespai	39
	Bibliografia	40

1. Introduzione

I rivestimenti delle gallerie della rete viaria italiana realizzati in calcestruzzo presentano spesso situazioni di degrado variabili e generalmente diffuse. Tali problematiche si manifestano con particolare frequenza nelle gallerie di non recente epoca di realizzazione, caratterizzate da gravi e complessi problemi di conservazione. Il calcestruzzo del rivestimento può infatti essere interessato da un processo di ammaloramento più o meno diffuso, con presenza di fessure, lesioni, distacchi o nidi di ghiaia, accentuati dalla eventuale presenza di infiltrazioni o sacche di acqua. Le cause di tali fenomeni di degrado sono molteplici e possono essere sinteticamente individuate in cause di natura ambientale o di non idonea esecuzione. Un intervento di manutenzione straordinaria abbastanza diffuso consiste nel ripristino del rivestimento in calcestruzzo e/o nell'impermeabilizzazione della galleria. Nel presente Quaderno Tecnico sono presi in esami i soli interventi di ripristino del rivestimento, mentre gli interventi di impermeabilizzazione sono trattati separatamente nel Quaderno Tecnico n. 14 *"Interventi di impermeabilizzazione in galleria"*. Per gli aspetti inerenti gli interventi di ripristino dello stato corticale, si rimanda al Quaderno Tecnico n. 6 *"Interventi di ripristino corticale dei calcestruzzi ammalorati"*. È opportuno evidenziare che il presente Quaderno Tecnico non sostituisce il progetto di ripristino necessario laddove il degrado sia tale da richiedere l'esecuzione di un intervento di rinforzo.

Occorre considerare che gli interventi oggetto del presente Quaderno Tecnico non sono generalmente inquadrabili come interventi di ripristino strutturale, escludendo conseguentemente la necessità di effettuare un collaudo statico. Inoltre, considerato il valore degli importi a base di gara, in molti casi (importo lavori < 1 M€) non è necessario nemmeno il collaudo tecnico-amministrativo, sostituito dal Certificato di Regolare esecuzione. Si evidenzia pertanto come la figura del Direttore Lavori rivesta un ruolo di estrema importanza, a garanzia del controllo della corretta esecuzione dell'opera in termini di applicazione delle procedure di accettazione in cantiere dei materiali, di controllo delle prestazioni richieste dal progetto e di applicazione in opera.

Nel presente Quaderno Tecnico si farà riferimento alla norma UNI EN 1504 "Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità", che definisce le procedure e le caratteristiche dei prodotti e sistemi da utilizzare per la riparazione, la manutenzione e la protezione, il restauro e il consolidamento delle strutture in calcestruzzo.

Nel seguito si indicherà con il termine "prodotto" un costituente formulato per la riparazione o la protezione di strutture in calcestruzzo, mentre con il termine "sistema" due o più prodotti utilizzati insieme oppure consecutivamente. La modalità di applicazione di un prodotto o sistema per mezzo di un'attrezzatura o di un metodo specifico è la "tecnologia".

In particolare, nella UNI EN 1504 Parte 5 vengono specificati i requisiti e i criteri di conformità per l'identi-

ficazione, le prestazioni (inclusi gli aspetti di durabilità) e per la sicurezza dei prodotti per iniezione, per la riparazione e protezione delle strutture di calcestruzzo utilizzati per:

- riempimento delle fessure, vuoti e interstizi nel calcestruzzo che permette di trasmettere gli sforzi;
- riempimento duttile delle fessure, vuoti e interstizi nel calcestruzzo;
- riempimento espansivo di fessure, vuoti e interstizi nel calcestruzzo.

È importante sottolineare che il Progettista dell'intervento di ripristino del rivestimento in calcestruzzo deve provvedere ad indicare correttamente le caratteristiche e le prestazioni richieste dai prodotti per iniezione, riparazione e protezione, che possono differire da intervento ad intervento.

Tabella 1. Schema normativo UNI EN 1504

Parte	Oggetto
1 UNI EN 1504-1:2005	Definizioni
2 UNI EN 1504-2:2005	Sistemi di protezione della superficie di calcestruzzo
3 UNI EN 1504-3:2006	Riparazione strutturale e non strutturale
4 UNI EN 1504-4:2005	Incollaggio strutturale
5 UNI EN 1504-5:2005	Iniezione del calcestruzzo
6 UNI EN 1504-6:2007	Ancoraggio dell'armatura di acciaio
7 UNI EN 1504-7:2007	Protezione contro la corrosione delle armature
8 UNI EN 1504-8:2005	Controllo di qualità e valutazione delle conformità
9 UNI EN 1504-9:2008	Principi generali per l'uso dei prodotti e dei sistemi
10 UNI EN 1504-10:2005	Applicazioni in opera di prodotti e sistemi e controllo di qualità dei lavori

2. Rilievo quadro fessurativo e condizioni del supporto

Al fine di assicurare un adeguato processo di progettazione ed esecuzione dell'intervento di ripristino del rivestimento, la fase iniziale di rilievo del quadro fessurativo e delle condizioni del supporto assume un ruolo di primaria importanza. Il rilievo e la rappresentazione grafica delle fessure costituiscono infatti un utile strumento per la valutazione delle cause del fenomeno di ammaloramento e per la scelta della migliore tecnica di intervento. Le possibili tecniche di intervento di ripristino del rivestimento possono essere suddivise in **classi di intervento**, in funzione della tipologia delle fessure, della misura delle loro ampiezze e movimenti nel tempo e della condizione del supporto.

Le fessure sono classificate in base al loro andamento:

- verticale;
- orizzontale;
- obliquo;

ed in relazione alla loro entità, in termini di:

- estensione;
- ampiezza.

Le diverse tecniche di intervento possono essere classificate in base alla larghezza della fessura w_f misurata sulla superficie del calcestruzzo. Indicativamente, possono essere definiti tre intervalli di ampiezza delle fessure:

- $0 \leq w_f \leq 0.2 \text{ mm}$
- $0.2 \text{ mm} < w_f \leq 0.5 \text{ mm}$
- $w_f \geq 0.5 \text{ mm}$

Nel caso di aperture di fessura inferiori a 0.2 mm non sono richiesti interventi di ripristino del rivestimento, a meno che non vi siano speciali richieste in termini di durabilità.

In tale fase può essere utile procedere ad una marcatura delle fessure con vernici di diverso colore, a seconda della loro ampiezza, per garantire la rispondenza degli interventi eseguiti a quanto indicato nel progetto, essendo gli stessi funzione delle rispettive larghezze.

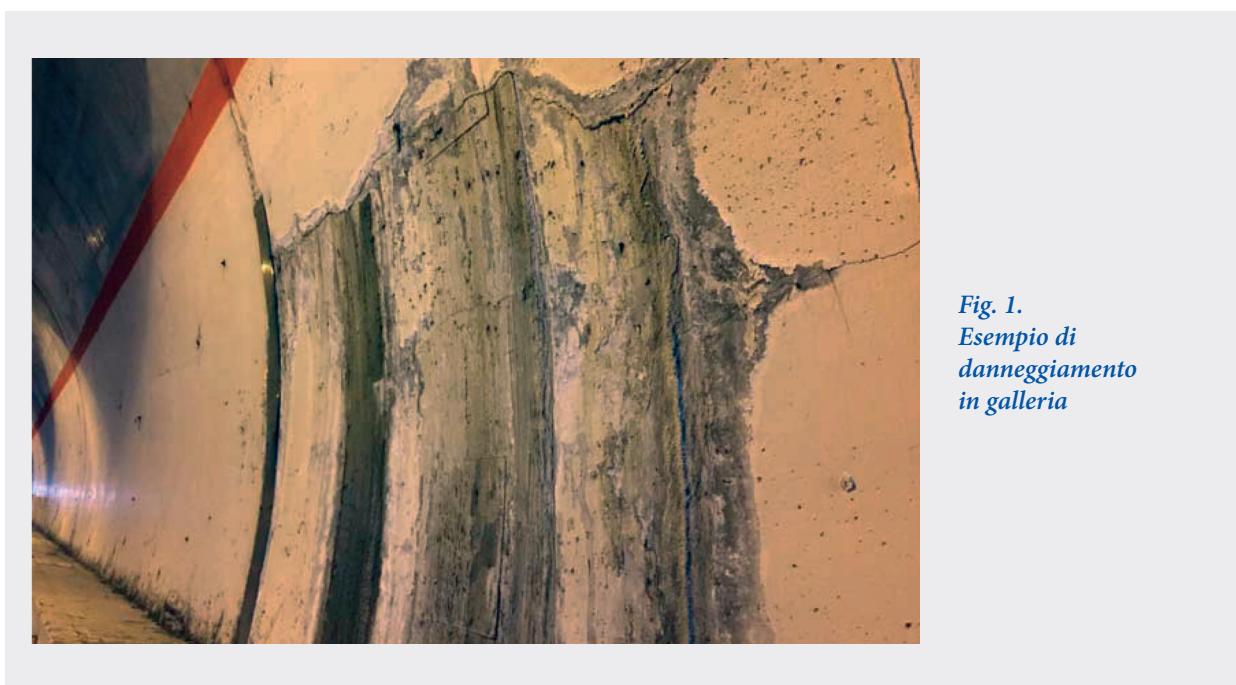
La larghezza della fessura può subire inoltre modifiche in funzione del tempo, a causa di sollecitazioni meccaniche (per esempio azioni dovute al traffico) o fisiche, di tipo giornaliero o stagionali. I movimenti delle fessure possono infatti influenzare l'adesione dei prodotti per iniezione con il supporto in calcestruzzo.

La condizione del supporto viene classificata a seconda del contenuto di acqua presente nella fessura o

che trasuda da essa, considerando le condizioni di fessura:

- **asciutta**: assenza di acqua all'interno della fessura o sui fianchi ed esclusione di fenomeni di migrazione di acqua nella fessura durante le fasi di iniezione e di indurimento del prodotto per iniezione. Una fessura asciutta è riconoscibile dal fatto che il colore della fessura è uguale a quello della superficie asciutta del calcestruzzo.
- **umida**: assenza di acqua nella fessura associata a presenza sui fianchi, senza formazione di uno strato di acqua sulla superficie dei fianchi. Una fessura umida è riconoscibile dal fatto che il colore della superficie della fessura è diverso da quello della superficie asciutta del calcestruzzo.
- **bagnata**: presenza permanente di acqua nella fessura. La presenza di gocce d'acqua sulla superficie della fessura è caratteristica di una fessura bagnata.
- **flusso d'acqua**: presenza di un flusso d'acqua attraverso la fessura. Possono essere previste misurazioni di pressione e portata.

Nella fase di rilievo della galleria, è importante valutare la presenza o meno di impermeabilizzazione del rivestimento. Nel caso in cui quest'ultima risultasse assente, si può procedere con interventi di ripristino, oggetto del presente Quaderno Tecnico, oppure con un intervento di posa del sistema di impermeabilizzazione, descritto nel Quaderno Tecnico n. 14 *"Interventi di impermeabilizzazione in galleria"*, previa esecuzione di interventi di ripristino del rivestimento.



*Fig. 2.
Esempio di
danneggiamento
in galleria*



*Fig. 3
Esempi di
danneggiamento
in galleria*



3. Principali tipologie di prodotti per iniezione

Le principali categorie di prodotti e sistemi sono definite all'interno della UNI EN 1504 Parte 1 "Definizioni". Tra questi possono essere annoverati:

- 1) **prodotti e sistemi di ancoraggio**, utilizzati per il fissaggio dell'armatura nel calcestruzzo per il conferimento di un adeguato comportamento strutturale oppure per il riempimento di cavità allo scopo di assicurare una continuità tra elementi di acciaio e calcestruzzo;
- 2) **prodotti e sistemi per iniezione**, impiegati per il ripristino dell'integrità e/o della durabilità della struttura;
- 3) **prodotti e sistemi di riparazione non strutturali**, applicati su una superficie di calcestruzzo per il ripristino dell'aspetto geometrico o estetico della struttura;
- 4) **prodotti e sistemi di protezione dell'armatura**, applicati ad armature non protette per aumentare la protezione dalla corrosione;
- 5) **prodotti e sistemi aggrappanti strutturali**, applicati al calcestruzzo per garantire un legame strutturale duraturo ad altri materiali applicati;
- 6) **prodotti e sistemi di riparazione strutturali**, applicati a una struttura di calcestruzzo per la sostituzione del calcestruzzo danneggiato ed il ripristino dell'integrità e della durabilità strutturale;
- 7) **prodotti e sistemi di protezione della superficie**, applicati per aumentare la durabilità delle strutture di calcestruzzo e calcestruzzo armato.

Con riferimento ai prodotti per iniezione, per la riparazione e protezione delle strutture di calcestruzzo, le principali tipologie di leganti sono generalmente costituite da due componenti, un polimero base reattivo e un induritore o catalizzatore, a cui possono essere aggiunti anche degli additivi, per conferire al prodotto proprietà specifiche, quali acceleranti, ecc.. I leganti più comunemente utilizzati sono:

- resine epossidiche;
- resine acriliche;
- resine poliuretaniche;
- resine organo-minerali o silicate.

4. Principi per la protezione e la riparazione

La scelta di un prodotto o sistema appropriato per la protezione, la riparazione o il rinforzo delle strutture di calcestruzzo che hanno subito o potrebbero subire danni o deterioramenti deve essere il risultato di un attento e complesso lavoro di progettazione. Il processo di riparazione può articolarsi nelle seguenti fasi principali:

- valutazione delle condizioni della struttura;
- identificazione delle cause di deterioramento;
- decisione degli obiettivi della protezione e della riparazione;
- scelta del/dei principio/i di protezione e riparazione appropriato/i;
- scelta dei metodi;
- definizione delle proprietà dei prodotti e dei sistemi;
- specifica dei requisiti di manutenzione in seguito alla protezione ed alla riparazione.

Punti chiave della UNI EN 1504 sono la definizione dei requisiti minimi per la protezione e riparazione, l'identificazione degli obiettivi dell'intervento di protezione e riparazione e l'indicazione delle basi per la scelta dei prodotti e sistemi. In particolare, tali tematiche sono trattate nella Parte 9 "Principi generali per l'uso dei prodotti e dei sistemi".

Ai fini di una corretta progettazione dell'intervento di protezione e riparazione è essenziale la fase di valutazione delle condizioni della struttura di calcestruzzo, dei difetti, compresi quelli non a vista e quelli potenziali, e delle cause di tali difetti. È altresì importante tenere conto dell'approccio progettuale originario, delle caratteristiche ambientali, delle condizioni durante la costruzione e della storia della struttura, delle condizioni d'uso ed infine dei futuri requisiti per l'uso richiesti.

Per quanto concerne i difetti del calcestruzzo più comunemente riscontrati, una classificazione può essere effettuata a seconda della natura del difetto che può essere di origine meccanica, chimica o fisica. Le cause più comuni di difetti di tipo meccanico possono essere individuate in impatti, sovraccarichi, eventuali movimenti della struttura quali ad esempio assestamenti, esplosioni o vibrazioni. Difetti di natura chimica possono essere generalmente riconducibili a reazioni alcali-aggregato, ad attività biologiche o alla presenza di agenti aggressivi quali ad esempio solfati, acqua dolce o sali. Infine per quanto riguarda i difetti del calcestruzzo di natura fisica, le cause principali risiedono in cicli gelo/disgelo e in fenomeni termici, di cristallizzazione dei sali, di ritiro, erosione o usura.

Nella tabella successiva sono riportate in modo schematico le sopracitate cause comuni dei difetti riscontrabili nel calcestruzzo.

Tabella 2. Cause comuni dei difetti del calcestruzzo

Materiale	Natura del difetto	Causa comune
Calcestruzzo	Meccanica	Impatti
		Sovraccarichi
		Movimenti della struttura
		Esplorazioni
		Vibrazioni
	Chimica	reazioni alcali-aggregato
		attività biologiche
		presenza di agenti aggressivi quali ad esempio solfati, acqua dolce o sali
	Fisica	cicli gelo/disgelo
		fenomeni termici, di cristallizzazione dei sali, di ritiro, erosione o usura
		fenomeni di cristallizzazione dei sali
		ritiro
		erosione
		usura

La scelta di un prodotto per iniezione, riparazione e protezione deve avvenire in relazione soprattutto alle modalità applicative. Più semplice è l'applicazione, migliore questa sarà e quindi migliore sarà il risultato dell'intervento in termini di durabilità.

Alcuni dei difetti descritti possono derivare anche da specifiche non adeguate, materiali non idonei e non corrette fasi di progettazione ed esecuzione.

Per tali motivi, le fasi di identificazione e registrazione della natura e delle cause dei difetti riscontrabili nella struttura di calcestruzzo rivestono un ruolo di fondamentale importanza nel processo di riparazione. Appositi ed idonei piani di indagine devono essere definiti. È importante sottolineare che i risultati ottenuti a valle delle indagini effettuate devono essere validi in entrambe le fasi di progettazione ed esecuzione dei lavori di protezione o riparazione. In caso negativo, nuove valutazioni devono essere effettuate.

La scelta dell'intervento di protezione e riparazione deve essere appropriata alle cause ed all'entità dei difetti, prendendo in considerazione fattori generali, strutturali, ambientali e fattori legati alla

salute e sicurezza. Nella tabella seguente sono indicati degli esempi per ciascuna delle categorie sopra indicate.

Tabella 3. Fattori per scelta dell'intervento di protezione e riparazione appropriato

Fattore	Descrizione
Generale	Uso previsto
	Vita di progetto e di servizio
	Requisiti prestazionali
	Prestazioni a lungo termine
	Opportunità di protezione, riparazione e monitoraggio addizionali
	Numero e costo dei cicli di riparazione
	Costo e finanziamento delle opzioni alternative di protezione o riparazione
Strutturale	Proprietà e preparazione del substrato esistente
	Aspetto della struttura di calcestruzzo protetta o riparata
	Cambiamento aspetti dinamici o altre azioni dirette
	Mezzi mediante i quali verranno trasportati i carichi durante o dopo la protezione o la riparazione
Ambientale	Future necessità di ispezione e manutenzione
	Ambiente futuro della struttura di calcestruzzo
	Protezione da intemperie, inquinamento, spruzzi salini, ecc.
Salute e sicurezza	Protezione del substrato durante il lavoro di riparazione
	Conseguenze del cedimento strutturale della struttura di calcestruzzo
	Requisiti sanitari e di sicurezza
	Impatto delle operazioni di riparazione sugli occupanti o utenti della struttura di calcestruzzo e sul pubblico

La scelta di un prodotto o di un sistema idoneo per iniezione, riparazione o protezione di una struttura in calcestruzzo si deve basare sull'applicazione di metodi conformi ad una serie di principi di base, che possono essere utilizzati separatamente o combinati fra di loro, definiti al Paragrafo 6 della UNI EN 1504 - Parte 9

“Principi generali per l’uso dei prodotti e dei sistemi”. In particolare sono identificati sei principi e metodi correlati ai difetti del calcestruzzo (Principi da 1 a 6). È ammesso l’impiego di metodi non descritti nella UNI EN 1504, previa dimostrazione di conformità al principio utilizzato.

Con riferimento ai soli interventi di ripristino di rivestimenti di gallerie in calcestruzzo, oggetto del presente Quaderno Tecnico e descritti nella UNI EN 1504 - Parte 5 “Iniezione del calcestruzzo”, l’iniezione del calcestruzzo è utilizzata come metodo per i Principi 1 e 4. Il Principio 1 (PI) - “Protezione contro l’ingresso”, il quale prevede la riduzione o prevenzione dell’ingresso di agenti aggressivi - per esempio acqua, altri liquidi, vapore, gas, agenti chimici e biologici - può essere raggiunto con il metodo del riempimento delle fessure (Metodo 1.4). Il Principio 4 (SS) - “Rafforzamento strutturale”, consistente nell’aumento o ripristino della capacità di carico strutturale di un elemento della struttura di calcestruzzo, viene raggiunto con l’utilizzo del Metodo 4.5 di iniezione nelle fessure, nei vuoti o negli interstizi e del Metodo 4.6 di riempimento delle fessure, dei vuoti e degli interstizi.

L’iniezione è utilizzata per evitare le conseguenze dannose dei vuoti e delle fessure nel calcestruzzo:

- per ottenere l’impermeabilità e quindi la tenuta all’acqua;
- per evitare la penetrazione di agenti aggressivi che potrebbero indurre la corrosione dell’armatura;
- per consolidare la struttura mediante il rafforzamento del calcestruzzo.

Tabella 4. Principi e metodi correlati ai difetti del calcestruzzo

Principio		Metodo	
N.	Definizione	N.	Definizione
1	Protezione contro l’ingresso	1.4	Riempimento delle fessure
4	Rafforzamento strutturale	4.5	Iniezione nelle fessure, nei vuoti o negli interstizi
		4.6	Riempimento delle fessure, dei vuoti o degli interstizi

5. Classificazione secondo UNI EN 1504

Come definito al punto 3.2.2 della UNI EN 1504-1, i *prodotti e sistemi per iniezione* sono iniettati all'interno di una struttura di calcestruzzo per il ripristino della sua integrità e/o durabilità.

I requisiti e i criteri di conformità per l'identificazione, le prestazioni (inclusi gli aspetti di durabilità) e la sicurezza dei prodotti per iniezione, per la riparazione e protezione delle strutture di calcestruzzo sono fissati dalla UNI EN 1504 - Parte 5, che definisce tre categorie a seconda dell'impiego previsto:

- CATEGORIA F, prodotti in grado di legarsi alla superficie del calcestruzzo e consentire la trasmissione delle forze attraverso se stessi, impiegati per il riempimento di fessure, vuoti e interstizi nel calcestruzzo, con trasmissione di forza;
- CATEGORIA D, prodotti flessibili in grado di sopportare movimenti successivi, utilizzati per il riempimento duttile di fessure, vuoti e interstizi nel calcestruzzo;
- CATEGORIA S, prodotti in grado, allo stato reattivo, di espandersi ripetutamente per assorbimento d'acqua, impiegati per riempimento espansivo di fessure, vuoti e interstizi nel calcestruzzo.

È opportuno sottolineare che la UNI 1504-5 non prende in esame interventi di:

- trattamento delle fessure mediante ampliamento e sigillatura con sigillante elastomerico;
- riempimento esterno di cavità, ossia collocazione di prodotto all'esterno della struttura (generalmente entro i terreni di fondazione circostanti, o nell'interfaccia tra struttura e terreno), definite dalla EN 12715;
- iniezioni preliminari, se necessarie, per arrestare temporaneamente il passaggio di acqua durante l'iniezione di impermeabilizzazione.

Per i due principi di riparazione considerati e per i relativi metodi di riparazione, le Tabelle 5, 6 e 7 elencano le caratteristiche prestazionali dei prodotti per iniezione del calcestruzzo richieste, per "tutti gli impieghi previsti" o per "determinati impieghi previsti".

Le caratteristiche prestazionali dei prodotti per iniezione utilizzati in relazione al Principio 1 "Protezione contro l'ingresso" e al metodo 1.4 "Riempimento delle fessure" sono elencate nelle Tabelle 5, 6 e 7 a seconda della categoria di prodotto utilizzata, rispettivamente F, D e S.

Le caratteristiche prestazionali dei prodotti per iniezione utilizzati in relazione al principio 4 "Rafforzamento strutturale", metodi 4.5 "Iniezione nelle fessure, nei vuoti o negli interstizi" e 4.6 "Riempimento delle fessure, dei vuoti o degli interstizi" sono elencate nella Tabella 5.

QUADERNO TECNICO N. 13

Tabella 5. Caratteristiche prestazionali prodotti per iniezione per il riempimento delle fessure con trasmissione delle forze (F)

Caratteristiche prestazionali Metodi 1.4, 4.5 e 4.6	Impiego previsto
CARATTERISTICHE DI BASE	
Adesione mediante forza di aderenza per trazione (H, P)	■
Adesione mediante resistenza al taglio inclinato (H, P)	□
Ritiro volumetrico (P)	■
Formazione di essudazione (bleeding) (H)	■
Variazione di volume (H)	■
Temperatura di transizione vetrosa (P)	□
Contenuto di cloruri (H)	□
CARATTERISTICHE DI LAVORABILITÀ	
Iniettabilità in mezzo asciutto	■
Larghezza delle fessure: 0,1 mm - 0,2 mm - 0,3 mm: determinazione dell'injectabilità e prova di trazione indiretta (H, P)	
Larghezza delle fessure: 0,5 mm - 0,8 mm o dove la EN 1771 non è idonea: trattata come: Adesione mediante forza di aderenza per trazione (H, P)	
Iniezione in mezzo non asciutto	■
Larghezza delle fessure: 0,1 mm - 0,2 mm - 0,3 mm: determinazione dell'injectabilità e prova di trazione indiretta (H, P)	
Larghezza delle fessure: 0,5 mm - 0,8 mm o dove la EN 1771 non è idonea: trattata come: Adesione mediante forza di aderenza per trazione (H, P)	
Viscosità (P)	■
Tempo di efflusso (H)	■
CARATTERISTICHE DI REATTIVITÀ	
Tempo di lavorabilità (H, P)	■
Sviluppo di resistenza alla trazione per i polimeri (P)	■
Tempo di presa (H)	■
DURABILITÀ	
Adesione mediante forza di aderenza per trazione dopo cicli termici e di bagnato-asciutto (H, P)	■
Compatibilità con il calcestruzzo (H, P)	■

Note: ■ Per tutti gli impieghi previsti

□ Per determinati impieghi previsti

(H) Prodotto per iniezione formulato con legante idraulico

(P) Prodotto per iniezione formulato con legante polimerico reattivo

Tabella 6. Caratteristiche prestazionali prodotti per iniezione per il riempimento duttile delle fessure (D)

Caratteristiche prestazionali	Impiego previsto
Metodo 1.4	
CARATTERISTICHE DI BASE	
Capacità di aderenza e di allungamento dei prodotti per iniezione duttili (P)	■
Tenuta all'acqua (P)	□
Temperatura di transizione vetrosa (P)	□
CARATTERISTICHE DI LAVORABILITÀ	
Iniettabilità in mezzo asciutto (P)	■
Larghezza delle fessure: 0,1 mm - 0,2 mm - 0,3 mm: determinazione dell'iettabilità (P)	
Larghezza delle fessure: 0,5 mm - 0,8 mm o dove la EN 1771 non è idonea iniezione tra lastre di calcestruzzo (P)	
Iniettabilità in mezzo non asciutto (P)	■
Larghezze delle fessure: 0,1 mm - 0,2 mm - 0,3 mm: determinazione dell'iettabilità (P)	
Larghezze delle fessure: 0,5 mm - 0,8 mm o dove la EN 1771 non è idonea: iniezione tra lastre di calcestruzzo (P)	
Viscosità (P)	■
Rapporto di espansione e sua evoluzione (P)	□
CARATTERISTICHE DI REATTIVITÀ	
Tempo di lavorabilità (P)	■
DURABILITÀ	
Compatibilità con il calcestruzzo (P)	■

Note: ■ Per tutti gli impieghi previsti

□ Per determinati impieghi previsti

(P) Prodotto per iniezione formulato con legante polimerico reattivo.

Tabella 7. Caratteristiche prestazionali prodotti per iniezione per il riempimento espansivo delle fessure (S)

Caratteristiche prestazionali Metodo 1.4	Impiego previsto
CARATTERISTICHE DI BASE	
Tenuta all'acqua (P)	■
Comportamento alla corrosione (P)	□
CARATTERISTICHE DI LAVORABILITÀ	
Viscosità (P)	■
Rapporto e velocità di espansione durante il condizionamento in acqua (P)	■
CARATTERISTICHE DI REATTIVITÀ	
Tempo di lavorabilità (P)	■
DURABILITÀ	
Sensibilità all'acqua: rapporto di espansione per condizionamento in acqua (P)	■
Sensibilità ai cicli di bagnato-asciutto (P)	■
Compatibilità con il calcestruzzo (P)	■

Note:

- Per tutti gli impieghi previsti
- Per determinati impieghi previsti

(P) Prodotto per iniezione formulato con legante polimerico reattivo.

A seconda della categoria del prodotto di iniezione - F, D e S - il produttore deve effettuare le prove prestazionali iniziali del prodotto, in accordo alle Tabelle 8, 9 e 10.

Tabella 8. Requisiti prestazionali prodotti per iniezione per il riempimento delle fessure con trasmissione delle forze (F)

N. Caratteristiche prestazionali	Metodo di prova	Requisiti
CARATTERISTICHE DI BASE		
1 Aderenza mediante forza di trazione (H, P)	EN 12618-2	>2 N/mm ² (H) >0,6 N/mm ² (H) per prodotti per iniezione destinati solo al riempimento di vuoti e interstizi Rottura coesiva nel substrato (P)
2 Aderenza mediante resistenza al taglio inclinato (H, P)	EN 12618-3	Rottura monolitica (modello di rottura simile a quello dei prismi di controllo)
3 Ritiro volumetrico (P)	EN 12617-2	<3%
4 Essudazione (H)	EN 445/3-3	Essudazione <1% del volume iniziale dopo 3 h
5 Variazione di volume (H)	EN 445/3-4	-1% < variazione di volume < +5% del volume iniziale
6 Temperatura di transizione vetrosa (P)	EN 12614	>40 °C
7 Contenuto di cloruri (H)	EN 196-21	<0,2%
CARATTERISTICHE DI LAVORABILITÀ		
8 Iniettabilità in mezzo asciutto. - Larghezze delle fessure 0,1 mm - 0,2 mm 0,3 mm: determinazione della iniettabilità e prova di trazione indiretta (H, P) - Larghezze delle fessure 0,5 mm - 0,8 mm o dove la EN 1771 non è idonea: trattata come aderenza mediante forza di trazione (H, P)	EN 1771 EN 12618-2 Per larghezze di fessure 0,3 mm - 0,5 mm e 0,8 mm, devono essere utilizzati distanziatori flessibili di plastica inerte rispettivamente di 0,3 mm - 0,5 mm e 0,8 mm di larghezza	Classe di iniettabilità <4 min (alta iniettabilità) per larghezze di fessura di 0,1 mm <8 min (al minimo di iniettabilità) per larghezze di fessure di 0,2 mm e 0,3 mm Prova di trazione indiretta >7 N/mm ² (P) >3 N/mm ² (H) Percentuale di riempimento delle fessure >90 Requisiti di aderenza del punto (1) soddisfatti

N. Caratteristiche prestazionali	Metodo di prova	Requisiti
9 Iniettabilità in mezzo non asciutto. - Larghezze delle fessure 0,1 mm - 0,2 mm 0,3 mm: determinazione della iniettabilità e prova di trazione indiretta (H, P) - Larghezze delle fessure 0,5 mm - 0,8 mm o dove la EN 1771 non è idonea (H, P)	EN 1771 Trattato come forza di trazione nella EN 12618-2 Per classi di iniettabilità 0,3 mm - 0,5 mm e 0,8 mm, devono essere utilizzati distanziatori flessibili di plastica inerte rispettivamente di 0,3 mm - 0,5 mm e 0,8 mm di larghezza	Classe di iniettabilità 0,1: alta iniettabilità (<4 min) 0,2 e 0,3: al minimo di iniettabilità Prova di trazione indiretta $>7 \text{ N/mm}^2$ (P) $>3 \text{ N/mm}^2$ (H) Percentuale di riempimento delle fessure >90 Requisiti di aderenza del punto (1) soddisfatti
10 Viscosità (P)	EN ISO 3219	Valore dichiarato
11 Tempo di efflusso (H)	EN 14117	Valore dichiarato
CARATTERISTICHE DI REATTIVITÀ		
12 Tempo di lavorabilità (H, P)	EN ISO 9514 Durata in vaso: vedere prospetti 2.a (P) e 2.b (H) Nota Si applicano le definizioni di cui ai punti 3.4 e 3.5.	Valore dichiarato
13 Sviluppo di resistenza alla trazione per i polimeri (P)	EN 1543 La prova deve essere effettuata a tre temperature di condizionamento e di prova: a 21 °C e alle temperature massima e minima raccomandate dal produttore, con tolleranza di ± 2 °C.	Resistenza alla trazione $>3 \text{ N/mm}^2$ entro 72 h alla temperatura di utilizzo minima, o entro 10 h alla temperatura di utilizzo minima per movimenti giornalieri della fessura maggiori del 10% o di 0,03 mm (deve essere considerato il valore più basso)

N. Caratteristiche prestazionali	Metodo di prova	Requisiti
14 Tempo di presa (H)	EN 196-3 La prova deve essere effettuata a tre temperature di condizionamento e di prova: a 21 °C e alle temperature massima e minima raccomandate dal produttore, con tolleranza di ± 2 °C.	Valore dichiarato
DURABILITÀ		
15 Aderenza mediante resistenza a trazione dopo cicli termici e di bagnato-asciutto (H, P)	EN 12618-2	Riduzione della resistenza a trazione minore del 30% dei valori iniziali (H). Rottura coesiva del substrato (P)
16 Compatibilità con il calcestruzzo Trattata come: Aderenza mediante resistenza per trazione (H, P)	EN 12618-2	Riduzione della resistenza a trazione minore del 30% dei valori iniziali (H). Rottura coesiva del substrato (P)

Note:

(P) Prodotto per iniezione formulato con legante polimerico reattivo.

(H) Prodotto per iniezione formulato con legante idraulico.

Tabella 9. Requisiti prestazionali prodotti per iniezione per il riempimento duttile delle fessure (D)

N.	Caratteristiche prestazionali	Metodo di prova	Requisiti
CARATTERISTICHE DI BASE			
1	Capacità di aderenza e di allungamento dei prodotti per iniezione duttili (P)	EN 12618-1	Aderenza: valore dichiarato Allungamento: >10%
2	Tenuta all'acqua (P)	EN 14068	Tenuta all'acqua a 2×10^5 Pa Applicazioni speciali: tenuta all'acqua a 7×10^5 Pa
3	Temperatura di transizione vetrosa (P)	EN 12614	Per informazione
CARATTERISTICHE DI LAVORABILITÀ			
4	Iniettabilità in mezzo asciutto. - Larghezze delle fessure 0,1 mm - 0,2 mm 0,3 mm: determinazione della iniettabilità (P) - Larghezze delle fessure 0,5 mm - 0,8 mm o dove la EN 1771 non è idonea	EN 1771 Trattato come iniezione tra lastre di calcestruzzo nella EN 12618-2 (dal punto 4.3 al punto 4.6): Per larghezze di fessure 0,3 mm - 0,5 mm e 0,8 mm, devono essere utilizzati distanziatori flessibili di plastica inerte rispettivamente di 0,3 mm - 0,5 mm e 0,8 mm di larghezza	Classe di iniettabilità <4 min (alta iniettabilità) per larghezze di fessure di 0,1 mm 0,2 e 0,3: al minimo di iniettabilità <8 min (al minimo di iniettabilità) per larghezze di fessure 0,2 mm - 0,3 mm Percentuale di riempimento della fessura >90
5	Iniettabilità in mezzo non asciutto - Larghezze delle fessure 0,1 mm - 0,2 mm: determinazione della iniettabilità (P) - Larghezze delle fessure 0,5 mm - 0,8 mm o dove la EN 1771 non è idonea (H, P)	EN 1771 Trattato come iniezione tra lastre di calcestruzzo nella EN 12618-2 (dal punto 4.3 al punto 4.6): Per larghezze di fessure 0,3 mm - 0,5 mm e 0,8 mm, devono essere utilizzati distanziatori flessibili di plastica inerte rispettivamente di 0,3 mm - 0,5 mm e 0,8 mm di larghezza	Classe di iniettabilità <4 min (alta iniettabilità) per larghezze di fessure di 0,1 mm <8 min (al minimo di iniettabilità) per larghezze di fessure di 0,2 mm e 0,3 mm Percentuale di riempimento della fessura >90
6	Viscosità (P)	EN ISO 3219	Valore dichiarato

N.	Caratteristiche prestazionali	Metodo di prova	Requisiti
7	Rapporto di espansione e sua evoluzione (P)	EN 14406	Valore dichiarato
CARATTERISTICHE DI REATTIVITÀ			
8	Tempo di lavorabilità (P)	EN ISO 9514 Durata in vaso: vedere prospetto 2.a Nota Si applicano le definizioni di cui ai punti 3.4 e 3.5.	Valore dichiarato
DURABILITÀ			
9	Compatibilità con il calcestruzzo (P)	EN 12637-1	Nessuna rottura nelle prove di compressione Lavoro perso per deformazione <20%

Note:

(P) Prodotto per iniezione formulato con legante polimerico reattivo.

Tabella 10. Requisiti prestazionali prodotti per iniezione per il riempimento espansivo delle fessure (S)

N.	Caratteristiche prestazionali	Metodo di prova	Requisiti
CARATTERISTICHE DI BASE			
1	Tenuta all'acqua (P)	EN 14068 Il metodo di prova descritto nella EN 14068 deve essere completato mediante 500 cicli di variazione di pressione, essendo ciascun ciclo costituito come segue: 15 min a 75% della pressione massima - 15 min a 25% della pressione massima. Dopo l'applicazione della pressione massima dichiarata per 7 d, come indicato nella EN 14068, la pressione deve essere abbassata al 50% della pressione massima dichiarata, mantenuta per 2 h a tale pressione, prima dell'inizio dei cicli	Tenuta all'acqua a 2×10^5 Pa Applicazioni speciali: tenuta all'acqua a 7×10^5 Pa
CARATTERISTICHE DI LAVORABILITÀ			
3	Lavorabilità - Viscosità (P)	EN ISO 3219 Quando la EN ISO 3219 non è idonea, deve essere applicata la EN 12618-2. Per larghezze di fessure 0,3 mm - 0,5 mm e 0,8 mm, devono essere utilizzati distanziatori di plastica inerte rispettivamente di 0,3 mm - 0,5 mm e 0,8 mm di larghezza.	≤ 60 mPa·s Percentuale di riempimento della fessura > 95

N.	Caratteristiche prestazionali	Metodo di prova	Requisiti
4	Rapporto ed evoluzione di espansione provocata durante il condizionamento in acqua Variazioni di volume e di massa durante asciugatura all'aria e condizionamento in acqua (P)	EN 14498	Valore dichiarato
CARATTERISTICHE DI REATTIVITÀ			
5	Tempo di lavorabilità (P)	EN ISO 9514 Durata in vaso: vedere prospetto 2.a Nota Si applicano le definizioni di cui ai punti 3.4 e 3.5.	Valore dichiarato
DURABILITÀ			
6	Sensibilità all'acqua: rapporto di espansione per condizionamento in acqua - Trattato come: Variazioni di volume e massa durante asciugatura all'aria e condizionamento in acqua (P)	EN 14498 (regime di condizionamento A)	Il rapporto di espansione deve raggiungere un livello costante durante l'immersione in acqua
7	Sensibilità ai cicli di umidificazione-asciugatura - Trattata come: Variazioni di volume e massa durante asciugatura all'aria e condizionamento in acqua (P)	EN 14498 (regime di condizionamento B)	Dopo i cicli di umidificazione- asciugatura non devono presentarsi variazioni del rapporto di espansione dopo l'immersione in acqua
8	Compatibilità con il calcestruzzo (P)	La prova è eseguita su provini come da EN 12637-1, punti 6.2 e 7.3.1. Campione: 6 provini, ciascuno di 15 mm di spessore. Condizionamento: 3 provini devono essere condizionati in acqua potabile e 3 provini devono essere condizionati in una soluzione di KOH 1M	Le proprietà di resistenza rispetto ai provini immersi in acqua non devono presentare differenze maggiori del 20%. Le proprietà di resistenza sono misurate applicando un carico di compressione con una velocità di 100 mm/min sul provino, con una mazza battente di Ø 20 mm dotata di testa conica (angolo 60°). Si riporta la curva deformazione/carico.

Note:

(P) Prodotto per iniezione formulato con legante polimerico reattivo.

6. Classificazione dei prodotti per iniezione

I prodotti per iniezione sono classificati utilizzando il sistema di classificazione UW, dove la lettera U rappresenta l'impiego previsto e la lettera W la lavorabilità.

Prima di tutto è riportata la lettera U, seguita da una lettera e un numero tra parentesi relativi all'impiego previsto:

- F: Prodotto per iniezione per il riempimento delle fessure con trasmissione delle forze:
 - F1: Aderenza mediante resistenza a trazione $> 2 \text{ N/mm}^2$ (per l'iniezione di fessure, vuoti e interstizi);
 - F2: Aderenza mediante resistenza a trazione $> 0,6 \text{ N/mm}^2$ (limitata al riempimento di vuoti e interstizi);
- D: Prodotto per iniezione per il riempimento duttile di fessure:
 - D1: Tenuta all'acqua a $2 \times 10^5 \text{ Pa}$;
 - D2: Tenuta all'acqua a $7 \times 10^5 \text{ Pa}$ (per applicazioni speciali);
- S: Prodotto per iniezione per il riempimento espansivo delle fessure:
 - S1: Tenuta all'acqua a $2 \times 10^5 \text{ Pa}$;
 - S2: Tenuta all'acqua a $7 \times 10^5 \text{ Pa}$ (per applicazioni speciali).

Dopo è riportata la lettera W, seguita da 3 o 4 gruppi di numeri tra parentesi:

- Primo gruppo (un numero): spessore minimo garantito della fessura, misurato in decimi di millimetro (1 - 2 - 3 - 5 - 8), risultante dalle prove di iniettabilità;
- Secondo gruppo (uno o più numeri): stato di umidità della fessura, risultante dalle prove di iniettabilità e da prove relative alle prestazioni pertinenti (prove di aderenza e di durabilità per categoria F, capacità di allungamento e tenuta all'acqua per categoria D, tenuta all'acqua per categoria S):
 - (1) per fessura asciutta;
 - (2) per fessura umida;
 - (3) per fessura bagnata;
 - (4) per fessura con flusso d'acqua;
- Terzo gruppo (due numeri): temperature di impiego minima e massima;
- Quarto gruppo (un numero): applicabile solo per la categoria F:
 - (1) utilizzabile per fessure soggette a movimenti giornalieri maggiori del 10% o di 0,03 mm, durante la maturazione;
 - (0) utilizzabile per fessure senza movimenti giornalieri o minori del 10% o di 0,03 mm, durante la maturazione.

Per esempio, la classificazione U(F1) W(1) (1/2) (5/30) (1) identifica un prodotto per iniezione che è:

- idoneo per il riempimento delle fessure con trasmissione delle forze;
- iniettabile in fessure di 0,1 mm, asciutte o umide;
- idoneo all'uso da 5 °C a 30 °C;
- utilizzabile per fessure soggette a movimenti giornalieri maggiori del 10% o di 0,03 mm, durante la maturazione.

7. Marcatura CE

L'impiego di prodotti per l'iniezione di categoria F, D e S è ammesso solo ed esclusivamente nel caso in cui siano dotate di Marcatura CE.

L'utilizzo di malte come prodotto per uso strutturale, inteso come materiale o prodotto che consente ad un'opera ove questo è incorporato di soddisfare il requisito essenziale di resistenza meccanica e stabilità, non è infatti previsto dal Decreto Ministeriale 17.01.2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni".

In accordo al Paragrafo 11.1 del Decreto Ministeriale 14.01.2008, "*I materiali e prodotti per uso strutturale devono essere: identificati univocamente a cura del fabbricante, secondo le procedure di seguito richiamate; qualificati sotto la responsabilità del fabbricante, secondo le procedure di seguito richiamate; accettati dal Direttore dei lavori mediante acquisizione e verifica della documentazione di identificazione e qualificazione, nonché mediante eventuali prove di accettazione.*"

Per quanto attiene l'identificazione e la qualificazione di malte impiegate per la riparazione ed il rinforzo delle strutture in calcestruzzo, oggetto del presente Quaderno Tecnico, si configura il caso rappresentato alla lettera A del Paragrafo 11.1 del D.M. 17.01.2018, in quanto è disponibile una norma europea armonizzata. Per maggiore chiarezza si riporta un estratto della norma citata:

"... A) materiali e prodotti per i quali sia disponibile, per l'uso strutturale previsto, una norma europea armonizzata il cui riferimento sia pubblicato su GUUE. Al termine del periodo di coesistenza il loro impiego nelle opere è possibile soltanto se corredata della "Dichiarazione di Prestazione" e della Marcatura CE, prevista al Capo II del Regolamento UE 305/2011".

È onere del Direttore Lavori, in fase di accettazione, accertarsi del possesso della marcatura stessa e richiedere copia della documentazione di marcatura CE e della Dichiarazione di Prestazione di cui al Capo II del Regolamento UE 305/2011, nonché - qualora ritenuto necessario, ai fini della verifica di quanto sopra - copia del certificato di costanza della prestazione del prodotto o di conformità del controllo della produzione in fabbrica, di cui al Capo IV ed Allegato V del Regolamento UE 305/2011, rilasciato da idoneo organismo notificato ai sensi del Capo VII dello stesso Regolamento (UE) 305/2011, **procedendo ad esplicita accettazione per iscritto. Il Direttore Lavori è tenuto inoltre alla verifica della corrispondenza dei prodotti alle tipologie, classi e/o famiglie previsti nella suddetta documentazione.**

Il produttore o il suo rappresentante autorizzato designato nel contesto dell'UE o dell'EFTA è responsabile dell'applicazione della marcatura CE. Il simbolo di marcatura CE da applicare deve essere conforme alla Direttiva 93/68/CE e deve figurare preferibilmente sull'imballaggio (qualora ciò non sia possibile, deve figurare sull'etichetta o sui documenti di trasporto, quali per esempio la bolla di consegna). Le informazioni seguenti devono accompagnare il simbolo di marcatura CE:

- numero di identificazione dell'ente di certificazione (solo per prodotti che rientrano nel sistema 2+);
- nome o marchio identificativo e indirizzo registrato del produttore;

- le ultime due cifre dell'anno di apposizione della marcatura;
- certificato del controllo di produzione in fabbrica (per prodotti che rientrano nel sistema 2+);
- riferimento della norma europea UNI EN 1504;
- descrizione del prodotto: nome generico, materiale, dimensioni... e impiego previsto;
- informazioni sulle caratteristiche essenziali pertinenti.

Nella immagine seguente è rappresentato un esempio delle informazioni di accompagnamento della marcatura CE (tratto da UNI EN 1504 - Parte 5).

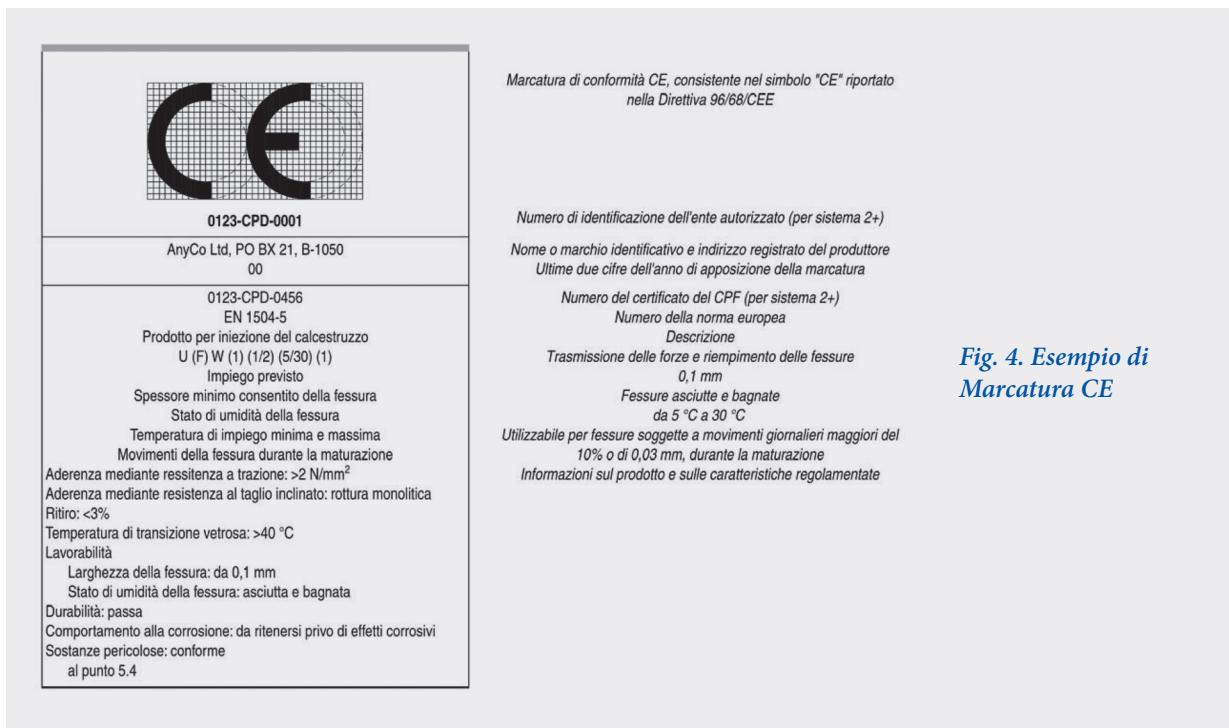


Fig. 4. Esempio di Marcatura CE

8. Preparazione del supporto ed applicazione in opera

Al fine di garantire una adeguata applicazione dei prodotti per iniezione, deve essere garantita una preparazione del supporto di calcestruzzo idonea alle condizioni richieste del supporto e allo stato strutturale degli elementi.

La norma UNI EN 1504 - Parte 10 "Applicazione in opera di prodotti e sistemi e controllo di qualità dei lavori" stabilisce i requisiti per la preparazione del supporto in funzione del metodo di riparazione e di protezione scelto.

In particolare, con riferimento ai metodi di riempimento di fessure, vuoti o interstizi, deve essere eseguita una pulitura del supporto. In accordo ai Principi ed ai metodi di protezione e riparazione di cui alla norma UNI EN 1504 - Parte 9, devono essere rimossi gli strati di calcestruzzo debole, danneggiato e deteriorato, o dove necessario il calcestruzzo sano. L'eventuale presenza di micro-fessure o delaminazioni contribuisce infatti alla riduzione di ancoraggio ed integrità strutturale. A tal fine è suggerito di ispezionare visivamente e sottoporre a martellamento la superficie finita della struttura in calcestruzzo, per rilevare la presenza di materiale incoerente.

Il supporto deve essere privo di polvere, materiale incoerente, contaminanti di superficie e materiali in grado di ridurre l'aderenza o prevenire l'assorbimento o la bagnatura della superficie con i materiali di riparazione. Nel caso in cui le operazioni di pulitura non fossero eseguite immediatamente prima dell'applicazione, il supporto pulito deve essere protetto dalle ulteriori contaminazioni.

Si deve tenere conto della posizione e delle dimensioni delle fessure e dei giunti, di qualunque movimento del supporto e dell'effetto sulla stabilità, sulla durabilità e sulla funzione della struttura, nonché del rischio che si formino nuove fessure in seguito al trattamento.

Il riempimento delle fessure può essere effettuato mediante iniezione, imbibizione o tecniche che utilizzano il vuoto. Prima del riempimento delle fessure, si deve procedere alla rimozione di qualunque agente contaminante, quale ad esempio olio. La quantità tollerabile di umidità o acqua nelle fessure dipende dalle proprietà del materiale di riempimento. La pulizia ed asciugatura delle fessure può essere eseguita con metodi che comprendono l'utilizzo di acqua e solventi e aria pulita sotto pressione. In caso di riempimento delle fessure per iniezione, è solitamente necessario sigillare le fessure per completare l'iniezione senza interruzioni.

9. Compiti del Direttore Lavori

Nel caso di interventi di ripristino del rivestimento di gallerie con prodotti per iniezione, **la figura del Direttore Lavori viene a rivestire un ruolo di estrema importanza poiché nella maggior parte degli interventi risultano assenti entrambi i momenti di collaudo statico e tecnico-amministrativo, a causa della loro classificazione come intervento locale e della natura degli importi a base di gara.**

Il Direttore Lavori rappresenta pertanto il garante dell'intero processo realizzativo dell'intervento di ripristino o rinforzo, dalla fase di accettazione in cantiere del materiale fino al controllo di qualità in situ. Onere del Direttore Lavori è compiere una serie di azioni che portino al controllo della corretta esecuzione dell'opera, compreso il controllo sui materiali.

I compiti essenziali ma non esaustivi del Direttore Lavori possono essere così individuati:

- Verifica delle proposte progettuali e della consistenza effettiva delle opere oggetto di intervento;
- Accettazione in cantiere del materiale;
- Controllo delle procedure di applicazione in opera del prodotto per iniezione;
- Controllo delle prestazioni richieste dal progetto, in accordo con EN 1504, e D. M. 17.01.2018.

Il Direttore Lavori, in fase di accettazione, deve accertarsi del possesso della marcatura stessa e richiedere copia della documentazione di marcatura CE e della Dichiarazione di Prestazione di cui al Capo II del Regolamento UE 305/2011, nonché - qualora ritenuto necessario, ai fini della verifica di quanto sopra - copia del certificato di costanza della prestazione del prodotto o di conformità del controllo della produzione in fabbrica, di cui al Capo IV ed Allegato V del Regolamento UE 305/2011, rilasciato da idoneo organismo notificato ai sensi del Capo VII dello stesso Regolamento (UE) 305/2011, **procedendo ad esplicita accettazione per iscritto**. Il Direttore Lavori è tenuto inoltre alla verifica della corrispondenza dei prodotti alle tipologie, classi e/o famiglie previsti nella suddetta documentazione;

Il Direttore Lavori deve controllare il rispetto delle procedure di applicazione del prodotto per iniezione, riportate all'interno della scheda prodotto. Precedentemente all'avvio dei lavori di protezione, riparazione o rinforzo di strutture in calcestruzzo **si suggerisce l'esecuzione di un campo prova su una porzione della struttura**, al fine di accettare le corrette modalità di applicazione del prodotto o sistema, tenuto conto anche delle specifiche condizioni ambientali e dell'effettiva preparazione del supporto. **In tale fase, in caso di esito negativo del campo prova, può essere prevista esclusivamente una modifica del prodotto per iniezione previsto, ma non della tecnica di intervento.** Successivamente all'esecuzione di prove riguardanti le proprietà del supporto, l'idoneità dei prodotti e dei sistemi, le loro modalità di applicazione e le proprietà finali dei prodotti e dei sistemi induriti e successivamente ad accettazione delle stesse, si potrà dar esecuzione ai lavori di ripristino, avendo cura di seguire le medesime procedure di applicazione del materiale.

Con riferimento all'ultimo punto, riguardante le operazioni di controllo, si sottolinea l'importanza e la ne-

cessità di eseguire controlli visivi e rilievi del corretto ripristino del rivestimento e della corretta sigillatura delle fessure presenti, anteriormente alla eventuale esecuzione del ricoprimento. In caso di esito negativo e di assenza di acqua in pressione, può essere prevista l'esecuzione di carotaggi, al fine della verifica del grado di intasamento della fessura raggiunto. In caso di presenza di acqua, si consiglia l'esecuzione di carotaggi per una profondità massima pari alla metà dello spessore del rivestimento.

10. Compiti del Progettista ed indicazioni progettuali

Al fine di garantire una adeguata qualità ed efficacia dell'intervento di ripristino del rivestimento, la fase progettuale riveste un ruolo di primaria importanza.

Il Progettista, dopo attenta valutazione delle cause del quadro di ammaloramento del rivestimento della galleria e delle prestazioni richieste dal relativo intervento di ripristino, deve indicare correttamente in fase progettuale la categoria del prodotto per iniezione da impiegare - F, D o S -, le caratteristiche e prestazioni richieste e le fasi di applicazione. Il progettista deve espressamente specificare in sede progettuale il tipo di prodotto per iniezione previsto, identificato a seguito di un attento esame di tutte le problematiche relative.

Il Progettista deve inoltre indicare dettagliatamente le procedure previste per il controllo dei materiali in opera, quali ad esempio il controllo visivo e il rilievo del corretto ripristino e della idonea sigillatura delle fessure, prima dell'esecuzione di un eventuale sistema di ricoprimento.

11. Tecniche di intervento

I possibili interventi di ripristino del rivestimento in calcestruzzo di gallerie sono funzione della tipologia di danneggiamento presente.

In particolare, fessurazioni di diversa tipologia sono trattate in modo diverso ed adeguato all'ampiezza della fessura e alla condizione del supporto.

Una prima differenziazione del quadro di danno è svolta considerando lo stato di umidità della fessura, suddividendo in fessure con assenza o presenza di acqua.

Con riferimento alla prima tipologia di fessure asciutte/umide, una ulteriore classificazione può essere eseguita in funzione della loro ampiezza, considerando fessure di piccola entità, comprese tra 0.2 mm e 0.5 mm e fessure di ampiezza maggiore, superiore a 0.5 mm.

Per quanto riguarda la seconda tipologia di fessure bagnate, le fessurazioni possono essere suddivise a

seconda della loro estensione, in fessure puntuali o diffuse. Una ulteriore classificazione può essere operata sulla base dello stato del supporto, considerando i casi di fessura bagnata - acqua permanente nella fessura, accompagnata dalla presenza di gocce d'acqua sulla superficie della fessura - e di flusso d'acqua. Nella Tabella 11 è riportato uno schema riassuntivo di tali tipologie di danneggiamento, alla base della scelta dell'intervento di ripristino adeguato.

Tabella 11. Tipologie di danneggiamento

Tipologia	Condizione del supporto	Aampiezza/Estensione
A1	Assenza di acqua	Piccola entità $0.2 \leq w_f \leq 0.5$ mm
A2	Fessura asciutta/umida*	Larghezza maggiore $w_f > 0.5$ mm
B1	Fessura bagnata	Fessure puntuali
B2	Presenza	Fessure diffuse
C1	di acqua	Fessure puntuali
C2	Fessura con flusso d'acqua (Venute d'acqua non in pressione o in pressione)	Fessure diffuse

* Nota: definizione secondo UNI EN 1504-5:2005

Altre tipologie di danneggiamento riscontrabili in rivestimenti di gallerie in calcestruzzo consistono in alveolature, sbeccature o nidi di ghiaia.

11.1. Danno A1 - Assenza di acqua, fessura di piccola entità

Per quanto riguarda la tipologia di danno A1- "Assenza di acqua, fessure di piccola entità", per aumentare la durabilità ed assicurare la protezione del calcestruzzo dalla penetrazione di acqua e di agenti aggressivi presenti nell'atmosfera, si può effettuare un trattamento superficiale con malta cementizia polimero rinforzata.

La superficie in calcestruzzo oggetto del trattamento deve essere solida ed adeguatamente pulita, in modo da assicurare la necessaria adesione con il prodotto di ripristino. Si deve pertanto procedere alla rimozione di tutte le eventuali parti friabili, polveri, grassi o oli disarmanti, mediante processo di idrosabbiatura o lavaggio con acqua in pressione. Nel caso in cui il supporto in calcestruzzo presenti un elevato grado di ammaloramento, lo stesso deve essere adeguatamente preparato in accordo alle indicazioni contenute nel Paragrafo 8.

Successivamente si può procedere all'applicazione della malta cementizia polimero rinforzata sulla superficie in calcestruzzo ben preparata ed umida, manualmente oppure a spruzzo, procedendo per strati

successivi fino al raggiungimento dello spessore di progetto. Nel caso di presenza di zone soggette a microfessurazione o particolarmente sollecitate, si consiglia l'inserimento di un'armatura di rinforzo tra gli strati successivi.

Un trattamento alternativo di protezione della superficie in calcestruzzo consiste nell'applicazione del solo strato di pittura.

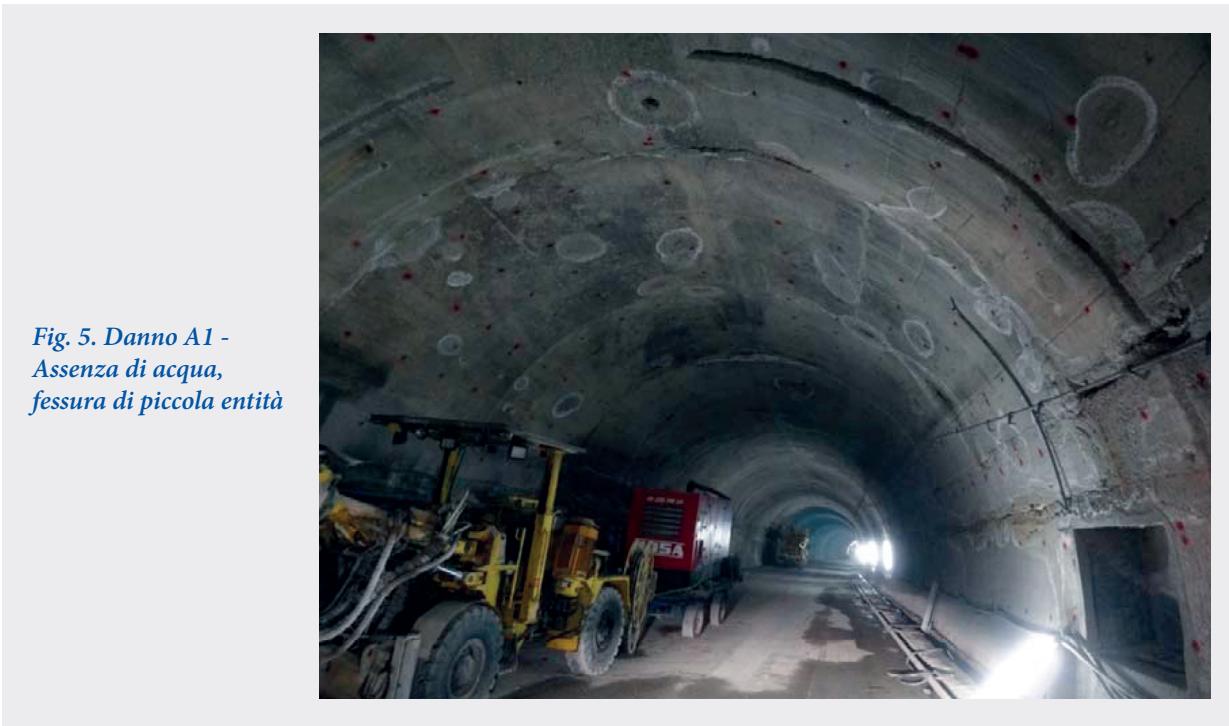


Fig. 5. Danno A1 - Assenza di acqua, fessura di piccola entità

11.2. Danno A2 - Assenza di acqua, fessuradi larghezza maggiore

Una prima tecnica di intervento, in caso di tipologia di danno A2 - "Assenza di acqua, fessura di larghezza maggiore", consiste nella sigillatura della fessura. Generalmente si effettua una prima fase di apertura della fessura ed una fase successiva di sigillatura della stessa con malta epossidica bi-componente. Un limite di tale tecnica risiede nell'impossibilità di sigillare completamente la fessura per l'intera profondità. Una seconda tecnica è rappresentata dalla iniezione della fessura, con resine epossidiche o silicate, per mezzo di packer superficiale o packer meccanico. Nel caso di impiego di packer meccanico, i fori che dovranno accogliere i packer dovranno essere effettuati a quinconce ogni 25 cm, a una distanza pari a 25-30 cm dal giunto, con un'inclinazione di 45 gradi rispetto all'asse del giunto. In generale è opportuno che la fessura venga intercettata ad una profondità non inferiore alla metà dello spessore del rivestimento. Prima dell'installazione dei packer, i fori dovranno essere adeguatamente puliti per soffiatura.

Qualora la fessura presenti un'ampiezza elevata ed interassi l'intero spessore del rivestimento, si consiglia l'utilizzo di resine di tipo silicate, in virtù del costo minore, delle migliori proprietà in ambiente umido,

del maggiore grado di viscosità e della possibilità di taratura del tempo di polimerizzazione. In virtù del fatto che queste resine - sia epossidiche che silicate ad alte prestazioni - hanno normalmente tempi di reazione abbastanza lunghi, è opportuno sempre prevedere l'apertura e la successiva sigillatura della fessura per mezzo di malta epossidica bi-componente prima di effettuare l'iniezione, al fine di evitare che la resina colli all'esterno della fessura.

Deve essere inoltre sempre effettuata una valutazione della compatibilità tra prodotto per iniezione e supporto in calcestruzzo, in relazione alle sue proprietà termo-igrometriche.



Fig. 6. Apertura della fessura

Fig. 7. Iniezione della fessura

11.3. Danno B1 - Presenza di acqua, fessure bagnate, puntuali

Nel caso di presenza permanente di acqua nella fessura - condizione del supporto di tipo "bagnato" - non è indicato l'utilizzo di resine epossidiche, particolarmente sensibili a condizioni ambientali di umidità. Inoltre è sconsigliato l'utilizzo di packer superficiali, a causa della difficoltà di realizzare incollaggi adeguati su superfici di calcestruzzo bagnate e della necessità di garantire il corretto riempimento della fessura, lungo l'intero sviluppo.

Una prima tecnica di intervento consiste nella sigillatura, tramite iniezioni con packer meccanico, di resine acriliche, poliuretaniche o silicate, caratterizzate da elevate proprietà espansive e di sigillatura. Successivamente, può essere eventualmente effettuato un intervento di scasso e sigillatura con malta cementizia a rapido indurimento. Nel caso in cui la sigillatura avvenga dopo l'iniezione, può essere previsto l'impiego di malta epossidica bi-componente, presupponendo che la fessura sia stata asciugata.

Una tecnica alternativa di intervento è rappresentata invece da iniezioni con packer meccanico di resine silicate ad alte prestazioni (resistenza a compressione maggiore o uguale a 50 MPa), previo scasso della fessura e sigillatura con malta cementizia a rapido indurimento.

Fig. 8. Fessure puntuali, bagnate

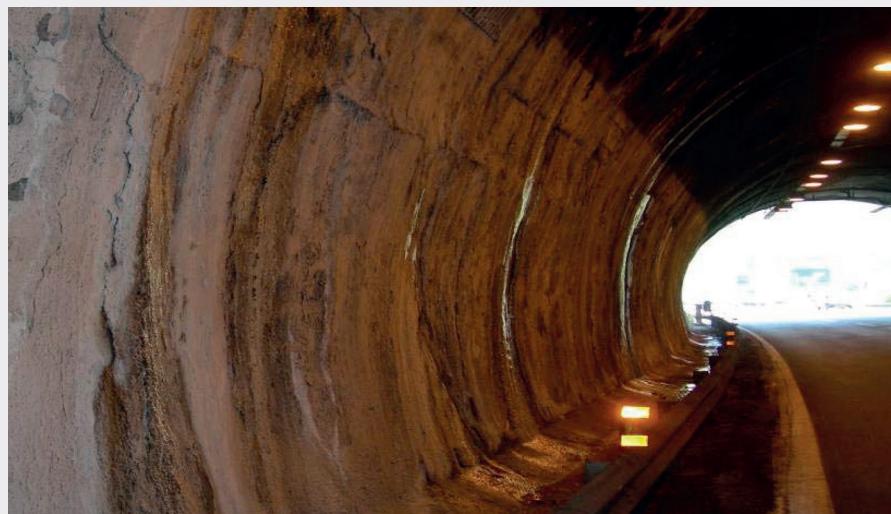


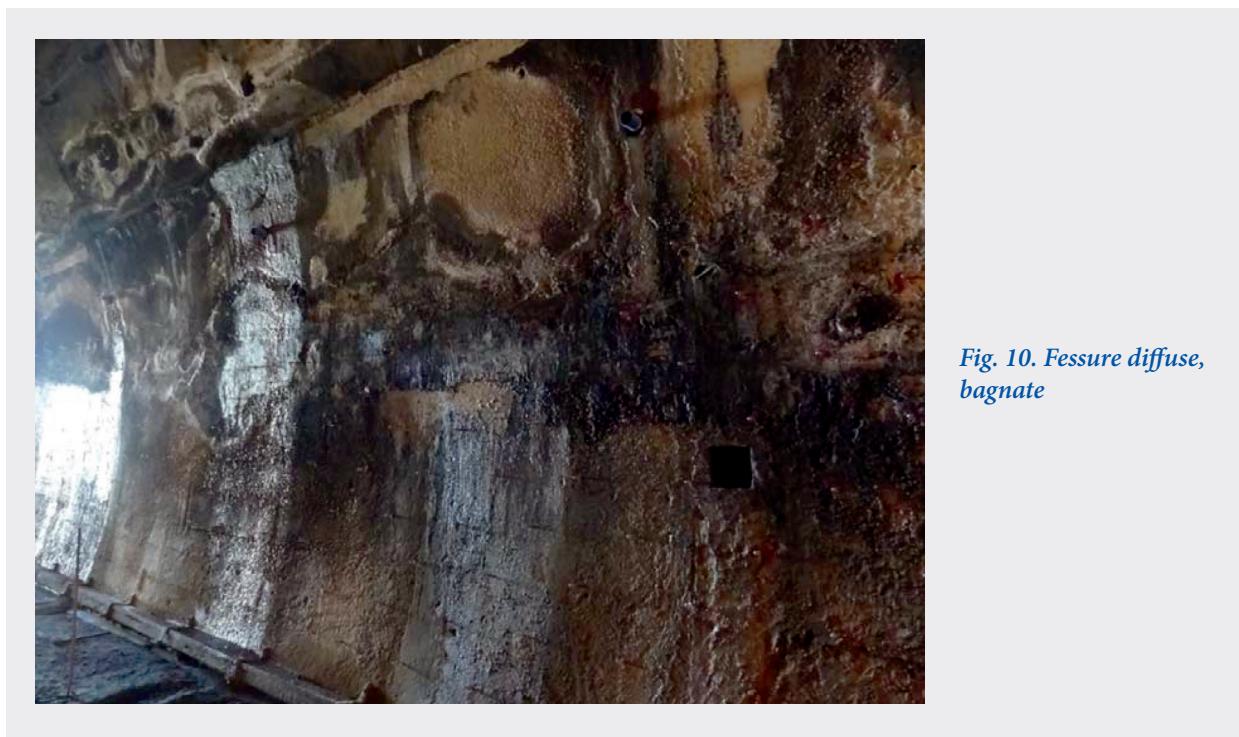
Fig. 9. Iniezione della fessura



11.4. Danno B₂ - Presenza di acqua, fessure bagnate, diffuse

Per quanto riguarda la tipologia di danneggiamento di tipo B₂, caratterizzata da fessure diffuse sulla superficie del rivestimento in calcestruzzo, con presenza di acqua permanente al loro interno, si consiglia l'esecuzione degli interventi di ripristino descritti al Paragrafo 11.2 "Assenza di acqua, fessura di larghezza maggiore", previo trattamento di iniezione a tergo del rivestimento. A seconda della presenza o meno di vuoti di grande dimensione o cavità a tergo del rivestimento, possono utilizzarsi rispettivamente malte cementizie additivate con polimeri con elevata resistenza al dilavamento oppure resine acriliche. Una tecnica efficace per l'esecuzione di retroiniezioni consiste nella realizzazione di cordoni di compartmentazione in resine poliuretaniche o silicate ad alto potere espandente, lungo la sezione trasversale della galleria, e nella successiva iniezione dei settori così realizzati con malta cementizia ad elevata resistenza al dilavamento.

Vista la presenza di acqua e la natura diffusa delle fessure, si consiglia di valutare l'opportunità di eseguire un intervento di impermeabilizzazione globale della struttura. Per maggiori dettagli si rimanda al Quaderno Tecnico n.14 "Interventi di impermeabilizzazione in galleria".



11.5. Danno C₁ - Presenza di acqua, fessure con flusso di acqua, puntuali

Nel caso di tipologia di danneggiamento di tipo C₁, caratterizzata da fessure puntuali sulla superficie del rivestimento in calcestruzzo, con presenza di un flusso di acqua attraverso esse, sono comunemente previsti due tipi di intervento.

Il primo consiste nell'iniezione delle fessure con packer meccanico, con resine poliuretaniche o silicate ad elevata reattività o ad alto potere espandente.

Il secondo è rappresentato invece dall'esecuzione di iniezioni localizzate a tergo del rivestimento con resine poliuretaniche o silicate ad alto potere espandente e nel successivo trattamento della fessura con i metodi descritti al Paragrafo 11.2 "Assenza di acqua, fessura di larghezza maggiore".

11.6. Danno C2 - Presenza di acqua, fessure con flusso di acqua, diffuse

In presenza di un danneggiamento di tipo C2, con fessure diffuse sulla superficie del rivestimento in calcestruzzo e presenza di un flusso di acqua attraverso esse, la modalità comune di intervento di ripristino consiste nella esecuzione di iniezioni a tergo del rivestimento con resine poliuretaniche o silicate ad alto potere espandente e tempi di reazione ridotti, e nel successivo trattamento della fessura con i metodi descritti al Paragrafo 11.2 "Assenza di acqua, fessura di larghezza maggiore".

Vista la presenza di acqua e la natura diffusa delle fessure, si consiglia di valutare l'opportunità di eseguire un intervento di impermeabilizzazione globale della struttura. Per maggiori dettagli si rimanda al Quaderno Tecnico n.14 "*Interventi di impermeabilizzazione in galleria*".

11.7. Presenza di vespai

Nel caso in cui il rivestimento in calcestruzzo della galleria sia interessato dalla presenza di vespai, la tecnica di intervento per il ripristino può essere sintetizzata nelle seguenti fasi:

- scalpellatura meccanica delle parti di materiale non coeso nell'area oggetto di intervento;
- rimozione manuale e soffiatura delle polveri o delle porzioni ammalorate di calcestruzzo all'interno delle cavità da riempire;
- risagomatura e spazzolatura delle eventuali armature esistenti;
- predisposizione dei fori a quinconce per la successiva iniezione delle cavità;
- installazione dei tubetti iniettori sigillati e stuccatura con stucco epossidico degli stessi;
- spaglio con quarzo dello stucco applicato;
- ricostruzione e regolarizzazione della sezione in calcestruzzo dell'area da trattare con malta di classe R3 o R4;
- finitura superficiale della malta applicata e stagionatura;
- dopo almeno 25 ore, iniezione a bassa pressione (< 5 bar) delle cavità, a partire dai fori inferiori, con resina:
 - nel caso di vespai aventi cavità ampie e fessure passanti e continue si utilizza una resina organo-minerale con tempo di reazione modulabile marcata in accordo alla UNI EN 1504-5;
 - nel caso di vespai con ridotte cavità e fessure non continue si utilizza una resina epossidica super fluida marcata secondo UNI EN 1504-5;
- stuccatura dei fori di iniezione.

Nel caso di presenza di vespai solamente di tipo superficiale, si procede con rasatura della superficie ed applicazione di una malta specifica.

Bibliografia

- [1] UNI EN 1504-1:2005 "Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità - Parte 1: Definizioni"
- [2] UNI EN 1504-5:2005 "Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità - Parte 5: Iniezione del calcestruzzo"
- [3] UNI EN 1504-9:2008 "Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità - Parte 9: Principi generali per l'uso dei prodotti e dei sistemi"
- [4] UNI EN 1504-10:2005 "Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità - Parte 10: Applicazione in opera di prodotti e sistemi e controllo di qualità dei lavori"
- [5] UNI EN 12715:2003 "Esecuzione di lavori geotecnici speciali - Iniezioni"
- [6] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto 17.01.2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale, n. 42 del 20 febbraio 2018 - Serie generale

QUADERNO TECNICO N. 14

**Interventi di
impermeabilizzazione
in galleria**

Indice Quaderno Tecnico N. 14

1.	Introduzione	43
2.	Rilievo quadro fessurativo e condizioni del supporto	44
3.	Tecniche di intervento	45
3.1.	Membrana preformata in PVC	46
3.1.1.	Marcatura CE	60
3.2.	Membrana a spruzzo	62
3.3.	Sistema misto	65
4.	Compiti del Direttore Lavori	66
	Bibliografia	66

1. Introduzione

Uno degli aspetti più importanti della manutenzione delle gallerie riguarda gli interventi di impermeabilizzazione. I rivestimenti delle gallerie della rete viaria italiana realizzati in calcestruzzo mostrano infatti spesso situazioni di degrado variabili e generalmente diffuse, connesse alla presenza di infiltrazioni di acqua. Tali problematiche si manifestano con particolare frequenza nelle gallerie di non recente epoca di realizzazione, caratterizzate da gravi e complessi problemi di conservazione. Il calcestruzzo del rivestimento può infatti essere interessato da un processo di ammaloramento più o meno diffuso, con presenza di fessure, lesioni, distacchi o nidi di ghiaia, accentuati dalla eventuale presenza di infiltrazioni o sacche di acqua. Le cause di tali fenomeni di degrado sono molteplici e possono essere sinteticamente individuate in cause di natura ambientale o di non idonea esecuzione.

Al fine di stabilire la tecnica di intervento più idonea, si deve inizialmente procedere ad una valutazione dello stato di fatto della galleria, con particolare riferimento alla presenza o meno di un sistema di impermeabilizzazione.

Un intervento di manutenzione straordinaria abbastanza diffuso consiste nel ripristino o nella realizzazione del sistema di impermeabilizzazione della galleria. Il presente Quaderno Tecnico analizza le principali tecniche di intervento per il ripristino della tenuta idraulica, mentre per quanto concerne gli interventi di ripristino del rivestimento si rimanda al Quaderno Tecnico n. 13 *"Interventi di ripristino in galleria"*. Per gli aspetti inerenti gli interventi di ripristino dello stato corticale, si dovrà fare riferimento al Quaderno Tecnico n. 6 *"Interventi di ripristino corticale dei calcestruzzi ammalorati"*.

Nel caso in cui l'intervento di ripristino della tenuta idraulica consista esclusivamente nell'iniezione della fessura, si rimanda al Quaderno Tecnico n. 13 *"Interventi di ripristino in galleria"*.

È opportuno evidenziare che il presente Quaderno Tecnico non sostituisce il progetto di ripristino necessario laddove il degrado sia tale da richiedere l'esecuzione di un intervento di rinforzo.

Occorre considerare che gli interventi oggetto del presente Quaderno Tecnico non sono generalmente inquadrabili come interventi di ripristino strutturale, escludendo conseguentemente la necessità di effettuare un collaudo statico. Inoltre, considerato il valore degli importi a base di gara, in molti casi (importo lavori < 1 M€) non è necessario nemmeno il collaudo tecnico-amministrativo, sostituito dal Certificato di Regolare esecuzione. Si evidenzia pertanto come la figura del Direttore Lavori rivesta un ruolo di estrema importanza, a garanzia del controllo della corretta esecuzione dell'opera in termini di applicazione delle procedure di accettazione in cantiere dei materiali, di controllo delle prestazioni richieste dal progetto e di applicazione in opera.

2. Rilievo quadro fessurativo e condizioni del supporto

Nella fase di rilievo della galleria, è importante valutare la presenza o meno di impermeabilizzazione del rivestimento. Nel caso in cui quest'ultima risultasse assente, si può procedere con interventi di ripristino, descritti nel Quaderno Tecnico n. 13 "Interventi di ripristino in galleria", oppure con un intervento di posa del sistema di impermeabilizzazione, oggetto del presente Quaderno Tecnico, previa esecuzione di interventi di ripristino del rivestimento.

Al fine di assicurare un adeguato processo di progettazione ed esecuzione dell'intervento di impermeabilizzazione, la fase iniziale di rilievo del quadro fessurativo e delle condizioni del supporto assume un ruolo di primaria importanza. Il rilievo e la rappresentazione grafica delle fessure costituiscono infatti un utile strumento per la valutazione delle cause del fenomeno di ammaloramento e per la scelta della migliore tecnica di intervento. Le possibili tecniche di intervento dipendono dalla tipologia delle fessure, dalla misura delle loro ampiezze e movimenti nel tempo e dalla condizione del supporto.

Come riportato nel Quaderno Tecnico n. 13 "Interventi di ripristino in galleria", le fessure possono essere classificate in base al loro andamento:

- verticale;
- orizzontale;
- obliquo;

ed in relazione alla loro entità, in termini di:

- estensione;
- ampiezza.

Indicativamente, possono essere definiti tre intervalli di ampiezza della fessura, w_f , misurata sulla superficie del calcestruzzo:

- $0 \leq w_f \leq 0.2 \text{ mm}$
- $0.2 \text{ mm} < w_f \leq 0.5 \text{ mm}$
- $w_f \geq 0.5 \text{ mm}$

La condizione del supporto viene classificata a seconda del contenuto di acqua presente nella fessura o che trasuda da essa, considerando le condizioni di fessura:

- **asciutta**: assenza di acqua all'interno della fessura o sui fianchi ed esclusione di fenomeni di migrazione di acqua nella fessura durante le fasi di iniezione e di indurimento del prodotto per iniezione. Una fessura asciutta è riconoscibile dal fatto che il colore della fessura è uguale a quello della superficie asciutta del calcestruzzo.
- **umida**: assenza di acqua nella fessura associata a presenza sui fianchi, senza formazione di uno strato

di acqua sulla superficie dei fianchi. Una fessura umida è riconoscibile dal fatto che il colore della superficie della fessura è diverso da quello della superficie asciutta del calcestruzzo.

- **bagnata:** presenza permanente di acqua nella fessura. La presenza di gocce d'acqua sulla superficie della fessura è caratteristica di una fessura bagnata.
- **flusso d'acqua:** presenza di un flusso d'acqua attraverso la fessura. Possono essere previste misurazioni di pressione e portata.

3. Tecniche di intervento

Ai fini della individuazione della corretta tecnica di intervento per il ripristino della tenuta idraulica della galleria, è utile riferirsi alla classificazione di danno riportata nel Quaderno Tecnico n. 13 "Interventi di ripristino in galleria", basata

sullo stato di umidità della fessura, sulla misura della loro ampiezza e sulla loro estensione.

In particolare, una prima classificazione è effettuata suddividendo in fessure con assenza o presenza di acqua. Con riferimento alla prima tipologia di fessure asciutte/umide, una ulteriore classificazione può essere eseguita in funzione della loro ampiezza, considerando fessure di piccola entità, comprese tra 0.2 mm e 0.5 mm e fessure di ampiezza maggiore, superiore a 0.5 mm.

Per quanto riguarda la seconda tipologia di fessure bagnate, le fessurazioni possono essere suddivise a seconda della loro estensione, in fessure puntuali o diffuse. Una ulteriore classificazione può essere operata sulla base dello stato del supporto, considerando i casi di fessura bagnata - acqua permanente nella fessura, accompagnata dalla presenza di gocce d'acqua sulla superficie della fessura - e di flusso d'acqua. Nella Tabella 1 è riportato uno schema riassuntivo di tali tipologie di danneggiamento.

Tabella 1. Tipologie di danneggiamento

Tipologia	Condizione del supporto	Aampiezza/Estensione
A1	Assenza di acqua	Piccola entità $0.2 \leq w_f \leq 0.5$ mm
	Fessura asciutta/umida*	
A2		Larghezza maggiore $w_f > 0.5$ mm
B1	Fessure bagnata	Fessure puntuali
B2	Presenza di acqua	Fessure diffuse
C1	Fessura con flusso d'acqua (Venute d'acqua non in pressione o in pressione)	Fessure puntuali
C2		Fessure diffuse

Nel caso di danneggiamento classificabile nelle categorie B2 e C2, ovvero nei casi in cui il Progettista ritenga opportuno realizzare un sistema di impermeabilizzazione - in assenza di un sistema di impermeabilizzazione originario - dovrà essere valutata l'opportunità di eseguire un intervento globale di ripristino della tenuta idraulica della struttura.

In generale possono essere individuati tre sistemi di impermeabilizzazione di una galleria:

- membrana preformata in PVC;
- membrana a spruzzo;
- sistema misto.

3.1. Membrana preformata in PVC

Il sistema di impermeabilizzazione con membrana in PVC può essere applicato anche in presenza di condizioni estreme di umidità e/o venute d'acqua. I suoi vantaggi principali consistono in:

- facilità di messa in opera;
- buone caratteristiche di lavorabilità e saldabilità;
- buona resistenza meccanica;
- buona resistenza all'azione di una pressione permanente;
- buona flessibilità anche a basse temperature;
- buona resistenza nei confronti di correnti vaganti ed invecchiamento;
- idoneità al contatto con acqua acida o alcalina.

In generale si può prevedere la posa del sistema di impermeabilizzazione e l'esecuzione del rivestimento - in caso di sussistenza di un idoneo ingombro all'interno della sagoma della galleria - ovvero la demolizione per fresatura del supporto originario con successiva realizzazione del sistema di impermeabilizzazione e ricostruzione del rivestimento definitivo.

Nel caso di interventi di impermeabilizzazione di gallerie esistenti, uno dei sistemi più impiegati è il sistema drenato a singolo strato con inserimento di waterstop ed eventuale sistema di backup a tubi re-iniettabili.

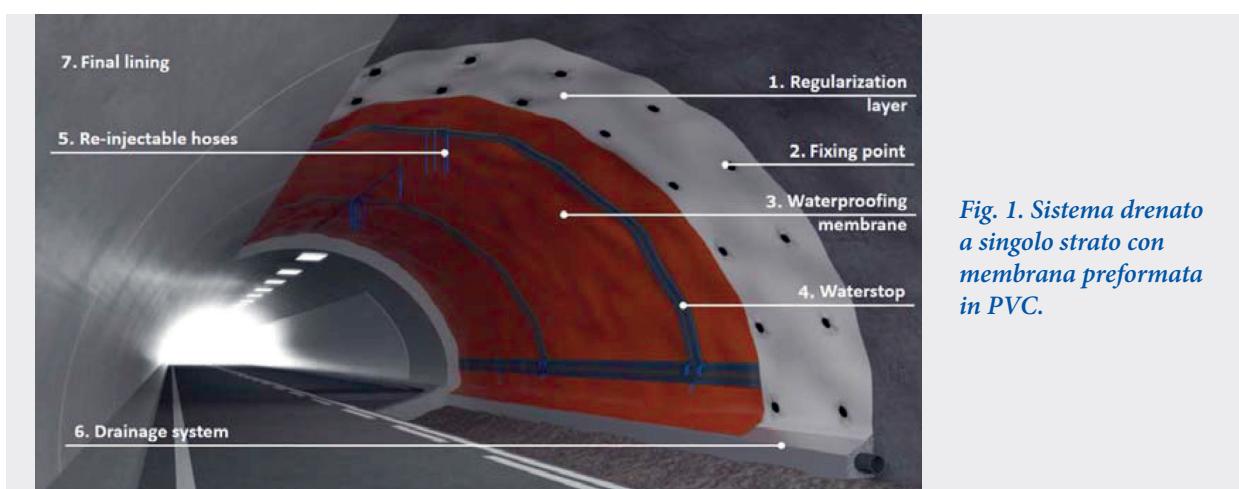


Fig. 1. Sistema drenato a singolo strato con membrana preformata in PVC.

Punto di partenza dell'intervento è la valutazione del supporto in termini di compatibilità con la membrana. Lo stesso deve essere pulito e regolare. Indicazioni in merito alla regolarità, riportate nella Figura 2 per i casi di assenza e presenza di pressione dell'acqua, sono fornite in [2].

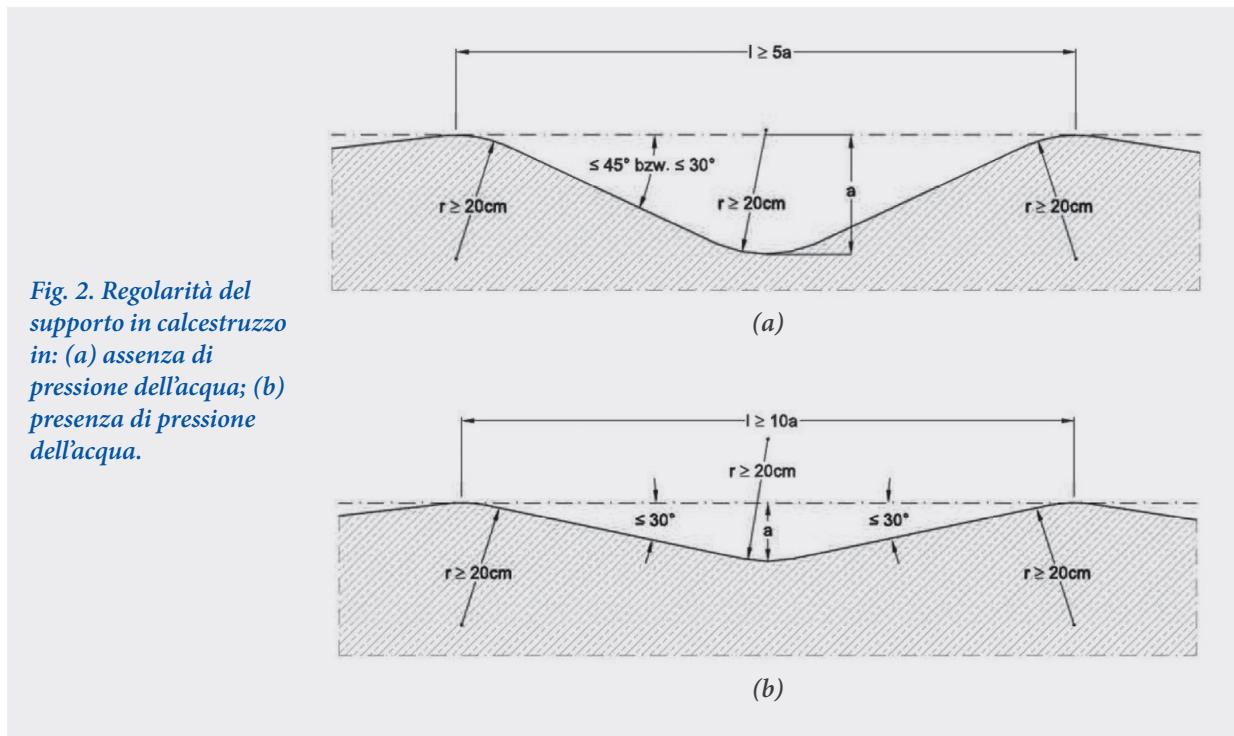


Fig. 2. Regolarità del supporto in calcestruzzo in: (a) assenza di pressione dell'acqua; (b) presenza di pressione dell'acqua.

Nel caso in cui il supporto sia interessato da fenomeni di ammaloramento del calcestruzzo e/o delle barre di armatura, si dovrà fare riferimento ai Quaderni Tecnici n. 6 "Interventi di ripristino corticale dei calcestruzzi ammalorati" e n. 13 "Interventi di ripristino in galleria", preventivamente all'intervento di impermeabilizzazione.

Al fine di assicurare una adeguata protezione della membrana preformata in PVC dalle sollecitazioni indotte dalle eventuali asperità ed irregolarità del supporto in calcestruzzo, si prevede l'installazione di uno strato in tessuto non tessuto, di grammatura non inferiore a 700 g/m^2 . Nel caso in cui il supporto sia caratterizzato dalla presenza di fibre metalliche, tale valore è incrementato a 1000 g/m^2 . Se si utilizza uno strato di regolarizzazione in calcestruzzo fibrorinforzato proiettato, ai fini della definizione della grammatura del tessuto non tessuto, valgono le prescrizioni di cui sopra.

Il tessuto non tessuto viene generalmente fornito in rotoli, prevedendo pertanto una sovrapposizione pari ad almeno 100 mm. Lo stesso viene fissato al supporto sottostante in calcestruzzo mediante chiodatura.

Nella tabella seguente sono indicate le caratteristiche prestazionali richieste.

Tabella 2. Caratteristiche prestazionali strato in tessuto non tessuto [700 g/m²]

Geotessile non tessuto costituito al 100% da fibre di prima scelta di Polipropilene, alta tenacità, stabilizzate ai raggi UV, coesionate meccanicamente mediante agugliatura, esenti da trattamenti chimici o termici, con funzione di SEPARAZIONE, FILTRAZIONE e PROTEZIONE	
Massa Areica (UNI EN ISO 9864) (g/m ²)	700 ±10%
Resistenza a trazione longitudinale (UNI EN ISO 10319) (kN/m)	≥ 52
Resistenza a trazione trasversale (UNI EN ISO 10319) (kN/m)	≥ 45
Allungamento a carico massimo (UNI EN ISO 10319) (%)	≥ 60
Resistenza al punzonamento statico (CBR) (UNI EN ISO 12236) (N)	≥ 7600
Resistenza al punzonamento dinamico (Cone Drop Test) (UNI EN ISO 13433) (mm)	≤ 4
Apertura caratteristica dei pori O90 (UNI EN ISO 12956) (μm)	≤ 130
Permeabilità all'acqua perpendicolare al piano (UNI EN ISO 11058) (m/s)	≥ 16
Capacità drenante (trasmissività a 20 kPa) (UNI EN ISO 12958) (m ² /s)	≥ 7,5 × 10 ⁻⁶
Classe di reazione al fuoco (UNI EN ISO 13501-1)	Classe E

Nota: Il geotessile dovrà essere provvisto di marcatura CE in conformità alla direttiva 89/106 CEE. Al materiale fornito dovrà essere allegato il documento di accompagnamento CE, sul quale dovranno essere riportate le seguenti indicazioni di durabilità:

- *Da coprire entro 1 mese dall'installazione;*
 - *Previsione di durabilità minima di 100 anni in terreni naturali con 4< pH <9 e temperature del terreno <25°C*
- Tutti i rotoli presenti in cantiere dovranno riportare il marchio di conformità europea CE.*

Tabella 3. Caratteristiche prestazionali strato in tessuto non tessuto [1000 g/m²]

Geotessile non tessuto costituito al 100% da fibre di prima scelta di Polipropilene, alta tenacità, stabilizzate ai raggi UV, coesionate meccanicamente mediante agugliatura, esenti da trattamenti chimici o termici, con funzione di SEPARAZIONE, FILTRAZIONE e PROTEZIONE	
Massa Areica (UNI EN ISO 9864) (g/m ²)	1000 ±10%
Resistenza a trazione longitudinale (UNI EN ISO 10319) (kN/m)	≥ 63
Resistenza a trazione trasversale (UNI EN ISO 10319) (kN/m)	≥ 58
Allungamento a carico massimo (UNI EN ISO 10319) (%)	≥ 60
Resistenza al punzonamento statico (CBR) (UNI EN ISO 12236) (N)	≥ 10000
Resistenza al punzonamento dinamico (Cone Drop Test) (UNI EN ISO 13433) (mm)	≤ 0

Apertura caratteristica dei pori O90 (UNI EN ISO 12956) (μm)	≤ 130
Permeabilità all'acqua perpendicolare al piano (UNI EN ISO 11058) (m/s)	≥ 10
Capacità drenante (trasmissività a 20 kPa) (UNI EN ISO 12958) (m ² /s)	$\geq 11 \times 10^{-6}$
Classe di reazione al fuoco (UNI EN ISO 13501-1)	Classe E

Nota: Il geotessile dovrà essere provvisto di marcatura CE in conformità alla direttiva 89/106 CEE. Al materiale fornito dovrà essere allegato il documento di accompagnamento CE, sul quale dovranno essere riportate le seguenti indicazioni di durabilità:

- *Da coprire entro 1 mese dall'installazione;*
 - *Previsione di durabilità minima di 100 anni in terreni naturali con $4 < \text{pH} < 9$ e temperature del terreno $< 25^\circ\text{C}$*
- Tutti i rotoli presenti in cantiere dovranno riportare il marchio di conformità europea CE.*

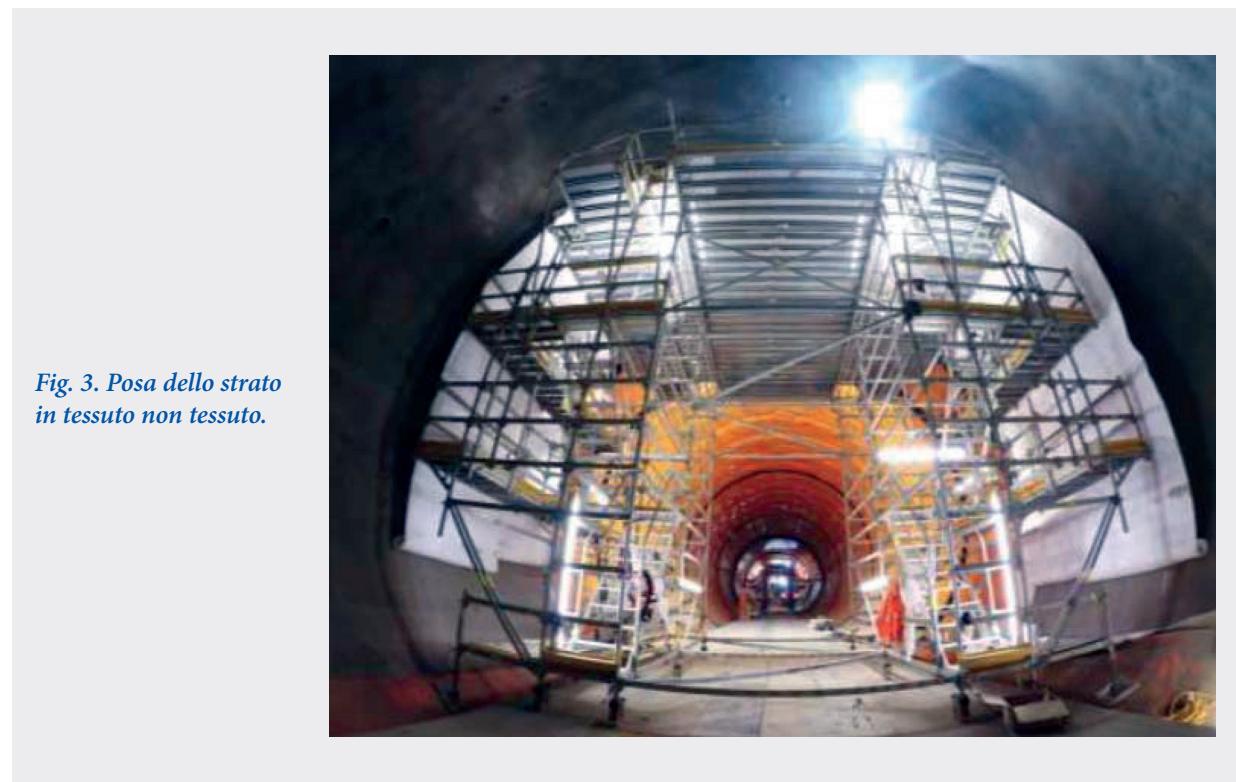
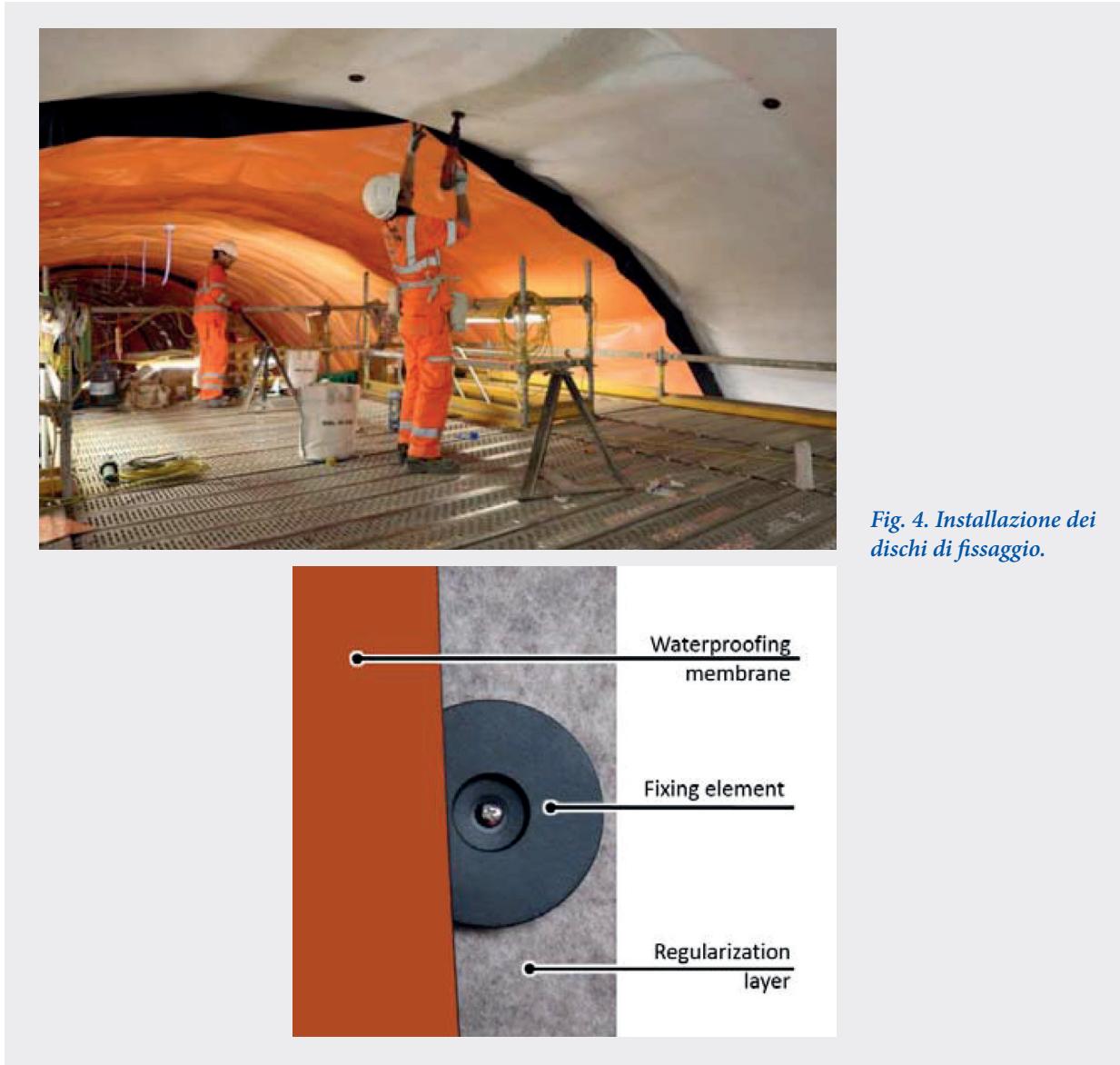


Fig. 3. Posa dello strato in tessuto non tessuto.

Successivamente si procede con l'installazione della membrana preformata in PVC, obbligatoriamente mediante dischi di fissaggio, in quanto appositamente progettati per garantire l'integrità della membrana stessa in caso di sollecitazioni in fase di installazione e getto del rivestimento definitivo. I dischi dovranno essere progettati al fine di collassare prima che la membrana possa strapparsi o danneggiarsi. In relazione alla condizione del supporto ed alla posizione lungo lo sviluppo della sezione trasversale della galleria, si prevede il posizionamento dei dischi in ragione di una media pari a 3÷4 dischi al metro quadrato. I dischi devono essere realizzati con lo stesso materiale di base della membrana.



La membrana preformata in PVC è quindi fissata ai dischi mediante termosaldatura. La membrana viene generalmente fornita in rotoli, prevedendo pertanto una sovrapposizione pari ad almeno 100 mm. Le due parti sono connesse tra di loro mediante termosaldatura a doppia pista, per garantire le successive operazioni di controllo di qualità. Tutte le saldature realizzate dovranno essere testate per mezzo di aria compressa, con mantenimento della pressione a 2 bar per 10 minuti e perdita di pressione consentita non superiore al 10%. Ove non fosse possibile realizzare saldature a doppia pista, è ammessa la realizzazione di saldature manuali, che dovranno essere testate per mezzo di apposito uncino.

La membrana in PVC deve essere installata in modo tale da assicurare l'assenza di parti in tensione, al fine di scongiurare danneggiamenti accidentali. La membrana dovrà essere inoltre del tipo bi-colore (warning layer) e presentare uno strato di segnalazione di colore contrastante con lo strato di base, al fine di con-

sentire agevolmente l'individuazione di eventuali danni arrecati alla membrana nelle fasi di installazione della stessa o successive. Lo strato di segnalazione, al fine di evidenziare con maggiore facilità i possibili danni arrecati alla membrana, dovrà avere uno spessore minore o uguale a 0,2 mm. La membrana dovrà presentare un'aspettativa di vita utile pari ad almeno la vita utile della struttura. Tale caratteristica dovrà essere valutata per mezzo di opportuni test di cessione di massa effettuati da un laboratorio accreditato. La membrana dovrà essere marcata CE in accordo alla normativa vigente UNI EN 13491:2005 e possedere la corrispondente Dichiarazione di Prestazione. Le caratteristiche prestazionali richieste della membrana in PVC sono indicate nella tabella seguente.

Tabella 4. Caratteristiche prestazionali membrana preformata in PVC

TECHNICAL DATA (typical values)	
PRODUCT IDENTITY	
Materia prima	PVC-P
Spessore (escluso warning layer) (UNI EN 1849-2) (mm)	≥ 2,0
Spessore Warning Layer(UNI EN 1849-2) (mm)	≤ 0,2
Linearità e planarità (EN 1848-2) (mm)	g ≤ 50 p ≤ 10
Densità (EN 1183-1) (g/cm ³)	Dichiarata dal fornitore
TECHNICAL CHARACTERISTICS	
Resistenza a trazione CMD/MD (ISO R 527-1) (N/mm ²):	≥ 15
Allungamento a rottura (ISO R 527-1) (%)	≥ 330
Resistance to tearing (ISO 34) (B method - corner test picture 2, speed 500mm/minute) (kN/m)	≥ 45
Modulo elastico E tra l'1 e il 2 % di allungamento a rottura (ISO R 527-1) (N/mm ²)	≤ 20
Resistenza a punzonamento statico, CBR test (EN 12236)(kN)	> 2,5
Permeabilità (EN 14150) (m ³ /m ² day)	< 10 ⁻⁶
Resistenza all'esplosione - multiaxial test, Ø = 1,0 mm (EN 14151) (mm)	≥ 50
Resistenza a punzonamento dinamico (perforazione) (EN 12691) (-) Metodo A, 500g, altezza: 750 mm, spessore: 2,1 mm	Impermeabile

TECHNICAL DATA (typical values)

TECHNICAL CHARACTERISTICS

Resistenza a compressione (SIA V 280 Nr. 14) (-)	Impermeabile
Load: 7 N/mm ² per 48 h	
Piegatura a freddo (EN 495-5) (-)	Nessuna rottura o fessura
Temp. = - 40°C	
Invecchiamento termico, 6 h/80 °C	
Stabilità dimensionale (EN 1107-2) (%)	≤ 2
Aspetto (1850-2) (-)	Nessuna bolla
Invecchiamento a lungo termine, 70 gg a 80 °C (EN 1849-2)	
Variazione in resistenza a trazione (ISO R 527-1) (%)	≤ 20
Variazione in allungamento a rottura (ISO R 527-1) (%)	≤ 20
Piegatura a freddo - 20 °C (EN 495-5) (-)	Nessuna rottura o fessura
Resistenza all'ossidazione (EN 14575)	
90 gg a 85 °C	≤ 20
Variazione in resistenza a trazione e allungamento a rottura (%)	
Comportamento dopo lo stoccaggio in acqua calda (SIA V 280 Nr. 13)	
8 mesi, 50 °C	
Variazione in allungamento a rottura (%)	≤ 20
Variazione di massa (%)	≤ 4
Comportamento dopo lo stoccaggio in soluzioni acquose (EN 14415)	
Liquido tipo 2, 90 gg a 23 °C	
Variazione in resistenza a trazione e allungamento a rottura (%)	≤ 25
Comportamento dopo lo stoccaggio in soluzioni acquose (EN 1847)	
Liquido tipo 3, 90 gg a 23 °C	
Variazione in resistenza a trazione e allungamento a rottura (%)	≤ 20
Piegatura a freddo - 20 °C (EN 495-5) (-)	Nessuna rottura o fessura
Classe di reazione al fuoco (EN 11925-2 and EN 13501-1) (-)	classe E
Aspetto della saldatura (DVS 2225-5) (-)	Nessun difetto
Resistenza della saldatura (shear test) (EN 12317-2) (-)	Rottura all'esterno della saldatura
Peeling test (EN 12316-2) (N/mm)	≥ 6
Comportamento dopo lo stoccaggio in soluzioni acquose (EN 14415)	
Liquido tipo 2, 360 gg a 50 °C	
Variazione in resistenza a trazione e allungamento a rottura (%)	≤ 25
Variazione in resistenza al punzonamento dinamico (perforazione) (%)	≤ 40
Variazione di massa (%)	< 7

TECHNICAL DATA (typical values)

TECHNICAL CHARACTERISTICS

Comportamento dopo lo stoccaggio in soluzioni acquose (EN 1847)

Liquido tipo 3, 120 gg a 23 °C

Variazione in resistenza a trazione e allungamento a rottura (%) ≤ 25

Variazione in resistenza al punzonamento dinamico (perforazione) (%) ≤ 30

Variazione di massa (%) < 7

Variazione dimensionale (%) < 5

Comportamento dopo lo stoccaggio in acqua calda (SIA V 280 Nr. 13)

240 d at 50 °C

Variazione in resistenza a trazione e allungamento a rottura (%) ≤ 25

Variazione in resistenza al punzonamento dinamico (perforazione) (%) ≤ 30

Variazione di massa (%) ≤ 3

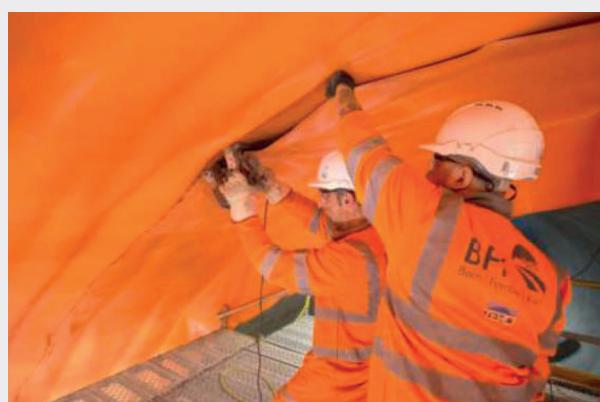
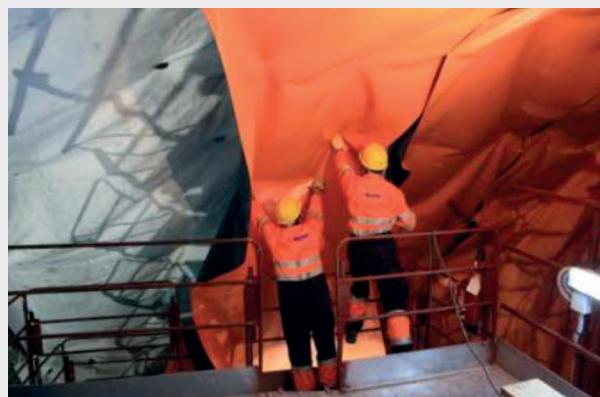
Variazione dimensionale (%) ≤ 3

Resistenza ai microorganismi (EN 12225 e EN 527-3/5/100)

Variazione in resistenza trazione e allungamento a rottura (%) ≤ 25

Resistenza alle radici (UNI CEN/TS 14416) Conforme

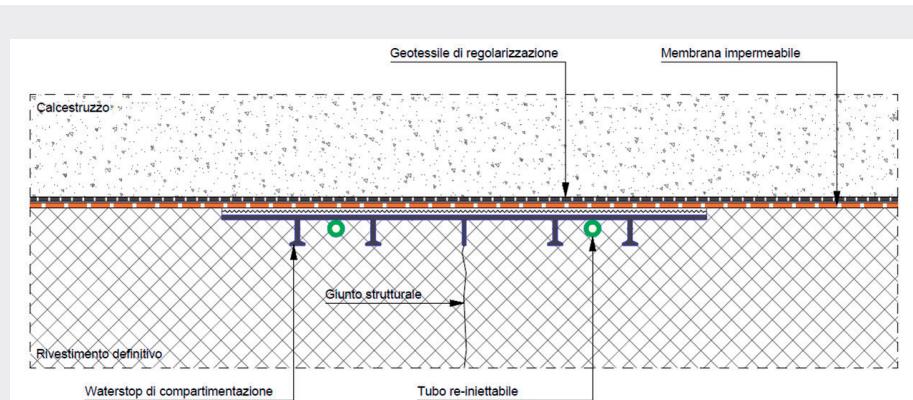
Fig. 5. Installazione della membrana preformata in PVC.



Ad installazione avvenuta, la membrana preformata in PVC dovrà essere sottoposta a controlli di qualità, che consistono in:

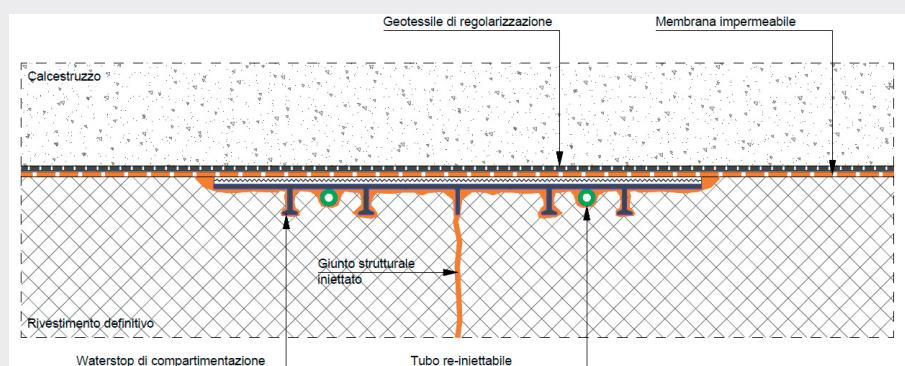
- ispezione visiva;
- test manuali (test con uncino per saldature manuali);
- test ad aria compressa per saldature a doppia pista.

Il sistema di impermeabilizzazione è quindi protetto mediante getto di un nuovo rivestimento in calcestruzzo. Dovrà essere previsto l'inserimento di waterstop, realizzati con la stessa materia di base della membrana e di comprovata compatibilità con il manto stesso, per la realizzazione di compartimenti utili per circoscrivere eventuali infiltrazioni e/o venute d'acqua ed intervenire in maniera localizzata. È inoltre opportuno prevedere l'installazione di un sistema di backup a tubi re-iniettabili, da utilizzare in caso si presenti la necessità di bloccare eventuali venute d'acqua.



(a)

*Fig. 6. Dettaglio waterstop e sistema di backup a tubi re-iniettabili:
a) pre-iniezione; b)
post-iniezione.*



(b)

I punti di ancoraggio delle barre di armatura del rivestimento definitivo e/o di eventuali apparecchiature appese, dovranno essere adeguatamente realizzati con sistemi prefabbricati a tenuta con manicotto in PVC e flangia, per garantire la continuità e l'impermeabilizzazione del sistema, proteggendo la barra flettuta da correnti passive e fenomeni di corrosione. Per il fissaggio dei connettori si consiglia l'utilizzo di resine vinilestere, in virtù del migliore comportamento in ambiente umido. La connessione tra manicotto in PVC e membrana preformata in PVC dovrà essere eseguita mediante termosaldatura.

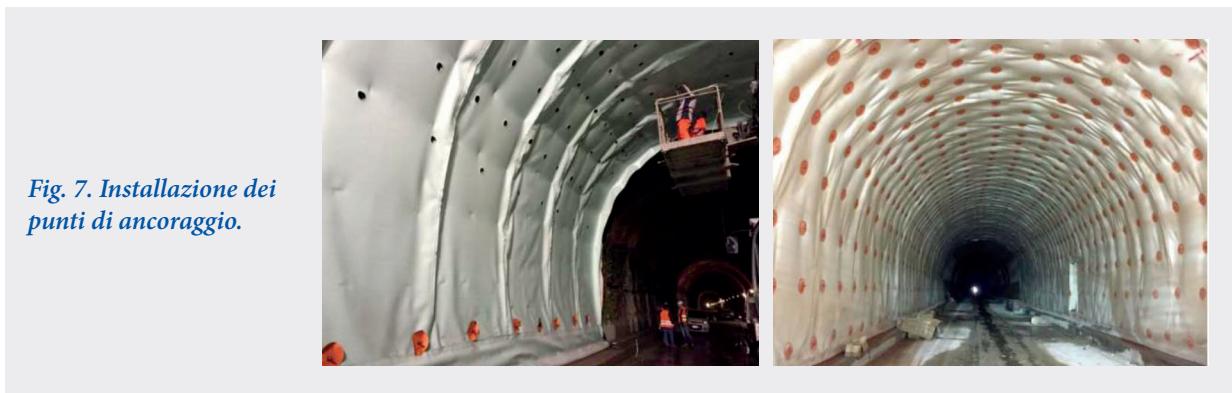


Fig. 7. Installazione dei punti di ancoraggio.

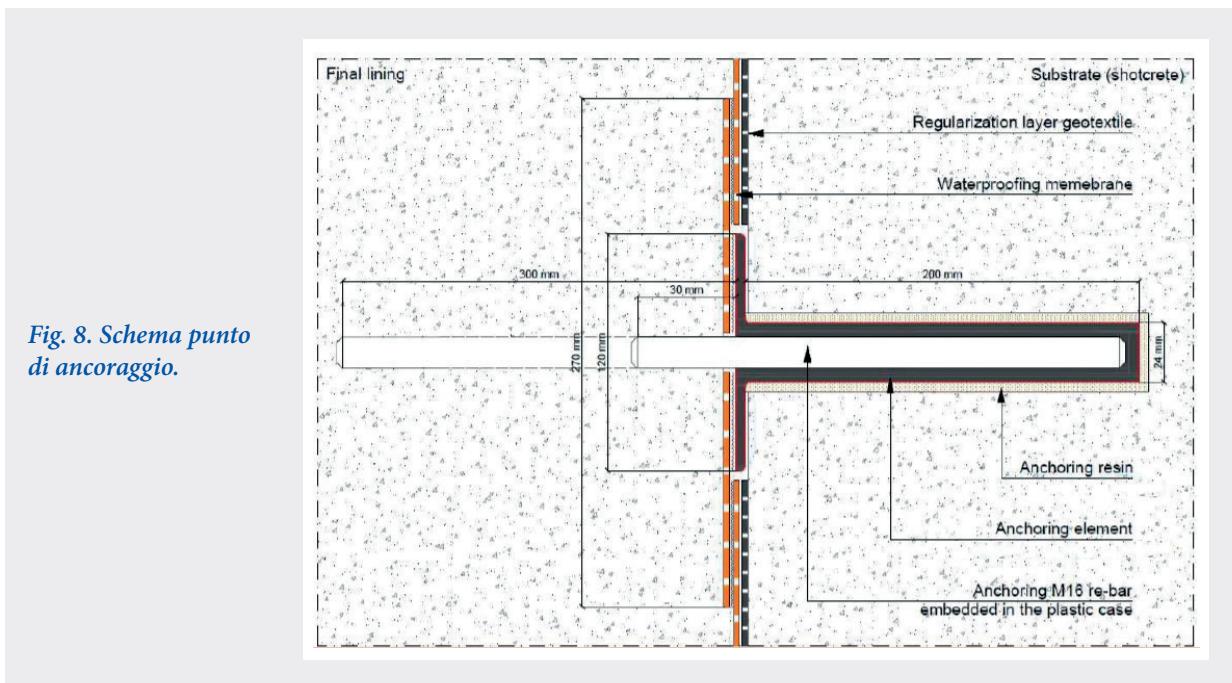
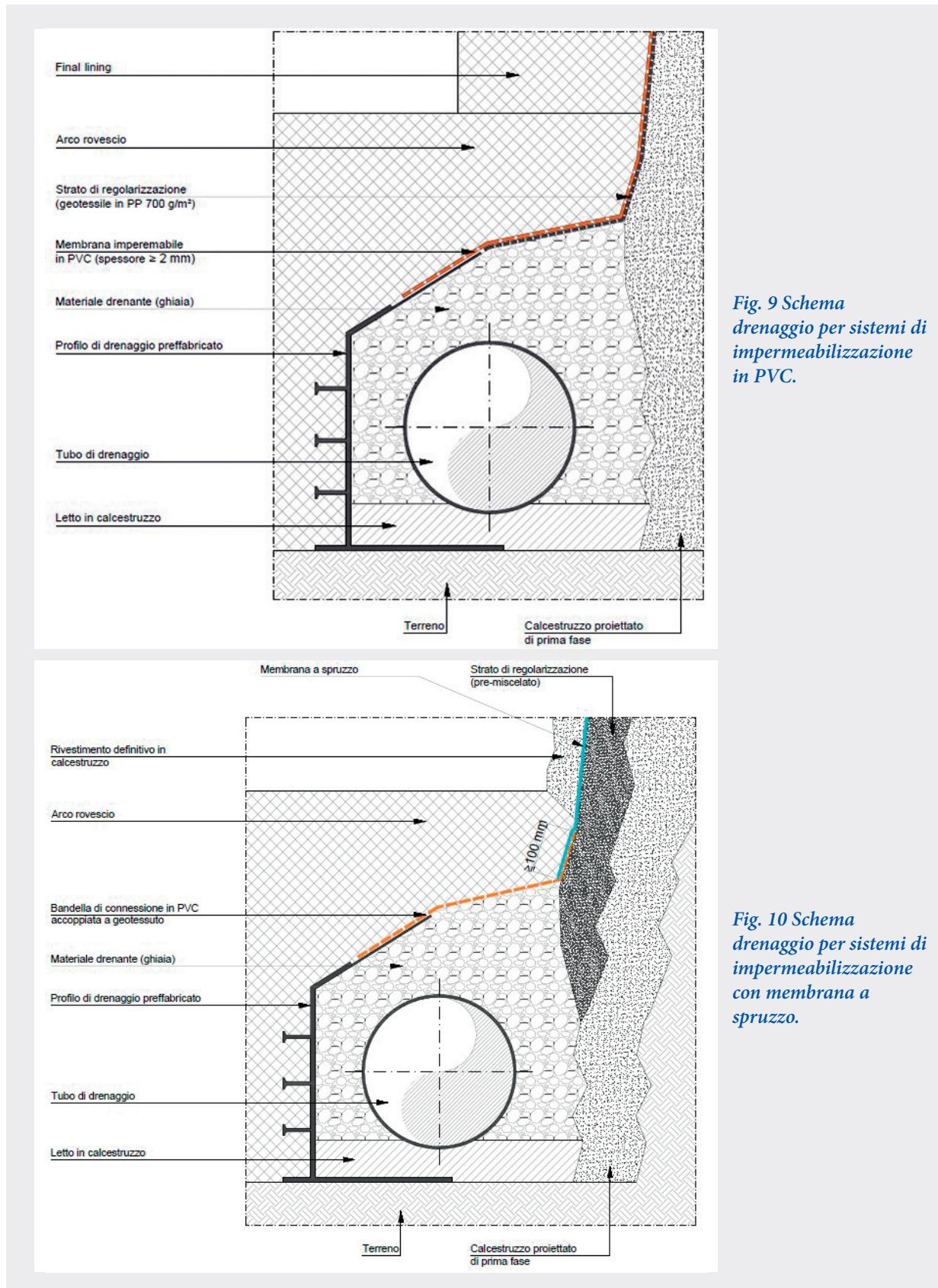


Fig. 8. Schema punto di ancoraggio.

Nel caso in cui si renda necessaria la realizzazione di un sistema di drenaggio - in caso di ripristino o di realizzazione poiché assente - lo stesso deve essere adeguatamente eseguito. Nelle figure seguenti sono mostrati esempi di drenaggio per i casi di sistemi di impermeabilizzazione in PVC e con membrana a spruzzo.



Nel caso in cui le fessure e/o le venute d'acqua siano concentrate soprattutto nei piedritti della galleria si può pensare ad un intervento di ripristino e drenaggio dell'acqua solo in prossimità dei piedritti stessi. Si realizza cioè uno strato di drenaggio impermeabile armato in grado di canalizzare l'infiltrazione d'acqua al piede della galleria restituire la finitura superficiale originaria del manufatto. Per realizzare tale tipo di intervento si isola innanzitutto la parte da drenare attraverso una serie di scossaline preformate accoppiate con il telo impermeabile, il telo può essere anche in TPO ed essere accoppiato ad un tessuto non tessuto di densità inferiore ai 700 g/mq considerata la planarità dell'area sulla quale intervenire. Una volta installate le scossaline si fissa il telo a queste e si blocca al calcestruzzo mediante dischi che potranno avere anche la funzione di aggancio della rete metallica che verrà inserita nel getto di malta da ripristino. Tutte le operazioni suddette devono essere precedute dalla rimozione dello strato di calcestruzzo o finitura decoeso dal supporto mediante idrodemolizione.



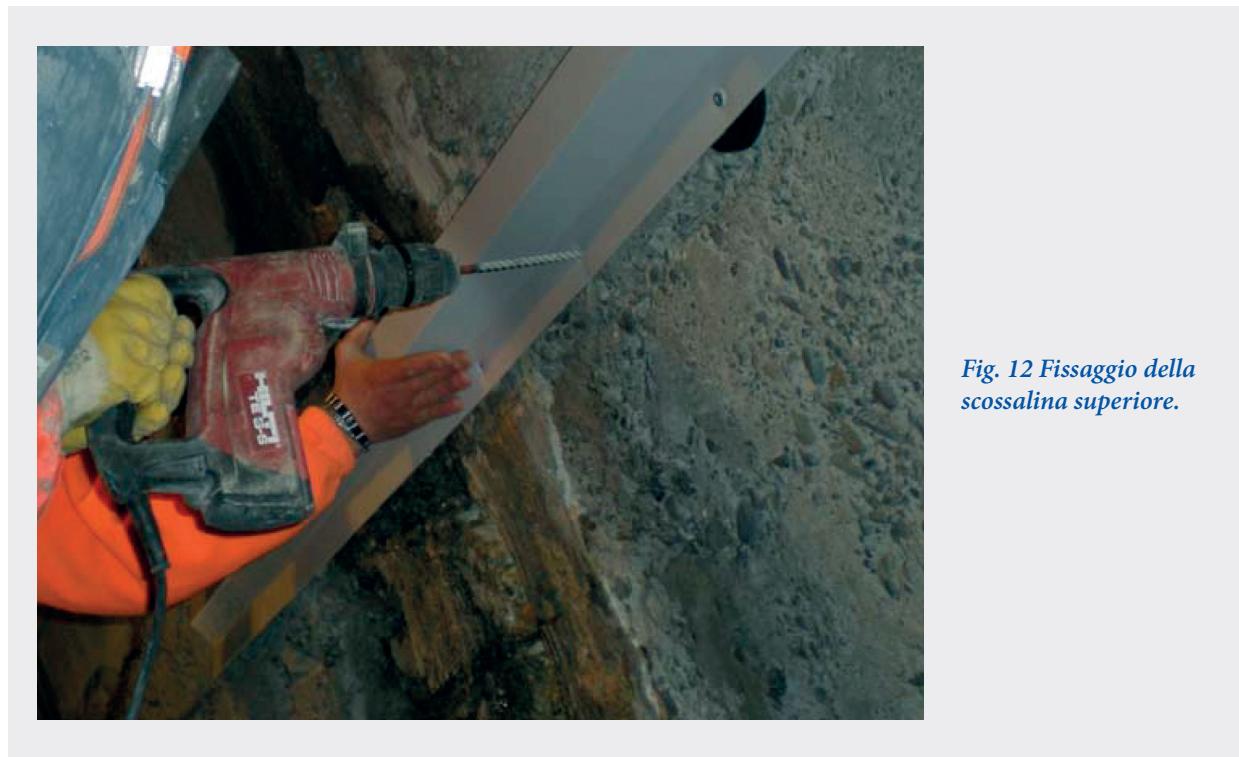
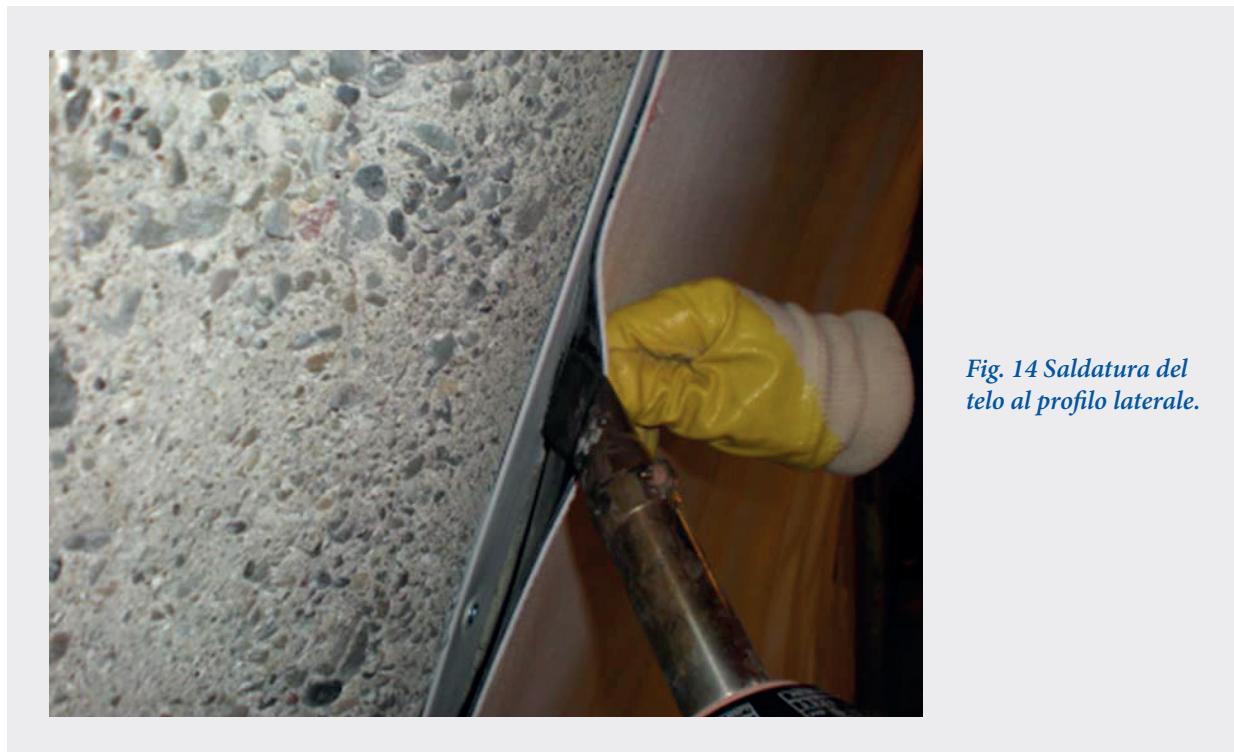


Fig. 12 Fissaggio della scossalina superiore.



Fig. 13 Accoppiamento con il telo in TPO.



*Fig. 14 Saldatura del
telo al profilo laterale.*



*Fig. 15 Fissaggio della
rete di armatura.*



Fig. 16 Applicazione dello strato di malta cementizia di classe R4 di finitura.

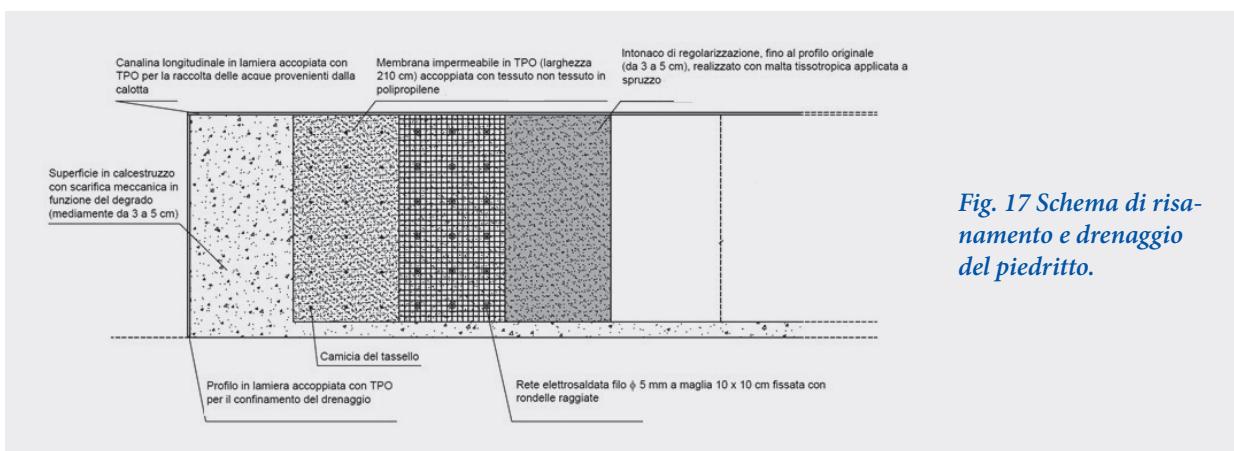


Fig. 17 Schema di risanamento e drenaggio del piedritto.

3.1.1. Marcatura CE

L'impiego di membrane preformate in PVC è ammesso solo ed esclusivamente nel caso in cui siano dotate di Marcatura CE.

È onere del Direttore Lavori, in fase di accettazione, accertarsi del possesso della marcatura stessa e richiedere ad ogni fornitore, per ogni diverso prodotto, la Dichiarazione di Conformità alla parte armonizzata della specifica norma europea UNI EN 13491:2005, procedendo ad esplicita accettazione per iscritto. Il Direttore Lavori è tenuto inoltre alla verifica della corrispondenza dei prodotti alle tipologie, classi e/o famiglie previsti nella suddetta documentazione.

Il fabbricante o il suo rappresentante autorizzato con sede nell'EEA (UE ed EFTA) è responsabile dell'ap-

posizione del simbolo di marcatura CE.

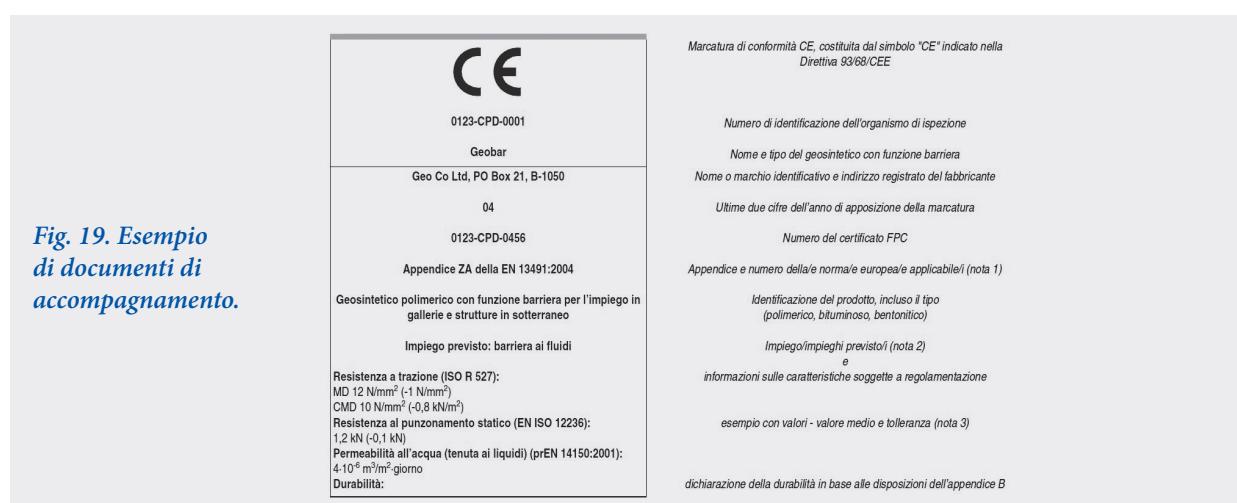
Il simbolo di conformità CE deve essere conforme alla Direttiva 93/68/CE e deve essere accompagnato dalle informazioni seguenti:

- numero di identificazione dell'organismo di certificazione;
- nome o marchio di identificazione del fabbricante;
- sede legale del fabbricante;
- ultime due cifre dell'anno di apposizione della marcatura;
- numero del certificato del controllo di produzione in fabbrica;
- riferimento alla UNI EN 13491:2005 e alla appendice ZA;
- informazioni sulle caratteristiche coperte da mandato: valori da dichiarare presentati come indicato al punto 5.1 della UNI EN 13491:2005.

L'apposizione avviene sull'imballaggio dei geosintetici con funzione barriera, nei modi indicati nella figura seguente.



Le informazioni complete sono riportate sui documenti di accompagnamento come illustrato nella figura successiva.



3.2. Membrana a spruzzo

In relazione allo stato del supporto ed alle condizioni di umidità e/o venute d'acqua, può risultare economicamente vantaggioso utilizzare un sistema di impermeabilizzazione della galleria con membrana impermeabilizzante a spruzzo. Le sue caratteristiche principali consistono in:

- elevata flessibilità, permettendo allungamenti e deformazioni e garantendo l'integrità dell'impermeabilizzazione dopo la deformazione del supporto;
- elevata resistenza a trazione;
- buone proprietà di adesione con i diversi supporti;
- adattabilità a superfici irregolari;
- facilità di applicazione, essendo spruzzabile, pronta all'uso e richiedendo un equipaggiamento semplice, composto da una pompa mono-componente e da una lancia di dimensioni ridotte;
- compatibilità con membrane bugnate e manti sintetici accoppiati;
- compatibilità con calcestruzzo proiettato e con calcestruzzo gettato in opera;
- compatibilità con calcestruzzo contenente fibre in polipropilene o acciaio;

Il sistema di impermeabilizzazione con membrana impermeabilizzante a spruzzo è composto dalle seguenti parti:

- strato di calcestruzzo proiettato a contatto con il terreno;
- membrana impermeabilizzante a spruzzo;
- rivestimento definitivo in calcestruzzo proiettato.



Fig. 20. Dettaglio stratificazione sistema di impermeabilizzazione con membrana a spruzzo.

Punto di partenza dell'intervento di impermeabilizzazione è la fase di controllo del supporto, che deve essere pulito, asciutto e coerente. Nel caso in cui il supporto sia interessato da fenomeni di ammaloramento del calcestruzzo e/o delle barre di armatura, si dovrà fare riferimento ai Quaderni Tecnici n. 6 "Interventi di ripristino corticale dei calcestruzzi ammalorati" e n. 13 "Interventi di ripristino in galleria".

Al fine di migliorare l'adesione tra membrana a spruzzo e supporto, quest'ultimo deve essere adeguatamente pulito da polveri residue tramite trattamento ad aria compressa. Nel caso di impiego di acqua a pressione, prima dell'applicazione della membrana a spruzzo, il supporto deve essere asciutto. Qualsiasi prodotto applicato sulla superficie del calcestruzzo e non compatibile con la membrana a spruzzo deve essere accuratamente rimosso.

Al fine della regolarizzazione del supporto dovrà essere eseguito un getto in calcestruzzo proiettato a granulometria fina, con irregolarità superficiali dell'ordine di 5 mm. Nel caso di utilizzo di calcestruzzo fibrorinforzato, devono essere utilizzate fibre in polipropilene. Ogni tipologia di venuta d'acqua deve essere adeguatamente trattata prima dell'applicazione della membrana a spruzzo e preferibilmente prima dell'applicazione dello strato di regolarizzazione in calcestruzzo proiettato. Se le venute d'acqua sono trattate in modo opportuno, il supporto dovrebbe presentarsi asciutto. Eventuali ulteriori provvedimenti localizzati possono essere adottati per eliminare condizioni locali di eccessiva umidità e/o venute d'acqua.

Fig. 21. Esecuzione dello strato di regolarizzazione con calcestruzzo proiettato.



Successivamente si procede all'applicazione della membrana a spruzzo ed al controllo dello spessore. Il prodotto dovrà essere applicato a spruzzo da una distanza dalla superficie non maggiore di 1,5 m. Dovran-

no essere pertanto predisposte idonee strutture per raggiungere correttamente tutte le superfici oggetto del trattamento. La distanza ottimale è comunque pari a 1 m: valori maggiori possono infatti comportare un incremento del rischio che il materiale venga disperso in aria. Non è essenziale che il substrato venga interamente coperto con una singola applicazione a spruzzo. In caso di interruzione delle lavorazioni superiori a 6 ore, dovrà essere prevista una sovrapposizione tra strati successivi non inferiore a 100 mm. Le caratteristiche prestazionali richieste della membrana a spruzzo sono indicate nella tabella seguente.

Tabella 5. Caratteristiche prestazionali membrana a spruzzo

Densità [g/m ³]	1.25 ± 0.05	
Durezza Shore A [-]	(DIN 53505)	≥ 40
Resistenza a trazione [MPa]	(EN ISO 527)	≥ 1.0
Allungamento a rottura [%]((EN ISO 527)	≥ 150
Resistenza allo strappo (pull out) [MPa]	(EN 1542)	≥ 0.75
Resistenza alla pressione dell'acqua	(EN 12390/8)	5 bar per 28 giorni
Proprietà di crack bridging [μm]	(EN 1062-7, method A)	A5 > 2500
Reazione al fuoco	(EN 13501-1)	B, s2, do



Fig. 22. Realizzazione della membrana a spruzzo.

Prima dell'applicazione dello strato finale di calcestruzzo proiettato si deve verificare che il materiale sia asciutto e che la superficie sia pulita. In caso di esito negativo, la superficie deve essere adeguatamente pulita con aria compressa o con acqua e lasciata asciugare. La membrana a spruzzo non deve presentare difetti di uniformità, laminazione o fessurazione, perdite di aderenza, resistenza o durezza. In caso negativo, l'intera sezione danneggiata dovrà essere rimossa, pulita e sottoposta nuovamente all'applicazione della membrana a spruzzo.

Passo successivo è l'applicazione dello strato finale di rivestimento in calcestruzzo, previa predisposizione di rete metallica. In caso di utilizzo di calcestruzzo fibrorinforzato possono essere impiegate fibre sia in materiale metallico sia in polipropilene. Per un corretto funzionamento della membrana impermeabilizzante, l'intera superficie deve essere coperta dal rivestimento finale.

Eventuali barre di armatura - ad esempio per punti di ancoraggio o per l'installazione di reti di armatura - dovranno essere installate nello strato di calcestruzzo interno, prima dell'applicazione della membrana a spruzzo.

3.3. Sistema misto

Una ulteriore tipologia di impermeabilizzazione è rappresentata dal sistema misto, costituito dall'accoppiamento di membrana preformata in PVC e membrana a spruzzo. Nella realizzazione dell'intervento di impermeabilizzazione della galleria infatti, vista la natura particolare dell'opera, potrebbero riscontrarsi differenze nella condizione del supporto, in termini di ammaloramento, umidità e/o venute d'acqua, tali da giustificare l'adozione di differenti tecniche di intervento.

I due sistemi di impermeabilizzazione precedentemente descritti risultano comunque completamente compatibili l'uno con l'altro. Particolare attenzione deve essere posta nell'esecuzione della sovrapposizione tra membrana preformata in PVC e membrana a spruzzo. Generalmente, la membrana preformata in PVC è caratterizzata dalla presenza di un tratto terminale in tessuto non tessuto, il quale viene fissato al supporto mediante utilizzo di adesivo epossidico. Il tessuto non tessuto viene quindi ricoperto con un ulteriore strato di adesivo epossidico. Ad asciugatura avvenuta, si può procedere infine con la realizzazione della membrana a spruzzo.

Fig. 23. Sistema misto accoppiato membrana preformata in PVC - membrana a spruzzo.



4. Compiti del Direttore Lavori

Nel caso di interventi di ripristino della tenuta idraulica di una galleria, **la figura del Direttore Lavori viene a rivestire un ruolo di estrema importanza poiché nella maggior parte degli interventi risultano assenti entrambi i momenti di collaudo statico e tecnico-amministrativo, a causa della loro classificazione come intervento locale e della natura degli importi a base di gara.**

Il Direttore Lavori rappresenta pertanto il garante dell'intero processo realizzativo dell'intervento di ripristino o rinforzo, dalla fase di accettazione in cantiere del materiale fino al controllo di qualità in situ. Onere del Direttore Lavori è compiere una serie di azioni che portino al controllo della corretta esecuzione dell'opera, compreso il controllo sui materiali.

I compiti essenziali ma non esaustivi del Direttore Lavori possono essere così individuati:

- Verifica delle proposte progettuali e della consistenza effettiva delle opere oggetto di intervento;
- Accettazione in cantiere del materiale;
- Controllo delle procedure di applicazione in opera del sistema di impermeabilizzazione;
- Controllo delle prestazioni richieste dal progetto.

Nel caso di impiego di membrane preformate in PVC e tessuti non tessuti, il Direttore Lavori, in fase di accettazione, deve accertarsi del possesso della marcatura stessa e richiedere ad ogni fornitore, per ogni diverso prodotto, la Dichiarazione di Conformità alla parte armonizzata della specifica norma europea, **procedendo ad esplicita accettazione per iscritto**. Ciascun prodotto deve essere inoltre accompagnato dalla relativa Scheda Tecnica e da un Certificato di Prova emesso a cura di un Laboratorio Ufficiale, al fine dell'attestazione delle caratteristiche prestazionali.

Nel caso di impiego di membrane a spruzzo e waterstop, in fase di accettazione sono richieste la relativa Scheda Tecnica ed un Certificato di Prova emesso a cura di un Laboratorio Ufficiale, al fine dell'attestazione delle caratteristiche prestazionali.

Il Direttore Lavori deve controllare il rispetto delle procedure di applicazione del sistema di impermeabilizzazione. Con riferimento alle operazioni di controllo, si sottolinea l'importanza e la necessità di eseguire controlli visivi e rilievi del corretto ripristino della tenuta idraulica, anteriormente alla esecuzione dello strato di rivestimento definitivo.

Bibliografia

[1] UNI EN 13491:2005 "Geosintetici con funzione barriera. Caratteristiche richieste per l'impiego come barriere ai fluidi nella costruzione di gallerie e di strutture in sotterraneo"

[2] Guideline Tunnel Waterproofing, Österreichische Bautechnik Vereinigung, August 2015.

QUADERNO TECNICO N. 15

**Interventi di ripristino
delle condizioni
di sicurezza di solette
in C.A.**

Indice Quaderno Tecnico N. 15

1.	Introduzione	69
2.	Azioni dovute all'urto di veicoli in svio	70
3.	Modelli di calcolo	73
3.1.	Modellazione analitica monodimensionale, elastica lineare	74
3.2.	Modellazione lineare agli elementi finiti	76
3.3.	Modellazione non lineare agli elementi finiti	79
4.	Tecniche di intervento	82
4.1.	Interventi con barre di acciaio o GFRP	82
4.2.	Interventi con piatti di acciaio a momento negativo	85
Appendice A: prove sperimentali soletta in c.a. rinforzata con barre di acciaio o GFRP		87
Appendice B: prove sperimentali soletta in c.a. rinforzata con piatti di acciaio		92
Bibliografia		95

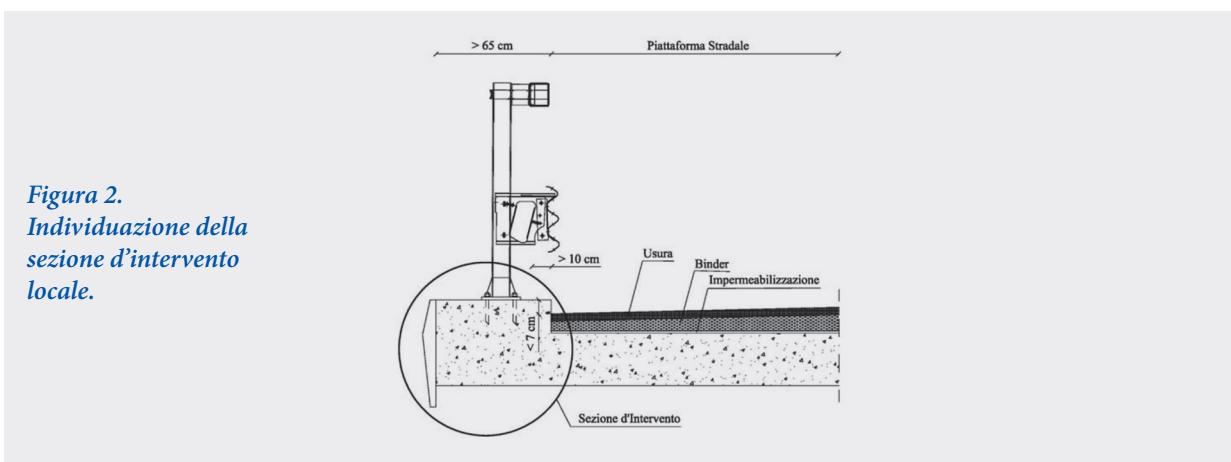
1. Introduzione

Il corretto funzionamento delle barriere di sicurezza, installate nel caso di viadotti su appositi cordoli bordo ponte, dipende dalla capacità di resistenza non solo di tali elementi di collegamento ma anche dell'impalcato esistente. Un esempio di barriera di sicurezza su cordolo bordo ponte esistente è mostrato nella figura seguente.



Nei casi di installazione di nuove barriere (H₂, H₃, H₄), ampliamenti della carreggiata o sostituzione delle barriere antirumore, si rendono spesso necessari interventi di rifacimento parziale o totale dei cordoli, a causa dell'intensità delle azioni di calcolo previste dall'attuale quadro normativo, tali da superare generalmente la capacità di resistenza degli elementi strutturali esistenti.

A motivo del carattere locale di tali interventi, classificabili come interventi di manutenzione straordinaria, la sezione di analisi è limitata al solo cordolo, prescindendo dagli altri elementi cui esso è connesso, così come mostrato nella figura seguente.



Per quanto concerne gli aspetti inerenti la progettazione di nuovi cordoli bordo ponte in c.a., si rimanda al Quaderno Tecnico n. 4 "Interventi di ripristino delle condizioni di sicurezza di cordoli e barriere bordo ponte". Nel caso di realizzazione di cordoli bordo ponte in calcestruzzo fibrorinforzato, si rimanda al Quaderno Tecnico n. 5 "Interventi di rifacimento dei cordoli con calcestruzzo fibrorinforzato".

Fermo restando il carattere locale dell'intervento, come già descritto nel Quaderno Tecnico n.4 "Interventi di ripristino delle condizioni di sicurezza di cordoli e barriere bordo ponte", risulta comunque opportuno accompagnare la redazione del progetto con la verifica dell'impalcato, in riferimento all'urto del veicolo in svio.

Oggetto del presente Quaderno Tecnico è la descrizione dei differenti metodi di analisi a disposizione per la valutazione delle sollecitazioni agenti sulla struttura.

Inoltre, nel paragrafo conclusivo saranno esaminate le principali tecniche di intervento per il rinforzo di solette in c.a., nel caso di impalcati con travi in c.a., in c.a.p. o metalliche.

2. Azioni dovute all'urto di veicoli in svio

Per quanto riguarda la definizione delle azioni dovute all'urto di veicoli in svio trova applicazione il Paragrafo 5.1.3.10 del D.M. 17.01.2018, di cui si riporta nel seguito un estratto: *"le barriere di sicurezza stradali e gli elementi strutturali ai quali sono collegate devono essere dimensionati in funzione della classe di contenimento richiesta, per l'impiego specifico, dalle norme nazionali applicabili.*

Nel progetto dell'impalcato deve essere considerata una combinazione di carico nella quale al sistema di forze orizzontali, equivalenti all'effetto dell'azione d'urto sulla barriera di sicurezza stradale, si associa un carico verticale isolato sulla sede stradale costituito dallo Schema di Carico 2, posizionato in adiacenza alla barriera stessa e disposto nella posizione più gravosa.

Tale sistema di forze orizzontali potrà essere valutato dal progettista, alternativamente, sulla base:

- delle risultanze sperimentali ottenute nel corso di prove d'urto al vero, su barriere della stessa tipologia e della classe di contenimento previste in progetto, mediante l'utilizzo di strumentazione idonea a registrare l'evoluzione degli effetti dinamici;*
- del riconoscimento di equivalenza tra il sistema di forze e le azioni trasmesse alla struttura, a causa di urti su barriere della stessa tipologia e della classe di contenimento previste in progetto, laddove tale equivalenza risulti da valutazioni teoriche e/o modellazioni numerico-sperimentali;*

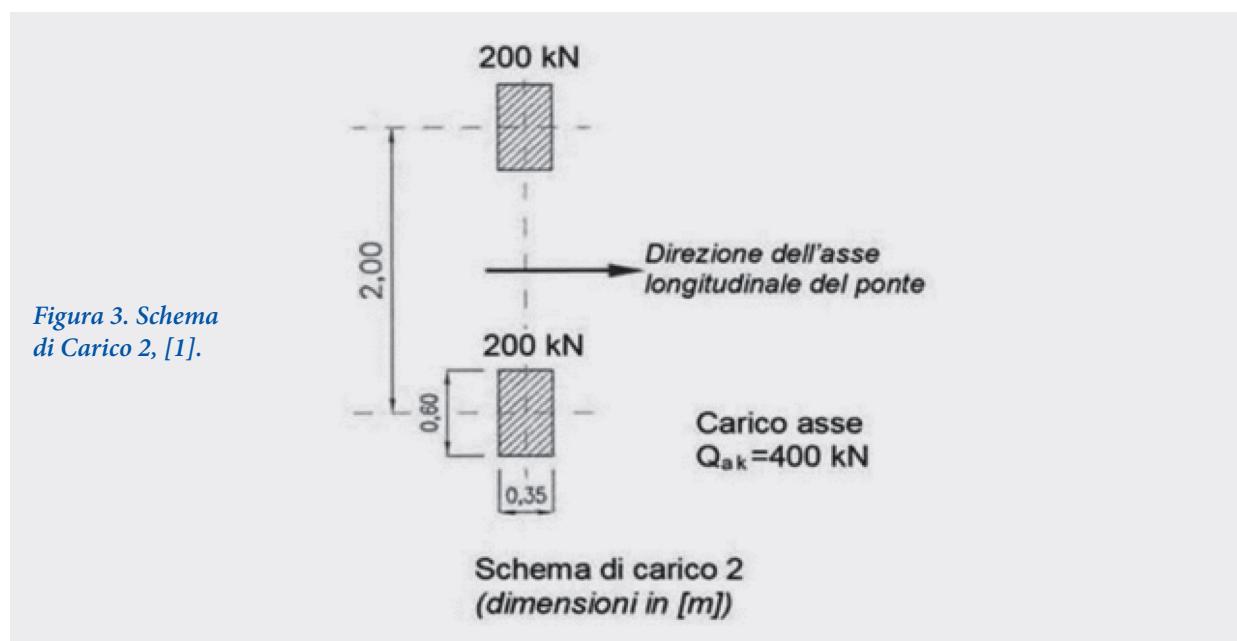
In assenza delle suddette valutazioni, il sistema di forze orizzontali può essere determinato con riferimento alla resistenza caratteristica degli elementi strutturali principali coinvolti nel meccanismo d'insieme della barriera e deve essere applicato ad una quota h , misurata dal piano viario, pari alla minore delle dimensioni h_1 e h_2 , dove $h_1 = (\text{altezza della barriera} - 0,10\text{m})$ e $h_2 = 1,00\text{ m}$. Nel dimensionamento degli elementi strutturali ai

quali è collegata la barriera si deve tener conto della eventuale sovrapposizione delle zone di diffusione di tale sistema di forze, in funzione della geometria della barriera e delle sue condizioni di vincolo. Per il dimensionamento dell'impalcato, le forze orizzontali così determinate devono essere amplificate di un fattore pari a 1,50. Il coefficiente parziale di sicurezza per la combinazione di carico agli SLU per l'urto di veicolo in svio deve essere assunto unitario."

Pertanto lo schema di carico da utilizzarsi per la valutazione delle sollecitazioni presenti nell'impalcato in c.a., per effetto dell'urto di veicoli in svio, è composto dalle seguenti azioni:

- Peso proprio dell'elemento (g_1);
- Carichi permanenti (g_2);
 - Pavimentazione (g_{2pav});
 - Parapetto (g_{2par});
 - Barriera di sicurezza (g_{2g});
- Sistema di forze orizzontali, equivalenti all'effetto dell'azione d'urto sulla barriera di sicurezza stradale;
- Carico verticale isolato sulla sede stradale costituito dallo Schema di Carico 2, posizionato in adiacenza alla barriera stessa e disposto nella posizione più gravosa

Come riportato al Paragrafo 5.1.3.3.3 del D.M. 17.01.2018, lo Schema di Carico 2, comprensivo degli effetti dinamici, "...è costituito da un singolo asse applicato su specifiche impronte di pneumatico di forma rettangolare, di larghezza 0,60 m ed altezza 0,35 m, come mostrato in Fig. 5.1.2. Questo schema va considerato autonomamente con asse longitudinale nella posizione più gravosa ed è da assumere a riferimento solo per verifiche locali. Qualora sia più gravoso si considererà il peso di una singola ruota di 200 kN."



Ai fini delle verifiche locali, il carico concentrato da considerarsi, associato allo Schema di Carico 2, si assume uniformemente distribuito sulla superficie della impronta.

Poiché le solette in c.a. sopportano generalmente una pavimentazione in conglomerato bituminoso avente spessore pari a circa 10 cm, il carico del singolo pneumatico è supposto agente su un'area teorica maggiore di quella effettiva di contatto sulla pavimentazione. Come indicato al Paragrafo 5.1.3.3.6 del D.M. 17.01.2018, la diffusione attraverso la pavimentazione e lo spessore della soletta si considera avvenire secondo un angolo di 45° , fino al piano medio della struttura della soletta sottostante (Fig. 4a). Nel caso di piastra ortotropa, la diffusione va considerata fino al piano medio della lamiera superiore d'impalcato (Fig. 4b).

Tale ipotesi di ripartizione risulta cautelativa in quanto indagini sperimentali mostrano che l'area equivalente è quella che si otterrebbe diffondendo il carico fino al baricentro delle armature inferiori [2].

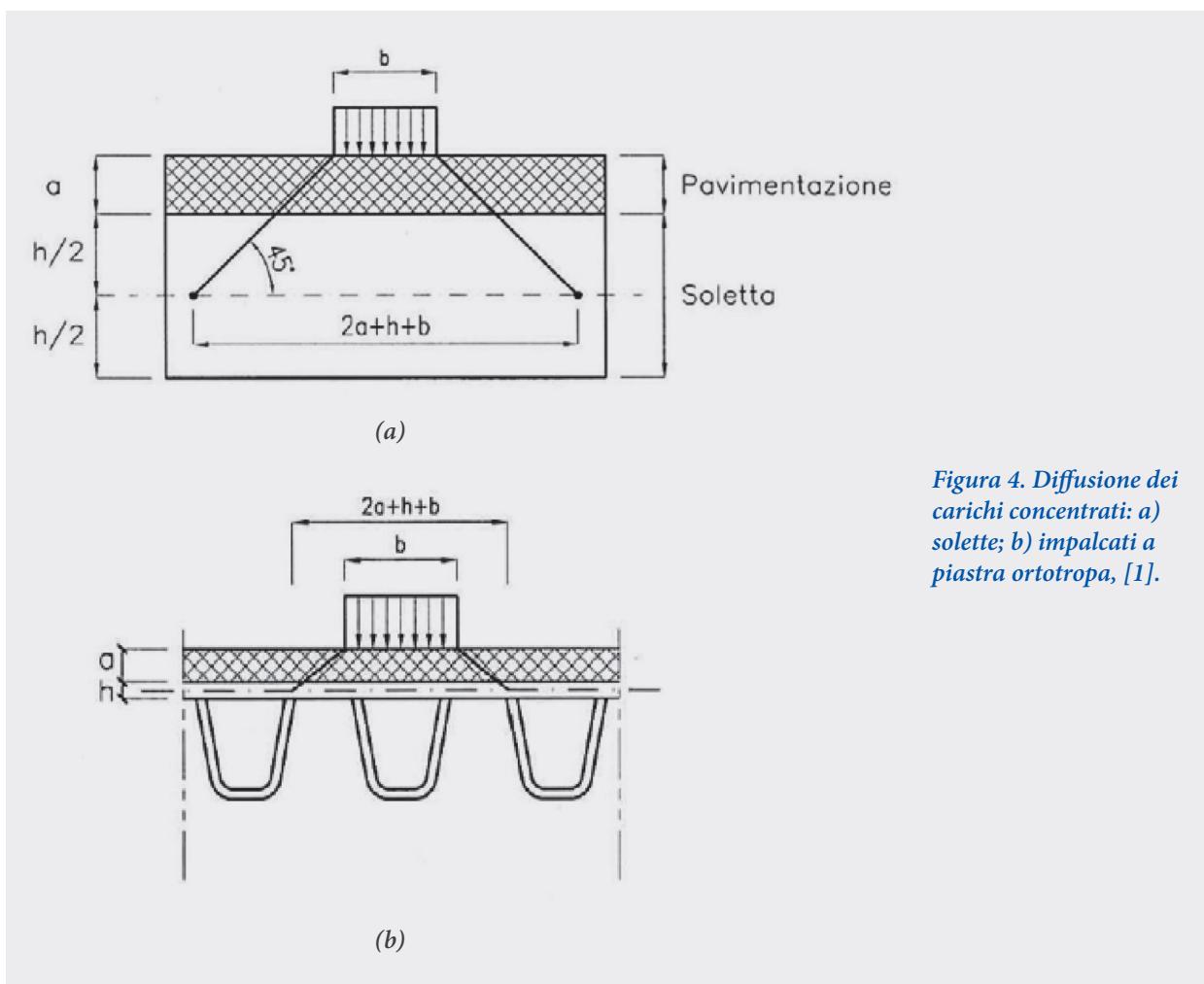
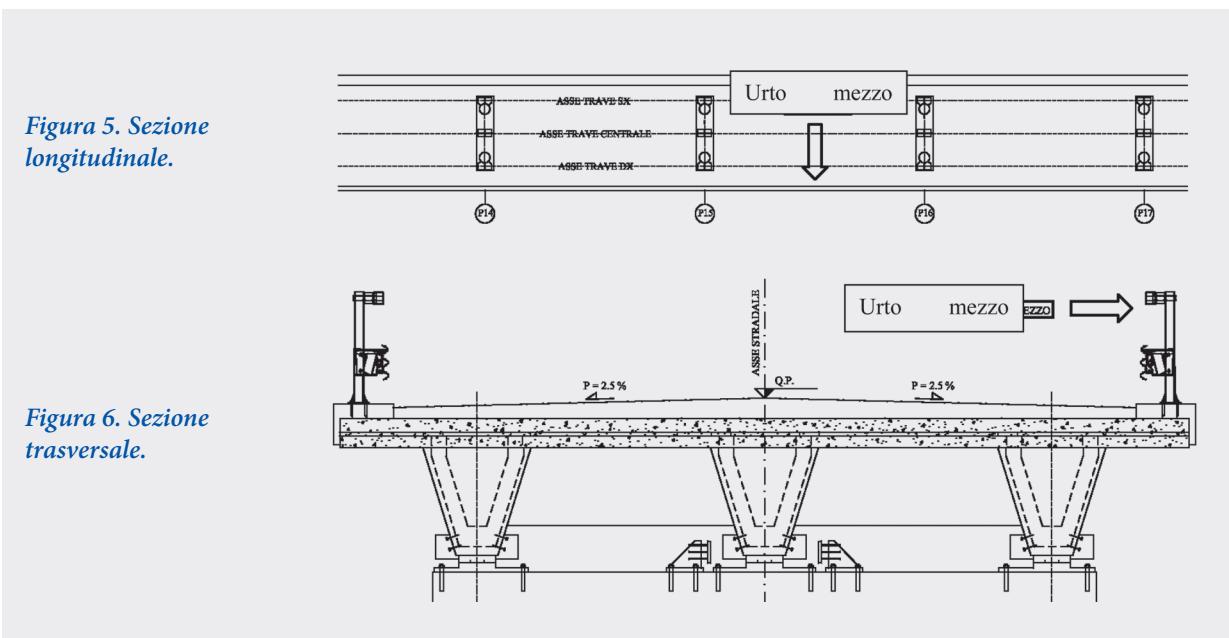


Figura 4. Diffusione dei carichi concentrati: a) solette; b) impalcati a piastra ortotropa, [1].

3. Modelli di calcolo

Rispetto al carico eccezionale dovuto all'urto di un mezzo pesante, così come definito dalla normativa, si procederà ad un'analisi del comportamento della soletta a sbalzo attigua al cordolo. L'analisi dovrà essere effettuata fino all'asse della trave più esterna dell'impalcato, dal lato dell'urto (Figure 5 e 6).



Ai fini della valutazione degli effetti delle azioni possono essere adottati schemi analitici di tipo semplificato oppure modellazioni numeriche agli elementi finiti (FEM).

Le analisi strutturali, inoltre, possono essere di tipo elastiche lineari oppure non lineari.

Come specificato al Paragrafo 4.1.1.1 del D.M. 17.01.2018, "L'analisi elastica lineare può essere usata per valutare gli effetti delle azioni sia per gli stati limite di esercizio sia per gli stati limite ultimi. Per la determinazione degli effetti delle azioni, le analisi saranno effettuate assumendo:

- sezioni interamente reagenti con rigidezze valutate riferendosi al solo calcestruzzo;
- relazioni tensione deformazione lineari;
- valori medi del modulo d'elasticità."

Il Paragrafo 4.1.1.3 del D.M. 17.01.2018, relativo all'esecuzione di analisi non lineari, specifica che "L'analisi non lineare può essere usata per valutare gli effetti di azioni statiche e dinamiche, sia per gli stati limite di esercizio, sia per gli stati limite ultimi, a condizione che siano soddisfatti l'equilibrio e la congruenza.

Al materiale si può attribuire un diagramma tensioni-deformazioni che ne rappresenti adeguatamente il comportamento reale, verificando che le sezioni dove si localizzano le plasticizzazioni siano in grado di sopportare

allo stato limite ultimo tutte le deformazioni non elastiche derivanti dall'analisi, tenendo in appropriata considerazione le incertezze. Nell'analisi si trascurano gli effetti di precedenti applicazioni del carico e si assume un incremento monotono dell'intensità delle azioni e la costanza del rapporto tra le loro intensità. L'analisi può essere del primo o del secondo ordine."

3.1. Modellazione analitica monodimensionale, elastica lineare

Tale metodologia di calcolo strutturale è basata sull'ipotesi di riduzione della struttura di impalcato, di fatto tridimensionale, ad un modello di calcolo monodimensionale.

La soletta caricata viene estratta in modo diretto dall'impalcato e, tramite una opportuna scelta delle condizioni di vincolo della stessa, si tiene conto della presenza del resto della struttura.

Lo schema di calcolo da considerare è quello di mensola soggetta ad azioni distribuite (correlate ai pesi propri) e ad azioni concentrate (carico mobile, urto), come mostrato in Figura 7. La sezione di verifica è ubicata nella sezione di incastro della mensola (sezione S2 in Figura 7), da verificare principalmente a tensoflessione.

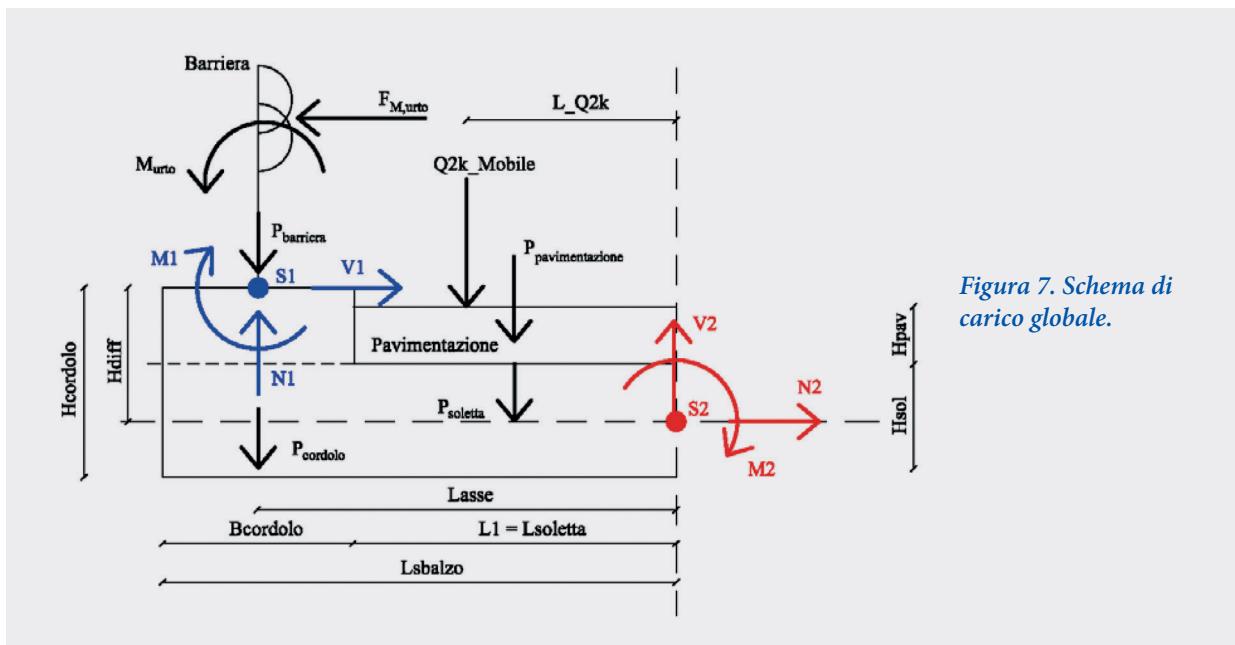
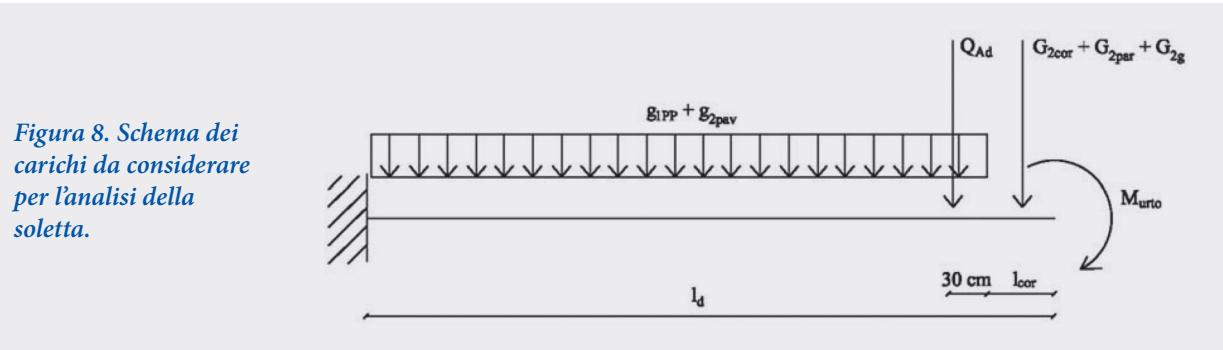
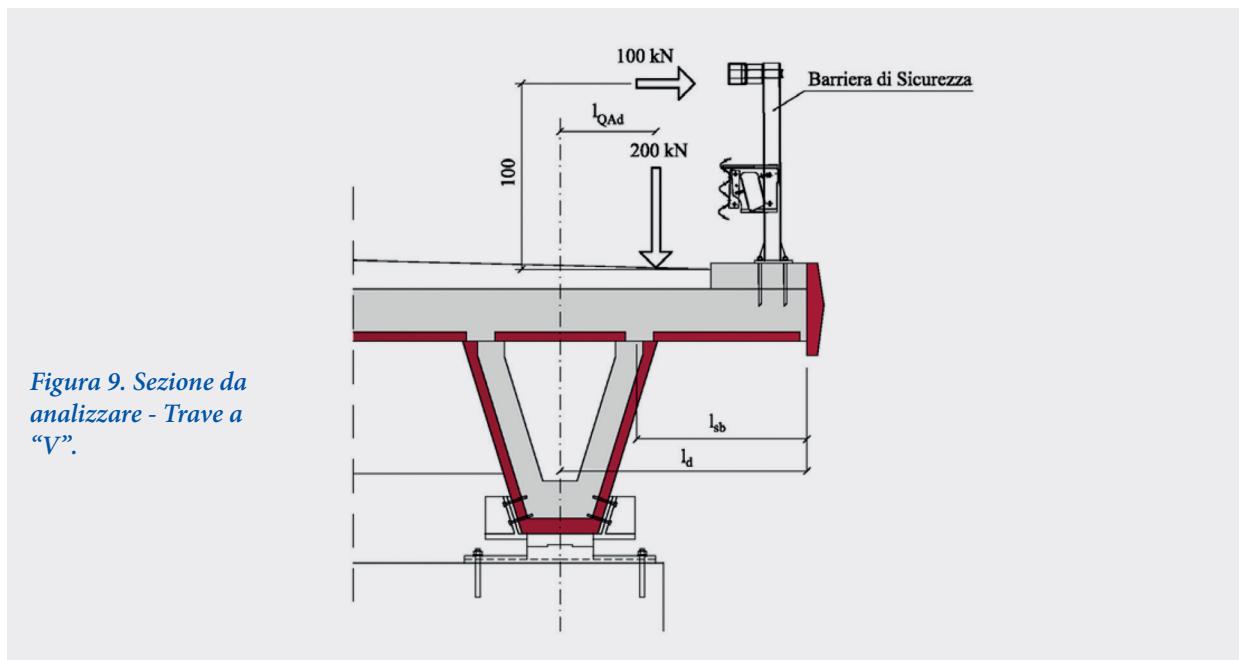


Figura 7. Schema di carico globale.

La soletta sarà sollecitata da carichi distribuiti (peso proprio g_{1pp} e pavimentazione g_{2pav}), carichi concentrati all'estremità (g_{2cor} , g_{2par} , g_{2g}), il carico da urto Q_{urto} ed il carico verticale concomitante Q_{Ad} - applicato a 30 cm dal bordo del cordolo - come mostrato nella figura seguente.



Lo schema statico di riferimento per la verifica dello sbalzo di impalcato è quindi quello di mensola incastriata in asse trave dell'impalcato, avente una luce l_d . Tale ipotesi risulta cautelativa in caso di travi con sezione a V, caratterizzate da una luce dello sbalzo l_{sb} inferiore.



A seconda della tipologia di carico, uniformemente distribuito sull'intera superficie della porzione di piastra a sbalzo o solamente su una parte della stessa, si distinguono due casi: nel primo caso si ha una curvatura cilindrica, con curvature nulle lungo l'asse longitudinale dell'impalcato; nel secondo caso si ottiene invece una deformata a doppia curvatura [2].

Nell'ipotesi che ogni striscia elementare della soletta sopporti il carico che grava su di essa, senza ricevere sostegno dalle strisce adiacenti, si parla di comportamento *a trave*.

Al fine di tenere conto della collaborazione tra la striscia direttamente caricata e quelle adiacenti, si può

effettuare un calcolo a trave ipotizzando però una larghezza della sezione resistente più ampia, ammettendo una diffusione degli sforzi secondo un angolo di diffusione pari a 45° .

In funzione delle caratteristiche geometriche dell'impalcato oggetto di analisi, si ricava la lunghezza b_w di riferimento (Figura 10). Tale approccio considera la ridistribuzione degli sforzi interni nelle solette cui sono applicati carichi concentrati, garantendo in generale una sovraresistenza nei confronti delle sollecitazioni.

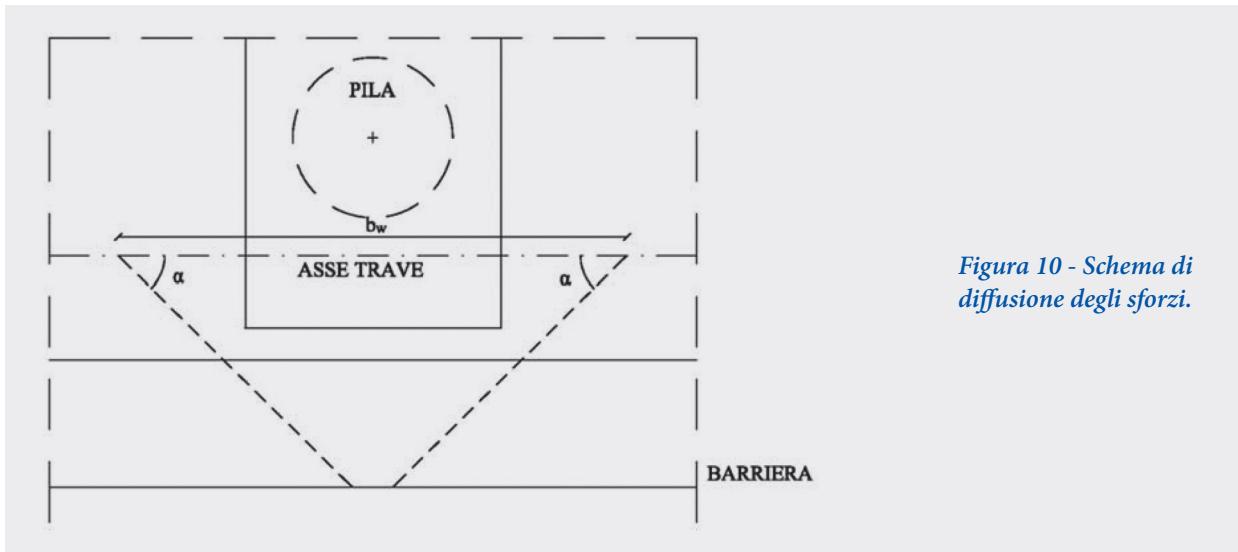


Figura 10 - Schema di diffusione degli sforzi.

Un ulteriore modello diffusivo è quello proposto dal Model Code 2010 [3] (Figura 11). In questo caso, l'angolo di diffusione α e la larghezza della sezione di controllo b_w dipendono dalle condizioni di vincolo - schema di semplice appoggio (Fig. 11b) o di incastro (Fig. 11c) - e dalla tipologia di calcestruzzo utilizzato per la realizzazione del cordolo.

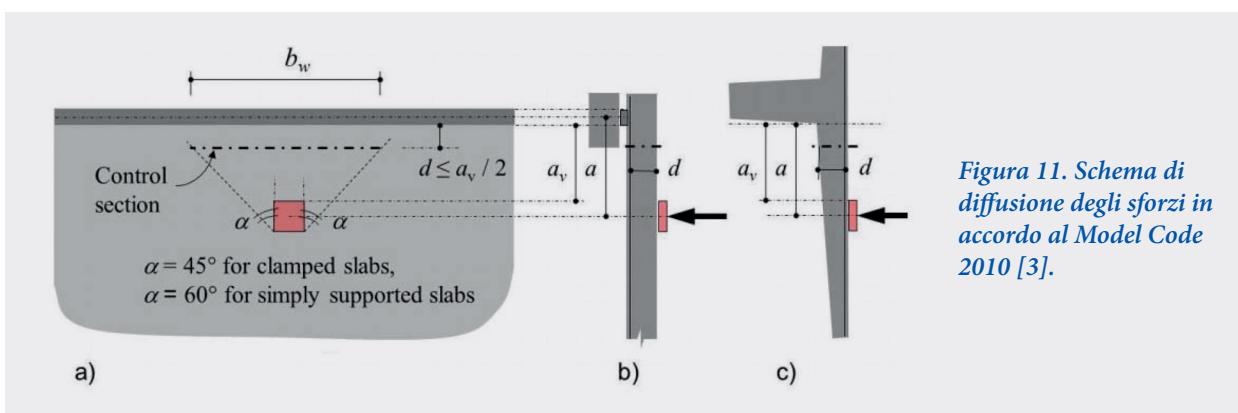


Figura 11. Schema di diffusione degli sforzi in accordo al Model Code 2010 [3].

3.2. Modellazione lineare agli elementi finiti

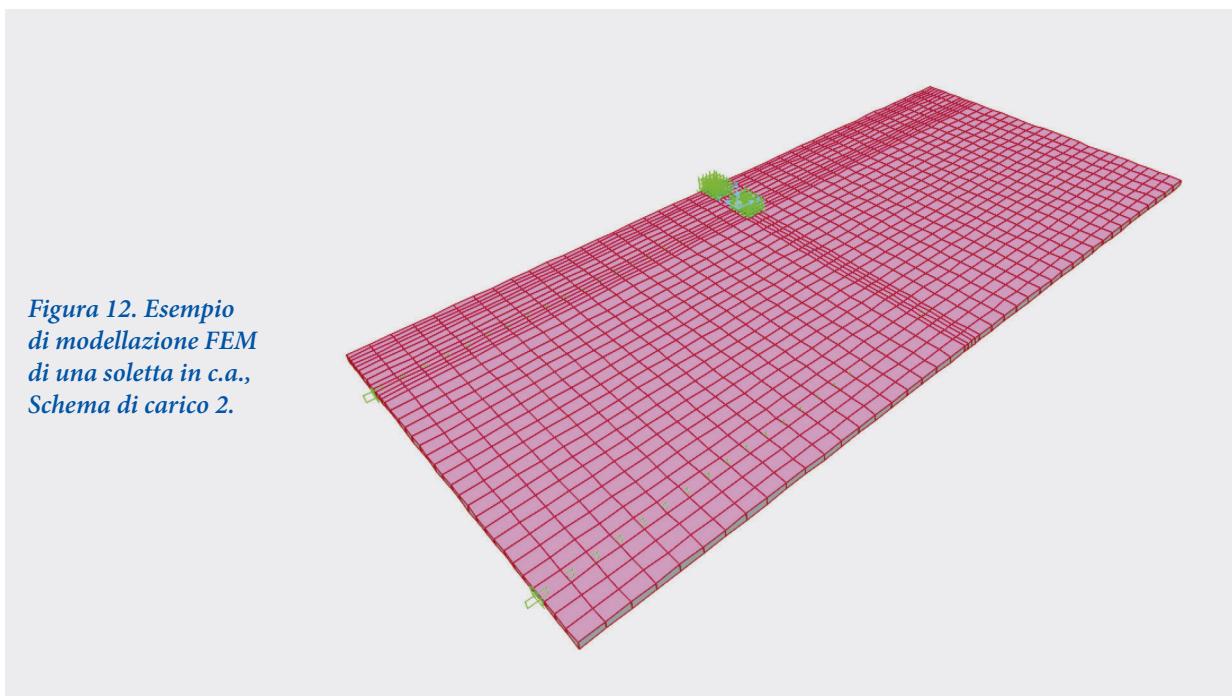
Al fine di tener conto del comportamento a piastra della soletta, caratterizzato dalla collaborazione tra la

striscia direttamente caricata e quelle adiacenti, può essere adottata una modellazione lineare agli elementi finiti (FEM).

Tale tipologia di analisi prevede la realizzazione di un modello tridimensionale della struttura, definendo in modo opportuno gli elementi che lo costituiscono, il materiale, lo schema di vincolo e le condizioni di carico.

Le analisi sono effettuate assumendo sezioni interamente reagenti, con rigidezze valutate riferendosi al solo calcestruzzo. Per quanto concerne la definizione dei materiali, sono impiegate relazioni costitutive tensione-deformazione di tipo lineari.

Per la modellazione della soletta di impalcato possono essere utilizzati elementi finiti bidimensionali, il cui piano medio coincide con il baricentro della soletta in c.a. In questo caso, ai fini della definizione della superficie di impronta delle azioni variabili da traffico, si applicano le indicazioni riportate nel Paragrafo 2, ammettendo una diffusione del carico attraverso la pavimentazione fino al piano medio della soletta sottostante. Nella figura seguente è mostrato un esempio di modellazione agli elementi finiti di una soletta in c.a. con elementi di tipo bidimensionale. La struttura può inoltre essere discretizzata in modo da avere una risoluzione sufficientemente elevata nelle zone maggiormente sollecitate.



I risultati delle analisi numeriche effettuate - in termini di spostamenti, deformazioni, tensioni, ecc. - sono usualmente visualizzati tramite mappe di colore personalizzabili. A titolo di esempio, la Figura 13 mostra una vista di una soletta in c.a. con l'andamento delle sollecitazioni di momento flettente (Fig. 13a) e taglio (Fig. 13b), dovute all'azione del carico variabile da traffico dello Schema di carico 2.

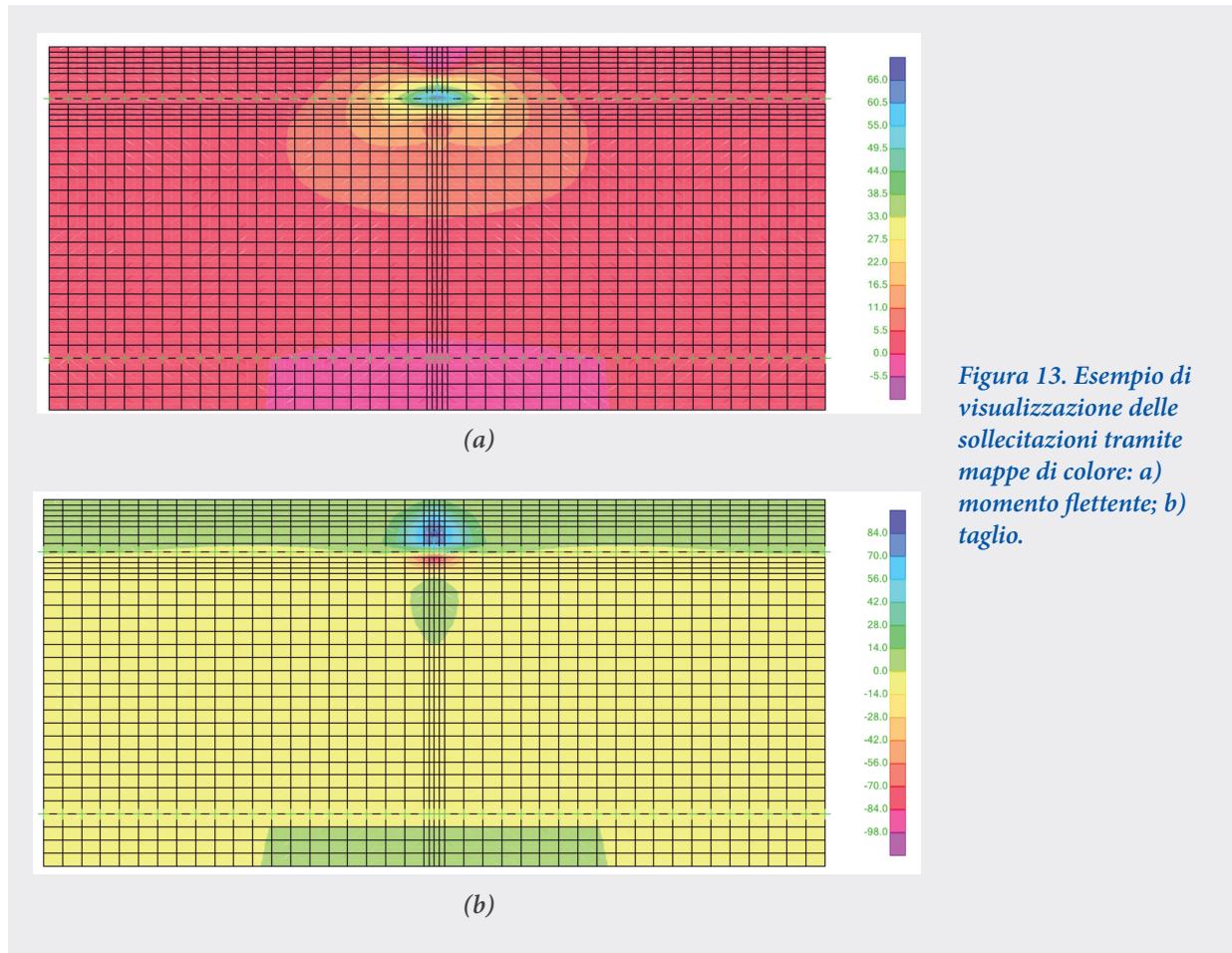


Figura 13. Esempio di visualizzazione delle sollecitazioni tramite mappe di colore: a) momento flettente; b) taglio.

Per la modellazione della struttura di impalcato possono essere adottati in alternativa elementi finiti solidi. La Figura 14 mostra un esempio di modello tridimensionale della porzione a sbalzo di un impalcato in c.a., comprensivo del cordolo bordo ponte e dei montanti della barriera di sicurezza.

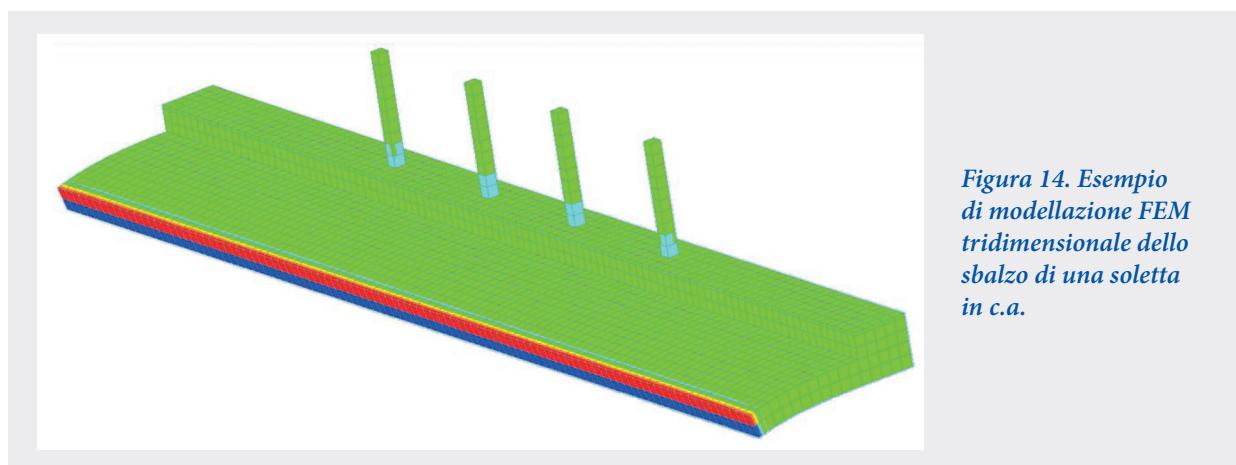
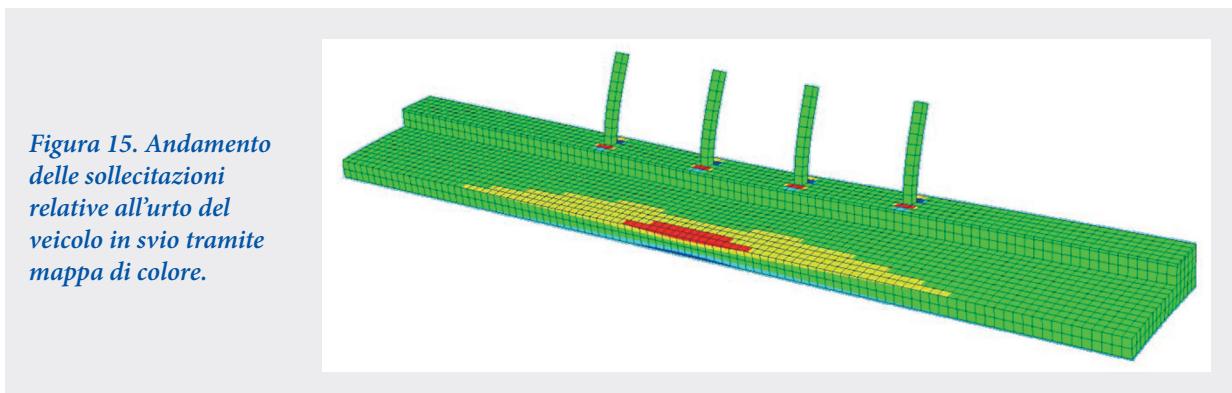


Figura 14. Esempio di modellazione FEM tridimensionale dello sbalzo di una soletta in c.a.

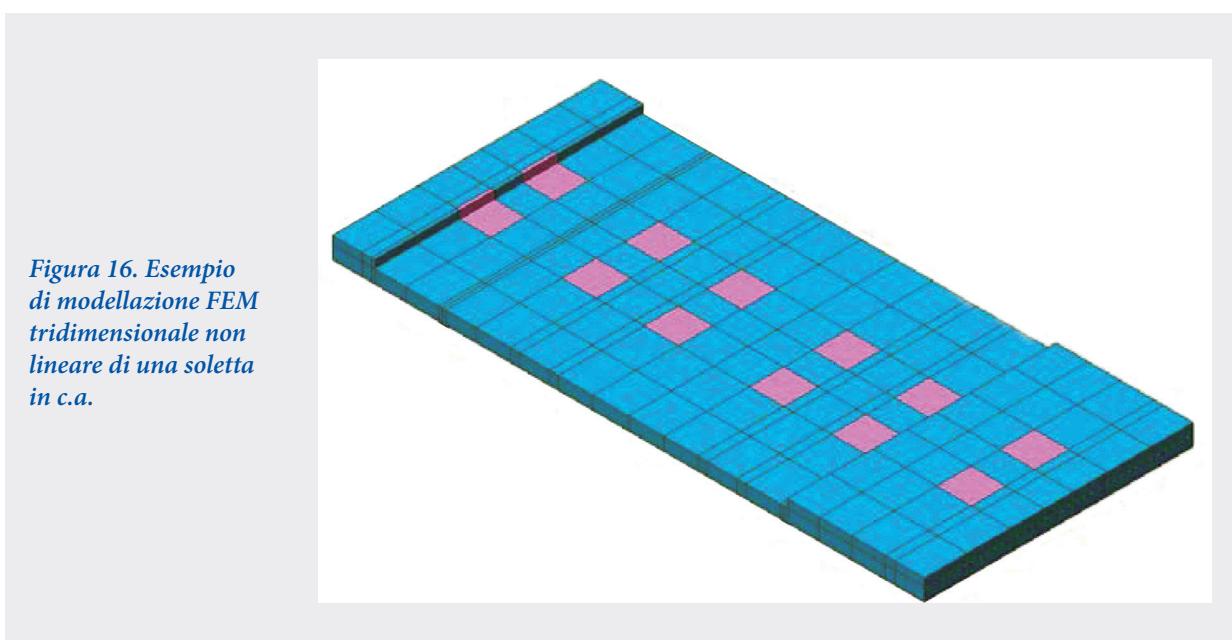
In Figura 15 è invece mostrato un esempio di stato tensionale relativo all'azione orizzontale dovuta all'urto del veicolo in svio, tramite mappa di colore.



3.3. Modellazione non lineare agli elementi finiti

Una ulteriore tipologia di analisi strutturale, che può essere adottata per la valutazione degli effetti delle azioni, consiste nella modellazione non lineare agli elementi finiti (FEM).

La struttura è generalmente analizzata con un modello tridimensionale, realizzato con elementi finiti di tipo bidimensionale o solido, (Figura 16).



Per tale tipologia di analisi è richiesta la modellazione delle parti in calcestruzzo e delle barre di armatura in acciaio. Un dettaglio di queste ultime è mostrato in Figura 17.

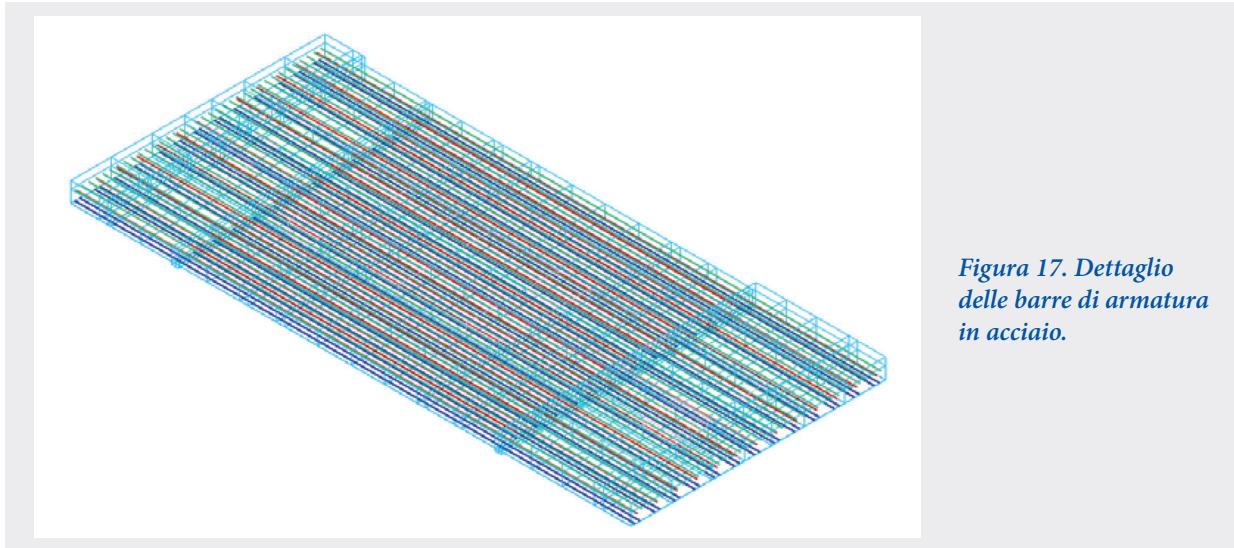


Figura 17. Dettaglio delle barre di armatura in acciaio.

Al materiale - sia calcestruzzo sia barre di armatura - si può attribuire una legge costitutiva tensione-deformazione non lineare, che ne rappresenti adeguatamente il comportamento reale in compressione e trazione. Esempi di relazioni tensione-deformazione tipiche per il calcestruzzo in compressione ed in trazione sono mostrati rispettivamente nelle Figure 18 e 19.

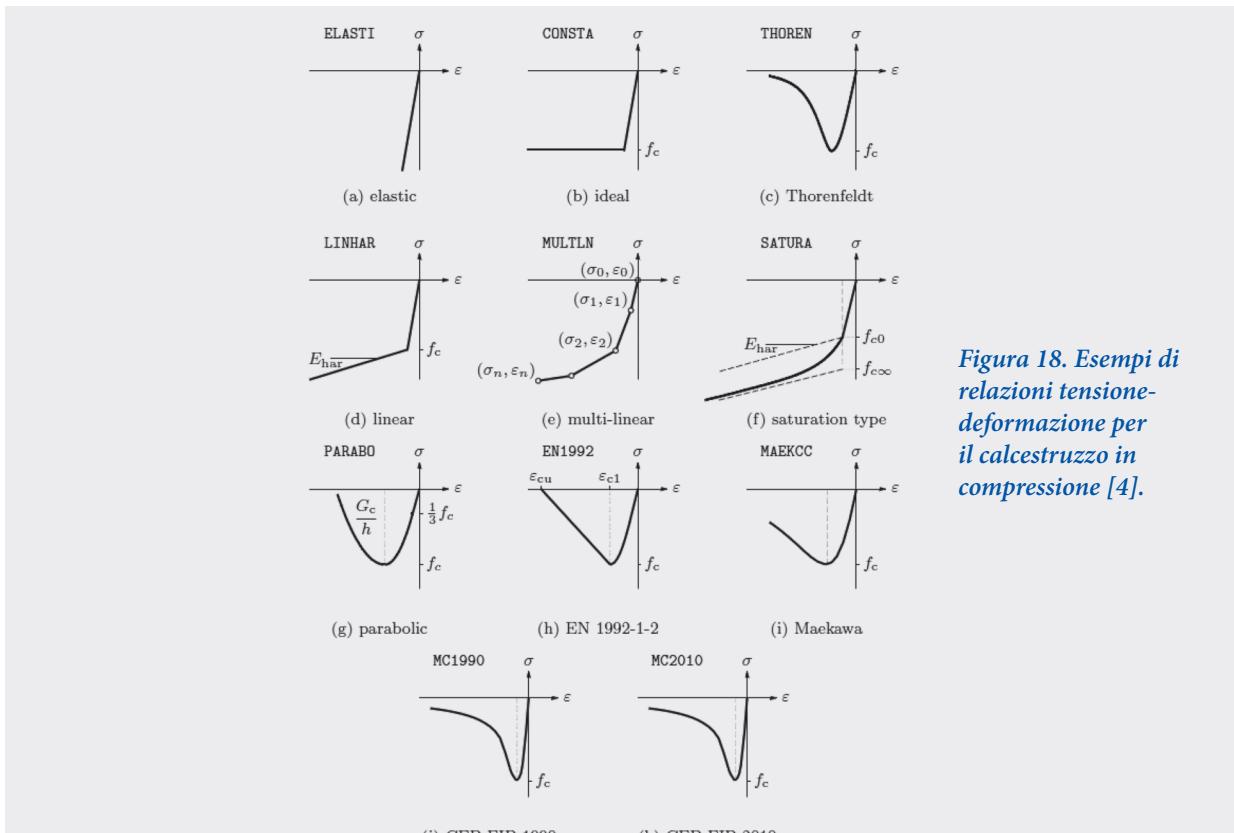


Figura 18. Esempi di relazioni tensione-deformazione per il calcestruzzo in compressione [4].

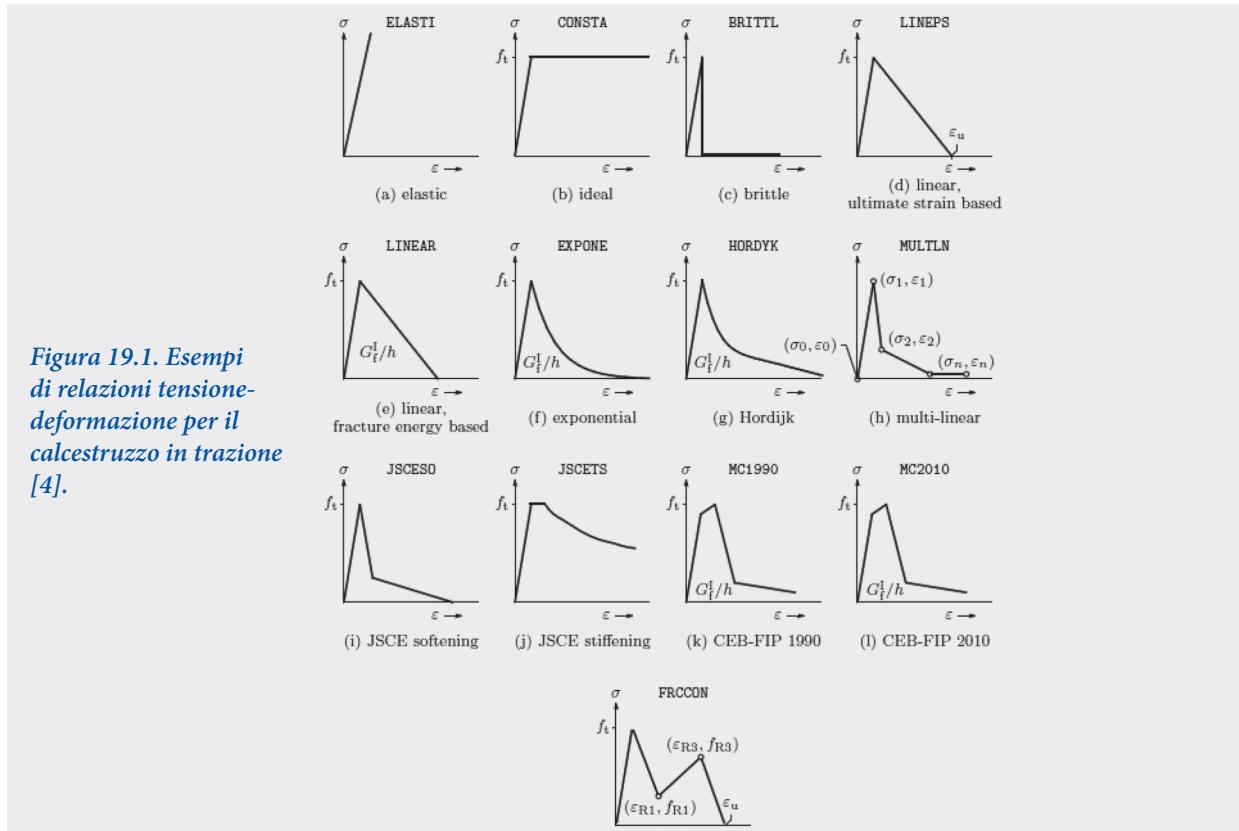


Figura 19.1. Esempi di relazioni tensione-deformazione per il calcestruzzo in trazione [4].

Per quanto riguarda il comportamento delle barre di armatura di acciaio, possono essere adottate leggi costitutive elastiche lineari, modelli costitutivi con incrudimento o legami che tengono conto del comportamento ciclico del materiale.

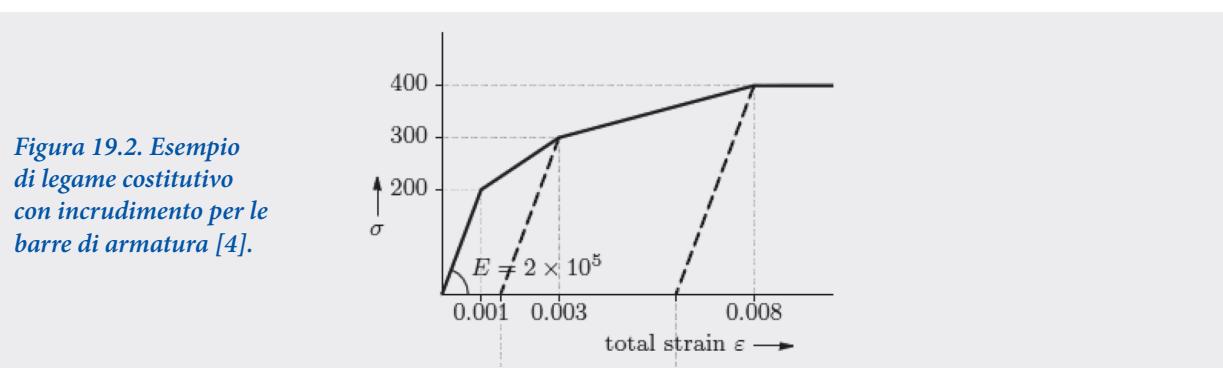


Figura 19.2. Esempio di legame costitutivo con incrudimento per le barre di armatura [4].

Tale tipologia di analisi permette inoltre di analizzare i fenomeni fessurativi che possono eventualmente interessare la struttura di impalcato, operando nel contesto della meccanica della frattura non lineare. Un esempio di quadro fessurativo della porzione a sbalzo di un impalcato in c.a., relativo all'azione orizzontale dovuta all'urto del veicolo in svio, è mostrato in Figura 20.

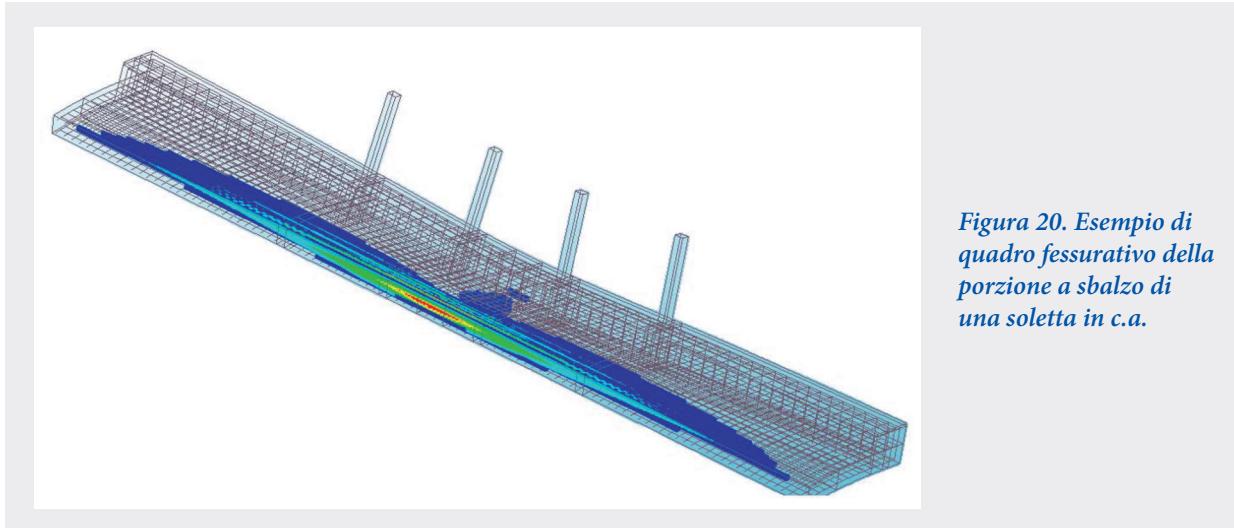


Figura 20. Esempio di quadro fessurativo della porzione a sbalzo di una soletta in c.a.

4. Tecniche di intervento

Nella presente Sezione sono illustrate una serie di tecniche di intervento per il rinforzo a momento negativo delle parti a sbalzo dell’impalcato, al fine di garantire la sicurezza strutturale nei confronti delle azioni orizzontali dovute all’urto del veicolo in svio.

In particolare sono descritte due differenti soluzioni tecnologiche per il rinforzo di solette in c.a. con cordolo bordo ponte di estremità, con barre di acciaio o in fibra di vetro (GFRP - Glass Fiber Reinforced Polymer), e con piatti metallici.

L’efficacia di tali tecniche di intervento è confermata da una campagna di indagini sperimentali, effettuate presso il Laboratorio Strutture e Prove Materiali del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica della Facoltà di Ingegneria dell’Università degli studi di Roma “Tor Vergata”, nel seguito richiamate e descritte.

4.1. Interventi con barre di acciaio o GFRP

Tale tecnica di intervento per il rinforzo a momento negativo di solette da ponte in c.a. prevede l’inserimento di barre in acciaio o GFRP in appositi scassi realizzati sulla superficie di estradosso dell’impalcato.

Al fine di garantire una adeguata applicazione del sistema di rinforzo, deve essere garantita una preparazione del supporto di calcestruzzo idonea alle condizioni richieste del supporto e allo stato strutturale degli elementi.

Nel caso in cui il supporto sia interessato da fenomeni di ammaloramento del calcestruzzo e/o delle barre di armatura, si dovrà fare riferimento al Quaderno Tecnico n. 6 “Interventi di ripristino corticale dei calcestruzzi ammalorati”.

Gli scassi per l'alloggiamento delle barre di rinforzo possono essere eseguiti con mezzi meccanici. Si suggerisce un'inclinazione del taglio secondo un angolo minimo di 90° (1 in Figura 21), per evitare sottosquadri e massimo di 135° (2 in Figura 21), per ridurre distacchi dalla superficie superiore del calcestruzzo sano adiacente. I bordi dovrebbero essere adeguatamente irruviditi al fine di garantire una sufficiente adesione tra materiale originario e prodotto di riparazione.

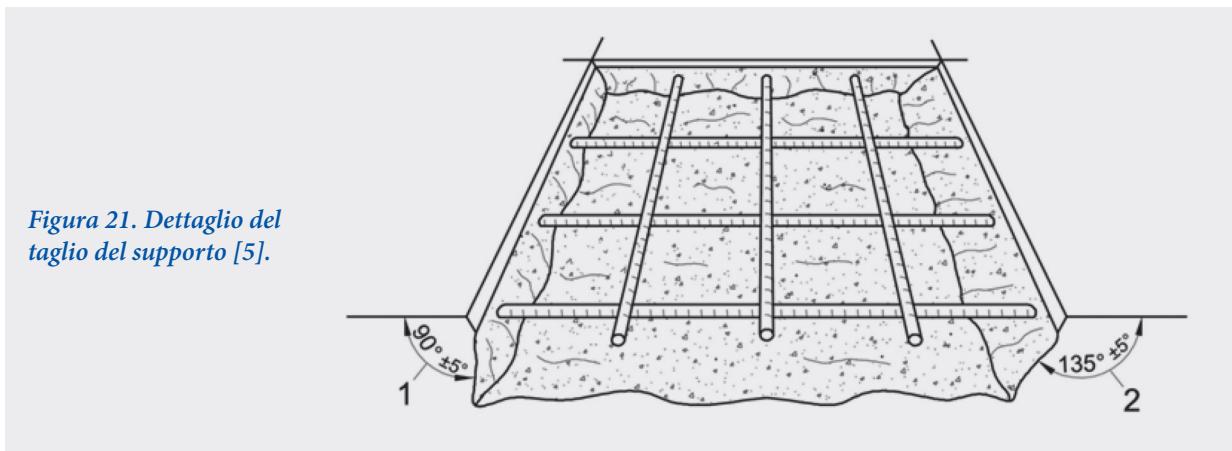


Figura 21. Dettaglio del taglio del supporto [5].

Nel caso in cui le barre di armatura presenti siano interessate da fenomeni di corrosione, la profondità della rimozione deve essere correlata alle specifiche di riparazione. La stessa dovrebbe estendersi in modo tale da lasciare un giuoco tra l'armatura ed il supporto almeno uguale al maggiore tra 15 mm o la dimensione massima dell'aggregato del materiale di riparazione aumentato di 5 mm, al fine di consentire una compattazione adeguata.

In seguito all'esecuzione degli scassi sulla superficie del calcestruzzo, è fondamentale pulire le superfici da trattare, con l'idrolavaggio a 300-400 atm ed una portata d'acqua di almeno 150 l/min.

La superficie del calcestruzzo di supporto dovrà risultare macroscopicamente ruvida (asperità non inferiore a 5 mm di profondità) allo scopo di ottenere la massima aderenza tra il nuovo ed il vecchio materiale.



Figura 22. Porzione soletta in c.a. esistente con scassi per posizionamento barre di rinforzo.

Successivamente alla posa delle barre di acciaio o GFRP, si procederà con il riempimento dello scasso realizzato con malte da ripristino o calcestruzzi da ripristino, in accordo alle indicazioni fornite rispettivamente nei Quaderni Tecnici n. 9 "Malte da ripristino" e n. 10 "Calcestruzzi da ripristino".

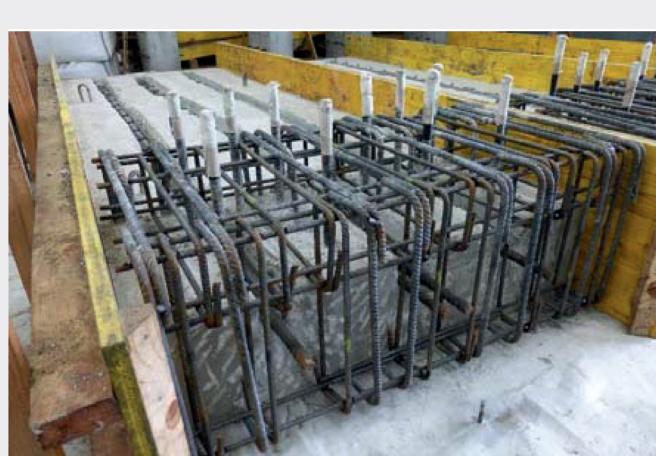


Figura 23. Porzione soletta esistente in c.a. con armatura cordolo ed armatura di rinforzo.



Figura 24. Dettaglio barre di rinforzo.



Figura 25. Porzione soletta esistente in c.a. rinforzata con barre in acciaio o GFRP.

4.2. Interventi con piatti di acciaio a momento negativo

Una differente soluzione tecnologica per il rinforzo a momento negativo di solette da ponte in c.a. consiste nell'inserimento di piatti metallici sulla superficie superiore di estradosso.

Al fine di garantire una adeguata applicazione del sistema di rinforzo, deve essere garantita una preparazione del supporto di calcestruzzo idonea alle condizioni richieste del supporto e allo stato strutturale degli elementi. Nel caso in cui il supporto sia interessato da fenomeni di ammaloramento del calcestruzzo e/o delle barre di armatura, si dovrà fare riferimento al Quaderno Tecnico n. 6 "Interventi di ripristino corticale dei calcestruzzi ammalorati".

Devono essere rimossi gli strati di calcestruzzo debole, danneggiato e deteriorato, o dove necessario il calcestruzzo sano. L'entità dell'intervento di rimozione del calcestruzzo deve essere ridotta al minimo. Una efficace tecnica di rimozione del calcestruzzo è rappresentata dall'idrodemolizione. I suoi principali vantaggi consistono nell'assenza di sviluppo di microfessure e nella riduzione dello strato di calcestruzzo sano rimosso. L'idrodemolizione deve essere effettuata con lance manuali o sistemi automatizzati capaci di garantire un getto d'acqua costante fino alla pressione massima di 1500 bar, in modo tale da rimuovere in maniera mirata solo le parti superficiali non solidali al resto del calcestruzzo. Come indicato dalla norma UNI 1504-10, la pressione di 600 bar è sufficiente a rimuovere il calcestruzzo disgregato e a pulire le barre di armatura senza rischiare di creare dannose lesioni nel calcestruzzo non disgregato. L'uso di una pressione superiore è indicata quando si voglia eliminare anche il calcestruzzo non disgregato e ben adeso al supporto ma ammalorato. La portata d'acqua ideale è compresa fra i 150-300 l/min. Tuttavia l'idroscarifica e le relative pressione e portata d'acqua di esecuzione devono essere conformi agli elaborati progettuali e tarate rispetto alla resistenza meccanica del calcestruzzo su cui si va ad operare. La demolizione può essere completata con mezzi meccanici per piccole porzioni di materiale. L'idrodemolizione deve portare alla luce lo strato di calcestruzzo di buona qualità ed omogeneità.

In seguito alla scarifica o idroscarifica del calcestruzzo è fondamentale pulire le superfici da trattare, soprattutto se orizzontali, con l'idrolavaggio a 300-400 atm ed una portata d'acqua di almeno 150 l/min. La superficie del calcestruzzo di supporto dovrà risultare macroscopicamente ruvida, con asperità non inferiori a 5 mm di profondità.

Figura 26. Porzione soletta in c.a. esistente con scassi per posizionamento barre di rinforzo.



Successivamente si procede con la posa in opera di piatti metallici, collegati alla soletta esistente in c.a. tramite barre di acciaio e ancoranti chimici.

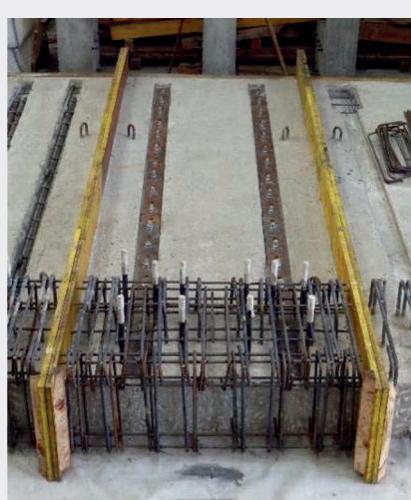


Figura 27. Porzione soletta esistente in c.a. con armatura cordolo e piatti di rinforzo.



Figura 28. Dettaglio ancoraggi delle barre di rinforzo.



Figura 29. Porzione soletta esistente in c.a. rinforzata con piatti metallici.

Appendice A: prove sperimentali soletta in c.a. rinforzata con barre di acciaio o GFRP

Al fine di illustrare la tecnica di intervento precedentemente descritta al §4.1, si riporta una descrizione delle prove sperimentali effettuate presso il Laboratorio Strutture e Prove Materiali del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli studi di Roma "Tor Vergata", su porzioni di soletta in c.a. con cordolo bordo ponte di estremità. Le prove di carico sono state effettuate su solette in c.a. rettangolari, con lati pari a 360 cm e 125 cm e spessore 30cm, con cordoli di estremità, caratterizzati da larghezza pari a 75 cm e spessore pari a 24 cm. L'armatura presente nella soletta è costituita da barre $\varnothing 12/35'$ + $\varnothing 16/20'$ superiori e $\varnothing 12/20'$ inferiori. L'armatura trasversale è pari $\varnothing 10/20'$ superiori e $\varnothing 10/25'$ inferiori. La soluzione di rinforzo consiste nel posizionamento di 4 barre $\varnothing 24$, all'interno di appositi alloggiamenti realizzati sulla superficie superiore di estradosso.

Nella mezzeria del cordolo sono bullonate, mediante tirafondi, due piastre metalliche 430x420x30mm, cui sono saldate due colonne HE180B di altezza pari a 1200 mm, simulanti i montanti della barriera di sicurezza. Un'immagine dell'elemento realizzato è mostrata in Figura 30.



Figura 30. Porzione di soletta in c.a. con cordolo bordo ponte di estremità.

Nelle immagini che seguono sono mostrate le fasi principali del processo di realizzazione delle solette in c.a.:

- Preparazione della gabbia di armatura;
- Predisposizione elementi per creazione degli alloggiamenti delle barre di rinforzo in acciaio;
- Getto della soletta in calcestruzzo;
- Maturazione e scassero della soletta in c.a.;
- Inserimento delle barre di rinforzo in acciaio all'interno degli alloggiamenti precedentemente creati;
- Riempimento degli alloggiamenti con malta da ripristino o calcestruzzo da ripristino;
- Getto del cordolo in calcestruzzo fibrorinforzato ad elevate prestazioni.

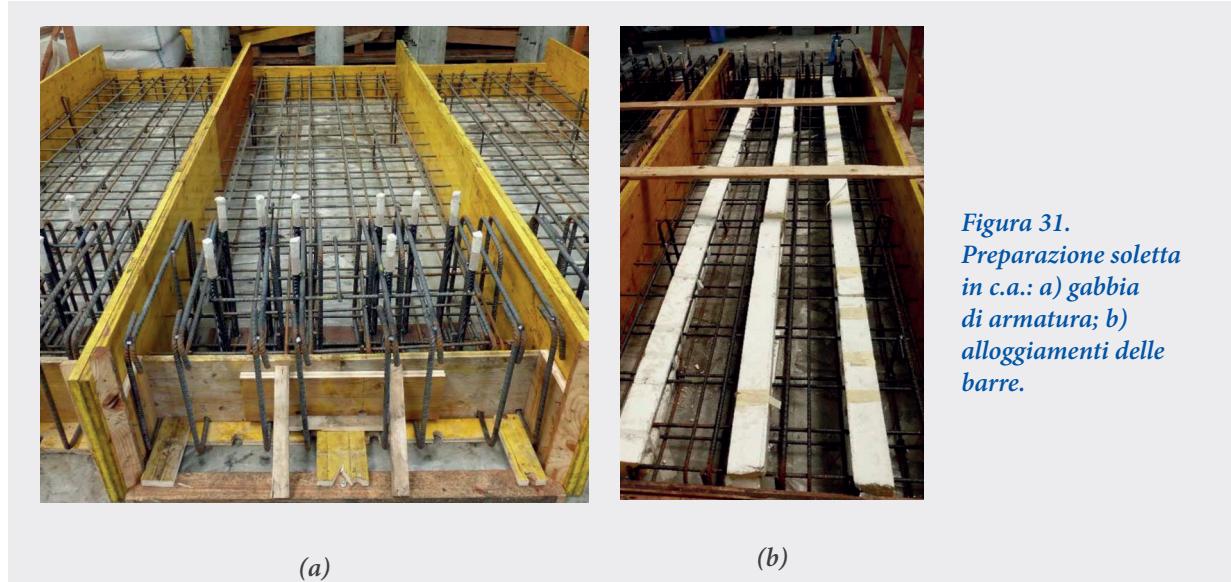


Figura 31.
Preparazione soletta
in c.a.: a) gabbia
di armatura; b)
alloggiamenti delle
barre.

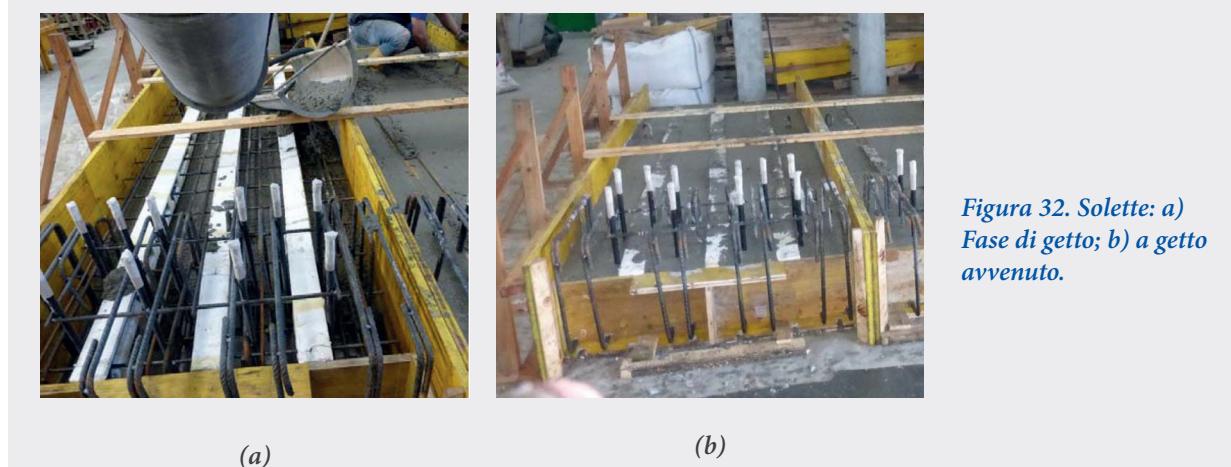
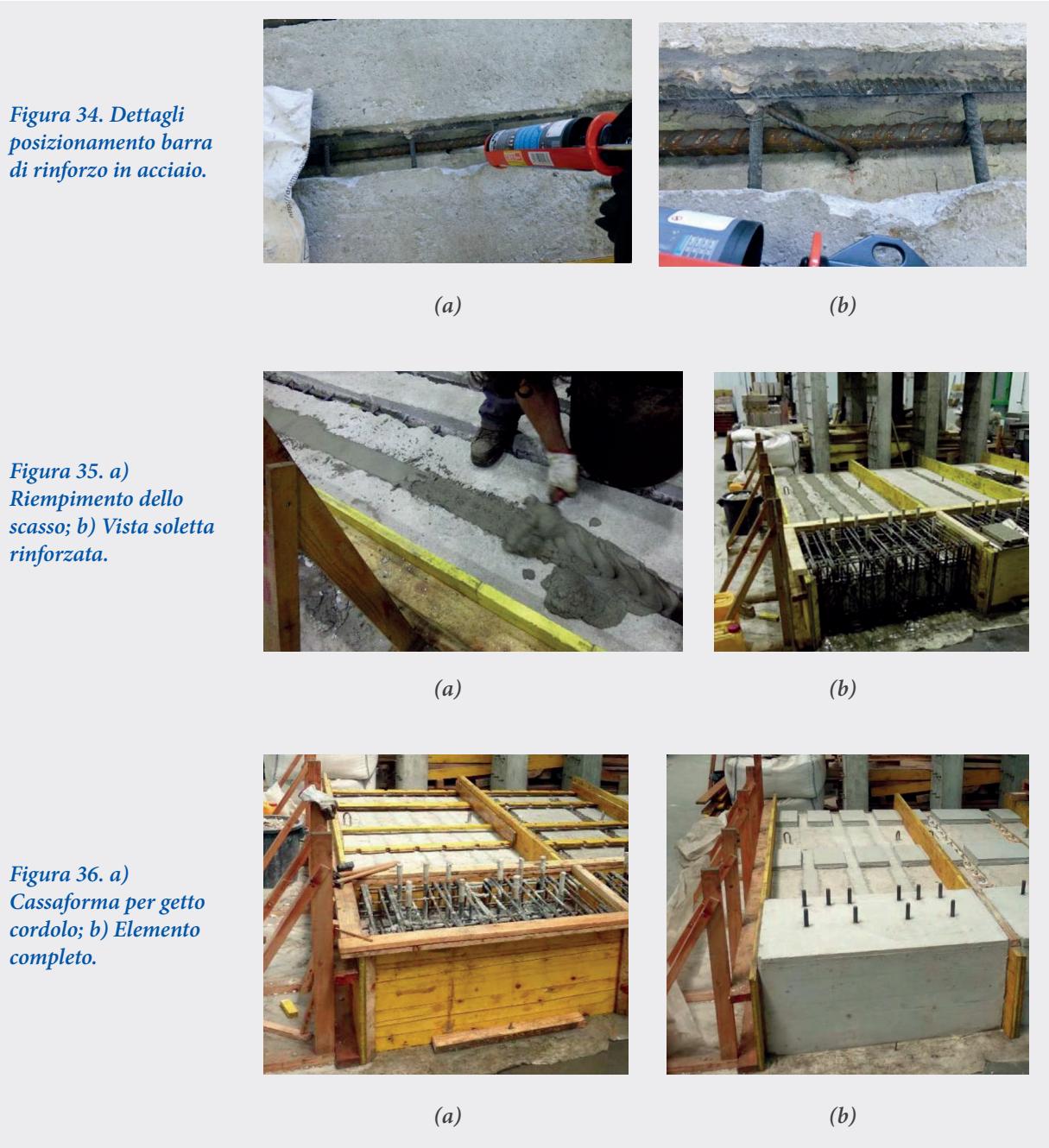


Figura 32. Solette: a)
Fase di getto; b) a getto
avvenuto.



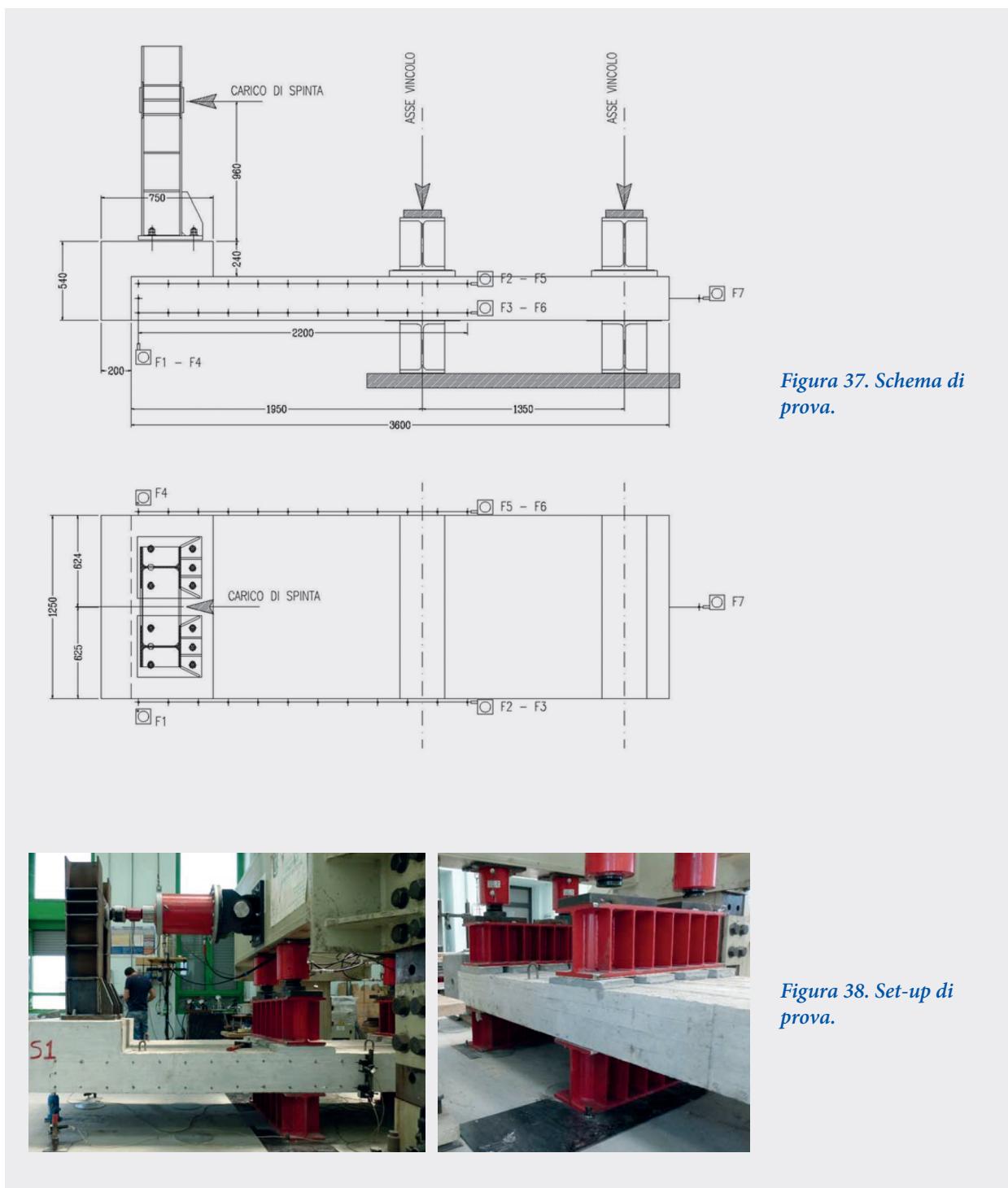
Figura 33. a)
Maturazione avvenuta;
b) Inserimento barre;
c) Dettaglio barra di
rinforzo.



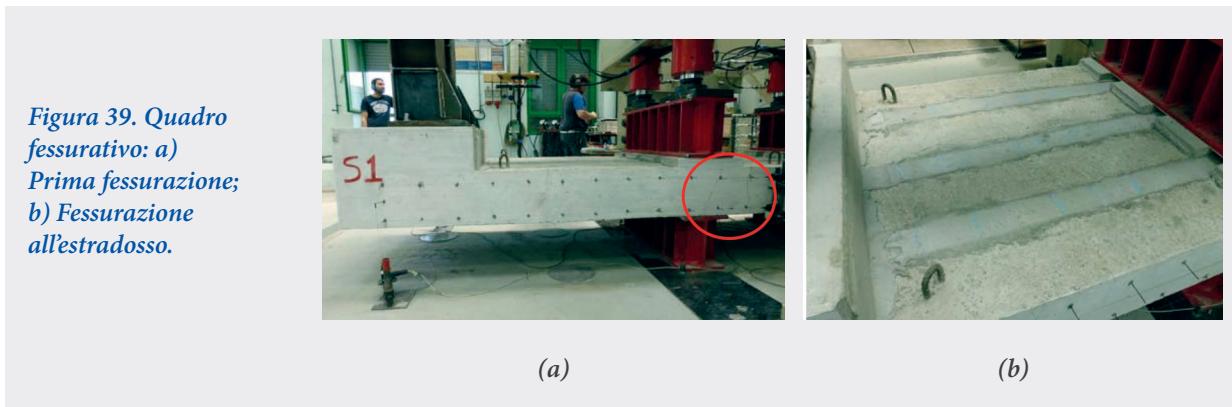
Il sistema è stato quindi sottoposto a prova secondo lo schema riportato nella Figura 37. In particolare, al fine di assicurare il vincolo di incastro, è stato posizionato all'estremità della soletta un sistema di travi HEB 300, compresse da 3 martinetti idraulici da 2000 kN ciascuno. La forza orizzontale sul montante è stata fornita da un martinetto idraulico da 4000 kN, posizionato ad una altezza pari a 960 mm dalla superficie di estradosso del cordolo. Le prove sono state eseguite, in controllo di spostamento, fino al raggiungimento del carico ultimo del sistema, misurando il carico complessivo F applicato con il sistema di carico, lo spo-

stamento verticale della soletta, in corrispondenza del cordolo, lo spostamento orizzontale della soletta in direzione opposta alla direzione di spinta e l'allungamento delle superfici laterali destra e sinistra.

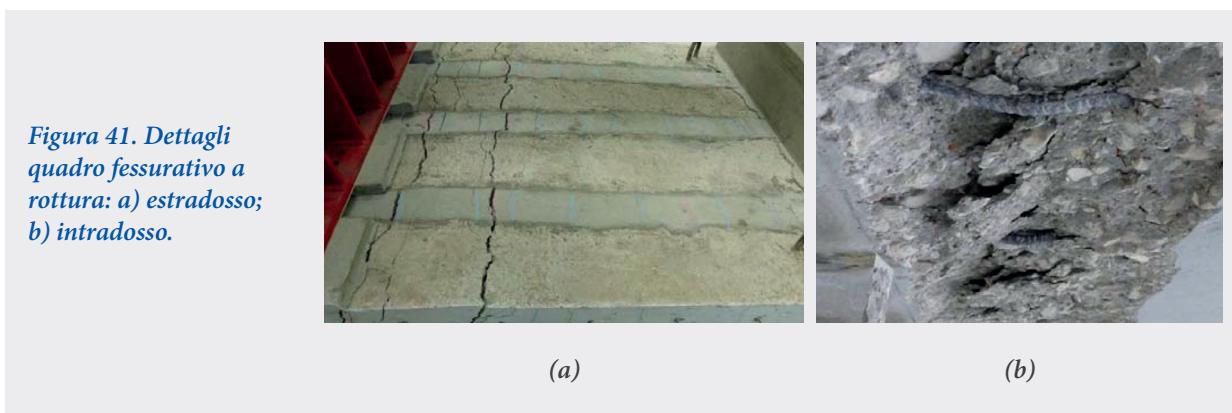
È stato inoltre eseguito un rilievo delle lesioni, seguendone la loro evoluzione in funzione del carico F applicato. Una immagine del set-up di prova è riportata in Figura 38.



Le prime fessure si sono formate per un valore di carico pari a circa 45 kN, sulle superfici laterali in prossimità dell'incastro (Figura 39a), mentre sulla superficie superiore di estradosso cominciano a formarsi per un carico pari a 70 kN, (Figura 39b).



Il carico massimo del sistema soletta in c.a. con cordolo bordo ponte di estremità, rinforzato con 4 barre $\varnothing 24$, è risultato pari a circa 263 kN. La rottura del sistema si è verificata per schiacciamento del calcestruzzo compresso in prossimità dell'incastro, come si può vedere dalla Figure 40 e 41.



Appendice B: prove sperimentali soletta in c.a. rinforzata con piatti di acciaio

Analogamente al caso precedente, per illustrare la tecnica descritta al §4.2, si riportano i risultati delle prove sperimentali effettuate presso il Laboratorio Strutture e Prove Materiali del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli studi di Roma "Tor Vergata", su porzioni di soletta in c.a., aventi stessa geometria ma rinforzate con 2 piatti metallici 100x15 mm. Gli stessi sono posizionati all'interno di appositi alloggiamenti realizzati sulla superficie superiore di estradosso (Figura 42).

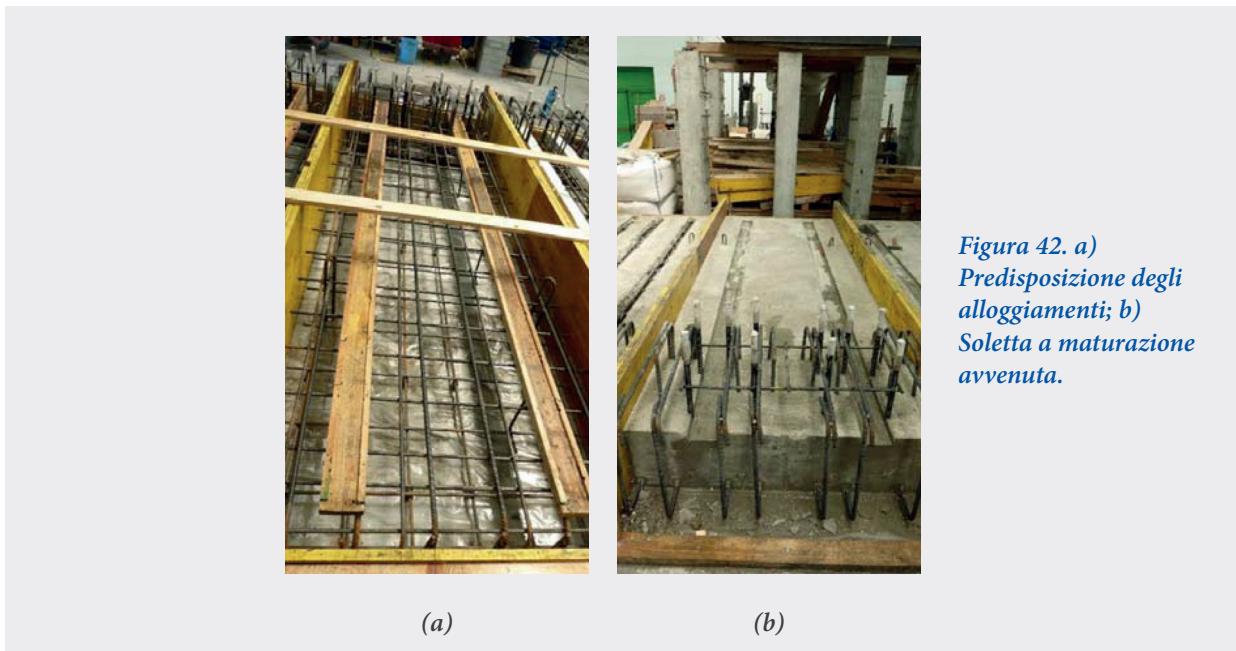


Figura 42. a) Predisposizione degli alloggiamenti; b) Soletta a maturazione avvenuta.

Come si può vedere nella Figura 43, i piatti metallici sono collegati alla soletta in c.a. tramite ancoranti chimici con barre $\varnothing 20$.

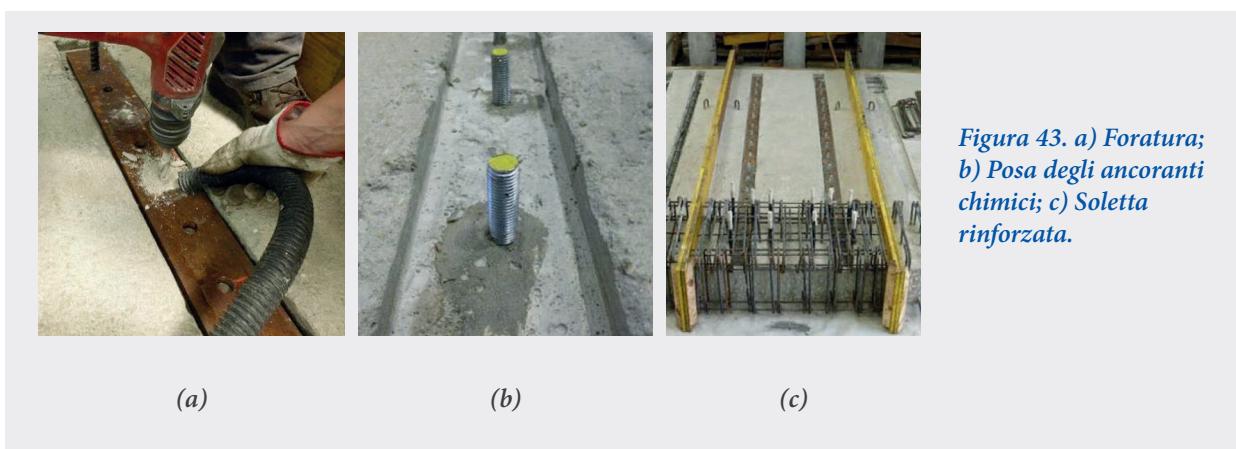
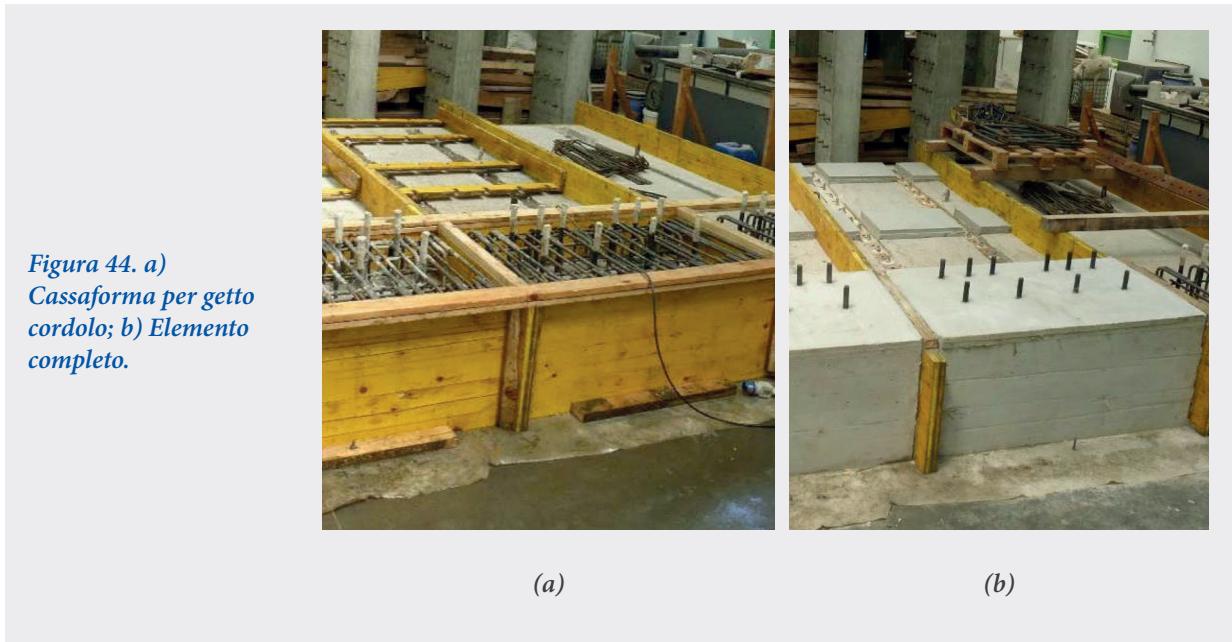


Figura 43. a) Foratura; b) Posa degli ancoranti chimici; c) Soletta rinforzata.

La cassaforma per il getto del cordolo ed il sistema completo sono mostrati in Figura.



*Figura 44. a)
Cassaforma per getto
cordolo; b) Elemento
completo.*

Il sistema è stato quindi sottoposto a prova secondo lo stesso schema riportato nella Figura 37. Una immagine del set-up di prova è mostrata in Figura 45.



*Figura 45. Set-up di
prova.*

Le prime fessure si sono formate per un valore di carico pari a circa 45 kN, sulle superfici laterali in prossimità dell'incastro (Figura 46a). Tipiche fessure flessionali verticali si sono formate sulle superfici laterali per livelli di carico pari a circa 70 kN, (Figura 46b).

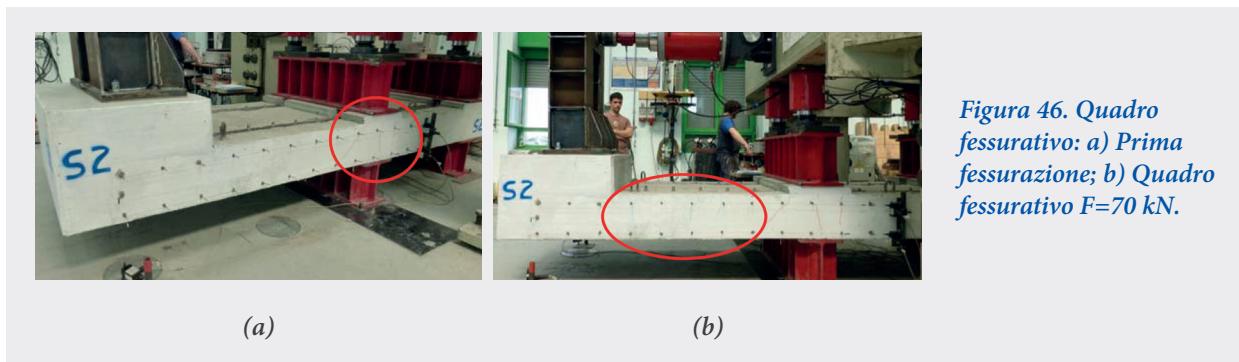


Figura 46. Quadro fessurativo: a) Prima fessurazione; b) Quadro fessurativo $F=70$ kN.

Il carico massimo del sistema soletta in c.a. con cordolo bordo ponte di estremità, rinforzato con 2 piatti metallici 100x15 mm, è risultato pari a circa 244 kN. La rottura del sistema si è verificata per schiacciamento del calcestruzzo compresso in prossimità dell'incastro, come si può vedere dalla Figure 47 e 48.

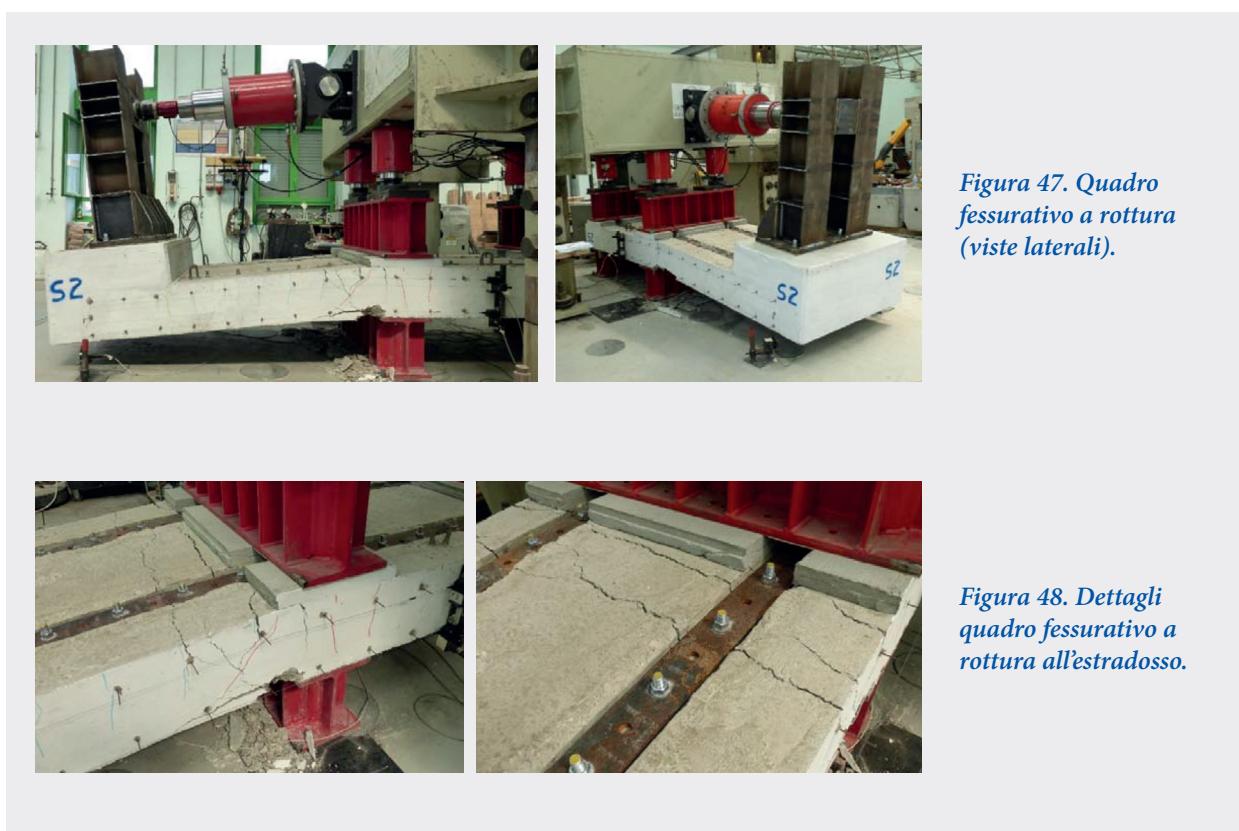


Figura 47. Quadro fessurativo a rottura (viste laterali).

Figura 48. Dettagli quadro fessurativo a rottura all'estradosso.

Bibliografia

- [1] Decreto Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 17 gennaio 2018, Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni".
- [2] Petrangeli M.P., Progettazione e costruzione di ponti, IV Edizione, Casa Editrice Ambrosiana.
- [3] Fib, CEB-FIP, Model Code 2010, Vol. 2.
- [4] TNO DIANA BV, User's Manual release 9.6, Material Library, Edited by: Jonna Marie and Wijtze Pieter Kikstra, Delftelpark 19a, 2628 XJ Delft, The Netherlands.
- [5] UNI EN 1504-10:2005 "Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità - Parte 10: Applicazione in opera di prodotti e sistemi e controllo di qualità dei lavori".

QUADERNO TECNICO N. 16

**Interventi sugli impalcati
a struttura mista
acciaio-calcestruzzo**

Indice Quaderno Tecnico N. 16

1.	Introduzione	99
2.	Caratteristiche principali	100
3.	Attività di sorveglianza	105
4.	Problematiche specifiche: esempi di danneggiamento	106
5.	Esempi di interventi di ripristino	116
5.1.	Danneggiamento dell'impalcato a seguito di urti	116
5.2.	Intervento di protezione dell'impalcato mediante verniciatura	117
5.3.	Ripristino della funzionalità statica del collegamento	118
5.4.	Difetti locali per corrosione o fatica	119
5.5.	Intervento di ripristino della piastra ortotropa	120
	Bibliografia	121

1. Introduzione

Gli impalcati a struttura mista acciaio-calcestruzzo sono costituiti da parti realizzate in acciaio per carpenteria e parti in calcestruzzo armato, rese collaboranti tra di loro da un appropriato sistema di connessione. Quest'ultimo rappresenta un punto di fondamentale importanza per la resistenza e rigidezza dell'intera struttura e da esso può dipendere la crisi.

L'utilizzo di impalcati a sezione mista acciaio-calcestruzzo ha subito un notevole incremento negli ultimi anni, in virtù dei progressi raggiunti nel campo della tecnologia dei materiali, dei processi realizzativi, di costruzione e montaggio e nel settore del calcolo strutturale.

Data la loro specifica natura, i ponti ad impalcato misto acciaio-calcestruzzo presentano problemi specifici legati a:

- degrado degli elementi in acciaio per corrosione e/o fatica;
- degrado della soletta in c.a.;

Tali situazioni di degrado richiedono spesso l'esecuzione di interventi di manutenzione straordinaria, che interessano gli elementi sia in calcestruzzo sia in acciaio.

Nel presente Quaderno Tecnico verranno innanzitutto analizzate le possibili modalità di danneggiamento che possono verificarsi in un ponte a struttura mista in acciaio-calcestruzzo. Per ciascuna modalità di danneggiamento saranno quindi descritte le principali tecniche di riparazione e rinforzo.

Per quanto concerne la soletta superiore, il calcestruzzo può essere interessato da un processo di ammaloramento più o meno diffuso, con presenza di fessure, lesioni, distacchi, accentuati dalla eventuale presenza di infiltrazioni di acque ad alto contenuto di cloruri. Una esposizione costante all'umidità accelera inoltre sia il processo di corrosione delle barre di armatura sia i fenomeni di fessurazione e di spalling del calcestruzzo. Tutto ciò è incrementato in presenza di cicli di gelo e disgelo. Le cause di tali fenomeni di degrado sono molteplici e possono essere sinteticamente individuate in cause di natura ambientale o di non idonea esecuzione. Per gli aspetti inerenti gli interventi di ripristino dello stato del calcestruzzo della soletta, si rimanda al Quaderno Tecnico n. 6 *"Interventi di ripristino corticale dei calcestruzzi ammalorati"*.

È opportuno evidenziare che il presente Quaderno Tecnico non sostituisce il progetto di ripristino necessario laddove il degrado sia tale da richiedere l'esecuzione di un intervento di rinforzo.

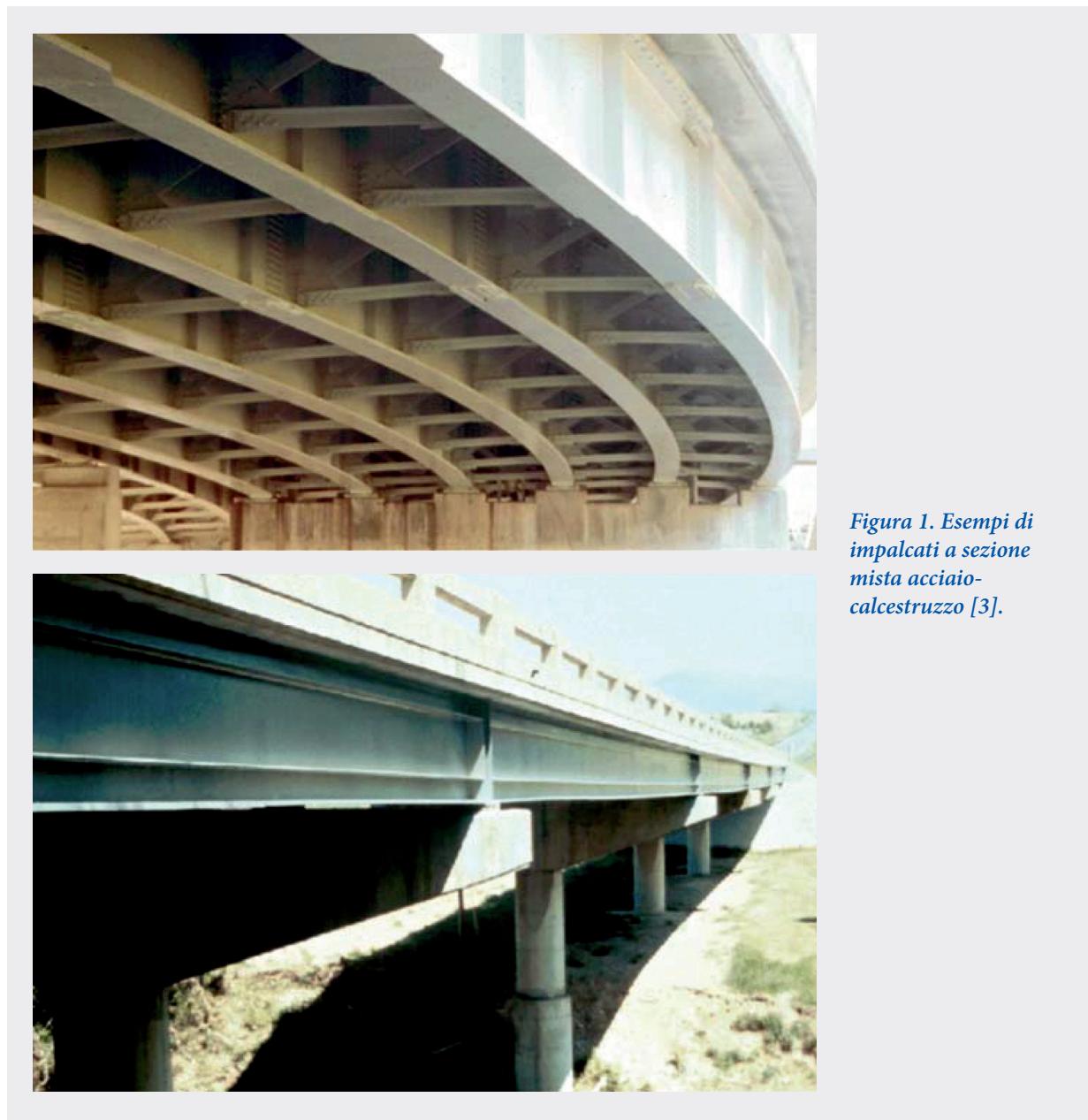


Figura 1. Esempi di impalcati a sezione mista acciaio-calcestruzzo [3].

2. Caratteristiche principali

Gli impalcati a sezione composta sono generalmente adottati nel campo delle luci comprese tra 30 e 80 m, per la possibilità di ottimizzazione dei materiali. Tuttavia, gli stessi sono utilizzati anche per luci maggiori, fino a 120÷150 m.

Per quanto riguarda la sezione trasversale, possono essere individuate due tipologie principali, rappresen-

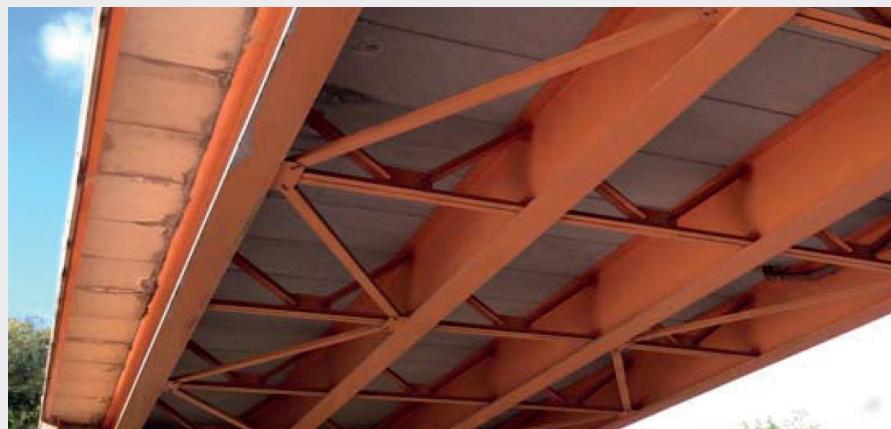
tate dallo schema bitrave o multitrave e dalla sezione a cassone.

La prima tipologia è costituita da due o più travi a doppio T collegate tra di loro da una serie di trasversi a doppio T, generalmente connessi ai soli irrigidimenti verticali delle travi principali tramite saldatura. Tale soluzione presenta numerosi vantaggi sia per la sua semplicità di realizzazione sia da un punto di vista economico. Tipicamente i trasversi non sono connessi alla soletta superiore e presentano un interasse pari a circa 6÷8 m. Nel caso di ponti di piccola luce - inferiore a 30 m - i trasversi possono anche essere assenti. In questo caso la funzione di irrigidimento viene affidata alla soletta ed ai soli trasversi di testata. All'aumentare della larghezza dell'impalcato, lo schema di sezione composta bitrave viene generalmente adottato ricorrendo a due soluzioni principali, collegando i traversi alla soletta superiore oppure disponendo traversi aggettanti.

Figura 2. Esempio di impalcato misto acciaio-calcestruzzo con schema bitrave [3].



Figura 3. Esempio di impalcato misto acciaio-calcestruzzo con schema multitrave.



La seconda tipologia è invece rappresentata dalle sezioni a cassone, costituite da una trave metallica aperta superiormente e connessa alla soletta superiore. L'impiego di travi a cassone presenta importanti vantaggi in virtù dell'elevata rigidezza torsionale, permettendo di ridurre l'altezza dell'impalcato. Il cassone generalmente presenta una sezione di tipo rettangolare o trapezio. All'aumentare della larghezza dell'impalcato, si può ricorrere a schemi con cassone monocellulare e traversi aggettanti oppure con cassone rettangolare o trapezio e sbalzi laterali sostenuti da travi reticolari inclinate o puntoni.

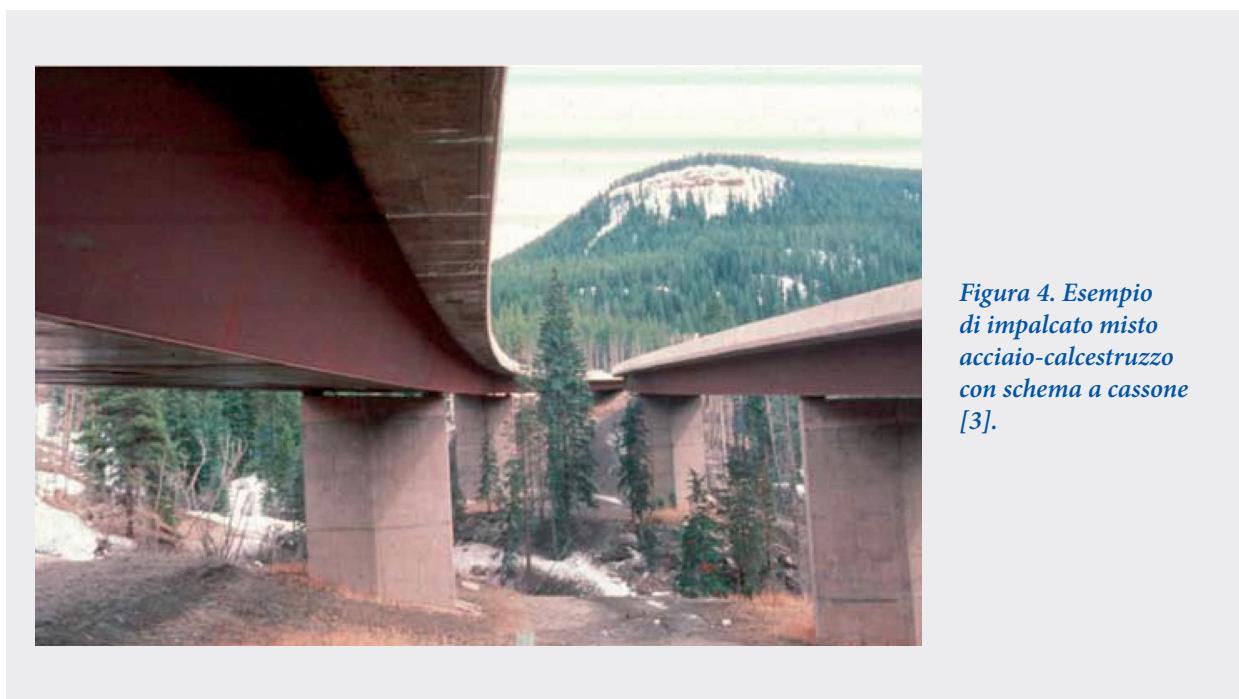
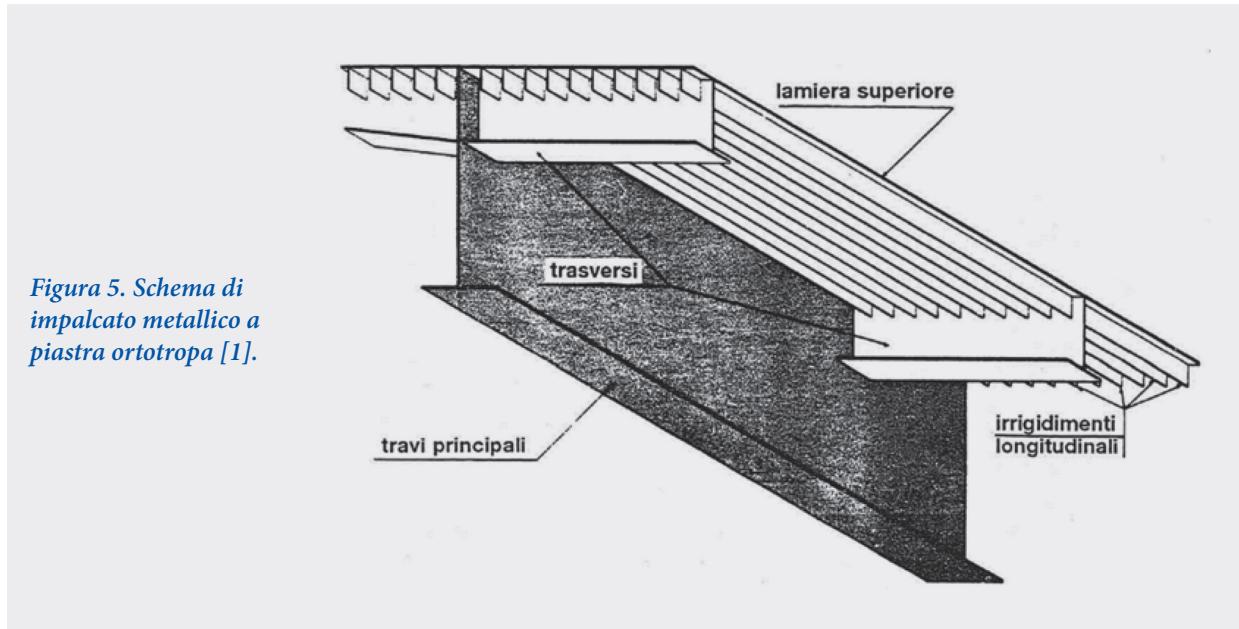


Figura 4. Esempio di impalcato misto acciaio-calcestruzzo con schema a cassone [3].

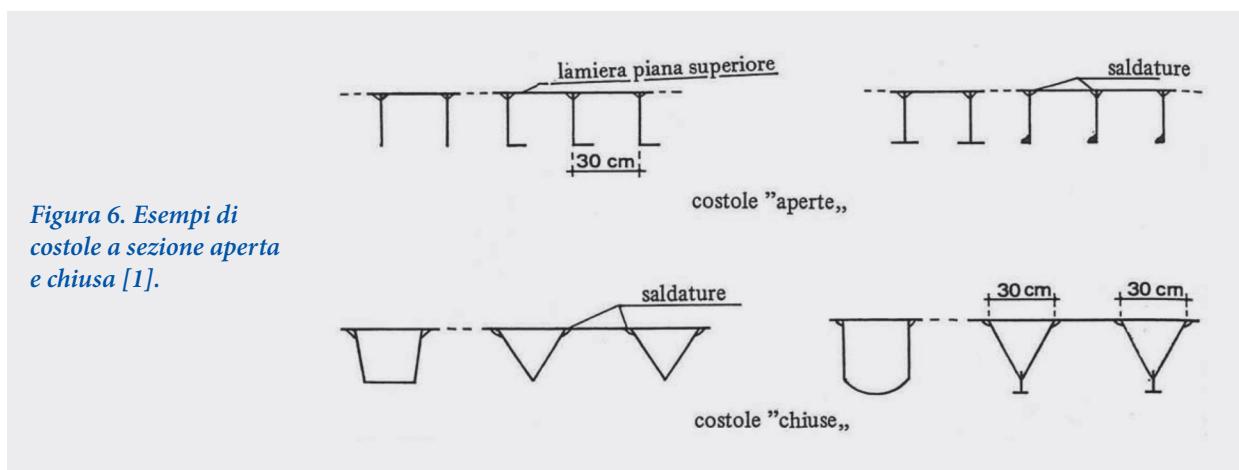
La soletta superiore è generalmente realizzata in c.a. ed è connessa all'ala superiore del cassone mediante appositi connettori a taglio.

Nel caso di ponti metallici, al fine di ridurre i carichi permanenti, sono state sviluppate soluzioni di impalcati metallici costituiti da una lastra in acciaio che sopporta una pavimentazione di tipo sottile, avente uno spessore pari a circa 3÷5 cm. Tale sistema è indicato con il nome di piastra ortotropa, poiché costituito da una lamiera piana superiore irrigidita da costole longitudinali e da travi trasversali, connesse tramite saldatura. Il sistema è caratterizzato da rigidezze diverse nelle due direzioni ortogonali. Nella figura seguente è mostrato uno schema di impalcato a piastra ortotropa.



Gli impalcati a piastra ortotropa possono essere suddivisi in due classi principali a seconda della forma degli irrigidimenti trasversali, di tipo aperta o chiusa.

Nel primo caso, le costole, costituite da piatti semplici, profili a T inverso oppure piatti con bulbo, sono prive di rigidezza torsionale. Nel secondo caso invece hanno forma trapezoidale, a V, a U, a Y e sono pertanto caratterizzate da una significativa rigidezza torsionale. Esempi delle due categorie di costole a sezione aperta e chiusa sono mostrati nella figura seguente.



Generalmente le travi trasversali sono caratterizzate da un interasse pari a circa $1.50 \div 2.0$ m nel caso di costole a sezione aperta e pari a $3.0 \div 4.0$ m, in caso di costole a sezione chiusa. Lo spessore della lamiera

superiore è tipicamente non inferiore a 10 mm.

La figura seguente mostra un esempio di ponte con impalcato realizzato con una piastra ortotropa del tipo a sezione aperta, il Viadotto sul fiume Lao.

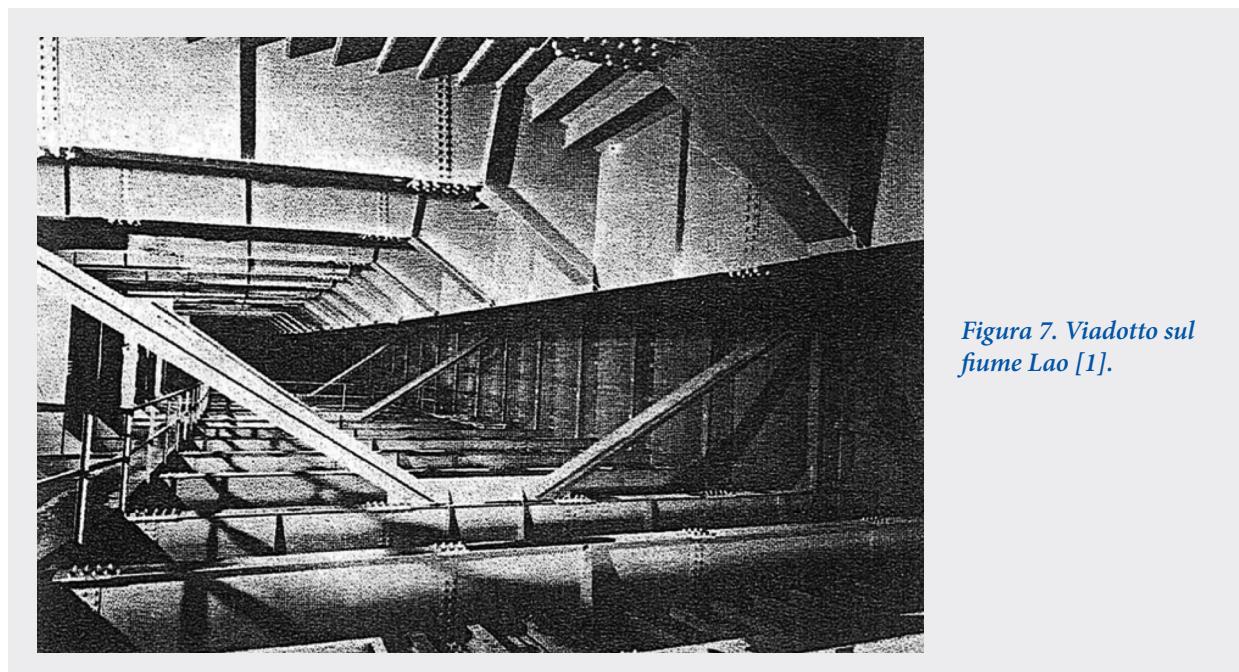


Figura 7. Viadotto sul fiume Lao [1].

Infine, anche le pareti laterali ed il fondo dei ponti a cassone metallico possono prevedere l'inserimento di costole di irrigidimento, generalmente di forma aperta.

3. Attività di sorveglianza

Molti ponti in servizio mostrano ormai prestazioni insufficienti, in termini di sicurezza strutturale e di funzionalità, a causa di problematiche legate alla durabilità. Al fine di garantire il mantenimento in efficienza del patrimonio delle opere della rete viaria, un ruolo di fondamentale importanza è rivestito dall'attività di sorveglianza o ispezione, dalla quale dipende l'efficacia dei programmi di manutenzione. Le procedure di ispezione dei ponti con impalcato misto acciaio-calcestruzzo sono principalmente basate su metodi visivi. La maggior parte dei difetti possono essere infatti rilevati visivamente. Al fine di visualizzare correttamente il quadro fessurativo, è spesso richiesto un intervento di rimozione dello strato di vernice. Tali operazioni devono essere condotte con particolare attenzione per evitare ricopimenti delle fessure stesse. La frequenza delle ispezioni visive deve essere commisurata alle caratteristiche ed all'importanza dell'opera. Le stesse devono essere effettuate rigorosamente, ad intervalli temporali regolari e devono interessare tutti gli elementi dell'opera stessa. La finalità è quella di individuare le cause dei fenomeni di degrado in atto, per poter correttamente definire gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, necessari per eliminare il degrado stesso. Tutte queste attività devono inoltre garantire la sicurezza d'uso dell'opera, la sicurezza del trasporto, l'economicità d'uso della struttura e la fruibilità complessiva delle reti di trasporto, considerata la continua variazione della domanda di traffico.

Gli interventi devono essere attuati con un approccio metodologico, senza limitare le possibilità di traffico e di sicurezza, per prolungare la vita in servizio del ponte.

L'attività di sorveglianza permette di ottenere informazioni riguardanti lo stato di ammaloramento degli elementi strutturali del ponte, al fine di valutare la necessità di eseguire di interventi di ripristino, con identificazione dell'urgenza e dei costi e tempi associati.

Il sistema strutturale portante del ponte - anche se eseguito correttamente nel rispetto di tutte le prescrizioni normative e progettuali - subisce infatti fenomeni di deterioramento nel corso della sua vita di servizio. Tra i fattori che contribuiscono al deterioramento dei materiali e degli elementi strutturali possono essere annoverati fattori legati all'utilizzazione stessa, quali l'intensità della circolazione, i carichi eccessivi, gli urti occasionali oppure fattori connessi alle azioni ambientali, quali l'ambiente aggressivo, i fattori climatici, e soprattutto l'inadeguato sistema di smaltimento delle acque meteoriche.

È importante sottolineare che il ritardato risanamento dei materiali è causa di danni crescenti nel tempo, con conseguenti incrementi dei costi degli interventi.

L'attività di sorveglianza delle opere costituisce quindi un punto di primaria importanza dell'intero processo di gestione della manutenzione di un ponte, costituito dalle successive fasi di valutazione delle condizioni attuali e future degli elementi strutturali e di definizione degli interventi di ripristino.

4. Problematiche specifiche: esempi di danneggiamento

Nella presente sezione sono riassunte le principali modalità di danneggiamento di ponti con impalcati a sezione composta acciaio-calcestruzzo. Per quanto riguarda gli aspetti inerenti le problematiche specifiche delle parti realizzate in calcestruzzo, si rimanda al Quaderno Tecnico n. 6 *"Interventi di ripristino corticale dei calcestruzzi ammalorati"*.

Con riferimento alle parti realizzate in acciaio, le principali modalità di danneggiamento consistono in:

- difetti delle saldature;
- rottura delle saldature;
- sfogliamento della vernice;
- difetti delle chiodature;
- presenza di bulloni allentati;
- tranciamento dei bulloni;
- deformazioni delle anime e delle piattabande delle travi;
- deformazioni delle pareti di travi scatolari;
- presenza di ristagni di acqua;
- lesioni dei nodi;
- fenomeni di corrosione;
- fenomeni di ossidazione.

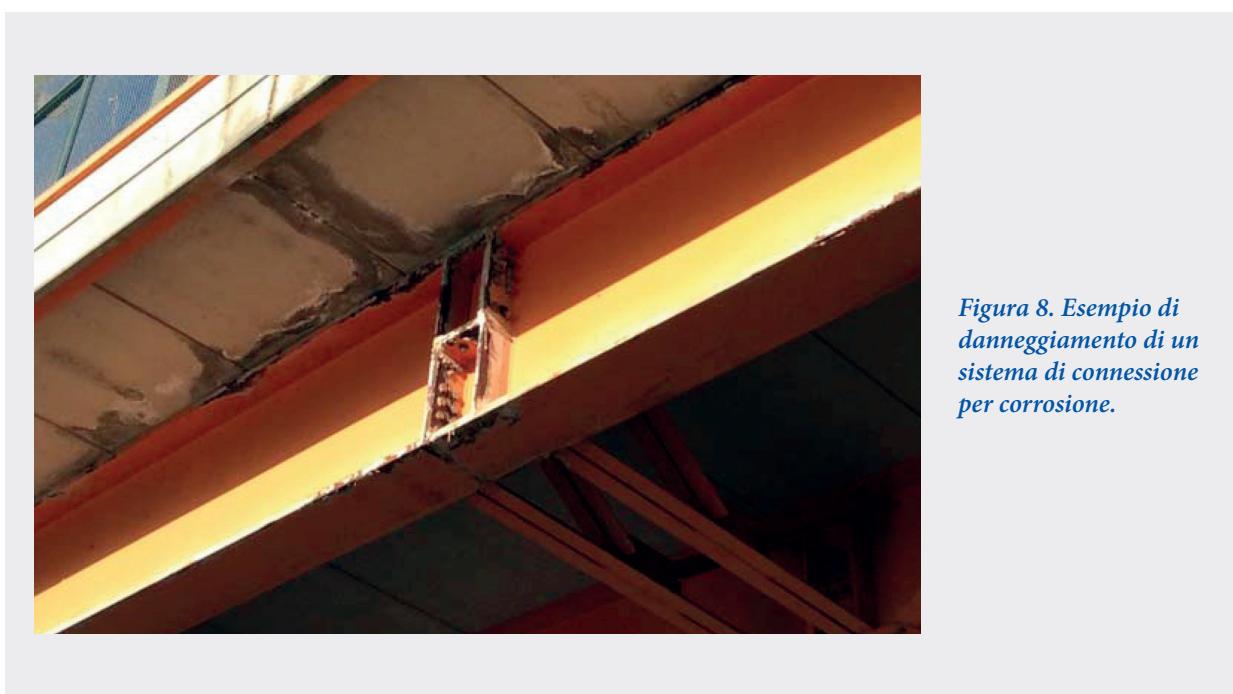


Figura 8. Esempio di danneggiamento di un sistema di connessione per corrosione.

Figura 9. Esempio di danneggiamento per corrosione dell'ala inferiore della trave metallica principale.



Un aspetto di fondamentale importanza per le costruzioni in acciaio è rappresentato dalla durabilità. Quest'ultima è influenzata principalmente dai fenomeni di corrosione, che inducono una progressiva perdita di materiale, con una conseguente riduzione dell'area resistente e delle prestazioni strutturali, sia in termini di resistenza sia in termini di rigidezza e duttilità. La figura seguente mostra un esempio di danneggiamento delle parti metalliche di un ponte a sezione composta acciaio-calcestruzzo. In particolare, si possono osservare gli effetti dovuti all'innesto di fenomeni di corrosione, sia sulle travi principali sia sulle travi trasversali.

Figura 10. Esempio di danneggiamento per corrosione delle travi principali e trasversali.



I sistemi di connessione di impalcati in acciaio sono particolarmente sensibili nei confronti della corrosione a causa dell'esposizione ad umidità e agenti chimici. La polvere ed i detriti che si depositano sulle connessioni tendono a trattenere umidità, causando un ulteriore deterioramento. Simili condizioni di degrado si verificano in corrispondenza delle ali superiori delle travi principali. Particolare attenzione deve essere posta nei confronti della corrosione e della ruggine che possono interessare le giunzioni tra i piatti d'anima e delle ali.

I sistemi di connessione devono essere verificati nei confronti del serraggio: perdite di serraggio possono infatti verificarsi a causa dei carichi, urti o vibrazioni. Possono verificarsi inoltre perdite o allentamenti di rivetti o bulloni.

Le travi ed i trasversi possono essere interessati da fessure in corrispondenza dell'anima, delle connessioni o nelle zone di appoggio. I carichi ciclici dovuti al transito veicolare possono indurre fenomeni di fessurazione per fatica.

Un esempio di impalcato in buone condizioni, privo di segni di danneggiamento o deterioramento, è mostrato in Figura 11.

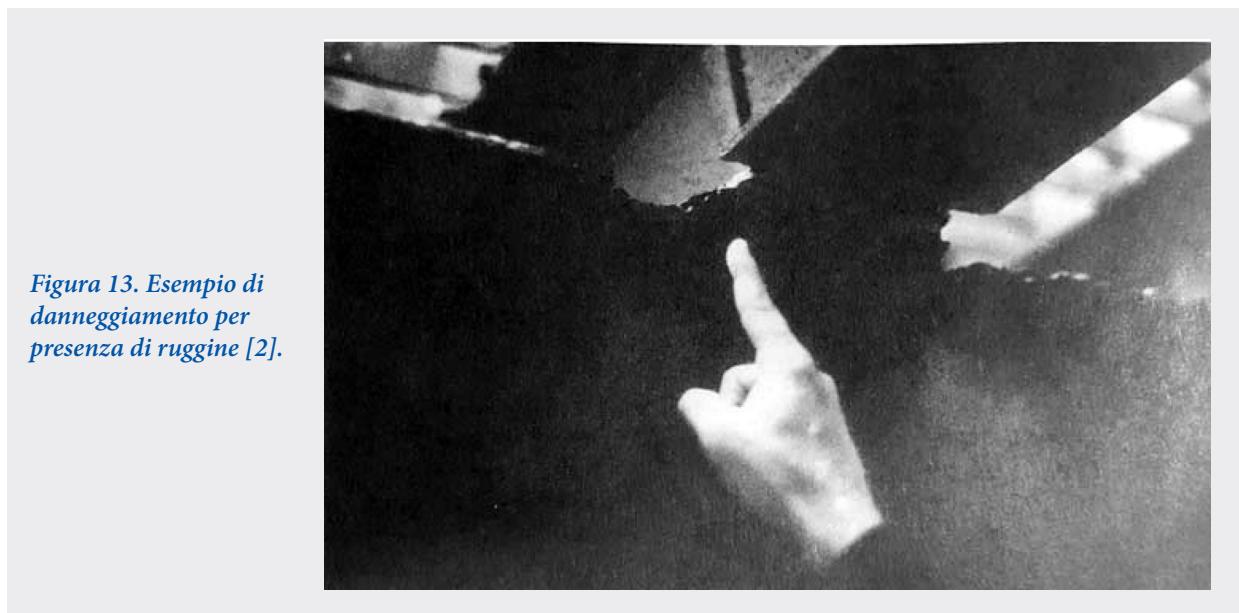


Figura 11. Esempio di impalcato in buone condizioni [2].

L'impalcato mostrato in Figura 12 è invece caratterizzato dalla presenza di uno strato di vernice non efficace e di ruggine, con conseguente riduzione di sezione resistente e di capacità portante della struttura.



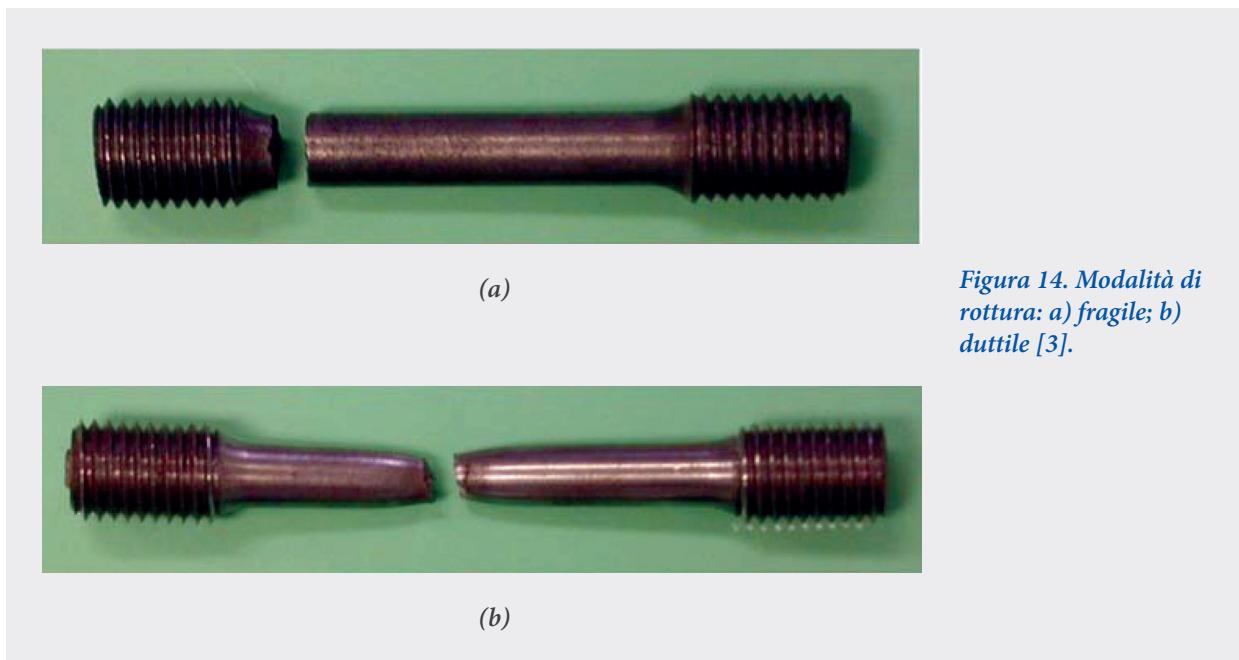
In Figura 13 è invece riportato un impalcato in condizioni critiche, caratterizzato da uno stato avanzato di deterioramento, tale da necessitare di un intervento urgente di ripristino e rinforzo.



Il processo di crisi per fatica di un elemento strutturale può essere schematizzato nelle tre fasi di innesco della fessura, propagazione della fessura e rottura. Generalmente l'innesto della fessura avviene nei punti in cui vi è una concentrazione degli sforzi a causa di difetti, dettagli di connessione o distorsioni. Succes-

sivamente all'innesto della fessura, i carichi ciclici applicati sulla struttura sono responsabili della sua propagazione, fino al raggiungimento di una dimensione critica, in cui avviene la separazione dell'elemento in due parti. Tale rottura può causare collassi di tipo parziale o totale del ponte. La vita totale per fatica è pari pertanto alla somma del tempo necessario per l'innesto della fessura e del tempo necessario per la sua propagazione.

Comunemente le fessure sono classificate in due modalità di collasso, di tipo fragile o duttile. La prima modalità di rottura è caratterizzata dall'assenza di avvertimenti e di deformazioni plastiche. La rottura duttile è invece caratterizzata da deformazioni plastiche locali, con segnali visibili del collasso incipiente. Esempi delle due modalità di rottura sono mostrati in Figura 14. Il passaggio tra le due modalità di crisi è significativamente influenzato dalla temperatura, dalla tipologia del carico e dal grado di vincolo.



I fattori principali che influenzano l'innesto della fessura per fatica consistono nella presenza di difetti e di concentrazioni di sforzi, queste ultime strettamente legate alla natura dei particolari costruttivi. La cura dei dettagli costruttivi, in particolare nei riguardi di elementi strutturali connessi mediante saldatura, può ridurre i fenomeni di concentrazione degli sforzi. I processi di saldatura infatti inducono la presenza di elevate tensioni residue. Contemporaneamente, concentrazioni di sforzi per effetto dei carichi avvengono spesso in corrispondenza delle connessioni del ponte, dove le tensioni residue sono elevate. Tale combinazione risulta estremamente favorevole all'innesto della fessura per fatica.

Le strutture del ponte possono inoltre essere caratterizzate dalla presenza di difetti di dimensioni variabi-

li, indotti dalla qualità delle saldature, dai metodi di fabbricazione e dalle tecniche di realizzazione. I difetti del materiale possono essere esterni oppure interni, quali ad esempio inclusioni non metalliche o cavità per ritiro. Tipici difetti non visibili delle saldature sono legati a incompleta penetrazione, mancanza di fusione, inclusioni di scorie (Figura 15a) e porosità (Figura 15b). A seconda dei casi possono o meno indurre ad una riduzione della capacità portante dell'elemento strutturale.

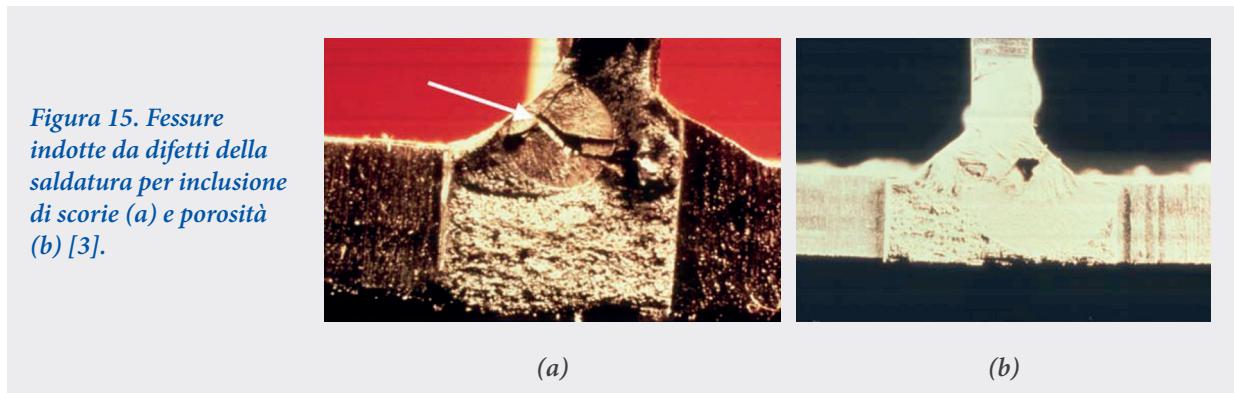


Figura 15. Fessure indotte da difetti della saldatura per inclusione di scorie (a) e porosità (b) [3].

Un punto favorevole per l'innesto della fessura è rappresentato dalle saldature effettuate per il riempimento dei fori posizionati erroneamente. Le saldature realizzate in tali punti sono infatti molto spesso caratterizzate dai difetti precedentemente descritti (Figura 16).



Figura 16. Fessura indotta da difetti di un foro riempito con saldatura [3].

Tipici difetti visibili delle saldature sono connessi ad una convessità eccessiva del cordone di saldatura, tale da formare una calotta convessa - rappresentando un punto di innesco per fenomeni di rottura fragile - oppure a un sottosquadro della saldatura - creando una zona con resistenza meccanica più bassa di quella adiacente. Difetti negli elementi metallici possono essere provocati inoltre da fasi di trasporto e messa in opera non eseguite a regola d'arte. Durante le fasi di movimentazione e sollevamento possono infatti verificarsi tagli ed intaccature, per effetto delle intense pressioni al contatto con i dispositivi di aggancio, oppure segni dovuti alle catene.

Infine, esempi di difetti riscontrabili durante la fase di servizio del ponte possono essere costituiti da danneggiamenti a causa di urti o collisioni oppure ad innesco di fenomeni di degrado per corrosione, dovuti a scarsi dettagli realizzativi, scarsa manutenzione e verniciatura.

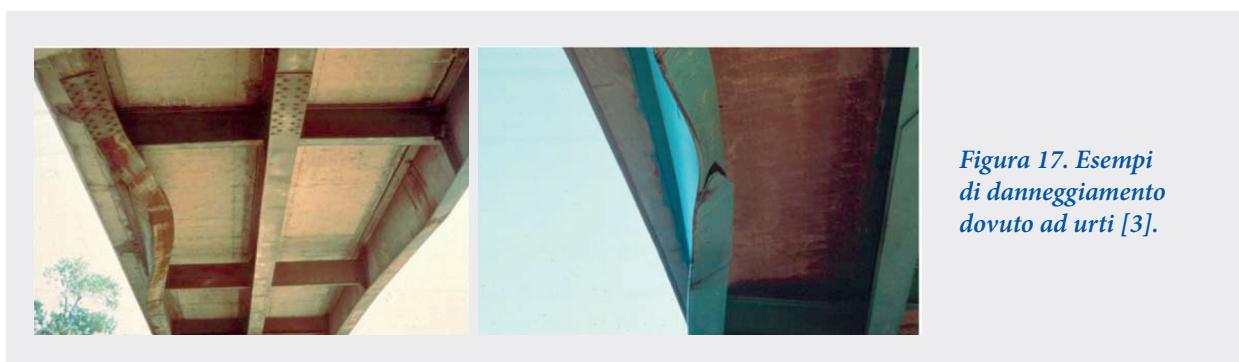


Figura 17. Esempi di danneggiamento dovuto ad urti [3].

I fattori principali che influenzano la propagazione delle fessure per fatica consistono nell'escursione dello stato tensionale, definito come differenza tra i valori massimo e minimo della tensione nell'elemento considerato, e nel numero di cicli di carico.

Un punto delicato per l'innesto delle fessure nelle ali di sezioni a doppio T è rappresentato dalla parte terminale dei piatti connessi tramite saldatura (Figura 18). Come si può osservare in Figura 19, una o più fessure, indotte dalla presenza di difetti, possono comportare la separazione dell'elemento in due parti.

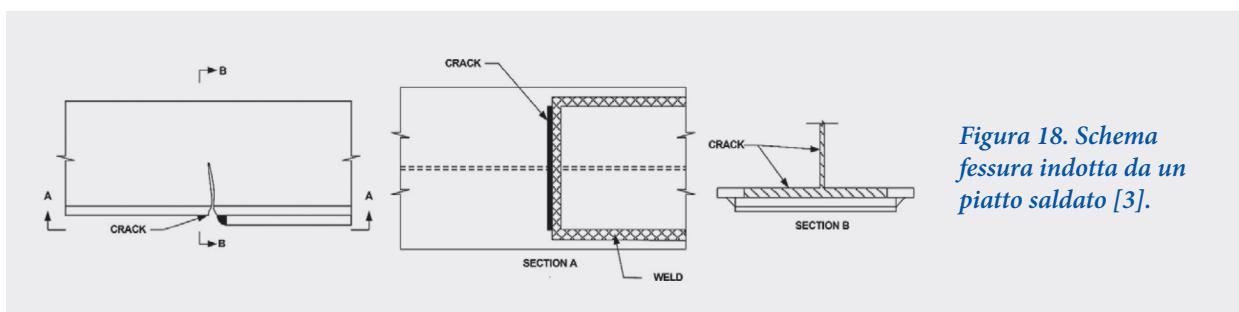
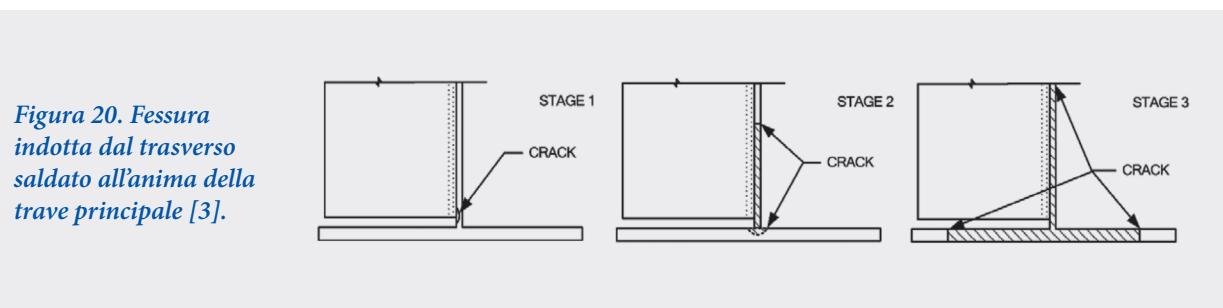


Figura 18. Schema di una fessura indotta da un piatto saldato [3].



Un punto sensibile per l'innesto delle fessure nell'anima di sezioni a doppio T consiste nella parte inferiore della saldatura di connessione tra il trasverso e l'ala della trave principale.



Situazioni frequenti di degrado possono interessare zone sensibili delle strutture dell'impalcato misto acciaio-calcestruzzo, quali ad esempio le aree in prossimità dei vincoli e le zone significative per sforzi di taglio o flessione.

È opportuno controllare quindi lo stato di danneggiamento delle zone di estremità delle travi nei confronti della corrosione. Esempi tipici di degrado delle zone di vincolo sono rappresentati da presenza di detriti, perdita di idoneo allineamento o presenza di movimenti anomali.

In prossimità delle zone di appoggio dei ponti appoggiati a più campate è importante controllare lo stato di conservazione dell'anima delle travi principali, nei confronti di perdita di sezione resistente o innesto di fenomeni di buckling, a causa della presenza, in tali parti della struttura, di elevati sforzi di taglio (Figura 21). In caso siano presenti trasversi collegati alle travi principali mediante saldatura, devono essere controllate le saldature tra l'anima delle travi principali e i piatti di collegamento.



Figura 21. Degrado per corrosione nelle zone in prossimità degli appoggi [3].



Figura 22. Degrado zona di estremità di un trasverso [3].



Figura 23. Degrado per corrosione dell'anima della trave di un impalcato a travi estradossate [3].

Nelle zone caratterizzate da elevati sforzi di flessione - l'intera lunghezza della campata per ponti a più campate semplicemente appoggiate o anche le zone in corrispondenza degli appoggi intermedi nel caso di impalcati continui - è importante controllare lo stato di danneggiamento delle ali con riferimento a fenomeni di innesco di corrosione, perdita di sezione, presenza di fessure. Le ali soggette a sforzi di compressione devono essere controllate nei riguardi di attivazione di meccanismi di buckling.

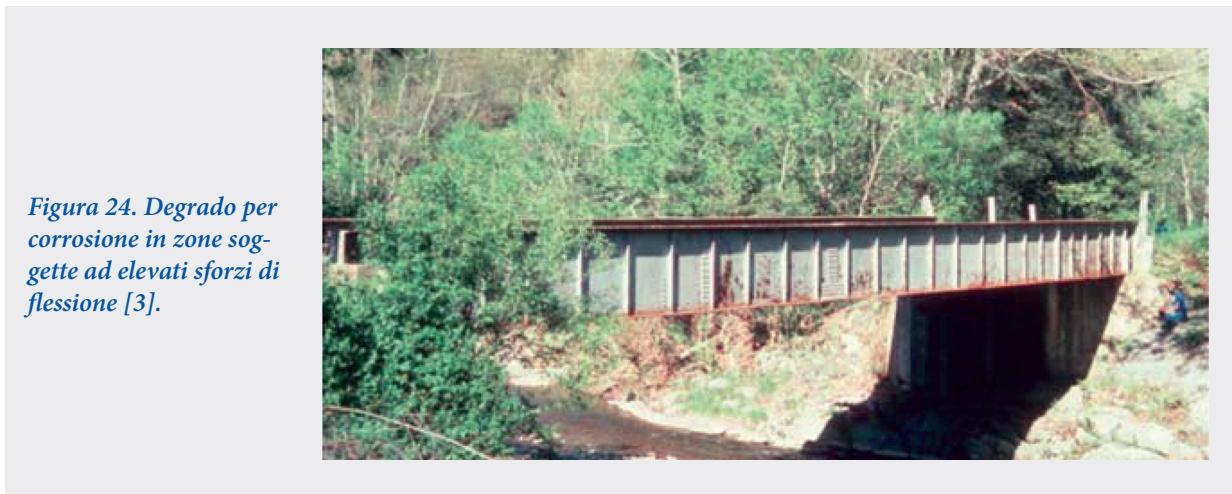


Figura 24. Degrado per corrosione in zone soggette ad elevati sforzi di flessione [3].

Un ulteriore difetto di impalcati misti acciaio-calcestruzzo è rappresentato dalla presenza di distorsioni degli elementi secondari, indice di eccessive sollecitazioni negli elementi principali o di presenza di cedimenti differenziali.

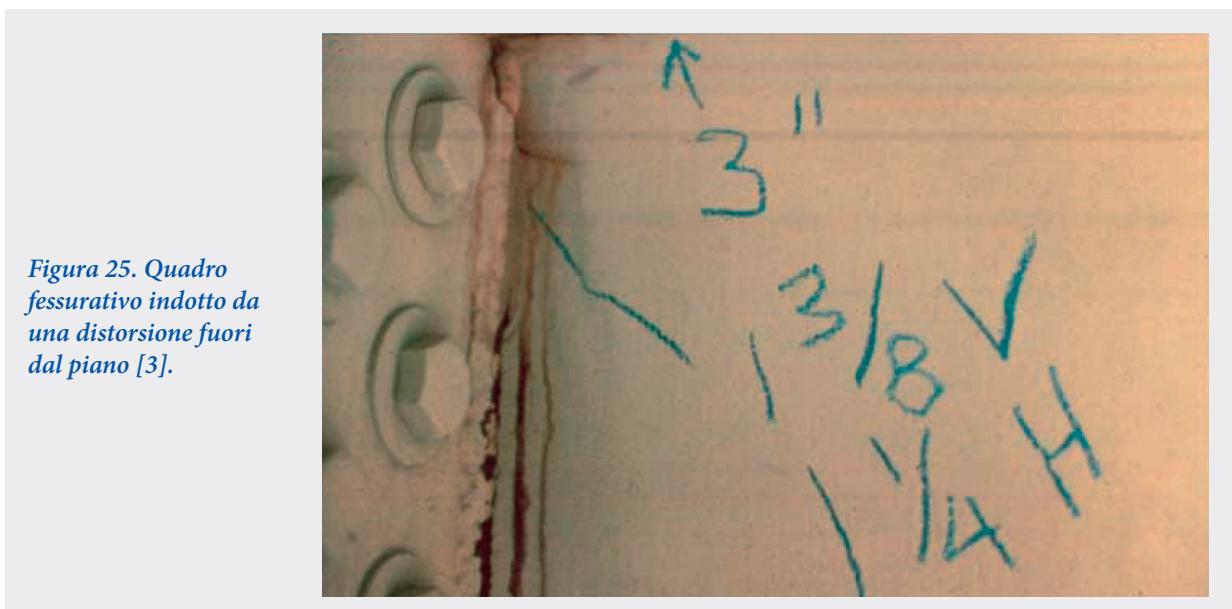


Figura 25. Quadro fessurativo indotto da una distorsione fuori dal piano [3].

Si sottolinea inoltre l'importanza di verificare le zone dell'impalcato misto in acciaio-calcestruzzo che tendono ad essere interessate da presenza di detriti e umidità poiché aumenta la probabilità di innesco di fenomeni corrosivi e di danneggiamento per perdita di sezione. Con riferimento agli impalcati misti acciaio-calcestruzzo con schema a cassone, deve essere verificato lo stato di conservazione dei sistemi di drenaggio poiché deve essere opportunamente escluso l'ingresso di acqua all'interno della sezione a cassone. Eventuali fori per il drenaggio delle infiltrazioni di acqua devono essere controllati nei riguardi di fenomeni di corrosione o di intasamento.

5. Esempi di interventi di ripristino

Successivamente alle fasi di sorveglianza delle opere e di valutazione delle condizioni attuali e future degli elementi strutturali indagati, si procede alla definizione di un idoneo intervento di ripristino.

Nei seguenti paragrafi saranno esaminate una serie di tecniche di intervento, con riferimento ad alcune tipiche tipologie di danneggiamento.

5.1. Danneggiamento dell'impalcato a seguito di urti

In aree esposte al traffico - nel caso di ponti che attraversano strade, autostrade, ferrovie o canali navigabili - possono verificarsi urti o collisioni ad esempio con mezzi fuori sagoma o bracci meccanici. Il verificarsi di tali eventi può indurre la formazione di fessure, riduzioni di sezione resistente o distorsioni, con conseguente perdita della capacità portante dell'impalcato metallico. Esempi di danneggiamento per urto in impalcati a sezione mista acciaio-calcestruzzo con schema bitrave e multitrave sono mostrati in Figura 26.



Figura 26. Esempio di danneggiamento per urto di un impalcato con schema bitrave e multitrave [3].

I principali effetti sulle strutture di impalcato consistono in deformazioni delle anime e delle ali delle travi, nel tranciamento dei bulloni e nella dissaldatura delle parti strutturali.

A seconda della tipologia di danneggiamento, l'intervento di ripristino può essere di tipo locale o può pre-

vedere la sostituzione dell'intera struttura dell'impalcato. In quest'ultimo caso, l'intervento di ripristino è generalmente costituito dalle seguenti fasi realizzative:

- demolizione della soletta dell'impalcato incidentato;
- rimozione dell'impalcato in acciaio;
- risanamento dei baggioli e posa dei nuovi dispositivi di appoggio;
- posa del nuovo impalcato;
- posa delle predalles, dell'armatura e getto della nuova soletta.

5.2. Intervento di protezione dell'impalcato mediante verniciatura

Come descritto nel Paragrafo 4, uno degli aspetti fondamentali delle strutture in acciaio è rappresentato dal problema della durabilità. Quest'ultima è legata essenzialmente ai fenomeni di corrosione o di ossidazione, che inducono una progressiva perdita di materiale, con conseguente riduzione dell'area resistente e delle prestazioni strutturali, sia in termini di resistenza sia in termini di rigidezza e duttilità. La conseguenza visibile di tale stato di degrado è rappresentata dal distacco dello stato protettivo di vernice.

Le cause di tali fenomeni risiedono molto spesso nella esecuzione non a regola d'arte della verniciatura di primo impianto o in malfunzionamenti dei sistemi di drenaggio, raccolta e smaltimento delle acque.

Figura 27. Esempio di danneggiamento per corrosione [3].



L'intervento di ripristino dell'impalcato mediante protezione con verniciatura è generalmente costituito dalle seguenti fasi realizzative:

- trattamento delle strutture dell'impalcato mediante sabbiatura;
- realizzazione di un ciclo di verniciatura delle strutture in acciaio.



Figura 28. Dettaglio verniciatura elemento metallico [3].

5.3. Ripristino della funzionalità statica del collegamento

Il verificarsi di fenomeni di natura chimica per attacco dei cloruri o di natura fisica per cicli di gelo e disgelo può indurre un quadro di danneggiamento della zona dell'impalcato misto acciaio-calcestruzzo in corrispondenza delle zone di vincolo, con conseguente perdita della funzionalità statica del collegamento.

Tipicamente si osserva una riduzione della sezione resistente dell'anima della trave portata, dei fazzoletti e delle piastre di collegamento, per effetto della corrosione. Generalmente, tale quadro di danneggiamento è accompagnato dall'innesto di fenomeni di corrosione nei perni di collegamento e nei bulloni (Figura 29).



Figura 29. Dettaglio degrado per corrosione di un perno di collegamento [3].

È opportuno sottolineare che la probabilità che si verifichino fenomeni di danno per corrosione delle zone in corrispondenza dei vincoli aumenta in caso di malfunzionamenti dei sistemi di drenaggio, raccolta e smaltimento delle acque, con conseguente percolazione delle acque di piattaforma.

L'intervento di ripristino della funzionalità statica del collegamento è generalmente costituito dalle seguenti fasi realizzative:

- posizionamento delle strutture di sostegno provvisorie;
- rimozione della porzione degradata dell'anima della trave portata e ripristino mediante saldatura;
- posa di eventuali piatti in sovrappiastre sia sulla trave portata sia sulla trave portante mediante saldatura;
- posa delle nuove piastre di collegamento mediante saldatura;
- inserimento del nuovo perno di collegamento.

5.4. Difetti locali per corrosione o fatica

Difetti di tipo locale possono presentarsi negli elementi strutturali di impalcati misti acciaio-calcestruzzo per effetto di corrosione o fatica.

Nel primo caso, il difetto per corrosione o delaminazione dell'elemento strutturale compare nelle zone in cui si è persa la verniciatura protettiva, a causa di ristagni di umidità, attacchi chimici o fisici, presenza di cricche, contatto con metalli differenti - ad esempio uso di bulloni zincati con acciaio corten -, correnti elettriche vaganti.

Nel secondo caso, il difetto per fatica è generalmente rappresentato da cricche in corrispondenza degli irrigidimenti longitudinali, delle saldature delle piastre di collegamento o delle squadrette di collegamento oppure da fessure in corrispondenza delle chiodature. Le cause possono essere tipicamente individuate in una progettazione non idonea nei confronti dei carichi ciclici. Tali effetti possono essere particolarmente evidenti in impalcati a lastra ortotropa, caratterizzati dall'applicazione dei carichi dovuti al traffico veicolare direttamente sulla lastra superiore. In questo caso, le fessure possono interessare la lastra superiore, gli irrigidimenti longitudinali e i collegamenti mediante saldatura.

Gli interventi di ripristino dei difetti di tipo locale sono generalmente costituiti dalle seguenti fasi realizzative:

- valutazione dello spessore residuo degli elementi strutturali interessati dal difetto di tipo locale per corrosione o fatica;
- chiusura di eventuali cricche in corrispondenza degli irrigidimenti longitudinali, delle saldature delle piastre di collegamento o delle squadrette di collegamento;
- sostituzione dei chiodi e dei bulloni danneggiati;
- posa di nuovi piatti di rinforzo degli elementi danneggiati dai fenomeni di corrosione o fatica;
- posa di eventuali nuovi profili metallici.

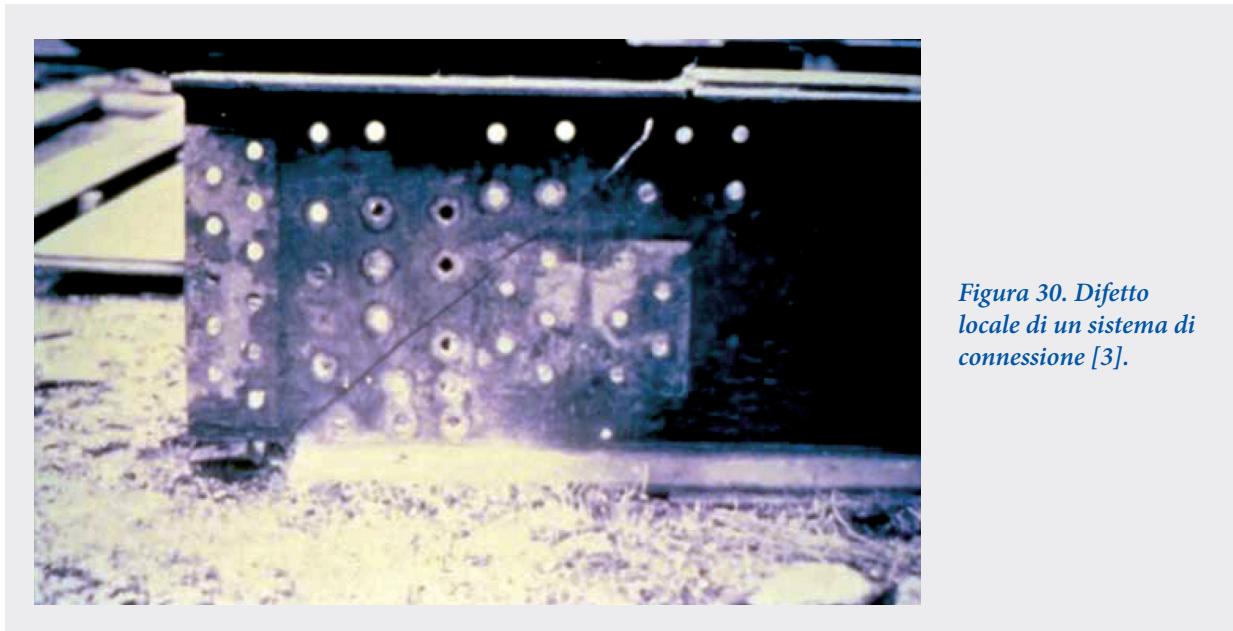


Figura 30. Difetto locale di un sistema di connessione [3].

5.5. Intervento di ripristino della piastra ortotropa

In caso di danneggiamento della piastra ortotropa, a seconda della tipologia di degrado, l'intervento di ripristino può essere di tipo locale o può prevedere la sostituzione dell'intera struttura della piastra. Nel caso di rinforzo locale sono tipicamente impiegate due tecniche di intervento. La prima consiste nel rinforzo dell'impalcato mediante una soletta in calcestruzzo armato ad elevata resistenza. La seconda prevede invece l'utilizzo di piastre metalliche aggiuntive.

Nel primo caso, l'intervento di ripristino della piastra ortotropa è generalmente costituito dalle seguenti fasi realizzative:

- rimozione dello strato di ricoprimento;
- ispezione visiva e/o con tecniche diagnostiche ad ultrasuoni della piastra ortotropa;
- irruvidimento della superficie;
- applicazione di resina bi-componente;
- posa dell'armatura;
- getto di calcestruzzo fibrorinforzato ad elevate prestazioni.

Nel secondo caso invece l'intervento di ripristino consiste in:

- rimozione dello strato di ricoprimento;
- ispezione visiva e/o con tecniche diagnostiche ad ultrasuoni della piastra ortotropa;
- irruvidimento della superficie;
- posa di piastre aggiuntive previa applicazione di resina epossidica oppure fissaggio tramite chiodatura o bullonatura.

Bibliografia

- [1] Petrangeli M.P., Progettazione e costruzione di ponti, IV Edizione, Casa Editrice Ambrosiana.
- [2] White K.R., Minor J. and Derucher K.N., Bridge Maintenance, Inspection and Evaluation, Second Edition, Revised and Expanded, Marcel Dekker Inc., New York, 1992
- [3] Bridge Inspector's Reference Manual, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA NHI 12-049, December 2012

"Il quarto volume dei quaderni tecnici di Anas conferma che la ricerca dell'eccellenza nel recupero delle infrastrutture stradali caratterizza stabilmente l'azione della Società, sempre più all'avanguardia nella gestione della propria rete. La standardizzazione delle procedure e delle soluzioni tecniche è un elemento chiave per il presidio delle nostre infrastrutture e il punto di partenza per il miglioramento continuo in efficienza ed efficacia dei nostri operatori."

Gianni Vittorio Armani
Amministratore Delegato Anas S.p.A.

Anas S.p.A. (Gruppo FS Italiane)
Direzione Generale
Via Monzambano, 10 - 00185 Roma
Tel. 800841148
servizioclienti@stradeanas.it