

RISTRUTTURAZIONE E RINFORZO STATICO DELLE GALLERIE

Il rinforzo di rivestimento sistematico mediante Steel Net

PROCEDURE DI RIPARAZIONE DI GALLERIE, ANCHE MEDIANTE APPLICAZIONE DI ALCUNI NUOVI PRODOTTI COME LA MALTA REOPLASTICA TIXOTROPICA BICOMPONENTE E IL TESSUTO IN ACCIAIO ZINCATO AD ALTISSIMA RESISTENZA UHTSS, DA UTILIZZARE PER I RINFORZI STRUTTURALI

L'uso sempre crescente di spazio sotterraneo per la costruzione di infrastrutture di trasporto aumenta la rete di gallerie da mantenere nel tempo, mediante interventi di manutenzione e rinforzo, a volte di natura strutturale. Allo stesso tempo, lo sviluppo e la ricerca di nuovi materiali hanno portato, negli ultimi decenni, a un uso diffuso nel mondo dell'edilizia civile di materiali compositi, rinforzati con fibre, o ad alte prestazioni, che possono essere utilmente impiegati per la riparazione di gallerie.

L'articolo presenta alcune procedure tipiche di riparazione di gallerie, anche mediante applicazione di alcuni nuovi prodotti, come la malta reoplastica tixotropica bicomponente e il tessuto in acciaio zincato ad altissima resistenza UHTSS, da utilizzare per i rinforzi strutturali. Sono illustrati l'approccio progettuale e alcuni schemi tipici, insieme a un case history applicato dagli Autori per il ripristino di gallerie facenti parte del tratto Bologna-Firenze dell'Autostrada A1.

LA MANUTENZIONE DELLE INFRASTRUTTURE

La manutenzione delle infrastrutture esistenti è una delle questioni più importanti per il mercato delle costruzioni. Per le infrastrutture, nonché per gli edifici, infatti, la ristrutturazione e il restauro sono oggi attività prioritarie, al fine di mantenere il valore delle opere esistenti e garantire condizioni di sicurezza per gli utenti. Le gallerie sono tra le opere più difficili

da gestire, considerando che sono a diretto contatto con il suolo e le acque sotterranee e le classi di esposizione potrebbero essere molto severe. Inoltre, possono essere soggette a movimenti del suolo che si manifestano nel tempo o a eventi sismici (per le gallerie poco profonde), così che possano sorgere condizioni di carico aggiuntive durante la loro vita, portando stati tensionali aggiuntivi per i rivestimenti in opera. Ciò è particolarmente vero per le infrastrutture costruite in Italia negli anni Sessanta/Settanta, durante il boom economico del dopoguerra, quando ebbe luogo una rapida espansione della rete di trasporto, a volte con tecnologie ancora da perfezionare.

Pertanto, è presumibile che nei prossimi anni occorrerà mettere in atto un sistema di monitoraggio e controllo delle strutture esistenti, come pure occorrerà mettere a punto tecnologie di rinforzo nell'ottica di un'ampia applicazione.

Il presente articolo presenta un approccio metodologico, da applicare per definire lo stato di conservazione delle strutture sotterranee, per valutare il livello degli eventuali danneggiamenti presenti e per scegliere le soluzioni adeguate per il ripristino. Il tutto, considerando che le attività di diagnosi e di manutenzione/rinforzo dovranno essere svolte, in molti casi, in gallerie in servizio, cercando quindi di ridurre il più possibile l'impatto sul normale esercizio. Saranno anche illustrati alcuni esempi applicativi.

L'APPROCCIO METODOLOGICO

Il nuovo approccio progettuale, secondo le più recenti Normative e Regolamenti, prevede la redazione di un "piano di manutenzione" per qualsiasi opera in fase di progettazione, nel quale identificare il tipo e la frequenza dei controlli che devono essere condotti per garantire la funzionalità e la durabilità delle strutture. Questo approccio non era attuato in passato e, per molti anni, non è stata condotta una verifica puntuale dello stato delle strutture. Per valutare le condizioni delle strutture esistenti, è quindi necessario eseguire ispezioni dettagliate e indagini, al fine di individuare le problematiche che devono essere approfondite e risolte. È possibile procedere con:

- l'esecuzione di un "rilievo generale" della struttura indagata, per la definizione dello stato di ammaloramento e l'eventuale evidenziazione di problemi locali;
- l'esecuzione di prove in situ e di laboratorio per definire le proprietà meccaniche e geometriche della struttura e lo stato di sollecitazione esistente;
- la preparazione di un modello interpretativo dei fenomeni rilevati, in grado di valutare le cause e dimensionare gli eventuali interventi di riparazione;
- la definizione delle tecnologie e delle fasi di lavoro più appropriate (individuando metodi e materiali di costruzione).

IL RILIEVO GENERALE

Il rilievo generale deve includere una mappatura dettagliata delle condizioni delle strutture. Con riferimento ai tunnel, la superficie interna (piedritti e calotta), i marciapiedi e i pozzetti devono essere mappati e riportati in dettaglio in schemi grafici. Nel caso di strutture in calcestruzzo, l'indagine dovrebbe includere:

- la presenza di superfici ammalorate;
- le situazioni di distacchi e spalling di calcestruzzo (in particolare per i copriferrì nel caso di strutture in calcestruzzo armato);
- i fenomeni di fessurazione, misurando la geometria, la profondità e la larghezza delle fessure, d) le aree con umidità e/o presenza d'acqua, che rivestono grande importanza per la durabilità del calcestruzzo. Si consideri infatti che, fino agli anni Ottanta, i tunnel non erano generalmente impermeabilizzati, quindi non è insolito trovare venute d'acqua concentrate o diffuse che possano avere causato danni locali alle strutture.

Nel caso di strutture in muratura, tipiche ad esempio delle vecchie gallerie ferroviarie, l'indagine deve anche considerare la condizione degli strati di allettamento con malta cementizia ed individuare l'eventuale presenza di mattoni rotti o in fase di distacco.

Il rilievo dovrà principalmente distinguere gli ammaloramenti superficiali dalle situazioni più critiche, che possono essere correlate a sofferenze statiche, principalmente legate alla presenza di quadri fessurativi, che dovranno essere esaminate più approfonditamente mediante prove in situ.

I METODI E LE PROVE DI INDAGINE

In caso di situazioni critiche locali, al fine di comprendere meglio le condizioni reali e le cause, vengono generalmente eseguite prove in situ e di laboratorio come descritto di seguito, insieme a un programma di monitoraggio predisposto al fine di valutare l'evoluzione dei fenomeni riscontrati.

Le indagini laserscanner e georadar

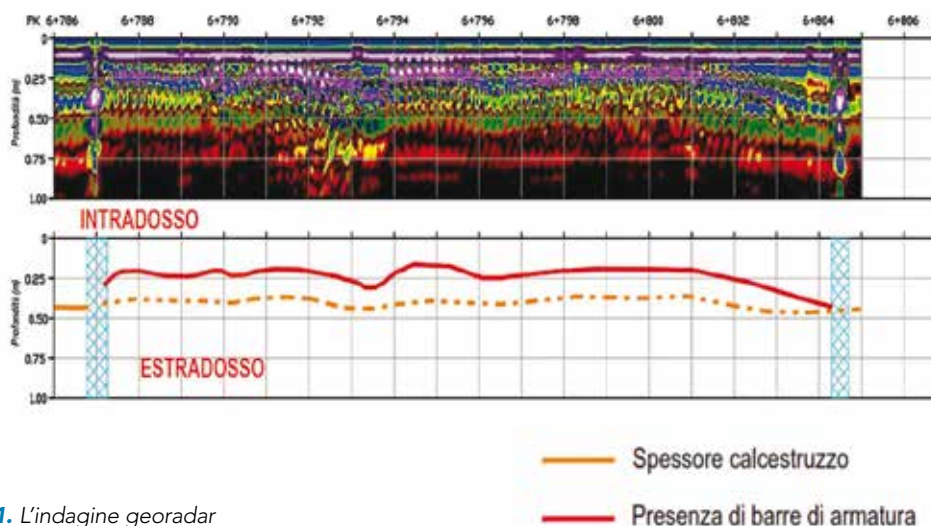
A volte può essere molto utile valutare lo spessore dei rivestimenti, al fine di verificare se ci sono stati problemi di getto, durante la costruzione, che possono avere generato spessori ridotti. La presenza di sottospessori è infatti una delle principali cause che portano alla formazione di fessurazioni nei rivestimenti. Questo controllo può essere facilmente eseguito mediante indagini georadar (GPR Ground Probing Radar).

Questa tecnica è anche in grado di valutare, se interpretata da Tecnici Specialistici, la compattezza del calcestruzzo, evidenziando l'eventuale presenza di vuoti, aree danneggiate o parti del rivestimento che si stanno staccando. Il georadar è inoltre in grado di evidenziare eventuali discontinuità all'interno dello spessore del calcestruzzo e di identificare l'interfaccia con il terreno/la roccia retrostante.

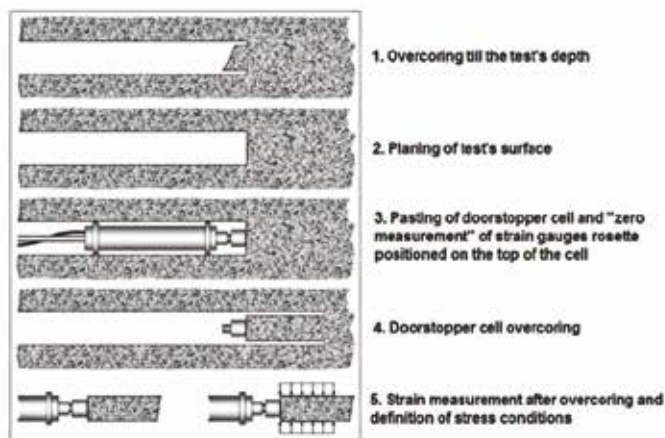
L'indagine mediante georadar prevede l'introduzione di un breve impulso elettromagnetico nel rivestimento attraverso l'uso di un'antenna, la cui frequenza può variare da 400 a 2.600 MHz (vengono utilizzati principalmente 750 MHz).

L'impulso si propaga nel materiale con una velocità che dipende principalmente dalla costante dielettrica del materiale stesso. Quando l'impulso incontra un'interfaccia con proprietà dielettriche diverse dal mezzo, si riflette parzialmente sulla superficie. La Figura 1 mostra un tipico output dell'indagine da cui è possibile definire lo spessore del rivestimento ed eventuali difetti.

Il laser scanner può invece essere molto utile per verificare il gabarit del tunnel; inoltre consente di effettuare un'indagine accurata dei settori in cui vi sono distacchi o deformazioni dei rivestimenti, specie se eseguito in tempi successivi; confrontando i rilievi eseguiti in due momenti diversi è infatti possibile valutare l'eventuale evoluzione dei fenomeni.



1. L'indagine georadar



2. La prova doorstopper

Le indagini tensionali: le prove doorstopper e di martinetto piatto

Al fine di valutare se i quadri fessurativi o gli eventuali splaccaggi sono correlati o meno a problemi di natura statica, è essenziale valutare lo stato tensionale all'interno dei rivestimenti: è necessario eseguire prove in situ, di martinetto piatto o "doorstopper".

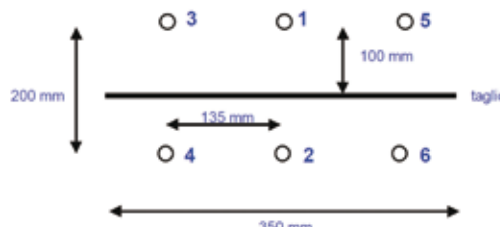
La prova "doorstopper" prevede la misurazione delle deformazioni che si verificano sul fondo di un carotaggio di calcestruzzo (di diametro pari a 76 mm), a seguito del rilascio delle sollecitazioni ottenute mediante sovracarotaggio al suo contorno. Questa misurazione viene eseguita mediante una cella, che incorpora 4 estensimetri a resistenza elettrica posti a 45° l'uno rispetto all'altro, che viene incollata sul fondo del carotaggio. Una volta effettuata la misura di zero degli estensimetri, le tensioni presenti nel calcestruzzo vengono rilasciate approfondendo il carotaggio con un semplice carotiere (di diametro interno $D = 61$ mm), recuperando il nucleo carotato insieme alla

cella di misura incollata ad esso. È così possibile misurare le deformazioni causate dal rilascio delle sollecitazioni nella cella e - una volta definito il modulo elastico del campione - definire la sollecitazione nel calcestruzzo. Una rappresentazione schematica delle varie fasi della prova è mostrata in Figura 2. Le prove vengono eseguite sia in intradosso che in estradosso del rivestimento, in modo da avere lo stato di sollecitazione su tutta la sua sezione trasversale.

Generalmente, vengono eseguite tre/quattro coppie di prove, in corrispondenza della calotta e delle reni, onde determinare le sollecitazioni (e conseguentemente il momento flettente e i carichi assiali) lungo lo sviluppo dei rivestimenti, come mostrato nelle Figure 3A e 3B.

In alternativa, è possibile utilizzare prove di martinetto piatto, che sono più semplici da eseguire, anche se consentono la valutazione delle sollecitazioni solo nell'intradosso e nel caso di sollecitazione da compressione.

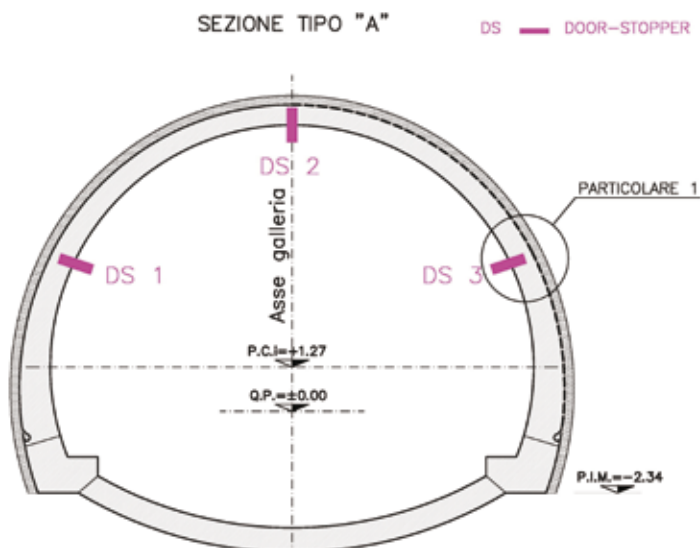
Con riferimento alla Figura 4, la prova prevede l'installazione di sei target posizionati lungo il futuro taglio; viene eseguita una lettura zero, seguita dall'esecuzione del taglio e dal posizionamento del martinetto piatto all'interno del taglio stesso. Viene quindi aumentata la pressione nel martinetto fino a quando la posizione delle basi non viene ripristinata nella condizione individuata dalla lettura di zero; questa pressione di ripristino, con alcuni fattori correttivi legati alla geometria dello strumento, rappresenta lo stato tensionale presente nel rivestimento.



4. Lo schema della prova di martinetto piatto

Per valutare le condizioni di sicurezza delle strutture esistenti è anche necessario valutare la resistenza dei materiali strutturali: in particolare occorre eseguire prove a compressione monoassiale, del tipo UCS, su campioni di calcestruzzo da prelevare in situ.

SEZIONE TIPO "A"



3A e 3B. La posizione delle prove doorstopper



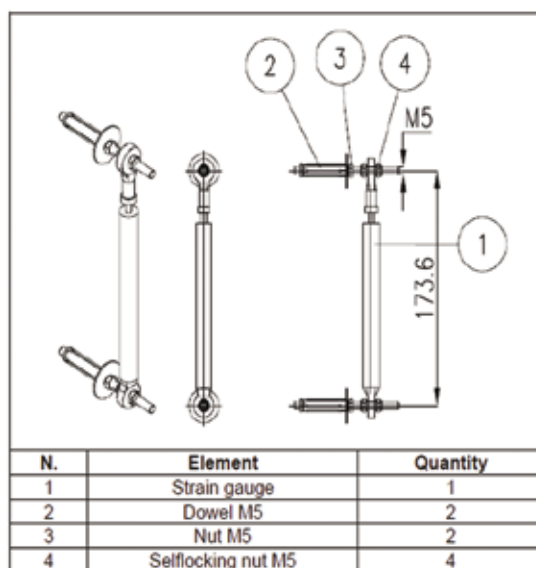
Il monitoraggio delle fessure

È molto importante capire se i fenomeni di fessurazione siano ancora in evoluzione o se siano stabilizzati. A tale scopo è necessario prevedere una campagna di monitoraggio con fessurimetri in grado di rilevare con precisione eventuali movimenti.

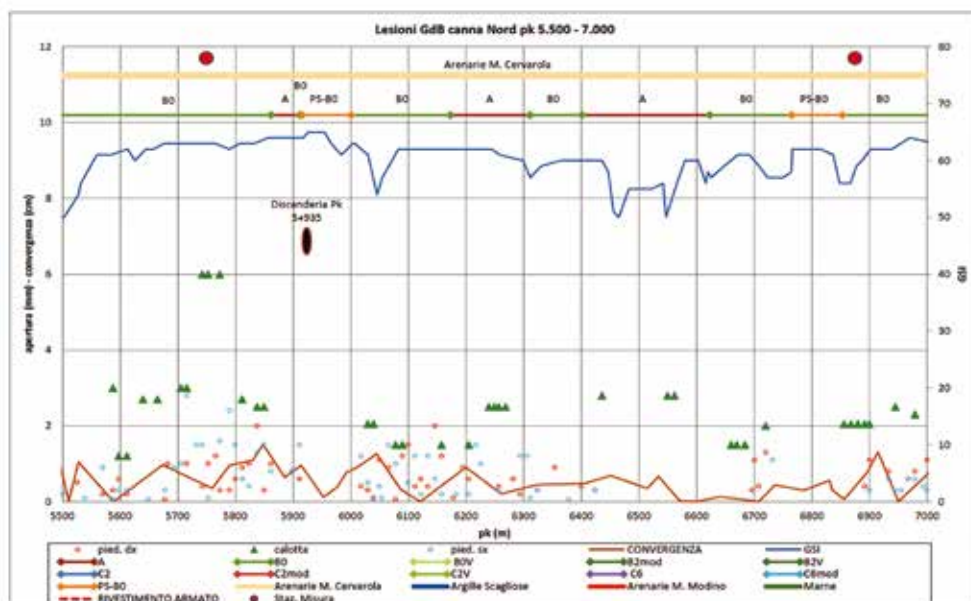
È preferibile utilizzare fessurimetri elettrici dotati di datalogger automatico (UAD) e termometro: ciò consente la lettura automatica dell'apertura della fessura monitorata, attraverso la variazione di resistenza di un circuito posto

sulla barra dell'estensimetro. Tali fessurimetri sono costituiti da due basi di misura installate su entrambi i lati della fessura da monitorare e da un corpo centrale dotato di un trasduttore elettrico, come mostrato in Figura 5.

Vengono anche posizionati alcuni fessurimetri meccanici, in cui la misurazione viene eseguita manualmente utilizzando una strumentazione analogica di precisione (comparatore millesimale - sensibilità 0,001 mm), per confronto con le letture automatiche. È molto importante registrare anche le variazioni di temperatura, in modo da valutare se il movimento delle fessure può essere ad esse correlato.



5. I fessurimetri elettrici



6. Una sintesi dei dati costruttivi

LA MODELLAZIONE DELLA PROBLEMATICAZIONE

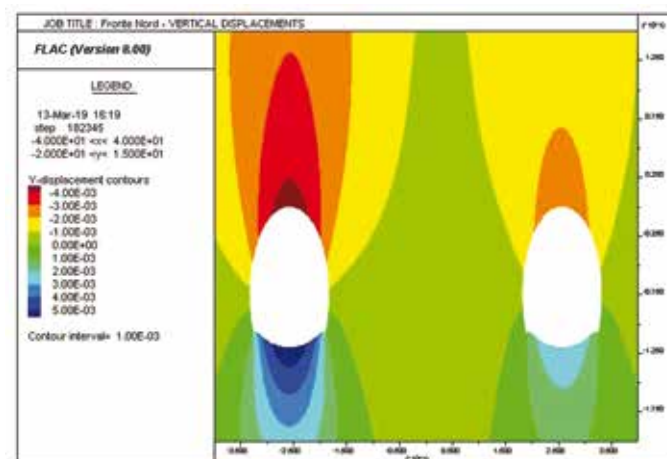
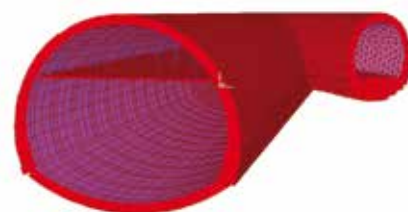
I dati raccolti consentono di esprimere valutazioni sulle cause del danno riscontrato. In molti casi non vi sono situazioni tensionali critiche e il monitoraggio effettuato mostra una stabilizzazione dei fenomeni di fessurazione. In questi casi gli ammaloramenti riscontrati sono quindi imputabili alla vecchiaia delle strutture, stante il prolungato tempo in esercizio, oppure a difetti di costruzione, come giunti irregolari, fessurazioni per ritiro o fenomeni termici durante le fasi di getto: in questi casi, è possibile procedere con ripristini di natura cosmetica, con la sigillatura delle fessure escludendo problematiche di natura statica.

Se invece le informazioni raccolte indicano la presenza di problematiche di natura statica, di interazione tra terreno-struttura o l'ammaloramento riscontrato è tale da determinare rischi per

la stabilità delle strutture, è necessario predisporre un "modello interpretativo" della situazione, per poter progettare in dettaglio l'intervento di ripristino e/o rinforzo strutturale. Per la ricostruzione di un modello interpretativo è necessario recuperare, per quanto possibile, i dati di costruzione dell'opera, quali le fasi esecutive, gli interventi adottati in fase di scavo, la tipologia dei pre-rivestimenti e dei rivestimenti definitivi adottati e, infine, i dati di monitoraggio registrati durante la costruzione e durante le prime fasi di esercizio.

La Figura 6 riporta un diagramma tipico con la sintesi dei dati di costruzione lungo il tracciato della galleria: le condizioni geologiche, l'eventuale presenza di faglie e/o zone fratturate, i parametri geomeccanici dell'ammasso roccioso (GSI, RMR, ecc.) e le deformazioni che si sono registrate durante le fasi di scavo (convergenze dei pre-rivestimenti ed eventuali movimenti dei rivestimenti definitivi a seguito della loro realizzazione).

Queste informazioni, insieme ai dati raccolti dalle indagini illustrate nel capitolo "I metodi e le prove di in-



7A e 7B. Esempi di modelli numerici FEM 2D-3D

dagine”, vengono impiegate per preparare un “modello numerico” che rappresenti, mediante un approccio di back-analysis, la presunta situazione attuale (Figure 7A e 7B).

Con un tale modello è possibile riprodurre le zone critiche dei rivestimenti e valutarne le sollecitazioni agenti - momento flettente, forza assiale e taglio - da utilizzare per dimensionare l'intervento di consolidamento/rinforzo.

Una considerazione particolare riguarda le azioni sismiche: le Normative più recenti richiedono la valutazione della sicurezza delle infrastrutture durante gli eventi sismici. Questo requisito si applica anche ai tunnel, in particolare quelli con scarsa copertura.

Molte gallerie esistenti non furono dimensionate per far fronte a eventi simili. È quindi spesso necessario valutare il loro comportamento sotto sisma e definire i necessari interventi di rinforzo. Anche per svolgere queste analisi è necessario eseguire le indagini sopra illustrate nei capitoli “Il rilievo generale” e “I metodi e le prove di indagine” e preparare un modello che includa tutte le informazioni disponibili.

Una volta valutate le azioni sismiche in base alle accelerazioni attese, alla vita utile delle strutture ed al periodo di ritorno dell'evento sismico, esse saranno applicate al modello in modo da valutare se sono compatibili o meno con le caratteristiche di resistenza delle strutture e, di conseguenza, definire gli interventi di rinforzo eventualmente necessari.

Possono essere utilmente impiegati metodi semplificati [1, 2 e 3].

I METODI COSTRUTTIVI E I MATERIALI

A seconda delle tipologie e delle natura degli ammaloramenti riscontrati, si possono applicare diversi interventi, dalla semplice sigillatura delle fessure al posizionamento di piastre in acciaio e materiali di rinforzo. Di seguito sono presentati alcuni degli interventi più comuni.

La sigillatura delle fessure (apertura 1,0-1,5 mm)

Se l'apertura delle fessure è inferiore a 1,0-1,5 mm e la posizione è trasversale all'asse dei tunnel (ciò significa giunti trasversali, quindi fessure che dividono il rivestimento in blocchi), è possibile procedere alla loro sigillatura seguendo la seguente fase:

- esecuzione di un taglio, con una smerigliatrice, per una profondità di 100-150 mm (spessore di circa 2-3 mm) lungo l'intera fessura;
- lavaggio del taglio con acqua in pressione;
- preparazione e applicazione di malte cementizie pronte all'uso con proprietà tissotropiche bicomponenti. La malta viene applicata direttamente a spatola, esercitando una buona pressione e compattazione.

La sigillatura delle fessure (apertura > 1,5 mm)

Se l'apertura delle fessure è maggiore di 1,5 mm, è necessario sigillarle mediante iniezioni (Figura 8):

- esecuzione di fori con punte del diametro di 8 mm lungo l'intero asse della fessura con un'inclinazione di 45°, alternandole a destra e a sinistra della fessura, in modo tale da intercettare la superficie della fessura stessa;



8. La procedura di sigillatura delle fessure

- pulizia dei fori con aria compressa e inserimento nei fori di speciali tubi in PVC o rame;
- sigillare i tubi applicati e la superficie esterna della fessura con un adesivo epossidico bicomponente per l'incollaggio strutturale.
- dopo circa 24 ore, una volta indurito l'adesivo, ogni tubo verrà nuovamente pulito con aria compressa, verificando allo stesso tempo che i tubi e la chiusura esterna siano ben sigillati.
- procedere all'iniezione di resina epossidica bicomponente, a bassissima viscosità; l'applicazione del materiale avverrà con una pompa di iniezione pneumatica o manuale, pompando il prodotto all'interno dei tubi preparati. L'iniezione inizierà dal basso e continuerà fino a quando il prodotto fuoriesce dal tubicino superiore;
- una volta completata l'operazione di iniezione, i tubi verranno tagliati a livello dell'intradosso e la superficie verrà ripristinata con un adesivo epossidico bicomponente per l'incollaggio strutturale.

I materiali per la sigillatura

Per l'intervento descritto al sottocapitolo “La sigillatura delle fessure (apertura 1,0-1,5 mm)”, viene generalmente utilizzata una malta cementizia, ad esempio MapeGrout LM2K: classe R3, UCS pari a 10 MPa dopo 24 ore e maggiore di 35 MPa dopo 28 giorni, modulo elastico > 15 GPa, adesione maggiore di 2,0 MPa (secondo EN1766) e classe di resistenza al fuoco E. Per gli interventi descritti nel sottocapitolo “La sigillatura delle fessure (apertura > 1,5 mm)”, occorre un adesivo epossidico, come ad esempio il prodotto Adesilex PG1 utilizzato per sigillare i tubi e i fori esterni: è necessaria una resistenza all'adesione superiore a 3,0 MPa, secondo la EN 12636, UCS superiore a 50 MPa e lavorabilità nell'intervallo 30-60 minuti con indurimento in 5-7 ore.

Infine, per l'iniezione delle fessure, viene utilizzata una resina epossidica bicomponente, come ad esempio Epojet o Epojet LV, con viscosità molto bassa ~ 140 mPa • s e controllo sul ritiro < 3% (secondo EN 12617-2) e UCS > 60 MPa.

Gli interventi di rinforzo

Quando il fenomeno della fessurazione è molto esteso e si presume che si presentino problemi statici, potrebbe essere necessario eseguire interventi di rinforzo incrementando le caratteristiche di resistenza dei rivestimenti.

È il caso in cui i rivestimenti in calcestruzzo semplice non sono in grado di sopportare sollecitazioni di trazione, conseguenti a carichi non simmetrici, azioni sismiche, spinte d'ammasso localizzate; è quindi necessario correggere la sezione resistente applicando nuovi materiali ad alte prestazioni: lastre di carbonio e materiali compositi (FRP), materiali in fibra di vetro (GFRP) o tessuto in acciaio zincato ad alta resistenza (UHTTS) sono tutte soluzioni adeguate [4 e 5].

Per le applicazioni in sotterraneo, l'uso di acciaio ad alta resistenza, come il tessuto Steel Net, è una soluzione molto flessibile, in grado di aumentare la resistenza a trazione dei rivestimenti con una variazione molto ridotta dello spessore, in modo da preservare il gabarit della sezione. Lo Steel Net viene annegato in uno strato di malta, dopo aver rimosso alcuni centimetri del calcestruzzo esistente. Queste sono le fasi di esecutive:

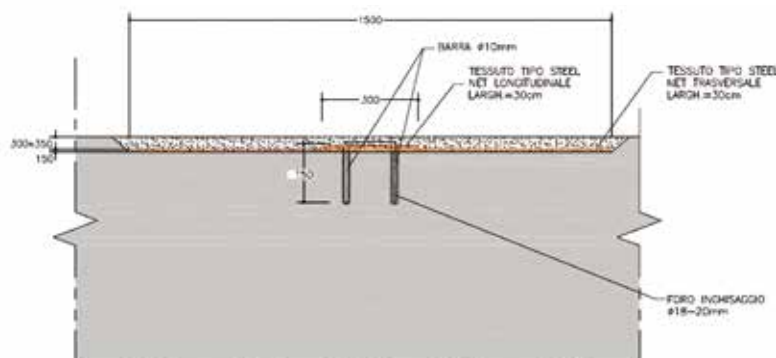
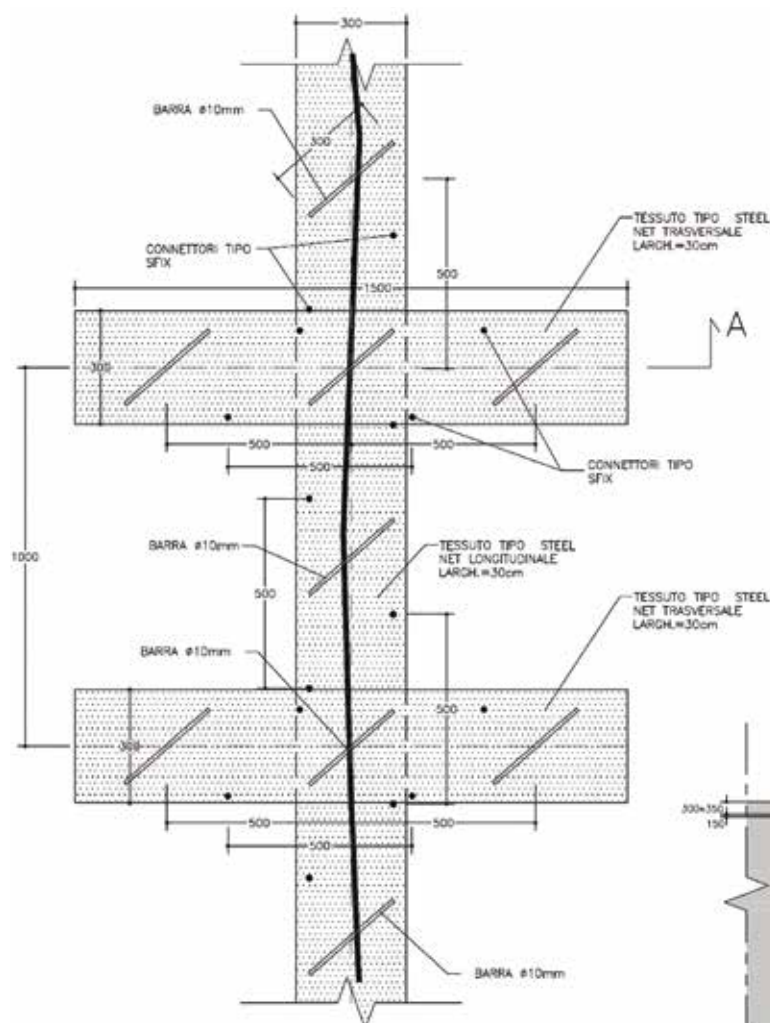
- rimozione di uno spessore di calcestruzzo di circa 45-50 mm (non superiore al copriferro del calcestruzzo armato);

- pulitura delle superfici da rinforzare, rimuovendo eventuali parti danneggiate o incoerenti;
- irruvidimento della superficie del calcestruzzo e ripristino di eventuali volumi mancanti con malte cementizie;
- installazione di un primo strato di malta bicomponente R4, come ad esempio il Concrete Rock V2, utilizzando una spatola, per uno strato di 15-20 mm;
- posizionamento dello strato di tessuto in acciaio zincato UHTSS come Steel Net 220, nella malta fresca, in senso trasversale e/o longitudinale, avendo cura di impregnarlo perfettamente ed evitando la formazione di rughe o bolle;
- installazione dei connettori in acciaio, come del tipo SFIX G 10-12, mediante perforazione del rivestimento in calcestruzzo e iniezione di malte/resine speciali per la sigillatura degli elementi di connessione;
- installazione dello strato finale di malta bicomponente R4, come ad esempio il Concrete Rock V2, fino a raggiungere uno spessore protettivo contro un possibile incendio, pari a circa 30-35 mm (spessore totale della malta, posata in due strati pari a 50-60 mm).

In questo modo, parte del rivestimento esistente viene sostituito con materiale ad alte prestazioni, in grado di sopportare le sollecitazioni di trazione e aumentare la resistenza flessionale della struttura.

Le Figure 9A e 9B rappresentano un tipico intervento: per coprire l'area fessurata vengono posizionati tessuti Steel Net longitudinalmente e alcuni trasversalmente (ogni 1,00 m), a cucire la fessura. Circa 50 mm di rivestimento in calcestruzzo vengono rimossi e sostituiti con malta bicomponente (primo strato 15 mm e strato finale 35 mm).

Il tessuto a rete in acciaio UHTTS è preparato in rotoli, di larghezza 300 mm, spessore equivalente 0,27 mm (2,72 mm/cm²), resistenza a trazione allo stato limite ultimo ULS pari a 6.900 kN/cm, modulo elastico > 190 GPa e deformazione di trazione > 1,6%. Per le connessioni, si suggeriscono elementi in acciaio zincato, di diametro 10-12 mm, con resistenza a trazione superiore a 2.400 MPa e deformazione sotto trazione > 1,6%. Infine, per la malta bicomponente, sono generalmente richiesti i seguenti requisiti: resistenza a compressione UCS > 45 MPa e adesione > 2,5 MPa.



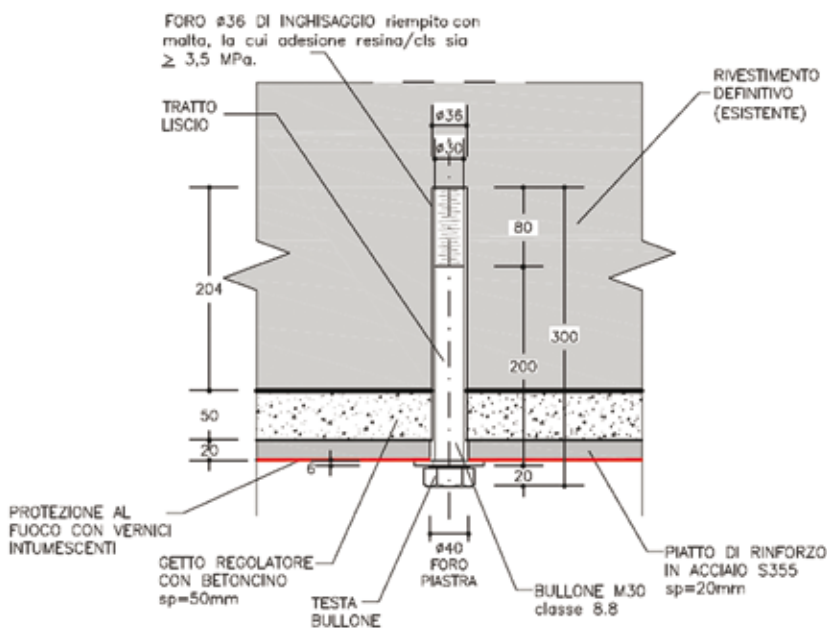
9A e 9B. L'intervento con tessuto in acciaio UHTTS

L'uso di piastre e di blindaggi d'acciaio

Una tipologia di rinforzo più robusto è il posizionamento, all'intradosso dei rivestimenti, di piastre in acciaio, con spessore variabile in base alle esigenze statiche da 15 a 30 mm, collegate al rivestimento esistente mediante bulloni in acciaio.

Questo intervento è in grado di aumentare sia la resistenza flettente del rivestimento, sostenendo le sollecitazioni di trazione, sia la resistenza al taglio, aumentandone la rigidità. Ne deriva una sezione resistente acciaio-calcestruzzo, tipica di una struttura mista; la collaborazione statica del rinforzo con la struttura esistente viene garantita dalla posa in opera di connettori: generalmente vengono utilizzati bulloni in acciaio M24-M30, con foro di perforazione 30-38 mm e profondità 250-300 mm.

Anche in questa applicazione verranno rimossi pochi centimetri del calcestruzzo esistente per mantenere invariato lo spessore finale del rivestimento esistente. Al fine di disporre le piastre d'acciaio secondo la geometria del rivestimento - che può presentare difetti o irregolarità - queste sono posizionate generalmente a 30-50 mm di distanza dal suo intradosso e tale intercapedine viene riempita con malta R3-R4. L'acciaio deve essere coperto con vernici intumescenti, quale protezione al fuoco. La Figura 10 mostra i dettagli dell'intervento.



10. Un dettaglio degli interventi con piastre d'acciaio

CASI APPLICATIVI

Alcuni degli interventi descritti nel capitolo "I metodi costruttivi e i materiali", sono stati applicati per il ripristino di gallerie facenti parte dell'autostrada Bologna-Firenze [6] e di un tunnel sulla viabilità di collegamento a Firenze.

Nelle Figure 11A e 11B sono riportate alcune tipiche fessure verticali, per ritiro del calcestruzzo: è stata applicata una riparazione secondo le modalità descritte ai sottocapitoli "La sigillatura delle fessure (apertura 1,0-1,5 mm)" o "La sigillatura delle fessure (apertura > 1,5 mm)", a seconda dell'apertura della fessura, do-



11A e 11B. Alcune fessure verticali monitorate

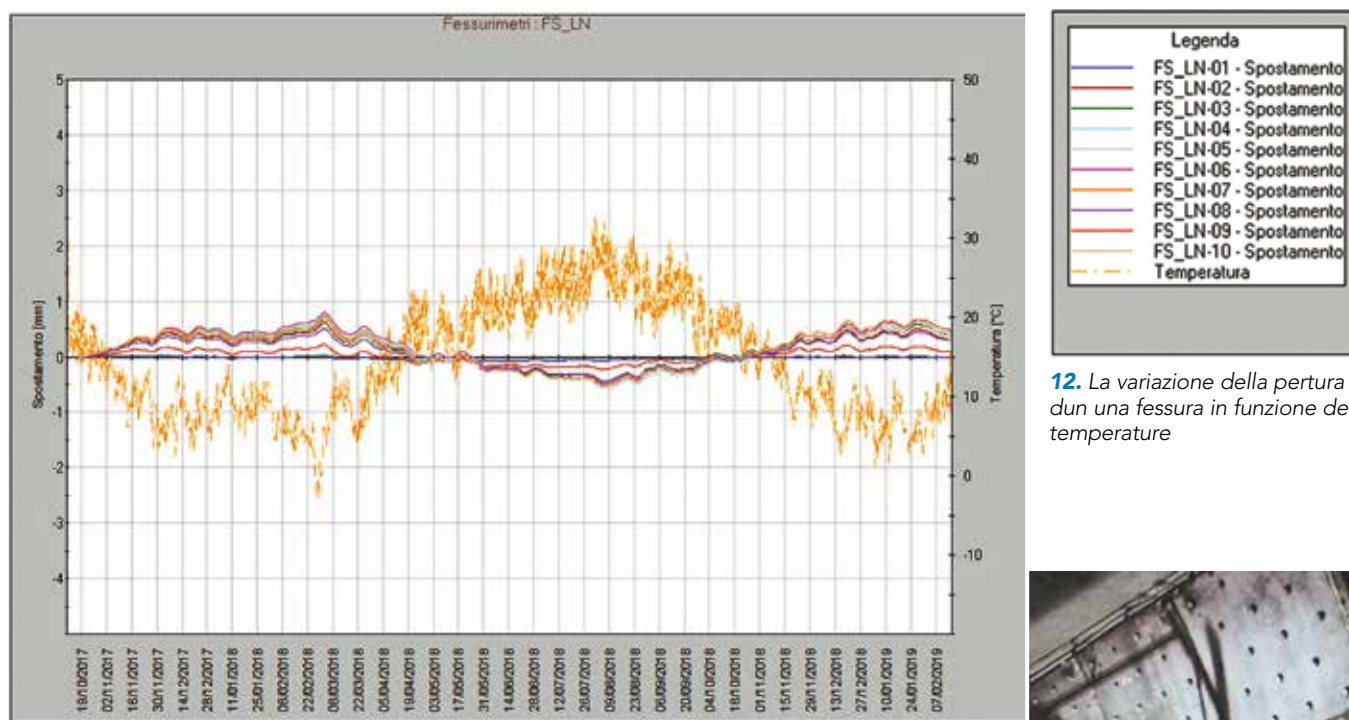
po aver verificato mediante monitoraggio con fessurimetri che i fenomeni si erano stabilizzati.

La Figura 12 mostra la tendenza tipica dell'apertura di una fessura (linee rosse e blu) influenzata dalla variazione di temperatura (linea gialla): si può notare un aumento dell'apertura durante il periodo invernale, in presenza di basse temperature, e una chiusura della fessura in estate con l'aumentare delle temperature. È importante valutare che non sia presente un trend crescente a significare un fenomeno in evoluzione. Per le fessure longitudinali, specialmente se localizzate in calotta (Figura 13A), è preferibile approntare un intervento di rinforzo strutturale; è necessario verificare se la fessura interessi l'intero spessore del rivestimento o meno, eseguendo un carotaggio nello stesso (Figura 13B).

Le Figure 14A, 14B e 14C mostrano un rinforzo strutturale mediante l'impiego del tessuto in acciaio zincato UHTSS Steel Net 220, per riparare parte di una calotta interessata da fessure: il nastro, di larghezza 300 mm, viene srotolato e posizionato con malte specifiche sull'intradosso del rivestimento della galleria, in corrispondenza delle fessure, fissandolo meccanicamente con connettori (in questo caso sono state utilizzate staffe in acciaio) e annegandolo in uno strato di malta ad alte prestazioni.

Il dimensionamento dell'armatura deve tener conto della resistenza a trazione del tessuto d'acciaio, pari a 6.900 N/cm, e del limite di delaminazione pari a $f_{dd} = 1.440 \text{ N/mm}^2$. Considerando l'area in acciaio, 272 mm², la resistenza del sistema di rinforzo è facilmente valutabile (si suggerisce l'uso di un fattore di sicurezza pari a 1,2). Per raggiungere la resistenza richiesta possono essere utilizzati diversi strati sovrapposti di Steel Net 220.

Il tessuto in acciaio Steel Net 220 può essere utilizzato anche per rinforzi sistematici, se si desidera aumentare la resistenza dei rivestimenti in calcestruzzo per supportare carichi



12. La variazione della pertura dun una fessura in funzione della temperature

imprevisti o condizioni sismiche. I tessuti d'acciaio vengono posizionati lungo l'intero profilo d'intradosso del tunnel, a una distanza variabile normalmente nell'intervallo 1,20-1,80 m in base all'aumento della resistenza da ottenere.

Infine, la Figura 15 mostra un esempio di utilizzo di piastre d'acciaio per rinforzare il piedritto di una galleria in cui si erano generati carichi concentrati tali da creare fessurazioni nel rivestimento (di ampiezza centimetrica), splaccaggi del calcestruzzo e rotture per taglio. Il problema era principalmente localizzato all'intersezione con un cunicolo laterale, disposto con asse inclinato rispetto all'asse del tunnel principale e costruito successivamente ad esso, che aveva determinato concentrazioni tensionali localizzate.

Un modello 3D mediante l'impiego del software SAP 2000 (Figura 16) ha permesso di valutare in dettaglio lo stato tensiona-

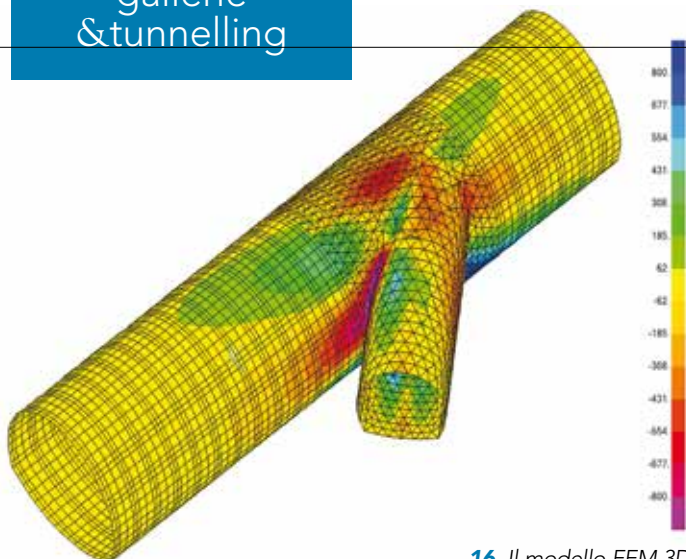


15. Il rinforzo del piedritto con piastre d'acciaio



13A e 13B. La fessura longitudinale (13A) e verifica con carotaggio (13B)





16. Il modello FEM 3D per la valutazione di sollecitazioni localizzate



14A, 14B e 14C. L'applicazione di tessuto in acciaio UHTTS Steel Net 200

le presente nel nodo e di dimensionare il rinforzo necessario. I risultati del modello sono stati confrontati e calibrati con i risultati delle prove doorstopper eseguite nei punti più significativi del rivestimento.

Sono state utilizzate piastre d'acciaio S355 di 20 mm di spessore, connesse al rivestimento mediante bulloni M30, classe 8.8, di 280 mm di lunghezza.

La presenza delle piastre in acciaio ha consentito di aumentare il dominio resistente USL M-N della sezione composita (acciaio più calcestruzzo) e incrementare la resistenza al taglio, principalmente riconducibile alle piastre in acciaio.

CONCLUSIONI

Sono state illustrate alcune opzioni per il rinforzo strutturale dei rivestimenti di gallerie, definendo il contesto di applicazione e i requisiti tecnici.

È importante focalizzare l'attenzione sul fatto che, al fine di scegliere l'intervento più idoneo, è necessario un rilievo e un'indagine di dettaglio della situazione esistente, in grado di valutare le caratteristiche dei quadri fessurativi e dei danneggiamenti presenti e di individuarne le cause.

Una volta che l'intervento è stato eseguito, è necessario predisporre un programma di monitoraggio in grado di controllare il comportamento della nuova struttura e sottoporla a un attento "programma di manutenzione", come ormai richiesto dai più recenti orientamenti normativi. ■

⁽¹⁾ Ingegnere, Responsabile del Settore Tecnico di Rocksoil SpA

⁽²⁾ Ingegnere, Amministratore Delegato di Rocksoil SpA

⁽³⁾ Ingegnere, Direttore Tecnico di G&P Intech Srl

⁽⁴⁾ Ingegnere Senior di Rocksoil SpA

Bibliografia

- [1]. J. Penzien, C.L. Wu - "1998. Stresses in linings of bored tunnels", Earthq. Eng. Struct. Dyn. 27 (3), 283-300, 1998.
- [2]. J. Penzien - "Seismically induced racking of tunnel linings", Earthq. Eng. Struct. Dyn. 29, 683-691, 2000.
- [3]. J.N. Wang - "Seismic design of tunnels: a simple state-of-the-art design approach", Monograph 7. Parsons, Brinckerhoff, Quade and Douglas Inc, New York, 1993.
- [4]. V. Bacchettini, V. Corinaldesi, P. Croce, T. D'Antino, G. Giacomello, G. Giacomini, M. Mele, G. Moriconi, M. Pasetto, C. Pellegrino, H. Vocca - "Ponti stradali", AIPCR - Associazione mondiale della strada, Congresso nazionale AIPCR, Roma 2014, CT 4.3., 2014.
- [5]. C. Perinelli, G. Giacomini - "Consolidamento delle opere d'arte sulla A14", "Strade & Autostrade", n° 108 Novembre/Dicembre 2014, 74-76, 2014.
- [6]. P. Lunardi, G. Cassani, M. Gatti - "Design aspects of the new Apennines crossing on the A1 Milan-Naples motorway: the Base Tunnel", Proceeding of the AFTES Congrès International Monaco, Le souterain: espace d'avenir, 147, 6-8 October 2008.