

Via d'esodo sospesa

UNA SOLUZIONE INNOVATIVA PER LA SICUREZZA IN GALLERIA È STATA SOTTOPOSTA A PROVE DAL VERO PER LA VERIFICA DEL GRADO REI DELLA STRUTTURA. IL CUNICOLO IN CEMENTO, AGGANCIATO ALLA VOLTA, HA SUPERATO TUTTE LE PROVE DI RESISTENZA AL FUOCO, ASSICURANDO UNA TEMPERATURA INTERNA DI 32°, AL PIANO DI CALPESTIO. ALLA SPERIMENTAZIONE, UN'ASSOLUTA PRIMA MONDIALE, HANNO ASSISTITO PIÙ DI 150 SPECIALISTI DEL TUNNELLING PROVENIENTI DA TUTTA EUROPA. LA LOCATION: LA GALLERIA SANTA CROCE, LUNGO LA VIA DEI MARMI, IN COMUNE DI CARRARA.

Alessandro Focaracci
ingegnere
Prometeoengineering.it Srl

Lo sviluppo dell'analisi di rischio nella progettazione della sicurezza delle gallerie ha fornito una risposta metodologica innovativa all'esigenza di un miglioramento sostanziale della sicurezza avvertita con forza dall'opinione pubblica in seguito ai gravi incidenti avvenuti negli ultimi anni (Monte Bianco, Gottardo, Frejus). Le nuove normative, sia a livello europeo che nazionale, hanno dato risposta a questa esigenza e hanno fatto propria la nuova impostazione progettuale basata sulla valutazione quantitativa e probabilistica del rischio: si sono così creati i necessari presupposti per avviare un imponente programma di interventi di messa in sicurezza dei tunnel stradali, ferroviari e metropolitani. La metodologia di progettazione e le misure di sicurezza innovative contribuiranno a collocare ancora una volta il nostro Paese, che da solo detiene oltre il 60% delle gallerie in Europa, all'avanguardia nel mondo del *tunnelling*.

La necessità di utilizzare criteri di valutazione di tipo quantitativo e di adottare un approccio di tipo sistemico, nasce dal fatto che la percezione del pericolo, ovvero la percezione psichica del rischio, è soggettiva in quanto è legata alla confidenza che il soggetto ha con il sistema (mezzo, impianto, struttura, ecc.) utilizzato.

Pertanto non si può ricorrere ad una semplicistica elencazione dei provvedimenti da adottare per la sicurezza di una infrastruttura, se prima non si sono definiti esattamente i pericoli più probabili ed i livelli di sicurezza ammessi.

L'Unione Europea con il Consiglio Europeo di Essen del

1994 ha deciso di realizzare una rete di trasporti europea Trans-European Network Transport (TEN-T) per rispondere alla necessità di un sistema di trasporti e di una rete di infrastrutture plurimodali efficiente, tale da facilitare la circolazione delle merci e delle persone nonché di ridurre la perifericità di alcune zone dell'Unione particolarmente svantaggiate. Le TEN-T comprendono grandi progetti prioritari che concernono il trasporto su strada e quello combinato, le vie navigabili e i porti marittimi nonché la rete europea dei treni a grande velocità. Anche i sistemi intelligenti di gestione dei trasporti rientrano in questa categoria, tra cui il progetto Galileo di posizionamento geografico via satellite.

Uno dei principi ispiratori della politica europea dei trasporti è stato la sicurezza degli utenti delle infrastrutture di trasporto; secondo tale idea "le misure di sicurezza dovrebbero permettere alle persone coinvolte in incidenti di mettersi in salvo, consentire agli utenti della strada di reagire immediatamente per evitare conseguenze più gravi, garantire l'azione efficace dei servizi di pronto intervento, proteggere l'ambiente nonché limitare i danni materiali".

L'evoluzione nel campo delle gallerie stradali è stata l'emanazione da parte dell'Unione Europea della Direttiva 2004/54/CE "relativa ai requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale trans-europea" ha rappresentato un'evoluzione nel campo delle gallerie stradali. La Direttiva fornisce indicazioni cogenti per tutte le infrastrutture di lunghezza superiore ai 500 m; essa in-

1. Carrara, 10 giugno. Un momento della prova di resistenza al fuoco cui è stato sottoposto il cunicolo sospeso nella galleria Santa Croce, lungo la Strada dei Marmi



2, 3. L'ing. Focaracci illustra agli esperti del tunnelling convenuti in galleria Santa Croce gli aspetti tecnici della via d'esodo sospesa e le dinamiche delle prove di resistenza al fuoco



dividua gli obiettivi di sicurezza da perseguire, identifica un insieme di parametri di sicurezza da considerare, fissa gruppi di requisiti minimi di sicurezza da soddisfare, suggerisce un approccio sistemico per la progettazione della sicurezza individuando l'analisi di rischio come lo strumento analitico da utilizzare per determinare il livello di sicurezza di una galleria. In particolare *"la sicurezza in galleria impone una serie di misure inerenti, tra l'altro, alla geometria e alle caratteristiche progettuali della galleria, alle installazioni di sicurezza, compresa la segnaletica, la gestione del traffico, la formazione dei servizi di pronto intervento, la gestione degli incidenti, le informazioni da comunicare agli utenti in ordine al comportamento da seguire in galleria, nonché una migliore comunicazione fra le autorità competenti ed i servizi di intervento, quali la polizia, i pompieri e le squadre di soccorso."*

La normativa italiana relativa alla sicurezza nelle gallerie stradali è costituita dal Decreto Legislativo 5 ottobre 2006, n. 264 *"Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale trans-europea"* di recepimento della citata direttiva.

Il Decreto Legislativo 264/06 definisce una serie di requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete trans-europea, richiede l'effettuazione di un'analisi di rischio per le gallerie con caratteristiche speciali ovvero per le gallerie in cui i requisiti minimi non sono realizzabili, definisce una metodologia di analisi di rischio italiana, definisce le figure giuridiche ed amministrative deputate alla gestione della sicurezza in galleria, definisce le modalità di approvazione, messa in opera, ispezione delle gallerie e la relativa documentazione necessaria.

Ulteriore evoluzione del processo di regolamentazione delle fasi di progettazione della sicurezza è stata quella da parte dell'ANAS di emanare, attraverso la Circolare 17/2006 *"Le linee guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali"*; esse sono conformi ai dettami del Decreto Legislativo 264/2006 e contengono indicazioni progettuali e metodologiche più dettagliate finalizzate alla definizione di uno standard di progettazione per le gallerie gestite da ANAS. Il nuovo impianto normativo comunitario e nazionale definisce un approccio sistemico che consente di evitare che eventi tragici, che investono la sfera emotiva, portino a sovradimensionare gli interventi destinati alla sicurezza, con aggravii economici tali da mettere in crisi le capacità d'investimento di un paese, sottraendo risorse che potrebbero essere destinate ad opere di maggiore priorità. Un approccio corretto e coerente con le reali necessità di una determinata infrastruttura consente, invece, un'ottimiz-

zazione degli investimenti, che rende più realizzabile il perseguimento degli obiettivi di sicurezza su larga scala. Per comprendere la reale portata e la direzione indicata dal legislatore per orientare il problema della sicurezza in galleria e quindi ottimizzare investimenti e scelte anche nel campo della ricerca occorre considerare che tutto l'impianto normativo fa riferimento ad eventi che maggiormente condizionano la salvabilità degli utenti ovvero i fenomeni d'incendio. Infatti il D.Lgs. 264/06 illustra chiaramente che anche ai fini dell'analisi di rischio ci si deve riferire esclusivamente all'analisi degli eventi considerati critici nello specifico ambiente confinato delle gallerie, vale a dire incendi, collisioni con incendio, sversamenti di sostanze infiammabili, rilasci di sostanze tossiche nocive. Pertanto i processi di analisi introdotti nella metodologia IRAM (*Italian Risk Analysis Method*) coerenti con il D.Lgs. 264/06 e dettagliate nelle *"Linee guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali"* emesse da ANAS con la Circolare 17/06 riguardano:

1. determinazione del flusso del pericolo in galleria cioè il flusso indotto dai fenomeni termodinamici e fluidodinamici conseguenti all'accadimento di un evento critico. Le conseguenze dell'analisi del flusso del pericolo determinano il danno connesso all'accadimento dell'evento critico in galleria. Inoltre i risultati del flusso del pericolo costituiscono i parametri d'ingresso per la simulazione del processo di esodo per gli utenti;
2. formulazione di modelli di formazione delle code al fine di determinare il numero di utenti interessati dall'evento critico;
3. individuazione di scenari che simulino il processo di esodo degli utenti della galleria, a ciascuno dei quali viene associata una probabilità di accadimento.

Il flusso del pericolo combinato con la simulazione statistica dell'esodo delle persone esposte, consentono di ottenere la salvabilità e le fatalità per tutti gli scenari incidentali possibili.

Inoltre nell'impianto normativo, tra le dotazioni di sicurezza ampia enfasi è data alle misure di facilitazione dell'esodo sia di tipo infrastrutturale che impiantistico. Le misure di maggiore efficacia, come dimostrato dall'applicazione della metodologia IRAM di analisi di rischio al progetto della sicurezza di più di 300 km di gallerie stradali e autostradali sono quelle indicate al paragrafo 2.3 e seguenti del D.Lgs 264/06: vie di fuga e uscite di emergenza; accesso per i servizi di pronto intervento; piazzole di sosta; drenaggio; resistenza al fuoco delle strutture ecc.

Pertanto, seguendo un corretto approccio ingegneri-

stico occorre da un lato sviluppare soluzioni progettuali orientate alla salvabilità degli utenti, migliorando i processi di esodo, dall'altro approfondire anche attraverso modelli matematici lo studio sul comportamento al fuoco di tutto il sistema galleria. In questo contesto, con un progresso innovativo a cui si è assistito, nel mondo del tunnelling solo negli anni '90, si inquadra la prova eseguita a Carrara l'11 giugno 2009 nella galleria S. Croce della Strada dei Marmi di Progetto Carrara

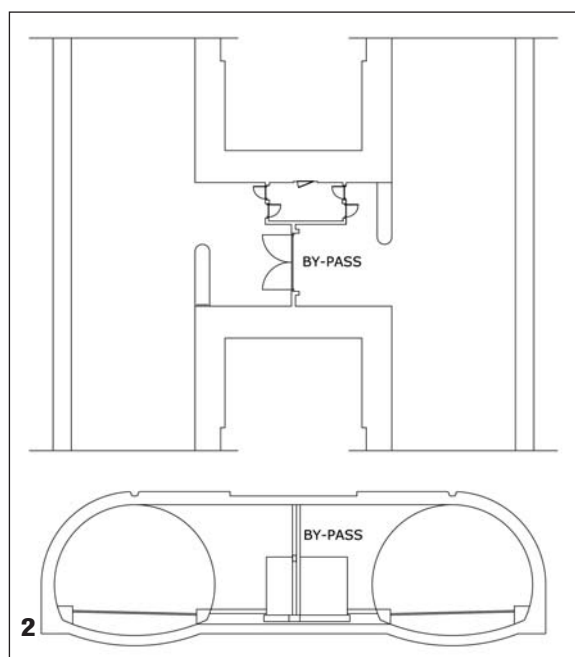
PROGETTAZIONE DELLA VIA D'ESODO SOSPESA

Nel corso degli anni, la progettazione delle vie di fuga per gli utenti in galleria ha subito alcune evoluzioni sia dal punto di vista del posizionamento sia rispetto alle dotazioni impiantistiche:

- via d'esodo coincidente con gli imbocchi,
- via d'esodo attraverso *by-pass* e canna parallela (fig. 2),
- via d'esodo posizionata al di sotto del piano stradale (fig. 3),
- galleria di servizio parallela alla canna principale (fig. 4).

Tali soluzioni però presentano alcuni aspetti negativi:

- notevole impatto ambientale poiché si deve scavare una vera e propria galleria *ex novo*;
- problematiche connesse alla drenaggio delle falde;
- messa a dimora di migliaia di metri cubi in più di materiale scavato;
- maggiori difficoltà dal punto di vista costruttivo dovute all'interferenza reciproca delle due gallerie;
- Maggiori costi realizzativi a parità di effetti sulla sicurezza degli utenti.



Primo esperimento al mondo

Test antincendio nella galleria Santa Croce

La prova di sicurezza lungo la Strade dei Marmi si è articolata in due tempi. Il 10 giugno sono state condotte prove preventive all'esterno e all'interno della galleria. È stato acceso un focolaio di incendio e testato un robot, comandato a distanza, per lo spegnimento con getti di acqua a schiuma. Quindi, il giorno 11 sono state condotte tutte le prove di resistenza del camminamento appeso alla volta della galleria - ne è stato realizzato un prototipo della lunghezza di 12 metri - cui è possibile accedere con scalette laterali protette da zone filtro.

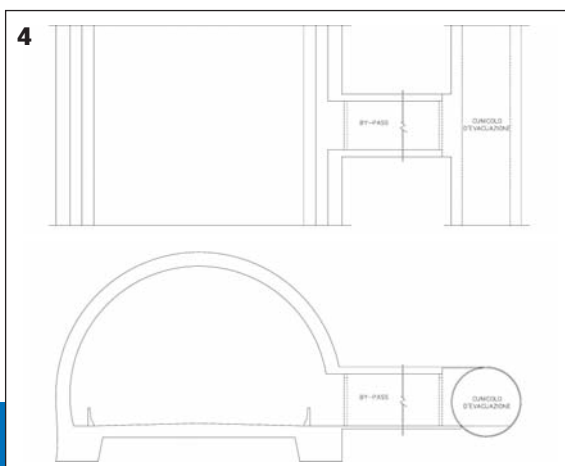
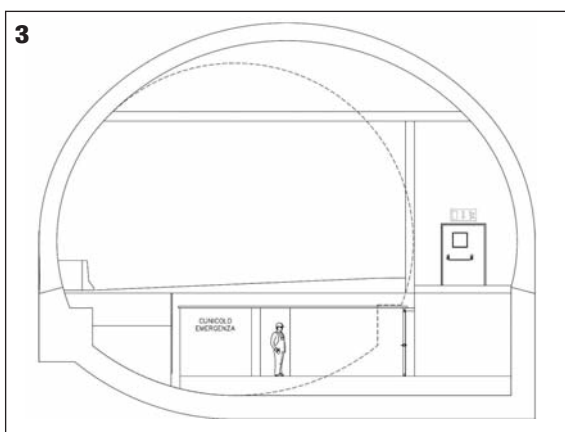
La soluzione, assolutamente rivoluzionaria, è stata progettata del direttore tecnico di Prometeoengineering.it Srl, con la collaborazione di Progetto Carrara, Adanti e Politecnico di Torino. Si tratta del primo progetto al mondo nel suo genere e potrebbe rappresentare, per la Strade dei Marmi, la soluzione ideale per realizzare le vie di fuga richieste dalla più avanzata normativa in materia di sicurezza delle gallerie. Attese a giorni - purtroppo dopo la stampa della rivista - la certificazione delle prove, siglata dal Politecnico di Torino.

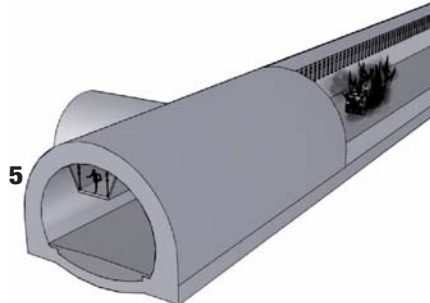
La Strada dei Marmi

Il luogo del test antincendio della galleria sospesa è stata la galleria Santa Croce lungo la Strada dei Marmi, una nuova arteria, parte realizzata (Lotto 1) e parte in corso di realizzazione (lotto 2), fortemente voluta dall'Amministrazione comunale di Carrara, per collegare direttamente i luoghi di estrazione a quelli di lavorazione del marmo, al di fuori della viabilità urbana dei centri attraversati, fra questi Carrara. Si tratta di una strada *ex-novo*, il cui progetto ha fatto ampiamente ricorso all'uso delle gallerie, per ridurre al massimo gli impatti visivi dell'arteria e ridurre allo stesso tempo i tempi di percorrenza. Due i lotti:

- lotto 1: da Miseglia Bassa fino alla Foce (completato nel 2008).
- lotto 2: dalla Foce alla SS Aurelia (fine lavori prevista nel 2011).

Parliamo in totale di 5600 m, 4 gallerie, 6 viadotti.





5

La via d'esodo sospesa

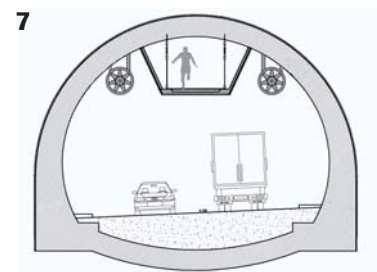
Tra i sistemi di agevolazione all'esodo, particolare efficace ed innovativo è il cunicolo sospeso fissato alla calotta della galleria. La via d'Esodo Sospesa è un camminamento di dimensioni tali da consentire un facile esodo a cui si accede attraverso scale di accesso, collegata all'interno di cameroni laterali o piazzole di sosta.

La forma del camminamento può essere trapezia o rettangolare ed è collegata attraverso tiranti o piastre bullonate. La struttura in calcestruzzo o acciaio sarà protetta da materiali in grado di abbattere le temperature quali malte, lastre di cartongesso o materiali analoghi. Il camminamento poi uscirà all'esterno in prossimità di un imbocco della galleria, dove saranno attrezzate le aree dedicate alla gestione dell'emergenza.

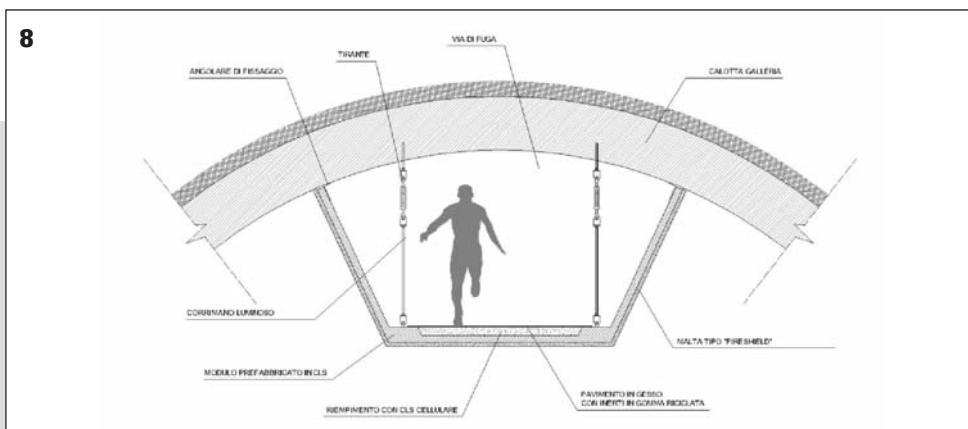
Il camminamento così progettato risponde pienamente all'esigenza di esodo in sicurezza degli utenti, in quanto possiede caratteristiche di compartimentazione (impedisce il passaggio di fiamma, gas e fumi), isolamento termico (limita il passaggio di calore) e conservazione della funzionalità (conserva la propria integrità strutturale per almeno 120 minuti in caso di incendio). In altre parole si realizza una struttura REI 120 a tutti gli effetti.



6



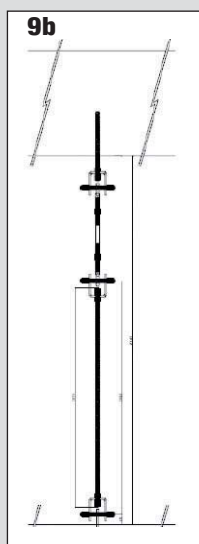
7



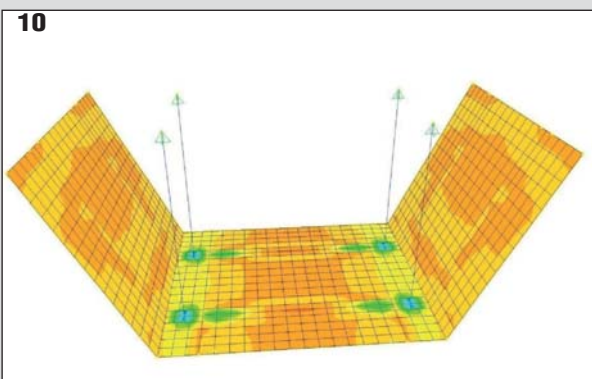
8



9a



9b



10

Tale struttura permette di ottenere i seguenti vantaggi rispetto a soluzioni tradizionali:

- industrializzazione del processo di realizzazione: gli elementi prefabbricati infatti vengono prodotti in condizioni controllate in officina e successivamente assemblati e montati in situ;
- limitati costi di produzione: la soluzione del cunicolo sospeso evita l'esecuzione di onerose opere di scavo proprie di altre soluzioni progettuali. Se necessaria, esclusivamente, la realizzazione dei cameroni di accesso alla struttura;
- posa in opera in tempi brevi: infatti, si dispongono preventivamente gli ancoraggi in calotta, mentre risulta già pre-assemblata a terra con i tiranti e la rete di rinforzo per la malta tipo Fireshield. La fase successiva consiste nell'elevazione ed il contemporaneo bloccaggio alla calotta e tra un elemento e l'altro. Per ultimo si procede alla formazione dello strato di malta Fireshield che provvede alla resistenza passiva al fuoco.

Una soluzione così innovativa, destinata alla salvabilità degli utenti della galleria in caso di incidente rilevante con incendio, necessita di una validazione da parte di un soggetto terzo particolarmente qualificato, che verifichi, da un lato le caratteristiche statiche dell'opera, dall'altro la funzionalità REI 120 prevista dalla norma.

Per questo è stata realizzata una prova a scala reale all'interno della galleria S. Croce della "Strada dei Marmi" a Carrara. Il soggetto che ha assunto il compito di validatore dell'opera, progettando e seguendo in situ tutti i test, è il Politecnico di Torino Dipartimento di Energetica.

VALIDAZIONE DELLA VIA D'ESODO SOSPESA CON PROVE IN SCALA REALE

Descrizione della struttura oggetto di prova

La struttura oggetto di prova è realizzata mediante cinque conci installati sulla volta della galleria S. Croce per una lunghezza complessiva pari a 12 m. I conci sono realizzati in CLS armato rivestiti esternamente con materiale isolante per la protezione al fuoco, Il fissaggio della struttura alla volta è garantito mediante quattro tiranti per concio. In fig. 9 il dettaglio dei tiranti.

I collegamenti longitudinali tra i conci sono realizzati mediante angolari in acciaio fissati per un ala a due conci consecutivi in corrispondenza della loro giunzione e per un ala alla calotta; tutti gli ancoraggi sono realizzati attraverso tasselli meccanici ad espansione

Prove di verifica REI

La prova di verifica REI è mirata alla valutazione delle prestazioni del cunicolo sospeso in termini di:

- Resistenza strutturale,
- Ermeticità della compartimentazione,
- Isolamento termico.

L'intervallo temporale per cui si valutano le prestazioni dell'elemento strutturale è pari a 120 min. La temperatura massima all'estradosso della Via d'Esodo Sospesa è non meno di 1000°C, che può corrispondere ad un incendio di circa 70 MW.

La resistenza strutturale è valutata mediante:

- l'andamento temporale dei profili di temperatura all'interno dei diversi strati del concio, in differenti posizioni del concio stesso;
- la misura delle deformazioni longitudinali e trasversali dei conci mediante estensimetri a filo opportunamente installati;

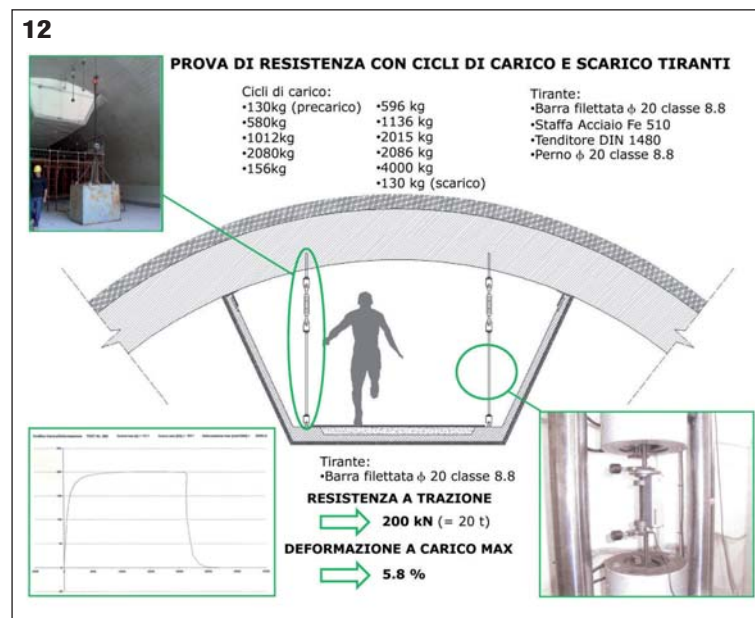
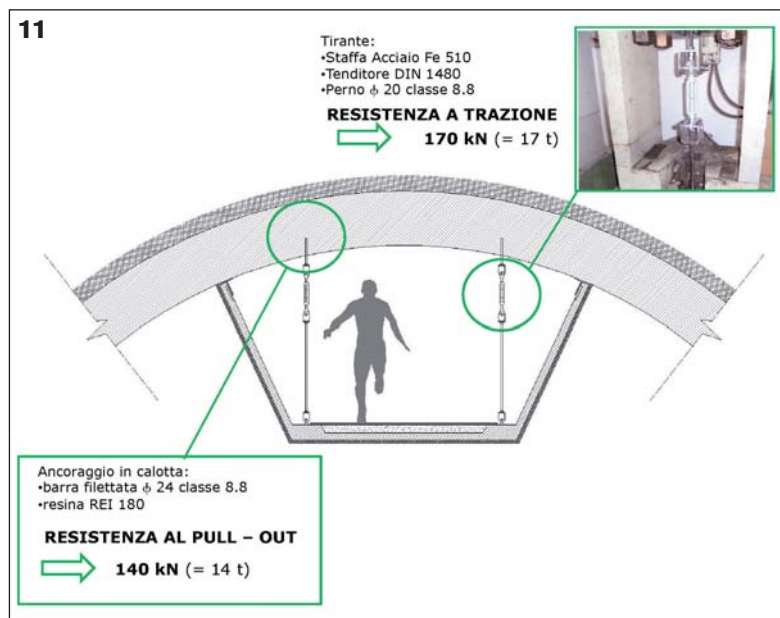
- l'analisi visiva ed in laboratorio delle strutture al termine della sollecitazione termica.

L'ermeticità è valutata:

- prima dell'esposizione al fuoco mediante fumi freddi dispersi all'interno del cunicolo,
- durante l'esposizione al fuoco mediante la registrazione delle immagini all'interno del cunicolo e la misura delle concentrazioni di monossido di carbonio in posizioni opportune,
- prima dell'esposizione al fuoco mediante fumi freddi dispersi all'interno del cunicolo.

L'isolamento è valutato mediante:

- l'andamento temporale delle temperature sulle superfici esterne ed interne del concio in posizioni opportune (pavimento, pareti);
- l'andamento temporale delle temperature dell'aria all'interno del cunicolo in differenti posizioni.



L'ermeticità è garantita:

- sui lati e sulla soletta dalla presenza della malta isolante,
- in corrispondenza della giunzione con la volta mediante sigillante elastico antifluoco;
- in corrispondenza dei giunti maschio femmina tra i blocchi mediante guarnizioni a tenuta di fumo.

La struttura oggetto è stata da prima sottoposta ad attente analisi strutturali mediante calcoli agli elementi finiti in campo lineare (fig. 10).

Le assunzioni numeriche sono state poi verificate *in situ* attraverso prove di collaudo sia sul cassone prefabbricato che sugli elementi strutturali di sostegno.

Le figure 11 e 12 riportano i risultati delle prove condotte.

PROVA DI RESISTENZA AL FUOCO NELLA GALLERIA S. CROCE

I giorni 10-11 giugno 2009 sono state condotte prove per la verifica della resistenza al fuoco della via d'esodo sospesa. Nel dettaglio si è trattato di:

- prova di ermeticità ante-sollecitazione termica mediante fumi freddi rilasciati all'interno del cunicolo,
- prova di resistenza strutturale mediante sollecitazione termica operata da bruciatori esterni in aria libera,
- prova di ermeticità post-sollecitazione termica mediante incendio di pozze di combustibile esterne.

La prova di ermeticità ante sollecitazione

La prova di ermeticità ante-sollecitazione termica è sta-

Protezione passiva al fuoco

L'uso della malta Meyco Fireshield 1350 della Basf

Per proteggere il calcestruzzo durante un fenomeno di incendio si utilizzano malte di tipo Fireshield per offrire una barriera termica in grado di evitare fenomeni di spalling del calcestruzzo (con conseguente perdita di resistenza del materiale ricoperto) e, nel caso specifico della via di esodo, evitare che all'interno del cunicolo si raggiungano valori di temperatura difficilmente tollerabili dalle persone che potrebbero percorrerlo (40°C).

A protezione della via d'esodo di Carrara è stata utilizzata la malta Meyco Fireshield 1350 della Basf, una malta durabile e versatile che può essere posta in opera a spruzzo come un normale calcestruzzo proiettato anche senza l'utilizzo di armatura di aggrappo, gettata entro cassero, prefabbricata in pannelli. La malta, una volta posta in opera, raggiunge valori di resistenza a compressione compresi tra i 15 e 20 MPa. Lo spessore d'applicazione di tale malta è progettato in funzione della curva di incendio, in funzione del tempo di esposizione previsto, della temperatura che si vuole che il calcestruzzo protetto raggiunga in tale tempo e della distanza delle eventuali armature dall'interfaccia (copriferro).

La prova di resistenza strutturale è stata realizzata effettuando il riscaldamento della superficie esterna della via di esodo per mezzo di due bruciatori a gasolio. In fig. 13 si vedono i bruciatori in azione nel corso della prova di resistenza ed isolamento, che consentono di raggiungere una temperatura massima in corrispondenza dell'estradosso del manufatto pari a 1000°C. La prova è stata condotta effettuando le seguenti misurazioni:

La prova di resistenza strutturale

La prova di resistenza strutturale è stata realizzata effettuando il riscaldamento della superficie esterna della via di esodo per mezzo di due bruciatori a gasolio.

In fig. 13 si vedono i bruciatori in azione nel corso della prova di resistenza ed isolamento, che consentono di raggiungere una temperatura massima in corrispondenza dell'estradosso del manufatto pari a 1000°C. La prova è stata condotta effettuando le seguenti misurazioni:

- temperatura della superficie esterna della via di esodo in corrispondenza della bocca del bruciatore,
- distribuzione verticale di temperatura all'interno della via di esodo,
- distribuzione di temperatura nei differenti strati della soletta e delle pareti della via di esodo,
- temperatura delle pareti interne della via di esodo,
- temperatura dei tiranti,
- velocità dell'aria all'interno della via di esodo,
- concentrazione di monossido di carbonio all'interno della via di esodo,
- opacità dell'aria all'interno della via di esodo,
- allungamento dei tiranti,
- scostamento dei giunti tra i conci.

La fig. 14 mostra l'allestimento della strumentazione di misura all'interno del prototipo di via di esodo sospesa. I risultati delle misure sono stati registrati mediante un sistema di acquisizione e visualizzati in tempo reale durante la prova al fine di monitorare le

ta condotta mediante il rilascio di fumi freddi all'interno del cunicolo opportunamente sigillato alle estremità. La procedura di prova ha previsto la chiusura ermetica delle via di esodo, l'erogazione di fumi ad intervalli regolari per un tempo pari a 5 minuti, il controllo mediante acquisizione video della saturazione dell'ambiente interno e dell'assenza di fuoriuscite di fumi dal cunicolo verso l'esterno, l'apertura di una finestra nel cunicolo per la fuoriuscita dei fumi dopo 10 minuti dall'inizio dell'erogazione.

I criteri di verifica dell'ermeticità sono stati:

- la saturazione dell'ambiente interno da parte dei fumi,
- l'assenza di trafiletti attraverso le pareti e la soletta della via di esodo.



condizioni e rilevare eventuali criticità. In fig. 15 è riprodotta la visualizzazione sinottica dei parametri principali di monitoraggio della prova.

La prova di ermeticità post-sollecitazione

La prova di ermeticità post-sollecitazione termica è stata condotta mediante la realizzazione di focolai costituiti da pozze di gasolio posti al di sotto della via di esodo con l'obiettivo di investire esternamente la via di esodo con fumi ad elevata opacità e presenza di monossido di carbonio.

Durante lo svolgimento della prova sono state variate le condizioni di ventilazione al fine di garantire la sicurezza della prova e investire la parte esterna della via di fuga con i fumi generati dagli incendi di pozza. L'evento di prova ha previsto l'accensione di n. 3 pozze di combustibile di dimensioni 1 m x 1 per un tempo pari a 10 minuti.

La verifica strumentale dell'ermeticità è stata effettuata mediante l'analisi della variazione temporale dell'opacità dell'aria e della concentrazione di monossido di carbonio all'interno della struttura.

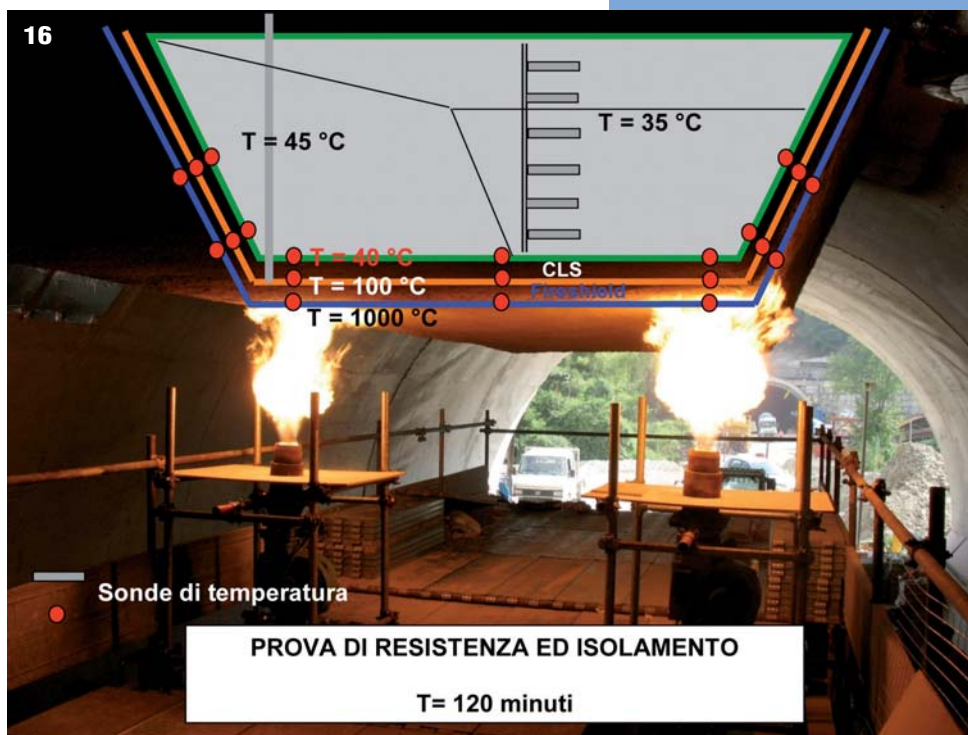
Risultati

I risultati delle prove di Resistenza Strutturale, Ermeticità della compartimentazione, Isolamento termico nell'arco temporale di 120 minuti sono stati i seguenti:

- la temperatura all'interno della Via d'Esodo Sospesa non ha superato i 35°C, con un carico d'incendio rapportabile a 70 MW,
- la temperatura del tirante non ha superato i 45 °C,
- la temperatura in corrispondenza dell'interfaccia tra il materiale isolante ed il CLS non ha superato i 100 °C,
- la dilatazione tra i giunti è inferiore a 0.3 mm,
- l'allungamento dei tiranti è inferiore a 0.5 mm,
- non si sono verificate fuoriuscite di fumi all'esterno della struttura ante sollecitazione termica,
- non si sono verificati aumenti di opacità o concentrazione di monossido di carbonio all'interno della struttura post sollecitazione termica,
- la temperatura delle pareti interne non supera i 40 °C.

Dal punto di vista qualitativo al termine della prova in cui per 120 minuti sono stati applicati più di 1000 °C sulla superficie del cassone si è potuto osservare:

- il rivestimento isolante non sia stato interessato da fenomeni di *spalling*,
- il rivestimento isolante non presenti danni evidenti,
- la parte superficiale del rivestimento isolante risulti friabile e si asporti facilmente,



- le parti metalliche non abbiano subito riscaldamento significativi,
- il CLS non risulti fessurato o danneggiato.

In fig. 16 sono illustrati i risultati della prova condotta.

CONCLUSIONI

Il prototipo della via di esodo sospesa ha superato i collaudi statici e le prove di resistenza al fuoco condotti nel sito della galleria S. Croce presso la Strada dei Marmi localizzata nel comune di Carrara (MS). L'esito della prova ha consentito di valutare sperimentalmente il soddisfacimento dei criteri adottati in fase di progettazione in accordo ai principi dell'ingegneria della sicurezza. Riteniamo si sia aperta una nuova frontiera nel mondo del tunnelling che consentirà di risolvere le problematiche di esodo in tante gallerie stradali, specie se a traffico bidirezionale, prive di uscite di emergenza, che garantiscono la salvabilità degli utenti, in ottemperanza ai recenti dettami normativi.

La soluzione testata a Carrara può consentire risparmi di milioni di euro e si connota come una valida alternativa alle vie di fuga tradizionali. ■■

Ringraziamenti

L'autore ringrazia: Progetto Carrara SpA, il Gruppo Industriale Maccaferri SpA, Adanti SpA perchè sin dall'inizio hanno creduto nell'idea progettuale sostenendola con convinzione