Resistenza al fuoco di gallerie in calcestruzzo fibrorinforzato

AUTORI: Ing. Alessandro P. Fantilli, Ing. Bernardino Chiaia, Villani Lucia

Introduzione

La sensibilità al tema della sicurezza antincendio in ambito strutturale per l'Ingegneria Civile è andata sempre più crescendo negli anni, e ancor di più per infrastrutture come gallerie, fino a costituire una vera e propria priorità che ha condotto i professionisti del settore a sperimentare materiali, e nello specifico miscele di calcestruzzo, che siano in grado di resistere adeguatamente alle alte temperature.

Analizzando lo stato di fatto della rete autostradale, il territorio italiano è caratterizzato da una rete molto estesa in sotterraneo, per un totale di circa 365 km di gallerie, di cui il 70% aperta al traffico a fine anni '70. Di conseguenza la loro vita utile sta volgendo al termine per cui ne sono richiesti interventi di riparazione e ripristino in sicurezza per gli utenti.

Tra le soluzioni alternative capaci di combinare una migliorata stabilità strutturale e buona resistenza a fuoco vi è l'utilizzo di calcestruzzi fibrorinforzati (*FRC, Fiber Reinforced Concrete*), con risultati ottimali in termini di qualità, tempo di esecuzione e risparmio sui materiali. Un notevole esempio di tale soluzione in totale assenza di armatura ordinaria è lo studio del progetto per il rinnovo del rivestimento delle gallerie tipiche del periodo 1970/80. Il relativo comportamento pre e post incendio è stato simulato con software di calcolo strutturale DOLMEN (prodotto da CDM DOLMEN srl di Torino).

Tecnologia 3D per la manutenzione di gallerie

L'applicazione di FRC per uso strutturale nella progettazione di gallerie gettate in opera è regolamentata dai testi normativi delle Linee Guida del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (LG2021 e LG2022) [1] [2] sui cui si fonda quanto riportato nelle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 [3]. La Circolare applicativa delle NTC, emanata nel 2019, al §C11.2.12 precisa che, oltre ai requisiti minimi prestazionali, il dosaggio minimo delle fibre all'interno del calcestruzzo *non deve essere inferiore allo 0,3% in volume*. Altrettanto rilevante nel panorama normativo è l'Eurocodice 2 (EC2), di cui l'Allegato L parte 1-1 [4] tratta il progetto di strutture in calcestruzzo fibrorinforzato, riferendosi esclusivamente a fibre di acciaio (*SFRC, "Steel Fibre Reinforced Concrete"*).

La principale ragione che spinge ad utilizzare calcestruzzi fibrorinforzati è un migliorato comportamento post fessurativo: al momento della formazione delle micro-fessure nel calcestruzzo, le fibre si attivano contrastando l'apertura progressiva delle stesse e generando una significativa resistenza residua in combinazione a grandi valori di deformazione, fino ad un valore significativo dell'apertura di fessura. Le principali resistenze residue caratterizzanti tale materiale sono ottenibili da test di laboratorio a flessione (UNI EN 14651:2007), e di seguito riportate:

- $f_{R,1}$, in corrispondenza di un'apertura di fessura (*CMOD*, '*Crack Mouth Opening Displacement*') pari a 0,5 mm e utile per la progettazione SLE;
- $f_{R,3}$, in corrispondenza di una CMOD pari a 2,5 mm utilizzata per progettazione SLU.

Per quanto riguarda, invece, le gallerie esistenti, in occasione del XVIII Convegno ANIDIS nel 2019, è stato illustrato un approccio metodologico che prevede principalmente l'esecuzione di un 'sondaggio generale' per la definizione dello stato di decadimento ed eventuali problemi locali, accompagnato da test in situ e in laboratorio, e la preparazione di un modello FEM 3D interpretativo del caso studio, necessario per definire le tecnologie più appropriate di ripristino delle condizioni accettabili [5].

Quanto esposto in termini di normative per gestire nei prossimi anni la manutenzione delle gallerie,può essere riassunto nei seguenti punti:

- Minimizzazione dello spessore di demolizione;
- Minimizzazione degli interventi di presidio temporaneo (ammasso/rivestimento originario residuale);
- Impermeabilizzazione della galleria;
- Massimizzazione della prestazione statica del nuovo rivestimento definitivo;
- Defunzionalizzazione statica del rivestimento esistente originario.

Tra gli sviluppi di ricerca più recenti nell'ambito dei materiali cementizi fibrorinforzati si inserisce la tecnica *AM (Additive Manufacturing)*, ovvero un processo nel quale un componente tridimensionale è prodotto mediante deposizione multipla di strati con mezzi robotici o strumenti simili dotati di ugelli, meglio nota come tecnologia 3D Concrete Printing (3DCP), in grado di estrudere in situ intere sezioni a scala reale di rivestimenti di gallerie utilizzando FRC a rapidissima presa e sviluppo di resistenza, in assenza di vibrazione e garantendo compattezza e omogeneità in tutta la struttura.

La tecnologia adottata è detta *ETLR* (*Extruded Tunnel Lining Regeneration)*, ovvero *"treno di lavorazione"*. Si tratta di un sistema basato sullo slipforming orizzontale di calcestruzzi speciali, e le fasi del processo ben rispondono alla strategia TRS prima descritta, in particolare grazie a diversi elementi modulari come cassaforma esterna fissa e interna scorrevole su un telaio mobile che, dotato prima di fresa a tamburo per demolire lo strato ammalorato e poi di estrusore, permette l'esecuzione della nuova calotta in continuo e un avanzamento del tutto automatizzato.

a)
b)
c)

Figura 1: a) Esempio di estrusione in piccola scala.; b) Elementi modulari del treno di lavorazione ETLR; c) Fresa a tamburo.

Costruzione del modello pre incendio del caso studio

La tecnologia descritta è stata proposta per l'intervento Tipologico di Sistemazione Definitiva "TRS-C2" con calcestruzzo fibrorinforzato di una Galleria Esempio, che si estende per una lunghezza complessiva di 63 metri circa.

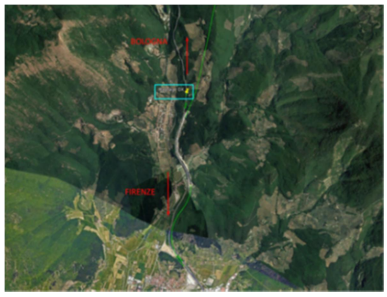
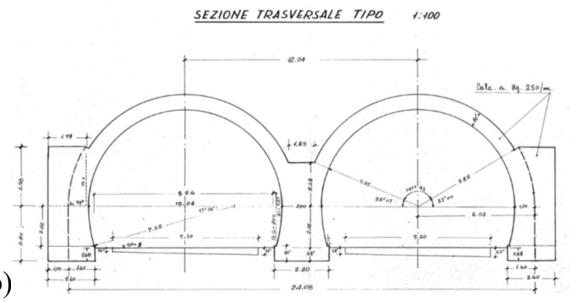
a) 
b) 

Figura 2: a) Inquadramento geografico Galleria Esempio; b) Sezione trasversale tipo del tratto naturale.

Si tratta di un'opera realizzata negli anni Sessanta, e grazie ai documenti storici "as-built" è stato possibile estrapolare informazioni importanti in merito alle caratteristiche geometriche. A seguito di indagini sui materiali è stato possibile accertare le caratteristiche strutturali di interesse:

- Rivestimento esistente di spessore 80 cm e resistenza R_{ck} pari a 24,15 MPa;
- Nuovo guscio in SFRC di classe C50/60 con 40 kg/m^3 di fibre di acciaio e spessore 30 cm.

Entrambi i gusci, nuovo ed esistente, sono privi di barre di armatura ordinaria. Note tutte le caratteristiche dei materiali, è stato possibile passare alla realizzazione di due modelli:

1. *Modello 1*: a **breve termine**, in cui si considera il nuovo strato di FRC introdotto in galleria con comportamento strutturale indipendente dallo strato di rivestimento già esistente;
2. *Modello 2*: **a lungo termine,** si considera l'interazione tra lo strato in FRC e quello di calcestruzzo già esistente.

Si chiarisce che in entrambi i modelli lo strato FRC è assunto come l'unico con funzione strutturale. Partendo dal *Modello 1*, questo è stato realizzato con una struttura a gusci, caratterizzata da una mesh quadrangolare, per una profondità di 150 cm e raggio medio di 4,87 m. La dimensione dei gusci singoli nella mesh è tale da linearizzarli nel piano XZ su un angolo di inclinazione di circa 5° tra un singolo elemento guscio e il successivo superiore, angolo tale che tra conci consecutivi avvenga una trasmissione degli sforzi di compressione (cos5°≅1) e al contempo ne sia minimizzato il taglio (sen5°= 0,09).

Per quanto riguarda i carichi applicati, si sono presi in considerazione il *peso proprio dei gusci* (calcolato automaticamente dal software una volta definiti i materiali e la geometria) e *peso del terreno* pari a 280 kPa, considerato come carico distribuito verticale rispetto al sistema di riferimento globale della struttura, data la buona qualità dell'ammasso roccioso (valori alti di RQD e quindi del modulo elastico) e quindi l'assenza di spinte laterali, oltre che di arco rovescio.

La struttura alla base è stata vincolata con dei *vincoli di tipo incastro* per cui sono impediti completamente sia spostamenti che rotazioni attorno agli assi X, Y e Z. Un altro dettaglio da non trascurare è stata la caratterizzazione di un *coefficiente di Winkler pari a 5* per quella porzione di gusci in calcestruzzo fibrorinforzato per cui sono risultati dal software spostamenti massimi normali al guscio negativi nella combinazione SLU incendio, corrispondenti a una compressione per i conci che di fatto risentono dell'interazione con l'altro strato di calcestruzzo esistente trascurato nel *Modello 1*, o con il terreno nel *Modello 2*.

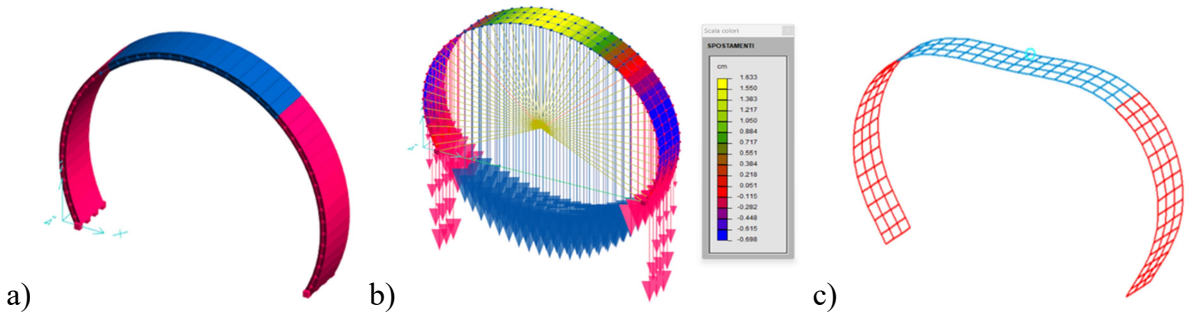


Figura 3: a) Costruzione del Modello 1; b) Spostamenti massimi normali al guscio ottenuti per carichi applicati; c) Deformazione.

Quanto detto vale anche per il guscio SFRC del *Modello 2,* più realistico poiché si è tenuto in considerazione anche il guscio esterno di calcestruzzo originario esistente. Entrambi sono stati sottoposti ai medesimi carichi e connessi da *rigid link*, vale a dire vincoli come aste di sezione fittizia rettangolare 5x5 il cui materiale e peso è irrilevante, ciò che conta ai fini dell'analisi è che siano *infintamente rigidi* e consentano una trasmissione degli sforzi senza deformazioni. In particolare, agli estremi risultano

svincolate e quindi permesse le rotazioni, per cui non viene trasmesso momento ma unicamente azioni normali e di taglio tra i due gusci.

L'inserimento di questi elementi ha consentito una collaborazione tra i due gusci e un comportamento 'monolitico' della struttura, con conseguenti vantaggi dal punto di vista della stabilità strutturale e soprattutto una riduzione netta di deformazioni sia del calcestruzzo che dell'acciaio per le fibre, insieme ai coefficienti massimi di utilizzo che possono essere intesi come indice di quanto il comportamento strutturale della piastra si avvicina al suo limite di resistenza.

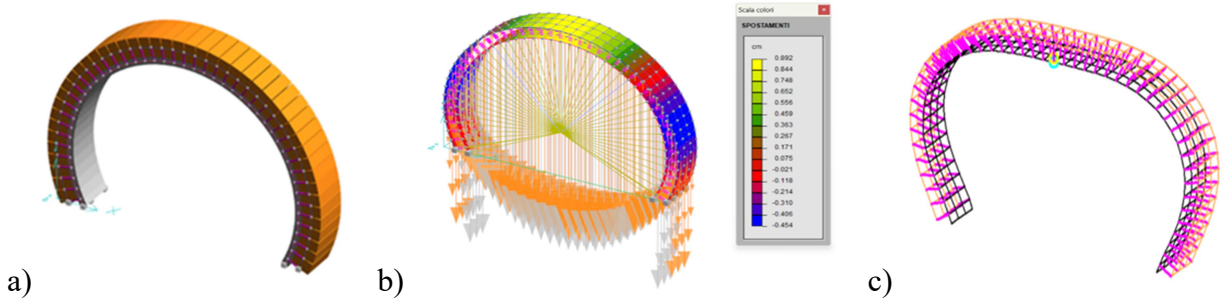


Figura 4: a) Costruzione del Modello 2; b) Spostamenti massimi normali al guscio ottenuti per carichi applicati; c) Deformazione.

Per entrambi i modelli, per avere un'idea globale della distribuzione delle tensioni, il software ha consentito di plottare le sollecitazioni massime secondo Von Mises nella condizione SLU che, come era possibile prevedere, sono più elevate alla base del guscio dove sono presenti i vincoli incastro.

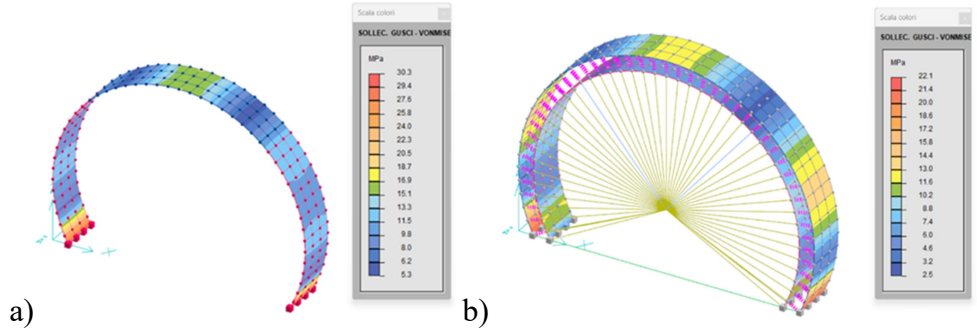


Figura 5: a) Sollecitazioni massime di Von Mises per il Modello 1; b) Sollecitazioni massime di Von Mises per il Modello 2.

Si è effettuata poi l'analisi statica per la medesima condizione nel modulo *Piastre e Setti*. Per entrambi i modelli sono stati definiti dei macrogusci su piani secati considerati come *piastre inflesse*.

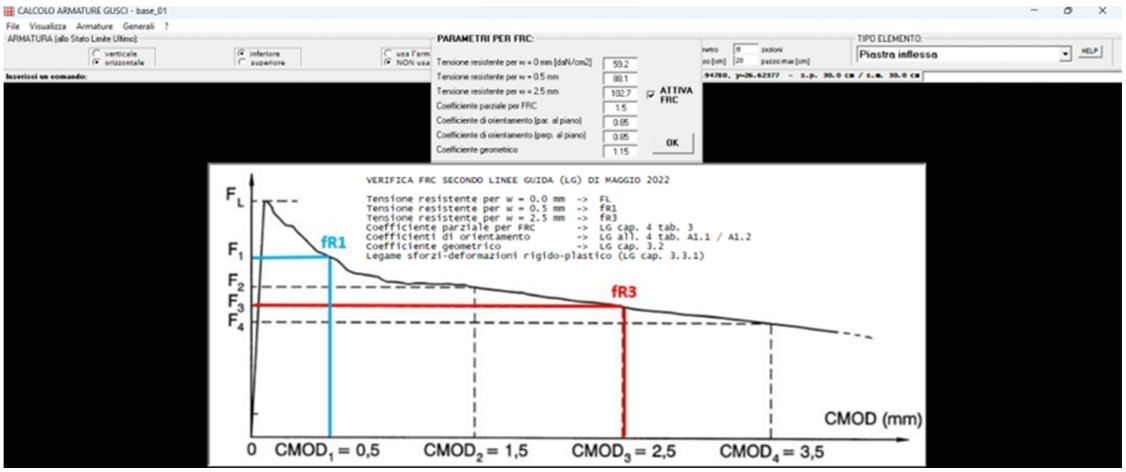


Figura 6: Verifica statica dei gusci con inserimento dei parametri FRC.

Il modulo di calcolo ha consentito la verifica statica di tutti i macrogusci partendo da un minimo di area teorica di armatura richiesta in base alle sollecitazioni presenti, che una volta attivati i parametri di FRC, è risultata nulla in quanto le fibre di acciaio sono risultate sufficienti a garantire la resistenza necessaria. La verifica statica è stata così soddisfatta.

Verifica a fuoco dei modelli

Step successivo è stato studiare l'esposizione a fuoco del guscio in FRC. Infatti, uno dei principali effetti che è necessario indagare in questi fenomeni è lo *spalling esplosivo*, ovvero la rottura di strati o porzioni di calcestruzzo dalla superficie dell'elemento strutturale che si verifica fino ai primi 20-30 minuti dell'incendio quando le temperature sono tra 150 e 250 °C, ovvero nella fase in cui l'aumento termico è notevole. L'espulsione di calcestruzzo può essere molto violenta e arrivare fino a diversi metri di distanza dalla superficie interessata. Una volta avvenuto lo spalling, il fenomeno tende a un degrado progressivo che continua in profondità, fino a *ridurre la sezione* minacciando l'integrità strutturale. Per tale ragione, lo *spessore delle gallerie* esposte a temperature critiche è uno dei parametri più importanti da monitorare. Il FRC assume un ruolo cruciale nelle applicazioni in galleria, in quanto la presenza delle fibre fornisce una misura di *protezione passiva* per contenere gli effetti del fuoco.

Per un'analisi a fuoco, è bene andare a considerare la variazione dei seguenti parametri a causa del degrado chimico e fisico del calcestruzzo:

- riduzione di **conducibilità termica** ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) di calcestruzzi esposti tra 20 e 1200 °C, che può essere determinata dalla media tra i valori di limite inferiore K_L e superiore K_U dati da Eurocodice:

  $$K_U = 2 - 0{,}2451\left(\frac{T}{100}\right) + 0{,}0107\left(\frac{T}{100}\right)^2$$

  $$K_L = 1{,}36 - 0{,}136\left(\frac{T}{100}\right) + 0{,}0057\left(\frac{T}{100}\right)^2$$

  con T sempre espressa in °C.

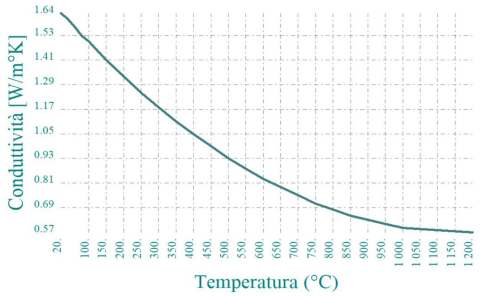


Figura 7: Andamento della conducibilità termica.

- riduzione di **densità** ($kg \cdot m^{-3}$), che partendo da un valore a temperatura ambiente ρ_R di 2430 kg/m^3 [7], si riduce per la disidratazione dei prodotti idratati con aumento di porosità, che può essere calcolata con una equazione multilineare:

$$\rho(T) = \begin{cases} \rho_R, & 20°C \le T \le 115°C \\ \rho_R\left[1 - \frac{0{,}02\,(T-115)}{85}\right], & 115°C < T \le 200°C \\ \rho_R\left[0{,}98 - \frac{0{,}03\,(T-200)}{200}\right], & 200°C < T \le 400°C \\ \rho_R\left[0{,}95 - \frac{0{,}03\,(T-400)}{800}\right], & 400°C < T \le 1200°C \end{cases}$$

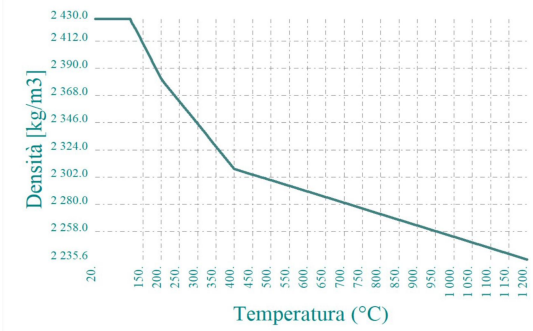


Figura 8: Andamento della densità.

- variazione di **calore specifico** (J· $kg^{-1} \cdot K^{-1}$), che misura la facilità con il quale il calcestruzzo può subire variazioni termiche ed è strettamente legato al contenuto di umidità.

$$c(T) = \begin{cases} 900, & 20°C \leq T \leq 100°C \\ 900 + (T - 100), & 100°C < T \leq 200°C \\ 1000 + (T - 200), & 200°C < T \leq 400°C \\ 1100, & 400°C < T \leq 1200°C \end{cases}$$

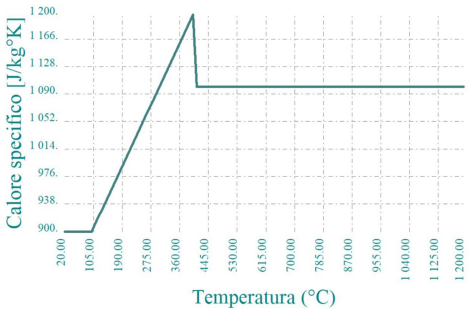


Figura 9: Andamento del calore specifico.

- riduzione di **resistenza a compressione** f_c' a 28 giorni [MPa] e **resistenza a trazione** f_t [MPa] [8]:

$$\left.\begin{aligned} T < 300°C: \ \frac{f_c^{T\prime}}{f_{c\prime}} &= 1{,}0219 - 0{,}0004T \\ 300°C \leq T < 600°C: \ \frac{f_c^{T\prime}}{f_{c\prime}} &= 1{,}3795 - 0{,}0016T \\ T \geq 600°C: \ \frac{f_c^{T\prime}}{f_{c\prime}} &= 0{,}591 - 0{,}0003T \end{aligned}\right\}$$

$$f_{tT} = \begin{cases} f_t, & T \leq 100°C \\ f_t \frac{600-T}{500}, & 100°C < T \leq 550°C \\ f_t \frac{1200-T}{6500}, & 550°C < T \leq 1200°C \\ 0, & T > 1200°C \end{cases}$$

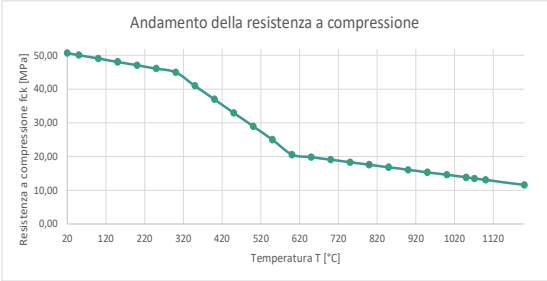


Figura 10: Andamento della resistenza a

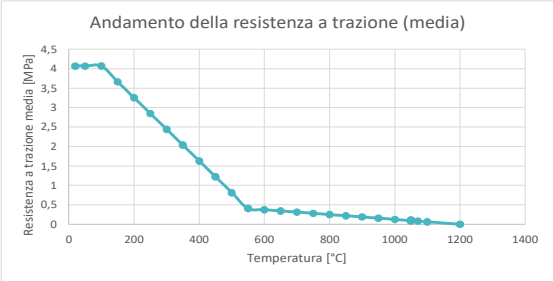
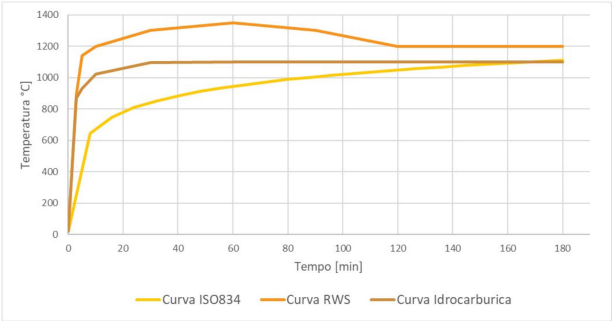


Figura 11: Andamento della resistenza a trazione.

L'analisi termica è stata effettata considerando l'esposizione a tre *curve tempo-temperatura*, in ordine di severità la *curva ISO834*, quella *idrocarburica* e quella *RWS*.

a)



b)

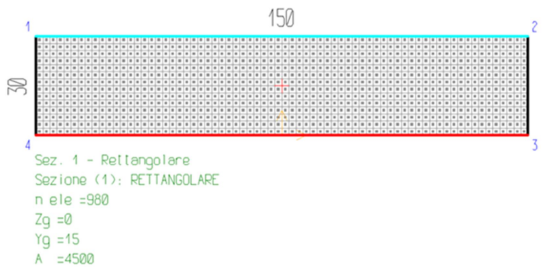


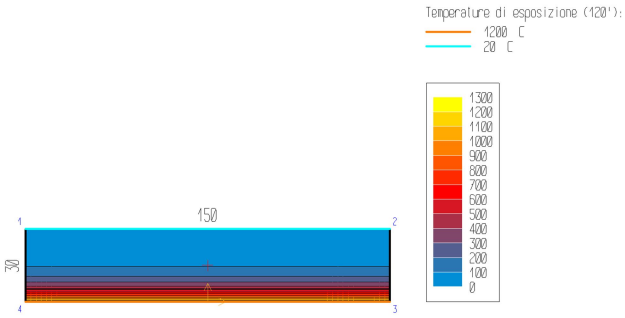
Figura 12: a) Curve tempo-temperatura utilizzate nell'analisi, b) Studio della sezione esposta a incendio su Dolmen.

Per effettuare la verifica a fuoco si è fatto ricorso al modulo ***IS Fuoco* di Dolmen.** Considerando una sezione radiale di galleria 30 cm x150 cm, si è impostato un contorno più lungo a 20 °C, ovvero temperatura ambiente (color ciano in *Figura 13b*), supponendo questa come temperatura di contatto con la roccia, e l'altro contorno della sezione (color rosso) sottoposto a curva di incendio. La trasmissione del calore è supposta avvenire secondo equazione di Fourier, esprimibile come:

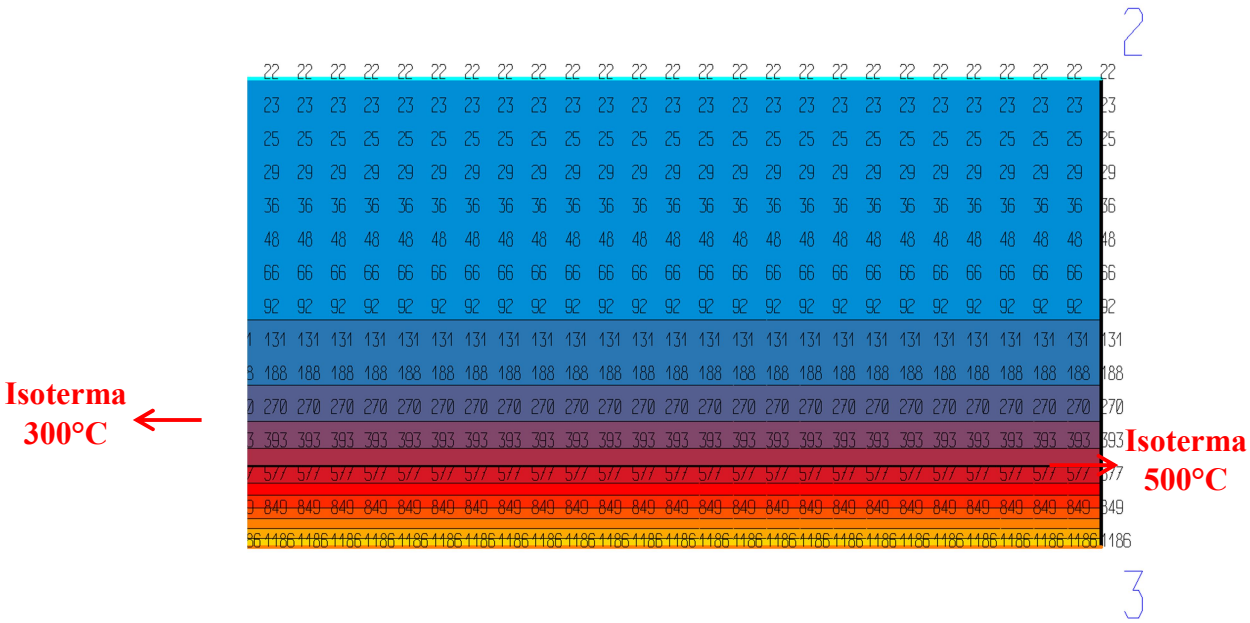
$$\nabla(KT) + Q = \rho c$$

dove K è la conducibilità termica, c è il calore specifico, ρ è la densità, Q è il flusso volumetrico di calore e T è la temperatura.

Un aspetto da non trascurare è stata la costruzione della mesh di elementi per avviare la verifica termica. In questo caso si è optato per un numero di circa 1000 elementi, discretizzazione massima consentita, e un passo minimo della griglia iniziale approssimativamente di 2.12 cm (valore che si è andato poi riducendo date le dimensioni minori della sezione per effetto dello spalling).



a)



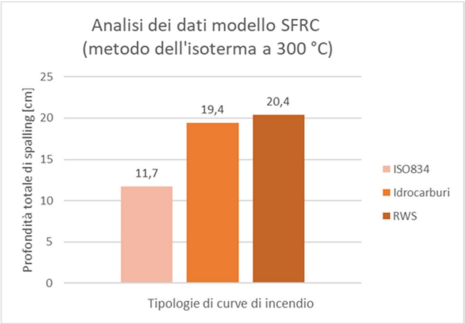
b)

Figura 13: Isoterme per esposizione RWS a tempo t=120 min a) sezione completa, b) dettaglio temperatura nodi.

L'iter operativo è stato effettuare *un'analisi iterativa*, prima con il metodo dell'isoterma a 300 °C e poi con quello dell'isoterma a 500 °C. Si è quindi frazionato il tempo totale di esposizione di 120 minuti in intervalli intermedi di 15 minuti ciascuno, e in ognuno di essi si è andato ad esporre la sezione alle curve di incendio specifiche supponendo però che, in ogni step, la parte di sezione che supera i 300 °C, o i 500 °C in un secondo momento, è completamente danneggiata e non più funzionale, e può essere automaticamente rimossa dall'analisi dei minuti successivi. Così facendo, ad ogni interazione si studia teoricamente una

sezione sempre più ridotta e nuovamente esposta a fuoco, con l'obiettivo di verificare che la sezione di spessore minore ai 120 minuti finali resista staticamente nel modello presentato finora, però con le resistenze del materiale ridotte a causa dell'incremento di temperatura, secondo le leggi prima descritte.

Dai risultati ottenuti, si è visto che per entrambi i metodi delle isoterme applicate, l'andamento dello spalling nel tempo è risultato pressoché lineare e ovviamente maggiore per curve di incendio più severe:

a) 

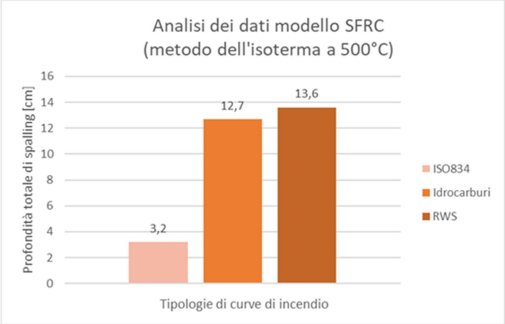
b) 

Figura 14: Profondità di spalling applicando il metodo dell'isoterma: a) a 300°C, b) a 500°C.

Ottenuti gli spessori ridotti a 120 minuti di esposizione, è stato possibile effettuare nuovamente l'analisi statica per il *Modello 1* e *2*. Si è potuto osservare come il metodo dell'isoterma a 300 ° è troppo cautelativo e trascura significativamente quelli che sono i benefici apportati dalle fibre alle alte temperature, infatti la verifica è risultata soddisfatta solo per curva di incendio meno severa, ovvero ISO834. Per tale ragione, si è ripetuta l'analisi con una temperatura dell'isoterma critica di 500 °C, che questa volta ha dato esito delle verifiche statiche positivo per tutte e tre le curve di incendio.

Analisi con le fibre plastiche di polipropilene

Sebbene un quadro definitivo debba ancora essere descritto, gli esperti restano concordi sul fatto che le micro-fibre in polipropilene (PP) sono le più adatte a contrastare lo spalling esplosivo nel calcestruzzo. Tale fenomeno, infatti, è strettamente legato al *contenuto d'acqua* nel calcestruzzo che all'aumentare della temperatura si trasforma in vapore acqueo e data l'impossibilità di allontanarsi dalla matrice cementizia, causa un drammatico aumento di pressione a tal punto da superare la capacità a trazione del calcestruzzo e causare l'espulsione violenta di porzioni del manufatto.

La caratteristica principale delle fibre PP è che sono in grado di ridurre la pressione che causa il processo: è sufficiente un quantitativo di 2 kg/m^3 per far sì che, quando il calcestruzzo fibrorinforzato è riscaldato a circa 160°C, le fibre fondano per formare una rete di vuoti interconnessi che permettono al vapore di attraversarli. A questo si aggiunge poi la formazione di microfratture che aumentano ulteriormente la permeabilità.

Questo processo è alla base del cosiddetto *thermo-hydral process* [9]. Operativamente, il criterio che permette di definire la presenza o meno di spalling è confrontare la legge di pressione nei pori con quella di resistenza a trazione del materiale a ogni step temporale, e quando la prima eccede la seconda la rottura del calcestruzzo è inevitabile. Questo avviene in corrispondenza di una precisa temperatura individuabile dall'intersezione delle due leggi, che può essere utilizzata come valore di isoterma critica per effettuare la medesima analisi iterativa precedente.

In assenza di una formulazione analitica esatta e universale che permetta di calcolare la pressione nei pori al variare della temperatura per materiali FRC, è stata condotta un'analisi di confronto tra la curva di resistenza a trazione del SFRC (ipotesi valida in virtù del fatto che il modesto quantitativo di fibre plastiche non altera significativamente il suo andamento) e diverse curve bibliografiche di *pore pressure* per materiali

fibrorinforzati con fibre polimeriche e caratterizzati da una composizione del calcestruzzo e una resistenza il più possibile affini a quelli della galleria Ragnaia I in questione.

A dimostrazione che l'utilizzo di fibre plastiche PP sposti il punto di inizio spalling a temperature molto elevate, consentendo anche la totale assenza di spalling in molti casi, è risultato di particolare interesse uno studio condotto su calcestruzzi con fibre di polipropilene fibrillate (PPFRC), la cui risposta a fuoco è nota essere peggiorativa rispetto alle fibre in monofilamento [10].

In dettaglio, si è effettuate due analisi:

1. una prima analisi in cui si sono associati diversi valori di pore pressure alle relative temperature decrescenti per profondità maggiori della sezione esposta a curva ISO834, con esito di temperatura di spalling a 600 °C a 20 mm. Effettuando l'analisi iterativa con Dolmen nel modulo IS Fuoco si è ottenuta una sezione finale di 27 cm, che applicata nei modelli di galleria ha dato esito di verifiche statiche soddisfatte.
2. una seconda analisi più semplificativa e cautelativa in cui si sono associati i valori di pore pressure direttamente alle temperature prima della curva termica che si registra sulla superficie (0 mm) e poi del forno della curva ISO834 considerate valida per la porzione di sezione più superficiale dei primi 20 mm (dal momento che la mesh ha tale dimensione degli elementi interni). Ripetendo l'analisi iterativa con Dolmen si è ottenuta una temperatura di spalling di 892 °C e una sezione finale di 29,8 cm. L'analisi statica condotta sempre a resistenze ridotte ha restituito verifiche statiche soddisfatte per entrambi i modelli.

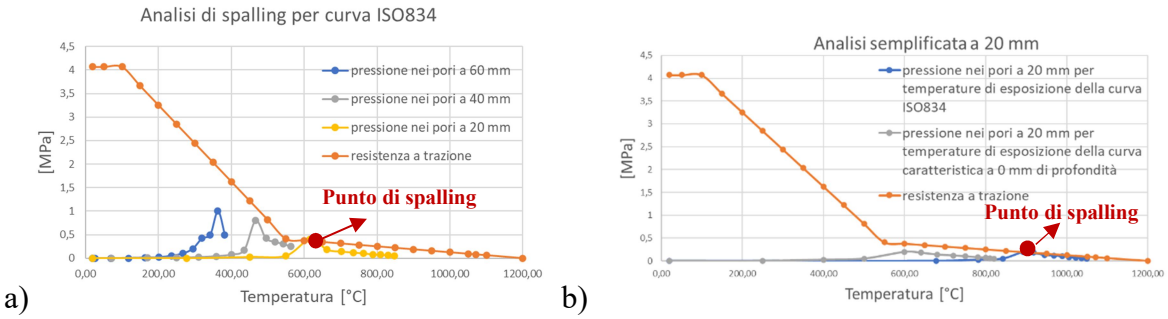


Figura 15: Analisi di spalling per fibre PP: a) a diverse profondità; b) semplificata a 20 mm.

Conclusioni

In conclusione, si può affermare che l'impiego del calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) risponde bene alla necessità di intervenire sullo stato di avanzato deterioramento dei rivestimenti nelle gallerie esistenti in Italia, che richiedono un consolidamento tempestivo ed efficace.

Sebbene le fibre di acciaio sono in grado di garantire un ottimo comportamento a fessurazione, sono in realtà le fibre polimeriche ad assicurare una resistenza a fuoco migliore dal momento che, fondendosi, aumentano la permeabilità e rendendo il calcestruzzo meno vulnerabile al fenomeno di spalling e di conseguenza alla riduzione dello spessore dei rivestimenti. Tale parametro, infatti, è uno strumento efficace per la classificazione del rischio nelle gallerie, una volta valutato lo stato tensionale in caso di sezioni ridotte, soggette a significative variazioni termiche.

Rispetto ai normali calcestruzzi privi di fibre a modeste resistenze, che hanno temperatura di spalling intorno ai 300 °C, o quelli ad alta resistenza ($f_c \approx 60$ MPa) intorno ai 500 °C, questo studio ha dimostrato che SFRC risponde bene staticamente applicando il metodo dell'isoterma a 500 °C, considerando tutte le ipotesi a vantaggio di sicurezza del caso, ma solo l'aggiunta di fibre di polipropilene consente l'innalzamento di temperatura di spalling sino a circa 900 °C, garantendo massime performance a fuoco. Da quanto ottenuto, ne consegue che un metodo di analisi al tempo stesso efficace e cautelativo per studiare anche i calcestruzzi fibrorinforzati è quello dell'isoterma a 500 °C.

BIBLIOGRAFIA

[1] "Linee Guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei FRC" (ultimo aggiornamento 2021), Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
[2] "Linee Guida per la progettazione, messa in opera, controllo e collaudo di elementi strutturali in calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio e polimeriche" (2022), Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
[3] D.M. 17/01/2018 "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni", pubblicato sulla G.U. n.8 – Suppl. Ordinario n.42;
[4] UNI EN 1992-1-1 (2022) "Eurocodice 2: Progettazione delle strutture in calcestruzzo –Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici";
[5] 'Refurbish and static reinforcement of tunnels: innovative construction methods and materials', Martino Gatti[a], Giorgio Giacomin[b], Gilberto Masnaghetti[a], Giuseppe Lunardi[a] ([a] Rocksoil S.p.A., Via Corridoni 13, 20122 Milano, Italy; [b] G&P Intech S.r.l., Via Retrone 39, 36077 Altavilla Vicentina, Vicenza – Italy); XVIII CONVEGNO ANIDIS (Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Simica) ASCOLI PICENO 2019;
[7] 'Influence of fire on temperature gradient and physical-mechanical properties of macro-synthetic fiber reinforced concrete for tunnel linings' R. Serafini, S.R.A. Dantas; R.P. Salvador, R.R. Agra, D.A.S. Rambo, A.F. Berto, A.D. de Figueiredo- Constr. Build. Mater. 214 (2019) 254-268, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819310220?via%3Dihub ;
[8] 'Hydrothermal model for predicting fire-induced spalling in concrete structural systems' M.B. Dwaikat, V.K.R.Kodur - Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan State University, 3580 Engineering Building, East Lansing, MI 48824-1226, USA, Article on Elsevier (2008);
[9] 'A simplified approach for predicting fire resistance of reinforced concrete columns under biaxial bending' Venkatesh Kodur, Nikhil Raut - Department of Civil & Environmental Engineering, Michigan State University, East Lansing, MI 48824-1126, USA, Article on Elsevier (2012);
[10] 'Fire spalling sensitivity of high-performance concrete in heated slabs under biaxial compressive loading' Francesco Lo Monte, Roberto Felicetti, Chiara Rossino - Materials and Structures (2019) 52:14, https://doi.org/10.1617/s11527-019-1318-0;