

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/340417944>

# Incêndio em túneis construídos com concreto reforçado com fibras com função estrutural

Article · April 2020

CITATIONS

0

READS

232

6 authors, including:



**Ronney Rodrigues Agra**

University of São Paulo

17 PUBLICATIONS 77 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Ramoel Serafini**

Universidade São Judas Tadeu

33 PUBLICATIONS 143 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Dimas Alan Strauss Rambo**

University of São Paulo

25 PUBLICATIONS 479 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Marcos Vinicius Martinez Sylverio**

Instituto de Pesquisas Tecnológicas

4 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Spalling of concrete exposed at high temperatures [View project](#)



Quality control of FRC [View project](#)

# Incêndios em túneis construídos com concreto reforçado com fibras com função estrutural

RONNEY RODRIGUES AGRA – ENGENHEIRO CIVIL, MESTRANDO

RAMOEL SERAFINI – ENGENHEIRO CIVIL, DOUTORANDO

MARCOS VINICIUS MARTINEZ SYLVERIO – ENGENHEIRO CIVIL, MESTRANDO

ANTONIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO – ENGENHEIRO CIVIL, PROFESSOR-DOUTOR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL, ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DIMAS ALAN STRAUSS RAMBO – ENGENHEIRO CIVIL, PROFESSOR-DOUTOR

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

ANTONIO FERNANDO BERTO – ENGENHEIRO CIVIL, MESTRE

LABORATÓRIO DE SEGURANÇA AO FOGO E A EXPLOSÕES DO INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

## RESUMO

O concreto reforçado com fibras é utilizado na fabricação de segmentos destinados ao revestimento de túneis. Porém, os requisitos normativos e pré-normativos nacionais e internacionais não apresentam uma abordagem abrangente de projeto para o CRF em situação de incêndio, o que revela a necessidade de investigações a respeito do assunto. O objetivo deste artigo é apresentar uma revisão de estudos sobre os efeitos das elevadas temperaturas nas propriedades mecânicas do CRF para túneis.

## I. INTRODUÇÃO

O uso crescente do concreto reforçado com fibras (CRF) na construção civil e, em especial, em túneis, se deve a razões econômicas e técnicas. Isto se consolidou na área de túneis após a publicação do Boletim 83 da *fib* [1,2], que parametrizou sua utilização para o revestimento de túneis produzidos com anéis segmentados executados com tuneladoras TBM (*Tunnel Boring Machines*) [3]. Essa publicação possui uma

abordagem próxima àquela adotada no Brasil através das práticas recomendadas do IBRACON [4] e vêm sendo base dos textos ora em discussão na ABNT sobre o tema. Nessa abordagem, é fundamental a parametrização do comportamento do CRF através do estabelecimento de equações constitutivas que caracterizem a capacidade resistente do compósito até a fratura da matriz, em conjunto com as resistências residuais pós-fissuração.

Há diversos exemplos históricos de acidentes, em vista do reconhecimento tardio de que as estruturas de concreto devem ser verificadas para a condição de incêndio. Entretanto, requisitos normativos e pré-normativos nacionais e internacionais, bem como códigos-modelo, não apresentam abordagem adequada e abrangente de projeto para o CRF em situação de incêndio, o que pode conduzir a soluções ineficientes, colocando em risco a segurança estrutural nessas condições. A escassez de base normativa para o modelo de projeto em situação de incêndio do CRF e o fato de que as normas e pré-normas atuais – como é o caso da EN 1992-1-2

e *fib Model Code 2010* – estabelecem apenas como deve ser realizado o projeto estrutural do CRF em temperatura ambiente revelam a necessidade de investigações a respeito do comportamento do CRF em situação de incêndio.

Embora os estudos focados no efeito do fogo em túneis sejam escassos na literatura, destaca-se o trabalho realizado por Serafini et al. [5], que avaliou o efeito do fogo nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com macrofibras sintéticas<sup>1</sup> para aplicações tuneleiras. Os resultados mostram que um intenso gradiente de temperaturas é induzido no interior do compósito com a elevação da temperatura. Essa verificação, no entanto, só é possível por meio de ensaios de aquecimento em fornos, com a ação direta de chama, o que permite análises reais de simulação de incêndio para a avaliação pós-incêndio das estruturas de CRF. Dessa forma, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma revisão do estado da arte dos efeitos das elevadas temperaturas em concretos reforçados com fibras para túneis construídos com tuneladoras TBM.

<sup>1</sup> MACROFIBRA DE POLIPROPILENO (BARCHIP48) DE COMPRIMENTO 48 MM, FATOR DE FORMA 67 E MÓDULO DE ELASTICIDADE DE 10 GPa.



## 2. APLICAÇÕES DO CRF EM TÚNEIS TBM

Devido à maior flexibilidade para a produção de elementos pré-fabricados, o CRF elimina ou diminui consideravelmente a necessidade de montagem da armadura convencional, proporcionando ganhos de produtividade e redução do espaço necessário para a fabricação de segmentos destinados ao revestimento de túneis TBM [3]. Esses segmentos são utilizados para compor os anéis que são instalados a cada avanço do equipamento, por meio de atuadores hidráulicos (*jacks*), que exercem forças de empuxo sobre as aduelas do anel anterior.

Esses anéis de revestimento têm sua adequação estrutural garantida pela armadura, que pode ser constituída por sistemas convencionais, pelo reforço exclusivo de fibras ou pelo reforço híbrido composto por fibras e barras de aço. As aduelas pré-moldadas para o revestimento de túneis precisam resistir a esforços nas fases transitórias (desmoldagem, empilhamento, transporte, forças de empuxo e forças de interação com o solo), sendo que a adição de fibras nessas peças acarreta melhoria da ductilidade dos elementos, garantindo a segurança durante a manipulação das peças [3]. Por meio do correto estudo de dosagem das fibras, pode-se evitar o processo de fissuração originado por efeito dinâmico de impactos nas fases anteriores à instalação da aduela em obra.

Dentre as metodologias analíticas de dimensionamento, a Associação Internacional de Túneis e do Espaço Subterrâneo [2] (em inglês *International Tunneling and Underground Space Association*) apresenta o método ana-

lítico de cálculo e o método viga-mola para determinar os esforços, mediante análises eficientes por meio de programas de elementos finitos. Os carregamentos devem ser analisados de forma cuidadosa para alcançar segurança na estabilidade de túneis, inclusive a capacidade resistente residual após a ocorrência de um potencial incêndio. Nesse sentido, é importante entender a influência da temperatura e da ação do incêndio no CRF, de modo a realizar uma verificação bem fundamentada.

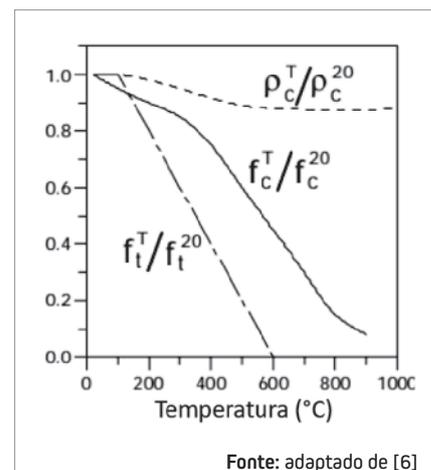
## 3. O EFEITO DA TEMPERATURA E DO INCÊNDIO NO CRF

Em geral, o comportamento da matriz de concreto do CRF sofre alterações com a temperatura de maneira similar àquelas verificadas para o concreto simples. Entre as propriedades mecânicas do concreto, a resistência à tração apresenta o comportamento mais sensível à temperatura (Figura 1). De forma geral, após o resfriamento e em relação ao concreto aquecido, a resistência à tração é maior para concreto com sílica ativa; decresce rapidamente com a temperatura em concreto de alto desempenho (principalmente para  $T \geq 600^{\circ}\text{C}$ ); é pouco afetada pelo tipo de resfriamento (lento e controlado no forno ou rápido na água); e é próxima da resistência a quente em concreto de alta resistência com sílica ativa [6]. No entanto, esta condição de variação comportamental está associada à garantia de que não haja lascamento explosivo, o que deve ser controlado por metodologia específica.

O comportamento pós-fissuração do CRF, quando submetido a elevadas temperaturas, varia conforme o tipo e o teor de fibra utilizado, a tem-

peratura de exposição e o tempo de exposição. A principal preocupação é quanto à sua resistência residual à tração, que pode ser severamente prejudicada em temperaturas acima de  $300^{\circ}\text{C}$ . O concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) apresenta menores reduções na resposta pós-pico para temperaturas acima de  $400^{\circ}\text{C}$ , enquanto o concreto reforçado com fibras poliméricas (CRFP) apresenta maiores reduções de resistência à tração pós-fissuração e tenacidade em razão da degradação das fibras.

Por meio da utilização do ensaio preconizado pela EN 14651, Serafini et al. [5] avaliaram a resistência residual à tração na flexão do CRFP submetido ao fogo. Os prismas de CRFP ( $8 \text{ kg/m}^3$  de macrofibras poliméricas<sup>2</sup>) foram submetidos ao ensaio de fogo direto, em aquecimento unifacial a temperaturas de até  $1100^{\circ}\text{C}$  por 120 minutos, reproduzindo a curva H (hidrocarbonetos), o que tornou a simulação



► **Figura 1**  
Redução da densidade e resistência à compressão e à tração do concreto em função da temperatura

<sup>2</sup> MACROFIBRA DE POLIPROPILENO (BARCHIP48) DE COMPRIMENTO 48 MM, FATOR DE FORMA 67 E MÓDULO DE ELASTICIDADE DE 10 GPa.

mais próxima da realidade de incêndio em túneis. Os resultados demonstram que o CRFP não apresenta resistência à tração na flexão significativa após exposição ao fogo (Figura 2), o que está relacionado com a fusão (170°C) e ignição (400-500°C) das fibras poliméricas na região de tração do corpo de prova, especialmente nos primeiros 12 cm a partir da face afetada.

Os valores de resistência à tração da matriz cimentícia reduziram, em média, 96,6% em relação à temperatura ambiente, o que está associado com a decomposição dos produtos de hidratação da pasta de cimento, redução da área específica dos hidratos, aumento no volume total de poros e mudanças na distribuição de poros na pasta de cimento. Já as reduções apresentadas nos valores de resistência à tração pós-fissuração no estado limite de serviço (ELS) – em torno de 85,3% – e estado limite último (ELU) – em torno de 94,1% – estão relacionadas a mudanças mi-

croestruturais na pasta de cimento e, principalmente, na deterioração das fibras. Verificou-se ainda que a densidade e o módulo de elasticidade dinâmico foram reduzidos devido à influência de fissuras no corpo de prova, redução no volume de sólidos da pasta, mudanças físico-químicas na matriz e degradação das fibras [5].

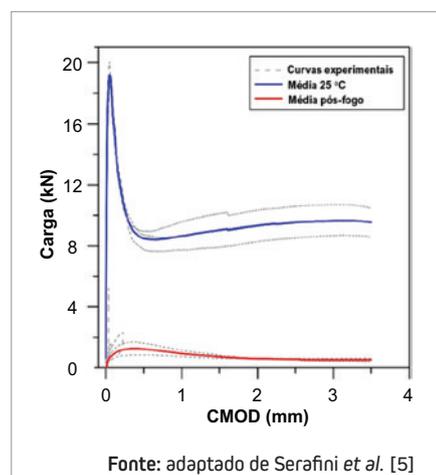
Em 600°C, as reduções em termos de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram, em média, de 64,9% e 96,6%, respectivamente, quando comparados aos valores obtidos na temperatura ambiente. O modelo experimental proposto por Serafini et al. [5] indica que as taxas de redução de resistência à compressão do CRFP são 0,32; 0,20; 0,11; 0,07 e 0,07 MPa/min para as distâncias de 3, 6, 9, 12 e 15 cm da face aquecida diretamente pelo fogo, respectivamente. Em relação ao módulo de elasticidade, as taxas de redução são 0,2; 0,15; 0,08; 0,05 e 0,05 GPa/min para as distâncias de 3, 6, 9, 12 e 15 cm, respectivamente. Esse modelo consiste em uma abordagem experimental alternativa para a avaliação pós-incêndio de estruturas de túneis construídas com CRFP.

As propriedades mecânicas do CRFP exposto a elevadas temperaturas também foram investigadas em estudo conduzido por Rambo et al. [7]. O ensaio de Duplo Puncionamento<sup>4</sup> foi aplicado para avaliar a resistência à tração residual do compósito (8 kg/m<sup>3</sup> de macrofibras poliméricas<sup>5</sup>) exposto a temperaturas de até 600°C em um forno elétrico industrial (*Inforgel Company*). Notou-se que a resistência à tração do CRFP reduz-se gradualmente com o aumento da temperatura e a resposta pós-fissuração varia significa-

tivamente com a temperatura (Figura 3). O efeito da temperatura na redução da resistência mecânica e no módulo de elasticidade do CRFP se apresentou de maneira similar ao que ocorre no concreto convencional.

O efeito da temperatura não foi significativo até 200°C, visto que as amostras de CRFP apresentaram valores de resistência residual similares aos da temperatura ambiente. Entretanto, a partir de 400°C, a resistência à tração pós-fissuração reduziu-se significativamente (em torno de 54%) quando comparada à temperatura ambiente. Os autores citam que o ensaio de Duplo Puncionamento não apresentou resposta conclusiva após exposição a altas temperaturas devido à degradação da superfície da amostra, somada à punção que resulta no esmagamento da matriz deteriorada. Apesar disso, o gradiente de temperatura no interior das amostras pode ter preservado parte do material (matriz ou fibras) e, conseqüentemente, parte da resistência pós-fissuração do compósito.

Após exposição à temperatura de 600°C, o valor de densidade de consumo de energia (kJ/m<sup>3</sup>) para uma deformação de 0,2% foi, em média, 89,9% menor que o valor obtido à temperatura de 25°C. Também em 600°C, as reduções em termos de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram estatisticamente semelhantes aos valores obtidos no estudo de Serafini et al. [5]. A perda significativa de resistência residual à compressão a partir de 300°C está relacionada com a incompatibilidade entre as deformações térmicas do agregado e da pasta, a decomposição dos produtos de hidratação do compósito e a degradação



**Figura 2**  
Curvas Carga-CMOD<sup>3</sup> para o CRFP antes e após exposição ao fogo (curva de hidrocarbonetos)

<sup>3</sup> CMOD – *CRACK MOUTH OPENING DISPLACEMENT* – ABERTURA DA FISSURA NO ENTALHE CENTRAL DA PEÇA, MEDIDA NO ENSAIO NORMALIZADO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DE CPs DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS.

<sup>4</sup> CPs DE 150 x 150 MM (DIÂMETRO X ALTURA). DISCOS DE CARGA DE DIÂMETRO 37,5 MM.

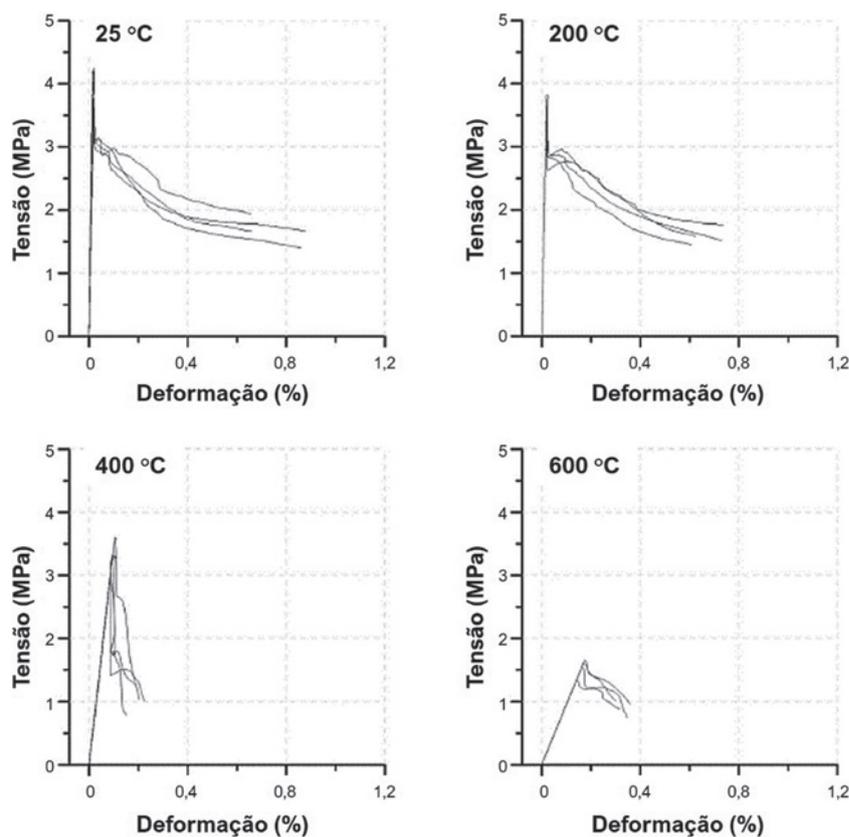
<sup>5</sup> MACROFIBRA DE POLIPROPILENO (BARCHIP48) DE COMPRIMENTO 48 MM, FATOR DE FORMA 67 E MÓDULO DE ELASTICIDADE DE 10 GPa.

das fibras sintéticas. A redução do módulo de elasticidade está relacionada com o aumento da porosidade do compósito, justificada pelo intenso processo de decomposição dos produtos de hidratação, principalmente entre a faixa de temperatura compreendida entre 150 e 450°C [7].

Agra et al. [8] evidenciaram que o ensaio DEWS<sup>6</sup> é capaz de caracterizar o CRFA (35 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço<sup>7</sup>) quanto à resistência à tração residual, mesmo em condições severas, como no caso de amostras submetidas à ação do fogo. A avaliação ocorreu sem haver prejuízos aos valores obtidos como resposta do material, visto que não foram constatados danos no concreto em condições de contato. Os autores citam que os valores de resistência à tração da matriz cimentícia após exposição ao fogo foram, em média, 71,1% menores que os obtidos em temperatura ambiente, o que está associado a desidratação de produtos da pasta de cimento, perda de capacidade de reforço das fibras e mudanças na distribuição dos poros.

Já, os valores de resistência à tração pós-fissuração no ELS (COD = 0,5 mm) e no ELU (COD = 2,5 mm) foram, em média, 64,1% e 59,8% menores que os obtidos em temperatura ambiente (Figura 4). Esses efeitos estão relacionados com mudanças físico-químicas na matriz, mudanças microestruturais do compósito e degradação das fibras utilizadas como reforço.

Em um estudo realizado por Serafini et al. [9], os resultados obtidos por meio do ensaio DEWS para o CRFA (35 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço<sup>8</sup>) exposto a 600°C também mostram que a resistência à tração da matriz cimentícia e a resistência à tração residual no ELS e ELU são significativamente afetadas. Os valores de



Fonte: adaptado de Rambo et al. [7]

### ► Figura 3

Curvas tensão-deformação obtidas por meio do ensaio de Duplo Puncionamento de corpos de prova de CRFP submetidos a diferentes temperaturas

resistência à tração da matriz cimentícia, após exposição a 600°C, foram, em média, 82,5% menores que os obtidos em temperatura ambiente. Já, os valores de resistência à tração pós-fissuração no ELS (COD = 0,5 mm) e no ELU (COD = 2,5 mm) foram, em média, 74,3% e 72,2% menores que os obtidos em temperatura ambiente.

Os processos de oxidação e corrosão das fibras de aço começam a acontecer em 500 e 700°C, respectivamente. Assim, as fibras de aço expostas a elevadas temperaturas se tornam frágeis e facilmente danificadas, devido aos efeitos de redução da área transversal e aumento significativo no tamanho do grão do aço. Logo, por volta de 700°C, o compósito não apresenta mais ganho de ductilidade, visto que as fibras passam a não mais con-

tribuir para melhorar o comportamento pós-fissuração do CRF.

Esses resultados [5,7,8,9] constituem referências importantes para a avaliação ao fogo de aduelas pré-moldadas de CRF no revestimento de túneis. Considerando que a maior contribuição das fibras ocorre no estágio pós-fissuração do compósito, propriedades como resistência à tração residual são severamente afetadas em elevadas temperaturas, devido a degradação das fibras. Esse fator deve ser levado em conta na fase de projeto, a fim de garantir a segurança estrutural dos elementos de CRF, especialmente quando há considerável demanda por esforços de flexão.

Vale ainda ressaltar que, na maioria dos casos, a espessura dos elementos de CRF está acima dos 15 cm utilizados na maioria das análises [5,8,9] e as

<sup>6</sup> DEWS = DOUBLE EDGE WEDGE SPLITTING, ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPO DE PROVA COM DUPLO CORTE EM CUNHA.

<sup>7,8</sup> FIBRA DE AÇO DRAMIX 3D 80/60BG DE COMPRIMENTO 60 MM E FATOR DE FORMA 80.

solicitações em serviço são menores que as transitórias. Assim, mesmo se houver deterioração significativa do material na face exposta ao fogo, isso não significa necessariamente a perda das condições de estabilidade do revestimento do túnel, visto que há possibilidade das camadas interiores fornecerem condições de suporte suficientes [5]. Isto se deve ao fato do dimensionamento dos segmentos estar correlacionado a condições críticas transitórias, como o empuxo dos atuadores, o que faz com que as condições de serviço sejam atendidas com grande margem de segurança na grande maioria dos casos.

#### 4. GRADIENTE DE TEMPERATURA NO CRF EXPOSTO AO FOGO

As propriedades mecânicas do CRF são afetadas em função da distância até a face aquecida diretamente pelo fogo, visto que é induzido no compósito um gradiente de temperatura em um cenário de incêndio, gerando assim diferentes camadas de desidratação da pasta de cimento e microfissuras. Dessa maneira, qualquer avaliação das propriedades mecânicas globais de elementos de CRF expostos ao fogo

resulta na resposta mecânica média das camadas afetadas. Sabe-se que a diferença de temperatura observada na seção de um material depende de alguns fatores como a gravidade do incêndio em termos de duração e temperaturas máximas, a rapidez do início do incêndio, a forma da seção e suas propriedades térmicas [6]. Entretanto, poucos são os estudos que enfatizam o gradiente de temperatura no CRF exposto ao fogo e seu impacto nas propriedades mecânicas.

No estudo realizado por Serafini et al. [5], verificou-se que, à medida que o tempo de exposição do CRFP ao fogo aumenta, a temperatura interna do concreto aumenta em taxas diferentes para cada distância avaliada. Além disso, a temperatura interna do concreto diminui rapidamente em maiores distâncias do fogo, como pode ser comprovado na Figura 5, que apresenta os valores de regressão linear (Figura 5a) e taxas de aquecimento interno em função da distância (Figura 5b), para os resultados experimentais obtidos neste estudo. Os resultados indicam que a taxa de aquecimento interno do CRFP é praticamente constante para uma determinada profundidade e é função apenas da distância do fogo, como apontado na Figura 5a.

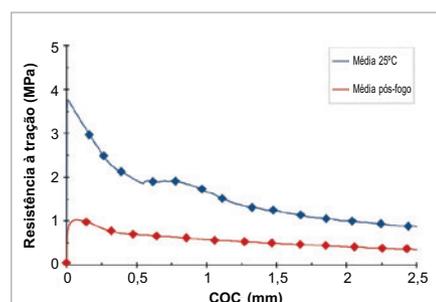
Notou-se ainda que os valores de gradiente de temperatura tendem a aumentar de forma quase linear com a duração do incêndio e reduzir em função da distância da face afetada diretamente pelo fogo. A baixa condutividade térmica do concreto é um dos principais fatores associados ao aumento do gradiente de temperatura em função do tempo. À medida que o gradiente de temperatura no concreto aumenta, as tensões de origem térmica provocam danos na forma de fissuras no compósito. Isto reforça a

necessidade de controle do lascamento explosivo a partir de uma proteção passiva, de modo a garantir a integridade do revestimento e uma capacidade resistente residual do conjunto que garanta a estabilidade da estrutura.

#### 5. DINÂMICA DO INCÊNDIO EM TÚNEIS

Incêndios em túneis, como o caso do Eurotúnel em 1996 (Figura 6), enfatizaram a preocupação quanto à segurança de estruturas de concreto submetidas ao fogo, principalmente tratando-se do concreto de alta resistência. Na maioria dos casos de incêndios em túneis, foram atingidas temperaturas de até 1100°C. Nesta situação, a elevação da temperatura produz mudanças significativas na composição química da matriz cimentícia e na microestrutura do compósito, que são conhecidas por afetar significativamente o comportamento mecânico do CRF. Por isso, o projetista deve estar atento à verificação ante as ações de caráter excepcional, como ações devidas ao incêndio, reconhecidas pelo Eurocode 1 como uma situação acidental que compromete o estado limite de serviço (ELS) da estrutura e requer apenas verificações no estado limite último (ELU), associados com colapso estrutural ou outras formas semelhantes de falha estrutural, como falha por deformação excessiva.

O estudo do comportamento de segmentos pré-moldados (aduelas) no revestimento de túneis em uma situação de incêndio envolve algumas variáveis, inclusive relacionadas com a interação solo-estrutura, durante a exposição ao fogo, além da própria degradação dos elementos, cuja espessura é relativamente pequena (250 a 500 mm), o que pode comprometer a segurança estrutural.



Fonte: adaptado de Agra et al. [8]

► **Figura 4**  
Curvas de resistência à tração média por abertura de fissura (COD) do CRFA na temperatura ambiente e após exposição ao fogo

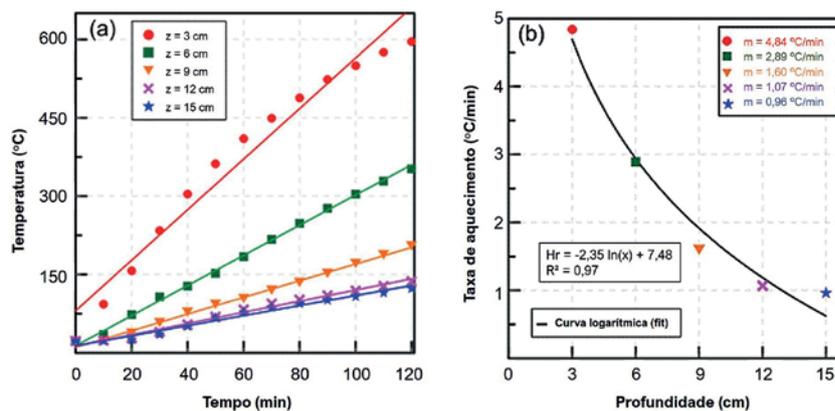


Apenas uma camada relativamente fina do revestimento do túnel de concreto é termicamente danificada, uma vez que a temperatura não aumenta além de 100°C a 140 mm de profundidade e além de 500°C a 50 mm de profundidade [5]. Geralmente, as primeiras fissuras aparecem após 31 minutos de exposição ao fogo e, após 60 minutos, todo o revestimento está fissurado. A formação e o desenvolvimento de fissuras são benéficos para a estrutura, pois, reduzindo a rigidez geral da estrutura, também reduz as reações causadas pela expansão térmica diferencial, atenuando seus efeitos [10].

O estudo realizado por Lilliu e Meda [10] descreve um possível procedimento para prever o comportamento de um túnel sob uma carga de incêndio, onde a interação com o solo, o efeito da expansão térmica e o dano material muitas vezes não são levados em consideração pelos códigos. Desta forma, tal procedimento pode ser usado para o projeto de incêndio de túneis. Apesar de toda fissuração, a estabilidade estrutural do túnel pode ser garantida por até 120 minutos de duração do fogo. Esse tipo de análise requer o uso de um código de elementos finitos não lineares adequado, que considere a interação solo-estrutura, comportamento de materiais não lineares e fissuras no concreto, dependência térmica das propriedades do material e acoplamento entre o problema térmico e mecânico. Dessa forma, parametrizações do comportamento como as descritas no item 3 são fundamentais.

## 6. COMENTÁRIOS FINAIS

A grande necessidade da sociedade brasileira para a construção de túneis ocorre com uma carência de referências nacionais e internacionais



Fonte: adaptado de Serafini et al. [5]

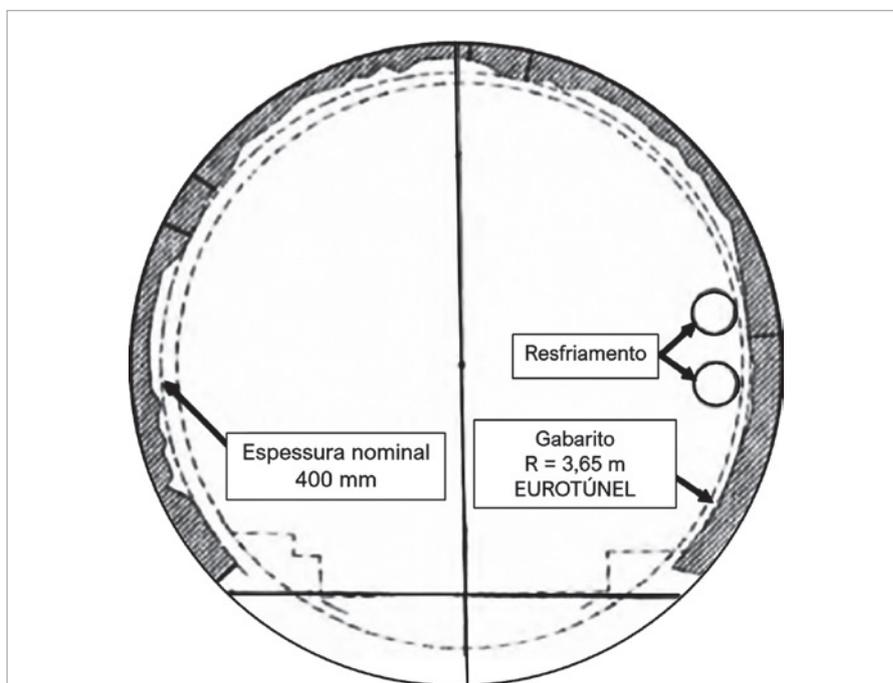
### ► Figura 5

Taxa de aquecimento interno do concreto:

(a) regressão linear; (b) valores de taxa de aquecimento

que permitam tratar o CRF sujeito a altas temperaturas de forma adequada para verificações de projeto, o que pode ocasionar resultados ineficientes, que coloquem em risco a segurança estrutural. Assim, a carência de base normativa sinaliza a necessidade de aprofundamento de estudos

no que concerne a requisitos, métodos de ensaio e procedimentos para projeto de estruturas de CRF quando submetidas à ação do fogo, especialmente no que se refere à caracterização do comportamento do material e a obtenção de equações constitutivas confiáveis para serem aplicadas nos



Fonte: adaptado de [6]

### ► Figura 6

Danos causados pelo fogo em uma seção típica do revestimento de concreto do túnel localizado no Canal da Mancha

modelos de previsão de comportamento. Em um cenário de incêndio em túneis um gradiente de temperatura é induzido no compósito, gerando as-

sim diferentes camadas afetadas com propriedades mecânicas distintas, de forma que o comportamento global da aduela consiste na resposta média

dessas camadas. Dessa forma, o conhecimento da influência da temperatura no comportamento do material é essencial a essas verificações. 

## ▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB. Precast tunnel segments in fibre-reinforced concrete. State-of-the-art report. Bulletin 83. Switzerland, 2017.
- [2] INTERNATIONAL TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACEY TECHNOLOGY – ITA. ITAtech Guidance for precast fibre reinforced concrete segments – Vol. 1: Design aspects. ITAtech Activity Group Support. ITAtech Report no. 7. April. 2016..
- [3] DE LA FUENTE, A.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D.; GALO BARDES, I. Projeto de segmentos para obras de túneis com tuneladora utilizando concreto com fibras. Concreto & Construções. Ed. 88. São Paulo, 2017.
- [4] Prática Recomendada IBRACON/ABECE - Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras. CT 303 – Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras. 2016.
- [5] SERAFINI, R.; DANTAS, S.R.A.; SALVADOR, R.P. ; AGRA, R.R. ; RAMBO, D.A.S.; BERTO, A.F.; FIGUEIREDO, A.D. Influence of fire on temperature gradient and physical-mechanical properties of macro-synthetic fiber reinforced concrete for tunnel linings. Construction and Building Materials, 2019, v. 214, 254-268.
- [6] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. fib Bulletin 46, Fire design of concrete structures - structural behaviour and assessment, State-of-art report. Lausanne, Switzerland, 2008.
- [7] RAMBO, D. A. S.; BLANCO, A.; DE FIGUEIREDO, A. D.; DOS SANTOS, E. R. F.; TOLEDO, R. D.; GOMES, O. D. F. M. Study of temperature effect on macro-synthetic fiber reinforced concretes by means of Barcelona tests: An approach focused on tunnels assessment. Construction and Building Materials, 2018, 158, 443-453.
- [8] AGRA, R. R.; SERAFINI, R.; FIGUEIREDO, A. D.; BERTO, A. F. Avaliação dos efeitos do fogo na resistência à tração residual do concreto reforçado com fibras de aço por meio do ensaio DEWS (Double Edge Wedge Splitting). In: 5th IBERIAN-LATIN-AMERICAN CONGRESS ON FIRE SAFETY. Porto, Portugal, 2019.
- [9] SERAFINI, R.; AGRA, R.R.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A.D. The effect of elevated temperatures on the tensile properties of steel fiber reinforced concrete by means of double edge wedge splitting (DEWS) test: preliminary results. 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - FraMCoS-X. Bayonne, France, 2019.
- [10] LILLIU, G.; MEDA, A. Nonlinear Phased Analysis of Reinforced Concrete Tunnels Under Fire Exposure Article. Journal of Structural Fire Engineering, 2013, v. 4, n. 3.

