

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/324544246>

Concreto reforçado com fibras em situação de incêndio

Article in *Concrete Construction - World of Concrete* · April 2018

CITATIONS

21

READS

605

3 authors:



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



Antonio D. Figueiredo

University of São Paulo

183 PUBLICATIONS 1,627 CITATIONS

SEE PROFILE

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



Quality control of FRC [View project](#)



Quality control of fiber reinforced concrete [View project](#)

Concreto reforçado com fibras em situação de incêndio

RAMOEL SERAFINI – ENGENHEIRO CIVIL, MESTRANDO

DIMAS ALAN STRAUSS RAMBO – ENGENHEIRO CIVIL, PROFESSOR NA UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU E PESQUISADOR DE PÓS-DOUTORADO

ANTONIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO – ENGENHEIRO CIVIL, PROFESSOR ASSOCIADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

I. INTRODUÇÃO

Concretos reforçados com fibras (CRF) são, por definição, compósitos produzidos a partir de cimento hidráulico, agregados de diferentes dimensões e reforço fibroso (contínuo ou descontínuo). Hoje, a perspectiva de aplicação deste “novo material para estruturas”, definição dada pelo *fib Model Code 2010*, se estende a diversos elementos estruturais, entre os quais podem ser citados: pórticos, lajes, vigas, pilares, estacas, aduelas de túneis, concreto projetado, concreto pré-moldado, entre outros.

Sabe-se que a garantia da segurança estrutural e a preservação do bem social são princípios básicos da engenharia.

Neste contexto, torna-se particularmente interessante o estudo do comportamento do CRF frente a vários aspectos, dentre os quais deve-se destacar seu comportamento frente ao fogo. Dependendo da intensidade do fogo, tanto o concreto quanto o reforço, têm suas propriedades mecânicas diminuídas, uma vez que a elevação da temperatura afeta a microestrutura de ambos os materiais. O desenvolvimento das temperaturas no CRF, por sua vez, dependerá do cenário de incêndio propiciado pela estrutura em questão.

Frequentemente, curvas nominais de incêndio, representadas por equações simplificadas, são utilizadas para padronizar as temperaturas em testes reais de resistência ao fogo e simulações. Dentre as principais curvas nominais presentes na bibliografia pode-se citar a curva-padrão (*standard curve*) para incêndio de materiais celulósicos; a curva “H” (*hydrocarbon curve*) para incêndio em hidrocarbonetos; e a curva de incêndio externo (*external fire curve*). A Figura 1 apresenta as diferenças entre as principais curvas de incêndio.

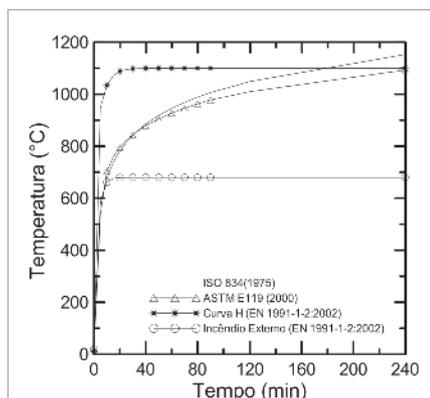
Apesar da existência de testes de resistência ao fogo e curvas padrão de incêndio, as normas atuais carecem de critérios técnicos para a avaliação do comportamento dos CRF quando submetidos a este tipo de condição. Além disso, não abordam a implicação do incêndio na segurança estrutural do CRF

nem apresentam modelos de previsão de comportamento, devido à falta de estudos específicos sobre o assunto [1, 2]. A utilização de CRF no revestimento de túneis, por exemplo, apesar de prevista, tem recebido pouca atenção quanto à avaliação do efeito do incêndio nas propriedades mecânicas residuais (pós-incêndio) da estrutura [2].

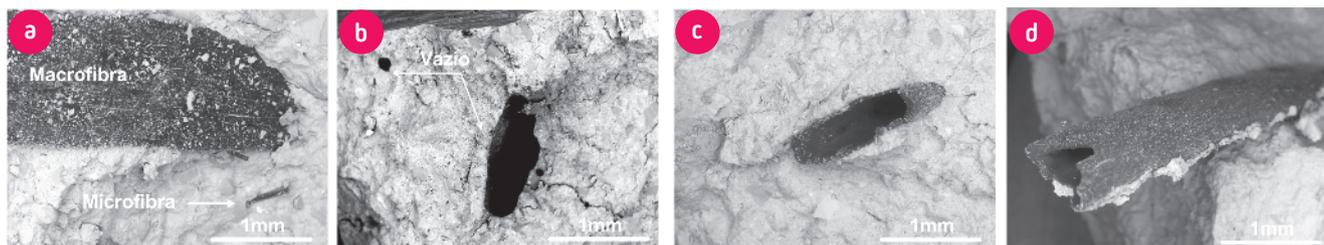
Este conjunto de fatos evidencia, portanto, a necessidade de trabalhos que tratem do comportamento mecânico de CRF distintos em situação de incêndio e da elaboração e validação de modelos de previsão de comportamento para este tipo de estrutura. No presente trabalho, são apresentadas as principais alterações dos componentes do CRF que afetam o comportamento global do compósito durante e após sua exposição ao fogo.

2. MATRIZ CIMENTÍCIA E AGREGADOS

As características da matriz afetam o comportamento dos compósitos e, portanto, podem gerar alterações significativas do comportamento do CRF. O aumento da temperatura produz significativas alterações na composição química e microestrutura da pasta de cimento Portland endurecida. Conforme há o aumento da temperatura, a água livre presente no concreto é expelida até a temperatura de cerca de 100°C. Em temperaturas



► **Figura 1**
Principais curvas de incêndio padronizadas existentes na literatura (Fonte: autores)



► **Figura 2**

Interface entre macrofibra sintética e matriz, sendo (a) temperatura ambiente e após aquecimento até 400°C em diferentes zonas do CRMFS: (b) Zona 1 (c) Zona 2 (d) Zona 3 (adaptado de [6])

superiores, inicia-se a liberação da água combinada dos produtos de hidratação do cimento Portland, ocasionando sua decomposição, que se estendem até cerca de 800°C, com a descarbonatação do carbonato de cálcio, geralmente sob a forma de calcita. Os principais produtos que desidratam são: etringita (~100°C), acompanhada do monossulfato (faixa extensa entre ~50°C e ~800°C), portlandita (~450°C) e o silicato de cálcio (C-S-H), que desidrata em uma longa faixa de temperaturas (50°C até 600°C ou mais) devido à perda de água interlamelar e desidroxilação [3]. Como resultado dessas alterações químicas e microestruturais, o concreto de cimento Portland tem, em geral, suas propriedades mecânicas impactadas negativamente. As principais alterações experimentadas pela matriz cimentícia após exposição ao fogo são: fissuração, deformação excessiva, redução da resistência à compressão, desintegração da pasta endurecida, perda de aderência entre agregados e pasta, além de possível fragmentação explosiva.

O comportamento do concreto quando submetido a elevadas temperaturas é altamente dependente do tipo de agregado presente em sua composição. Agregados silicosos (contendo quartzo) são muito comumente utilizados na construção civil. O quartzo, por sua vez, apresenta um aumento de volume devido à transformação cristalina do α -quartzo (trigonal) para β -quartzo (hexagonal) em torno de 575°C. Esses processos de expansão-retração causam microfissurações na

matriz cimentícia e agregados, os quais afetam a integridade da estrutura. A maioria dos agregados não silicosos, como o calcário, é estável até os 600°C-650°C. Agregados especiais, como argilas expandidas, vermiculitas, perlita expandida e aluminas, em geral, apresentam coeficientes de expansão térmica mais próximos e até compatíveis com a pasta de cimento. Isto faz com que a taxa de perda de resistência residual (pós-incêndio) seja menor em concretos contendo este tipo de agregados, em comparação a concretos com agregados convencionais.

3. PROPRIEDADES DAS FIBRAS E DA INTERFACE FIBRA-MATRIZ

As fibras mais comumente utilizadas no mercado são as fibras de aço e macrofibras poliméricas. No caso das fibras de aço, o aço encruado tipicamente utilizado nas fibras A1 (ABNT NBR 15530:07), mais comuns no mercado, pode perder encruamento com a exposição a temperaturas acima de sua temperatura de recristalização [4], ou seja, em torno de 500°C. O processo de recristalização afeta diretamente as propriedades de resistência e ductilidade da fibra, alterando suas propriedades e comportamento sob esforços de tração.

As macrofibras poliméricas são compostas majoritariamente por fases amorfas somadas a certo grau de cristalinidade conferido pelo processo produtivo de extrusão e alongamento. Essa cristalinidade é responsável diretamente pelas propriedades mecânicas da fibra

[5]. Uma vez que o grau de cristalinidade é afetado diretamente pelas cargas térmicas, a elevada temperatura também afeta as propriedades das macrofibras poliméricas. Por exemplo, a temperatura de fusão de fibras de polipropileno é de cerca de 160°C [4]. Logo especial atenção deve ser dada para concretos reforçados com macrofibras de polipropileno, visto que a sua degradação, mesmo que parcial, pode comprometer a capacidade resistente da estrutura em temperaturas inferiores ao que ocorre para fibras de aço. Como o comportamento pós-fissuração é fortemente influenciado pelas propriedades mecânicas das fibras, é importante parametrizar o grau de dano a que as fibras estão sujeitas em função de sua temperatura de exposição no interior do concreto.

Além disso, faz-se necessária a simulação dos mecanismos que envolvem as fibras e sua interação com a matriz cimentícia para caracterização da carga de pico e processo de deslizamento-arrancamento da fibra no CRF. Estas alterações podem vir a gerar alterações significativas da resistência e energia de arrancamento das fibras, culminando em alterações no comportamento global do compósito. O ensaio mais utilizado para esta caracterização é o ensaio de arrancamento (*pullout*), que busca identificar alterações na interface fibra-matriz através da determinação das cargas associadas ao arrancamento. Os resultados deste tipo de ensaio podem ser utilizados para refinar modelos computacionais de

previsão de comportamento do CRF. Estudos em todo o mundo buscam avaliar a influência de parâmetros, tais como: tipo da fibra, tipo da matriz, inclinação e comprimento embebido na dinâmica de interação fibra-matriz. Entretanto, esta caracterização tem se restringido a concretos em condições normais de temperatura, evidenciando a lacuna técnico-científica nesta área do conhecimento. Já avaliações qualitativas da interface entre fibra e matriz cimentícia através de imagens de microscopia podem ser encontradas na literatura [6]. A Figura 2 apresenta avaliação por microscopia eletrônica de varredura da interface entre macrofibras sintéticas e matriz cimentícia em condições normais e após o aquecimento a 400°C para a superfície do corpo de prova (Zona 1) e dois pontos internos ao espécime (Zona 2 e Zona 3).

4. PROPRIEDADES DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

O estudo das propriedades e do comportamento do concreto reforçado com fibras de aço e macrofibras poliméricas frente às elevadas temperaturas é um assunto ainda em desenvolvimento [6-9]. A grande maioria dos trabalhos publicados

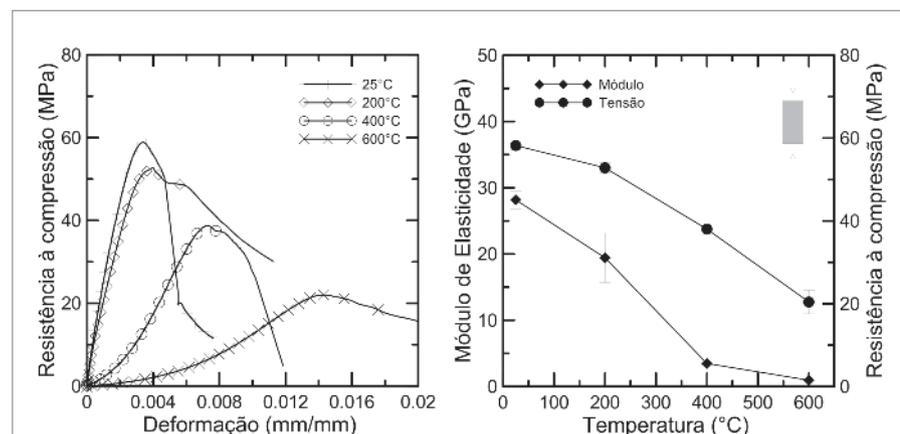
trata sobre a parametrização das características de concretos com fibra de aço. Trabalhos utilizando macrofibras poliméricas, por exemplo, tendem a ser mais escassos, porém não menos importantes, uma vez que as macrofibras poliméricas são degradadas em temperaturas mais baixas, diminuindo o volume de reforço do elemento e podendo comprometer a segurança do elemento estrutural.

As principais propriedades de interesse do CRF que são afetadas pelas elevadas temperaturas são: a resistência à compressão; a resistência à tração; o módulo de elasticidade; e a capacidade de absorção de energia, tanto antes quanto depois do incêndio.

A resistência à compressão começa a ser fortemente afetada a partir dos 300°C [6-8]. Em temperaturas desta magnitude são reportadas reduções acentuadas nos valores de resistência. Ao atingir temperaturas acima de 500°C, a taxa de perda de resistência à compressão residual tende a decrescer [7]. Para exemplificar as ordens de grandeza desta redução, pode-se tomar como exemplo compósitos reforçados com fibras de aço, com reduções que chegam a 41% para a temperatura de 400°C e a 69% para a temperatura de

600°C, quando comparadas à temperatura ambiente [9]. Já, para concretos reforçados com macrofibras poliméricas e similar resistência da matriz, as reduções foram da mesma ordem de grandeza em testes similares: 34,6% para a temperatura de 400°C e 64,9% para a temperatura de 600°C [6]. O módulo de elasticidade também é reduzido rapidamente com o aumento da temperatura [6-8] e este processo tem relação direta com a redução de volume de sólidos da pasta de cimento. A ordem de grandeza dessas reduções é da ordem de 80% para temperatura de 400°C e 95% para temperatura de 600°C [6,8]. Quando a temperatura excede os 600°C, a perda do módulo de elasticidade do compósito desacelera com o aumento da temperatura [8]. A Figura 3 apresenta, em forma de gráficos, as reduções de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

A resposta pós-fissuração dos CRF é fundamental para seu comportamento estrutural. Quando os CRF são expostos a elevadas temperaturas, o comportamento pós-fissuração é afetado por três fatores: a temperatura de exposição, o tipo de fibra utilizada e o tempo de exposição. Para todas as temperaturas, a resposta do compósito em termos de carga pós-fissuração e tenacidade é dependente do tipo de fibra. Entretanto, para temperaturas acima de 400°C, concretos reforçados com fibra de aço apresentam menores perdas na resposta pós-pico, enquanto concretos reforçados com macrofibras poliméricas apresentam um acentuado grau de degradação das fibras [10]. Isto é evidenciado nos gráficos apresentados na Figura 4, onde se torna perceptível a queda de capacidade resistente residual para os concretos reforçados com macrofibras poliméricas já a 400°C. Isto demonstra claramente



► **Figura 3**
Redução da resistência à compressão e módulo de elasticidade em concretos reforçados com macrofibras poliméricas (adaptado de [6])



que estruturas reforçadas com macrofibras poliméricas devem ser avaliadas com maior rigor para a condição de incêndio, como seria o caso de uma laje elevada de edifício, por exemplo.

5. CONCLUSÕES

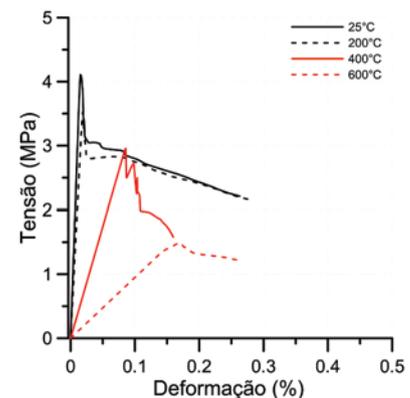
Neste artigo foram apresentados os principais efeitos da temperatura em concretos reforçados com fibras de aço e macrofibras poliméricas. Os efeitos da temperatura na matriz cimentícia, nos agregados, no reforço fibroso e interface com a matriz, e, por fim, no compósito como um todo. As principais conclusões que podem ser verificadas neste artigo são:

► O aumento da temperatura produz significativas alterações na composição química e microestrutura da pasta de cimento Portland endurecida; além disso, processos de transição cristalina de alguns minerais presentes nos agregados (ex: quartzo), associados com eventos de expansão-retração, podem causar microfissuração na matriz cimentícia e no próprio agregado, afetando, assim, as propriedades mecânicas globais do compósito;

► Fibras de aço encruado podem perder encruamento com a exposição a elevadas temperaturas, afetando diretamente as propriedades de resistência e ductilidade da fibra, e alterando as propriedades e o comportamento do compósito;

► Macrofibras poliméricas são afetadas com maior intensidade pelas elevadas temperaturas, uma vez que o grau de cristalinidade é afetado diretamente pelas cargas térmicas, além de estarem sujeitas à fusão e degradação em baixas temperaturas, podendo comprometer o reforço estrutural; no caso de concretos reforçados com macrofibras poliméricas, a capacidade do CRF de suportar esforços de compressão, tração e, principalmente, a resistência pós-fissuração são consideravelmente reduzidas acima dos 400°C;

► Avaliações qualitativas da interface entre fibra e matriz cimentícia através de imagens de microscopia podem ser encontradas na literatura; entretanto, a dinâmica de interação fibra-matriz quanto à carga de arrancamento e energia absorvida



► **Figura 4**
Curvas médias de carga por deslocamentos obtidos no ensaio de duplo punção (ensaio Barcelona) do concreto reforçado com macrofibras poliméricas a distintos níveis de temperatura (adaptado de [6])

tem se restringido a concretos em condições normais de temperatura, evidenciando a lacuna técnico-científica nesta área do conhecimento;

► Após a exposição à elevada temperatura, concretos reforçados com fibra de aço apresentam menores perdas na resposta pós-pico, concretos reforçados com macrofibras poliméricas apresentam um acentuado grau de degradação das fibras, gerando grandes perdas na resposta carga-deformação quando solicitado à flexão. ☞

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DEHN, F.; HERRMANN, A. Concreto reforçado com fibra de aço (SFRC) em situação de incêndio – requisitos normativos, pré-normativos e código-modelo. *Concreto & Construções*, 2017, p. 108-112.
- [2] INTERNATIONAL TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE ASSOCIATION (ITA). ITAtech Design guidance for Precast Fibre Reinforced Concrete Segments. 2016. ITAtech Report no. 7, vol. 1, France, 2016.
- [3] TAYLOR, H. F.W. *Cement chemistry*. Thomas Telford, 1997.
- [4] SHACKELFORD, J. F. *Ciência dos materiais*. Pearson. 6ª. Edição. 2008. 556p.
- [5] MADDAH, H. A. Polypropylene as a Promising Plastic: a review. *American Journal of Polymer Science*. 2016, p. 1-11.
- [6] 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.
- [7] POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(12), 2215-2222.
- [8] TAI, Y. S.; PAN, H. H.; KUNG, Y. N. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 C. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(7), 2416-2424.
- [9] CHEN, G. M.; HE, Y. H.; YANG, H.; CHEN, J. F.; GUO, Y. C. Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 2014, 71, 1-15.
- [10] SUKONTASUKKUL, P.; POMCHIENGIN, W.; SONGPIRIYAKIJ, S. Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(10), 1967-1974.