

CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO



10.56238/edimpacto2025.027-001

Fabrício Longhi Bolina
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Matheus Gabriel Dilly
Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

RESUMO

Os incêndios representam uma ameaça significativa às estruturas, podendo causar colapsos devido às transformações físicas, químicas e mecânicas no concreto armado. No Brasil, normas como a ABNT NBR 15575 e NBR 14432 regulamentam a segurança contra incêndios, exigindo que o projeto conte com a resistência ao fogo (TRF). O caso do edifício Wilton Paes de Almeida, que colapsou em 2018, exemplifica os danos severos de um incêndio mal controlado. A adição de fibras ao concreto é uma medida destacada para melhorar o desempenho em altas temperaturas, especialmente contra o deslocamento. A resistência ao fogo é avaliada pelo tempo que um elemento mantém estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico sob condições padronizadas.

Palavras-chave: Resistência ao fogo. Concreto armado.

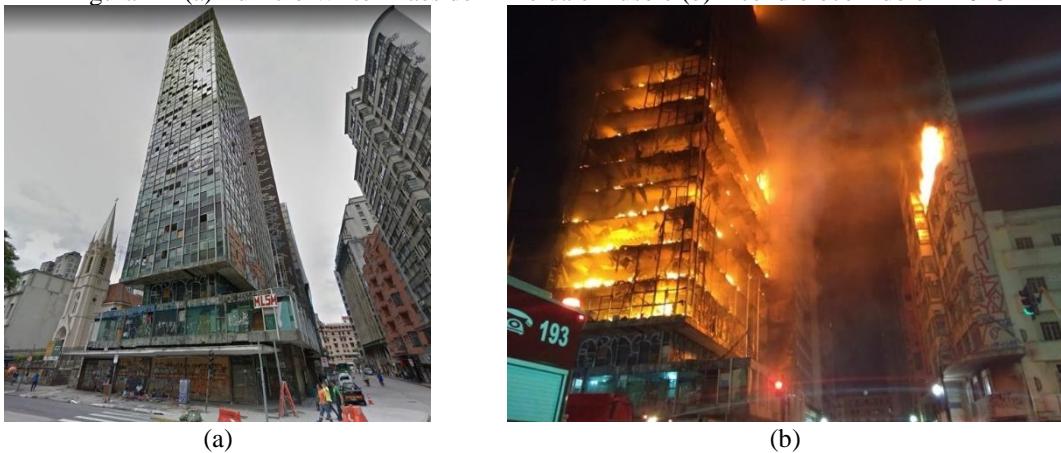
1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os incêndios são um dos agentes mais destrutivos das estruturas, podendo levar ao colapso da edificação. O aquecimento dos elementos promove um conjunto de transformações de cunho físico, químico e mecânico, culminando em alterações – às vezes significativas – na sua segurança, estabilidade e capacidade de suporte. Logo, a possibilidade de ocorrer um incêndio em uma estrutura deve ser admitida na etapa de projeto, e o conjunto de normas regulamentadoras que se destina a isso deve ser atendida.

No Brasil, a segurança ao incêndio dos sistemas construtivos é requerida pela norma de desempenho, a ABNT NBR 15575, além das normas regulamentadoras, como as NBR 5628 (ABNT, 2022), NBR 14432 (ABNT, 2001), NBR 14323 (ABNT, 2013) e NBR 15200 (ABNT, 2024), entre outras. Há ainda regulamentos estaduais dos corpos de bombeiros.

Desastres podem ser lembrados e servem de aprendizado. A Figura 1a mostra o edifício Wilton Paes de Almeida, construído entre os anos de 1961 e 1968 na cidade de São Paulo, que possuía 24 andares e 11.083 m² de área construída. Este edifício colapsou no dia 01/05/2018, devido ao incêndio iniciado no 5º pavimento, que se alastrou rapidamente aos cômodos e andares adjacentes. A intensidade do incêndio foi tão expressiva que danificou o prédio vizinho, por radiação térmica, como pode ser observado na Figura 1b.

Figura 1 – (a) Edifício Wilton Paes de Almeida em uso e (b) incêndio ocorrido em 2018



Fonte: gl.globo.com

A estrutura do edifício Wilton Paes de Almeida era em concreto armado. A exposição de concretos convencionais às altas temperaturas desencadeia uma série de fenômenos que influencia diretamente o seu desempenho. Características como umidade do elemento, taxa de aquecimento, dimensões das peças e estaticidade estrutural são fatores influentes. Na busca por medidas que visam preservar o desempenho do concreto sob altas temperaturas, a adição de fibras em concretos ganha destaque, e se aplica para condições específicas.

O projeto, dosagem e execução adequada das estruturas de concreto armado para as condições normais de solicitação não garantem que, no caso de um incêndio, o sistema cumpra a requisitos adequados de funcionalidade e segurança. Independente do elemento ser composto em concreto armado e/ou reforçado com fibras, projetar e construir estas estruturas considerando a possibilidade de ocorrência de um incêndio, apesar de ser um critério relativamente recente no Brasil, sobretudo se comparado a outros países, é obrigatório.

Na sequência foram abordados os principais aspectos relativos ao desempenho de concreto reforçado com fibras.

2 INTRODUÇÃO AO ESTUDO

A análise do desempenho de elementos estruturais ou de vedação em situação de incêndio é realizada em termos da sua resistência ao fogo. Trata-se de um critério que é definido pelo tempo no qual um determinado elemento cumpre com funções de (I) estabilidade estrutural, (II) estanqueidade aos gases quentes e fumaça e (III) isolamento térmico, durante exposição a um programa de aquecimento pré-definido, como a curva de incêndio padronizada pela ISO 834 (ISO, 2014).

Esta curva padronizada é reconhecida pela NBR 14432 (ABNT, 2001), EN 1991-1-2 (EN, 2004), AS 1530-4 (AS, 1994) e CAN/ULC-04 (ULC, 2014) para incêndios em edificações. Os países que não seguem a ISO 834 adotam curvas semelhantes, a exemplo da ASTM E-119, mas com pouca variação na temperatura de cada intervalo, fato que permite uma padronização de procedimento. Há outras curvas de incêndio, específicas para casos não convencionais, como de hidrocarbonetos e túneis. Há também curvas que visam alimentar modelos de dinâmica de incêndio, para análises arquitetônicas e dispositivos ativos e passivos. Todavia, não faz parte do escopo deste capítulo detalhá-las.

A unidade de medida da resistência ao fogo é temporal, definida em minutos. Quanto maior o tempo em que determinado elemento cumpre os três requisitos, durante exposição à curva padronizada de temperatura, maior será o seu tempo de resistência ao fogo (TRF). Este é o critério adotado em projetos e em análises laboratoriais.

Prédios de maior altura ou risco de incêndio possuem maiores exigências de tempo de resistência requerida ao fogo (TRRF) em seus elementos, os quais, muitas vezes, se sobrepõe aos requisitos para as condições normais de exposição (temperatura ambiente). Em linhas gerais, uma estrutura ou sistema de fechamento vertical projetada com maior tempo de resistência ao fogo promove maior segurança aos usuários, pois, além de evitar o colapso prematuro durante o incêndio, confina as chamas e evita com que se propaguem aos cômodos vizinhos.

No Brasil, o TRRF pode ser extraído da NBR 14432 ou legislações regionais, como apresentado na

Tabela 1, válidos para edificações habitacionais, propostas pela Instrução Técnica nº08 de 2018 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo. A altura da edificação estabelece sua classe que,

aliada à especificidade de seu uso, define o TRRF, em minutos. Compete ao responsável técnico projetar sistemas com tempo igual ou superior a este. Destaca-se que a altura em referência é aquela contada a partir da superfície do pavimento térreo, destinada ao escape, até a laje habitável mais alta da edificação. Portanto, o TRRF deve ser menor ou igual ao TRF dos elementos e sistemas construtivos. Ou seja:

$$\text{TRRF} \leq \text{TRF}$$

Tabela 1 – TRRF em edificações habitacionais (em minutos)

Altura da edificação em relação ao nível do solo							
Classe P1 $h \leq 6m$	Classe P2 $6 < h \leq 12m$	Classe P3 $12 < h \leq 23m$	Classe P4 $23 < h \leq 30m$	Classe P5 $30 < h \leq 80m$	Classe P6 $80 < h \leq 120m$	Classe P7 $120 < h \leq 150m$	Classe P7 $150 < h \leq 250m$
30	30	60	90	120	120	150	180

Fonte: elaborado com base na NBR 14432 (ABNT, 2001a) e IT08 (CBMESP, 2018).

Neste capítulo, foram discutidos os aspectos relativos aos elementos construídos em concreto reforçado com fibras (CRF) quando expostos às altas temperaturas, e os fatores que influenciam na resistência ao fogo destas peças. Também foi realizada a comparação com requisitos de projetos de normas nacionais e estrangeiras.

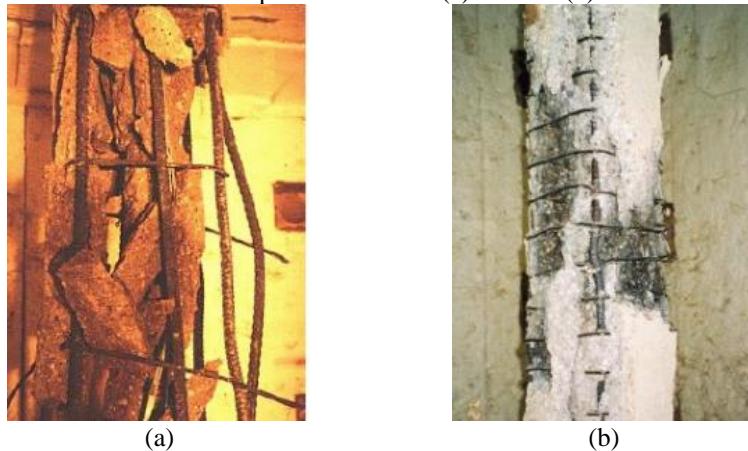
A seguir, estão apresentados alguns fenômenos que influenciam o desempenho destes elementos em altas temperaturas, com destaque ao fenômeno do desplacamento, o qual justifica a viabilidade técnica da adoção de fibras em determinadas situações.

3 O FENÔMENO DO DESPLACAMENTO (*SPALLING*)

Na maior parte dos casos, os elementos em concreto apresentam desempenho razoável ao fogo, em condições normais de uso e ambientais. As seções pouco esbeltas destes elementos colaboram para que critérios de **isolamento térmico** e **estanqueidade** sejam preservados durante alguns minutos de exposição às altas temperaturas. Quanto ao requisito de **estabilidade estrutural**, as propriedades térmicas do concreto e a proteção que o mesmo propicia às armaduras, aliado ao monolitismo inerente a estes sistemas, são suficientes para que a resistência ao fogo seja atendida durante algum intervalo. Nota-se haver alguma resistência ao fogo intrínseca a estas estruturas, em maior ou menor magnitude, dependendo de alguns fatores e critérios de projeto admitidos para a temperatura ambiente.

Entretanto, o fenômeno do desplacamento ou lascamento, chamado na literatura internacional de *spalling* (alguns autores ainda preferem usar o termo no Brasil), pode comprometer a integridade do concreto, expondo as armaduras ao calor, induzindo deformações plásticas excessivas, reduzindo a capacidade estrutural da seção e comprometendo a estabilidade do elemento. A Figura 2 mostra o fenômeno do desplacamento em pilares de concreto armado (KODUR, 2005), com intensidades distintas.

Figura 2 – Fenômeno do desplacamento com (a) maior e (b) menor intensidade



Fonte: Kodur (2005)

De cunho termohidráulico e termomecânico, o desplacamento é um fenômeno que promove o despreendimento das camadas superficiais dos elementos de concreto, quando expostos às altas temperaturas. A origem deste processo está na água livre interna do concreto que, quando aquecida, troca de fase e cria pressões de vapor que, se não dissipadas, se acumulam no interior da peça.

De difícil e complexa predição, trata-se de um mecanismo semi-destrutivo, que pode ter origem na:

- a) distribuição não uniforme de temperatura na seção;
- b) quantidade de água evaporável do concreto, água livre, que se manifesta com pequena ou grande e repentina liberação de energia.

A primeira (a), de baixa intensidade, promove uma fragmentação superficial do elemento, enquanto que na segunda (b), mais intensa, há o despreendimento, que pode ser explosivo, de camadas do concreto. Na grande maioria dos casos, o fenômeno se restringe à região do cobrimento das armaduras, parcela não armada da seção. A principal consequência, além da exposição direta ou indireta das armaduras ao calor, elementos mais sensíveis à temperatura, é a redução da seção transversal do elemento e/ou a perda de estabilidade estrutural.

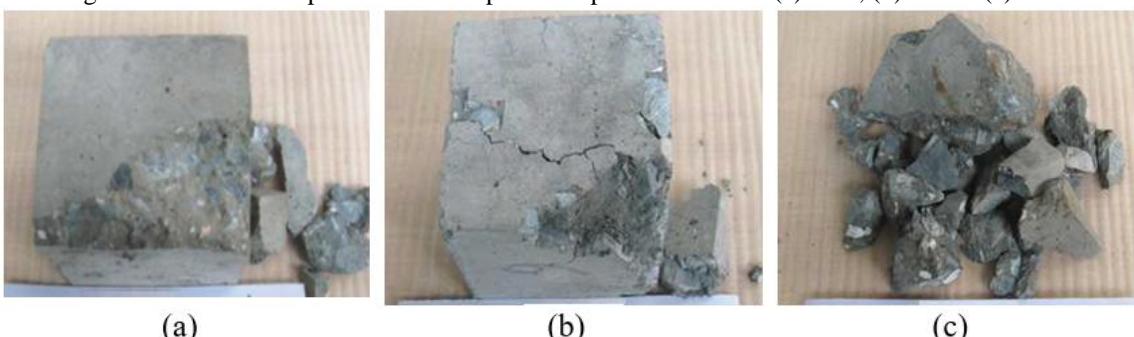
O acúmulo de pressão de vapor na seção, somado com as fissuras produzidas pelas tensões originadas por mecanismos termomecânicos, forma condições ideais ao desplacamento. Cabe salientar que a fragmentação do concreto ocorre somente quando a resistência à tração do mesmo é superada pela pressão de vapor. Este fato pode ser devido à redução da resistência do concreto pela temperatura. As fissuras formadas pelo mecanismo termomecânico, ao fragilizar o concreto, funcionam como um gatilho para a poro-pressão induzir o desplacamento.

Alguns autores afirmam que este mecanismo independe do estado de tensão da peça, proveniente do carregamento externo, o que não é consenso. As condições de vinculação se mostram mais influentes do que o carregamento atuante, principalmente em termos de restrição à dilatação

térmica. Estudos produzidos em escala real têm mostrado que os elementos mais susceptíveis ao lascamento são os pilares e lajes, que possuem maior grau de restrição à dilatação térmica, além de maior área exposta às altas temperaturas.

Fatores como taxa de aquecimento superficial, água livre e porosidade do concreto contribuem na análise das causas do fenômeno, que não necessariamente se desenvolve em todos os concretos. A umidade possui influência direta no comportamento do elemento sob elevadas temperaturas, conforme mostra a Figura 3. Como consequência do fenômeno, tem-se a exposição das armaduras ao calor intenso, a redução da seção transversal, perda do isolamento térmico e impacto na capacidade resistiva do elemento.

Figura 3 – Concreto exposto a altas temperaturas para umidade de (a) 75%, (b) 88% e (c) 100%



Fonte: Peng *et al.* (2013)

O uso das fibras tem papel importante na mitigação deste fenômeno. Esta é a maior contribuição da incorporação dos reforços em peças de concreto susceptíveis a ação de um incêndio.

Cada tipo de reforço tem uma certa temperatura de volatização. O fenômeno do desplacamento ocorre quando as camadas superficiais do concreto atingem temperaturas entre 200 e 250°C. Portanto, é fundamental que a fibra incorporada tenha uma volatização abaixo desta temperatura para que ela crie caminhos de escape do vapor e atue na mitigação do fenômeno. As fibras que melhor se encaixam nesta característica são as de polipropileno e náilon.

4 PARTICULARIDADES DAS FIBRAS DURANTE O AQUECIMENTO

Os itens subsequentes analisam o desempenho de concretos com adição de fibras de polipropileno, náilon e de aço.

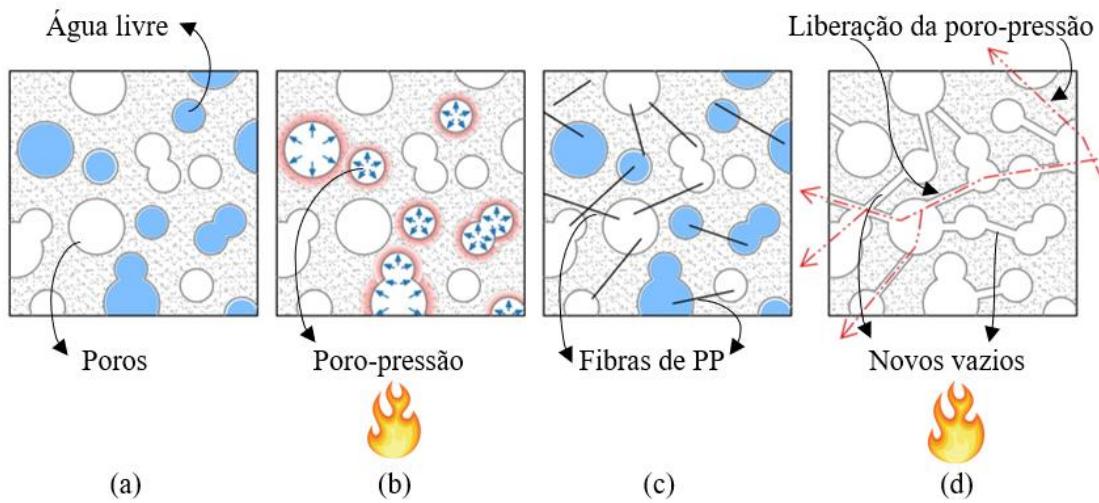
4.1 FIBRAS DE POLIPROPILENO:

As fibras de polipropileno atuam na mitigação do fenômeno do desplacamento em peças de concreto, sobretudo naquelas com baixa idade de cura, alta umidade interna, e/ou em concretos de elevada resistência mecânica, com baixa porosidade. O aquecimento das fibras de polipropileno resulta na volatização das mesmas, criando vazios na pasta cimentícia, permitindo a saída da umidade interna,

reduzindo a poro-pressão do concreto. As fibras de polipropileno se volatilizam na faixa dos 170°C, criando microcanais, funcionando como válvulas de escape da poro-pressão formada, aliviando o estado de tensão interna e reduzindo a susceptibilidade ao deslocamento.

A justificativa para a incorporação de fibras de PP em concretos convencionais, suscetíveis ao incêndio, está mostrada na Figura 4.

Figura 4 – Concreto (a) convencional, com reduzida interconectividade dos poros, (b) aquecido, (c) com fibras de PP e (d) aquecido com liberação de vapor

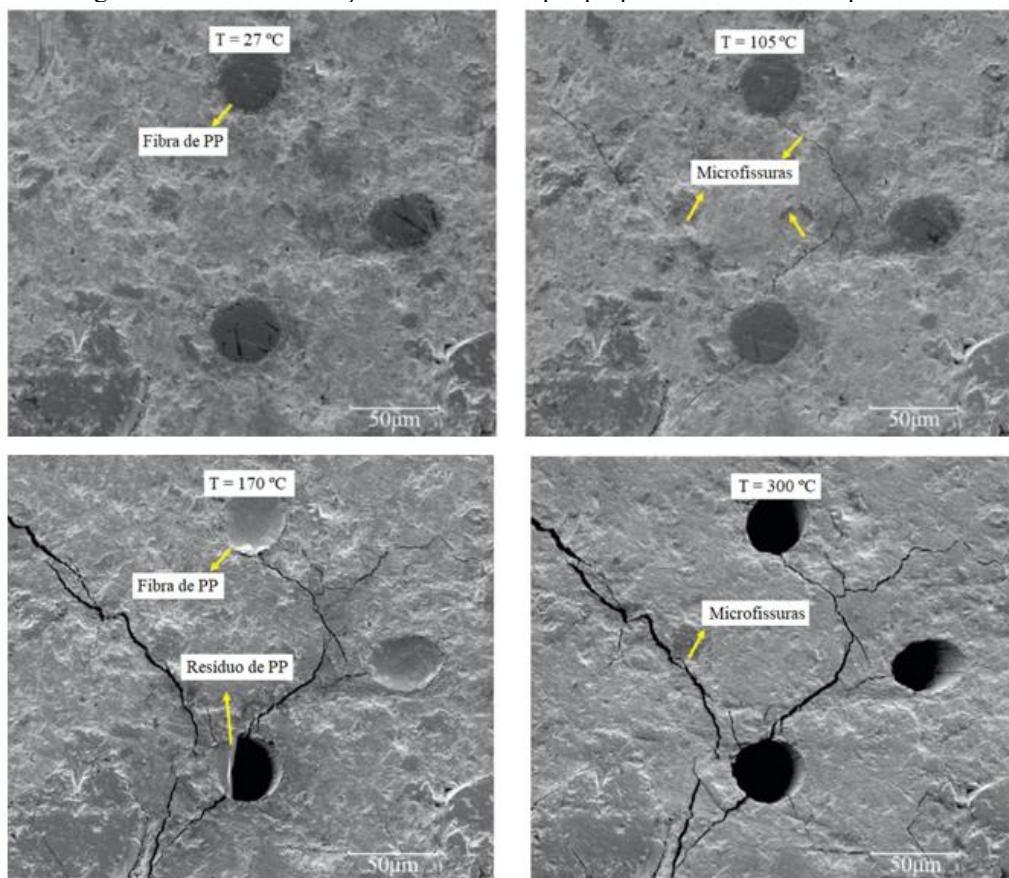


Fonte: os autores

Na Figura 4 é possível notar que, nos casos em que os concretos possuem elevada resistência, como aqueles de alta resistência (CAD) e de ultra alta resistência (CUAD), a permeabilidade geralmente é reduzida, apresentando baixa interconectividade dos poros (Figura 4a), o que pode promover um acúmulo de poro-pressão nos elementos, pelo fato da pressão de vapor não ser dissipada ao exterior da peça (Figura 4b). A incorporação de fibras de polipropileno (Figura 4c), mesmo que preservada a baixa permeabilidade, volatiliza – parcial ou totalmente – no ato do aquecimento do concreto, permitindo a liberação de vapor d’água (Figura 4d) pela formação de vazios interconectados, criando caminhos para o alívio da pressão de vapor. Assim, não são geradas tensões que fragilizem a peça.

Em estudo feito por Ding *et al.* (2016), com a adição de fibras de polipropileno, foi possível diminuir a poro-pressão em até 49,5%. A formação dos vazios proporcionada pela volatização das fibras pode ser observada na Figura 5, onde é mostrado o aquecimento das fibras na matriz cimentícia, entre as temperaturas de 27°C e 350°C, bem como as fissuras formadas na periferia da fibra.

Figura 5 – Concreto reforçado com fibra de polipropileno sob várias temperaturas



Fonte: Zhang, Dasari e Tan (2018)

Fibras de pequeno comprimento e diâmetro, ao se desintegrarem, não criam uma interconectividade apta a dissipar as tensões de vapor. Kalifa *et al.* (2000) sugerem que o comprimento e o diâmetro sejam de, no mínimo, 19 mm e 40 μm , respectivamente, para que as fibras de polipropileno sejam efetivas. Quando aplicadas em concretos usuais, esses reforços podem ser classificados como microfibras poliméricas.

A volatização das fibras de polipropileno promove a perda de resistência em estruturas se usada em teores elevados. Se, pelo lado físico, a volatilização das fibras e formação de poros auxilia na minimização do desplacamento, pelo lado mecânico essa porosidade pode vir a prejudicar o elemento. Todavia, esta redução pode ser desprezada para teores baixo, que usualmente são usados para este fim.

Porém, cabe destacar que o efeito do desplacamento não é tão comum em incêndios ocorridos em construções existentes, sendo mais notado em trabalhos experimentais com pequenas amostras e alta umidade interna. As estruturas de concreto armado expostas a incêndios tendem a possuir um elevado período de cura, uma maior maturação da peça e, portanto, menor teor de água livre interna. Este cenário é ideal para que o desplacamento ocorra de forma menos intensa em estruturas convencionais.

Alguns trabalhos experimentais mostram isso. A Figura 6 mostra duas placas expostas a duas horas da curva de aquecimento padrão. A placa sem adição de fibras apresentou desplacamento aos 20

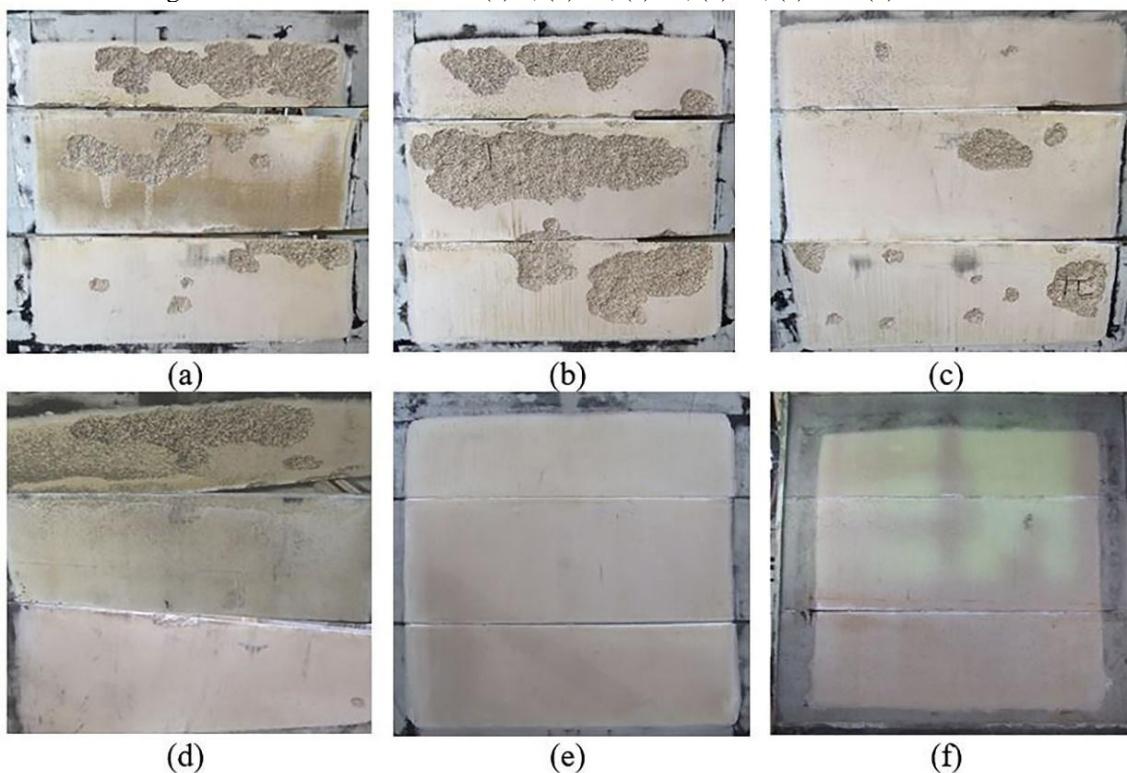
minutos de exposição às chamas, enquanto que a com 1000 g/m³ de fibras não apresentou desplacamento. Os ensaios foram realizados em baixas idades, quando as placas estavam com elevada umidade interna, não condizendo com a prática de incêndios reais.



Fonte: Shuttleworth (2001)

Ensaios realizados em elementos de escala real com concretos convencionais, com resistência à compressão de 50 MPa, mostraram que, em idades avançadas (até 830 dias), o fenômeno do desplacamento não ocorreu, tornando desnecessária a incorporação de fibras de polipropileno para este propósito. Na Figura 7 é possível notar que o fenômeno ocorreu nas idades de até 56 dias, não sendo observado nas placas ensaiadas aos 84 e 830 dias, superior a 2 anos de cura.

Figura 7 - Placas ensaiadas aos (a) 7, (b) 14, (c) 28, (d) 56, (e) 84 e (d) 830 dias



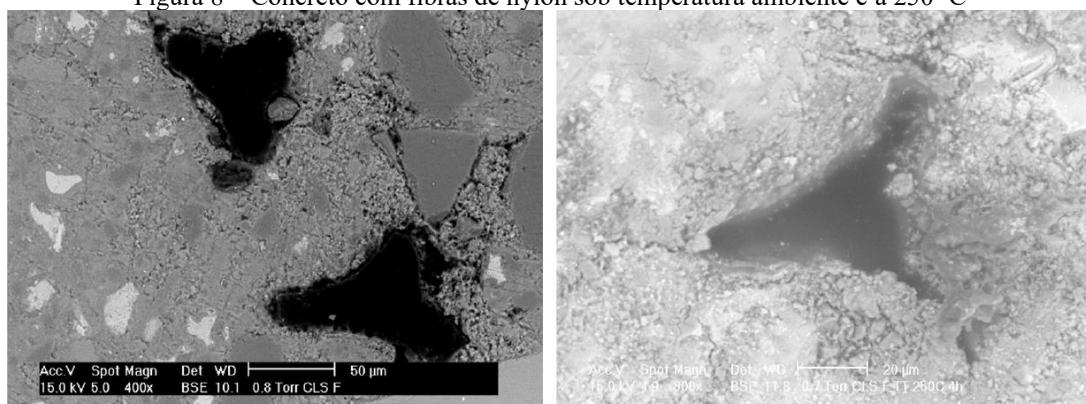
Fonte: acervo de itt Performance (Unisinos)

Logo, compreender o comportamento de elementos reforçados com fibras em uma situação de incêndio é importante para se buscar corretas definições em projeto.

4.2 FIBRAS DE NYLON:

As fibras de nylon apresentam função semelhante às de polipropileno: criar vias de dissipaçāo da poro-pressāo através da volatização das fibras, conforme mostra a Figura 8. As principais diferenças entre as fibras é que as dimensões das fibras de náilon são reduzidas e a temperatura de fusão é maior, próxima a 250°C. A adição destas fibras não apresenta variações significativas nas características mecānicas do concreto e resulta na diminuição no calor específico do material.

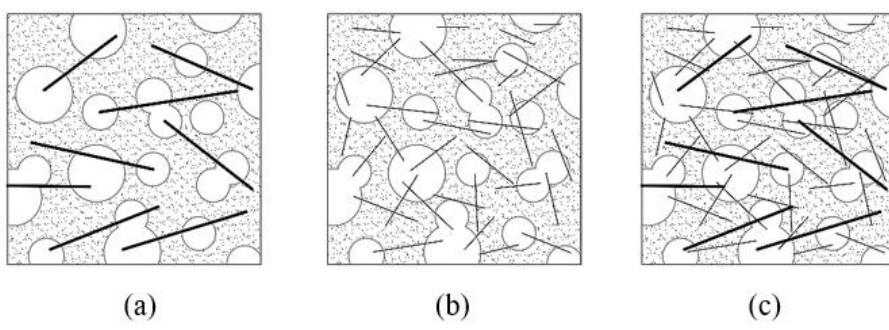
Figura 8 – Concreto com fibras de nylon sob temperatura ambiente e a 250 °C



Fonte: Ozger et al. (2013)

Por possuir diâmetro reduzido se comparada às fibras de polipropileno, as fibras de nylon são menos propensas à formação de grumos e, portanto, tendem a se misturar de forma mais homogênea na matriz cimentícia. Devido a isto, foi notado que é possível evitar o fenômeno do desplacamento com um teor menor da fibra, pois as mesmas tendem a estar mais dispersas na matriz. Este teor ótimo é da ordem de 0,04%, ao passo que a proporção mínima de fibras de polipropileno é de 0,1% (HAN *et al.*, 2012). A Figura 9 mostra que, com as fibras de nylon, é maior a tendência de haver maior conectividade entre os poros do que as de polipropileno. Isto remete a um maior potencial de dissipação de vapor e, portanto, mitigação do desplacamento. Ainda, é possível hibridizar as fibras, usando as duas simultaneamente.

Figura 9 – Fibras de (a) polipropileno, (b) nylon e (c) hibridização



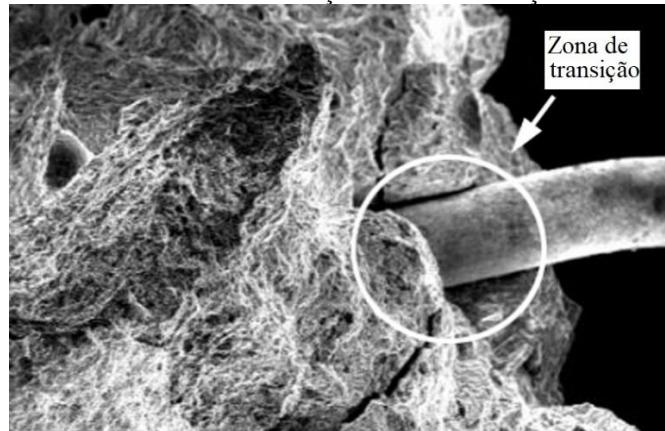
Fonte: o autor

4.3 FIBRAS DE AÇO:

Por controlar a formação de fissuras e aumentar a ductilidade da peça, a fibra metálica evita o desprendimento do concreto danificado pelo aquecimento. Isto faz com que o desplacamento, caso exista, ocorra mais tarde e seja do tipo explosivo, havendo desprendimento agressivo de camadas. Em termos de desempenho ao incêndio, esta é a contribuição mais marcante da incorporação de fibras metálicas no concreto: mitigar as consequências do desplacamento, sem atacar o fenômeno na sua origem.

Devido ao elevado ponto de fusão apresentado pelas fibras de aço, não é esperado o derretimento das mesmas sob situações de incêndio, o que compromete a dissipação da pressão. Porém, há a formação de fissuras na zona de interface entre a fibra e matriz, conforme Figura 10. Isto resulta numa melhor dissipação das pressões internas, porém com menor intensidade quando comparada à adição de fibras de polipropileno. Em estudo realizado por Ding *et al.* (2016), a adição de fibras metálicas promoveu uma diminuição de até 15,8% da poro-pressão.

Figura 10 – Fissuras na zona de transição entre fibra de aço e matriz cimentícia



Fonte: Ding *et al.* (2016)

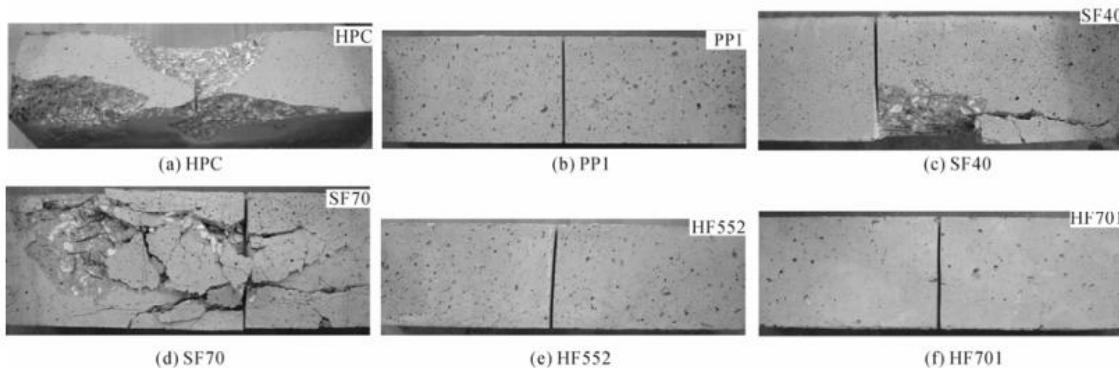
A fibra metálica preserva o desempenho ao fogo das estruturas de concreto até o instante em que ela perde sua capacidade de resistir às tensões de tração, fruto da ação do calor.

O aço é um excelente condutor de calor. Isto faz com que o aumento do teor de fibras gere um aquecimento mais intenso da seção transversal e, assim, redução da resistência do concreto. Por outro lado, o maior aquecimento das camadas internas da seção reduz o gradiente térmico, atuando indiretamente na atenuação do desplacamento.

As fibras atuam predominantemente após a nucleação de fissuras no concreto, alterando o comportamento frágil para pseudo-dúctil. Com o aumento do teor das fibras, o concreto tem a tendência de aumento do desplacamento. Isto se deve ao fato de que, não havendo micro-spalling nas primeiras fissuras, tensões de vapor se acumulam em demasia na camada de cobrimento de concreto, aumentando a energia acumulada e, portanto, a susceptibilidade ou intensidade do desplacamento.

No estudo realizado por Dong *et al.* (2008), foi possível comparar os efeitos da utilização de fibras de polipropileno, de aço e estas em conjunto (híbridas) na resistência ao fogo de vigas de concreto armado de alta resistência, acima de 55 MPa. Os ensaios mostraram que a configuração da peça com o uso de hibridização das fibras é interessante sob elevadas temperaturas, mitigando o desplacamento e preservando as características mecânicas da peça. No caso das amostras concebidas com adição isolada de fibras de polipropileno e aço, estas apresentaram uma perda de resistência à compressão residual de até 85% e 54%, respectivamente, enquanto que as amostras híbridas apresentaram perda residual de 39%. A Figura 11 apresenta a característica final das vigas (a) sem adição, (b) polipropileno (1 kg/m³), (c) fibras metálicas (40 kg/m³), (d) fibras metálicas (70 kg/m³), (e) e (f) híbridas.

Figura 11 – Aspecto final após exposição à temperatura de 1000°C



Fonte: Dong *et al.* (2008)

As imagens reforçam que as fibras metálicas, se usadas de forma isolada, podem não atenuar o efeito do desplacamento. Em tese, elas apenas postergam a ocorrência do fenômeno – que passa a ocorrer de modo mais intenso –, devendo ser substituídas ou combinadas com as de polipropileno para a eficiência seja atingida. As fibras metálicas incorporam uma maior resistência à tração do concreto, fazendo com que a resistência ao desplacamento aumente. Pelo fato destas fibras não promoverem dissipação de vapor de água, ou promoverem em menor magnitude, o aumento da resistência tração faz com que o desplacamento ocorra com uma maior pressão de vapor acumulada, tornando o dano maior e o efeito com um caráter mais explosivo, haja visto a maior energia desprendida.

As fibras de polipropileno e de aço melhoram o comportamento das estruturas em situação de incêndio nos instantes iniciais de exposição às altas temperaturas. As fibras de polipropileno controlam a fragmentação do concreto, enquanto que as metálicas fornecem uma ductilidade à matriz após fissuração sob altas temperaturas.

5 MANTAS DE FIBRA ADERIDAS COM POLÍMEROS PARA REFORÇO DE ESTRUTURAS

O uso de fibras aderidas à polímeros para reforço de estruturas mediante situação de incêndio tem crescido nos últimos anos, sobretudo nas últimas duas décadas. Também chamado de polímero reforçado com fibras, trata-se de um compósito formado por fibras – as mais frequentes são as de carbono, vidro ou aramida – e matriz polimérica, geralmente adesivo epóxi. Apesar de ainda se ter poucas normas sobre este reforço, pode-se citar a ACI 440.2R (ACI, 2017) e fib Bulletin 14 (FIB, 2001) que tratam do tema.

Quando se busca reforçar uma estrutura, pode-se utilizar mantas com fibras de carbono, por exemplo, que apresentam excelente desempenho em temperatura ambiente. Porém, a adesão das mantas é através de adesivos epóxi, que têm uma degradação a temperaturas relativamente baixas, da ordem de 50°C, alterando a capacidade resistente da peça reforçada. Em altas temperaturas, as resinas sofrem troca de fase, produzindo redução da capacidade de suporte do reforço.

A própria fibras de carbono, em temperaturas da ordem de 125°C, sofre com o decréscimo de resistência à tração, da ordem de 40 a 50%. Já para temperaturas na faixa dos 200°C, a redução pode chegar a 90%. Estes resultados variam, dada as configurações do compósito, como orientação e quantidade de fibras, além da composição química da matriz.

Desta maneira, se torna fundamental a proteção passiva do elemento estrutural reforçado com mantas de fibra aderidas com polímero, possibilitando o retardo da ação das altas temperaturas sobre a peça. A proteção pode ser alcançada através do uso de placas de gesso acartonado ou silicato de cálcio, por exemplo, com espessuras e número de placas variadas, dependendo do TRF almejado. Ainda, a proteção pode se dar com argamassa projetada reforçada com fibras.

6 ARGAMASSA PROJETADA REFORÇADA COM FIBRAS

O uso mais frequente de argamassas reforçadas com fibras ocorre em prédios estruturados em aço. Estas estruturas são, dependendo de alguns cenários e circunstâncias de projeto, mais sensíveis às altas temperaturas em relação às estruturas de concreto armado. Isto requer que o projeto estrutural incorpore proteções passivas aos perfis metálicos, visando mitigar o efeito do incêndio. Uma das alternativas economicamente mais viáveis e bem aceita no mercado é o jateamento de argamassa reforçada com fibras de polipropileno, conforme está mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Estrutura de aço revestida com argamassa reforçada com fibras.



Fonte: www.thebalancesmb.com/

Figura 13 – Jateamento de perfil metálico



Fonte: www.archiproducts.com

Cabe destacar que a atividade deve ser feita na estrutura montada, conforme Figura 13, visando preservar a proteção integral das peças – inclusive na região da ligação – e evitar impactos e desprendimentos oriundos de esforços mecânicos localizados durante a etapa de transporte dos perfis.

O uso destas argamassas visa criar uma barreira estanque e sem desplacamento, motivo da incorporação da fibra, durante a exposição ao calor dos perfis. Esta camada retarda o aquecimento dos elementos, diminuindo a temperatura média, preservando suas propriedades mecânicas por períodos mais prolongados. Geralmente, a análise crítica da eficiência desta solução é feita mediante ensaios

laboratoriais, com instrumentação dos perfis de aço, monitorando o desenvolvimento da temperatura mediante exposição à curva padronizada de temperatura.

7 ALGUMAS DIRETRIZES NORMATIVAS DE PROJETO

Os procedimentos de verificação de projeto em altas temperaturas podem ser divididos em três classes. A primeira envolve procedimentos relativamente simples e diretos, normalmente tabelados, encontrados em boa parte das normas técnicas. Estes critérios se apoiam em prescrições sustentadas em importantes trabalhos de pesquisas, oferecendo aos projetistas, por exemplo, dimensões mínimas prescritas, requerendo, em alguns casos, pouco conhecimento do tema para o cumprimento. A segunda classe admite a resistência da estrutura com base nos procedimentos analíticos de cálculo à temperatura ambiente, admitindo a redução da resistência dos elementos aquecidos. A terceira classe, mais refinada, envolve a curva de aquecimento, a transferência de calor para a estrutura e sua resposta às altas temperaturas. A primeira classe é prescritiva e, as duas últimas, se sustentam no desempenho.

Critérios de projeto só existem quando se tem um domínio do desempenho do material perante às condições necessárias. No tocante do projeto de estruturas de concreto armado convencional, há normas que orientam a verificação de estruturas ao incêndio por diferentes procedimentos. Além de métodos experimentais, onerosos e usados em condições bem específicas, há proposições numéricas para o cálculo do TRF de elementos estruturais. Todavia, o uso de fibras é recomendado apenas sobre a perspectiva do desplacamento, não havendo convergência absoluta entre as normas sob este critério. É sabido que, para aumentar o TRF, as armaduras devem ser protegidas pelo concreto da camada de cobrimento. Porém, neste sentido, estudos da década passada mostraram que, na existência de espessuras elevadas de cobrimento, a intensidade do desplacamento aumentava, gerando preocupação de algumas regulamentações. Alguns estudos mais recentes mostram que outras variáveis prevalecem.

Os métodos tabulares propostos na NBR 15200 (ABNT, 2012) são inspirados nos Eurocódigos estruturais (EN, 2004). O Eurocódigo propõe recomendações empíricas para amenizar o fenômeno do lascamento, como a incorporação de fibras de polipropileno ou barras de sacrifício nos cobrimentos superiores a 40mm. Normas como a CEB *Bulletin* nº208 (CEB, 1991), BS 8110-2 (BSI, 1985), AS 3600 (AS, 2009), NZS 3101 (NZS, 2006) e IS 456 (IS, 2000) também utilizam métodos tabelados de verificação estrutural que remetem ao cobrimento das armaduras para aumentar o TRF, mas nenhuma sugere o uso de fibras para mitigar o desplacamento.

A IS 456 (IS, 2000) recomenda medidas especiais para elementos horizontais, nos casos em que o cobrimento exceder 40mm para vigas e 35mm para lajes, como o uso de barras de sacrifício. A NZS 3101 (NZS, 2006) apenas cita que os cobrimentos tabulados de análise do TRF devem ser observados em conjunto com os praticados na durabilidade, não fixando medidas para preservar os elementos do desplacamento em espessuras elevadas. A AS 3600 (AS, 2009) cita não estar preparada



para mitigar o mecanismo do lascamento, recomendando o uso da BS 8110-2 (BSI, 1985). A abordagem deste fenômeno pela BS 8110-2 (BSI, 1985) é feita para os concretos com espessuras de cobrimento superiores a 40 mm, onde se recomenda o uso de pinturas, barras de sacrifício ou agregados leves para amenizar o fenômeno. Nestas normas não se admite a resistência do concreto como fator determinante ao desplacamento. O uso de fibras não é citado.



REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.2R-17: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills, 2017. 114 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2024

BARNES, R.; FIDELL, J. Performance in Fire of Small-Scale CFRP Strengthened Concrete Beams. Journal of Composites for Construction, 2006.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). BS 8110-2: Structural use of concrete - Code of practice for special circumstances. London, 1985.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB). CEB Bulletin d'Information n° 208: Fire design of Concrete Structures. Lausanne, 1991.

DING, Y.; ZHANG, C.; CAO, M.; ZHANG, Y; AZEVEDO, C. Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire. Construction and Building Materials, 2016.

DONG, X.; DING, Y.; WANG, T. Spalling and Mechanical Properties of Fiber Reinforced High-performance Concrete Subjected to Fire. Journal of Wuhan University of Technology, 2008.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. fib Bulletin No. 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Lausanne, 2001. 130 p.

GAMAGE, J. C. P. H.; AL-MAHAIDI, R.; WONG, M. B. Bond characteristics of CFRP plated concrete members under elevated temperatures. Composite Structures, 2006.

GAO, D.; YAN, D.; LI, X. Splitting strength of GGBFS concrete incorporating with steel fiber and polypropylene fiber after exposure to elevated temperatures. Fire Safety Journal, 2012.

HAN, C.G.; HWANG, Y.S.; YANG, S.H.; GOWRIPALAN, N. Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement, Cement Concrete Research, n° 35, 2005.

HAN, C; HAN, M; HEO, Y; SANJAYAN, J. Limited effect of diameter of fibres on spalling protection of concrete in fire. Materials and Structure, 2012.

HEO, Y. S., SANJAYAN, J. G., HAN, C. G., HAN, M. C. Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire. Cement and Concrete Research. 2010.

INDIAN STANDARD (IS). IS 456: Plain and reinforced concrete. New Delphi, 2000.

JANSSON, R. Fire spalling of concrete: theoretical and experimental studies. Tese de doutorado em Engenharia Civil. Estocolmo: KTH Vetenskap Och Konst, 2013.

KALIFA, P.; MENNETEAU, F. D.; QUENARD, D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. Cement and Concrete Research, 2000.



KHALIQ, W.; KODUR, V. Effectiveness of Polypropylene and Steel Fibers in Enhancing Fire Resistance of High-Strength Concrete Columns. *Journal of Structural Engineering*, 2018.

KHOURY, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. In: *Progress in Structural Engineering and Materials*. Vol. 2 ed.[s.l.] John Wiley & Sons, 2001. p. 429–447.

KODUR, V. K. R. *Fire resistance design guidelines for high strength concrete columns*. OttawaInstitute for Research in Construction, National Research Council, 2005.

LEE, G.; HAN, D.; HAN, M. C.; HAN, C. G.; SON, H. J. Combining polypropylene and nylon fibers to optimize fiber addition for spalling protection of high-strength concrete. *Construction and building materials*, 2012.

LI, Y.; TAN, K. H.; YANG, E. Synergistic effects of hybrid polypropylene and steel fibers on explosive spalling prevention of ultra-high performance concrete at elevated temperature. *Cement and Concrete Composites*, 2019a.

LI, Y.; ZHANG, YANG, E.; TAN, K.H. Effects of geometry and fraction of polypropylene fibers on permeability of ultra-high performance concrete after heat exposure. *Cement and Concrete Research*, 2019b.

NEW ZELAND STANDARD (NZS). NZS 3101: Concrete Structures Standard, Part 1 - The design of concrete structures. Wellington: Standard New Zeland, 1995.

OZGER, O.B.; GIRARDI, F.; GIANNUZI, G.M.; SALOMONI, V.A.; MAJORANA, C.E.; FAMBRI, L.; BALDASSINO, N.; DI MAGGIO, R. Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems. *Materials and Design*, 2013.

PENG, G.; WANG, L.; YANG, J.; SHI, Y. Title effect of steel fiber on explosive spalling of high performance concrete subjected to high temperatures. *3rd International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress*, 2013.

RAVIKUMAR, C. S.; THANDAVAMOORTHY, T. S. Glass Fibre Concrete: Investigation on Strength and Fire Resistant Properties. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2013.

RIAD, M.; GENIDI, M.M.; SHOEIB, A. E.; ELNABY, S. Effect of discrete glass fibers on the behavior of RC beams exposed to fire. *HBRC Journal*, 2017.

RIGOBELLO, R. Desenvolvimento e aplicação de código computacional para análise de estruturas de aço aporticadas em situação de incêndio. Tese de doutorado. Escola de Engenharia. Universidade de São Paulo, 2014.

RODRIGUES, J. P. C., LAIM, L., CORREIA, A. M. Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire. *Composite Structures*. 2010.

SHIHADA, S. Effect of polypropylene fibers on concrete fire resistance. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2011.

SHUTTLEWORTH, P. Fire protection of precast concrete tunnel linings on the Channel Tunnel Rail Link, *Concrete*, p 38-39, 2001.

STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA (AS). AS 3600: Concrete Structures. Camberra, 2009.



WANG, G. et al. Fire safety provisions for aged concrete building structures. Procedia Engineering, v. 62, p. 629–638, 2013.

ZEIML, M.; LACKNER, R.; MANG, H. A. Experimental insight into spalling behavior of concrete tunnel linings under fire loading. Acta Geotechnica, v. 3, n. 4, p. 295–308, 2008.

ZHANG, D.; DASARI, A.; TAN, K. H. On the mechanism of prevention of explosive spalling in ultra-high performance concrete with polymer fibers. Cement and Concrete Research, 2018.