

# Efeito “*anti-spalling*” das fibras de polipropileno

## INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos fibrosos em geral e o concreto reforçado com algum tipo de elemento fibroso, em particular, têm sido cada vez mais valorizados na construção civil. As fibras, dependendo da sua natureza, forma e dosagem, têm proporcionado aos concretos e argamassas uma versatilidade há muito tempo desejada. Atualmente pode-se desenvolver concretos com maior durabilidade, ductilidade, resistência ao impacto e à tração na flexão, desde que seja utilizado o tipo de fibra apropriado e em dosagens adequadas.

As fibras comumente utilizadas são quimicamente inertes. Os benefícios acima citados são atribuídos à sua atuação físico-mecânica. Resistência à tração, módulo de elasticidade, deformabilidade, aderência fibra-matriz, diâmetro, comprimento e índice de forma (relação comprimento/diâmetro) são propriedades físicas e mecânicas das fibras que definem o desempenho do compósito fibroso (consultar boletins técnicos anteriores).

A Publicação Técnica 6 apresenta as fibras de polipropileno (PP) sob outra perspectiva. Aborda-se a exploração das propriedades térmicas do PP para conferir ao concreto maior resistência ao fogo. Em outras palavras, trata-se do aumento da resistência ao lascamento explosivo do concreto quando submetido a altas temperaturas, fenômeno comumente divulgado pela literatura internacional como “*spalling*”. O assunto é recente, tanto nos centros de pesquisa quanto na indústria, no Brasil ou no exterior. Os primeiros resultados práticos de projetos de obras de engenharia e de pesquisas apontam seguramente para algo novo e interessante na indústria da construção.

Este boletim tem o propósito de expor os porquês da preocupação com segurança ao fogo em estruturas de concreto, o efeito danoso das altas temperaturas no concreto e, finalmente, explica, com um nível de detalhamento adequado para este informativo técnico, os mecanismos que levam as fibras de PP a desempenharem tal função.

## SEGURANÇA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO SUBMETIDAS AO FOGO

O desempenho de uma estrutura de concreto submetida a altas temperaturas depende da natureza do fogo, que pode variar consideravelmente para cada caso de incêndio. Um ponto muito importante é a curva tempo-temperatura imposta pelo fogo à superfície da estrutura, e particularmente: (i) a razão de aquecimento, que influencia o desenvolvimento da temperatura, umidade e gradientes de poro-pressão dentro do concreto; (ii) o máximo nível de temperatura, que modifica a natureza físico-química do concreto, promovendo a desagregação progressiva do mesmo; (iii) a duração do fogo, que afeta o desenvolvimento da temperatura na estrutura com o tempo (Khoury, 2002).

O efeito do fogo também varia sensivelmente de estrutura para estrutura. Dada a natureza confinada dos túneis, o incêndio nestes tende a gerar temperaturas mais elevadas quando comparado com um incêndio em edifícios e tende a ser mais longo pela dificuldade de acesso do corpo de bombeiros e de seus equipamentos. Por isso, o incêndio em um túnel é geralmente mais severo que em outros tipos de estruturas. Uma variedade de curvas tempo-temperatura tem sido proposta para túneis. A mais severa é a chamada “*hydrocarbon curve*”, usada quando o combustível é composto de materiais altamente inflamáveis (gasolina, querosene e diesel). Neste caso, a temperatura atinge 1.100 °C em apenas 5 minutos e 1.350 °C em 60 minutos. Em prédios, a combustão de materiais celulósicos é modelada por uma curva menos severa, a ISO 834, em que a temperatura atinge 556 °C em 5 minutos e 822 °C após 30 minutos (Figura 1).

Apesar da sua natureza não-combustível e da baixa difusividade térmica, o concreto sofre lascamentos explosivos devido ao aumento da poro-pressão e das tensões internas geradas durante o incêndio. O resultado disso é a ocorrência de deslocamentos das camadas mais externas, que reduzem a seção transversal da peça e expõem a armadura. A redução da capacidade portante do elemento estrutural é imediata.

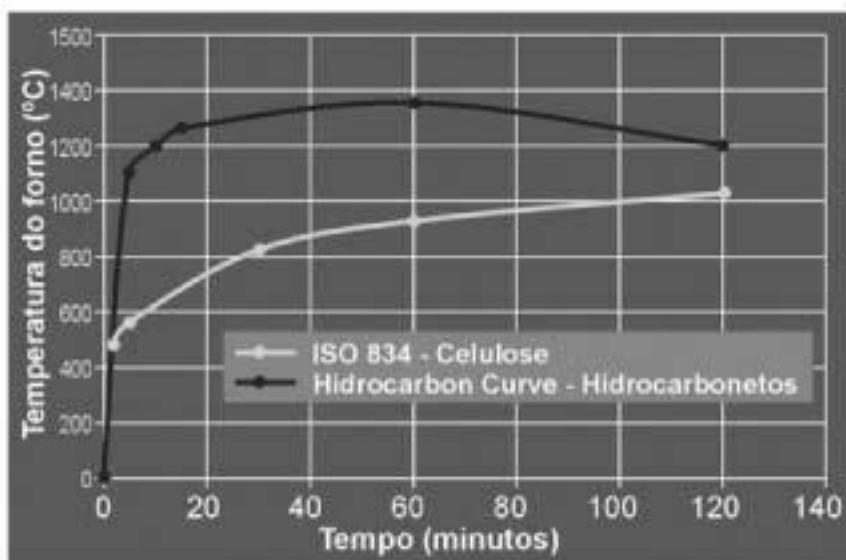


Figura 1: Curvas tempo-temperatura nominais padronizadas

Razão de aquecimento, duração do fogo, perda imediata da capacidade estrutural: definitivamente, o tempo está sempre associado aos incêndios. O objetivo da segurança contra incêndio é proteger a vida, e o tempo é fator essencial. A estrutura deve suportar os efeitos da ação térmica durante a fuga dos ocupantes e as ações de combate ao incêndio, ambos com segurança.

Khoury (2002) acredita que a segurança ao fogo em estruturas de concreto deve considerar tanto a segurança de pessoas quanto a integridade da estrutura. Ele acrescenta que os projetos de segurança ao fogo têm geralmente priorizado a segurança de pessoas, mas considera que a integridade estrutural não pode ser encarada como uma questão meramente econômica. Argumenta ainda que o impacto financeiro e sócio-econômico de um sinistro também afeta as pessoas, seja pelos custos de reparo, cancelamento de serviço e impacto econômico local e/ou regional.

Seja para garantir a vida ou para reduzir o impacto econômico-financeiro de um incêndio, é fundamental buscar mecanismos que possam vir a reduzir a tendência ao deslocamento e garantir a confiabilidade da estrutura (Lima, 2003).

### "SPALLING" OU LASCAMENTO EXPLOSIVO

"Spalling" ou lascamento explosivo é a expulsão violenta e repentina de camadas ou pedaços de concreto da superfície de um elemento estrutural quando exposto ao aumento rápido da temperatura, como acontece em casos de incêndio. Isto normalmente ocorre durante os primeiros 20-30 minutos do início do fogo. A Figura 2 mostra um pedaço de concreto que foi expulso de uma placa durante um ensaio de resistência ao fogo (IPT, 2003).

O comportamento do concreto exposto ao fogo é determinado pelas propriedades dos agregados e da matriz, seu grau de saturação, estrutura porosa e nível de carregamento, assim como a razão de aquecimento e a máxima temperatura atingida. A frente de calor, ao penetrar no concreto, provoca desidratação das camadas mais externas. A maior parte do vapor d'água formado migra em direção ao interior mais frio do concreto, onde há condensação. À medida que a frente de calor avança, a água condensada e o vapor se acumulam a sua frente, formando uma zona quase saturada.



Figura 2: Efeito do lascamento explosivo após ensaio de resistência ao fogo

A velocidade com que a zona de saturação move-se, "empurrada" pela frente de calor, depende da porosidade do concreto e da razão de aquecimento. Uma vez que a zona de saturação tem a velocidade de avanço limitada pela porosidade do concreto, a frente de calor a ultrapassa. Isso provoca a evaporação da água na interface. Devido ao aumento da temperatura e à restrição à expansão, a pressão de vapor nos poros aumenta rapidamente. Se a tensão de tração do concreto for insuficiente para resistir à pressão de vapor, a camada externa de concreto será arremessada repentinamente da superfície, na forma de lascamento explosivo ou "spalling". O fenômeno do "spalling", ilustrado na Figura 3, é assim descrito por Nince et al (2003), Shuttleworth (2001) e Kitchen (2001).

Fatores relacionados às propriedades do concreto, à geometria do elemento estrutural submetido ao fogo e à natureza do fogo têm sido identificados como variáveis

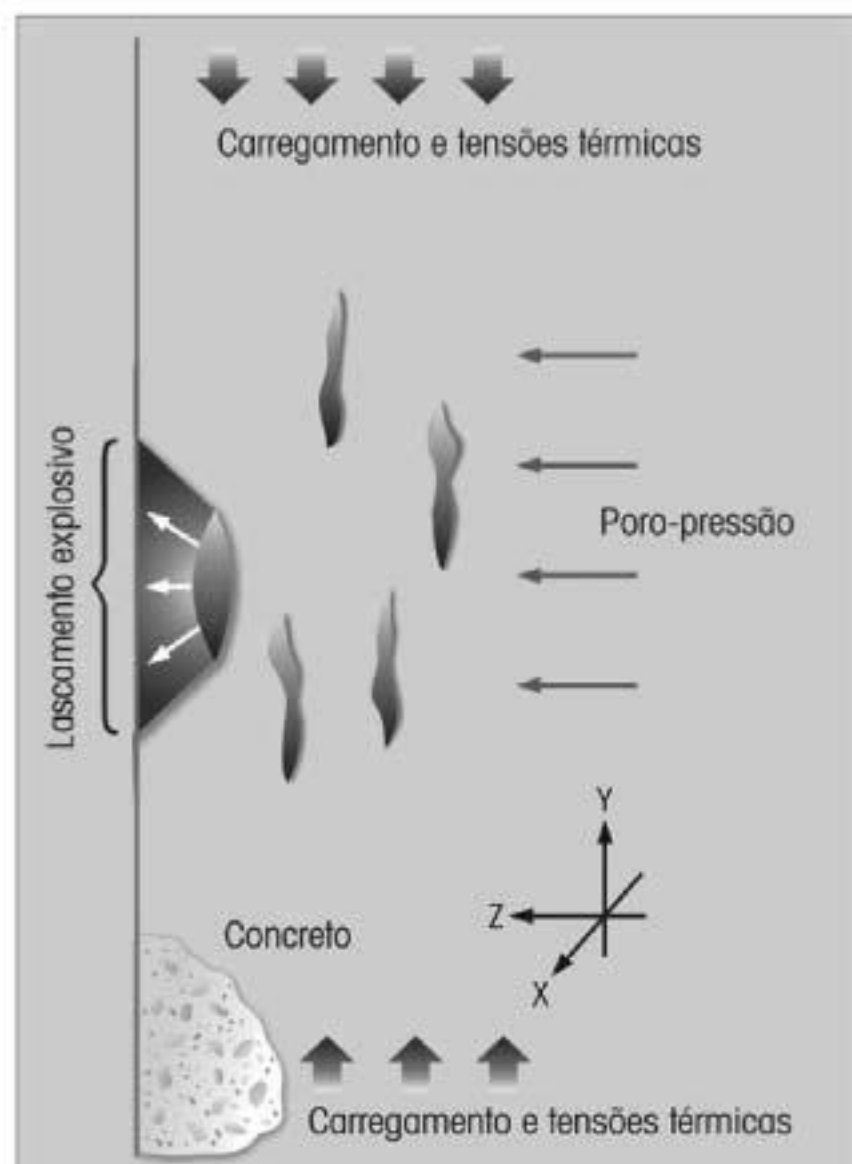


Figura 3: O fenômeno do "spalling" (Khoury, 2002)

importantes do fenômeno, mas os mais relevantes são a taxa de aquecimento, a permeabilidade do material, o grau de saturação e o nível de carregamento externo (Khoury, 2002).

A matriz densificada do concreto de alto desempenho, propriedade âncora no quesito durabilidade, tende a ser a principal responsável pelo mau funcionamento deste material diante de condições térmicas extremas (Lima, 2003). Concretos de alto desempenho com baixa permeabilidade estão mais suscetíveis ao lascamento explosivo múltiplo, quando comparados com concretos de resistências menores, mesmo tendo maiores resistências à tração. Isto ocorre porque a poro-pressão é maior em concretos de baixa permeabilidade. Também o pico da poro-pressão ocorre mais próximo da superfície de concretos de alto desempenho, o que explica o porquê de seções mais esbeltas apresentarem lascamentos repetidos em concretos de alto desempenho em incêndios (Khoury, 2002).

#### COMPORTAMENTO TÉRMICO DO POLIPROPILENO (PP)

As propriedades físicas e mecânicas das fibras de polipropileno são bem conhecidas. Referências à resistência à tração, ao módulo de elasticidade e à deformação de ruptura são comumente citadas na literatura. O mesmo não ocorre com o comportamento térmico, tão importante para esclarecer o mecanismo pelo qual as fibras de polipropileno reduzem o risco de lascamentos explosivos.

Salomão et al (2001), Salomão et al (2003) e Peret et al (2001) publicaram trabalhos que discutem este assunto. Estes autores pertencem a um grupo de pesquisa que trabalha com concreto refratário. Neste segmento as fibras de polipropileno são utilizadas em escala industrial para acelerar o processo de secagem dos refratários. Mecanismo muito similar ao que aqui descrevemos para concreto de cimento Portland.

As Figuras 4a e 4b apresentam curvas típicas de ensaios de calorimetria diferencial de varredura (DSC) e análise termogravimétrica (ATG) de fibras de polipropileno.

A Figura 4a mostra que até 150 °C (temperatura de amolecimento) não são encontradas reações térmicas nas fibras, diz-se que o polipropileno experimenta uma fase de estabilidade térmica. A partir deste ponto o polipropileno perde viscosidade, e aos 165 °C tem a fusão cristalina. Nesta fase, que se estende até aproximadamente 220 °C, ocorrem modificações físicas no polipropileno. As modificações químicas ocorrem a partir de 220 °C e é chamada de fase da degradação térmica do polipropileno. A Figura 4b mostra que a partir de 220 °C há acentuada perda de massa do polipropileno.

A redução considerável da viscosidade no primeiro momento, associada com a perda de massa a partir dos 220 °C, explicam o mecanismo pelo qual as fibras reduzem o lascamento explosivo do concreto, conforme visto a seguir.

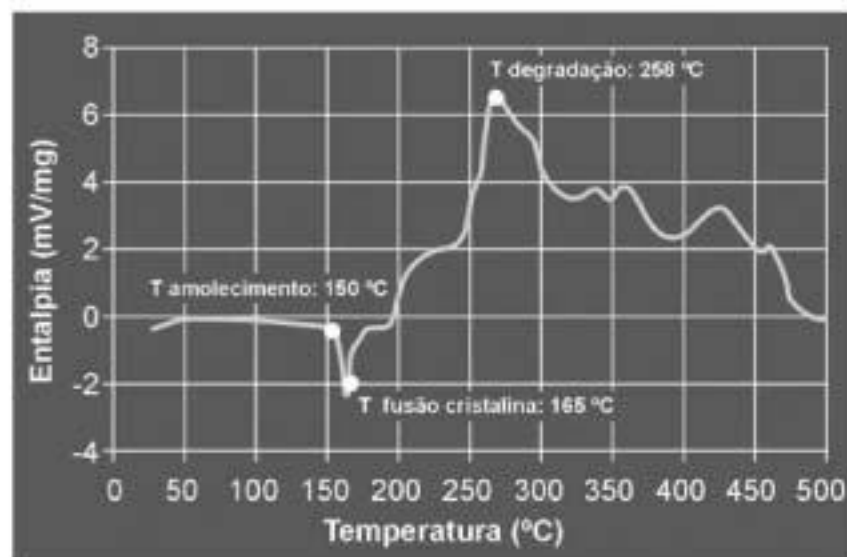


Figura 4a: Calorimetria diferencial de varredura de fibras de polipropileno

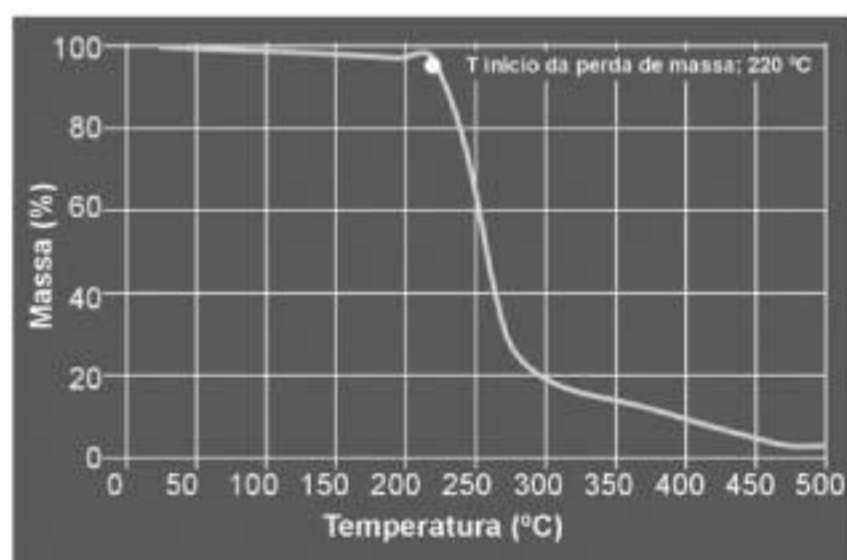


Figura 4b: Análise termogravimétrica de fibras de polipropileno

#### RELAÇÃO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO PP X EFEITO "ANTI-SPALLING"

Como visto nas seções anteriores deste boletim, o concreto quando submetido a altas temperaturas apresenta o fenômeno de "spalling", em função do rápido aumento da pressão nos poros do concreto que ocorre devido à evaporação da água da frente de saturação.

A redução acentuada da viscosidade e a perda de massa das fibras de polipropileno permite que o vapor pressurizado possa deformar a massa polimérica e atravessar os canais permeáveis gerados na estrutura do concreto (Salomão, 2003). Obviamente, quanto maior a dosagem de fibra maior será o número de canais formados. Valores típicos variam de 1 a 3 kg/m<sup>3</sup> de concreto.

Uma vez formados, os canais podem estabelecer conexões permeáveis entre as diversas regiões do concreto (canais permeáveis já existentes, porosidade oclusa, interfaces entre matriz e agregados e os próprios canais deixados pelas fibras). O vapor d'água gerado pelo calor que pressurizaria os poros naturais do concreto tem à disposição uma rede de drenagem. A percolação do vapor em direção à superfície é rápida, e a pressão do vapor, se ainda existir, é menor que a resistência à tração do concreto. Portanto, não há ocorrência de lascamentos explosivos.

Mas isto ainda não explica totalmente o fenômeno. A relação existente entre o comportamento térmico do PP e o

efeito "anti-spalling" está intimamente associada à faixa de temperatura em que isto ocorre. O surgimento dos canais permeáveis deixados pelas fibras e, conseqüentemente, da rede de drenagem por onde o vapor d'água percolar ocorre numa faixa de temperatura em que a maior parte de água está contida dentro da estrutura do concreto. Se o aumento da permeabilidade ocorre nesta faixa de temperatura, o lascamento explosivo é evitado. Por isto as fibras de polipropileno são as mais adequadas para esta finalidade, em detrimento de outras à base de polímeros que apresentam maior estabilidade térmica.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Ensaio comparativos em concreto projetado. Relatório Técnico N° 64.267. Divisão de Engenharia Civil/Laboratório de Segurança ao Fogo. São Paulo, 2003 (Relatório privado).

Khoury, G. A. Passive protection against fire. Tunnels & Tunnelling International. November 2002.

Kitchen, A. Polypropylene fibres reduce explosive spalling in fire. Concrete. April 2001

Lima, R. C. A.; Silva Filho, L. C. P. da; Casonato, C. A.; Caetano, L. F. O concreto de alto desempenho em temperaturas elevadas. Anais... V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. São Carlos, 2003.

Nince, A. A.; Costa, C. N.; Figueiredo, A. D. de; Silva, V. P. Influência das fibras de polipropileno no comportamento do concreto de alta resistência endurecido, submetido à ação térmica. Anais... 45° Congresso Brasileiro do Concreto. Vitória, 2003.

Peret, C. M.; Salomão, R.; Zambom, A. M.; Pandolfelli, V. C. Fibras poliméricas e a secagem de concretos refratários - Parte II: Comportamento Mecânico. 47° Congresso Brasileiro de Cerâmica. João Pessoa, 2003.

Rail Link Engineering. Fire protection of concrete for tunnel linings. Technical Report N° 000-RUG-RLEEX-00005-AB. Union Railways Limited, 1997.

Salomão, R.; Peret, C. M.; Zambom, A. M.; Pandolfelli, V. C. Fibras poliméricas e a secagem de concretos refratários - Parte I: Aumento da permeabilidade. 47° Congresso Brasileiro de Cerâmica. João Pessoa, 2003.

Salomão, R.; Ribeiro, C.; Innocentini, M. D. M.; Yamamoto, J.; Pandolfelli, V. C.; Bittencourt, L. R. M.; Rettore, R. P. Influência da adição de fibras poliméricas no comportamento de secagem de concretos refratários. Anais... 45° Congresso Brasileiro de Cerâmica. Florianópolis, 2001.

Salomão, R.; Cardoso, F. A.; Innocentini, M. D. M.; Pandolfelli, V. C.; Bittencourt, L. R. M. Effect of polymeric fibers on refractory castable permeability. American Ceramic Society Bulletin. v. 82, n.4, April 2003.

Shuttleworth, P. Fire protection of precast concrete tunnel linings on the Channel Tunnel Rail Link. Concrete. April 2001.



Rua Agueda Gonçalves, 77 - Jd. Pedro Gonçalves  
CEP 06760-020 - Taboão da Serra - SP  
Tel./Fax.: 55 11 4771 1323  
www.neomatrix.com.br



O PUBLI-TEC - Publicação Técnica é uma publicação da Neomatrix. Sua reprodução total ou parcial é permitida se a fonte for citada. A Neomatrix não se responsabiliza por opiniões apresentadas nesta publicação indicando a fonte e autoria.