

Análise da Propagação Superficial de Chama em Concretos com Inserção de Resíduos Reciclados de Pneus Inservíveis

Flame Spread Surface Index of Concrete With Incorporation of Recycled Material from Waste Tires

Camila Simonetti (1); Augusto Masiero Gil (2); Gustavo Carniel Manica (3); Nicolas Tafuer Schorn (3); Roberto Christ (4); Bernardo Fonseca Tutikian (4)

- (1) *Mestre em Engenharia Civil, aluna de Doutorado, PPGECC - UNISINOS*
(2) *Mestre em Engenharia Civil, aluno de Doutorado, Michigan State University*
(3) *Aluno de graduação, Engenharia Civil, UNISINOS*
(4) *Professor Doutor, it Performance, UNISINOS*

Resumo

Atualmente tem-se uma grande motivação de medidas mitigadoras dos impactos ambientais acerca da disposição incorreta de pneus inservíveis, bem como a realização de pesquisas sobre possíveis métodos de reaproveitamento destes elementos. Inserida nesse cenário está a construção civil, que pode empregar tecnologias visando a integração resíduos ao concreto com a perspectiva de qualificar algumas de suas propriedades e gerar benefícios para o meio ambiente. Neste contexto, este trabalho teve o intuito avaliar a propagação superficial de chama em concretos com a inserção de fibras de aço e partículas de borracha obtidas a partir de pneus descartados. O programa experimental compreendeu a caracterização dos materiais, a moldagem de corpos de prova de concretos e a realização do ensaio de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante, conforme a NBR 9442 (ABNT, 1988a), como caracterização parcial em relação à reação ao fogo. Foram empregadas partículas de borracha com granulometria entre 0,7 e 2 mm, com substituição em relação ao volume de agregado miúdo nos percentuais de 5,0% e 10,0%. A fibra de aço reciclada foi adicionada, em volume, nos percentuais de 0,5% e 1,5%. Os dados obtidos mostraram que não houve a propagação superficial de chama em nenhum dos concretos testados, nem presença de ignição, chama ou liberação de fumaça. De forma geral, observa-se que o concreto com a incorporação de resíduo de pneu apresentou comportamento semelhante ao concreto convencional, perante esse ensaio específico.

Palavra-Chave: Pneu inservível; concreto; reação ao fogo, propagação de chama.

Abstract

There is a great motivation for measures to mitigate environmental impacts by the incorrect disposal of waste tires, as well as research on possible methods for reusing these elements. In the field of civil construction, technologies aiming to incorporate waste tires into concrete to enhance some of its properties and generate benefits for the environment. This paper aimed to evaluate the flame spread surface index of concrete with incorporation of recycled material from waste tire. The experimental program included materials characterization, concrete specimens molding and the flame spread surface index, according to NBR 9442 (ABNT, 1988a), as a partial characterization in relation to fire reaction. Rubber particles with granulometry between 0,7 and 2 mm were used in substitution to fine aggregate in the percentages of 5,0% and 10,0%, in volume. The recycled steel fiber was added, in volume, in the percentages of 0,5% and 1,5%. The data collected showed that there was no flame spread surface in any of the tested mixtures, nor the presence of ignition, flame or smoke release. In general, it is observed that the concrete with the incorporation of tire residue presented a similar behavior as the conventional concrete, before this specific test.

Keywords: Waste tire; concrete; fire reaction; flame spread surface.

1 Introdução

Nas últimas décadas, o meio técnico e acadêmico tem empregado esforços para desenvolver materiais alternativos com menor impacto ambiental, bem como menor consumo de recursos naturais (SILVA JÚNIOR, 2014). Dentro deste contexto, se observa maior espaço para o uso de materiais reciclados de pneus descartados, uma vez que a disposição inadequada destes elementos pode gerar graves problemas ambientais devido a sua lenta decomposição, poluição ambiental e dificuldade de armazenamento (PINTO et al., 2017).

Pesquisas tem mostrado resultados positivos quanto a incorporação da borracha e da fibra metálica recicladas de pneus inservíveis na matriz do concreto, uma vez que permite modificações das propriedades do concreto para atendimento a requisitos específicos em que as propriedades desses resíduos são relevantes. No entanto, ainda existe uma lacuna em relação ao desempenho e classificação do concreto com a utilização de borracha e de fibra metálica recicladas, de pneus inservíveis, frente a elevadas temperaturas.

A avaliação da segurança contra incêndio das estruturas de concreto é dividida em duas principais etapas: reação e resistência ao fogo. Para avaliação dos produtos de construção, considera-se o início do incêndio como uma ignição em um compartimento que pode, que pode crescer e, atingir a inflamação generalizada.

Segundo a NBR 16626 (ABNT, 2017), a reação ao fogo é a resposta de um produto, ao contribuir pela sua própria decomposição, para um fogo a que está exposto, sob condições específicas. Denoël (2007) corrobora que a reação ao fogo se aplica aos materiais de construção, medindo as suas propriedades em relação ao início e ao desenvolvimento de um incêndio.

Para a classificação de um produto quanto à reação ao fogo, a primeira etapa é estabelecer se o produto pode contribuir no crescimento de um incêndio, determinando se ele é combustível ou incombustível. O ensaio de incombustibilidade é realizado através da norma ISO 1182 (2010a). Caso seja classificado como incombustível, classe I, é possível afirmar que não emite gases combustíveis que podem alimentar um incêndio.

Caso o material ensaiado seja classificado como combustível, se torna necessário determinar o quão combustível é e quais os efeitos de sua combustão. Dessa forma, ensaios subsequentes devem ser realizados para a investigação de outros parâmetros, sendo estes índice de propagação superficial de chama (I_p) e densidade óptica específica de fumaça (D_m), respectivamente NBR 9442 (ABNT, 1988a) e ASTM E 662 (ASTM, 2018). A classificação de produtos de construção em geral, exceto revestimento de piso e produtos de isolamento térmico de tubulações e dutos com seção circular de diâmetro externo não superior a 300 mm, pode ser observada na tabela 1, obtida da NBR 16626 (ABNT, 2017).

Tabela 1 – Classificação de produtos de construção em geral, exceto revestimento de piso e produtos de isolamento térmico de tubulações e dutos com seção circular de diâmetro externo não superior a 300 mm

Classe	Método de ensaio		
	ISO 1182 (ISO, 2010a)	NBR 9442 (ABNT, 1988a)	ASTM E 662 (ASTM, 2018)
I	Incombustível $\Delta t \leq 30^{\circ}\text{C}$ $\Delta m \leq 50\%$ $t_f \leq 10 \text{ s}$	-	-
II	A	Combustível $I_p \leq 25$	$D_m \leq 450$
	B	Combustível $I_p \leq 25$	$D_m > 450$
III	A	Combustível $25 < I_p \leq 75$	$D_m \leq 450$
	B	Combustível $25 < I_p \leq 75$	$D_m > 450$
IV	A	Combustível $75 < I_p \leq 150$	$D_m \leq 450$
	B	Combustível $75 < I_p \leq 150$	$D_m > 450$
V	A	Combustível $150 < I_p \leq 400$	$D_m \leq 450$
	B	Combustível $150 < I_p \leq 400$	$D_m > 450$
VI	Combustível	$I_p > 400$	-

Fonte: adaptado da tabela 3 da NBR 16626 (ABNT, 2017).

Legenda: (Δt) variação de temperatura; (Δm) variação de perda de massa; (t_f) tempo de combustão ou chamejamento; (I_p) índice de propagação superficial de chama; (D_m) densidade óptica específica máxima corrigida.

Em pesquisa sobre a análise térmica de concretos com inserção de resíduos reciclados de pneus inservíveis, Simonetti et al. (2019) verificaram que o concreto convencional é classificado como incombustível. No entanto, o concreto com a utilização borracha e da fibra metálica recicladas foram considerados combustíveis, devido a presença de chamejamento na superfície do corpo de prova. Este comportamento pode ser explicado pela ignição da borracha e a permanência da chama até a combustão completa da sua estrutura, ou pela presença de impurezas combustíveis na superfície da fibra metálica, dado que as fibras de aço utilizadas são provenientes da reciclagem. Não foi constatada perda de massa superior a 50%, nem variação na temperatura do forno maior que 30°C. Assim, esse artigo tem como objetivo avaliar a propagação superficial de chama em concretos elaborados com agregado reciclado de borracha e com fibras metálicas recicladas, ambos materiais oriundos de pneus inservíveis. Esta análise faz parte da investigação desses materiais compósitos frente a reação ao fogo.

2 Programa experimental

2.1 Materiais utilizados

2.1.1 Cimento, água e aditivo

O cimento utilizado para a confecção dos concretos foi o tipo CP-V ARI, sendo que o consumo deste insumo para as moldagens da etapa final foi proveniente de um mesmo lote

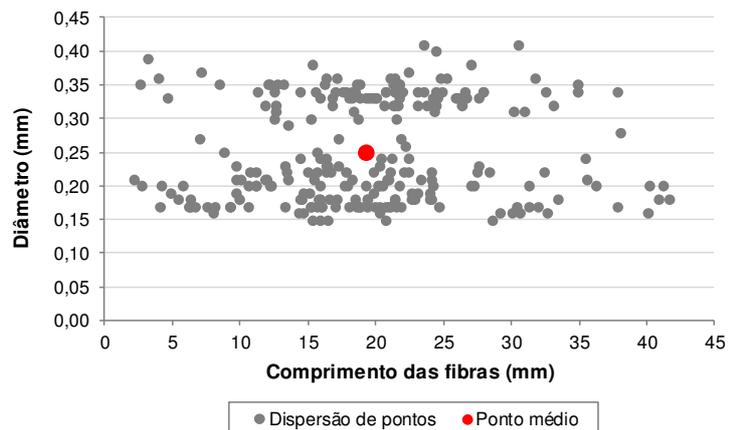
de fabricação. O aditivo empregado foi um superplastificante sintético de alto desempenho baseado na tecnologia de polímeros, o qual no estado líquido se encontra na cor marrom e possui densidade de $1,12 \text{ g/cm}^3$. A água utilizada na moldagem das amostras foi do abastecimento da rede pública através da Companhia Riograndense de Saneamento de Sapucaia do Sul - RS.

2.1.2 Fibra de aço reciclada

As fibras metálicas utilizadas neste trabalho (figura 1a) são fibras recicladas originadas de pneus inservíveis e que passaram por um processo de tratamento para remoção de partículas de borracha e outros resíduos. As fibras recicladas utilizadas no estudo possuem diâmetro médio de $0,25 \text{ mm}$ e comprimento médio de $19,26 \text{ mm}$. A figura 1b mostra a dispersão do diâmetro e do comprimento das fibras recicladas.



(a)



(b)

Figura 1 - Imagem da (a) fibra de aço reciclada e (b) gráfico de dispersão das dimensões (Fonte: elaborada pelos autores)

Para determinar o comprimento médio das fibras, foram realizadas imagens através de um escâner comum, sendo analisadas através do software Digimizer®. Este programa computacional permite a medição precisa do comprimento médio das fibras, o qual foi determinado a partir de uma amostragem de 210 unidades, realizada por quarteamento, de acordo com a NBR NM 27 (ABNT, 2001). O diâmetro médio das fibras foi obtido através de medida unitária de cada elemento da amostra utilizando um paquímetro digital.

2.1.3 Agregado miúdo, graúdo e de borracha reciclada

O agregado reciclado de borracha (ARB) é originado de pneus inservíveis que passaram por um processo de trituração mecânica, sendo fornecido na faixa granulométrica de $0,7$ a 2 mm conforme apresentado na figura 2.

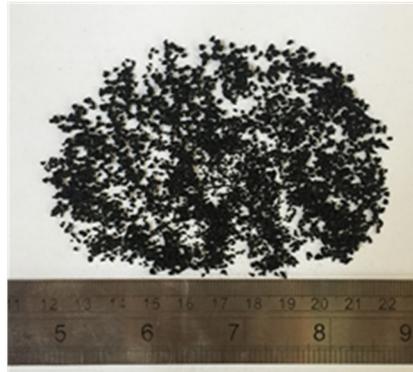


Figura 2 - Agregado reciclado de borracha (Fonte: elaborada pelos autores)

A caracterização deste material utilizou as prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003), da NBR NM 7211 (ABNT, 2019) e da NBR NM 45 (ABNT, 2006a). No entanto, para determinação da massa específica optou-se pelo método dos frascos de Chapman, descrito pela extinta norma NBR 9776 (ABNT, 1988b), utilizando querosene devido a sua baixa massa específica ($0,786 \text{ g/cm}^3$) que permite a total decantação do material suspenso. Os resultados estão expostos na tabela 2.

Os agregados miúdos utilizados são areia de origem quartzosa, dragada do rio Jacuí/RS, sendo que foram utilizadas duas granulometrias de areia, uma areia fina e uma areia média. Os resultados da granulometria e outras características físicas são dadas na tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização dos agregados miúdos e ARB

Propriedade	Areia fina	Areia média	Agregado reciclado de borracha	Norma de caracterização
Diâmetro máximo	0,60 mm	2,36 mm	2,36 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	0,93	1,81	3,44	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	1,41 g/cm^3	1,53 g/cm^3	0,54 g/cm^3	NBR NM 45 (ABNT, 2006a)
Massa específica aparente	2,57 g/cm^3	2,54 g/cm^3	1,20 g/cm^3	NBR NM 52 (ABNT, 2009a) NBR 9776 (ABNT, 1988b)
Massa específica do agregado seco	2,60 g/cm^3	2,52 g/cm^3	-	NBR NM 52 (ABNT, 2009a)
Massa específica do agregado com superfície seca	2,64 g/cm^3	2,51 g/cm^3	-	NBR NM 52 (ABNT, 2009a)

Fonte: elaborada pelos autores.

Os agregados graúdos utilizados no estudo tem origem basáltica, sendo extraído de regiões próximas a Porto Alegre/RS. Foram utilizadas duas granulometrias de brita, uma brita 0 e uma brita 1. Para caracterizar os agregados foi realizado um teste de composição granulométrica. Os resultados da granulometria e outras características físicas são dadas na tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização dos agregados graúdos

Propriedade	Brita 0	Brita 1	Norma de caracterização
Diâmetro máximo	12,5 mm	19 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	6,07	7,05	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	1,66 g/cm ³	1,64 g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006a)
Massa específica aparente	2,04 g/cm ³	3,14 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009b)
Massa específica do agregado seco	2,00 g/cm ³	3,08 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009b)
Massa específica do agregado com superfície seca	2,02 g/cm ³	3,10 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009b)

Fonte: elaborada pelos autores.

2.2 Dosagem das misturas

Nesta pesquisa foram elaborados concretos com substituição de areia média por agregado de borracha reciclada, nos percentuais de 5% e 10% de substituição em volume, e concretos com inserção de fibra metálica reciclada nos percentuais de 0,5% e 1,5%, em volume. Também foi elaborado concreto convencional, como referência. O traço base adotado foi fornecido pela indústria de pré-fabricado com central dosadora, local onde ocorreu as moldagens, tendo em vista composição de insumos já praticada e testada pela empresa com os materiais disponíveis na fábrica. O traço base possui proporção unitária 1:0,74:1,70:1,00:2,32 (cimento:areia fina:areia média:brita 0:brita 1) e relação água/cimento 0,51. O aditivo superplastificante foi utilizado com percentual fixo de 0,36% sobre a massa do cimento em todos os concretos confeccionados.

Cada concreto foi moldado em uma única betonada, sendo que após cada procedimento de mistura foi efetuado ensaio de abatimento do tronco de cone de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998). Os corpos de prova cilíndricos foram adensados através de haste de adensamento, de acordo com as instruções da NBR 5738 (ABNT, 2016), e foram cobertos com sacos plásticos cerca de duas horas após a moldagem, sendo desformados em 24 horas, conforme indicações da NBR 5738 (ABNT, 2016). A cura final até o momento dos ensaios foi realizada em câmara úmida com características de acordo com a NBR 9479 (ABNT, 2006b).

2.3 Determinação da resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado de acordo com a norma brasileira NBR 5739 (ABNT, 2007c), sendo adotada uma velocidade de aplicação de carga de 0,3 MPa por minuto. Este ensaio ocorreu na idade de 28 dias, sendo ensaiados 3 corpos de prova por tipo de concreto, confeccionados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016), nas dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Os corpos de prova foram retificados para distribuição uniforme de tensão na superfície das amostras durante o ensaio. Utilizou-se uma prensa hidráulica INSTRON-EMIC®, modelo 23-300, com capacidade de 2.000 kN, localizada no Laboratório de Segurança Estrutural do Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (itt Performance), na Unisinos.

2.4 Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante

O índice de propagação superficial de chama em materiais de construção pelo método do painel radiante, exceto revestimentos de piso, foi realizado através dos procedimentos descritos na NBR 9442 (ABNT, 1988a), sendo realizado no Laboratório de Segurança Contra Incêndio do itt Performance, na Unisinos. O forno utilizado foi fabricado pela empresa GREFORTEC® modelo 05518PR.

Para cada tipo de concreto foram testados quatro corpos de prova idênticos com dimensões de 150 mm de largura, 460 mm de comprimento e 25 mm de altura. Antes do ensaio foram mantidos em estufa com ventilação forçada a 60 ± 3 °C por 24 horas e em seguida condicionados na sala de ensaio até o equilíbrio em temperatura de 23 ± 3 °C e umidade relativa de $50 \pm 5\%$.

Para a execução do ensaio, as amostras (figura 3a) foram inseridas em um suporte metálico e colocados em frente a um painel radiante poroso (figura 3b), com 300 mm de largura e 460 mm de comprimento, alimentado por gás e ar. O suporte e corpo de prova foram posicionados em frente ao painel radiante com uma inclinação de 60°, de modo a submeter o corpo de prova a um fluxo radiante padronizado. Uma chama piloto com comprimento entre 51 mm e 76 mm foi aplicada na extremidade superior do corpo de prova.



Figura 3 – Determinação do índice de propagação superficial de chama (a) amostras (b) aparato de ensaio
(Fonte: elaborada pelos autores)

O ambiente de ensaio possuiu temperatura e umidade relativa controlada, sendo registradas as informações antes do início do ensaio, juntamente com a estabilização do aquecimento do painel durante 30 minutos, após ajustado para a temperatura de $670^{\circ}\text{C} \pm 5$ e assim permanecendo por mais 30 minutos.

Durante o ensaio foi anotado o tempo em que a frente da chama passa pelas marcas feitas a cada 76 mm nas linhas correspondentes na superfície das amostras. Também foi registrado qualquer fenômeno, como ocorrência de picos de luminosidade, gotejamentos de partículas em chama, liberação de fumaça e quaisquer outros acontecimentos relevantes. O ambiente do ensaio é livre de correntes de ar, possuindo apenas exaustão com fluxo de ar entre 300 a 400 L/min.

O encerramento do ensaio ocorre quando a temperatura máxima dos termopares da chaminé não variou mais do que 5 °C nos últimos 5 minutos ou quando a frente da chama atinge todas as marcações do suporte-padrão ou após um período de ensaio de 15 minutos, o que ocorrer primeiro.

O índice de propagação de chama é descrito pela equação 1 obtido no ensaio por meio do produto entre o fator propagação de chama (P_c) e o fator de evolução de calor desenvolvido pelo material (Q).

$$I_p = P_c \cdot Q \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

I_p = índice de propagação superficial de chama;

P_c = fator de propagação de chama;

Q = fator de evolução de calor.

O fator de propagação de chama é descrito pela equação 2 e o fator de evolução de calor é descrito pela equação 3.

$$P_c = 1 + \frac{1}{t_1 - t_0} + \frac{1}{t_2 - t_1} + \frac{1}{t_3 - t_2} + \frac{1}{t_4 - t_3} + \frac{1}{t_5 - t_4} \quad \text{Equação 2}$$

Onde,

P_c = fator de propagação de chama;

t_0 = zero;

t_1, t_2, t_3, t_4 e t_5 = tempo decorrido desde o início do ensaio até o momento em que a frente de chama atinge a primeira, segunda, terceira, quarta e quinta marcas do corpo de prova.

$$Q = C \cdot \frac{T}{\beta} \quad \text{Equação 3}$$

Onde,

Q = fator de evolução do calor;

β = constante do aparelho determinada na calibração igual a 41,24;

T = máxima diferença de temperatura entre a curva temperatura-tempo do corpo de prova ensaiado e a curva similar do corpo de prova de cimento-amianto utilizado na calibração.

Os dados resultantes de ensaios realizados, conforme a NBR 9442 (ABNT, 1988a), devem ser agrupados em classes, de acordo com o índice de propagação superficial de chama, conforme exposto na tabela 4. Quanto maior o índice, maior a velocidade com que a chama percorre e se propaga sobre a superfície do material nas condições de ensaio.

Tabela 4 – Classificação do ensaio de índice de propagação superficial de chama

Classe	Índice de propagação superficial de chama
A	0 a 25
B	26 a 75
C	76 a 150
D	151 a 400
E	acima de 400

Fonte: adaptado de NBR 9442 (ABNT, 1988a).

A NBR 16626 (ABNT, 2017) requer a definição de um atributo em relação à capacidade de gotejar ou desprender partículas em chamas, sendo que o material ensaiado através da NBR 9442 (ABNT, 1988a) recebe a sua classificação de acordo com a tabela 5.

Tabela 5 – Classificação da capacidade de gotejar ou desprender partículas em chamas

Classe	Descrição
d ₀	Se não ocorrerem gotejamento em chama e nem o desprendimento de partículas em chama
d ₁	Se não ocorrerem gotejamento em chama e nem o desprendimento de partículas em chama com duração superior a 10 segundos
d ₂	Se as condições anteriores não forem atendidas

Fonte: adaptado de NBR 16626 (ABNT, 2017).

3 Resultados

3.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone

A tabela 6 apresenta dados das moldagens, como as condições climáticas e o ensaio de abatimento de tronco de cone para cada concretagem realizada.

Tabela 6 – Caracterização das moldagens

Traço	Abatimento (mm)	Temperatura (°C)	Umidade relativa do ar (%)
REF	135	23,7	91,7
BOR5%	115	20,8	69,0
BOR10%	110	17,9	86,0
FIB0,5%	120	19,7	86,0
FIB1,5%	50	20,9	97,0

Fonte: elaborado pelos autores.

Em relação ao abatimento de tronco de cone, a inserção do resíduo de pneu inservível, tanto a borracha quanto a fibra metálica, ocasionaram a diminuição da trabalhabilidade das misturas quando comparadas ao concreto convencional. Este resultado já era esperado, pois reprisa o comportamento já verificado em outras pesquisas experimentais (ALBUQUERQUE, 2009; MARQUES; NIRSCHL; AKASAKI, 2006).

Cabe salientar que a redução do abatimento constatada nos traços com agregado reciclado de borracha e FIB0,5% não impediu ou causou prejuízo significativo para a moldagem das amostras. Já em FIB1,5%, houve a formação de grumos de fibras no concreto fresco devido ao elevado teor empregado. Também foi registrada dificuldade de moldagem das amostras.

3.2 Determinação da resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão podem ser observados na tabela 7, sendo destacados os valores de resistência potencial e resistência média.

Tabela 7 – Valores obtidos de resistência à compressão

Traço	Resistência potencial (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
REF	43,2	42,7	0,78
BOR5%	39,7	38,6	1,63
BOR10%	49,0	46,3	3,82
FIB0,5%	47,1	45,5	2,26
FIB1,5%	34,2	33,9	0,42

Fonte: elaborada pela autora.

As misturas BOR5% e FIB1,5% apresentaram, respectivamente, resistência à compressão 8% e 21% inferior em relação ao referênci. Já se esperava que a mistura FIB1,5% não apresentasse valores superiores de resistência à compressão devido aos grumos de fibras observados durante a moldagem e a baixa trabalhabilidade. Para BOR5%, o percentual de redução de 8% é um valor similar a dados obtidos por outros pesquisadores (ALBUQUERQUE, 2009; SCHIMELFENIG et al., 2017).

Já BOR10% e FIB0,5% apresentaram, respectivamente, resistência à compressão 13% e 9% superior em relação ao referênci. De acordo com Bentur e Mindess (2007), concretos com fibra de aço em percentuais de inserção de até 2% podem ocasionar aumento da resistência à compressão de 0% a 25%. Não era esperado aumento de resistência à compressão para BOR10%, no entanto, resultado semelhante já foi encontrado por Santos et al. (2017), sendo que 8% de substituição de areia por ARB ocasionou acréscimo de 7,2% na resistência à compressão.

3.3 Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante

Os resultados por amostra do ensaio para determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante são apresentados entre as tabelas 8 e 10.

Tabela 8 – Propagação do ensaio de painel radiante: REF

Propagação da chama (mm)	Tempo por amostra (s)			
	1	2	3	4
76	0	0	0	0
152	0	0	0	0
228	0	0	0	0
304	0	0	0	0
380	0	0	0	0

Fonte: elaborada pelos autores.

Tabela 9 – Propagação do ensaio de painel radiante: BOR

Propagação da chama (mm)	Tempo por amostra (s)							
	BOR5%				BOR10%			
	1	2	3	4	1	2	3	4
76	0	0	0	0	0	0	0	0
152	0	0	0	0	0	0	0	0
228	0	0	0	0	0	0	0	0
304	0	0	0	0	0	0	0	0
380	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: elaborada pelos autores.

Tabela 10 – Propagação do ensaio de painel radiante: FIB

Propagação da chama (mm)	Tempo por amostra (s)							
	FIB0,5%				FIB1,5%			
	1	2	3	4	1	2	3	4
76	0	0	0	0	0	0	0	0
152	0	0	0	0	0	0	0	0
228	0	0	0	0	0	0	0	0
304	0	0	0	0	0	0	0	0
380	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: elaborada pelos autores.

Os dados coletados mostram que não houve propagação de chama entre as linhas marcadas em cada amostra. A tabela 11 apresenta o índice de propagação superficial de chama para os concretos ensaiados calculado de acordo com a equação 1.

Tabela 11 – Índice de propagação superficial de chama

Amostra	Fator de propagação da chama (Pc)	Fator de evolução do calor (Q)	Índice de propagação superficial de chama (Ip)	Classificação da capacidade de gotejar ou desprender partículas em chamas
REF	1	0	0	d ₀
BOR5%	1	0	0	d ₀
BOR10%	1	0	0	d ₀
FIB0,5%	1	0,23	0,23	d ₀
FIB1,5%	1	0	0	d ₀

Fonte: elaborada pelos autores.

Ao analisar a tabela 11, se observa que o fator de propagação de chama (Pc) é igual a 1 para todas as amostras, uma vez que o tempo de propagação da chama também é nulo, conforme apresentado entre a tabela 8 e a tabela 10. Ao aplicar a equação 2, como os tempos decorridos são nulos, o valor resultante é igual a 1.

O fator de evolução do calor é baseado na variação de temperatura durante o ensaio, principalmente entre a máxima diferença entre a curva temperatura versus tempo do corpo de prova e da amostra padrão utilizada na calibração, conforme descrito na equação 3. Os valores das temperaturas das amostras ensaiadas se situaram abaixo da curva do ensaio de calibração, não ocorrendo diferença de temperatura significativa durante o procedimento. Desta forma, o fator de evolução de temperatura apresenta valor nulo.

A única exceção acerca do fator de evolução do calor foi para a amostra FIB0,5% que apresentou cerca de 1,7 °C acima da curva de calibração nos primeiros 30 segundos de ensaio. Esta diferença não é significativa para evidenciar potencial negativo do material frente a reação ao fogo. A figura 4 apresenta as curvas de temperatura média durante o tempo de ensaio para a calibração e para cada amostra.

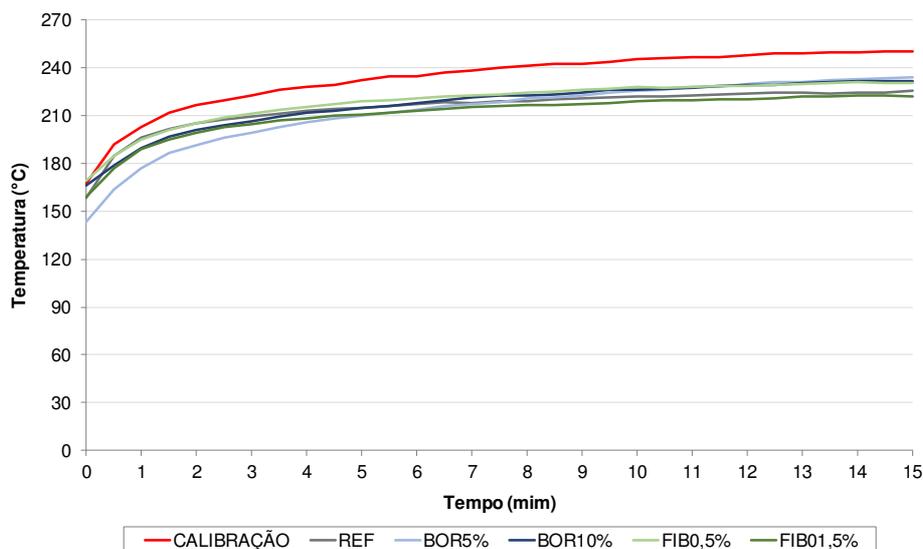
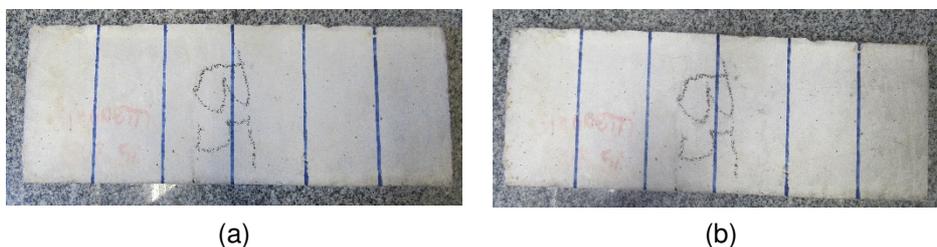


Figura 4 – Curvas de temperatura média ao longo do ensaio para a calibração e as amostras
(Fonte: elaborada pelos autores)

Por fim, se obtém para os índices de propagação superficial de chama valores nulos ou próximo de zero, indicando que os concretos ensaiados não contribuem para a propagação de chama na superfície destes materiais. Para o concreto convencional este resultado já era esperado.

Quanto à classificação do ensaio de índice de propagação superficial de chama, conforme exposto na tabela 4, todos os materiais são classificados como classe A. Nota-se que os índices de propagação obtidos estão muito abaixo do limite da classe A, que é igual a 25. Durante a execução do ensaio não foram verificados: ignição dos exemplares da amostra, chama transitória, liberação de resíduos provenientes da queima, exalação de fumaça ou gases. Os exemplares não apresentaram a formação de bolhas. Assim, de acordo com a classificação da capacidade de gotejar ou desprender partículas em chamas descrita na tabela 5, conforme a NBR 16626 (ABNT, 2017), a classe dos concretos ensaiados é d_0 . A figura 5 apresenta um exemplo de amostra antes e depois do ensaio de determinação do índice de propagação superficial de chama. De forma geral, as amostras não apresentam avarias significativas em sua superfície, nem bolhas, perda de partículas ou perda de massa. Apresentam coloração levemente escurecida em uma das extremidades, local que esteve em contato com a chama piloto.



(a) (b)

Figura 5 – Amostras BOR5% (a) antes e (b) após o ensaio
(Fonte: elaborada pelos autores)

4 Conclusões

Em relação à trabalhabilidade, os concretos elaborados com agregado reciclado de borracha e com fibras metálicas apresentaram abatimento menor que o referência, mostrando que a utilização dos resíduos de pneu inservível pode reduzir a trabalhabilidade do concreto fresco. No entanto, para BOR5%, BOR10% e FIB0,5%, a redução da trabalhabilidade não incidiu em prejuízo à moldagem das amostras ou em perda significativa de resistência à compressão.

A mistura BOR5% apresentou resistência à compressão 8% inferior em relação ao referência. Já BOR10% e FIB0,5% apresentaram respectivamente, resistência à compressão 13% e 9% superior em relação ao referência. Desta forma, se observa que a variação na resistência à compressão esteve em uma faixa restrita de 13%. A redução da resistência em FIB1,5% foi maior, 21%, devido a formação de grumos de fibras e a significativa redução da trabalhabilidade.

A substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha, e a inserção de fibras metálicas recicladas de pneus inservíveis, quando inseridos no concreto, não incidem em propagação de chama e liberação de fumaça quando esses concretos são submetidos

ao ensaio de propagação superficial de chama. Essa constatação é aplicada considerando especificamente os materiais e as dosagens desenvolvidas nessa pesquisa. O controle das características de reação ao fogo dos materiais, incorporados aos elementos construtivos, no processo produtivo do edifício, está associado à limitação do crescimento do incêndio, à evacuação segura do edifício e à preocupação contra a propagação do incêndio entre edifícios (COUTINHO; CORRÊA, 2016; MITIDIERI; LOSHIMOTO, 1998). Assim, a não propagação de chama e a ausência de fumaça são características desejáveis de um material da construção civil frente a altas temperaturas.

5 Referências

ALBUQUERQUE, A. C. DE. **Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu**. 2009. 162 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS, Brasil, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 662: Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials**. West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9442: Materiais de construção - Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1988a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio (cancelada)**. Rio de Janeiro, 1988b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479 - Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2006b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16626: Classificação da reação ao fogo de produtos de construção.** Rio de Janeiro, 2017.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites.** 2. ed. Abingdon, Oxfordshire: Taylor & Francis Group, 2007.

COUTINHO, B. A.; CORRÊA, A. R. A interpretação do Controle de Materiais de Acabamentos e de Revestimento no Processo de Segurança Contra Incêndio e Pânico. **E&S Engineering and Science**, v. 5, n. 2, p. 26, 2016.

DENOËL, J. **Fire safety and concrete structures.** Brussels: Federation of Belgian Cement Industry, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1182: Reaction to fire tests for products - Non-combustibility test.** Genebra, 2010.

MARQUES, A. C.; NIRSCHL, G. C.; AKASAKI, J. L. Propriedades mecânicas do concreto adicionado com borracha de pneus. **HOLOS Environment**, v. 6, n. 1, p. 31–41, 2006.

MITIDIERI, M. L.; LOSHIMOTO, E. **Proposta de classificação de materiais e componentes construtivos com relação ao comportamento frente ao fogo - Reação ao fogo.** São Paulo: EPUSP, 1998.

PINTO, A. R. M. et al. Gerenciamento de pneus inservíveis: estudo da reciclagem e destinação. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 10, p. 28–57, 2017.

SANTOS, G. R. F. DOS et al. **Análise de concreto com adição de resíduo de borracha de pneu.** 59º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...**Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

SCHIMELFENIG, B. et al. **Estudo da utilização de agregado reciclado de borracha de pneus como substituição da areia natural em concretos convencionais.** 59º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...**Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

SILVA JÚNIOR, F. A. **Avaliação do efeito da adição de resíduo de borracha de pneu e brita calcária na formulação de compósitos cimentícios.** 2014. 184 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Natal, RN, Brasil, 2014.



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

SIMONETTI, C. et al. **Análise térmica de concretos com inserção de resíduos reciclados de pneus inservíveis**. MEMORIAS CONPAT 2019. **Anais...ALCONPAT INTERNACIONAL**, 30 nov. 2019. Disponível em:
<<https://congressoconpat.org/index.php/congressosconpat/conpat2019/paper/viewFile/293/68>>.