

Comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas

Behavior of concrete subjected to high temperatures

Alisson Rodrigues de Oliveira Dias¹, Felipe Alves Amancio¹,
Maria Fabíola de Carvalho Rafael¹, Antônio Eduardo Bezerra Cabral²

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Estruturas e Construção Civil – PEC, Universidade Federal do Ceará, CEP: 60455-900, Fortaleza, CE, Brasil.

e-mail: rodrigues_alisson@live.com, felipeamancio@hotmail.com, mfabiolacr@gmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Estruturas e Construção Civil – PEC, Universidade Federal do Ceará, CEP: 60455-900, Fortaleza, CE, Brasil.

e-mail: eduardo.cabral@ufc.br

RESUMO

A resposta ao fogo de elementos estruturais depende das propriedades térmicas, mecânicas e de deformação do concreto. Estas propriedades variam significativamente com a temperatura e dependem da composição e características do concreto. Com isso, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise do comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas. Para isso, os programas experimentais adotados visaram investigar o comportamento do módulo de elasticidade do concreto, a resistência à compressão residual conforme o tipo de resfriamento, tempo de exposição, o f_{ck} do concreto e o teor de adição de fibra de polipropileno, além da análise da perda de massa e da influência na velocidade do pulso ultrassônico. As temperaturas as quais foram submetidas o concreto foram 200 °C, 400 °C, 600 °C e 800 °C. Pode-se concluir que o concreto quando exposto a elevadas temperaturas sofre deterioração significativa, como redução do módulo de elasticidade e da resistência à compressão, *spalling* do concreto e conseqüentemente perda de durabilidade. Foi observado que a adição de fibras de polipropileno ajudou a prevenir o *spalling* em temperaturas até 600 °C. Além disso, com base em testes estatísticos, os resultados demonstraram que o tipo de resfriamento não influencia na resistência residual, já o tempo de exposição, o tipo de f_{ck} e o teor de adição de fibras de polipropileno influenciam significativamente.

Palavras-chave: Concreto; Elevadas temperaturas; Resistência à compressão.

ABSTRACT

The fire response of structural elements depends on the thermal, mechanical and deformation properties of concrete. The properties vary significantly with temperature and depend on the composition and characteristics of the concrete. Thus, the objective of this work was to perform an analysis of the behavior of concrete subjected to high temperatures. For this, the experimental programs adopted were to investigate the behavior of the modulus of elasticity of the concrete, the resistance to the residual compression according to the type of cooling, exposure time, the concrete f_{ck} and the addition content of polypropylene fiber, besides of the analysis of mass loss and ultrasonic pulse velocity. The temperatures at which the concrete was subjected were 200 °C, 400 °C, 600 °C and 800 °C. It can be concluded that concrete exposed to high temperatures undergoes significant deterioration such as reduction of modulus of elasticity and compressive strength, spalling of concrete and consequently loss of durability. The addition of polypropylene fibers helped prevent spalling at temperatures up to 600 °C. Furthermore, based on statistical tests, the results showed that the A type of cooling does not influence the residual resistance, since the exposure time, the type of f_{ck} and the addition content of polypropylene fibers influence significantly.

Keywords: Concrete; High temperatures; Compressive strength.

1. INTRODUÇÃO

A engenharia civil enfrenta um imenso desafio em decorrência de danos causados pela ação do fogo durante a fase de construção e de serviço. Nos últimos anos, o surgimento de manifestações patológicas e danos estruturais relacionados com o fogo são frequentemente relatados em todo o mundo, ameaçando seriamente a segurança pessoal e da propriedade [1]. Os danos causados por um incêndio a uma estrutura de concreto podem ir desde uma simples descoloração ou mancha produzida pela fumaça, à completa destruição do elemento por perda de sua resistência mecânica [2].

Isso ocorre porque o fogo representa uma das condições deletérias mais severas às quais as estruturas possam ser submetidas. Sendo assim, a previsão de medidas adequadas de segurança contra incêndio é um aspecto importante do projeto de construção [3,4].

O concreto quando submetido a elevadas temperaturas, como no caso dos incêndios, sofre significativas mudanças físico-químicas [4,5,6,7,8]. Esta exposição pode ocasionar deteriorações relevantes, como a perda de resistência, redução do módulo de elasticidade e degradação da durabilidade no concreto [9,10,11,12] além de fissurações, desprendimento da massa de concreto superficial, destruição da ligação entre a pasta de cimento e os agregados e a deterioração gradual da pasta de cimento endurecida [6]. Essa é principalmente causada pelas diferenças nos coeficientes de expansão térmica dos materiais constituintes, como a pasta de cimento, os agregados etc., bem como está relacionada às mudanças dos materiais constituintes do concreto em temperaturas muito elevadas [13].

As manifestações patológicas ocasionadas pela ação das altas temperaturas são geralmente visíveis sob a forma de rachaduras na superfície e o efeito denominado *spalling* [14]. *Spalling* é definido como a quebra de camadas (peças) de concreto a partir da superfície quando exposto a temperaturas elevadas e em rápido aumento, como as encontradas nos incêndios. Este desprendimento pode ocorrer logo após a exposição ao aquecimento rápido e pode ser acompanhado por explosões violentas ou acontecer durante fases posteriores de fogo quando a peça se tornou tão fraca após o aquecimento de modo que, quando as rachaduras se desenvolvem, os pedaços de concreto caem da superfície. As conseqüências são limitadas, desde que a extensão do dano seja pequena, mas um *spalling* extensivo pode levar à perda precoce de estabilidade e integridade da estrutura [4].

Apesar de o concreto de alta resistência contribuir para uma melhor durabilidade e capacidade de carga de uma estrutura, em comparação ao concreto de resistência normal, são mais sensíveis ao *spalling* por causa de sua matriz de alta densidade e pequena permeabilidade [15,16,17]. Em relação a adição de fibras em matrizes cimentícias, o uso de fibras de polipropileno no concreto reduz e até evita o *spalling* quando submetido a elevadas temperaturas [16, 17, 18, 19, 20], porém esta adição afeta negativamente a trabalhabilidade no estado fresco [21,22].

Quanto aos valores de resistência residual do concreto produzido com fibra de polipropileno e submetido a elevadas temperaturas, há controvérsias. Enquanto estudos demonstram que essa resistência em concretos contendo fibras foram maiores que as de concretos sem essa adição após exposição [23], outros demonstram que a adição teve efeito negativo sobre as propriedades mecânicas residuais do concreto [1, 16, 24, 25].

Neste sentido, o presente trabalho visou analisar o comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas, variando parâmetros como tempo de exposição, tipo de resfriamento, f_{ck} e o teor de fibras de polipropileno.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foi utilizado cimento Portland CII-Z 32. As características do cimento utilizado são apresentadas na Tabela 1. O agregado gráudo era de origem granítica e o agregado miúdo silicoso.

Tabela 1: Características físicas e químicas do cimento utilizado.

PROPRIEDADES QUÍMICAS	RESULTADO	ESPECIFICAÇÃO – NBR 16697:2018
Perda ao fogo (%)	5,79	≤ 8,5%
Óxido de Magnésio – MgO (%)	2,77	-
Trióxido de Enxofre – SO ₃ (%)	3,21	≤ 4,5%

Resíduo Insolúvel (%)	14,42	≤ 18,5%	
PROPRIEDADES FÍSICAS	RESULTADO	ESPECIFICAÇÃO – NBR 16697:2018	
Área específica (Blaine) (cm ² /g)	5065	≥ 2600 cm ² /g	
Finura (#200) (%)	1,70	≤ 12,0%	
Finura (#325) (%)	6,70	-	
Tempo de pega (min)	Início de pega	168	≥ 60 min
	Fim de pega	226	≤ 600 min
Resistência à compressão (Mpa)	3 dias	27,4	≥ 10,0 Mpa
	7 dias	31,8	≥ 20,0 MPa
	28 dias	37,1	≥ 32,0 MPa

A Tabela 2 apresenta um resumo das normas utilizadas para caracterização dos agregados, bem como os resultados obtidos com os agregados analisados.

Tabela 2: Características dos agregados miúdos e graúdos utilizados na pesquisa.

ENSAIO	NORMA	AREIA	BRITA 0	BRITA 1
Granulometria	ABNT NM 248:2003 [26]	DMC = 2,36mm MF = 2,52	DMC = 12,5mm MF = 5,99	DMC = 19mm MF = 6,84
Massa unitária (g/cm ³)	ABNT NBR NM 45:2006 [27]	1,5	1,41	1,37
Absorção de água (%)	ABNT NBR NM 52:2009 [28]	0,2	0,89	0,94
Massa específica (g/cm ³)		2,64	2,61	2,61
Material pulverulento (%)	ABNT NBR NM 46:2003 [29]	1,7	0,29	0,9

O aditivo utilizado foi do tipo superplastificante, composto por policarboxilatos, à base de naftaleno sulfonato. Possui cor amarelada, pH entre 8,50 e 10,40 e uma massa específica em torno de 1,05 a 1,10 g/cm³. A fibra de polipropileno apresenta absorção zero, à prova de álcalis, ponto de ignição 404°C, ponto de fusão 160°C, massa específica 0,91 e baixa condutividade elétrica e térmica.

2.2 Métodos de pesquisa

Primeiramente, deu-se início com o preparo do concreto e moldagem dos corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, os quais foram submetidos à cura por 28 dias. Os traços utilizados são apresentados nas Tabela 3, juntamente com os materiais utilizados e suas quantidades. Para a consistência do concreto foi adotado um *slump* de 8 ± 2 mm, obtido de acordo com a NBR NM 67 [30].

Tabela 3: Consumo de materiais por m³ de concreto, em kg.

TRAÇO	f _{ck} (Mpa)	CIMENTO	AREIA	BRITA 13mm	BRITA 19mm	ADITIVO (%)	FIBRA DE POLI-PROPILENO	FATOR a/c
T20	20,0	278	860	277	694	0,23	-	0,65
T30	30,0	332	794	264	703	0,72	-	0,54
T30+1,2	30,0	332	794	264	703	0,76	1,20 kg/m ³	0,54
T30+1,8	30,0	332	794	264	703	0,85	1,80 kg/m ³	0,54
T30+2,4	30,0	332	794	264	703	0,94	2,40 kg/m ³	0,54
T40	40,0	435	710	266	709	0,80	-	0,41
T50	50,0	542	997,6	-	673,4	1,02	-	0,33

Em seguida, os corpos de prova foram secos em estufa por 24 horas a 105 °C ± 5 °C, posteriormente à secagem, foi realizado a pesagem dos corpos de prova e realizado o ensaio de ultrassom para determinar a velocidade de propagação ultrassônica. Logo após, os corpos de prova foram submetidos às temperaturas de 200 °C, 400 °C, 600 °C e 800 °C, à uma taxa de aquecimento conforme ilustrado na Figura 1, utilizando-se

um forno elétrico, com capacidade de temperatura máxima de 1340 °C, isolamento térmico através de placas de silicato de cálcio e equipado com um sistema digital de controle de temperatura e tempo. A temperatura adotada como referência (REF.) foi a temperatura ambiente, com medida em torno de 28 °C.

Para o tempo requerido de resistência ao fogo foi adotado o período médio de 30 minutos, conforme definido na ABNT NBR 14432:2001 [31] para ocupações residenciais de altura até 12 metros de altura. Os corpos de prova foram expostos ao calor durante o processo de aquecimento do forno até se alcançar a temperatura desejada para estudo, e em seguida, realizado a marcação do tempo de exposição. A Tabela 4 apresenta uma divisão dos parâmetros e variáveis analisados para a realização da pesquisa, bem como a quantidade de corpos de provas utilizados em cada ensaio.

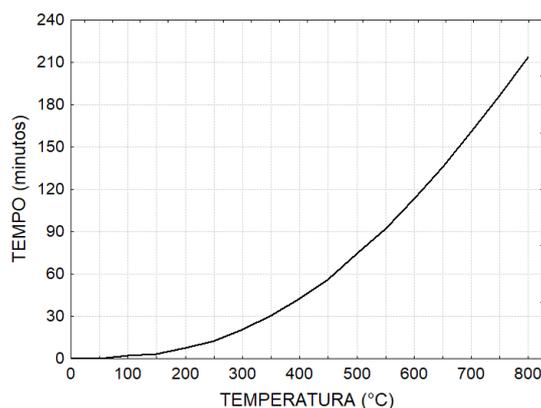


Figura 1: Taxa de aquecimento do forno utilizado.

Tabela 4: Divisão dos parâmetros analisados.

PARÂMETRO	TRAÇOS	TIPO DE RESFRIAMENTO	ENSAIOS	TEMPO DE FORNO	Nº DE CP's
Módulo de elasticidade	T30	Natural	Módulo de elasticidade	30 min	15
Tipo de resfriamento	T30	Brusco (imerso em água)	Resistência à compressão	30 min	30
		Natural			
Tempo de exposição	T30	Natural	Resistência à compressão	15 min	15
				30 min	15
				60 min	15
f _{ck} do concreto	T20	Natural	Resistência à compressão Perda de massa VPU	30 min	60
	T30				
	T40				
	T50				
Teor de fibra de poli-propileno	T30+1,2	Natural	Resistência à compressão VPU	30 min	45
	T30+1,2				
	T30+1,2				

Por fim, após a coleta dos resultados experimentais, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) e utilizado o método de comparação das médias através do Teste de Tukey por meio do software Statistica 7.0 para análise dos dados, em todos os parâmetros analisados. Como representação gráfica do Teste de Tukey foram utilizadas linhas horizontais acima das barras nos gráficos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é um parâmetro de extrema importância no dimensionamento de estruturas de concreto armado pois é fundamental quando se trata de analisar as suas deformações, o que torna necessá-

rio identificar esta variável nos projetos estruturais. Foi analisado o comportamento do módulo de elasticidade do concreto quando exposto à altas temperaturas. A ANOVA realizada demonstra que a temperatura influencia significativamente o comportamento do módulo de elasticidade. Com a realização do teste de comparação de médias de Tukey, foi identificado que não há diferença significativa entre as médias do módulo de elasticidade obtidos para os concretos de referência e o aquecido a 200 °C. As médias dos demais diferem entre si, conforme Figura 2.

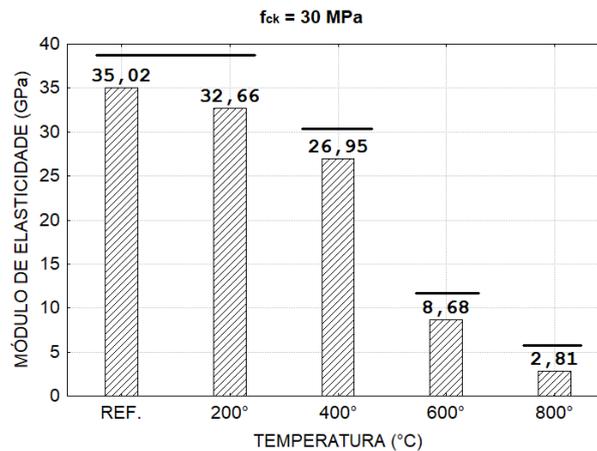


Figura 2: Desempenho do módulo de elasticidade conforme aumento da temperatura.

Percebe-se que em 200 °C o módulo de elasticidade é pouco afetado, com fator de redução na ordem de 0,93. Em 400°C tem-se um fator de redução de 0,77, o qual a partir desta temperatura o módulo é drasticamente afetado, com fatores de redução na ordem de 0,25 e 0,08 para as temperaturas de 600 °C e 800 °C, respectivamente. Valores similares foram encontrados por LIMA [32], que obteve valores de fator de redução na ordem de 0,93%, 0,77% e 0,25% para as temperaturas de 200 °C, 400 °C e 600 °C, respectivamente.

3.2 Tempo de exposição e tipo de resfriamento

Em relação a influência do tempo de exposição a altas temperaturas, foi investigado a resistência à compressão residual. Foram analisados os tempos de 15, 30 e 60 minutos. Com a ANOVA foi identificado que o tempo de exposição influencia significativamente a resistência à compressão do concreto. O teste de Tukey constatou que apenas há diferença significativa entre as médias para os tempos de exposição de 15 e 60 minutos, sendo essa diferença apenas para a temperatura de 600 °C (Figura 3).

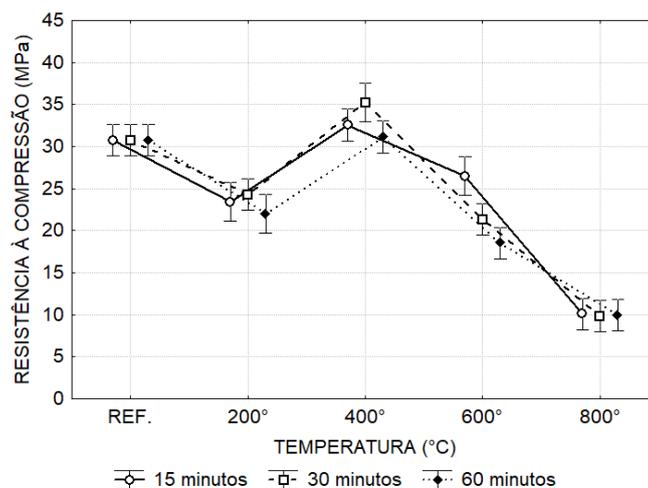


Figura 3: Variação da resistência à compressão em relação ao tempo de exposição e aumento de temperatura.

Em seguida, foi verificado a influência do tipo de resfriamento, natural (ao ar livre) e brusco (submerso em água imediatamente após a retirada do forno), na resistência à compressão residual do concreto. Apesar do resfriamento brusco apresentar menores valores de resistência, a ANOVA identificou que não há influência significativa do tipo de resfriamento na resistência do concreto. A Figura 4 ilustra o comportamento da resistência à compressão com o aumento da temperatura para os tipos de resfriamento.

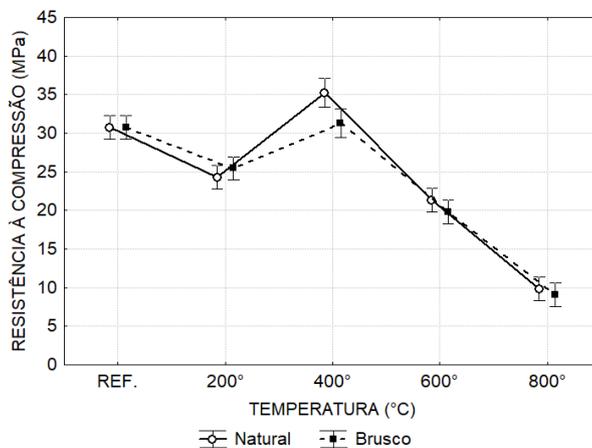


Figura 4: Comportamento da resistência à compressão conforme o tipo de resfriamento em diferentes temperaturas.

3.3 Influência do f_{ck}

Em relação a influência do f_{ck} , foi investigado o comportamento da resistência à compressão, perda de massa e velocidade de propagação ultrassônica, de concretos expostos a elevadas temperaturas. A ANOVA identificou que a exposição do concreto a altas temperaturas influencia significativamente a sua resistência residual. Com a realização do teste de comparação de médias de Tukey constatou-se que há diferenças significativas entre as médias dos concretos produzidos, para todos os valores de f_{ck} estudados.

Conforme apresentado na Figura 5, para os concretos de 20, 30 e 40 MPa não há diferença significativa entre as médias das resistências até 400 °C. Para o concreto de 50 MPa até 200 °C não há diferença entre as médias, porém em 400 °C ocorre um aumento de resistência, se comparado com o de referência. Fato similar de aumento de resistência com o aumento da temperatura foi encontrado por diversos autores na literatura. [1, 25, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44]

Conforme HUO *et al.* [43] foi observado que quando a temperatura era inferior, porém próxima a 400 °C a reidratação de partículas de cimento continuou a gerar novos Ca(OH)_2 e (C-S-H). Para MA *et al.* e HAGER [1,40] a hidratação dos grãos de cimento não hidratados é melhorada devido a uma condição de autoclave interna como resultado da alta temperatura e evaporação da água. Já SAVVA *et al.* [36] explicam que para o material pozzolânico, formou-se um gel adicional de tobermorite como resultado da reação pozzolânica de Ca(OH)_2 . POON *et al.* [33] ainda complementa afirmando que esse aumento é mais pronunciado no concreto com maior porcentagem de partículas não hidratadas devido à sua estrutura densa.

A partir de 600°C tem-se uma acentuada redução na resistência à compressão para todos os f_{ck} investigado. SOUZA e MORENO JR [45] explicam que nesta temperatura, o concreto perde não só a água livre, mas também a água contida no gel do cimento, provocando, como consequência, um alto grau de fissuração superficial. Os agregados se expandem dando lugar a tensões internas que prejudicam a resistência à compressão do concreto, o que corroboram com os resultados obtidos.

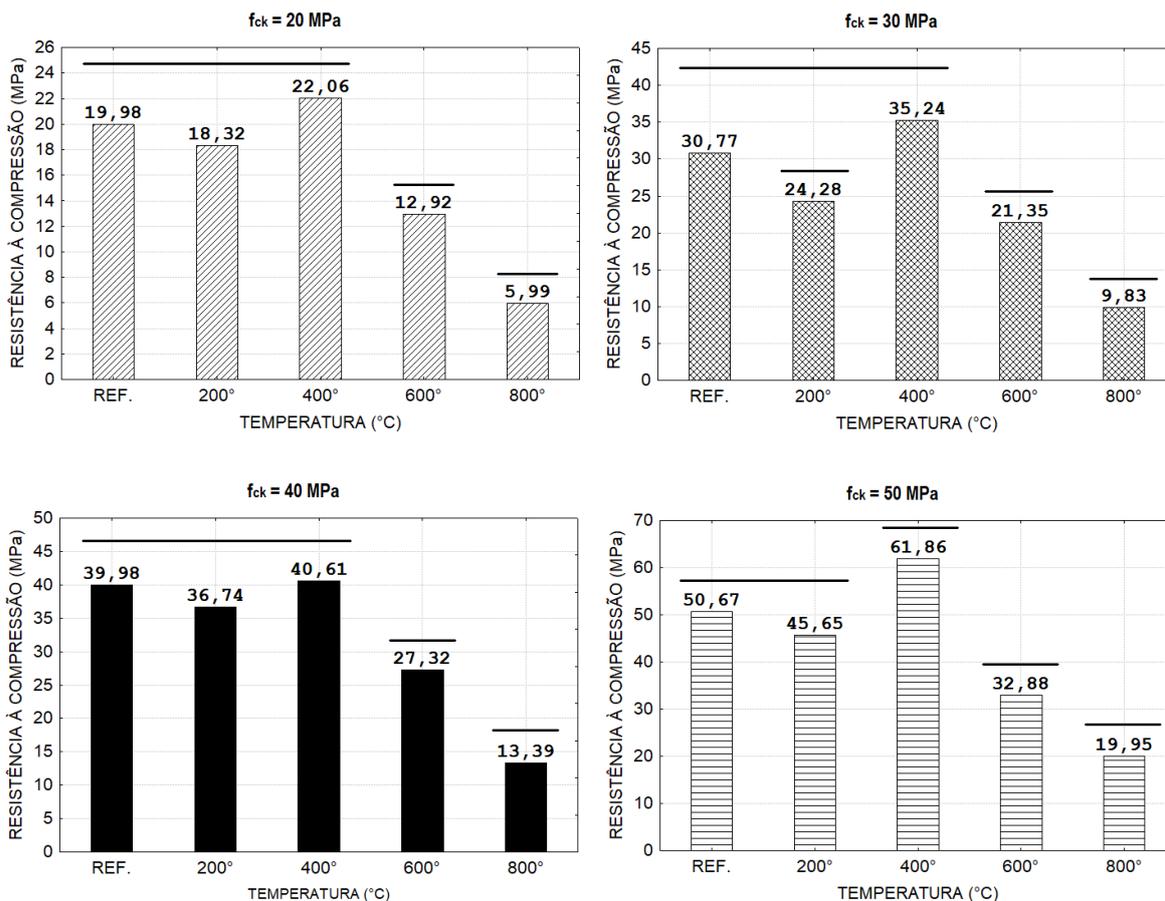


Figura 5: Análise comparativa do desempenho mecânico entre os tipos de f_{ck} analisados em diferentes temperaturas.

Quanto à perda de massa dos concretos com diferentes f_{ck} , o teste de TUKEY identificou que a diferença entre as médias não é significativa entre os concretos de 20, 30 e 40 MPa, sendo divergente apenas para o concreto de 50 MPa. A Figura 6 apresenta os valores de perda de massa para cada concreto, conforme a temperatura.

Constata-se que a perda de massa do concreto aumenta com o aumento da temperatura. A perda de massa está associada a evaporação da água livre ou fisicamente ligada. CASTRO *et al.* [46], explicam que na primeira hora, a taxa de evaporação é reduzida já que o calor só remove a umidade próxima à superfície da amostra.

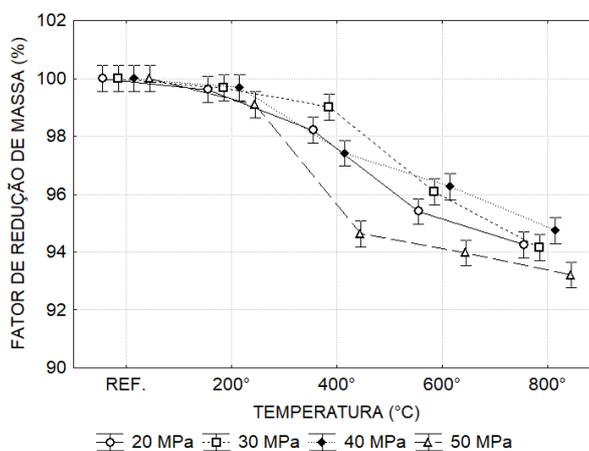


Figura 6: Influência dos diferentes tipos de f_{ck} na redução de massa do corpo de prova exposto a elevadas temperaturas.

Quanto à redução da velocidade ultrassônica do concreto, percebe-se uma redução da velocidade de propagação ultrassônica no concreto com o aumento da temperatura. A ANOVA demonstrou que o f_{ck} , bem como a interação entre temperatura- f_{ck} influencia significativamente na redução da velocidade. Com a realização do teste de TUKEY para o tipo de f_{ck} foi verificado que o valor das médias do fator de redução da velocidade ultrassônica é diferente para cada tipo, sendo o maior fator de redução para o concreto de 20 MPa. Foi constatado que até 200°C não ocorre diferença significativa na VPU, o que começa a ocorrer a partir de 400 °C (Figura 7).

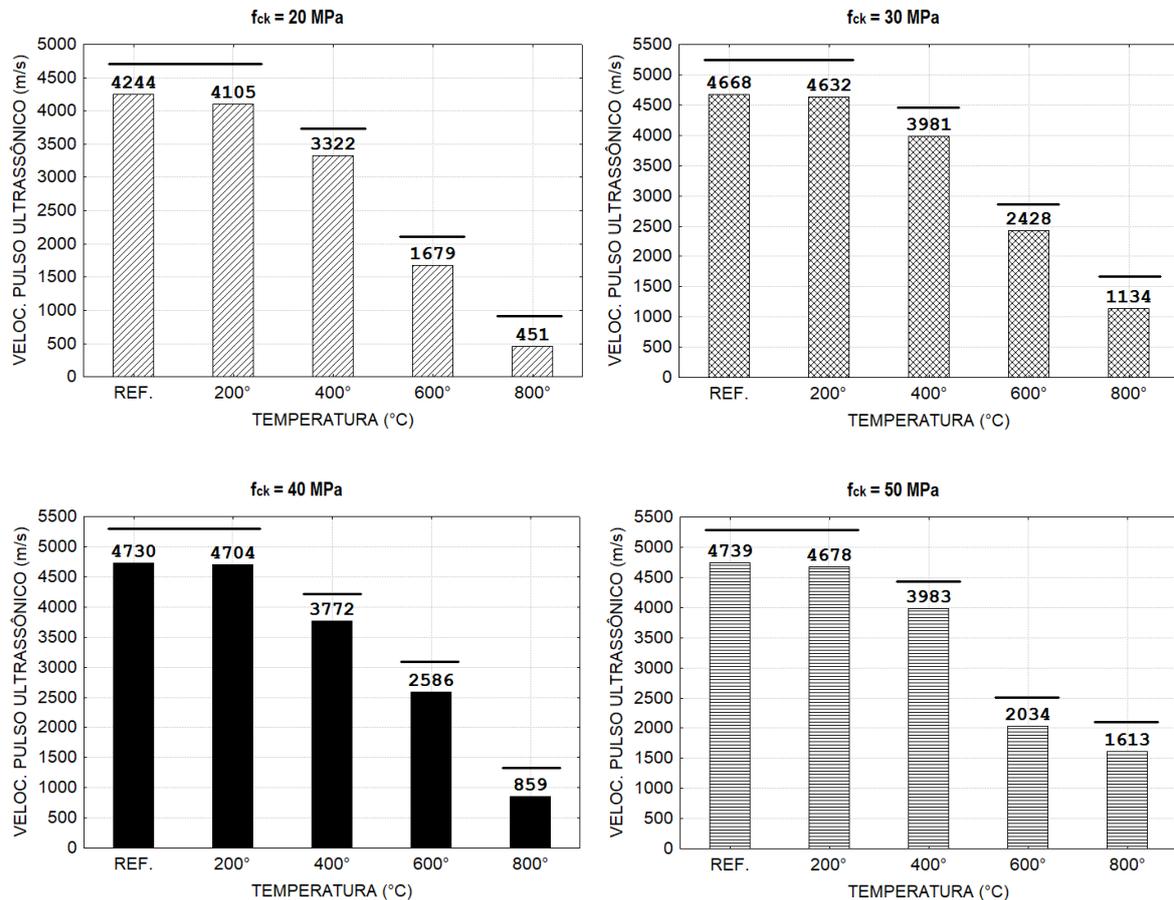


Figura 7: Comportamento da velocidade de pulso ultrassônico de acordo com a mudança de temperatura e f_{ck} .

Constata-se que a partir de 400°C tem-se uma redução significativa na velocidade, sendo mais acentuada a 600°C, o que pode ser justificado pelo maior grau de deterioração do concreto e maior incidência de fissuras, que conforme SOUZA e MORENO JR [45], ocorre a partir de 600°C. Em consoante, percebe-se que o concreto com menor f_{ck} apresenta maiores valores de redução da VPU, o que provavelmente se deva a uma maior quantidade de poros e fissuras no concreto quando submetido a elevadas temperaturas.

A coloração da superfície externa dos concretos é observada na Figura 8. Conforme GEORGALI e TSAKIRIDIS [6], as cores observadas em concretos submetidos a elevadas temperaturas seriam tons de rosa a avermelhado entre 300 °C a 600 °C, tom de cinza a amarelado 600 °C até cerca de 900 °C e a partir de 900 °C um tom amarelado escuro.

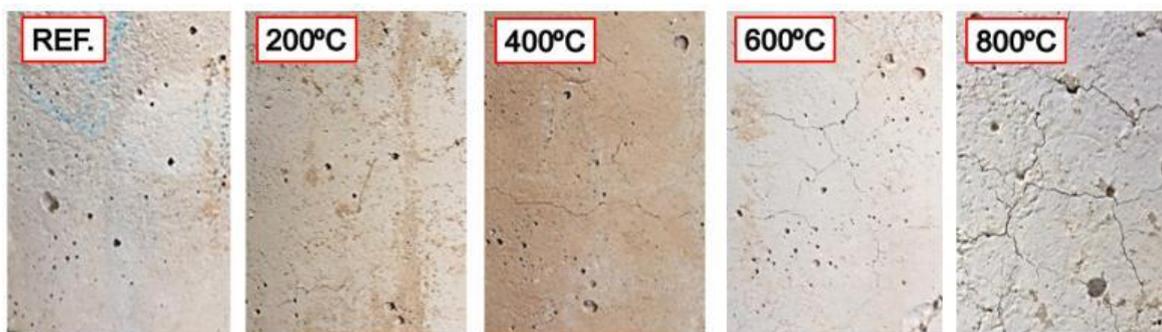


Figura 8: Variação da coloração da superfície externa dos corpos de prova de concreto após exposição a determinadas temperaturas.

3.3 Teor de fibras de polipropileno

Quanto a influência da adição de fibra de polipropileno para concretos expostos a elevadas temperaturas, a ANOVA identificou que o teor de fibras e a interação temperatura-teor de fibras influenciam significativamente a resistência à compressão do concreto após a exposição a elevadas temperaturas. A Figura 9 apresenta o comportamento dos concretos com os três teores de fibra quando aquecidos.

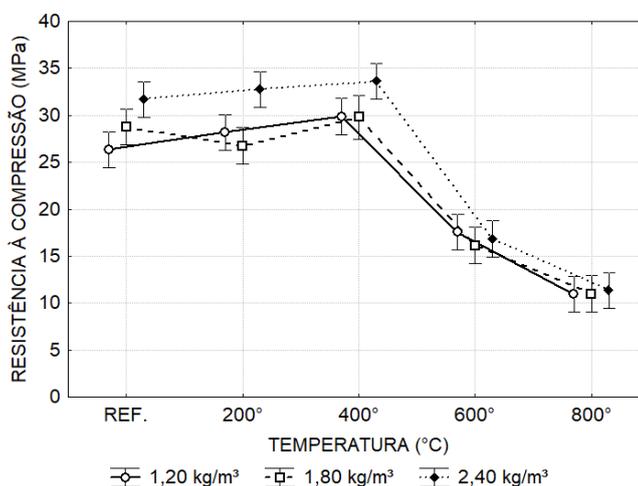


Figura 9: Influência da temperatura na resistência à compressão para traços contendo diferentes teores de fibra.

Percebe-se na Figura 9 que até a temperatura de 400 °C o concreto com teor de fibra de 2,40 kg/m³ apresenta os maiores valores de resistência. Já a partir de 600 °C o teste de TUKEY afirma que não há diferença significativa entre as médias das resistências para os três teores de adição de fibra, ou seja, a resistência à compressão residual do concreto após exposto a elevadas temperaturas não foi influenciada pelos teores de adição de fibra a partir de 600 °C.

Constata-se com os resultados do teste de TUKEY que não há diferenças significativas entre as médias obtidas para os concretos com teores de 1,20 kg/m³ e 1,80 kg/m³, sendo apenas para o valor de 2,40 kg/m³ que apresenta diferença significativa.

A Figura 10 apresenta comparação das médias por meio do teste de TUKEY de acordo com a temperatura para cada teor individualmente. Pode ser observado que para todos os teores de adição de fibra não há diferença significativa entre as médias até 400 °C, a partir de 600 °C já ocorre uma redução significativa. Já para os teores de 1,20 kg/m³ e 1,80 kg/m³ não há diferenças significativas entre as médias para nenhuma das temperaturas.

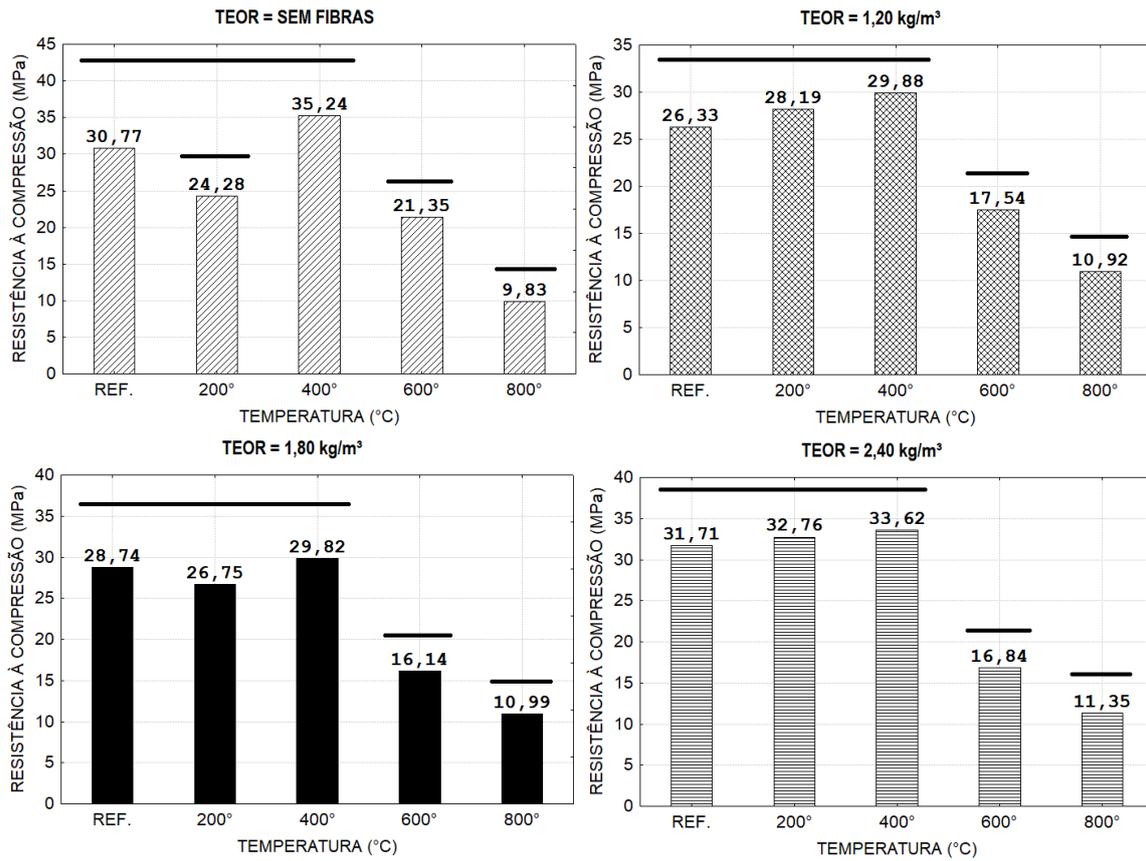


Figura 10: Análise comparativa do desempenho mecânico entre os traços com diferentes teores de fibra de polipropileno em diferentes temperaturas.

Em relação à redução da velocidade de pulso ultrassônico no concreto, a ANOVA demonstrou que o teor de adição de fibras de polipropileno influencia significativamente a redução da velocidade, sendo o teor de 1,80 kg/m³ que apresenta o menor fator de redução. A interação entre temperatura-teor de fibras também influencia significativamente a redução da velocidade de propagação do ultrassom no concreto, conforme a ANOVA. O teste de TUKEY para o efeito combinado de temperatura-teor de fibras é demonstrado na Figura 11.

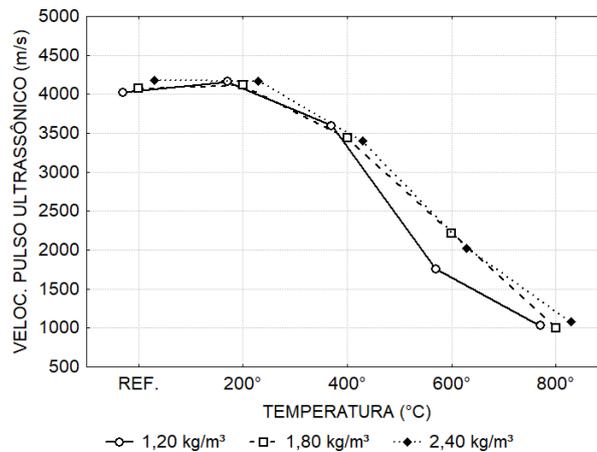


Figura 11: Influência dos diferentes teores de fibra de polipropileno na velocidade de pulso ultrassônico do concreto quando exposto a elevadas temperaturas.

A adição de fibra de polipropileno ajudou a prevenir o surgimento do fenômeno *spalling*. Até 600 °C não ocorreu *spalling* do concreto para nenhum teor de adição, enquanto que esse lascamento na superfície do concreto de referência já ocorria, sendo mais intensificado nos concretos de 50 MPa, devido à sua menor permeabilidade e estrutura mais densa.

Para a temperatura de 800 °C ocorreu o *spalling* para todos os concretos com adição de fibras de polipropileno, sendo menos intensificado no traço com maior teor de adição (2,40 kg/m³), conforme Figura 12, onde podem ser observadas imagens da superfície dos corpos de prova imediatamente após a exposição à esta temperatura. Foi escolhida a região mais crítica do corpo de prova, ou seja, com a maior presença de *spalling*, em uma área superficial de 3,5 cm de largura por 5,0 cm de altura.

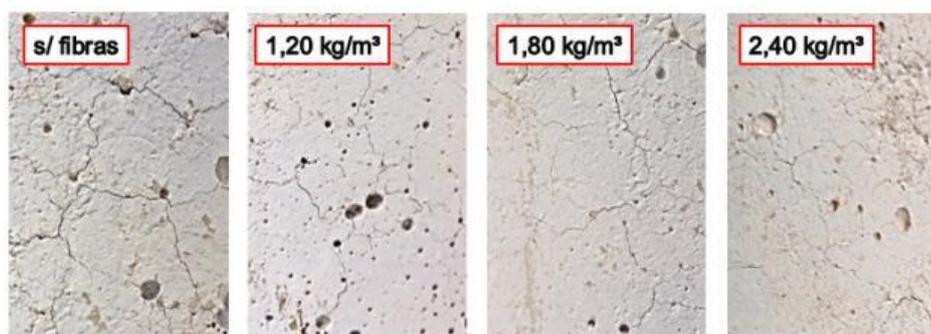


Figura 12: Diminuição da ocorrência de *spalling* no concreto à medida que se aumenta o teor de fibra de polipropileno, em concretos expostos à temperatura de 800 °C por 30 minutos.

4. CONCLUSÕES

O módulo de elasticidade é uma das propriedades mais afetadas com o aumento da temperatura. Foi observado que até 200 °C não há diferença significativa em comparação às médias dos resultados obtidos para os corpos de prova de referência, sendo a partir de 400 °C quando se inicia a redução considerável do módulo de elasticidade do concreto, chegando a atingir uma redução de 92% para o concreto submetido a temperatura de 800 °C.

O tempo de exposição causa influência na resistência residual do concreto, sendo o tempo de 60 minutos, o que apresentou as maiores perdas de resistência. Quanto ao tipo de resfriamento, não houve influência na resistência residual do concreto. Dessa forma, o concreto ao ser resfriado ao ar livre de forma natural, ou bruscamente com uso de água, não ocasiona alterações nas propriedades mecânicas.

Quanto aos resultados encontrados a partir da análise dos diferentes tipos de f_{ck} , foi possível avaliar que até 400 °C, com exceção do concreto com resistência de 50 MPa, não há diferença significativa entre as médias da resistência residual do concreto, acima desta temperatura o concreto começa a sofrer redução significativa na resistência e apresentar um alto grau de fissuração superficial, ocasionados principalmente pela perda de água livre e contida no gel do cimento e à tensões internas oriundas da expansão dos agregados.

Constatou-se que a perda de massa do concreto e, conseqüentemente, a redução da velocidade de pulso ultrassônico aumentam com o acréscimo da temperatura, por estarem associada à evaporação da água livre ou fisicamente ligada. Para a perda de massa foi observado um fator de redução em média de 6% nas maiores temperaturas estudadas, sendo essa perda mais acentuada para o traço de 50 MPa. Para a VPU, percebeu-se que sua redução começa a ser significativa a partir da temperatura de 400 °C, sendo o maior fator de redução para o concreto de 20 MPa.

O fenômeno do *spalling* com a adição de fibras de polipropileno foi prevenido até a temperatura de exposição de 600 °C. Acima desta temperatura a adição atuou apenas na minimização desse fenômeno, pois todos os concretos com fibras apresentaram *spalling*, fato menos intenso no concreto com maior teor de adição. Vale ressaltar que a resistência residual do concreto não é afetada com a adição de fibras quando o concreto é submetido a elevadas temperaturas.

Os resultados obtidos demonstram a importância das normas regulamentadoras que apresentam valores de redução para o módulo de elasticidade e para a resistência a compressão para o concreto após submetidas a situação de incêndios. Com isso, o engenheiro pode mensurar os danos causados pelo fogo nas estruturas de concreto e assim, estabelecer parâmetros para a construção de novos empreendimentos, bem como critérios para reforço e recuperação de estruturas que passaram por sinistros.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PEC, ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, e ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará – UFC. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] MA, Q. GUO, R. ZHAO, Z., *et al.*, “Mechanical properties of concrete at high temperature – A review”, *Construction and Building Materials*, v. 93 pp. 371-383, set. 2015.
- [2] SOUZA, A. A. A., MORENO JR, A. L. “The effect of high temperatures on concrete compression strength, tensile strength and deformation modulus”, *Ibracon Structures and Materials Journal*, v.3, n.4 pp.432-448, dec.2010
- [3] LAU, A., ANSON, M. “Effect of high temperatures on high performance steel fiber reinforced concrete”, *Cement and Concrete Research*. v. 36, n. 9, pp. 1698–1707, set. 2006.
- [4] KODUR, V. “Properties of Concrete at Elevated Temperatures”. *ISRN Civil Engineering*. Vol 2014, pp 1-15, mar. 2014
- [5] POON, C., AZHAR, S., ANSON, M., *et al.*, “Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post fire curing”, *Cement and Concrete Research*. v. 31, pp. 1307-1318, set. 2001.
- [6] GEORGALI, B., TSAKIRIDIS, P. E. “Microstructure of fire-damaged concrete. A case study”, *Cement & concrete composites*.v.27, pp. 255-259, Fev. 2005.
- [7] ARIQZ, O. “Effects of elevated temperatures on properties of concrete”, *Fire Safety Journal*, v.42 pp. 516-522, Nov 2007.
- [8] YANG, H., LIN, Y., HSIAO, C., *et al.*, “Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity”, *Fire Safety Journal*, v.44, pp.121-130, Jan 2009.
- [9] HADDAD, R.H., SHANNIS, L.G. “Post-fire behavior of bond between high strength pozzolanic concrete and reinforcing steel”, *Construction and Building Materials*, v.18, pp. 425-435, Jul. 2004.
- [10] XIAO, J., G. KÖNIG, G. “Study on concrete at high temperature in China – an overview”, *Fire Safety Journal*, v. 39, pp. 89-103, Fev. 2004.
- [11] HUSEM, M. “The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete”, *Fire Safety Journal*, v.41, pp. 155-163, Mar. 2006.
- [12] YICHING, L., CHIAMEN, H., HSUANCHIH, Y., *et al.*, “The effect of post-fire-curing on strength-velocity relationship for nondestructive assessment of fire-damaged concrete strength”, *Fire Safety Journal*. v.46, n. 4 pp. 178-185, Maio 2011.
- [13] PARK, S., YIM, H.J., KWAK, H. “Effects of post-fire curing conditions on the restoration of material properties of fire-damaged concrete”, *Construction and Building Materials*. V.99, pp. 90-98, Nov. 2015.
- [14] HERTZ K. D., SORENSEN, L. S. “Test method for spalling of fire exposed concrete”. *Fire Safety Journal*. v. 40, n. 5 pp. 466-676, Jul. 2005.
- [15] LEE, G., HAN, D., HAN, M.C., *et al.*, “Combining polypropylene and nylon fibers to optimize fiber addition for spalling protection of high-strength concrete”, *Construction and Building Materials*. V.34, pp. 313-320, Set. 2012.
- [16] SIDERIS, K. K., MANITA, P. “Residual mechanical characteristics and spalling resistance of for reinforced self-compacting concretes exposed to elevated temperatures”, *Construction and Building Materials*, v.41, pp. 296-302, Abr. 2013.
- [17] YERMAK, N., PLYA, P., BEAUCOUR, A., *et al.*, “Influence of steel and/or polypropylene fibers on the behavior of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties”, *Construction and Building Materials*, v.132, pp. 240-250, Fev. 2017.
- [18] CHEN B, LIU J. “Residual strength of hybrid-fiber reinforced high strength concrete after exposure to high temperature”, *Cement and Concrete Research*., v. 34, pp. 1065-1069, Jun. 2004.
- [19] JANSSON, R., BOSTRÖM, L. “The influence of pressure in the pore system on fire spalling of concrete”, *Fire Technology*. v. 46, n.1, pp. 217-230, Jan 2010.
- [20] BANGI, M. R., HORIGUCHI, T. “Pore pressure development in hybrid fiber-reinforced high strength concrete at elevated temperatures”, *Cement and Concrete Research*., v.41, n.11, pp. 1150-1156, Nov. 2011.

- [21] KARAHAN, O., ATIS C. D. “The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete”, *Materials & Design*, v.32, n.2, pp. 1044-1049, Dez. 2011.
- [22] XIONG, M. X., LIEW, J. Y. R. “Spalling behavior and residual resistance of fiber reinforced Ultra-High performance concrete after exposure to high temperatures”, *Materiales de Construcción*, v. 65, n. 320, 2015.
- [23] BEHNOOD, A., GHANDEHARI, M. “Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete without polypropylene fibers heated to high temperatures”, *Fire Safety Journal*, v.44, n.8, pp. 1015-1022, Nov. 2009.
- [24] POON, C.S., SHUI, Z.H., LAM, L. “Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures”, *Cement and Concrete Research*, v. 34, n.12, pp. 2215-2222, Dez. 2004.
- [25] AKCA, A. H., OZYURT, N., ZIHNIOLU, O. “High performance concrete under elevated temperatures”, *Construction and Building Materials*, v. 44, pp. 317-328, Jul. 2013.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 45: Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro, 2006.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2009.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem*. Rio de Janeiro, 2003.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 1998.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2001.
- [32] LIMA, R. C. A. “Investigação do comportamento de concretos em elevadas temperaturas”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.
- [33] POON, C.S., AZHAR, S., ANSON, M., *et al.*, “Comparison of the strength and durability performance of normal and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures”, *Cement and Concrete Research*, v. 31, pp. 1291-1300, Set. 2001.
- [34] XU, Y., WONG, Y. L., POON, C. S. ANSON, M. “Impact on high temperature on PFA concrete”, *Cement and Concrete Research*. v.31, pp. 1065-1073, Jul. 2001.
- [35] VODÁK, F. TRTÍK, K. KAPICKOVÁ, O. HOSKOVÁ, S. DEMO, P. “The effect of temperature on strength – porosity relationship for concrete”, *Construction and Building Materials*, v.18, pp. 529-534, 2004.
- [36] SAVVA A., MANITA P., SIDERIS K. K. “Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, V.27, pp. 239-248, Fev. 2005.
- [37] BIOLZI, L., CATTANEO, S. ROSATI, G. “Evaluating residual properties of thermally damaged concrete”, *Cement & Concrete Composites*. V.30, pp. 907-916, Nov. 2008.
- [38] KIM, G., KIM, Y., LEE, T. “Mechanical properties of high-strength concrete subjected to high temperature by stressed test”, *Transactions of Nonferrous metals society of China*, v.19, pp. 128-133, Set. 2009.
- [39] CÜLFIK, M.S., ÖZTURAN, T. “Mechanical properties of normal and high strength concretes subjected to high temperatures and using image analysis to detect bond deteriorations”, *Construction and Building Materials*, v.24, pp. 1486-1493, Ago. 2010.
- [40] HAGER, I. “Behavior of cement concrete at high temperature”, *Bulletin of the polish academy of sciences Technical sciences*, v. 61, pp. 145-154, Maio 2013.
- [41] RASHAD, A.M. “An investigation of high-volume fly ash concrete blended with slag subjected to elevated temperatures.”, *Journal of Cleaner Production*, v. 93, pp. 47-55, Abril 2015.
- [42] JACKIEWICZ-REK, W., DRZYMALA, T., KUS, A., *et al.*, “Durability of HPC subject to fire temperature impact”, *Archives of Civil Engineering*, v. 62, n.4, pp 73-94, Jan. 2016.
- [43] HUO, J., JUN, B., YU, Q., *et al.*, “Effect of Microstructure Variation on damage evolution of concrete at high temperatures”, *ACI Materials Journal*, v.113, pp. 547-558, Jan. 2016.

[44] DRZYMALA, T., JACKIEWICZ-REK, W., TOMASZEWSKI, M., *et al.*, “Effects of high temperature on the properties of high-performance concrete (HPC)”, *Procedia Engineering*. v.172, pp. 256-263, 2017.

[45] SOUZA, A. A. A., MORENO JR, A. L. “Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e modulo de deformação do concreto”, *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 3, n. 4, pp. 432-448, 2010.

[46] CASTRO, A. L., TIBA, P. R. T., PANDOLFELLI, V.C. “Polypropylene fibers and their influence on the behavior of concretes exposed to high temperatures”, *Review Cerâmica* v. 57, p. 22-31, 2011.

ORCID

Alisson Rodrigues de Oliveira Dias

<https://orcid.org/0000-0002-9892-6834>

Felipe Alves Amancio

<https://orcid.org/0000-0002-1349-683X>

Maria Fabíola de Carvalho Rafael

<https://orcid.org/0000-0001-8593-802X>

Antônio Eduardo Bezerra Cabral

<https://orcid.org/0000-0001-6394-1164>