

Área: Sustentabilidade | **Tema:** Educação e Sustentabilidade

Análise de propriedades mecânicas do concreto com adições minerais submetido a altas temperaturas

Analysis of mechanical properties of concrete with mineral additions subjected to high temperatures

Tobias Pigatto Ottoni, Marina Copetti, Silvane Santos Da Silva e Rogério Cattelan Antochaves De Lima

RESUMO

A natureza não combustível e não tóxica do concreto, bem como sua baixa condutividade térmica, coloca-o como vantajoso em relação à maioria dos materiais de construção, funcionando até certo ponto como uma barreira que previne a propagação do calor e do próprio fogo. Dessa forma, é de extrema importância que as suas propriedades sejam melhoradas constantemente, sendo que parâmetros como desempenho mecânico, microestrutura e durabilidade devem ser avaliados. Diante do propósito de formulação de misturas mais duráveis e conseqüentemente mais sustentáveis, o objetivo principal deste trabalho é a utilização de adições minerais em substituição ao cimento em altos teores com misturas binárias de fíler calcário e ternárias de fíler calcário e cinza de casca de arroz e análise do comportamento mecânico do concreto especialmente à compressão axial e módulo de elasticidade por velocidade de onda ultrassônica quando submetidos a ação de altas temperaturas, variando de 23°C a 900°C. Percebeu-se que, acima de 400°C as propriedades do concreto foram modificadas e houve uma perda significativa de massa, e à 900°C ocorreu o fenômeno de spalling nas misturas binárias e ternárias.

Palavras-Chave: Concreto, adições minerais, altas temperaturas, resistência mecânica.

ABSTRACT

The non-combustible and non-toxic nature of concrete, as well as its low thermal conductivity, makes it advantageous over most building materials, to some extent acting as a barrier to the spread of heat and fire itself. Thus, it is extremely important that their properties are constantly improved, and parameters such as mechanical performance, microstructure and durability should be evaluated. In view of the purpose of formulating more durable and consequently more sustainable mixtures, the main objective of this work is the use of high-grade cement-substitute mineral additions with binary lime and ternary mixtures of limestone and rice husk ash and analysis of the mechanical behavior of concrete especially axial compression and modulus of elasticity by ultrasonic wave velocity when subjected to high temperature action, ranging from 23°C to 900°C. It was noticed that above 400°C the concrete properties were modified and there was a significant loss of mass, and at 900°C the spalling phenomenon occurred in the binary and ternary mixtures.

Keywords: Concrete, mineral additions, high temperatures, mechanical resistance

ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM ADIÇÕES MINERAIS SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material compósito em que seus diferentes materiais constituintes não reagem da mesma forma diante de elevadas temperaturas, o que torna o efeito do fogo um problema preocupante. Apesar disso, é de senso comum que o concreto é um material incombustível e que não emite gases tóxicos quando exposto a altas temperaturas. Também é bem estabelecido que ocorra uma perda de resistência dos concretos expostos à altas temperaturas.

Segundo Figueiredo et. al (2002), a elevação da temperatura dos elementos estruturais, decorrentes da ação térmica devido aos incêndios, causa mudanças tanto na macroestrutura como na microestrutura. O aumento gradual de temperatura provoca efeitos divergentes no concreto e nas argamassas, verificando-se mudança na coloração, decréscimo na resistência mecânica, esfrelamento superficial, fissuração até o próprio colapso da estrutura. Dentre as causas que podem levar uma estrutura sujeita a altas temperaturas ao colapso, estão a temperatura máxima atingida, o tempo de exposição, o traço de concreto, o tipo de estrutura, o elemento estrutural e a velocidade de resfriamento. O tempo de exposição e a velocidade de resfriamento estão diretamente associados ao ciclo típico de um incêndio.

De acordo com Neville (2016), existem muitas variáveis que influenciam na resistência do concreto exposto à altas temperaturas, dentre elas estão o tipo de agregado, o tempo de exposição, o resfriamento e a relação água-cimento. Mesmo assim, em geral, quanto menor for a permeabilidade do concreto e maior for a velocidade de elevação da temperatura, maior será o risco de lascamento explosivo.

Desta forma é importante conhecer o comportamento do concreto sujeito à ação do fogo, pois dele dependerá a estabilidade estrutural da estrutura durante um período de tempo estabelecido.

Dentro do âmbito da sustentabilidade têm sido desenvolvidas diversas tecnologias para reduzir o consumo do cimento Portland na produção de concreto. Uma técnica viável consiste na incorporação de materiais alternativos provenientes do beneficiamento de resíduos no desenvolvimento de pastas cimentícias, tais como a cinza volante, a sílica ativa, a escória granulada de alto-forno, o metacaulim e a cinza de casca de arroz (CCA).

Segundo Liu et al (2017), uma grande vantagem das adições é a porosidade das suas partículas que absorvem água e podem promover a cura interna. Nie et al (2017) descrevem que a água absorvida pode promover uma reação pozolânica mais eficiente, uma vez que esta reação requer água, e com a absorção pode-se ter uma menor relação a/c, tendo também a cura interna melhorando a microestrutura dos produtos hidratados na zona interfacial de transição.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho justifica-se não só pela necessidade de avaliar experimentalmente o comportamento de concretos especiais confeccionados com fíler calcário (FC) e cinza de casca de arroz (CCA), como também pela necessidade de avançar nos estudos do concreto após a exposição a altas temperaturas. Com base na análise experimental, utilizando ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos (NDT) será possível avaliar qualitativamente e quantitativamente a degradação mecânica do concreto convencional e dos concretos especiais com FC e CCA decorrente da ação das altas temperaturas. Complementarmente, a utilização do ensaio não destrutivo de velocidade de propagação de pulso ultrassônico (VPU) permitirá ainda avaliar a correlação entre a degradação da resistência e do módulo de elasticidade com a VPU.

Tendo em vista o exposto, a presente pesquisa tem como objetivo avançar na análise

experimental de concretos submetidos à ação das altas temperaturas, estudando as propriedades mecânicas - resistência à compressão simples e módulo dinâmico de elasticidade - avaliando quantitativamente as alterações macroestruturais.

1.1 EFEITO DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Quando o concreto é exposto ao fogo ocorrem vários efeitos físico-químicos e mecânicos nas propriedades do concreto decorrentes da elevação de temperatura.

Britez e Costa (2011) avaliaram o comportamento do concreto em uma situação de incêndio. Segundo os autores, após os 100°C começa a ocorrer uma perda de aderência entre as barras de aço e o concreto, porém somente acima de 600°C ocorre a perda completa da aderência. À 300°C começa a ocorrer uma perda de resistência do concreto, entre 250°C e 420°C alguns deslocamentos podem ocorrer na superfície do concreto. Entre 550°C e 600°C, materiais a base cimentícia apresentam fissuras consideráveis e perdem a capacidade de carga e acima de 600°C o concreto não funciona com toda a sua capacidade estrutural.

Em termos físico-químicos, Robert, Colina e Debicki (2014) explicam que quando um concreto convencional é submetido a uma elevação da temperatura, ocorrem as seguintes modificações: em torno de 100°C ocorre a perda de água evaporável; em torno de 500°C ocorre a decomposição da portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$); transformação do quartzo a 570°C; decomposição das fases C-S-H acima de 600°C; descarbonatação do calcário (CaCO_3) acima de 800°C; início de uma fase de sinterização (fusão pastosa) entre 1150°C e 1200°C.

A literatura estudada indica que a perda de resistência no concreto devida à ação das altas temperaturas é causada em grande parte pela desidratação dos compostos hidratados e que para faixas de temperatura entre 400°C e 600°C, onde ocorre a desidroxilação da portlandita, a resistência mecânica diminui significativamente, com a maior perda ocorrendo em temperaturas entre 500°C e 600°C (PETRUCCI, 1987; CÁNOVAS, 1988; MEHTA e MONTEIRO, 2014; CASTELLOTE et al., 2004; LIMA, 2005; WENDT, 2006; SOUZA e MORENO JUNIOR, 2010; SANTOS, 2012).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 AGLOMERANTES

O cimento Portland utilizado foi o CP IV- RS 32 produzido pela empresa Intercement. O filer calcário (FC) escolhido é proveniente da extração de jazidas localizadas em Caçapava do Sul - RS, originário de rocha calcítica, atendendo aos requisitos da norma DNER-EM 367/97. Esse material é utilizado predominantemente para correção de acidez do solo, e é abundante na região do estudo, por isso a escolha desse tipo de calcário. O calcário foi moído em moinho de bolas (capacidade 50 L), sendo utilizado apenas o filer calcário com 3 horas de moagem, em razão da aproximação da curva de distribuição granulométrica com as demais adições da pesquisa. A cinza de casca de arroz escolhida é proveniente de uma das indústrias da região de Santa Maria que utiliza a casca no processo industrial por combustão, para secagem do arroz e/ou sua parboilização, deste modo, a queima foi realizada sem controle de temperatura. A CCA atende as especificações da NBR 12653:2014 e NBR 5752:2014 sendo classificada como pozolana Classe E de acordo com a NBR 12653:2014. A CCA foi moída em dois diferentes tempos de moagem, 60 e 120 minutos, para determinação da granulometria mais próxima das outras adições, sendo que foi selecionada a CCA com 1 hora de moagem.

2.2.1 Composição granulométrica

A Tabela 1 apresenta os diâmetros médios dos respectivos materiais.

Tabela 1 - Diâmetros médios das adições minerais

IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS	DIMENSÃO MÉDIA (μM)	DIÂMETRO ABAIXO DO QUAL SE ENCONTRAM 10% DAS PARTÍCULAS (μM)	DIÂMETRO ABAIXO DO QUAL SE ENCONTRAM 90% DAS PARTÍCULAS (μM)
CIMENTO CP IV-RS 32	7,27	0,93	21,60
FÍLER CALCÁRIO	2,09	0,73	19,42
CINZA DE CASCA DE ARROZ	11,95	2,06	30,28

Fonte: autores.

2.2.2 Composição química

A composição química do cimento e das adições minerais, com os respectivos limites dado pelas normas, pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do cimento e adições minerais

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	TEOR (% em massa)		
	CIMENTO CP IV	CALCÁRIO	CINZA DE CASCA DE ARROZ
Óxido de Cálcio (CaO)	38,12	53,60	2,19
Dióxido de Silício (SiO ₂)	32,61	1,04	87,72
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	8,79	0,20	0,46
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	4,34	0,27	0,41
Anidrido Sulfúrico (SO ₃)	1,97	1,14	0,01
Óxido de Magnésio (MgO)	5,04	0,31	0,53
Óxido de Potássio (K ₂ O)	1,39	0,02	1,60
Óxido de Titânio (TiO ₂)	0,41	-	-
Óxido de Estrôncio (SrO)	0,22	-	-
Anidrido Fosfórico (P ₂ O ₅)	0,10	-	-
Óxido de Manganês (MnO)	0,10	-	-
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,20	0,82	0,04
Perda ao Fogo (PF)	7	41,41	4,96

Fonte: autores.

2.2.3 Composição física

As características físicas e mecânicas do cimento e das adições minerais podem ser observadas no Tabela 3.

Tabela 3 - Características físicas do cimento e adições minerais

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		CPV - ARI	FILER CALCÁRIO	CCA
Massa específica (g/cm ³)		2,83	2,69	2,07
Superfície específica BET (m ² /g)		-	8,22	21,38
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (IAP) (%)		-	92,39	95,77
Material retido na # 75 µm (%)		0,30	12,74	0,18
Tamanho médio dos grãos (µm)		-	2,09	11,95
Início de pega (h)		4h:26min	-	-
Fim de pega (h)		5h:36min	-	-
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	26,3 MPa	-	-
	7 dias	30,3 MPa	-	-
	28 dias	43,7 MPa	-	-

Fonte: autores.

2.3 AGREGADOS

A proporção entre os grãos de cada agregado dada pela composição granulométrica exerce influência sobre a compacidade, resistência e durabilidade dos concretos. Tendo em vista um melhor empacotamento de partículas foram utilizadas duas areias provenientes das jazidas do Arenal em Santa Maria, classificadas como fina ($D_{m\acute{a}x} < 1,2$ mm) e média ($D_{m\acute{a}x} < 2,4$ mm), a fim de fornecer grãos de dimensões que possibilitem a melhor transição dos grãos finos do cimento e adições com o agregado graúdo, atendendo as especificações da NBR 7211:2009.

O agregado graúdo britado é oriundo da Pedreira Pinhal, do município de Itaara de origem diabásica (plagioclásio e piroxênios), classificadas como brita 0 ($D_{m\acute{a}x} \leq 12,5$ mm), atendendo as especificações da NBR 7211:2009. Foram realizados os ensaios descritos no Tabela 4 para a caracterização dos agregados.

Os resultados de caracterização dos agregados estão expostos no Tabela 4.

Tabela 4 - Características físicas dos agregados miúdos e graúdos

PROPRIEDADES	AREIA MÉDIA	BRITA 0	BRITA 1
Módulo de finura	2,05	3,23	6,96
Diâmetro máximo característico (mm)	2,40	2,40	19,00
Massa específica (g/cm ³)	2,62	2,46	2,50
Massa unitária (g/cm ³)	1656,76	1,22	1,46
Perda de massa por abrasão Los Angeles (%)	-	11,07	15,20
Índice de forma	-	2,09	2,80
Absorção de água (%)	0,33	3,17	2,36

Fonte: autores.

2.4 ADITIVO

Utilizou-se o aditivo superplastificante Glenium 54 da BASF, com características conforme a Tabela 5, o qual proporcionou fluidez evitando segregação quando se deseja características de maior trabalhabilidade com manutenção prolongada e elevado retardo no tempo de pega. Este aditivo age na superfície das partículas de cimento causando repulsão entre os grãos mergulhados na água da mistura, ocasionando assim abertura do Slump com

baixo consumo de água provocando alto desempenho e importante ganho de resistências mecânicas atendendo a norma NBR 11.768:2011 (tipo P). Compatíveis com todas as classes de cimento Portland.

Tabela 5 - Características do aditivo superplastificante

PROPRIEDADES	MASTERGLENIUM 54
pH	5 a 7
Teor de sólidos	38 a 42
Densidade (g/cm ³)	1,10
Base química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido Branco Turvo

Fonte: autores.

2.5 ÁGUA

A água potável utilizada é a disponível no campus da Universidade Federal de Santa Maria.

2.6 TRAÇO UTILIZADO

Nesse estudo foi escolhido um traço de referência disponibilizado por uma concreteira da cidade de Santa Maria – RS. A partir dele foram calculadas as quantidades de adições minerais dos traços consecutivos. Na Tabela 6 constam os materiais utilizados e as dosagens utilizadas para a preparação do concreto para 1m³ de concreto.

Tabela 6 - Composição da mistura para 1 m³

TRAÇOS	CIMENTO CP IV – RS 32(KG)	CCA (KG)	FÍLER (KG)	AREIA DE RIO (KG)	BRITA 1(KG)	BRITA 0 (KG)	ADITIVO (KG)	ÁGUA (KG)
Referência	319	0	0	844	675	300	0,00	177
60% FÍLER	127,60	0,00	191,4	844	675	300	3,19	177
40% FÍLER 20% CCA	63,80	63,80	191,40	844	675	300	3,19	177

Fonte: autores.

2.7 ENSAIOS REALIZADOS

2.7.1 Método de exposição a altas temperaturas

A metodologia de exposição dos corpos-de-prova a temperaturas elevadas consistiu em colocá-los em um forno elétrico com grande capacidade de aquecimento, a fim de simular a taxa de calor a que o elemento estrutural estaria sujeito se estivesse em uma situação real de incêndio. A opção por este tipo de exposição foi motivada pela possibilidade de exercer um controle mais preciso sobre a temperatura de exposição, e pela facilidade de ajuste da temperatura para vários patamares. Procedimentos similares foram adotados nas pesquisas realizadas por Lima (2001), Takano et al. (2001), Sun, Luo e Chan (2001) e Lima (2005). O equipamento empregado consiste num forno elétrico com potência de 18 kW/h, com controlador automático de temperatura digital e precisão de 1°C, com programação de

aquecimento e resfriamento, que pode aplicar temperaturas de até 1050°C. Uma vez atingido o patamar de temperatura desejado (200°C, 400°C, 600°C ou 900°C), os corpos-de-prova foram mantidos nesta temperatura durante 30 minutos, tempo mínimo que se esperaria que uma estrutura resistisse ao fogo e em que acontecem os principais deslocamentos. Ao término deste intervalo, os corpos de prova foram retirados do forno e deixados esfriar ao ar livre. Quando a temperatura dos mesmos se aproximava de 1000 °C, os corpos de prova eram colocados em uma câmara climatizada selada, modelo FEUTRON KPK 200. Na câmara as amostras eram mantidas a uma temperatura de 95 ± 1 °C e umidade relativa de 10%. Isto evitava que os corpos-de-prova se re-hidratassem até o momento do ensaio.

2.7.2 Resistência à compressão axial

Os ensaios foram realizados 24 horas após o aquecimento, em uma prensa hidráulica SHIMADZU, monitorada por computador, com capacidade de 2000 kN. Os procedimentos de ensaio foram baseados na NBR 5739:2018, sendo a carga máxima o parâmetro utilizado para o controle da qualidade do concreto. Os dados coletados permitiram o cálculo da resistência à compressão simples, obtida a partir da média dos resultados dos ensaios de seis corpos-de-prova.

2.7.3 Velocidade de pulso ultrassônico

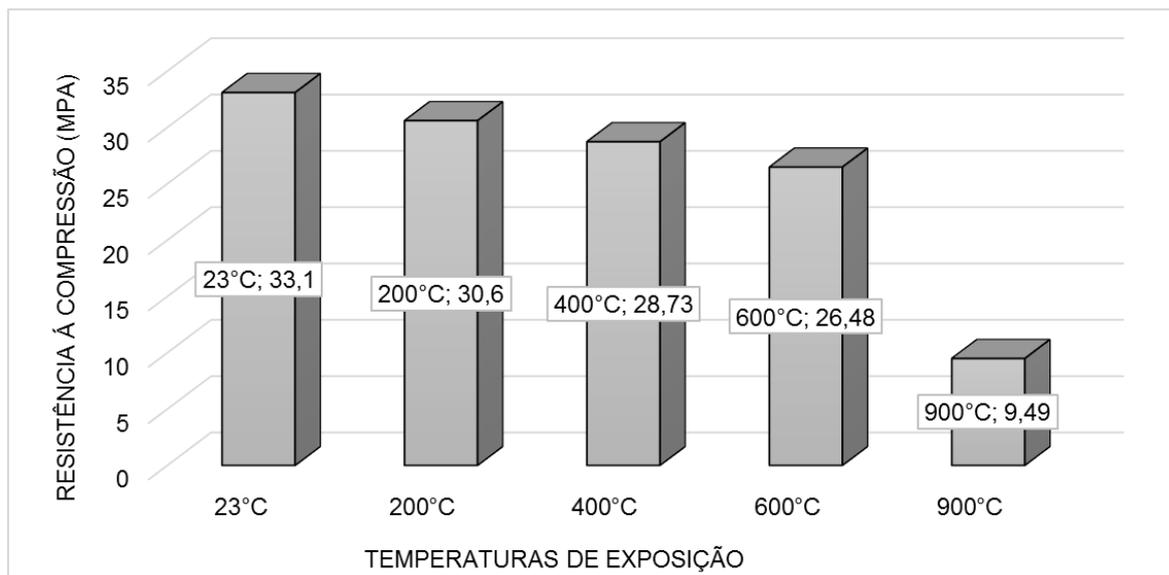
O ensaio de VPU foi utilizado para avaliar a degradação dos concretos devido à ação térmica através de ensaio não destrutivo (NDT) e correlacionando os resultados obtidos com a resistência à compressão, variação de massa e módulo de elasticidade. A realização do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico seguiu as recomendações da norma brasileira NBR 8802:2019. As medições do tempo de propagação de onda ultrassônica foram realizadas através do método direto, nos mesmos corpos de prova utilizados para determinar a resistência à compressão, antes da exposição a altas temperaturas e após o resfriamento. Foi utilizado o equipamento Pundit Lab, da marca Proceq, com transdutor de frequência igual a 54 kHz. O equipamento possui capacidade para aquisição online de dados, análise da forma da onda e controle remoto completo para todos os parâmetros de transmissão. Para garantir um melhor alinhamento com o eixo, o corpo de prova foi encaixado em um gabarito constituído por 2 moldes de madeira de diâmetro igual ao diâmetro do corpo de prova, com furo centralizado de diâmetro igual ao transdutor. A utilização de gel para ecografia permitiu garantir a aderência necessária entre o transdutor e o corpo de prova, nos pontos de contato.

3 RESULTADOS

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão do concreto varia com a situação de exposição a altas temperaturas. A Figura 1 demonstra os resultados de resistência à compressão do traço referência em diferentes temperaturas.

Figura 1 - Resistência a compressão axial para a mistura referência



Fonte: autores.

Tabela 7 - Redução da resistência à compressão para diferentes temperaturas da mistura referência

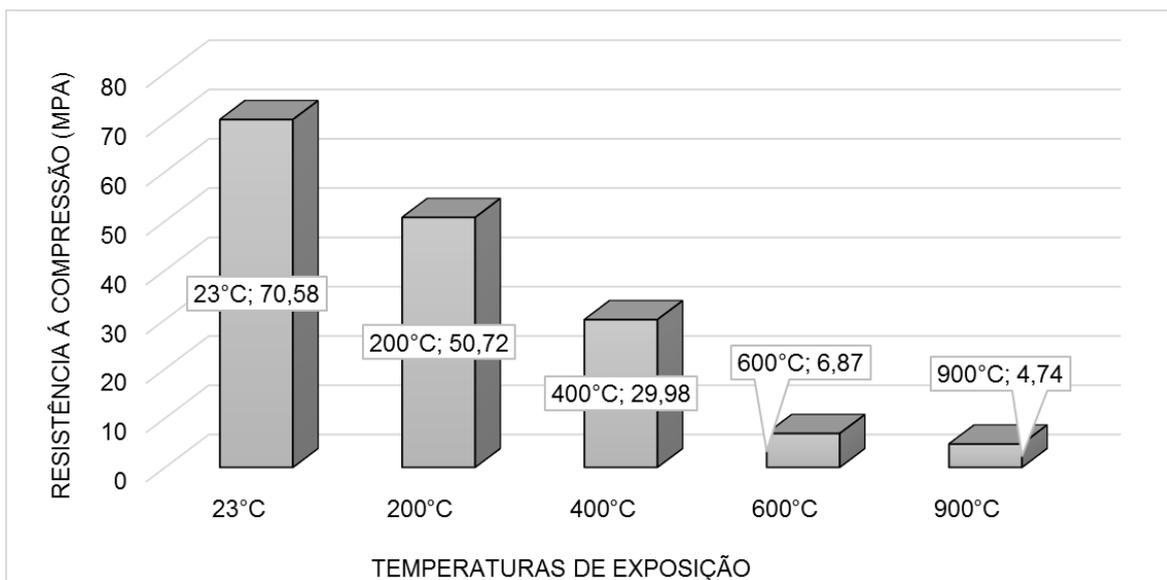
Temperaturas em que os corpos de prova foram expostos (°C)	200°C	400°C	600°C	900°C
Redução da resistência em relação à temperatura ambiente (MPa)	2,5	4,37	6,62	23,61
% de perda de resistência em relação à temperatura ambiente	7,55	13,20	20,00	71,33

Fonte: autores.

Ficou evidenciado nesse estudo que a resistência do concreto não é muito prejudicada até temperaturas próximas a 400°C, de forma que é possível concluir que a adoção de medidas de proteção ativas ou passivas que impeçam que a temperatura na matriz do concreto supere este patamar são excelentes alternativas técnicas quando se deseja que uma estrutura em concreto armado não sofra danos consideráveis se for atingida por incêndios. Salienta-se, entretanto, que estudos mais específicos sobre o comportamento de estruturas em concreto armado diante de elevadas temperaturas devem ser conduzidos, com a intenção de avaliar possíveis efeitos de escala como foi comprovado por (LIMA, 2005).

Analisando a Figura 2 pode-se destacar que o alto teor de FC incorporado à mistura influencia significativamente na resistência à compressão do concreto. O exame dos dados obtidos para cada uma das adições, em seus respectivos teores, indicou que a resistência dos concretos com FC apresenta uma curva de queda muito maior à dos concretos sem adição, para quase todos os patamares de temperatura. Ou seja, a adição de fíler acarretou incrementos na resistência à compressão para a temperatura ambiente, mas com o aumento de temperatura essa tendência aumentou negativamente visto que quanto maior a temperatura de exposição, menor a resistência à compressão. De fato, na temperatura ambiente, a adição de 60% de fíler causou um aumento de resistência em relação ao traço referência, e esse incremento pode ser explicado pelo efeito de preenchimento que ele causa e também ao seu índice de pozolanicidade. Por outro lado, o concreto com maior porcentagem de adição quando exposto a altas temperaturas teve uma drástica redução de resistência quando comparada com o traço referência, demonstrando um comportamento diferenciado e isso é intensificado conforme há o aumento da temperatura.

Figura 2 - Resistência à compressão para a mistura binária



Fonte: autores.

Tabela 8 - Redução da resistência à compressão para diferentes temperaturas para a mistura binária

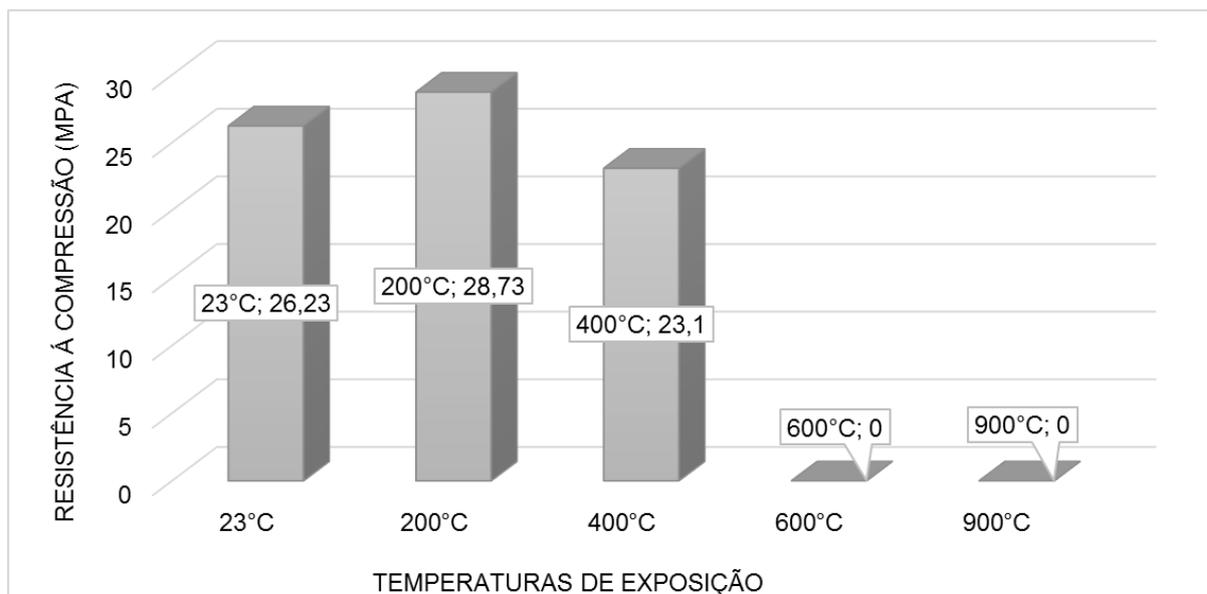
Temperaturas de exposição	200°C	400°C	600°C	900°C
Redução da resistência com relação à temperatura ambiente (MPa)	19,86	40,6	63,71	65,84
Porcentagem de perda de resistência com relação à amostra referência (%)	60	122,66	192,48	198,91

Fonte: autores.

Bentz (2000) afirma que nos concretos convencionais, mais porosos, a zona de transição facilita a saída do vapor desenvolvido durante a exposição térmica, aliviando as tensões associadas à poro-pressão. Devido à reação pozolânica, a zona de transição entre agregado e pasta é mais densa, dificultando a saída do vapor de água, ou seja, nos concretos com adições pozolânicas em elevadas temperaturas ocorre uma concentração de tensões, associadas à poro-pressão, substancialmente maior na zona de transição, com consequente agravamento da degradação da resistência e do módulo de elasticidade do concreto.

A Figura 9 apresenta os resultados de resistência à compressão axial da mistura ternária, ou seja, (cimento + fíler calcário +cinza de casca de arroz). Os lascamentos ou spalling ocorreram entre 600°C e 900°C neste caso. Este efeito pode estar relacionado ao aparecimento de tensões geradas pelos gradientes de deformação térmica que podem ter ocorrido nos corpos-de-prova aquecidos neste nível de temperatura, ou ainda, devido à transferência de massa (ar, vapor e água) através dos poros, resultando no aparecimento de gradientes de pressão no interior da massa, com subsequente acréscimo de pressão nos poros levando ao lascamento explosivo (KALIFA, MENNEAU & QUENARD, 2000 apud LIMA, 2005).

Figura 3 - Resistência à compressão para a mistura ternária



Fonte: autores.

Tabela 9 - Redução da resistência à compressão para diferentes temperaturas para a mistura ternária

Temperaturas de exposição	200°C	400°C	600°C	900°C
Redução da resistência com relação à temperatura ambiente (MPa)	2,5	3,13	0	0
Porcentagem de perda de resistência com relação à amostra referência (%)	7,55	9,46	0,00	0,00

Fonte: autores.

De forma geral, os concretos com CCA submetidos à ação das altas temperaturas tiveram uma degradação ligeiramente mais acentuada das suas propriedades mecânicas, comparativamente à degradação observada no concreto convencional, sem substituição. A redução nas propriedades mecânicas dos concretos fora substancialmente maior no patamar de temperatura mais elevado. Para o patamar de temperatura de 600°C, a resistência à compressão residual dos concretos ficou entre 40% e 50% da resistência na temperatura ambiente. De forma geral, os valores residuais obtidos para o módulo de elasticidade foram ligeiramente inferiores a 20% dos valores do módulo na temperatura ambiente. Por outro lado, a redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura foi mais acentuada que a redução da resistência à compressão (ALMEIDA, 2017).

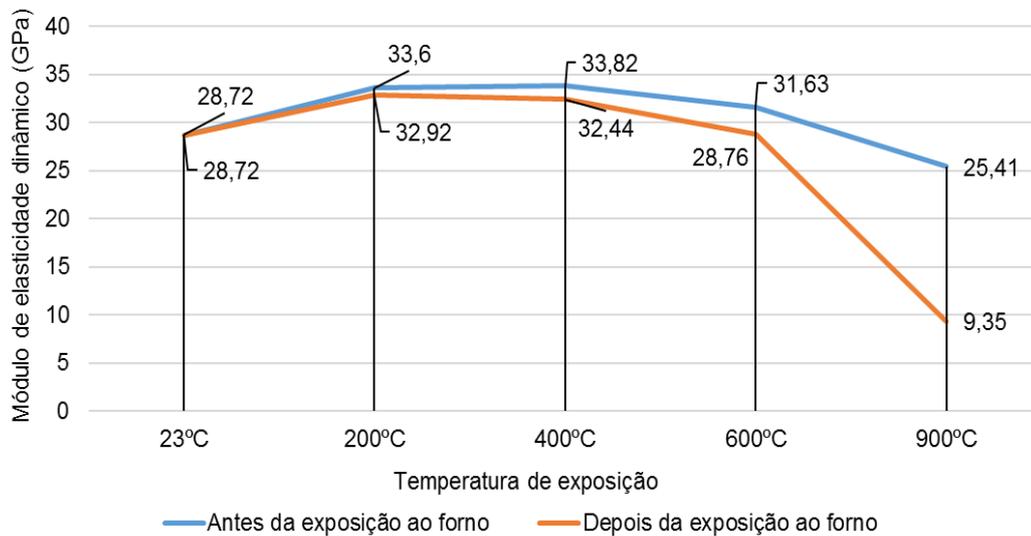
Almeida (2017) também salienta que a degradação das propriedades mecânicas dos concretos com CCA foi ligeiramente mais acentuada do que a do concreto convencional. O concreto com cinza cristalina submetido à ação das altas temperaturas teve, de forma geral, o pior desempenho entre todos os concretos testados. O aumento da taxa de aquecimento teve como consequência a redução da resistência à compressão dos concretos, de até 20%, sendo que no concreto com resistência mais elevada, com CCA, ocorreu spalling de superfície. A diferença entre os resultados obtidos para as diferentes composições das amostras deve ser levada em consideração no projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.

Na bibliografia não foi encontrado esse tipo de estudo com misturas ternárias dificultando uma comparação com os comportamentos dos materiais para esses casos.

3.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

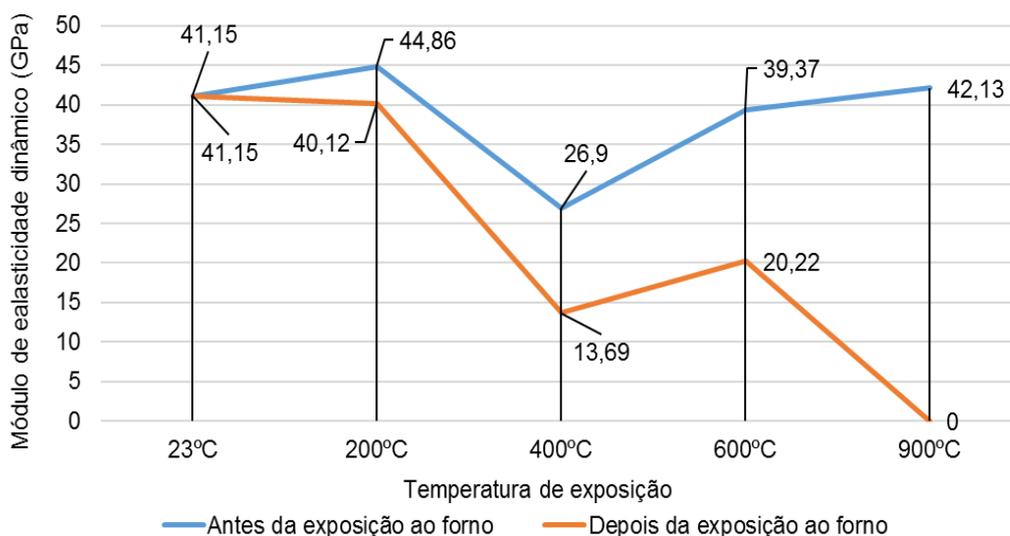
Após a análise dos resultados da etapa exploratória, conclui-se que a temperatura de exposição foi o fator que mais influenciou significativamente os resultados. A resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a massa diminuíram com o aumento da temperatura de exposição e a redução das propriedades mecânicas foi mais acentuada acima de 400°C. A extensão da fissuração superficial aumentou com o aumento da temperatura de exposição e foi mais severa em 600°C. A redução do módulo de elasticidade ocorreu de forma mais acentuada do que a redução observada na resistência à compressão. O concreto com mistura ternária (CCA e fíler) com alto teor de substituição de finos, teve um pior desempenho em altas temperaturas, em termos de resistência à compressão, módulo de elasticidade e perda de massa, no entanto, apesar do pior desempenho, poderá ser uma alternativa viável considerando os ganhos em termos de sustentabilidade. As Figura 10, 11 e 12 apresentam os resultados obtidos para o módulo de elasticidade a partir da velocidade de onda ultrassônica.

Figura 4 - Módulo de elasticidade para a mistura referência



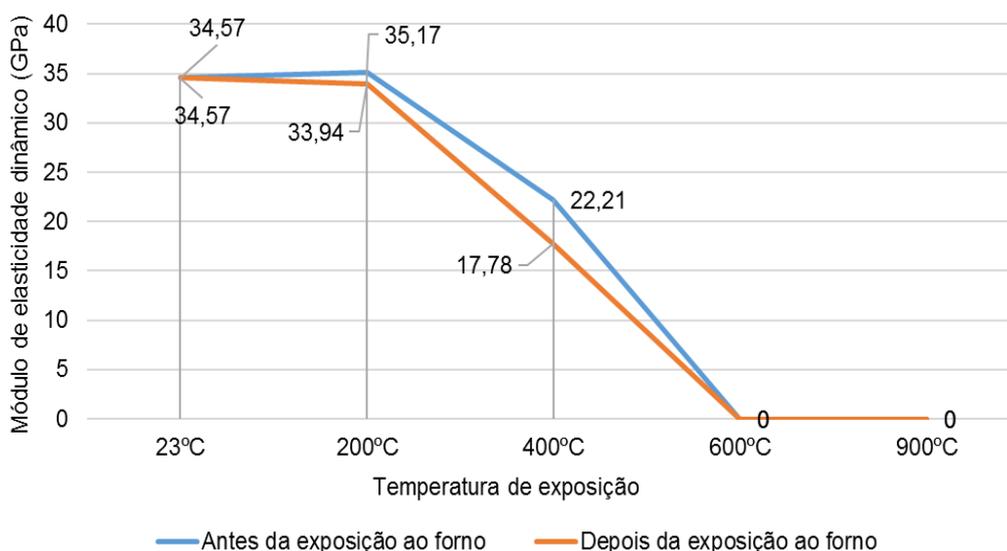
Fonte: autores.

Figura 5 - Módulo de elasticidade para a mistura binária



Fonte: autores.

Figura 6 - Módulo de elasticidade para a mistura ternária.



Fonte: autores.

Observou-se que, através da análise do módulo de elasticidade medido a partir da velocidade de onda ultrassônica, que a maior parte das misturas demonstraram redução do módulo conforme o aumento da temperatura. Quando analisado o traço sem substituições pode-se considerar um comportamento tendencial semelhante entre o antes e o depois das amostras serem expostas as temperaturas em estudo.

A utilização de adições minerais em concretos é importante por seus benefícios através da ação pozzolânica assim como pela ação física. Ao analisar a mistura binária, pode-se notar que o fíler calcário quando comparado com a mistura de referência na temperatura de 200°C apresentou um acréscimo no módulo de elasticidade, mas nas temperaturas mais elevadas como 400°C e 600°C apresentou decréscimo significativo, assim como para o patamar de

900°C foi impossível a verificação do módulo em virtude das amostras terem sofrido spalling.

Comportamento semelhante foi observado na mistura ternária. Na exposição de 200°C obteve-se um incremento no valor de módulo quando comparado com a mistura referência, mas inferior a mistura binária. Nas temperaturas acima, como de 400°C houve decréscimo do módulo comparado à temperatura de 200°C e uma perda total em virtude do spalling nas temperaturas de 600°C e 900°C.

4 CONCLUSÃO

A demanda crescente de substituição de cimento por adições minerais com vistas à sustentabilidade das estruturas de concreto levou a presente pesquisa a avaliar a influência da exposição de concretos com substituição de cimento por FC e CCA à elevadas temperaturas, visando simular o comportamento destas em situação de incêndio. A partir da análise de parâmetros como resistência residual à compressão e no módulo estático de elasticidade em amostras de concreto apresentam-se as seguintes conclusões:

- A resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a massa diminuíram com o aumento da temperatura de exposição;
- A redução das propriedades mecânicas foi mais acentuada acima de 400°C;
- As misturas com adições minerais apresentaram maior decréscimo de resistência, módulo de elasticidade e massa do que a mistura de referência sem adições minerais, fruto da maior compacidade dessas misturas em relação à de referência.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR EB-208: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991a.

_____. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2003a.

_____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, RJ, 2014a.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 8802:** Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio Janeiro, 2019.

_____. **NBR 11768:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014.

ALMEIDA, J. **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

BENTZ, D.P. Fibers, percolation, and spalling of high-performance concrete. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 97, n. 3, p. 351-359, 2000

BRITZ, C. A. **Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

COSTA, P. R. S. **Manifestações patológicas nas estruturas de concreto sujeitas a altas temperaturas.** Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

CÁNOVAS, M.F. **Patologia e terapia do concreto armado.** 2ª Ed. São Paulo: Pini, 1988.

CASTELLOTE M., ALONSO C., ANDRADE C., TURRILLAS X., CAMPO J. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 9, p. 1633-1644, 2004.

DNER-EM 367/97 (1997). **Material de enchimento para misturas betuminosas.** Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997

FIGUEIREDO, A. D.; COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas. In: Seminário Internacional Núcleo De Pesquisa Em Tecnologia Da Arquitetura E Urbanismo, 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: NUTAU/FAU-USP, 2002.

LIU, Jianhui et al. An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 146, p.702-712, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.154>.

LIMA, R.C.A. **Investigação dos efeitos de temperaturas elevadas em reforços estruturais com tecidos de fibra de carbono.** 2001. 125p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concreto em temperaturas elevadas.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – estrutura, propriedades e materiais.** 4ª edição, Ed. Pini, São Paulo, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5ª ed., Ed. Pini, São Paulo, 2016.

NIE, Shuai et al. Pozzolanic reaction of lightweight fine aggregate and its influence on the hydration of cement. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 153, p.165- 173, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.111>.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland.** Ed. Globo, Rio de Janeiro, 1987.

ROBERT F., COLINA H., DEBICKI G. A durabilidade do concreto mediante ao fogo. In: OLIVER JP, concreto. **Anais...** São Paulo: IBRACON; 2014.

SANTOS, C. C. **Propriedades mecânicas residuais após incêndio de betões normais.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012.

SOUZA, A. A. A.; MORENO JR, A. L. Efeito de Altas Temperaturas na Resistência à Compressão, Resistência à Tração e Módulo de Deformação do Concreto. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 3, n. 4, p. 432-448, dez. 2010.

SUN, W.; LUO, X.; CHAN, S.Y.N. **Properties of high performance concrete subjected to high temperatura attack.** In: Third International Conference Of Concrete Under Severe Conditions (Consec'01), 2001, Canadá. **Proceedings...** Vancouver: The University of British Columbia, 2001. 2v. v1, p.489-494.

TAKANO, T. et al. Residual properties of high strength fiber reinforced concrete exposed to high temperature. In.: Third International Conference Of Concrete Under Severe Conditions (Consec'01), 2001, Canadá. **Proceedings...** Vancouver: The University of British Columbia, 2001. 2v. v1, p.489-494.

WENDT, S. C. **Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2006.