

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ALTA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO AXIAL DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM CIMENTO PORTLAND BRANCO E METACAULIM

EVALUATION OF THE EFFECT OF THE HIGH TEMPERATURE IN THE MECHANICAL RESISTANCE TO THE AXIAL COMPRESSION OF CONCRETES PRODUCED WITH PORTLAND WHITE CEMENT AND METAKAOLIN

Recebido em: 21/05/2018

Aceito em: 18/07/2018

Rochanna Alves Silva da Rocha¹

Amanda Carla Santos de Mendonça²

RESUMO

As adições são utilizadas em substituição parcial do cimento Portland com o intuito de reduzir custos, melhorar a trabalhabilidade e coesão do concreto fresco e aumentar a resistência mecânica do concreto endurecido. Mas, uma vez que o comportamento do concreto depende de seus materiais constituintes e as condições para melhorar a resistência podem precipitar a desagregação do concreto submetido a altas temperaturas, o presente estudo busca, através de ensaios laboratoriais, avaliar o efeito da alta temperatura na resistência à compressão axial de concretos produzidos com adição de um metacaulim comercializado no estado da Paraíba/PB. Foi avaliada a resistência mecânica de concretos confeccionados com cimento Portland branco estrutural, adição e substituição de 10% de metacaulim sobre a massa do cimento. Os corpos de provas foram mantidos em cura submersa por 28 dias e, como resultado, constatou-se que a utilização do metacaulim branco como substituição parcial do cimento apresentou emprego mais eficaz frente a ação da temperatura.

Palavras-chave: Metacaulim. Resistência mecânica. Adição mineral.

ABSTRACT

Additions are used for partially replacement of Portland cement with the aim of reducing costs, improving the workability and cohesion of fresh concrete and

1 Graduada em Engenharia Civil pelo Centro Universitário de João Pessoa (UNIPÊ).
E-mail: rochanna.alves@hotmail.com

2 Graduada em Engenharia Civil pelo Centro Universitário de João Pessoa (UNIPÊ).
E-mail: amaandamendonca@hotmail.com

increasing the mechanical strength of hardened concrete. However, once the behavior of the concrete depends on its constituent materials and the conditions to improve the resistance can precipitate the disintegration of the concrete subjected to high temperatures, the present study seeks, through laboratory tests, to evaluate the effect of the high temperature on the resistance to the axial compression of concrete produced with the addition of a metakaolin commercialized in Paraíba/PB. The mechanical strength of concrete made of white Portland cement, addition and substitution of 10% of metakaolin on the cement mass was evaluated. The test specimens were kept under submerged curing for 28 days, and as a result, the use of white metakaolin as a partial replacement of the cement showed a more effective use against the action of temperature.

Keywords: Metakaolin. Mechanical resistance. Mineral addition.

INTRODUÇÃO

Cada vez mais, os materiais compósitos ganham importância tecnológica. Dentre eles, o concreto é o material compósito mais utilizado em construções brasileiras (POMPEU, 2004). De acordo com Silva (2000), por mais de um século o concreto foi composto por uma mistura homogênea de água, cimento, agregados e água.

Mas o aumento do consumo de cimento na utilização de concretos passou a apresentar alguns questionamentos em virtude do volume de energia necessária e da emissão de agentes agressivos ao meio ambiente, já que para a fabricação de uma tonelada de cimento lança-se, aproximadamente, outra tonelada de CO₂ na atmosfera (TAVARES, 2008), por isso a busca por novas tecnologias que tragam melhorias e soluções para otimização na aplicação do concreto e que também minimizem os impactos ambientais, fez surgir diferentes tipos de concretos, como com adições especiais, por exemplo metacaulim (FONSECA, 2010).

Mota (2016) afirma que a aplicação do metacaulim como adição a matrizes cimentícias apresenta melhorias na resistência mecânica em todas as idades, redução da absorção capilar e da permeabilidade, maior resistência ao ataque de agentes deletérios e mitigação do efeito expansivo da reação álcali-sílica.

Além disso, o concreto pode ser sujeito acidentalmente a altas temperaturas ou estas podem fazer parte de suas condições normais de trabalho (FERREIRA, 2011). A boa resistência do concreto, quando submetido a temperaturas mais altas, é devida às características térmicas dos materiais, porém, o aumento da temperatura nos elementos de concreto provoca redução na resistência (COSTA, 2011).

Souza (2005) afirma que o fogo se manifesta em função da composição química do material e depende da sua superfície específica e das condições de oxigenação e da umidade contida. As características da pasta de concreto, como teor de umidade e as

condições para melhorar a resistência, podem acelerar a desagregação do concreto submetido a elevadas temperaturas (COSTA, 2011).

Dessa forma, o estudo se justifica pela importância no conhecimento do comportamento dos materiais empregados em concretos frente a ação das elevadas temperaturas.

OBJETIVOS

Geral

O presente estudo busca avaliar o efeito da alta temperatura na resistência à compressão axial de concretos produzidos com adição de um metacaulim comercializado no estado da Paraíba.

Específicos

- Desenvolver concretos estruturais de resistência padrão com e sem adição mineral;
- Submeter os corpos de prova produzidos a temperatura de 600°C;
- Avaliar o efeito da temperatura na macroestrutura e na resistência à compressão residual dos corpos-de-prova produzidos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Concreto

Segundo Mehta e Monteiro (2014), atualmente, o concreto é o material da construção mais utilizando e estima-se que seu consumo seja da ordem de 19 bilhões de toneladas métricas ao ano; este fato pode ser compreendido devido à boa resistência do concreto à água, à viabilidade de construir estruturas de diferentes formas e tamanhos, à disponibilidade de materiais para sua produção e ao seu baixo custo, quando comparados a outros materiais de mesma função.

Segundo NEVILLE (2013), misturas de concretos convencionais de cimento Portland podem não atender as necessidades exigidas, por isso, a fim de superar tal carência, viu-se a necessidade de desenvolvimento de adições no concreto.

Cardoso (2012) afirma que, quando submetidos a altas temperaturas, concretos convencionais tem sua vida útil reduzida e normalmente necessitam de manutenção.

Concreto submetido a elevadas temperaturas

A propagação do calor no concreto dá-se, principalmente, por condução devido à temperatura fria no interior do concreto e quente na superfície, pela difusibilidade e pelo calor específico. Além disso, o concreto não é um bom condutor de calor, por isso o processo de propagação do calor no interior do concreto é lento quando comparado ao aço, por exemplo, formando um intenso gradiente térmico no seu interior e provocando modificações em suas propriedades (BRITTEZ, 2011).

O comportamento do concreto exposto a elevadas temperaturas está relacionado a vários fatores que agem simultaneamente, como a composição do concreto que influencia no seu comportamento, quando submetido ao fogo, pois a pasta de cimento e o agregado se decompõem com o calor, e o desenvolvimento de pressões internas geradas pela decomposição gasosa que é decorrente da permeabilidade do concreto, do tamanho do elemento e da taxa de aumento da temperatura (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas

De acordo com Argenton (2011), quando exposto ao fogo, o concreto pode apresentar redução de suas propriedades mecânicas, danos devido à deformação excessivas, ocorrência de deslocamento e alteração na coloração. Esses problemas decorrem de reações físico-químicas provenientes do fluxo de calor submetido e da distribuição da temperatura no interior do elemento que depende: do tipo de cimento, agregado, adições, dimensão da seção transversal, relação água/cimento e da porosidade do elemento de concreto (BRITTEZ, 2011).

A propriedade mais relevante do concreto no estado endurecido é a resistência à compressão, que é medida através de um esforço solicitante por uma prensa hidráulica (ROHDEN, 2011).

A resistência à compressão do concreto varia com a situação de exposição a altas temperaturas, por exemplo, no caso de um incêndio, a exposição a elevadas temperaturas ocorre por um período curto, mas a massa do concreto fica sujeita a um imenso fluxo de calor, enquanto no corte de concreto por lança térmica, a exposição é de poucos segundos e o fluxo de calor aplicado é pequeno. Os efeitos nas propriedades do concreto são decorrentes do gel de C-S-H e do C-S (NEVILLE, 2013).

Além disso, as características dos agregados influenciam na dosagem do concreto e no comportamento do concreto no estado fresco e endurecido. As propriedades do concreto no estado fresco são determinadas pela porosidade, massa específica, composição granulométrica, forma e textura superficial do agregado e as propriedades do estado endurecido são influenciadas pela composição mineralógica e também pela porosidade do agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com Morales, Campos e Faganello (2011), acima de 300°C a queda da resistência mecânica do concreto convencional é acentuada, sendo o resfriamento brusco da temperatura responsável pelas maiores perdas de resistência mas, dependendo da temperatura máxima atingida, é possível recuperar até 90% da resistência inicial com o resfriamento lento do concreto.

Costa, Figueiredo e Silva (2002) citam que essa desagregação no concreto se manifesta através de fenômenos como esfrelamento da superfície calcinada e separação parcial de pequenas camadas superficiais do material (*sloughing* ou *spalling*).

Metacaulim

De acordo com Gabrich (2008), as adições são utilizadas em substituição parcial do cimento Portland com o intuito de reduzir custos, melhorar a trabalhabilidade e coesão do concreto fresco e aumentar a resistência mecânica do concreto endurecido, além de reduzir a porosidade e absorção através da ocupação dos vazios deixados pela pasta de cimento.

O metacaulim é uma pozolana sílico-aluminosa empregada como adição mineral na produção de concretos especiais, derivada normalmente da calcinação entre 600°C e 900°C de alguns tipos de argilas, como as caulínicas e os caulins (PERIM, 2013). Segundo Rocha (2005), as pozolanas são materiais cerâmicos, constituídas por óxido na fase predominantemente amorfa, o que proporciona alta reatividade com o hidróxido de cálcio presente no concreto.

Segundo Lima (2005), o refinamento da estrutura de poros, através da utilização do metacaulim, obstaculiza o fluxo de fluídos e acaba aumentando a incidência de spalling nos concretos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item são expostos os materiais e métodos empregados na realização do estudo com o intuito de alcançar os objetivos geral e específicos.

Aglomerante

Neville (2016) afirma que o Cimento Portland Branco (CPB) apresenta baixo teor de álcalis solúveis e é produzido a partir da mistura de caulim, que contém baixos teores de óxido de ferro e manganês. Por isso, para produção do concreto deste trabalho, optou-se pela utilização do CPB, pois entende-se que esse cimento possui menos impurezas que o Cimento Portland comumente utilizado. Porém, vale destacar que o estudo não faz nenhum tipo de avaliação entre os tipos de aglomerantes.

Foi utilizado CPB 50 MPa da Aditex, cujas características químicas, físicas e mecânicas atenderam aos requisitos estabelecidos pela norma NBR 12989 (ABNT, 1993).

Além disso, o material era comprovadamente novo e estava armazenado de modo que suas propriedades originais não fossem alteradas. Seguindo a NBR NM 23 (ABNT, 2001), constatou-se que o cimento utilizado possui uma massa específica de 3,04 g/cm³.

Agregado Miúdo

Como agregado miúdo, foi utilizada areia média fina oriunda de uma concreteira da cidade de Cabedelo/PB. A caracterização física da areia foi dada por meio das normas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Ensaios para caracterização física do agregado miúdo.

Ensaio	Norma
Granulometria	NBR NM 248 [ABNT, 2006]
Massa Unitária	NBR NM 45 [ABNT, 2003]
Massa específica	NBR NM 52 [ABNT, 2009]

Fonte: produzida pela autora, 2018.

A areia coletada estava armazenada em baias para evitar o contato com outros materiais. Suas características físicas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Características físicas do agregado miúdo convencional.

Abertura da peneira (mm)	2,4	1,2	0,6	0,425	0,3	0,15	<0,15
% retida individual	0,00	26,68	60,47	4,92	1,25	1,79	0,49
% retida acumulada	0	26,68	87,15	92,07	93,32	95,11	95,6
Dimensão máxima Característica						mm	1,2
Módulo de finura							3
Massa específica						g/cm ³	2,62
Massa unitária						g/cm ³	1,65

Fonte: produzida pela autora, 2018.

Agregado Graúdo

Como agregado graúdo, foi utilizada a brita convencional da região oriunda de uma concreteira da cidade de Cabedelo/PB. A caracterização do agregado foi dada através do ensaio de massa específica, massa unitária do agregado no estado solto e análise granulométrica, que teve como objetivo determinar a dimensão máxima característica (DMC) e o módulo de finura do agregado graúdo. Os ensaios foram realizados de acordo com as normas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Ensaios para caracterização física do agregado graúdo.

Ensaio	Norma
Granulometria	NBR NM 248 [ABNT, 2006]
Massa Unitária	NBR NM 45 [ABNT, 2003]
Massa específica	NBR NM 53 [ABNT, 2009]

Fonte: produzida pela autora, 2018.

As características físicas do agregado graúdo estão expostas na Tabela 4.

Tabela 4: Características físicas do agregado graúdo convencional.

Abertura da peneira (mm)	12,5	9,5	6,3	4,75	<4,75
% retida individual	0	8,27	58,38	21,56	3,36
% retida acumulada	0	8,27	66,65	88,21	100
Dimensão máxima Característica				mm	9,5
Módulo de finura					4,58
Massa específica				g/cm ³	1,79
Massa unitária				g/cm ³	1,38

Fonte: produzida pela autora, 2018.

Adições

O metacaulim foi utilizado com intuito de exercer um efeito físico e um efeito químico durante o processo de hidratação do cimento promovendo maior desempenho no concreto devido à melhoria da pasta de cimento.

O metacaulim empregado como substituição e como adição na dosagem do concreto foi utilizado em um percentual de 10% com relação a massa do cimento. Não foram realizadas análises químicas para caracterização do material. A Figura 1 apresenta o aspecto visual do metacaulim utilizado, na qual é possível observar sua coloração esbranquiçada.

Figura 1: Metacaulim utilizados nas misturas de concreto.



Fonte: acervo pessoal, 2018.

Produção do Concreto

Através dos ensaios realizados no laboratório, foi possível dosar, pelo método ACI, os materiais a serem utilizados na moldagem dos corpos de prova de concreto. O traço unitário em peso utilizado está descrito na Tabela 5.

Tabela 5: Traço unitário em peso.

Material	Cimento branco	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água
Composição	1	1,27	2,10	0,41

Fonte: produzida pela autora, 2018.

Para estudar os efeitos das variáveis no comportamento de concretos submetidos a elevadas temperaturas, fixou-se todos os valores da Tabela 5, alterando apenas uma variável por vez conforme descrito na Tabela 6.

Tabela 6: Distinção das variáveis utilizadas no traço padrão.

Amostra	Constituintes da mistura
0	TUP
1	TUP com substituição de 10 % do cimento por metacaulim
2	TUP com adição de 10 % de metacaulim

Fonte: produzida pela autora, 2018.

Dessa forma, foram moldados 6 corpos-de-prova (CP's) cilíndricos de dimensões 5cm x 10cm para cada traço executado. A escolha da dessas dimensões foi determinada pelo tamanho da mufla utilizada para calcinação dos CP's.

A areia utilizada passou por um processo de beneficiamento, no qual foi lavada e seca em estufa por 24 horas e os demais materiais foram simplesmente pesados na hora da concretagem.

Como a NBR 5738 (ABNT, 2015) não orienta o processo de adensamento para concreto moldados em CP's de dimensão de 5cmx10cm, foi seguida a orientação da NBR 7215 (ABNT, 1996) para a moldagem de argamassa. Dessa forma, o processo foi realizado manualmente com o auxílio de um soquete, fazendo-se 4 camadas com aplicação de 30 golpes em cada.

Concluída a moldagem, foi aguardado o tempo de 24 horas para retirada dos corpos de prova dos moldes cilíndricos. Os corpos de provas desmoldados foram mantidos submersos por 28 dias em tanque localizado no Laboratório de Materiais do UNIPÊ.

Aquecimento dos corpos de prova

Os corpos de prova destinados à exposição térmica permaneceram submersos em tanque com água até completarem os 28 dias e foram retirados 24 horas antes do dia agendado para realização do aquecimento. Eles foram mantidos em uma sala

provida de ventilação natural no laboratório com a finalidade de reduzir o teor de umidade e, após as 24 horas, foram submetidos ao aquecimento. Para isso, foi utilizada mufla com dimensões de 15cmx15cmx20cm (Figura 2) presente no Laboratório de Química da UNIPÊ.

Figura 2: Equipamento utilizado no aquecimento dos corpos de prova.



Fonte: acervo pessoal, 2018.

A temperatura foi elevada a uma taxa constante de 20°C/min até atingir 600°C. Após atingir esse patamar de temperatura, os CP's ficaram expostos por 30 min até que a máquina fosse desligada e passasse a resfriar naturalmente para retirada dos CP's 24 horas após o desligamento do equipamento.

Ensaio da resistência à compressão axial

Este ensaio foi realizado com base nas diretrizes estabelecidas pela NBR 5739 (ABNT, 2015) e foi utilizada prensa hidráulica com capacidade de até 100 t existente no Laboratório de Materiais do UNIPÊ.

Este ensaio foi adotado como parâmetro para comparar a resistência dos corpos de prova antes da exposição e à resistência residual apresentada pelos corpos de prova após a exposição a altas temperaturas.

Perda de massa

O ensaio de perda de massa foi realizado a partir das massas dos CP's, que foram pesados a temperatura ambiente e após a exposição a 600°C.

Análise visual das amostras

Os corpos de prova foram observados visualmente quanto às alterações sofridas após a exposição a temperaturas elevadas e foram comparados entre si, sendo feitos registros fotográficos e anotações das impressões observadas no instante do término do ensaio.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resistência à compressão axial

Foi verificada a resistência à compressão axial aos 28 dias nos CP's a temperatura ambiente e calcinados em mufla a 600°C. A verificação foi realizada através da média aritmética simples de uma amostra aleatória de 3 corpos de prova para cada traço executado e temperatura de exposição, sendo apresentada na Tabela 7.

Tabela 7: Resistência mecânica à compressão axial de concretos a temperatura ambiente e concretos submetidos a 600°C.

Amostra	Traço	Resistência à compressão a temperatura ambiente (MPa)	Resistência à compressão a 600°C (MPa)
0	Convencional de referência	51,93	18,46
1	Substituição 10% de Metacaulim	48,58	18,29
2	Adição 10 % de Metacaulim	44,42	20,76

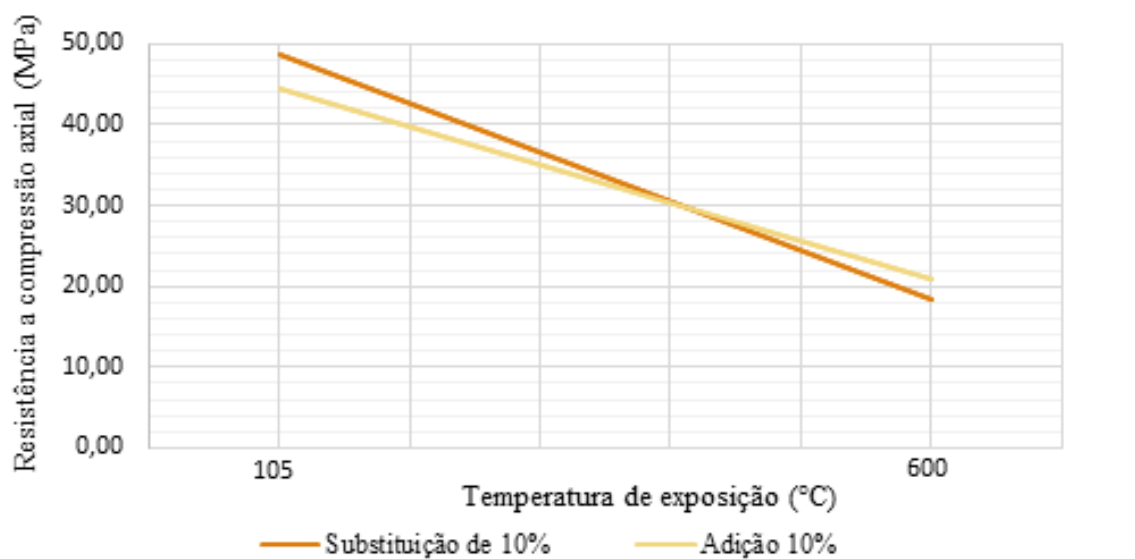
Fonte: produzida pela autora, 2018.

Analisando os resultados obtidos na realização do ensaio de resistência mecânica aos 28 dias nos CP's secos a temperatura ambiente, é possível observar que o traço convencional de referência apresentou o melhor desempenho, com uma resistência 14,5% superior ao traço com adição de metacaulim que obteve menor resistência.

Além disso, nota-se que a substituição de 10% do cimento pelo metacaulim apresenta uma resistência 8,56% superior ao concreto com adição de 10% de metacaulim, porém ambos apresentaram decréscimo na resistência quando comparados ao concreto convencional de referência.

A partir da Figura 3, é possível visualizar a variação na resistência aos 28 dias das amostras antes e após a exposição a 600°C.

Figura 3: Resistência à compressão axial de amostras com metacaulim antes e após a exposição a 600°C.

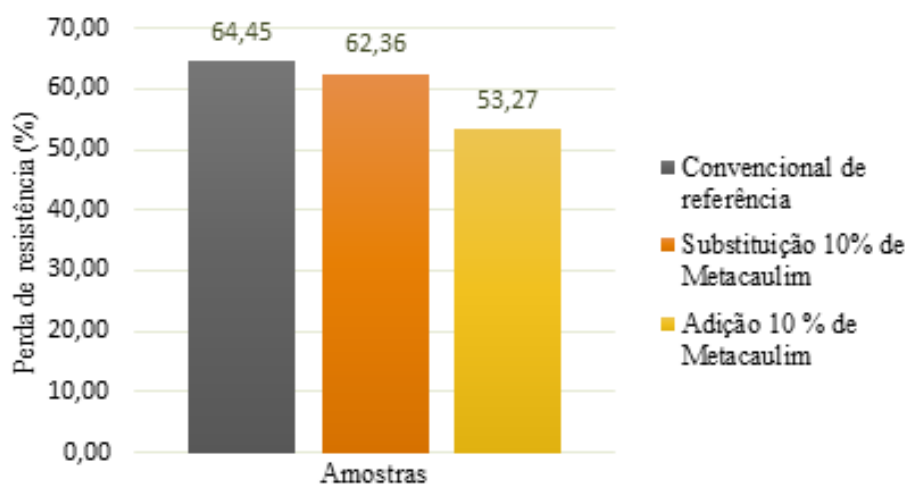


Fonte: produzido pela autora, 2018.

De acordo com Gráfico1, é possível observar que, apesar da amostra que contém adição de metacaulim apresentar resistência inicial inferior, a resistência após a exposição a 600°C é superior à amostra com substituição e se mantém próximo ao limite para ser classificado como concreto estrutural, que, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) deve possuir resistência mínima de 20 MPa.

Objetivando facilitar a visualização dos dados da Tabela 7 e da Figura 3, é apresentada a Figura 4, que mostra a semelhança existente no comportamento dos diferentes tipos de traços analisados após a exposição térmica.

Figura 4: Redução da resistência mecânica à compressão axial de concretos submetidos a 600°C



Fonte: produzido pela autora, 2018.

A redução percentual da resistência foi calculada com base nos valores de resistência antes do aquecimento a 600°C de cada amostra, mas ressalta-se que é complexo mensurar a perda de resistência do material como um todo, pois a temperatura no interior do elemento não é uniforme.

Observa-se que as amostras apresentam redução na resistência já prevista na literatura, pois, de acordo com Silva (2013), há uma redução de 50% a 70% da resistência inicial na resistência de concretos expostos a 600°C. Além disso, é possível verificar que as amostras contendo metacaulim apresentaram menores percentuais de redução na resistência à compressão frente à elevada temperatura.

Perda de massa

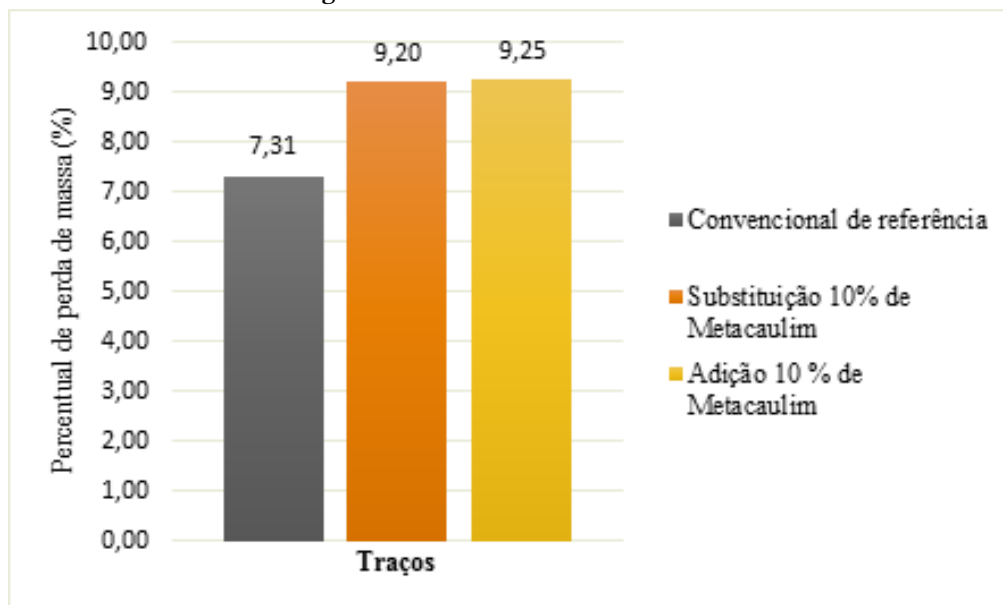
Os CP's utilizados na determinação da perda de massa das amostras foram os mesmos utilizados nos procedimentos de resistência de concretos expostos a 600°C. A Tabela 8 apresenta a média dos valores encontrados após a pesagem dos CP's para cada amostra seca à temperatura ambiente e o Figura 5 apresenta o percentual de perda de massa de cada amostra.

Tabela 8: Massa em gramas das amostras em diferentes condições de exposição.

Amostra	0	1	2	3	4	5	6
Condição							
Seco ao ar	467,49	457,37	461,06	447,8	450,09	436,04	419,87
600 °C	430,32	412,81	415,76	409,185	410,11	396,71	396,71

Fonte: produzida pela autora 2018.

Figura 5: Perda de massa das amostras.



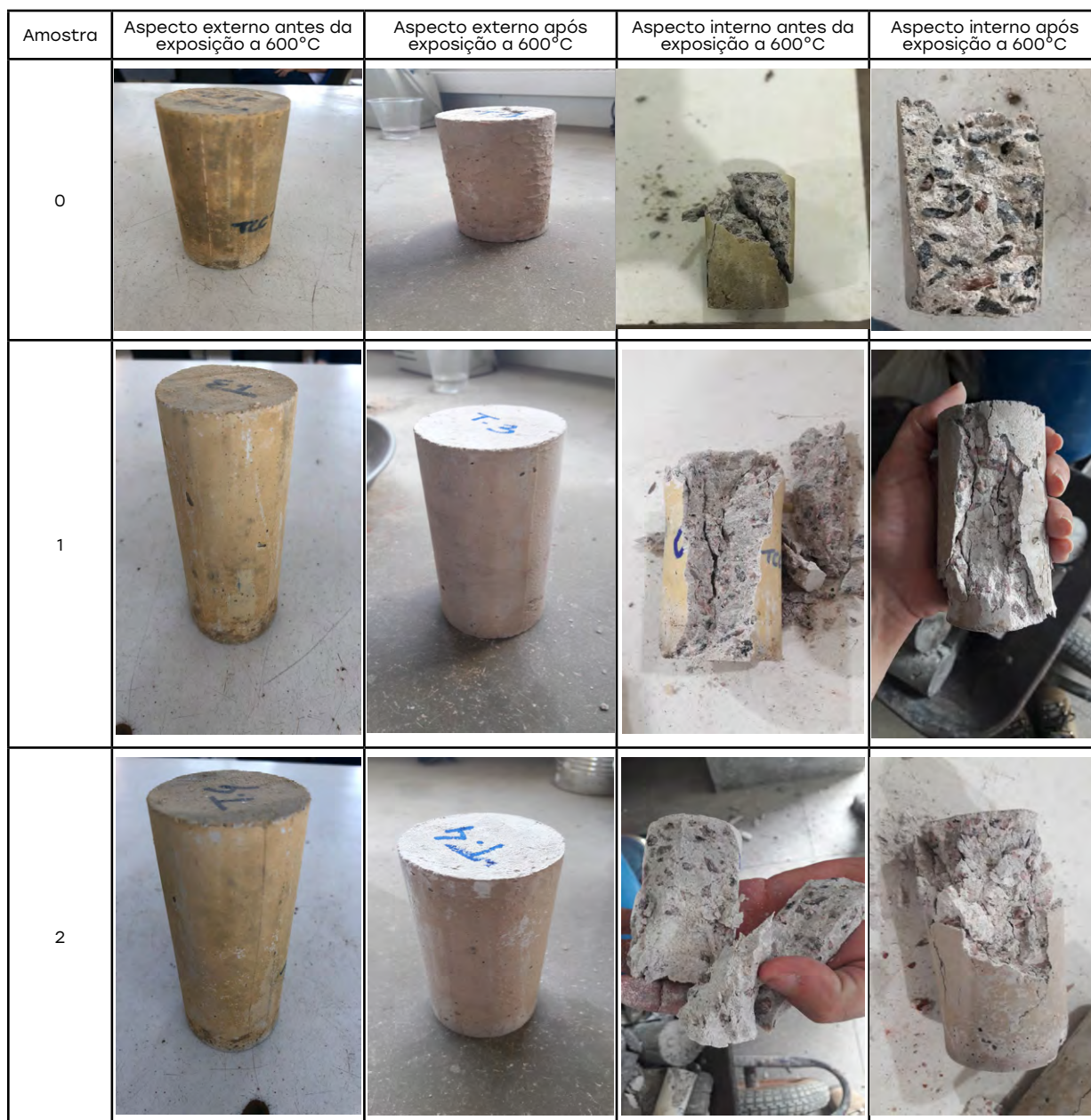
Fonte: produzido pela autora, 2018.

Analisando os resultados, observa-se que o concreto referência apresentou o menor percentual de perda (7,31%) das amostras, enquanto as amostras com metacaulim apresentaram percentuais de redução maiores. A adição do metacaulim apresentou uma perda de 9,25% de massa, enquanto a amostra com substituição parcial do cimento pelo metacaulim apresentou 9,20%.

Análise visual das amostras

Após a retirada da mufla, os CP's foram inspecionados visualmente. A Figura 6 apresenta imagens de aspectos interno e externo de 1 CP que não foi exposto à elevada temperatura e 1 CP exposto a 600°C.

Figura 6: Aspectos visuais das amostras.



Fonte: produzido pela autora com acervo pessoal, 2017.

Analisando as imagens do Quadro 1, é possível observar alterações macroscópicas nas amostras expostas a 600°C.

Nenhuma das amostras apresentou ocorrência de efeito *spalling* explosivo ou qualquer tipo de lascamento, mas todas as amostras apresentaram um fina camada descamante, que podia ser facilmente removida, sendo percebida ocorrência mais intensa na amostra 0. De acordo com o estudo de Argenton (2011), acredita-se que essa camada descamante seja decorrente de um processo de lixiviação da água presente no interior do concreto, que evapora com o aquecimento do CP e acaba carreando

o hidróxido de cálcio presente no interior do concreto. Mehta e Monteiro (2014) explicam que o produto da lixiviação entra em contato com o CO₂ presente no ar e forma uma crosta de carbonato de cálcio na superfície.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre o comportamento de concretos produzidos com adição mineral quando submetidos a temperatura de 600°C. Após a finalização do programa experimental e das análises, é possível concluir que:

Todos os concretos produzidos apresentaram resistência estrutural na condição de exposição a temperatura ambiente, mas o concreto convencional de referência (51,93 MPa) mostrou-se mais eficaz, uma vez que apresentou resistência à compressão superior às demais amostras que continham metacaulim.

Após a exposição a 600°C, constatou-se relevância na utilização de metacaulim, principalmente como adição, pois o seu percentual de redução de resistência foi inferior ao concreto referência e ao concreto com substituição de 10% do cimento por metacaulim. Além disso, sua resistência residual (20,76 MPa) ainda apresentou característica estrutural.

A maior perda de massa foi verificada nas amostras que continham metacaulim e a menor perda, no concreto referência. Apesar de Fonseca (2010) afirmar que a perda de resistência do concreto está associada a perda de massa, não foi possível avaliar tal efeito na resistência residual das amostras. Além disso, quanto ao aspecto visual, nenhuma amostra apresentou lascamentos ou alterações na coloração.

Com o objetivo proposto, foi possível verificar que os materiais utilizados influenciaram na resistência à compressão do concreto, antes e após a exposição a 600°C, sendo o estudo do comportamento de concretos frente a elevadas temperaturas essencial para aplicação de concretos não convencionais.

REFERÊNCIAS

ARGENTON, M. B. **Efeito das variações do teor de umidade e condições de aquecimento no comportamento de concretos de alta compactidade**. Monografia (Graduação). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2001

_____. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53:** determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 5738.** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio a compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 6118.** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 12989:** Cimento portland Branco. Rio de Janeiro, 1993.

BRITEZ, 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.

CARDOSO, L. R. Concreto refratário: constituintes, propriedades e aplicações. Monografia (Graduação). Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

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.

FERREIRA, A. P. G. Modelagem dos fenômenos de transporte termo-hídricos em meios porosos submetidos a temperaturas elevadas: aplicação a uma bicamada rocha-concreto. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

FONSECA, R. O. Concretos submetidos a ciclos de temperaturas elevadas: estudos experimentais em corpos de prova localizados em unidades de produção de uma usina siderúrgica. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Espírito Santo, Vitória, 2010.

GABRICH, M. F. **Estudo da influência das adições minerais no comportamento do concreto sob ação do fogo.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

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: microestrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014, 782 p.

MOTA, D. A. **Influência da adição de materiais pozolânicos na corrosibilidade do concreto armado, analisada por meio do potencial de corrosão e resistividade elétrica.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto.** 5. Ed. São Paulo: Bookman, 2016, 912 p.

PAREDES, D. C. A.; BRONHOLO, J. H. **Efeitos da temperatura da água de amassamento na resistência do concreto.** Monografia (Graduação). Curso de Tecnologia em Concreto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

PERIM, J. R. **Influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercados sujeitos a carbonatação acelerada.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

POMPEU, B.B. **Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo na resistência e energia de fatura do concreto.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Faculdade Estadual de Campinas, São Paulo, 2004.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade.** Dissertação (mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

ROHDEN, A. B. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura.** Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

SILVA, J. S. **Estudo de concretos de diferentes resistências à compressão submetidos a altas temperaturas sem e com incorporação de fibras de politereftalato de etileno (PET).** Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SOUZA, A. A. A. **Influência do tipo de agregado nas propriedades mecânicas do concreto submetido ao fogo.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2005.

TAVARES, L. R. C. **Avaliação da retração autógena em concretos de alto desempenho com diferentes adições.** Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.