

EFEITO DA ALTA TEMPERATURA EM CONCRETOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

EFFECT OF HIGH TEMPERATURE IN CONCRETES: A REVIEW OF LITERATURE

Recebido em: 21/05/2018.

Rochanna Alves Rocha¹ ■

Aceito em: 18/06/2018.

RESUMO

O concreto pode ser sujeito acidentalmente a altas temperaturas ou estas podem fazer parte de suas condições normais de trabalho. As características dos constituintes do concreto, como teor de umidade e as condições para melhorar a resistência, podem precipitar a desagregação do concreto submetido a altas temperaturas. O presente estudo se justifica pela relevância no entendimento do comportamento de concretos submetidos a elevadas temperaturas. Por isso, o trabalho tem como objetivo fazer uma revisão da literatura no que diz respeito ao efeito da alta temperatura na estrutura do concreto, a fim de auxiliar novas pesquisas no tocante a esse tema. Dessa forma, foi possível compreender a importância dos materiais constituintes no que diz respeito ao efeito da temperatura no concreto, sendo de fundamental importância um estudo aplicado no comportamento do concreto frente a elevas temperaturas para aplicação de concretos não convencionais.

Palavras-chave: Concreto. Constituintes. Alta temperatura. Resistência.

ABSTRACT

Concrete can be accidentally subjected to high temperatures or these can be part of your normal working conditions. The characteristics of the constituents of the concrete, such as moisture content and the conditions to improve the resistance, can precipitate the disintegration of the concrete subjected to high temperatures. The present study is justified by the relevance in the understanding of the behavior of concretes submitted to high temperatures. Therefore, the paper aims to review the literature regarding the effect of high temperature on the concrete structure, in order to support new research on this subject. In this way, it was possible to understand the importance of the constituent materials with respect to the effect of the temperature

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

on the concrete, being of fundamental importance a study applied in the behavior of the concrete in front of elevated temperatures for the application of unconventional concrete.

Keywords: Concrete. Constituents. High temperature. Resistance.

INTRODUÇÃO

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.

Misturas semelhantes ao concreto eram utilizadas no tempo da Idade Média e Renascimento, mas o que desencadeou o emprego do concreto em grandes proporções, foi a invenção do cimento Portland. Atualmente, há uma busca por aplicações de novas tecnologias que tragam melhorias e soluções para otimização na aplicação do concreto que também minimizem os impactos ambientais. Assim, como alternativas para finalidades de utilização distintas, surgem diferentes tipos de concretos, como com adições e aditivos especiais e com a utilização de agregados leves (FONSECA, 2010).

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 que o compõe, como incombustibilidade, baixo coeficiente de dilatação e condutividade térmica. Porém, o aumento da temperatura nos elementos de concreto provoca redução no módulo de elasticidade e na resistência características de seus materiais constituintes, havendo prejuízos na rigidez do elemento (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).

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*).

Por isso, o presente estudo se justifica pela relevância no entendimento do comportamento de concretos submetidos a elevadas temperaturas, pois um conhecimento mais aprofundado dessa influência pode resultar em projetos mais econômicos e seguros.

OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo fazer uma revisão da literatura no que diz respeito ao efeito da elevada temperatura na estrutura do concreto, a fim de auxiliar novas pesquisas no tocante a esse tema.

REFERENCIAL TEÓRICO

Concreto

De acordo com Silva (2000), por mais de um século o concreto foi composto por uma mistura homogênea de água, cimento, agregados e água. Segundo NEVILLE (2016), 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 tipos especiais de concreto.

Cardoso (2012) afirma que, quando submetidos a altas temperaturas, concretos convencionais tem sua vida útil reduzida e normalmente necessitam de manutenção. A fim de possibilitar propriedades limitadas pelo concreto tradicional, desenvolveram-se concretos especiais, como o concreto refratário, que, de acordo com a NBR 8826 (ABNT, 2014), pode ser entendido como um produto não-conformado de pega hidráulica, pega química ou pega ao ar e consiste na mistura de um ou mais agregados refratários de granulometria adequada, com ligantes como cimento aluminoso, sílica coloidal, alumina hidratada e fosfatos, podendo conter aditivos e componentes não cerâmicos.

Concreto submetido a elevadas temperaturas

Grande parte da comercialização de refratários do mundo corresponde ao concreto refratário que é um material caracterizado por possuir boa estabilidade física e química a temperaturas elevadas e possuir propriedades de isolamento térmico, além de apresentar resistência mecânica, térmica e ao choque térmico. Normalmente, são empregados em locais submetidos a temperaturas acima de 500°C, na indústria siderúrgica, por exemplo, como revestimento de fornos. Além disso, a fim de suportar esforços mecânicos e provocando retrações mínimas e dilatações, quando submetido à variação brusca de temperatura, este tipo de concreto pode ser obtido através da mistura de cimento aluminoso, aditivos especiais e agregados refratários (CARDOSO, 2012).

O comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas depende do comportamento individual dos seus materiais constituintes, variando com o grau de hidratação, proporção água-ligantes, finos existentes e tipo de agregados (SOUZA, 2016).

Aglomerante

A utilização de cimento Portland para concreto submetido a altas temperaturas é limitada a aproximadamente 500°C, pois, quando sujeito a elevadas temperaturas, o hidróxido de cálcio (C-H) se decompõe dando origem ao óxido de cálcio (CaO) livre que leva a deterioração do concreto exposto à umidade ou água (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

De acordo com Freitas (1993, apud RAAD, 2008), a partir das propriedades desejadas, é determinado o material ligante a ser utilizado, dessa forma, a fim de obter um material que possa ser exposto a elevadas temperaturas mantendo grande parte de suas características mecânicas e reológicas, em concretos refratários, é mais utilizado o cimento de aluminato de cálcio (CAC), que, pela alta pureza, a formação de fases indesejadas, como o óxido de cálcio e hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), ocorrem a temperaturas acima de 1000 °C.

Neville (2016) afirma que o cimento Portland branco 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, com giz ou calcário livres de determinadas impurezas e custa cerca de 3 vezes o preço do cimento Portland comum; além dele, é produzido o cimento branco especial de aluminato de cálcio que pode suportar temperaturas ainda mais elevadas, pois é produzido contendo entre 70 e 80% de Al₂O₃, 20 a 30% de cálcio e apenas 1 % de ferro e sílica, possuindo porém, custo bastante elevado.

Água

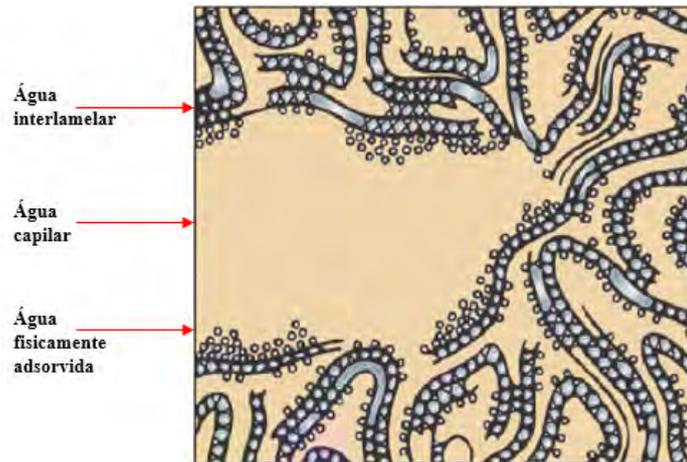
Freitas (1993, apud CARDOSO, 2012) aponta que o principal agente para a hidratação do concreto refratário na ligação hidráulica do aglomerante é a água, que possui papel relevante nas propriedades do concreto fresco e endurecido, além de atuar diretamente na fluidez da pasta e na continuidade dos constituintes, da matriz e demais componentes do concreto.

As reações de hidratação definem a estrutura do compósito. A hidratação do cimento se dá pela hidratação do C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF, sendo o endurecimento da pasta dominado pela hidratação dos aluminatos (C₃A e C₄AF) e a resistência do compósito comandada pelos silicatos (C₃S, C₂S), que compõem cerca de 75% do cimento Portland comum. É possível constatar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) sobre a superfície dos grãos de cimento depois de poucas horas de hidratação, sendo eles responsáveis por ocupar de 50 a 60% do volume de sólidos da pasta de cimento completamente hidratada (ALVES, 2002; BORJA, 2011; PAREDES E BRONHOLO, 2013).

A água pode existir de várias formas na pasta de cimento hidratada (Figura 1) e, de acordo com o grau de facilidade com que pode ser removida, é classificada em água interlamelar que é retida pelas ligações de pontes de hidrogênio entre as camadas do C-S-H, água capilar que está presente nos maiores vazios e está livre da

influência das forças de atração, água adsorvida que se encontra próximo à superfície sólida dos produtos de hidratação e a água quimicamente combinada que integra parte da microestrutura de vários produtos de hidratação do cimento (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Figura 1: Esquemática dos tipos de água na pasta de cimento hidratada.



Fonte: MEHTA E MONTEIRO, 2014.

Agregados

De acordo com Neville (2016), o tipo de agregado influencia a resposta do concreto, sendo o coeficiente de dilatação térmica (quanto maior for o coeficiente do agregado, maior será o coeficiente do concreto), calor específico e a condutividade propriedades dos agregados importantes no desempenho do concreto.

O comportamento térmico de concretos usuais é determinado pelos agregados, pois, além de ocuparem a maior parte do volume do concreto, restringem as eventuais contrações e dilatações da pasta de cimento durante o aquecimento. Dessa forma, devido à sua origem, as variações nas propriedades do agregado podem promover efeito considerável no comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas. A condutividade térmica do concreto, por exemplo, é influenciada pelo tipo de agregado, sendo a sua escolha baseada em propriedades, como condutividade, fusão e expansão térmica (BRITZ, 2011).

Propriedades do concreto no estado fresco e endurecido

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).

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 (METHA; 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.

Efeito do Fogo

De acordo com Souza (2005), o fogo é um fenômeno físico-químico que ocorre com uma reação de oxidação com emissão de calor e luz e se manifesta diretamente em função da composição química do material que pode queimar em função da sua superfície específica, das condições de exposição ao calor, da oxigenação e da umidade contida.

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).

Propriedades térmicas do concreto

Britez (2011) afirma que a transferência de calor no interior do concreto é responsável, em parte, pela intensidade do dano causado ao concreto e é decorrente da condutibilidade, difusividade e calor específico, propriedades térmicas básicas dependentes do tipo de agregado, cimento, porosidade e teor de umidade do concreto.

A condutibilidade térmica do concreto varia com seus constituintes, principalmente do cimento hidráulico e da presença de ligações cerâmicas. Em geral, a condução aumenta com o aumento da temperatura (CARDOSO, 2012).

De acordo com Neville (2016), a condutividade do ar é menor do que a da água, por isso o grau de saturação do concreto é o principal fator influente na sua condutividade, que, em concretos leves, aumenta com o acréscimo do teor de umidade e com a redução da quantidade de água da mistura, já que a condutividade da água é menor do que a condutividade da pasta de cimento.

Mas o coeficiente de condutibilidade térmica dos concretos é pouco relacionada à sua massa específica, sendo a mineralogia dos agregados de grande influência. O concreto usual é melhor condutor de calor quando comparado ao concreto de baixa

densidade, dessa forma são os concretos com baixa condutividade térmica que apresentam maior resistência ao fogo (GABRICH, 2008; BAUER, 2015).

Normalmente essa propriedade é calculada a partir da difusividade e , aproximadamente entre os 50 °C e 60°C, a condutividade aumenta lentamente até atingir um valor máximo, mas diminui subitamente por volta dos 120 °C com a perda da água do concreto. A condutividade volta a se estabilizar por volta dos 140 °C e a 800 °C é cerca da metade do valor a 20 °C (NEVILLE, 2016).

Outra propriedade relacionada à temperatura é o calor específico, ou seja, a capacidade térmica, que varia de 800 a 1000 J/Kg°C em concretos usuais e está relacionada com o teor de água e massa específica (MORALES, CAMPOS E FAGANELLO, 2011; BAUER, 2015).

De acordo com Cardoso (2012), agregados porosos apresentam expansão térmica menor, quando comparados aos agregados densos e concretos com coeficientes de dilatação térmica maiores e são menos resistentes a variações de temperatura do que concretos com um coeficiente menor.

Efeito do calor na estrutura do concreto

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).

Os componentes instáveis do concreto sofrem várias reações de decomposição quando aquecidos, principalmente, referentes à desidratação. Materiais cristalinos desidratam a temperaturas definidas, enquanto os materiais não cristalinos, como o gel de C-S-H, perdem água em ampla faixa de temperatura (WENDT, 2006).

A relação da temperatura nas causas e efeitos sofridos por concretos expostos a temperaturas elevadas pode ser entendida na Tabela 1 apresentada por Carvalho (2001):

Tabela 1: Efeitos do fogo nas características do concreto.

Característica	Efeito	Causa
Dureza superficial	Fissuração, fragmentação, fragilização	Desidratação a 100°C, remove a água livre; a desidratação se completa em 540°C; $Ca(OH)_2 \Rightarrow CaO$ em 450 a 500°C A pasta primeiro expande, depois retrai.
Fissuração	Fissuração superficial a 290°C; Fissuração profunda a 540°C	Perpendicular à face, e interna; pode assemelhar-se a fissuras de retração
Mudança de cor (sem lascamento)	Cor normal até 230°C Avermelhada de 290 a 590°C Vermelho/cinza de 590 a 900°C Cinza/camurça acima de 900°C O calcário se torna branco	Rochas sedimentares e metamórficas podem incorporar calor de forma estável em temperaturas baixas, tornam-se instáveis em maiores temperaturas e mostram permanente mudança de cor sob aquecimento.
Comportamento do agregado	Lascamento explosivo para concretos com alto teor de agregados silicosos próximos à superfície, acima de 573°C	Agregados diferem em difusibilidade, condutividade, coeficiente de dilatação; a transmissão de calor decresce para concretos feitos com agregados altamente silicosos, areia basáltica, calcário, agregados leves. Baixo quartzo inverte para alto quartzo em 573°C com expansão de 0,85% do volume.
Lascamento	Ocorre paralelamente à superfície livre seguido por quebra em lascas finas nos cantos e quinas (assemelha-se à esfoliação)	Redução da resistência

Fonte: Carvalho, 2001.

Por isso, devido aos diversos fatores que influenciam nas alterações do concreto, são apresentados a seguir a influência da elevada temperatura na microestrutura em relação às propriedades térmicas e mecânicas. De acordo com Souza (2016), a microestrutura do concreto é constituída em três regiões com polaridades distintas: a fase do agregado, a matriz do cimento hidratada e uma zona de transição que as conecta.

Efeito da alta temperatura na água

A água presente é eliminada ao elevar-se a temperatura no concreto endurecido. Entre 65 °C e 80 °C, é evaporada a água absorvida e, entre 80 °C e 100 °C, a água livre nos interstícios. Mas, devido ao alto calor de vaporização necessário, a temperatura do concreto não aumenta até que toda água evaporável seja eliminada, por isso, grande quantidade de água evaporável pode causar danos ao concreto, uma vez que fissuras surgem na microestrutura pela retração da pasta causada pela perda da água contida no sistema de poros. (CARVALHO, 2001; COSTA; SILVA, 2002).

Efeito da alta temperatura na pasta de cimento

A consequência do aumento de temperatura na pasta de cimento hidratada depende do grau de hidratação e da umidade, pois o fator água/cimento interfere diretamente na permeabilidade e a umidade livre na pressão de vapor. (CARVALHO, 2001;).

A pasta saturada apresenta grande quantidade de água livre, capilar e adsorvida, enquanto uma pasta bem hidratada consiste, principalmente, em silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), hidróxido de cálcio e sulfoaluminatos de cálcio hidratados. As alterações iniciais na pasta de cimento são predominantemente físicas e começa a sofrer desgaste químico a partir dos 200°C com a redução das forças de Van Der Waals entre as camadas do C-S-H. Aos 300°C, a água intermelar do C-S-H e parte da água quimicamente combinada do C-S-H e dos sulfatosaluminatos hidratados será perdida, provocando a evolução dos poros. Aproximadamente aos 500°C, verifica-se uma desidratação da pasta do cimento devido à decomposição do hidróxido de cálcio (portlandita) e, aos 900°C com a perda completa da água interlamelar, ocorre a decomposição completa do C-S-H (tobermorita), que é responsável pela perda de resistência do concreto e pela redução de volume da pasta aumentando a fissuração (COSTA; SILVA, 2002; SOUZA, 2016).

O tempo de exposição à determinada temperatura deve ser considerado, pois, como exemplo, o C-S-H mantido a 400°C por algumas horas perde tanta água quanto aquecido até a temperatura de 600°C por alguns minutos (WENDT, 2006).

Além disso, quando a amostra é aquecida em patamares superiores a 600°C e depois resfriada, o CaO formado se re-hidrata, formando uma portlandita secundária que apresenta arranjo cristalino de qualidade inferior à primeira, e provoca expansões que acabam contribuindo para o aparecimento de fissuras no concreto. Acima de 800°C, a pasta sofre reações cerâmicas e, entorno dos 1100°C, ocorre derretimento total dos cristais. Após o resfriamento, todas as partículas podem se re-hidratar, formando diferentes géis ou componentes cristalino (LIMA, 2005).

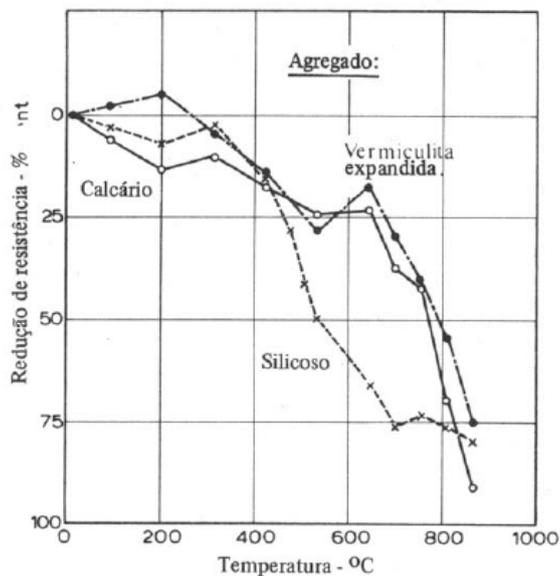
Efeito da temperatura no agregado

O efeito da temperatura no agregado varia de acordo com a sua composição. Agregados silicosos apresentam expansão térmica elevada e favorecem o aumento da fissuração e consequente redução da resistência na interface matriz-agregado. Por outro lado, agregados calcários apresentam menor dilatação térmica (SOUZA, 2016).

Segundo Wendt (2006, apud NEVILLE, 1997), a diferença na perda da resistência em concretos com agregados silicosos, calcários ou leves é desconsiderada quando são submetidos a temperaturas acima de 800°C, como pode ser observado na Figura 2 que apresenta o resultado de ensaio realizados em concretos de resistência

inicial de 28 MPa com tipos distintos de agregados ensaiados a quente e sem aplicação de carga.

Figura 2: Resistência à compressão de concretos com agregados distintos ensaiado a quente e sem aplicação de carga.



Fonte: NEVILLE, 1997 apud WENDT, 2006.

Agregados silicosos que contêm quartzo em sua composição, sofrem transformações significativas, como expansão volumétrica de 5,7% aos 570°C, devido à transformação da forma cristalina do quartzo de α em β que causam fissuras radiais ao redor dos agregados e agregados calcários tornam-se instáveis em torno dos 600°C quando começa sua decomposição (NEVILLE, 2016).

Efeito das altas temperaturas na zona de transição

O aquecimento do concreto leva a uma expansão térmica diferencial entre o agregado e a matriz cimentícia, pois, durante o aquecimento, a pasta sofre um intenso processo de retração devido à desidratação, enquanto os agregados sofrem um processo de expansão. Esse fato resulta em fissuras que surgem inicialmente na zona de transição devido à sua maior fragilidade, o que pode também introduzir processo de deslocamento (FERNANDES *ET AL*, 2007).

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).

Efeito nas propriedades mecânicas do concreto

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 CSH e do C₂S. Após a exposição a uma alta temperatura, a resistência varia (NEVILLE, 2016):

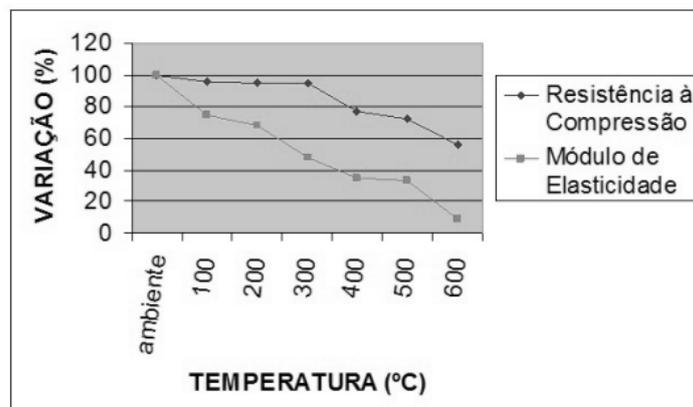
- a) Misturas com menor consumo de cimento sofrem uma perda na resistência após a exposição a uma alta temperatura menor do que misturas mais ricas;
- b) A perda da resistência à compressão é menor em concretos com agregados leves do que o concreto normal;
- c) Concretos de alta resistência perdem mais resistência do que concretos de resistência normal;
- d) Devido ao teor de umidade no momento de aplicação da carga, a perda de resistência é maior em concretos saturados do que em concretos secos.

A determinação do módulo de elasticidade (módulo de Young) em função da temperatura é realizada através de ultra som (MORALES, CAMPOS E FAGANELLO, 2011).

O comportamento da resistência e do módulo de elasticidade em concretos convencionais submetidos a variações de temperatura é apresentado na Figura 3, no qual é possível observar a ocorrência de uma redução drástica no módulo de elasticidade.

Conforme mencionado por Mehta e Monteiro (2014), a resistência do concreto também é influenciada pelas condições de ensaio, podendo os corpos de prova serem ensaiados a quentes e sob carga ou após resfriamento à temperatura e umidade ambientes.

Figura 3: Comportamento da Resistência à compressão e do Módulo de Elasticidade em concretos submetidos a diferentes temperaturas.



Fonte: MORALES, CAMPOS E FAGANELLO, 2011.

Fenômeno do lascamento e esfarelamento das camadas superficiais do concreto

De acordo com Lorenzon (2014), as condições térmicas extremas podem provocar deslocamentos no concreto, sendo esse fenômeno de lascamento, conhecido como *spalling* ou *sloughing*, que é decorrente do processo termo mecânico, associado ao aparecimento de tensões oriundas de variações térmicas, e ao termo hidráulico, relacionado à transferência de ar, vapor e água pela rede de poros.

Enquanto o *sloughing* é o desprendimento de uma considerável porção em grande extensão da superfície do concreto, o *spalling* configura-se pela perda parcial, instantânea e violenta com grande liberação de energia, formando cavidades no material quando submetido a temperaturas entre 250°C e 400°C. Outra forma de degradação física das camadas superficiais do concreto, é o esfarelamento, que é caracterizado pela constante exposição das camadas superficiais do concreto à ação térmica, o que o enfraquece e leva a uma redução da resistência a abrasão (COSTA, FIGUEIREDO E SILVA, 2002).

Dessa forma, Neville (2016) indica que o risco de lascamento explosivo aumenta com a diminuição da permeabilidade do concreto e com o aumento na velocidade de elevação da temperatura e da umidade excessiva, sendo este último o fator mais relevante na determinação do comportamento estrutural em temperaturas elevadas.

Em alguns casos, o lascamento é consequência da mineralogia do agregado ou da concentração de tensões térmicas surgidas durante o aquecimento (COSTA, FIGUEIREDO E SILVA, 2002; POMPEU, 2004; WEIDMANN, 2008).

Aspectos físicos e químicos

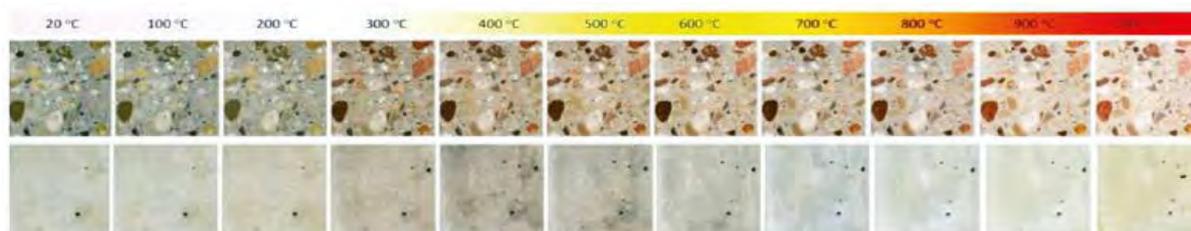
De acordo com Bauer (2015), o concreto convencional apresenta mudança na coloração após o resfriamento, mas essa alteração está sujeita a variações que dependem da natureza dos constituintes. A Tabela 2 indica a sucessão de cores de um concreto decorrentes do aumento da temperatura e a Figura 4 ilustra essas alterações.

Tabela 2: Alteração na coloração do concreto submetido ao aumento de temperatura.

TEMPERATURA	COLORAÇÃO
Entre 300 e 600 °C	Rosa
Entre 600 e 900 °C	Vermelho para cinzento
Entre 900 e 1000 °C	Amarelo-claro
Acima de 1000 °C	Amarelo

Fonte: produzida pela autora, 2017.

Figura 4: Alteração na coloração de um concreto e pasta submetidos a variadas temperaturas.

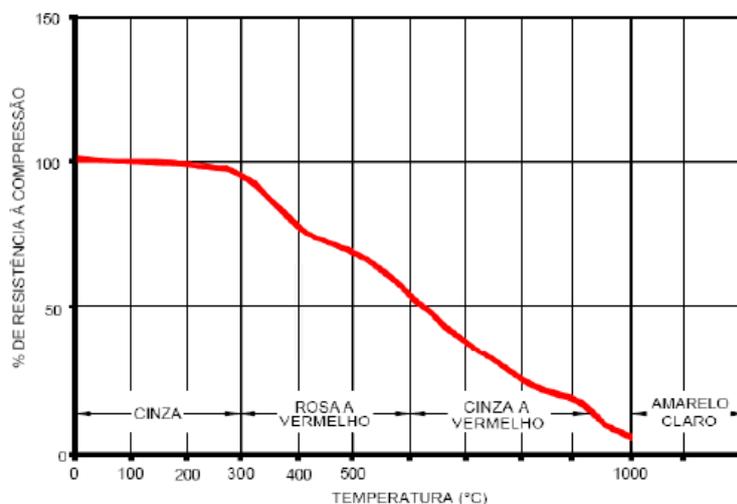


Fonte: HAGER, 2013.

A ilustração apresentada na Figura 4 é decorrente do estudo realizado por Hanger (2013), que utilizou scanner de mesa para análise das transformações na cor de um concreto de resistência comum, produzido com agregados naturais do leito do rio e submetido às temperaturas de $T = 100\text{ °C}$, 200 °C , 300 °C , 400 °C , 500 °C , 600 °C , 700 °C , 800 °C , 900 °C e 1000 °C , aquecidos em um forno elétrico com uma taxa de aquecimento constante de $1\text{ °C} / \text{min}$ e, depois de atingir a temperatura alvo, as amostras foram aquecidas a esta temperatura durante 1 h para homogeneizar a temperatura dentro da amostra (HAGER, 2013).

Os agregados utilizados no concreto levam às alterações de sua coloração, sendo essa mudança permanente. A modificação da cor é mais pronunciada em agregados silicosos, que ao serem submetidos a temperaturas em torno de 300 °C , o ferro presente nos agregados, especialmente na areia, oxida fazendo com que haja alteração para a cor rosa ou vermelha. Além disso, as alterações na coloração do concreto exposto a altas temperaturas pode servir como indicativo para se estimar a perda de resistência, como apresentado no Figura 5 (WENDT, 2006).

Figura 5: Relação entre a coloração e a perda de resistência de um concreto submetido a elevadas temperaturas.



Fonte: CANOVAS, 1998 APUD LIMA, 2005.

A partir do gráfico, é possível observar a queda de resistência inicial do concreto entre os 250°C e 300°C, mas sem alteração na sua coloração. Entre os 300°C e 600°C, a queda de resistência se acentua e pode chegar a 50%, com alteração para rosa ou vermelho na coloração do concreto. De 600°C a 950°C o concreto volta a ser cinza com alguns pontos avermelhados, indicando redução na resistência à compressão e fragilidade. A cor amarelo-alaranjado dos 950°C até 1000°C indica sinterização do concreto e, entre 1000°C até 1200°C, o concreto sintetizado torna-se amarelo claro e apresenta perda total de sua resistência (CANOVAS, 1998 APUD LIMA, 2005).

METODOLOGIA

Foi empregada uma metodologia descritiva, que consistiu em uma revisão de literatura através de consultas em livros, monografias, artigos sobre o efeito da elevada temperatura na estrutura do concreto.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma revisão da literatura sobre o comportamento da elevada temperatura na estrutura do concreto. Dessa forma, foi possível compreender a importância dos materiais constituintes no que diz respeito ao efeito da temperatura no concreto, sendo de fundamental importância um estudo no comportamento do concreto frente a elevadas temperaturas essencial para aplicação de concretos não convencionais.

REFERÊNCIAS

ALVES, S. M. S. **Desenvolvimento de compósitos resistentes Através da substituição parcial do cimento por resíduo da indústria cerâmica.** Dissertação (mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2002.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção:** normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. São Paulo: Pini, 2012, 457p.

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.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção:** novos materiais para construção civil. 5ed, vol 1 e 2. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

BORJA, E. V. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

BRITTEZ, 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.

CARVALHO, E. F. T. **Contribuição ao estudo da resistência residual do concreto submetido ao tratamento térmico padrão para situações de incêndio.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D.; SILVA, V. P. Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas. In: NUTAU, 2002.

COSTA, C.N; SILVA, V. P. Estruturas de concreto armado em situação de incêndio. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30, Brasília, 27 a 31 de maio de 2002.

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.

FERNANDES, B.; GIL, A.M.; BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B.F. Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: alterações físico-químicas e técnicas de análise. *.Net*, São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1983-41952017000400838&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 4 out 2017.

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, G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil:** uma abordagem epistêmica. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

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.

HAGER, I. **Fire Technology:** Colour Change in Heated Concrete, v. 50, n. 4, 2013.

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.

LORENZON, A. **Análise da resistência residual do concreto após exposição a altas temperaturas.** Monografia. Curso superior de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014, 782 p.

MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGARELLO, A. M. P. Ação do fogo sobre os componentes do concreto. In: SEMINA: CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS, Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 32, n. 1, p. 47-55, Londrina, 2011.

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.

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.

RAAD, H. J. **Influência das condições de misturas e moldagem na permeabilidade de concretos refratários aluminosos**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

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.

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.

SOUZA, L. D. P. S. **Análise do comportamento estrutural de vigas de concreto armado submetidas às altas temperaturas utilizando a metodologia do planejamento fatorial**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

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). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.