Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

EFEITO DE ALTAS TEMPERATURAS NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE CONCRETO CONVENCIONAL

A. PAIVA
Engenheiro M.Sc.
2º Batalhão de Engenharia de Construção
Teresina; Brasil
aspaiva@gmail.com

C. VASCONCELLOS
Professor D.Sc.
Escola Superior Técnica
Buenos Aires; Argentina
cabvasconcellos@uol.com.br

L. CARNEIRO
Professor D.Sc
Instituto Militar de Engenharia
Rio de Janeiro; Brasil
carneiro@ime.eb.br

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar experimentalmente a resistência à flexão de prismas de concreto simples sob altas temperaturas A resistência média do concreto à compressão, sob temperatura ambiente cerca de 25 ºC, era em torno de 35 MPa. Os corpos de prova prismáticos de concreto tinham dimensões de 100 mm x 100 mm x 300 mm. O parâmetro variado nos ensaios de flexão foi a temperatura (ambiente cerca de 25 ºC, 300 ºC, 600 ºC e 900 ºC). Os prismas de concreto foram retirados do forno mufla e imediatamente conduzidos à prensa para realização dos ensaios não destrutivo (esclerometria) e destrutivo (flexão simples). Verificou-se que a temperatura influencia os resultados de resistência à flexão e de índice esclerométrico do concreto, além de provocar mudanças no seu aspecto.
Palavras-chave: altas temperaturas, resistência à flexão, índice esclerométrico, concreto convencional.

ABSTRACT

This paper aims to experimentally evaluate the flexural strength of prismatic plain concrete under high temperatures. The average compressive strength of concrete under temperature about 25 ºC was about 35 MPa. The concrete prisms had dimensions of 100 mm x 100 mm x 300 mm. The varied parameter in flexural tests was the temperature (room temperature about 25 ºC, 300 ºC, 600 ºC and 900 ºC). The concrete prisms were removed from the muffle furnace and immediately taken to the compression testing machine to perform the non-destructive (rebound hammer method) and destructive testing (simple flexural). It was found that the temperature affects the concrete flexural strength and rebound number and causes changes in concrete appearance.
Keywords: high temperatures, flexural strength, rebound number, ordinary concrete.

1. INTRODUÇÃO

Ao se aquecer uma estrutura de concreto, o comportamento mecânico do concreto se altera, a deformação dos elementos estruturais aumenta, e a capacidade de carga de estrutura diminui por conta da deterioração das propriedades do concreto.

Em caso de incêndio em uma estrutura de concreto, a temperatura do fluxo térmico circundante aumenta rapidamente e varia continuamente. Em seguida, a estrutura de concreto é aquecida, a temperatura da sua superfície eleva rapidamente, o calor e penetra gradualmente no interior da estrutura de concreto por meio da ação do fenômeno da condução [1], causando alterações na sua micro e macroestrutura, o que leva a efeitos danosos à estrutura, tais como fissuras, esfarinhamentos, lascamentos e desplacamentos do concreto, ocasionando a diminuição de resistência e rigidez, o aparecimento de esforços adicionais nas estruturas hiperestáticas devido às deformações térmicas, e até talvez o colapso [2].

A avaliação da resistência do concreto de estruturas é necessária para dirimir dúvidas e auxiliar os engenheiros em casos, por exemplo, de monitoramento da evolução da resistência do concreto, de conhecimento da data mais adequada

para retirada de escoramentos de uma estrutura, de avaliação da homogeneidade e dureza superficial do concreto, e da qualidade de estruturas de concreto novas e antigas, dentre outros casos.
O método mais aceito para a avaliação da resistência do concreto é o ensaio destrutivo de extração de carotes de concreto, que consiste na perfuração de um elemento estrutural e extração de um cilindro de concreto para ser ensaiado à compressão. Mas este método reduz a capacidade resistente do elemento estrutural e, por isso, é muitas vezes evitado.

Para contornar esse problema, surgiram os ensaios não destrutivos, pois têm a vantagem de não produzir dano estrutural ou deixar pequenos danos para serem reparados após os ensaios, e de não provocar perda na capacidade resistente do elemento estrutural ensaiado. Um dos mais utilizados é o ensaio de esclerometria.

Neste trabalho avaliou-se experimentalmente a resistência à flexão de prismas de concreto simples de 100 mm x 100 mm x 300 mm de dimensões sob altas temperaturas (25 ºC, 300 ºC, 600 ºC e 900 ºC) por meio do ensaio destrutivo de flexão simples e com o uso do ensaio não destrutivo de esclerometria. Os prismas de concreto foram retirados do forno mufla e imediatamente ensaiados, sem sofrer qualquer tipo de processo de resfriamento.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foram confeccionados, no Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do IME, 8 corpos de prova prismáticos de concreto de 100 mm x 100 mm x 300 mm de dimensões.

O adensamento do concreto foi realizado com o uso de uma mesa vibratória, após o que os moldes de aço dos corpos de prova cilíndricos de concreto foram cobertos com plástico para evitar a perda de água, favorecendo o processo de cura do concreto.

A desforma dos corpos-de-prova ocorreu após 24 horas e os mesmos foram colocados em tanque d'água saturada de cal por 7 dias. Em seguida, foram deixados em ar livre até terem completado a idade de 28 dias.

Foi utilizado um forno tipo mufla para a elevação de temperatura dos corpos de prova de concreto, conforme mostra a Figura 1. O espaço livre na câmara do forno media 140 mm × 150 mm x 300 mm (largura x altura x profundidade), com temperatura máxima de aquecimento de 1200 ºC. A velocidade média do aumento de temperatura do forno com câmara vazia era de aproximadamente 9 ºC/min.



Figura 1: Forno tipo mufla utilizado para a elevação da temperatura do concreto

Após se atingir a temperatura máxima preestabelecida (300 ºC, 600 ºC ou 900 ºC), a mesma foi mantida neste patamar por até seis horas com o intuito de se atingir esta temperatura de modo uniforme no interior dos corpos de prova de concreto.

A fim de se ter o registro das temperaturas no interior dos corpos-de-prova de concreto, foram instalados previamente termopares conectados a um multímetro, que transmitiu os dados via *wireless* para um *software* instalado em um computador próximo ao local do experimento (ver Figura 2). Este equipamento possibilitava o armazenamento da temperatura a cada segundo e possuía capacidade de até 50.000 registros, ou seja, aproximadamente 14 horas de medições.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Anteriormente aos ensaios de elevação da temperatura dos corpos de prova de concreto, foram feitos os registros das elevações de temperatura dos fornos, sem os corpos de prova.



Figura 2: Sistema de aquisição de dados da temperatura no interior dos corpos-de-prova de concreto

Para a retirada dos corpos de prova aquecidos do interior dos fornos utilizaram-se uma pinça metálica e luvas de couro, de acordo com o que apresenta a Figura 3a. Para segurança e garantia de isolamento térmico no manuseio dos corpos de prova de concreto, optou-se por uso de um colchão térmico feito com uma espuma cerâmica revestida por uma fibra cerâmica de 2 mm de espessura (ver Figura 3b), o que tornou possível manusear os corpos de prova de concreto aquecidos na prensa.



(a) pinça metálica e luvas de couro



(b) colchão térmico de uma espuma cerâmica

Figura 3: Aparatos usados para retirar os corpos de prova de concreto do forno

Após cerca de dois minutos, tempo entre o momento da retirada do corpo de prova de concreto e o início dos ensaios, foram realizados ensaios de esclerometria, para a determinação do índice esclerométrico, e de flexão simples, para a determinação da resistência à flexão do concreto, conforme as normas [3, 4].

2.1 Materiais

O cimento Portland utilizados nos concretos foi o do tipo CP II–E-32, da Holcim.

O agregado miúdo empregado na elaboração dos concretos foi areia de rio lavada. Seus valores de módulo de finura e dimensão máxima característica foram 2,96 e 4,8 mm.

O agregado graúdo utilizado foi brita do tipo gnaisse com dimensão máxima característica de 19 mm (brita 1). Seu valor de módulo de finura foi 6,30.

2.2 Concreto

Foi confeccionado um concreto resistência convencional, com resistência à compressão média de cerca de 35 MPa. A composição em peso foi 1: 2,00: 2,80: 0,48: 0,004 (cimento: areia: agregados graúdos: relação água-cimento: superplastificante), tendo consumo de 371 kg de cimento por m^3 de concreto. O concreto apresentou o abatimento do tronco de cone de (35 ± 10) mm, realizado segundo a norma [5].

3. RESULTADOS E ANÁLISE

Os resultados dos valores de resistência à flexão $f_{ct,fl}$ e de índice esclerométrico I.E. do concreto ensaiado, imediatamente após sua retirada do forno mufla, estão reunidos na Tabela 1. Nesta tabela, a última linha agrupa os valores médios de $f_{ct,fl}$ ($f_{ct,flm}$) e de I.E. ($I.E._m$).

Constata-se dessa tabela que, com o aumento de temperatura, os valores de $f_{ct,fl}$ diminuíram, enquanto os valores de I.E. aumentaram. Os menores valores de $f_{ct,fl}$ ocorreram para a maior temperatura aplicada no ensaio (900 ºC), ao passo que os menores valores de I.E., para a temperatura ambiente.

Tabela 1 – Resultados de $f_{ct,fl}$ e I.E. dos corpos de prova de concreto ensaiados

Corpo-de-prova	$f_{ct,fl}$ (MPa)				I.E.			
	25 ºC	300 ºC	600 ºC	900 ºC	25 ºC	300 ºC	600 ºC	900 ºC
C1	3,74	1,83	1,66	1,30	36	36	39	40
C2	3,72	1,83	1,46	1,23	32	36	42	38
Média	3,73	1,83	1,56	1,27	34	36	41	39

A Figura 4 apresenta os valores de fator de redução da resistência $k_{c,\theta}$ dos concretos ensaiados neste trabalho em função da temperatura, além do fator de redução do índice esclerométrico $k_{e,\theta}$, aqui definido neste trabalho como sendo a relação entre o índice esclerométrico do concreto na temperatura θ ($I.E._\theta$) e o índice esclerométrico do concreto em situação normal (I.E.). Estes valores $k_{c,\theta}$ e $k_{e,\theta}$ foram obtidos usando os respectivos valores médios $f_{ct,flm}$ e $I.E._m$ encontrados na Tabela 1.

Verifica-se que, para a temperatura de 300 ºC, a resistência média à flexão do concreto ($f_{ct,flm}$) foi 51% inferior que a do concreto na temperatura ambiente 25 ºC, enquanto para as temperaturas de 600 ºC e 900 ºC, 58% e 66%.

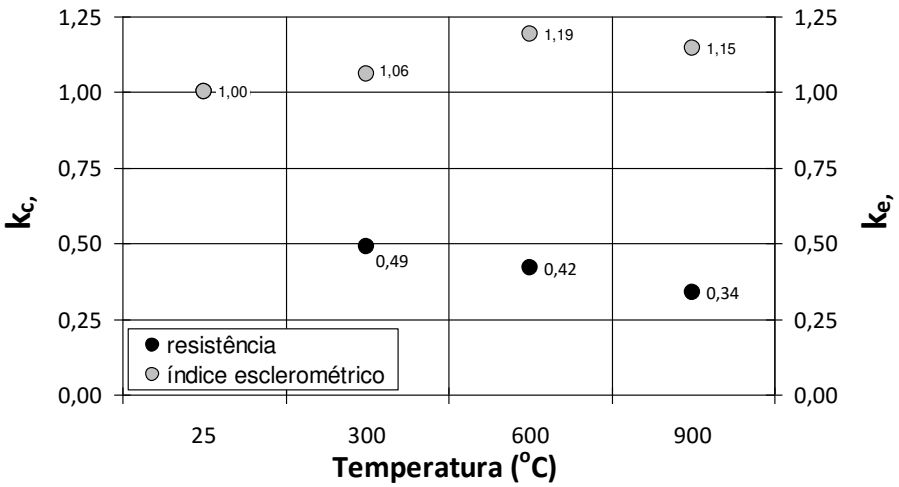


Figura 4: Variação do fator de redução da resistência e do índice esclerométrico do concreto ensaiado em função da temperatura

Os valores de $k_{e,\theta}$ aumentaram com o aumento da temperatura. Para a temperatura de 300 ºC, o valor de $k_{e,\theta}$ foi 1,06, o que depreende-se que o valor de $I.E._m$ encontrado foi 6% superior ao valor de $I.E._m$ para a temperatura ambiente de 25 ºC. Para as temperaturas de 600 ºC e 900 ºC, estes valores subiram para 1,19 e 1,15.

Devido à alta temperatura, a superfície do concreto foi calcinada, o que a tornou mais dura que a do concreto sob temperatura ambiente. Em vista disto, os valores de I.E. tenderam a aumentar com o incremento da temperatura.

Na Figura 5 podem ser vistos os valores de $f_{ct,flm}$ em função de $I.E._m$ do concreto ensaiado neste trabalho. Verificou-se que, em geral, houve diminuição de $f_{ct,flm}$ com o aumento de $I.E._m$.

As curvas de elevação da temperatura no forno e no interior do corpo-de-prova em função do tempo encontradas neste trabalho e segundo [6] podem ser vistas nas Figuras 6a e 6b. Percebe-se que estas curvas apresentaram comportamento semelhante entre si e que a temperatura no interior do forno para qualquer espaço de tempo foi maior que a no interior do corpo-de-prova de concreto. O forno utilizado por [6] tinha em sua câmara espaço livre nas dimensões 200 mm x 300 mm x 500 mm, com temperatura máxima de aquecimento de 1000 ºC. A velocidade média do aumento de temperatura do forno com câmara vazia era cerca de 8 ºC/min a 10 ºC/min.

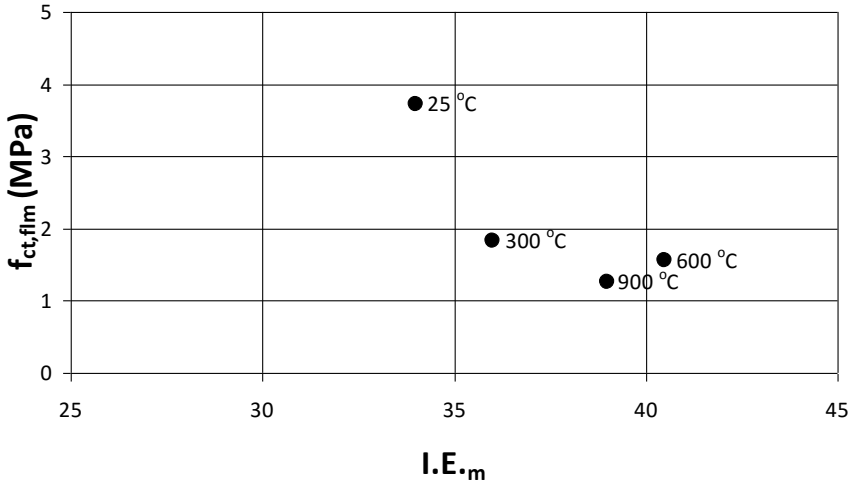
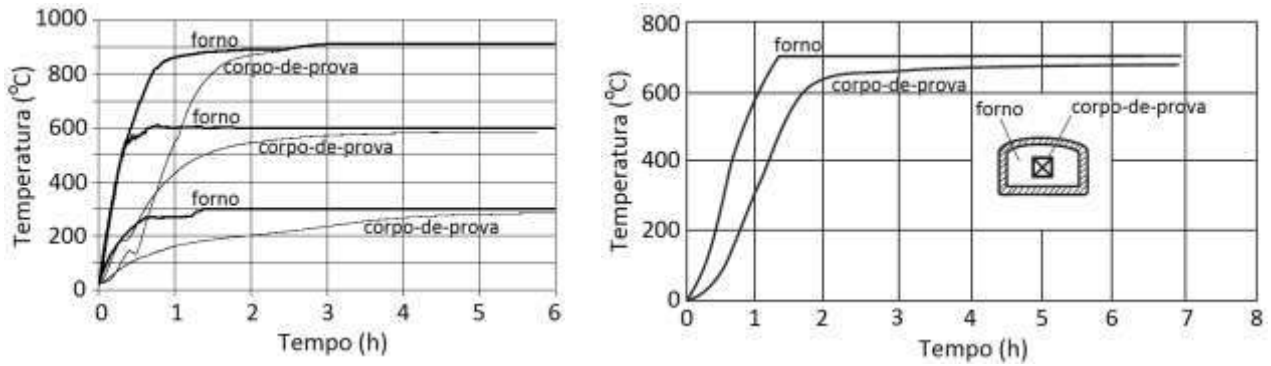


Figura 5: Valores de $f_{ct,flm}$ em função de $I.E._m$ obtidos neste trabalho e segundo o esclerômetro



(a) (b)

Figura 6: Curvas temperatura no forno e no interior do corpo-de-prova em função do tempo

A Figura 7 ilustra a medição feita na superfície interna do prisma de concreto imediatamente após sua ruptura, por meio de um termômetro infravermelho de 1200 ºC de capacidade de leitura. A temperatura do concreto era de 900 ºC, quando foi retirado do forno, e após a execução do ensaio, caiu para cerca de 670 ºC.

Pode-se visualizar na Figura 8 a execução do ensaio de esclerometria em um corpo de prova prismático de concreto de 100 mm x 100 mm x 300 mm de dimensões sob temperatura de 25 ºC. O esclerômetro digital modelo W-D-500 da marca *James NDT Instruments* foi utilizado no programa experimental deste trabalho. Sua energia de percussão é capaz de avaliar concretos de resistência à compressão variando de 10,8 MPa a 58,8 MPa (I.E. de 22 a 55), quando aplicado com ângulo de impacto nulo, isto é, paralelamente à direção normal da superfície do concreto.

Para a determinação dos valores médios de índices esclerométricos, o esclerômetro foi aplicado ortogonalmente à superfície lisa e seca do prisma de concreto 9 pontos afastados de 30 mm entre si, formando uma malha 90 mm x 90

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

mm. Cada prisma de concreto ensaiado foi preso entre os pratos de compressão da prensa para que deslocamento algum não viesse a ocorrer.



Figura 7: Medição feita no concreto por meio de um termômetro infravermelho



Figura 8: Execução do ensaio de esclerometria

A Figura 9 mostra o aspecto do corpo de prova prismático de concreto de 100 mm x 100 mm x 300 mm de dimensões, após o ensaio de flexão simples. Antes da aplicação do carregamento, o corpo de prova de concreto sob temperatura de 900 ºC já apresentava diversas fissuras ao longo de toda a sua superfície. Observa-se um tom avermelhado do concreto no interior do prisma rompido.



Figura 9: Aspecto dos corpos de prova de concreto após o ensaio de flexão para a temperatura de 900 ºC.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

O modo de ruptura dos corpos de prova de concreto foi similar, independentemente da temperatura a que foi submetido.

Observou-se a mudança de coloração na superfície do concreto. O corpo de prova de concreto sob temperatura de 300 ºC apresentou um tom amarronzado mais claro que o do corpo de prova de concreto sob temperatura de 900 ºC.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho tratou de um estudo para a avaliação experimental da resistência à flexão e do índice esclerométrico de prismas de concreto simples sob altas temperaturas. Confeccionou-se um grupo de concreto de resistência convencional (f_{cm} de 35 MPa), onde se variou a temperatura de aquecimento (ambiente cerca de 25 ºC, 300 ºC, 600 ºC e 900 ºC). De posse dos resultados de ensaios de esclerometria e de flexão simples do concreto logo após sua retirada de um forno mufla, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- os valores de $f_{ct,fl}$ diminuíram com o aumento de temperatura e, quanto maior o valor de temperatura, menores os valores de $f_{ct,fl}$;
- os valores de I.E. cresceram com o aumento de temperatura e, em geral, quanto maior o valor de temperatura, maiores os valores de I.E.;
- com relação ao concreto sob temperatura ambiente de 25 ºC, o valor de $f_{ct,flm}$ diminuiu 51%, 58% e 66% para as temperaturas de 300 ºC, 600 ºC e 900 ºC;
- a temperatura no interior do forno para qualquer espaço de tempo foi maior que a no interior do corpo de prova de concreto;
- o aspecto do concreto foi alterado com o aumento da temperatura: houve mudança na sua coloração e aparecimento de fissuras em sua superfície.
- a norma sobre projeto de estruturas de concreto em situação de incêncio [7] trata apenas da diminuição dos valores de resistência do concreto à compressão f_c com o aumento de temperatura; em projetos de pavimentos de concreto em situação de incêncio, o parâmetro mais importante para o concreto é a sua resistência à flexão.
- a diminuição dos valores de $f_{ct,flm}$ com o aumento da temperatura encontrada neste trabalho difere destacadamente com o que se apresenta na norma [7], que trata de valores de f_c. Segundo [7], para as temperaturas de 300 ºC, 600 ºC e 900 ºC, a diminuição é, em média, 7%, 47% e 88%.

5. REFERÊNCIAS

[1] Costa, C. N., Figueiredo, A. D., Silva, V. P. O Fenômeno do Lascamento (“spalling”) nas Estruturas de Concreto Armado Submetidas a Incêndio – Uma Revisão Crítica. *Anais do 44º Congresso Brasileiro do Concreto*, Belo Horizonte, Brasil, 2002.

[2] Paiva, A. A. S. Estudo do Efeito da Temperatura em Concretos e em Pavimento Rígido. *Dissertação de Mestrado*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

[3] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 7584. *Concreto endurecido – avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2012.

[4] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 12142. *Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos*. Rio de Janeiro, 2010.

[5] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR NM 67. *Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 1998.

[6] Guo, Z., Shi, X. *Experiment and Calculation of Reinforced Concrete at Elevated Temperatures*, Tsinghua University Press, Published by Elsevier Inc., United States of America, 2011.

[7] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 15200. *Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio*, Brasil, 2012.