XVII Congresso Internacional sobre Patologia e
Reabilitação das Construções

XVII Congreso Internacional sobre Patología y
Rehabilitación de las Construcciones

XVII International Conference on Pathology and
Constructions Rehabilitation

FORTALEZA (Brasil), 3 a 5 de junho de 2021

<https://doi.org/10.4322/CINPAR.2021.117>

Degradação térmica de concretos convencionais com diferentes relações A/C submetidos a altas temperaturas

Thermal degradation of conventional concretes with different ratios a/c under high temperatures

Moacyr NETO¹, Fernanda BORBA², Paulo ROBERTO³, Camilla CALDEIRA⁴, Marcos KIYOSHI⁵, Flávio ROLDÃO⁶

¹ IFTO Campus Palmas, Tocantins, Brasil, moacyr@ifto.edu.br

² IFTO Campus Palmas, Tocantins, Brasil, borba.oliveira.fernanda@gmail.com

³ IFTO Campus Palmas, Tocantins, Brasil, pauloroberto1905@gmail.com

⁴ IFTO Campus Palmas, Tocantins, Brasil, camillacaldeirac@gmail.com

⁵ IFTO Campus Palmas, Tocantins, Brasil, marcoshiratam@gmail.com

⁶ IFG, Goiás, Brasil, flavioroldao@ifto.edu.br

Abstract: When submitted to high temperatures, such as those resulting from a fire, the concrete presents a significant impairment of its physical-chemical properties, with reduction of its mechanical strength, modulus of elasticity and adhesion between the cement paste and the aggregates, as well as between concrete and reinforcement in structural parts, being also observed cracks resulting from the thermal amplitude and chemical changes of the compounds. The analysis of structural reliability, after a fire accident, is initially preceded by visual observation of the structure, observing its color change, cracking patterns and explosive chising (spalling). The present work, developed at the Palmas Campus of IFTO, sought to quantify the impairment of the mechanical performance of the concrete submitted to high temperatures, through tests of compressive strength, surface hardness by the reflection spirometer and modulus of elasticity. We analyzed concretes made with water/cement ratios equal to 0.42, 0.48 and 0.54, using Portland CP IV-32RS cement, washed river sand and large aggregate type granite crushed stone. The specimens were divided into series, subjected to temperatures of 400°C, 550°C and 800°C and to rapid cooling in water and subsequently, dried in a greenhouse. Finally, graphic demonstrations obtained during the investigation were presented for analysis regarding the parameters under study. This research aimed to contribute to the recovery of structural reliability after fire accidents.

Keywords: high temperatures, fire, thermal degradation of concrete.

Resumo: Quando submetido a altas temperaturas, como as decorrentes de um incêndio, o concreto apresenta um comprometimento significativo de suas propriedades físico-químicas, com redução de sua resistência mecânica, módulo de elasticidade e aderência entre a pasta de cimento e os agregados, bem como entre o concreto e a armadura em peças estruturais, sendo ainda observadas fissurações decorrentes da amplitude térmica e mudanças químicas dos compostos. A análise da confiabilidade estrutural, após um

sinistro de incêndio, é inicialmente precedida pela observação visual da estrutura, atentando-se a sua mudança de coloração, padrões de fissuração e lascamentos explosivos (spalling). O presente trabalho, desenvolvido no Campus Palmas do IFTO, buscou quantificar o comprometimento do desempenho mecânico do concreto submetido a temperaturas elevadas, através de ensaios de resistência à compressão, dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão e módulo de elasticidade. Foram analisados concretos confeccionados com relações água/cimento iguais a 0,42, 0,48 e 0,54, empregando cimento Portland CP IV-32RS, areia de rio lavada e agregado graúdo tipo pedra britada granítica. Os corpos de prova foram divididos em séries, submetidas às temperaturas de 400°C, 550°C e 800°C e ao resfriamento rápido em água e posteriormente, secos em estufa. Por fim, foram apresentadas demonstrações gráficas obtidas durante a investigação, para análise à respeito dos parâmetros em estudo. Esta pesquisa teve em vista contribuir para a recuperação da confiabilidade estrutural após sinistros de incêndio.

Palavras-chave: altas temperaturas, incêndio, degradação térmica do concreto.

1. Introdução

Quando em situação de incêndio o concreto, relativamente a outros materiais de construção, apresenta diversas vantagens, uma vez que é um material incombustível e não emite gases tóxicos quando exposto a altas temperaturas, ao contrário de outros materiais, como a madeira e o plástico. Mostra-se ainda, capaz de manter resistência suficiente por períodos relativamente longos, permitindo operações de resgate em caso de sinistros causados por incêndios (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Apesar de suas qualidades em relação à resistência ao fogo, o concreto sofre um grande número de fenômenos e processos físico-químicos durante o aquecimento, os quais podem ser extremamente destrutivos para o mesmo (PIASTA, 1984). Particularmente importantes são a perda de resistência à compressão, a redução do módulo de elasticidade, a fissuração decorrente de tensões térmicas, a destruição da aderência entre a pasta de cimento e os agregados, mudanças químicas dos compostos da pasta de cimento endurecida e a perda de aderência entre o concreto e o aço (GEORGALI; TSAKIRIDIS, 2004; SHORT, PURKISS, GUISE, 2001).

A deterioração do concreto é resultado de muitos fatores que interagem simultaneamente, sendo sua composição um dos que deve ser considerado, uma vez que tanto a pasta de cimento quanto os agregados são formados por componentes que se desidratam e se transformam quando submetidos ao aquecimento. Além disso, a permeabilidade do concreto, o tamanho da peça e a taxa de crescimento da temperatura também são fatores influentes, uma vez que governam o desenvolvimento das pressões internas dos produtos gasosos da decomposição (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

No caso de estruturas expostas a altas temperaturas, o estudo das alterações sofridas pelo concreto é uma ferramenta essencial, pois auxilia a desvendar a história de aquecimento do concreto, tornando-se um instrumento importante, tanto para as pesquisas forenses, quanto para determinar se uma estrutura de concreto ainda é estruturalmente eficiente (WENDT, 2006). Salienta-se que a avaliação de uma estrutura danificada por incêndios usualmente inicia pelas observações visuais do concreto, incluindo sua mudança de cor, fissuração e lascamento explosivo (ou “spalling”) (SHORT; PURKISS; GUISE, 2001).

2. Objetivos

O presente trabalho objetivou quantificar a degradação mecânica sofrida por concretos de diferentes relações água/cimento, quando submetidos a condições análogas às de incêndios de diferentes intensidades. Foram acompanhadas as variações apresentadas pela resistência à compressão, pela dureza superficial através do esclerômetro de reflexão e do módulo de elasticidade, com a temperatura de exposição, sendo

analisadas, comparativamente a uma amostra de referência, as temperaturas de 400°C, 550°C e 800°C. Foram também mensuradas as fissuras decorrentes das diferentes exposições.

3. Variáveis da pesquisa

3.1 Condições Fixas

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos, foram determinadas as seguintes condições fixas: tipo de cimento e agregados empregados nos diferentes traços de concreto confeccionados. Estas variáveis encontram-se representadas na Figura 1. Sua determinação foi considerada pela maior disponibilidade de aquisição no mercado local, bem como por configurar o maior volume comercializado na região, no ano de 2015.

Figura 1 – Condições fixas do programa experimental.

3.2 Variáveis independentes

As variáveis independentes, relacionadas ao traço e à temperatura de exposição, encontram-se relacionadas na Figura 2. Todos os traços confeccionados possuíam teor de argamassa igual a 49% e, quando da escolha das temperaturas de exposição, foram adotadas temperaturas já estudadas por BATISTA, PROCÓPIO e ARAÚJO (2014).

Figura 2 – Variáveis independentes do programa experimental.

3.3 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes, relacionadas à resistência à compressão, à avaliação da dureza superficial através do esclerômetro de reflexão, ao acompanhamento do módulo de elasticidade e abertura de fissuras, encontram-se relacionadas na Figura 3.

Título abreviado do artigo, usando no máximo 100 caracteres incluindo os espaços em branco

Figura 3 – Variáveis dependentes do programa experimental.

Na determinação da dureza superficial foi empregado um esclerômetro digital de reflexão tipo N, ilustrado na Figura 4, empregado a curva de correlação 10% lower. Na elaboração do diagrama tensão-deformação do concreto foram empregados CPs cilíndricos com 15x30cm, instrumentados com extensômetros eletrônicos acoplados a uma máquina universal de ensaios com capacidade de 200tf, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 4 – Esclerômetro tipo N empregado na determinação da dureza superficial do concreto.

Figura 5 – Determinação do diagrama tensão-deformação do concreto.

O acompanhamento da abertura das fissuras foi realizado com o auxílio de um fissurômetro dotado de iluminação e lupa com ampliação de 10x, ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Fissurometro empregado no acompanhamento das aberturas de fissuras.

4. Ciclos de exposição

Título abreviado do artigo, usando no máximo 100 caracteres incluindo os espaços em branco

Todos os corpos-de-prova integrantes do programa experimental (em um total de 72), foram mantidos em cura úmida por 28 dias, quando, então foram submetidos à exposição em estufa a 110°C, até constância de massa, para interrupção do processo de hidratação do cimento Portland, permanecendo em ambiente seco e abrigado até a data de ensaio. O forno tipo mufla empregado, o qual encontra-se ilustrado na Figura 7, possuía capacidade para armazenagem simultânea de até 8 corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 10x20cm, sendo previamente programado para atingir a temperatura de exposição a uma taxa de 10°C por segundo, mantendo a temperatura final por 30 minutos, conforme sugerido pela NBR14432(2000), e empregado por WENDT(2006).

Decorrido o tempo de exposição, os CPs foram rapidamente resfriados em água à temperatura ambiente e novamente secos em estufa. Após sua retirada e assim que atingida a temperatura ambiente, as amostras tiveram a configuração de sua superfície registrada, bem como determinadas a dureza superficial, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. A identificação das séries moldadas encontra-se na Quadro 1.

Figura 7 – Forno tipo mufla utilizado.

Quadro 1 – Relação das séries confeccionadas

Série	Número de CPs moldados	Relação a/c	Temperatura de exposição
T1F1	6	0,54	Referência – sem exposição
T1F2	6	0,54	400°C
T1F3	6	0,54	550°C
T1F4	6	0,54	800°C
T2F1	6	0,48	Referência – sem exposição
T2F2	6	0,48	400°C
T2F3	6	0,48	550°C
T2F4	6	0,48	800°C
T3F1	6	0,42	Referência – sem exposição
T3F2	6	0,42	400°C
T3F3	6	0,42	550°C
T3F4	6	0,42	800°C

Título abreviado do artigo, usando no máximo 100 caracteres incluindo os espaços em branco

5. Resultados

5.1 Resistência à compressão e dureza superficial

Observou-se, como esperado, uma redução da resistência à compressão com a temperatura de exposição. Nas temperaturas de 400°C e 550°C, esta redução foi tão mais intensa quanto menor a relação a/c , fenômeno relacionado à influência da densidade da rede de poros no efeito spalling, estudado por NINCE (2006). Ao serem expostas à temperatura de 800°C, entretanto, todas as amostras apresentaram a mesma resistência residual à compressão (33%), e pouca divergência na dureza superficial (22% a 29%).

Foram observadas grandes diferenças entre os resultados apresentados nos ensaios de resistência à compressão e dureza superficial, as quais se acentuaram com o aumento da temperatura de exposição. Salienta-se que a curva de correlação empregada (10% lower) apresentou resultados consideravelmente mais próximos da resistência à compressão que a curva padrão (standard), em todas as temperaturas mensuradas. Aliado a este comportamento, constatou-se uma maior variabilidade dos resultados de esclerometria com o aumento da temperatura de exposição, como pode ser observado na Figura 13.

Figura 8 – Variação do coeficiente de variação da dureza superficial do concreto pelo esclerômetro de reflexão com a temperatura de exposição.

5.2 Diagrama Tensão versus deformação específica

Após a exposição às temperaturas especificadas, os diferentes traços de concreto tiveram sua deformabilidade avaliada conforme as recomendações da NBR 8522(2003). Como esperado, foi constatada uma diminuição do Módulo de Young com o aumento da temperatura de exposição. Após traçar os diagramas, foram calculados os Módulos de Elasticidade Secantes, representados pela inclinação da reta que intercepta os pontos de 0,5MPa e 40% da tensão de carga de ruptura de cada corpo-de-prova, conforme recomendado pela NBR 8522(2003), e já estudado por WENDT(2006). A Figura 9 ilustra graficamente o resultado do Módulo Secante para as séries em estudo em cada temperatura de exposição, e a Figura 10 a redução do mesmo com a temperatura, relativamente aos resultados apresentados pela série de referência. Como observado, a redução do Módulo de Elasticidade é consideravelmente superior à da resistência à compressão, independentemente da série e temperatura de exposição analisadas.

Figura 9 – Variação do módulo de elasticidade secante (40% de f_c) com a temperatura de exposição.

Figura 10 – Redução do módulo de elasticidade secante (40% de f_c) com a temperatura de exposição.

6. Conclusões

Apesar de amplamente empregado como estimativa inicial da confiabilidade estrutural após a ocorrência de sinistros de incêndio, a análise conjunta dos resultados encontrados nos ensaios de resistência à compressão e determinação da dureza superficial do concreto através do esclerômetro de reflexão, desaconselham o emprego do esclerômetro uma vez que, com o aumento da temperatura de exposição, verificou-se uma maior diferença entre o resultado efetivo da resistência à compressão e a dureza superficial, bem como um aumento do coeficiente de variação dos resultados da esclerometria, comportamento tão mais intenso quanto menor a relação a/c . Este fato encontra-se relacionado, em menores temperaturas, à carbonatação superficial do concreto e, em temperaturas mais elevadas, à influência da densidade da rede de poros no efeito spalling, estudado por NINCE (2006). Salienta-se uma vez mais que, na maior temperatura acompanhada (800°C), a extensão da fissuração impediu a determinação da dureza superficial do concreto, pela desagregação do mesmo quando da tentativa de realização do procedimento.

Como já apontado por WENDT(2006), quando da inspeção de estruturas submetidas a sinistros de incêndio, torna-se imperativo a avaliação conjunta da resistência à compressão e do módulo de Young, uma vez que a rigidez do concreto apresenta uma redução consideravelmente superior à da resistência à compressão, para

uma mesma temperatura de exposição, sobretudo em menores relações a/c, mais uma vez relacionado à densidade da rede de poros no efeito spalling. Este diagnóstico conjunto torna-se imprescindível na recuperação da confiabilidade estrutural após sinistros de incêndio.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7584: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.

BATISTA, Doralice Nogueira; PROCÓPIO, Heloísa Moraes; ARAÚJO, Janaína. Concreto autoadensável com fibras submetido à altas temperaturas. In: 56º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2014. Natal, 2014.

BESSEY, G. E. The visible changes in concrete or mortar exposed to high temperatures. In: Investigations on building Fires, Part 2. National Building Studies, Technical Paper No.4, p. 6-18, HMSO, London, 1950.

GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P. E. Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. Cement and Concrete Composites, 2004.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

NEVILLE A.M.; J. J. BROOKS. Concrete Technology. Segunda edição. Inglaterra: Longman Group UK Limited: 987; 2010.

NINCE, Andréia Azeredo, Lascamento do Concreto Exposto a Altas Temperaturas. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PIASTA, J. Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste. Materials and Structures (Matériaux at constructions), v. 17, n. 102, p. 415- 420, nov.-dec. 1984. RILEM – The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. Paris, França, 1984.

ROSSO, T. Incêndios e arquitetura. Apostila. São Paulo: FAUUSP, 1975.

SHORT, N. R.; PURKISS, J. A.; GUISE, S. E. Assessment of fire-damaged concrete using colour image analysis. Construction and Building Materials, v.15, p.9-15, February, 2001.

WENDT, Sheila Cristina. Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica. Dissertação (Mestrado em Engenharia), 2006. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 186 p.