

## DESEMPENHO DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA SOB TENSÃO DE COMPRESSÃO EM CONDIÇÕES DE ALTAS TEMPERATURAS

L. A. A. Souza<sup>1</sup> e F. F. A. Pereira<sup>2</sup>

E-mail: luiz.souza@ifrn.edu.br<sup>1</sup>; Flavinho\_\_andrade@hotmail.com<sup>2</sup>

### RESUMO

Um incêndio pode levar uma estrutura de concreto à ruína parcial ou total, com custos elevados, tanto em relação à perda de vidas humanas, como no consumo de elevados recursos econômicos para a sua recuperação ou demolição. Devido aos altos custos que envolvem a realização de ensaios e testes de incêndio em estruturas de concreto em escala real, as observações sobre a ação do fogo em elementos de concreto são normalmente realizadas utilizando-se corpos-de-prova de dimensões reduzidas. Neste trabalho analisou-se as propriedades mecânicas residuais do concreto após este ser submetido à condição de altas temperaturas. Um programa experimental foi montado para analisar a influência do

tipo de agregado graúdo, do teor de umidade, do nível de tensão compressiva do concreto e da resistência à compressão média do concreto aos 28 dias. A taxa de aquecimento, temperatura máxima e tempo de exposição foram mantidos constantes. Os resultados mostraram que o concreto com 100% de umidade, independente do nível de carga, apresentou resistência residual superior ao concreto com 50% de umidade. Os corpos-de-prova ensaiados com carga apresentaram sempre os maiores valores de redução de resistência. O concreto com baixa resistência não apresentou *spalling*. O *spalling* ocorreu com maior severidade à medida que aumentou a resistência do concreto.

**PALAVRAS-CHAVE:** resistência residual do concreto, spalling explosivo, curvas de incêndio.

## PERFORMANCE OF HIGH STRENGTH CONCRETE UNDER COMPRESSIVE STRESS IN CONDITIONS OF HIGH TEMPERATURES

### ABSTRACT

A fire can undoing a concrete structure to the partial or total, with high costs, both in terms of loss of human life, and consumption of high economic resources for their rehabilitation or demolition. Due to the high costs involved in carrying out tests of fire in concrete structures in full scale, the observations on the action of fire on concrete elements are usually performed using specimens of reduced dimensions. In this work it was analyzed the residual mechanical properties of the concrete after be subjected to high temperature condition. An experimental program was fitted for analyze the influence of the type of coarse aggregate,

moisture content, level of compressive stress of the concrete and the average compressive strength of concrete at 28 days. The heating rate, maximum temperature and exposure time were maintained constant. The results showed that the concrete with 100% humidity, regardless of load level, showed residual strength higher than concrete with 50% humidity. The specimens of the load tested showed always the greatest reduction in resistance. The concrete with low resistance showed no *spalling*. The *spalling* occurred with greater severity increased as the strength of concrete.

**KEYWORDS:** residual strength of concrete, explosive spalling, fire curves.

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é atualmente o material de construção mais utilizado nas obras de estruturas. Um dos fatores que justificam esta ampla utilização é a sua durabilidade quando submetido a variadas condições de agressividade ambiental, incluindo-se nesta categoria as situações de incêndio. Em geral, as estruturas de concreto quando submetidas a elevadas temperaturas apresentam bom comportamento devido apresentarem baixa condutividade térmica e isolarem termicamente as barras de aço da armadura. Nesse sentido, segundo Rodrigues et al. (2010), o revestimento adotado para a armadura nas estruturas de concreto é o principal responsável pela manutenção da estrutura nos casos de incêndio, pois protege a armadura do contato direto com o fogo e da exposição às altas temperaturas presentes na superfície do elemento estrutural.

No entanto, um incêndio pode levar uma estrutura de concreto à ruína parcial ou total, com custos elevados, tanto em relação à perda de vidas humanas, como no consumo de elevados recursos econômicos para a sua recuperação ou demolição. Os elementos estruturais deverão, assim, resistir em situação de incêndio, durante pelo menos, o tempo necessário à evacuação das pessoas e para as operações de combate ao incêndio. Os elementos estruturais deverão, também, apresentar uma resistência mecânica residual que permita a sua recuperação (LOURENÇO et al., 2006).

De acordo com Boström et al. (2007), o desenvolvimento de novos tipos de concreto, como os concretos de alta resistência e os concretos auto-adensáveis, alterou o comportamento do concreto das obras estruturais quando em situação de incêndio, tornando-os mais vulneráveis. Diversos aditivos passaram a ser incorporados ao concreto convencional para a produção de concretos de alta resistência, como, por exemplo, sílica ativa, cinzas volantes, escória de alto forno, redutores da quantidade de água na mistura, tais como os incorporadores de ar. Contudo, um grande número de projetos de investigação e alguns incêndios em estruturas reais evidenciaram que a exposição à temperaturas elevadas origina uma degradação das propriedades mecânicas e químicas do concreto, bem como níveis significativos de destacamento explosivo da sua superfície, processo denominado de *spalling*. Em todo o mundo, diversos casos de incêndio em obras de engenharia apresentaram a ocorrência deste fenômeno.

Devido aos altos custos que envolvem a realização de ensaios e testes de incêndio em estruturas de concreto em escala real, as observações sobre a ação do fogo em elementos de concreto são normalmente realizadas utilizando-se corpos-de-prova de dimensões reduzidas. Dessa forma, neste trabalho os ensaios de verificação das propriedades do concreto sob altas temperaturas foram feitos usando corpos-de-prova cilíndricos de concreto, nos quais foi aplicada uma parcela da sua carga de ruptura.

Este trabalho teve como objetivo geral a verificação de propriedades mecânicas residuais do concreto após este ser submetido à condição de altas temperaturas. Os objetivos específicos do trabalho foram: i) caracterizar os materiais necessários à produção do concreto; ii) desenvolver as composições dos traços de concreto de forma a obter resistências nas faixas de concreto normal e concreto de alta resistência; iii) Verificar as cargas de ruptura do concreto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Spalling

O *spalling* é um fenômeno natural nas estruturas de concreto, quando elas são expostas a altas temperaturas. Dentro da matriz de concreto, desenvolvem-se tensões de origem térmica, que influem na desintegração das regiões superficiais dos elementos estruturais (PURKISS, 2007).

Por ser um material heterogêneo, o concreto possui em seu interior uma porcentagem de água. Quando submetido a altas temperaturas, como no caso de incêndio, a água passa para o estado gasoso dentro da estrutura de concreto, resultando em acréscimo de pressão no concreto, provocado pela tentativa de fuga dos gases aquecidos. Se o concreto oferece resistência para o escape do vapor de água, são desenvolvidas altas pressões na estrutura interna do concreto, que pode levá-lo facilmente à ruptura. Geralmente, esta ruptura é explosiva e provoca a exposição da armadura de aço do concreto. De acordo com Rodrigues et al. (2010), tal exposição, compromete a capacidade de carga do elemento estrutural, podendo conduzi-lo à ruína.

A desintegração de partes do concreto devido ao *spalling* pode causar uma séria redução da seção transversal do elemento estrutural e pode levá-lo facilmente a uma falha catastrófica. O *spalling* explosivo é o tipo mais perigoso de *spalling* do concreto já que ele pode ocorrer com alta energia explosiva, causando estilhaços de concreto que voam com alta velocidade, resultando em mais acidentes e danos para o ambiente vizinho, incluindo a quebra de janelas vizinhas, permitindo que mais oxigênio chegue à área do fogo, o que poderia aumentar a gravidade do incêndio.

Com o destacamento da espessura de recobrimento do concreto, as armaduras de reforço ficam diretamente expostas à ação direta das chamas, desde os primeiros momentos do incêndio, reduzindo de forma significativa a capacidade resistente da estrutura (ocorre, por vezes, a desintegração do próprio concreto). Este fenômeno é particularmente comum nos concretos de elevada resistência, pois estes apresentam uma matriz bastante compacta e de porosidade reduzida, o que conduz ao desenvolvimento de pressões elevadas no interior da microestrutura do concreto quando este é submetido a temperaturas elevadas (BOSTRÖM et al., 2007).

Além de *spalling* explosivo, os danos do incêndio para o concretos de alta resistência envolvem redução de resistência e desenvolvimento de fissuras. Em um incêndio grave, o elemento de concreto é submetido de um gradiente térmico transiente para a condição de temperaturas elevadas variáveis. Dessa forma, perda de resistência em diferentes pontos no interior do elemento, variam devido ao gradiente de temperatura. De acordo com Chan et al. (1999), testes com esclerômetro em lajes submetidas a condição de incêndio em laboratório, revelaram que as propriedades mecânicas residuais possuem uma distribuição espacial que correlacionam com a distribuição de temperatura destas. As técnicas com microscópio eletrônico de varredura (MEV), difração de raios X (DRX) e avaliação não destrutiva (AND) podem ser úteis para avaliar os danos do incêndio no elemento estrutural.

## 2.2 Mecanismos do spalling

Para Mindeguia et al. (2010), o *spalling* do concreto é normalmente explicado por dois diferentes mecanismos:

- a) Processo termo-mecânico: o aquecimento do elemento estrutural de concreto acarreta gradientes de temperatura elevados, principalmente nos primeiros centímetros da superfície aquecida. Estes gradientes podem ser muito importantes no caso de um aquecimento rápido e induz a tensões compressivas elevadas próximo à superfície aquecida. Estas tensões podem superar localmente a resistência do concreto e causar a expulsão de pedaços do mesmo;
- b) Processo termo-hídrico: o aquecimento do elemento estrutural de concreto envolve transporte de massa no meio poroso. Os fluidos presentes no concreto, como água livre, vapor d'água e ar seco, movimentam-se devido à pressão e ao gradiente de concentração molar (lei de Darcy e Fick). Particularmente, os fluidos movem-se através de regiões internas do concreto. Como estas regiões estão resfriadas, o vapor de água começa a condensar e uma barreira úmida é gradualmente criada próximo a superfície aquecida. Assume-se que este obstáculo é uma região de concreto com elevado teor de umidade. Como este obstáculo atua como uma barreira real para o fluxo de fluidos, as pressões de vapor são incrementadas. Estas pressões podem superar localmente a resistência elástica do concreto e iniciar o *spalling*.

## 2.3 Curvas de incêndio

Para a análise das estruturas, o incêndio é caracterizado pela relação entre a temperatura dos gases quentes e o tempo. A severidade do incêndio depende da geometria e do uso do edifício, por conseguinte, varia para cada edificação. Existem modelos matemáticos para representar o incêndio real, chamados de curvas naturais de incêndio. No entanto, por simplicidade, a curva natural é normalmente substituída por curvas padronizadas para ensaios. As mais difundidas internacionalmente são a ASTM E-119 e a ISO 834, sendo esta última, a recomendada pelas normas NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento (ABNT, 2001) e NBR 5628: Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo (ABNT, 2001) para descrever a elevação padronizada de temperatura em função do tempo no projeto de elementos construtivos.

Na fase inicial, com baixas temperaturas, o incêndio é considerado de pequenas proporções, sem riscos à vida humana e à estrutura. Após essa fase, tem-se o aumento brusco da temperatura por meio do incêndio generalizado (flashover), entrando em ignição a superfície de toda a carga combustível presente no ambiente. O incêndio assume grandes proporções, tomando todo o compartimento, e a temperatura dos gases eleva-se rapidamente até todo o material combustível extinguir-se, e então há a redução gradativa da temperatura dos gases. A Figura 1 representa a curva padrão ISO 834, descrita a partir do flashover de uma curva temperatura dos gases versus tempo, definida para uma carga de incêndio composta por materiais celulósicos.

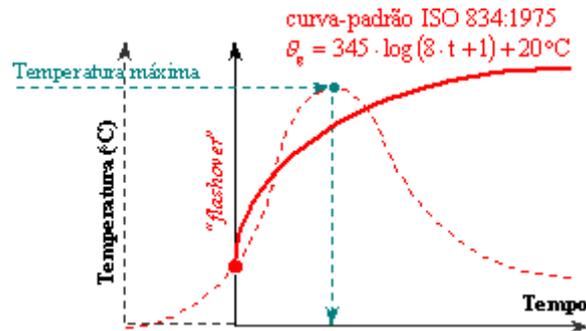


Figura 1: Curva de incêndio padrão ISO 834 iniciada a partir do flashover

### 3 METODOLOGIA

O estudo experimental foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Campus Mossoró, utilizando corpos-de-prova cilíndricos de concreto, com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. As características dos materiais e delineamento da pesquisa são apresentadas a seguir.

A parte experimental deste trabalho procurou enfatizar o comportamento mecânico do concreto em relação à resistência à compressão, após este ser submetido à ação de altas temperaturas. Procurou-se, portanto, observar a resistência residual dos corpos-de-prova de concreto, bem como verificar a ocorrência de *spalling* após o processo de aquecimento. Dessa forma, foi analisada a influência do tipo de agregado graúdo, do teor de umidade, do nível de tensão compressiva do concreto e da resistência à compressão média do concreto aos 28 dias. Alguns parâmetros experimentais como tipo de cimento, taxa de aquecimento, temperatura máxima e tempo de exposição foram mantidos constantes. A Figura 2 apresenta o delineamento do programa experimental.

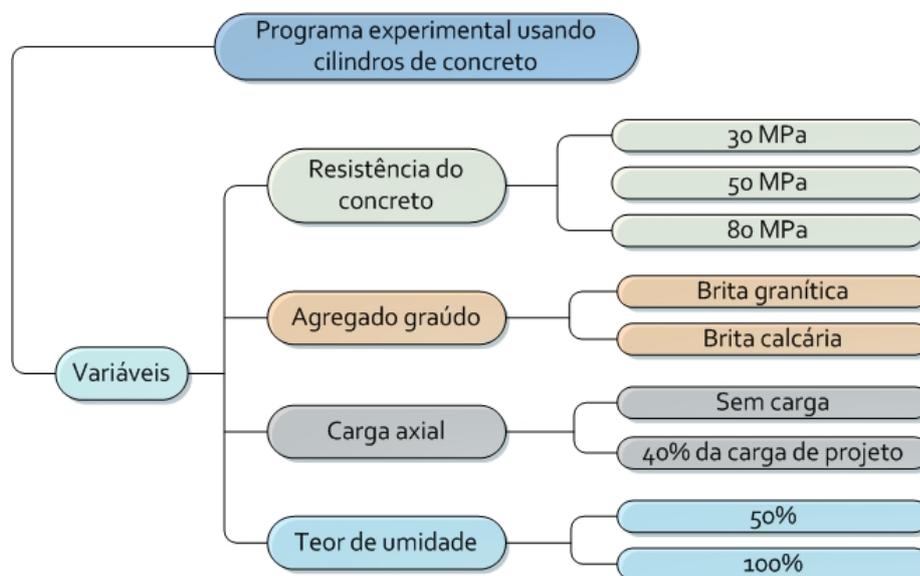


Figura 2: Fluxograma do programa experimental

### 3.1 Caracterização dos materiais

#### 3.1.1 Agregado graúdo

Foram utilizados dois tipos de agregado graúdo: brita granítica e brita calcária. A caracterização dos materiais foi realizada de acordo com as normas NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003) e NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2009).

#### 3.1.2 Agregado miúdo

Foi utilizada areia natural quartzosa oriunda do município de Mossoró, RN. A areia natural foi caracterizada, em conformidade com o prescrito pela NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003), NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2009), NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água (ABNT, 2001) e NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação (ABNT, 2009).

#### 3.1.3 Cimento

O cimento utilizado na moldagem dos corpos-de-prova de concreto foi o CP V – ARI (cimento Portland de alta resistência inicial). Este tipo de cimento tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquire elevadas resistências com maior velocidade.

#### 3.1.4 Metacaulim

O Metacaulim, obtido através do processo de queima controlada de argila caulínica, de alta pureza, composto de sílica e alumina no estado amorfo, possui alta reatividade quando em contato com o hidróxido de cálcio (CH) presente na pasta de cimento Portland, formando um hidrosilicato de cálcio (C-S-H) e um hidroaluminosilicato de cálcio. Devido a este efeito pozolânico, acaba por reduzir a porosidade e o teor de hidróxido de cálcio na matriz do cimento, contribuindo para o aumento da resistência à compressão e durabilidade do concreto influenciando na qualidade da zona de transição agregado-matriz. O produto utilizado neste trabalho tem o nome comercial de Metafort®.

#### 3.1.5 Aditivo superplastificante

Os plastificantes e superplastificantes são altamente recomendados para uso em todos os tipos de concreto onde se deseja alta redução da água de amassamento sem alteração no tempo de pega. No estado fresco apresenta as seguintes propriedades e benefícios: aumenta a coesão e redução da segregação; aumenta a trabalhabilidade do concreto; não altera o tempo de pega do cimento Portland; facilita o adensamento, o lançamento e o bombeamento. No concreto em estado endurecido, aumenta a resistência à compressão, à flexão e o módulo de elasticidade, aumenta a durabilidade, reduz a permeabilidade e as fissuras, entre outros. O produto utilizado neste trabalho foi o superplastificante GLENIUM® 51.

### 3.2 Dosagem e produção dos corpos-de-prova

Para a aplicação dos materiais acima apresentados, foram desenvolvidos diferentes traços de concreto, como forma de obter várias classes de resistência. Para isso, um estudo teórico e experimental foi realizado para obter as composições adequadas para cada caso. Os corpos-de-prova foram moldados em forma metálicas cilíndricas de 100 mm x 200 mm.

### 3.3 Curvas de aquecimento

A taxa de aquecimento do forno foi medida por dois termopares tipo K colocados em seu interior. Os corpos-de-prova foram colocados no forno na temperatura ambiente e aquecidos até a temperatura de 600°C, permanecendo nessa temperatura pelo intervalo de 60 minutos, com o objetivo de equilibrar as temperaturas do interior e da superfície do corpo-de-prova. Após isso, o forno foi desligado e os corpos-de-prova permaneceram em seu interior até atingirem temperatura próxima a ambiente. Foi utilizada a curva de aquecimento padrão ISO 834.

### 3.4 Forno de aquecimento dos corpos-de-prova

O Equipamento utilizado para a aplicação de altas temperaturas nos corpos-de-prova foi um forno elétrico da marca Jung, com dimensões úteis de 300 mm x 350 mm x 400 mm, com estrutura metálica construída em chapas e perfis de aço. Possui programador de tempo e temperatura microprocessado, que permite programar a temperatura que o forno deve atingir (set point), em quanto tempo ele deve chegar nesta temperatura (rampa) e o tempo que ele deve permanecer na mesma (patamar). A temperatura máxima de operação é de 1000°C.

### 3.5 Dispositivo de aplicação de carga

Um dispositivo de aplicação de carga, desenvolvido pelo autor, foi utilizado com o objetivo de submeter os corpos-de-prova a um carregamento de compressão axial. Dessa forma, o corpo-de-prova ao ser levado para o interior do forno permaneceu submetido a uma parcela de carga correspondente a 40% da resistência média aos 28 dias. O dispositivo foi construído em aço inoxidável e os seus componentes foram dimensionados de forma a não sofrerem deformações significativas em função das cargas aplicadas.

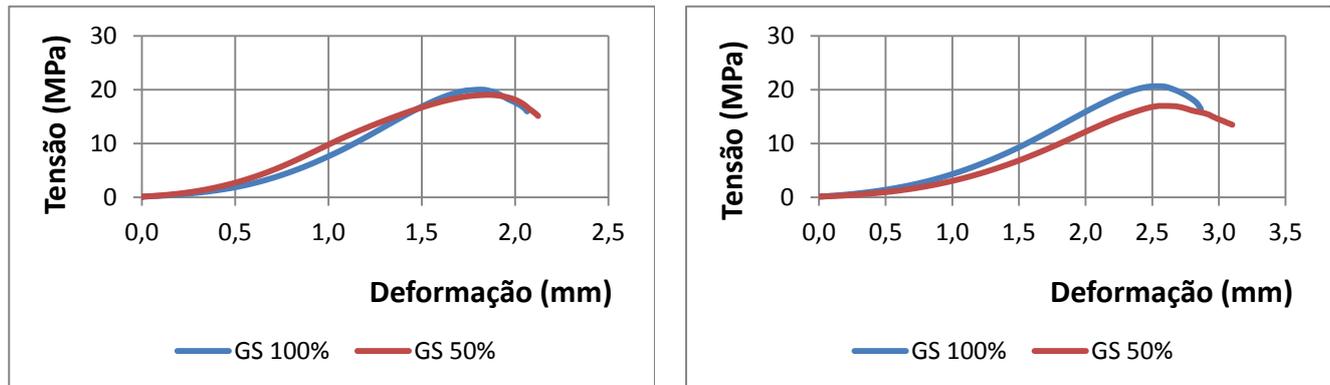
### 3.6 Teor de umidade dos corpos-de-prova

Para avaliar a influência da umidade no comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas, a preparação dos corpos-de-prova envolveu a retirada de água do interior do concreto por evaporação. Este processo teve o objetivo de ajustar o corpo-de-prova ao grau de saturação desejado, de acordo com o programa experimental montado.

Inicialmente, os corpos-de-prova permaneceram imersos em água no tanque de cura por 28 dias e então sua massa saturada ( $m_{sat}$ ) foi determinada. Os corpos-de-prova foram colocados em estufa com temperatura de aproximadamente 105°C. Nesta, permaneceram até que se verificasse constância de massa entre duas leituras consecutivas no intervalo de 24 horas, determinando-se assim a massa seca ( $m_s$ ). Conhecidos a massa saturada e a massa seca dos corpos-de-prova, foi determinada a massa que os mesmos deveriam apresentar no momento do ensaio, de acordo com o teor de umidade pretendido.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3a apresenta a resistência residual do concreto com resistência média aos 28 dias de 33 MPa, brita granítica, ensaiado com 40% da resistência média. Observa-se que, neste caso, os corpos-de-prova com teor de umidade de 100% apresentaram resistência residual 26,9% maior que os com 50% de umidade. A Figura 3b apresenta a resistência residual do concreto com  $f_{c28}$  de 50 MPa, brita granítica, ensaiado sem carregamento. A resistência residual do concreto com umidade de 100% foi 21,5% maior que o concreto com 50% de umidade.



a) Ensaiado com 40% da carga de ruptura

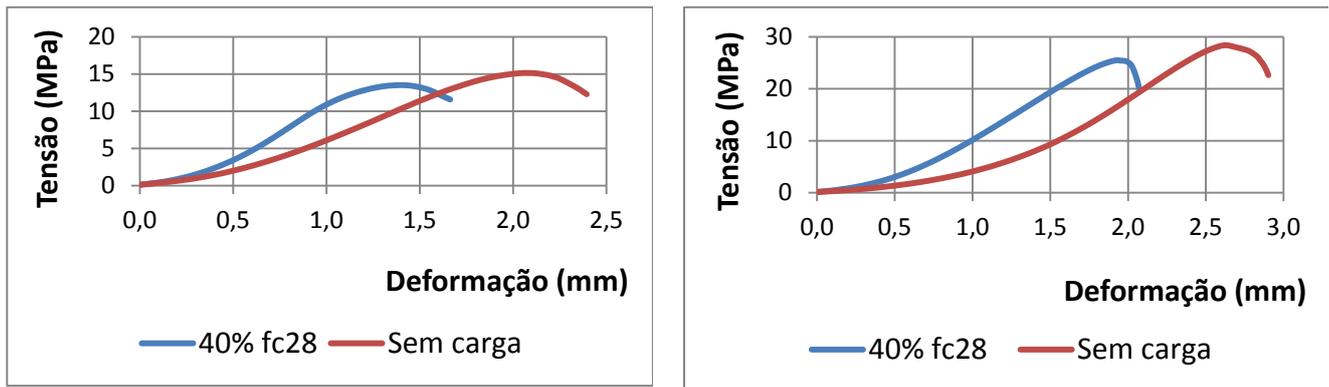
b) Ensaiado sem carga

**Figura 3: Resistência residual do concreto com  $f_{c28}$  de 50 Mpa com brita granítica**

A Figura 4a apresenta a resistência residual de corpos-de-prova de concreto com  $f_{c28}$  de 50 MPa, brita calcária, ensaiados com 40% da resistência média e sem carregamento. Neste caso, os corpos-de-prova de concreto ensaiados sem carregamento apresentaram resistência residual 12,0% maior que os corpos-de-prova com carga. As deformações, no entanto, foram mais pronunciadas no concreto ensaiado sem carregamento.

A Figura 4b apresenta a resistência residual de corpos-de-prova de concreto com  $f_{c28}$  de 80 MPa, brita granítica, ensaiados com 40% da resistência média e sem carregamento. Os corpos-de-prova de concreto ensaiados sem carregamento apresentaram resistência residual 11,3% maior que os corpos-de-prova com carga, sendo que as deformações foram mais pronunciadas no concreto ensaiado sem carregamento.

Pode-se perceber que a redução de resistência foi mais acentuada nos corpos-de-prova com  $f_{c28}$  de 50 MPa, com queda de 69,7% e 73,0%, no caso do concreto ensaiado sem carga e com carga, respectivamente. Já no concreto com  $f_{c28}$  de 80 MPa, a redução de resistência foi de 64,5% e 68,1%, no caso do concreto ensaiado sem carga e com carga, respectivamente. No entanto, deve-se ressaltar que no primeiro caso utilizou-se brita calcária, enquanto no segundo caso, brita granítica. Portanto, mais ensaios deverão ser realizados para se obter conclusões mais confiáveis.



a)  $f_{c28}$  de 50 Mpa com brita calcária

b)  $f_{c28}$  de 80 Mpa com brita granítica

**Figura 4: Resistência residual do concreto**

Em relação à ocorrência de *spalling*, observou-se que os corpos-de-prova com  $f_{c28}$  de 30 MPa não apresentaram *spalling*. Entre os corpos-de-prova com  $f_{c28}$  de 50 MPa, somente os que continham brita calcária e que foram ensaiados com carregamento sofreram algum tipo de *spalling*, apresentando moderada perda de massa. No caso dos corpos-de-prova com  $f_{c28}$  de 80 MPa, foi observada a ocorrência de *spalling* nos ensaios realizados com carga e sem carga, entretanto, no primeiro caso a perda de massa foi bastante significativa. A Figura 5 mostra a aparência de alguns corpos-de-prova após a conclusão dos ensaios em altas temperaturas.



**Figura 5: Corpos-de-prova após ensaio de altas temperaturas**

## 5 CONCLUSÃO

O concreto com 100% de umidade, com resistência de 30 e 50 MPa, independente do nível de carga, apresentou resistência residual superior quando comparado ao concreto com 50% de umidade. Em todos os casos analisados, os corpos-de-prova ensaiados com carga apresentaram sempre os maiores valores de redução de resistência, alcançando valores da ordem de 70%, em média. Em concordância com resultados da literatura, o concreto com baixa resistência não apresentou *spalling*. No entanto, este fenômeno ocorreu com maior severidade à medida que aumentou a resistência do concreto. A perda de massa também foi mais significativa nos corpos-de-prova ensaiados sob tensão compressiva.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5628: Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- BOSTRÖM, L.; WICKSTRÖM, U.; ADL-ZARRABI, B. Effect of specimen size and loading conditions on spalling of concrete. *Fire and Materials*, v. 31, n.3, p. 173-186, 2007.
- CHAN, S.Y.N.; PENG, G.F.; ANSON, M. Fire behavior of high-performance concrete made with silica fume at various moisture contents. *ACI Materials Journal*, v. 96, n. 3, p. 405-411, 1999.
- LOURENÇO, L.A.P.; BARROS, J.A.O.; RODRIGUES, J.; SANTOS, S.P.F.; ALVES, A. Betão fibroso de comportamento melhorado ao fogo. In: *IV Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, Lisboa, 2006. Anais... Lisboa, Portugal, 2006.
- MINDEGUIA, J.C.; PIMIENTA, P.; NOUMOWÉ, A.; KANEMA, M. Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature - experimental and numerical discussion on spalling risk. *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 3, p. 477-487, 2010.
- PURKISS, J. A. *Fire safety engineering design of structures*. 2. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2007. 389 p.
- RODRIGUES, J.P.C.; LAÍM, L.; CORREIA, A.M. Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire. *Composite Structures*, v. 92, n. 5, p. 1263-1268, 2010.