

## CONCRETOS NORMAIS APÓS INCÊNDIO



Daiane dos Santos  
da Silva

Mestre em Engenharia  
Civil pela UFSC  
Florianópolis, SC, Brasil.  
dss.engcivil@gmail.com



Poliana Dias de  
Moraes

Professora  
Universidade Federal de  
Santa Catarina  
Florianópolis, SC, Brasil.  
ecv1pdm@ecv.ufsc.br



João Paulo C.  
Rodrigues

Professor  
Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da  
Universidade de Coimbra,  
Portugal.  
jpaulocr@dec.uc.pt



Cristina Calmeiro dos  
Santos

Equip. a Profa. adjunto  
Instituto Politécnico de  
Castelo Branco, Portugal.  
ccalmeiro@ipcb.pt

### SUMÁRIO

Este artigo resume trabalhos de investigação sobre a resistência mecânica à compressão e o módulo de elasticidade residuais dos concretos normais usados na construção civil com e sem carregamento durante o processo de aquecimento e arrefecimento. De acordo com os resultados, observa-se que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto diminuem com o incremento da temperatura a que estiveram sujeitos e que o carregamento desde que não excessivo limita essa diminuição.

**Palavras-chave:** Concreto, incêndio, resistência, mecânica, residual.

### 1. INTRODUÇÃO

A acção dos incêndios sobre as estruturas de concreto traduz-se, para além de outros fenómenos, numa degradação das propriedades mecânicas do concreto e resistentes dos elementos. A avaliação das propriedades mecânicas residuais do concreto é da maior importância para a tomada de decisão sobre a reparação das estruturas de concreto após incêndio.

A ação de altas temperaturas em estruturas de concreto armado pode afetar suas propriedades macro e micro estruturais. Nas propriedades macro-estruturais destacam-se deformações excessivas, lascamentos explosivos que, por sua vez, ocasionam a perda de secção resistente, fissuras, redução da resistência à tração e à compressão, e também a redução do módulo de elasticidade do concreto [1-10].

Nas propriedades micro-estruturais, a exposição ao calor elevado conduz a uma série de reações químico-físicas nos materiais que acabam modificando suas propriedades físico-mecânicas. Ao ser aquecido, o concreto pode sofrer alteração em sua coloração e, por ser confeccionado por diferentes materiais, ocorrem comportamentos diferenciados entre seus constituintes. Isto pode provocar o surgimento de tensões internas, macro ou micro fissuras e deslocamentos ou lascamentos em grandes e pequenas proporções, que por sua vez, podem comprometer a estabilidade estrutural da edificação [7].

Este artigo tem por objetivo avaliar a influência da temperatura de aquecimento e do nível de carregamento nas propriedades mecânicas residuais, principalmente a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade, de concretos graníticos de resistências normais usados na construção civil em Portugal e no sul do Brasil.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Materiais**

Os materiais usados para a produção dos concretos, objeto desta pesquisa, consistem em agregados graúdos de origem granítica, agregados miúdos, cimento Portland, água e superplastificante. O concreto produzido em Portugal empregou agregado graúdo com duas composições granulométricas: uma com dimensão máxima de 12,5 mm e outra de 19,1 mm. O agregado miúdo era composto por areia fina e areia grossa. O cimento Portland do tipo II/A-L 42,5R, com teores de  $SO_3$  e de Cl inferiores a 4% e 0,10%, respectivamente, e resistência à compressão de 20 MPa aos 2 dias e de 42,5 aos 28 dias, com a adição do superplastificante (SP) da SIKA (Sikament® 195R), nas proporções especificadas no Quadro 1 [10], referida a 1 m<sup>3</sup> de concreto.

Os concretos produzidos no sul do Brasil empregaram duas composições granulométricas: uma com dimensão máxima de 9,5 mm e outra com dimensão de 19,1 mm. Agregado miúdo composto por areia fina e areia industrial oriunda de britagem de rocha. O cimento era Portland do tipo CPIV e a água fornecida pela rede de abastecimento com as composições especificadas por traço, segundo o Quadro 1 [9].

### **2.2 Amostras**

Foram estudadas três amostras de concreto com resistências características à compressão de 35, 45 MPa e 33 MPa, denominadas neste trabalho de A35, A45 e A33 cujas composições encontram-se registradas no Quadro 1

As amostras A35 e A45 eram compostas, cada uma, por 40 corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento (Fig. 1). Cada amostra foi dividida em 5 grupos de 8 corpos-de-prova, sendo que um grupo foi ensaiado à temperatura ambiente

(grupo de controle) e os outros 4 foram aquecidos a temperaturas de 300, 500, 700 e 900 °C durante 2h e 30 min, e resfriados por 24 horas ao ar, sendo depois ensaiados (Quadro 2).

Quadro 1. Composição das amostras

Amostra	Cimento (kg)	Areia fina (kg)	Areia industrial (kg)	Areia grossa (kg)	Brita 0* (kg)	Brita 1* (kg)	Brita 2* (kg)	SP (dm <sup>3</sup> )	a/c
A35	300	278	516		302		706		0,59
A45	300	223	413		259		605		0,51
A33	320	310		511		617	459	2,60	0,52

A amostra A33 era composta por 27 corpos-de-prova cilíndricos de 75 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento (Fig. 2), dividida em 5 grupos: um grupo de controle de 3 corpos-de-prova ensaiado à temperatura ambiente e os 4 grupos de 6 corpos-de-prova submetidos a 0,7 fcd ou a 0,3 fcd (3 corpos-de-prova para cada nível de carregamento) e após aquecidos a temperaturas de 300, 500, 600, 700 °C (Quadro 2).

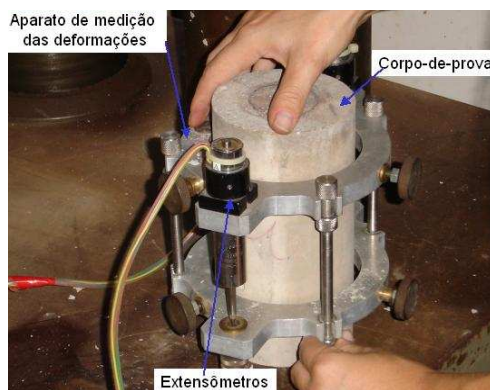


Figura 1. Corpos-de-prova de 100 mm × 200 mm

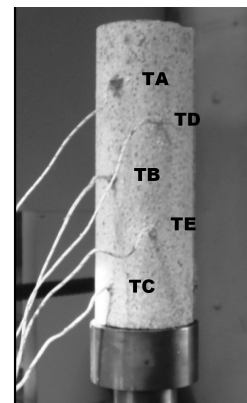


Figura 2. Corpos-de-prova de 75 × 200 mm

Quadro 2. Amostras ensaiadas

Amostras	Número de corpos-de-prova						Total
	20 °C	300 °C	500 °C	600 °C	700 °C	900 °C	
A35	8	8	8		8	8	40
A45	8	8	8		8	8	40
A33	3	6	6	6	6		27

Após serem desformados, todos os corpos-de-prova das amostras A35 e A45 foram armazenados em um tanque com água à temperatura ambiente, durante 28 dias. Após este período, os corpos-de-prova foram retirados da água e armazenados em ambiente de laboratório até completarem idades acima dos 160 dias, sendo ensaiados após esta idade.

Os corpos de prova da amostra foram A33 colocados em câmara de cura à temperatura ambiente e humidade relativa de 98% durante 6 dias e os restantes dias até ao ensaio em

câmara à temperatura ambiente e humidade relativa de 50%. Os ensaios foram realizados a uma idade superior a 90 dias [10].

### 2.3 Procedimento de ensaio

Os corpos-de-prova das amostras A35 e A45 foram aquecidos a 4 níveis de temperatura: 300, 500, 700 e 900 °C durante um período de 2h e 30 min a uma taxa de aquecimento de 7,4 °C/min em uma mufla elétrica sem aplicação de carregamento. O tempo de aquecimento de 2h e 30 min foi fixado para garantir que todos os corpos-de-prova ficassem expostos por um período mínimo de 30 minutos na temperatura a qual se estava ensaiando. Após os corpos-de-prova permanecerem em aquecimento durante o tempo determinado, a mufla foi desligada e permaneceu fechada durante 24 horas para que ocorresse o resfriamento natural dos concretos [9].

Os ensaios mecânicos para a determinação do módulo de elasticidade e da resistência à compressão axial foram realizados após o resfriamento de 24 horas dos corpos-de-prova. O aparato medidor de deformações era composto de dois extensômetros. As informações de deformação medidas nos corpos-de-prova no instante do ensaio eram armazenadas no computador juntamente com as de cargas aplicadas. Após o rompimento dos corpos-de-prova, foi possível obter todas as informações de tensão e deformação aplicadas nos mesmos, possibilitando dessa forma o cálculo do módulo de elasticidade e resistência à compressão axial. A máquina de ensaio possui sistema de aquisição de dados onde são registrados o deslocamento da travessa de aplicação de carga e a força aplicada (Fig. 3).

Porém os corpos-de-prova da amostra A33 foram aquecidos em 4 níveis de temperatura: 300, 500, 600 e 700 °C sob a ação de dois níveis de carregamento correspondentes a 0,3fcd ou 0,7fcd. O aparato de teste era composto por uma máquina universal de ensaio com capacidade máxima de carga de 600 kN, um forno cilíndrico de duas zonas com câmara de aquecimento de 90 mm de diâmetro 300 de altura, capaz de atingir temperaturas até 1200°C (Fig. 4). Os registros de forças, deslocamentos e temperaturas dos corpos-de-prova e do forno eram feitos num sistema de aquisição de dados [10].



Figura 3. Aparato de ensaio dos corpos-de-prova de 100 mm × 200 mm

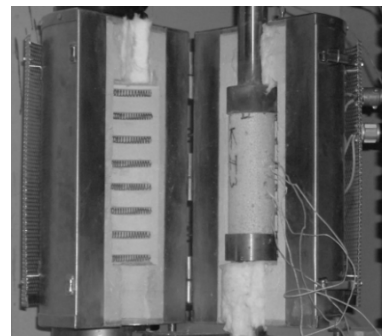


Figura 4. Aparato de ensaio dos corpos-de-prova de 75 mm × 200 mm

O procedimento de ensaio neste caso foi efetuado de acordo com as recomendações do TC-200 HTC do RILEM [11]. Inicialmente, o corpo-de-prova era carregado ao nível de carregamento de 0,3fcd ou 0,7fcd, o qual era mantido constante durante o processo de

aquecimento/resfriamento. Quando o nível de carregamento era atingido, o corpo-de-prova era aquecido a uma taxa de 3 °C/min, até o nível de temperatura desejado. O nível de temperatura era atingido quando a temperatura média dos 3 termopares da superfície do corpo-de-prova (Fig. 2) atingiam a temperatura do forno. A diferença axial máxima de temperatura entre qualquer das 3 leituras da superfície não podia exceder 1 °C a 20 °C, 5 °C a 100 °C e 20 °C a 700 °C. O corpo-de-prova era então mantido aquela temperatura por uma hora para estabilizar. Após, o forno era aberto e o corpo-de-prova era resfriado ao ar. Quanto a temperatura do corpo-de-prova novamente atingia a temperatura ambiente (aproximadamente 20 °C), o teste de compressão era realizado. A taxa de aplicação de carga era de 0,25 kN/s até a ruptura do corpo-de-prova [10].

No caso das amostras A35 e A45, a determinação do módulo de elasticidade e da resistência à compressão axial foi feita no mesmo ensaio, sendo o módulo obtido a partir das deformações a 30% do valor da resistência. Deste ensaio foi obtido o valor da carga de ruptura, deformação a 30% da carga de ruptura e a deformação a 0,5 MPa conforme ilustrado na Fig. 5 [12].

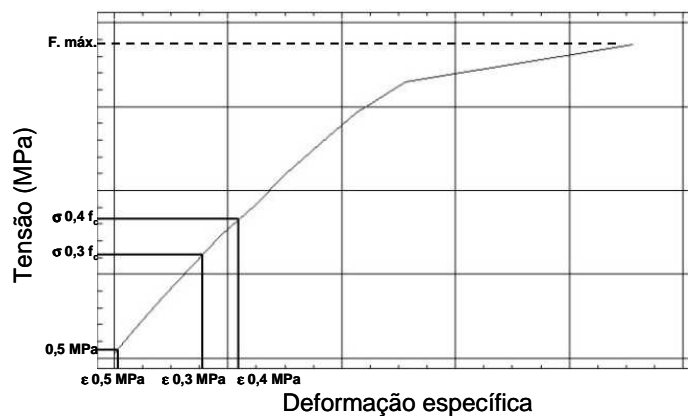


Figura 5. Curva tensão-deformação do ensaio de compressão

O módulo de elasticidade foi determinado a partir das tensões e deformações a 30% da carga de ruptura (Eq. 1), pois neste estágio, o concreto apresenta um comportamento linear.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_{0,3fc} - \sigma_{0,5}}{\varepsilon_{0,3fc} - \varepsilon_{0,5}}, \quad (1)$$

onde:  $\sigma_{0,3fc}$  é a tensão correspondente a 30% da carga de ruptura à compressão, em MPa;  $\sigma_{0,5}$  é a tensão básica, considerada para absorver as pequenas deformações iniciais decorrentes da acomodação do equipamento (0,5 MPa);  $\varepsilon_{0,3fc}$  é a deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão a 30% da carga de ruptura;  $\varepsilon_{0,5}$  é a deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão básica [12].

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa secção são apresentados os resultados referentes à resistência à compressão axial de 3 amostras de concreto aquecidas sem e com ação de carregamento. As amostras A35 e A45 foram aquecidas sem carregamento, enquanto a amostra A33 foi aquecida sob dois

níveis diferentes de carregamento: 0,3fcd e 0,7fcd. O módulo de elasticidade é apresentado somente para as amostras A35 e A45.

### 3.1 Resistência à compressão axial

As resistências médias à compressão axial normalizadas em relação às suas médias à temperatura ambiente para as 3 amostras são apresentadas na Fig. 6. Observa-se que a resistência à compressão reduz à medida que a temperatura aumenta. Até 300 °C, pode-se perceber o efeito benéfico do carregamento durante o aquecimento dos corpos-de-prova devido ao aumento de até 9 % na resistência residual dos concretos. A 500 °C, a redução é de aproximadamente 15% para os corpos-de-prova com carregamento de 0,3fcd e 100% para os corpos-de-prova com carregamento de 0,7fcd. A 600 °C, os corpos-de-prova com carregamento de 0,3fcd apresentavam redução de resistência de 60 %, sendo esta menor que aquelas apresentadas pelos corpos-de-prova não carregados. Os resultados mostram que o nível de carregamento, desde que não excessivo, apresenta um efeito benéfico na resistência residual dos concretos em função da temperatura.

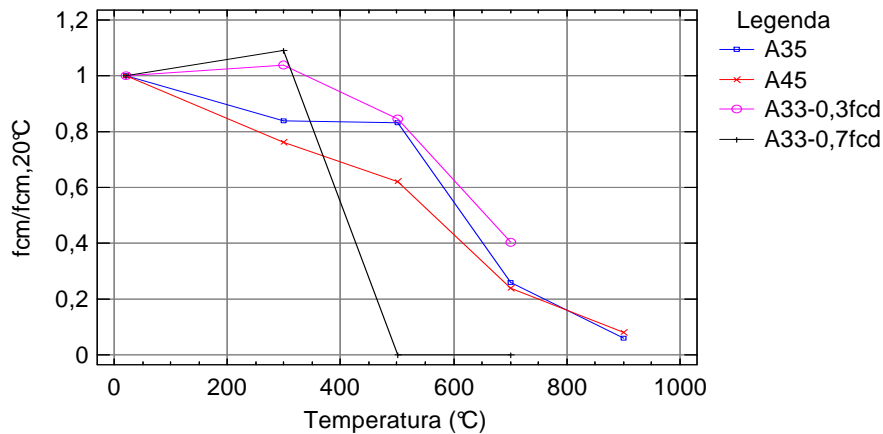


Figura 6. Resistência residual à compressão do concreto referida a seu valor a 20 °C

Entre as amostras não carregadas durante o aquecimento, a maior redução de resistência ocorreu para amostra A45, sendo mais acentuada a 500 °C em comparação com a amostra A35. A 900 °C, as amostras apresentam resistência residual quase nula.

A partir dos dados experimentais, foram obtidas as Eqs. (2) e (3) para a resistência relativa à compressão das amostras A35 e A45, respectivamente, em relação aos valores a 20 °C. Estas correlações apresentam  $r^2$  de 88,2 e 92,6 %, respectivamente.

$$\frac{f_{cm}}{f_{cm,20^{\circ}C}} = 0,9953 - 3,4296 \cdot 10^{-5} T - 1,2604 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (2)$$

$$\frac{f_{cm}}{f_{cm,20^{\circ}C}} = 1,0114 - 6,3887 \cdot 10^{-4} T - 4,56 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (3)$$

onde:  $f_{cm}$  é a resistência média à compressão,  $f_{cm,20^{\circ}C}$  é a resistência média à compressão à 20 °C, T é a temperatura, em °C.

A 500 °C, ocorre a dissociação do C-S-H em CaO e água, visto que a principal função do C-S-H é manter a pasta de cimento unida por meio de ligações químicas e das forças coesivas de Van der Waals, contribuindo satisfatoriamente para a resistência do concreto [13]. A partir dos 900 °C, os concretos ensaiados apresentam valores de resistência à compressão axial praticamente nulos. A 900 °C atinge-se a completa destruição do gel hidratado de silicato de cálcio, o qual compõe cerca de 50 a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento completamente hidratada e é, portanto, a fase mais importante, determinando as propriedades da pasta [2].

### 3.2 Módulo de elasticidade

A redução do módulo de elasticidade das amostras A35 e A45 é apresentado na Fig. 7. Percebe-se que à medida que a temperatura aumenta, o módulo de elasticidade diminui consideravelmente, apresentando valores praticamente nulos a 700 °C. Pode-se verificar, por meio da análise de variância, que a 20, 300, 500 e 700 °C, não existem diferenças estatisticamente significativas no módulo de elasticidade dos concretos das duas amostras, com exceção dos resultados obtidos a 900 °C. Esta redução pode originar deformações não previstas para os elementos estruturais submetidos a elevadas temperaturas. Mesmo que a peça não entre em colapso, isto poderá torná-la inadequada para uso [4].

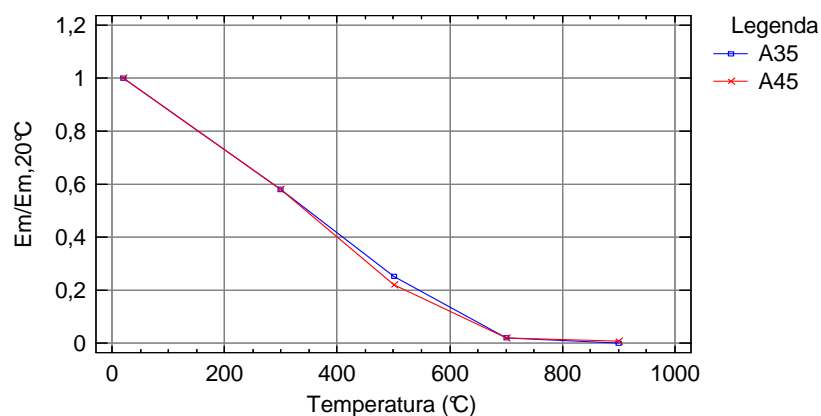


Figura 7. Módulo de Elasticidade residual do concreto referido a seu valor a 20 °C

A variação com a temperatura do módulo de elasticidade relativo em relação aos valores a 20 °C, para as amostras A35 e A45, é linear e é expressa pela Eq. (4). Esta correlação apresenta  $r^2$  de 94,1 % e é válida para temperaturas entre 20 e 700 °C.

$$\frac{E_m}{E_{m,20^\circ C}} = 1,03 - 1,51 \cdot 10^{-3} T, \quad (4)$$

onde:  $E_m$  é o módulo de elasticidade médio à compressão;  $E_{m,20^\circ C}$  é o módulo de elasticidade médio à 20 °C e  $T$  é a temperatura, em °C.

A redução do módulo de elasticidade dos concretos em função da temperatura acontece mais rapidamente que a resistência à compressão. Isto também foi observado no programa experimental desenvolvido por Costa [4] e pode ser explicado pela existência de

microfissuração na zona de transição por exposição ao fogo, que tem grande influência sobre a rigidez ou o módulo de elasticidade do concreto.

Vários autores consideram que o módulo de elasticidade é mais sensível à ação térmica, do que a resistência característica à compressão, sendo que aos 200 °C o módulo de elasticidade apresenta 70 a 80% do seu valor inicial a 20 °C e, aos 400 °C, somente 40 a 50%, sendo que estes fatores estão de acordo com os valores encontrados neste trabalho [14-16].

### 3.3 Comparação dos fatores de redução com os encontrados na literatura.

Os fatores de redução da resistência à compressão axial em função da temperatura encontrados na literatura para concretos aquecidos sem carregamento são mostrados na Fig. 8, juntamente com os obtidos a partir das amostras A35 e A45. Os valores obtidos por meio destas amostras encontram-se bastante próximos aos obtidos por Abrams e Mounajed e Obeid, citados por Alves [17].

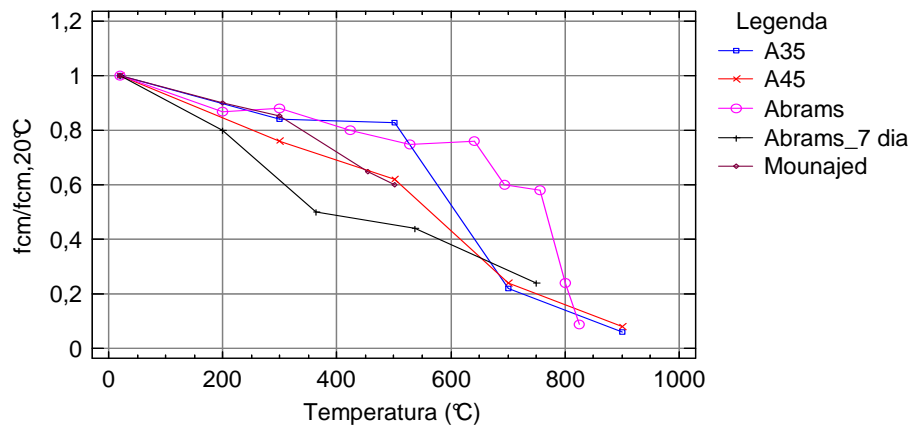


Figura 8. Fator de redução da resistência à compressão axial encontrados na literatura

A redução do módulo de elasticidade das amostras A35 e A45 apresentam uma certa semelhança com os resultados apresentados por Furumura et al., citados por Alves [17], para corpos-de-prova sem carregamento (Fig. 9). Porém os corpos-de-prova usados por Furumura et al., citado por Alves [17], eram cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, confeccionados com concreto de baixa resistência e submetidos à taxa de aquecimento de 1 °C/min.

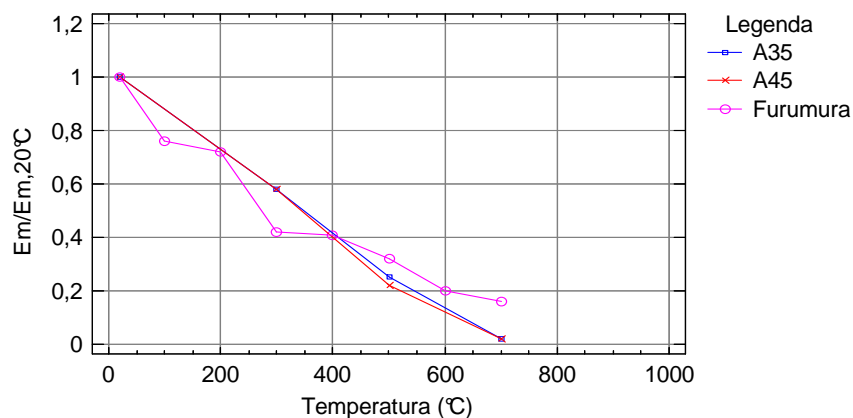


Figura 9. Fator de redução do módulo de elasticidade encontrados na literatura

## 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliada a influência da temperatura nas propriedades mecânicas residuais de concretos graníticos de resistências normais. Foram estudadas 3 amostras de concretos usados na construção civil em Portugal e no sul do Brasil, das quais duas ensaiadas sem carregamento e uma sob carregamento de 0,3fcd e de 0,7 fcd. Os resultados obtidos permitem concluir que:

- a resistência à compressão axial diminui com o aumento da temperatura de aquecimento dos corpos-de-prova. Acima de 600 °C, a redução de resistência pode ser superior a 40 % para as amostras sem carregamento ou com carregamento de 0,3fcd. A partir dos 900 °C, os concretos ensaiados apresentaram valores de resistência à compressão axial praticamente nulos;
- o nível de carregamento, desde que não excessivo, apresenta um efeito benéfico na resistência de concretos carregados, diminuindo a redução da resistência à compressão em função da temperatura do concreto resfriado ao ar;
- o módulo de elasticidade do concreto diminui linearmente com o aumento da temperatura, atingindo valores praticamente nulos a 700 °C.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, Brasil, pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

- [1] HARMATHY, T.Z.-“Properties of building materials. In: “The SFPE Handbook of fire protection engineering”. 2nd ed. Boston MA: Society of Fire Protection Engineers, pp. 142-155, 1995.
- [2] POON, C. et al. - “Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post fire curing”. *Cement and concrete research*. V. 31, pp. 1307-1318, 2001.
- [3] COSTA, C.N.-“Estruturas de concreto em situação de incêndio”. São Paulo: PEFEPUSP Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.
- [4] COSTA, C.N.; PIGNATTA, V.-“Estruturas de concreto armado em situação de incêndio”. *XXX Jornadas sul-americanas de engenharia estrutural*. Brasília, 2002.
- [5] HERTZ, K.D.-“Limits of spalling of fire-exposed concrete”. *Fire Safety Journal, Denmark*, v. 38, p. 103–116, August 2003.
- [6] LIMA, R.C.A. et al. - “Difração de raios-x e ultra som: usando ensaios não destrutivos eficazes para análise de estruturas sinistradas”. *47 CBC – IBRACON – Olinda, PE*, 2005.
- [7] COSTA, C.N. e PIGNATTA, V.-“Efeito da restrição axial às deformações térmicas em elementos de concreto sob flexão simples em situação de incêndio”. *48 CBC–IBRACON–Rio de Janeiro*, 2006.

- [8] RAMOS, D.V.M. -"Uso do ensaio de ultra-som em concretos submetidos a elevadas temperaturas. 48 CBC – IBRACON – Rio de Janeiro, 2006.
- [9] SILVA, D.S. – "Propriedades mecânicas residuais após incêndio de concretos usados na construção civil na Grande Florianópolis". Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFSC. Florianópolis. 2009
- [10] CALMEIRO, C.; RODRIGUES, J. P. C. & COELHO, A. L.; "Influence of the Cooling Process on the Residual Compression Strength of Ordinary Concretes"; *International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure*, Leipzig, Germany, September 2009.
- [11] RILEM TC 200-HTC, "Mechanical concrete properties at high temperature – Modelling and applications", *Materials and Structures*, vol.38, 2005, p. 913-919.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). "Concreto-Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação e da curva tensão-deformação". NBR 8522. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 9p.
- [13] CASTELLOTE, M. et al. – "Microstructure: solid phases." In: COURSE ON EFFECT OF HEAT ON CONCRETE, Udine, Itália: International Centre for Mechanical Sciences, 2003. 13p. Apostila
- [14] ALMEIDA, D.F. – "As estruturas de concreto armado e o fogo–comportamento–conseqüências–restauração". São Paulo: PCC-EPUSP, 1984. (Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo).
- [15] LIE, T.T.- "Structural fire protection". *ASCE manuals and reports on engineering practice*, nº 78. New York: ASCE, 1992. [Prepared by ASCE Committee on Fire Protection, Structural Division, American Society of Civil Engineers]
- [16] METHA, P., MONTEIRO, P.J.M. - "Concreto — estrutura, propriedades e materiais". Ed. PINI. São Paulo, 2008.
- [17] ALVES, A.J.G - "Comportamento ao Fogo de um Betão Reforçado com Fibras". Dissertação de Mestrado em Segurança Contra Incêndios Urbanos. Universidade de Coimbra, 2008.