

RESISTÊNCIA MECÂNICA RESIDUAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO APÓS O INCÊNDIO

Wandson Santos do Nascimento* ; Renato Guilherme da Silva Pereira**

RESUMO

Este resumo apresenta resultados de um programa experimental para determinar a resistência residual de vigas em concreto armado bi-apoiadas sujeitas à flexão pura após incêndios feito por Pires (2007). Também é apresentado um modelo tridimensional, não linear, em elementos finitos capaz de prever o comportamento térmico e mecânico (residual) deste tipo de elemento estrutural. A motivação de pesquisa ao tema está associada a importância ao aprofundamento do entendimento do que ocorre com as estruturas de concreto armado submetidas a situações de incêndio, por fins econômicos e de segurança às vidas humanas. Além disso, existe também a preocupação com a solidificação do conhecimento nesta área com vistas a contribuir para a construção de métodos precisos de dimensionamento de estruturas de concreto armado em situações de incêndio e também na verificação da possibilidade de uso de uma estrutura que tenha sido submetida a tal sinistro. As vigas apresentaram redução significativa na sua resistência residual em 210 min. de exposição ao fogo. O modelo numérico mostrou-se preciso na previsão das temperaturas e da carga de ruptura residual quando comparado aos resultados experimentais.

Palavras chave: Viga; Concreto Armado; Resistência Residual; Após Incêndio; Análise Experimental e Numérica.

1 INTRODUÇÃO

Devido a urbanização brasileira, a preocupação com a segurança contra incêndio em edificações no Brasil tem aumentado. Mais do que isto, torna-se cada vez mais comum para engenheiros e arquitetos terem seus serviços requisitados para avaliar e recuperar estruturas em edificações após incêndios.

A priori, o concreto armado apresenta vantagens em situação de incêndio, cita-se, por exemplo: ser incombustível, não exalar gases tóxicos, não possuir (geralmente) seções delgadas e ter baixa condutividade térmica, retardando o aumento de temperatura para o interior da peça e, conseqüentemente, minimizando os danos provocados pelo incêndio no que diz respeito a redução das propriedades mecânicas dos materiais constituintes.

As altas temperaturas alcançadas no incêndio, provocam fenômenos físicos e químicos que resultam na redução das propriedades mecânicas, isto é, na resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade, dos materiais constituintes (aço e concreto), além do fenômeno do lascamento (spalling) que podem comprometer a capacidade resistente do elemento estrutural (PIRES, 2007).

Pesquisas experimentais, tais como as realizadas por Guo e Shi (2011) e Maraveas et. al. (2017), respectivamente, determinaram a redução das propriedades mecânicas residuais do concreto e aço após o aquecimento a patamares de temperatura.

*Aluno de graduação em Engenharia Civil, Facol, projetoscad01@gmail.com

** Professor MSc. Engenharia Civil, Facol, renatoguilherme3@gmail.com

Este trabalho tem por objetivo validar um modelo numérico desenvolvido no programa de elementos finitos ABAQUS de forma a avaliar a resistência mecânica residual, comparando com o resultado do programa experimental, feito por Pires (2007), do impacto ocasionado por um incêndio em vigas de concreto armado. Neste sentido espera-se contribuir para o procedimento de avaliação de estruturas de concreto armado após incêndios, apresentando uma estratégia válida para este fim.

2 METODOLOGIA

No programa experimental, feito por Pires (2007), foram testadas 12 vigas de concreto armado com comprimento de 1,20 m e seção transversal de 0,12 m x 0,20 m, representando a base e a altura respectivamente. A resistência à compressão do concreto, após 60 dias, é de $f_c = 47,6$ MPa e foi determinada, por média aritmética, através de 4 corpos de prova cilíndricos com dimensões 0,10 m x 0,20 m.

Na armadura longitudinal positiva foram utilizadas 2 barras $\phi=10$ mm, Aço CA-50, e para armadura transversal $\phi_t=6,3$ mm, Aço CA-60, com espaçamento próximo aos apoios de 60mm e 80mm na região central da viga. Na parte superior da viga, foram utilizadas 2 barras $\phi_m=6,3$ mm, Aço CA-60, como armaduras de montagem, apenas com a função de porta-estribo. O cobrimento c_1 do concreto (distância entre a face e o eixo da armadura longitudinal), conforme NBR 15200:2012, foi de 30 mm.

O aquecimento das vigas, sem aplicação de carga mecânica, deu-se em 210 min., que correspondia ao limite programável no forno, sendo utilizada três amostras (vigas). A curva de aquecimento está representada na Figura 1.

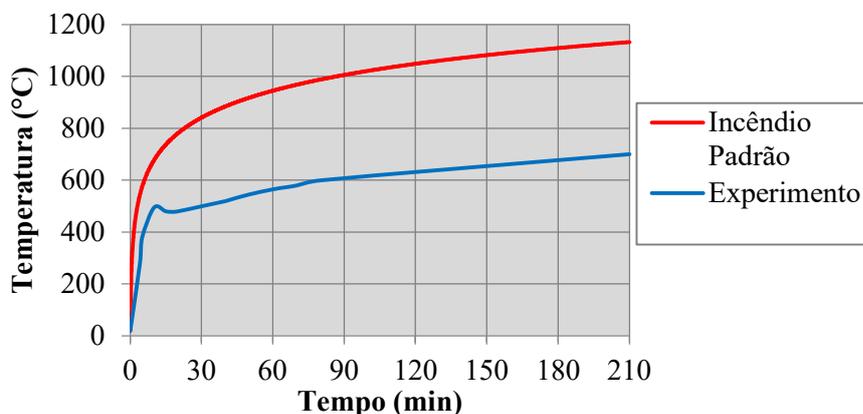


Figura 1. Temperatura dos gases no interior do forno durante o aquecimento para todos os experimentos.
Adaptado: Pires (2007)

O ensaio mecânico das vigas ocorreu após o seu resfriamento a temperatura ambiente. A carga foi aplicada por uma prensa hidráulica cuja capacidade máxima de carga era 3000kN. Durante todo o ensaio mecânico a carga mecânica aplicada a viga foi registrada por células de carga de 300kN. O esquema de ensaio é apresentado na Figura 2 (c) onde as vigas foram carregadas até a ruptura. A velocidade de aplicação de carga foi de 1 kN/s.

*Aluno de graduação em Engenharia Civil, Facol, projetoscad01@gmail.com

** Professor MSc. Engenharia Civil, Facol, renatoguilherme3@gmail.com

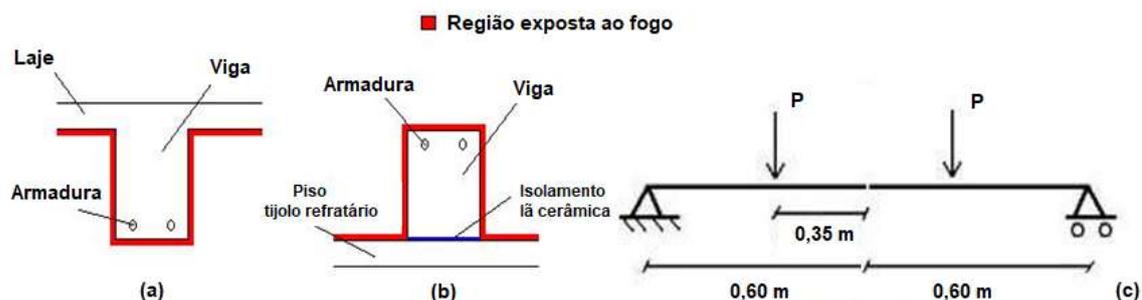


Figura 2. Esquema das vigas: na situação real (a), durante o aquecimento (b) e nos ensaios mecânicos (c). Fonte: Pires (2007)

Neste trabalho o modelo numérico tridimensional, não linear, em elementos finitos para análise das vigas de concreto armado foi desenvolvido no programa ABAQUS/Standard (2013). As propriedades geométricas do modelo seguem estritamente o descrito no programa experimental.

As vigas de concreto armado foram discretizadas na análise térmica em elementos de 10 mm x 10 mm x 10 mm para o concreto, 20 mm x 20 mm x 20 mm para armadura longitudinal e 20mm para armadura transversal. Já para análise mecânica foram discretizadas malhas de 50 mm x 50 mm x 50 mm para o concreto, 40 mm x 40 mm x 40 mm para a armadura longitudinal e 20 mm para armadura transversal.

Para simular a ação térmica no modelo foram utilizados dois tipos de superfícies ao redor da viga sujeitos a altas temperaturas, nomeadamente, *film condition* e *radiation*, que traduzem, respectivamente, os fenômenos de transferência de calor por convecção e radiação. De salientar ainda que foi considerado o valor de 0,95 para a emissividade do concreto. Foi adotado o valor 25 W/m² para o coeficiente de transferência de calor por convecção. O contato no modelo térmico entre o concreto e as armaduras longitudinais e transversais foi modelado com comportamento *Tie*, simulando o contato perfeito, para que não houvesse perda de calor.

Já no modelo mecânico, o contato entre o concreto e as armaduras foi feito pela função *Embedded region*, com objetivo de garantir uma solidariedade perfeita entre os materiais, conforme hipótese fundamental da teoria do concreto armado. Para simular a condição de apoio bi-apoiada do experimento, no modelo numérico restringiu-se todos os graus de liberdade de translação dos nós na região de um dos apoios e, no lado oposto, todos os graus de liberdade exceto a na direção longitudinal da viga caracterizando apoios do 2º e do 1º gênero, respectivamente. A distância entre os apoios foi 1,20m seguindo o vão experimental (Figura 3).

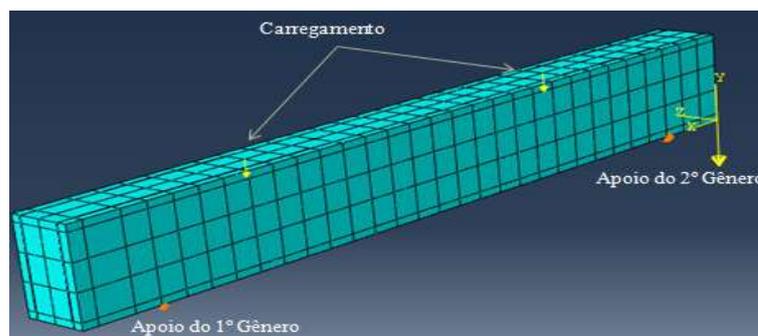


Figura 3. Modelo numérico utilizado na análise de elementos finitos.

*Aluno de graduação em Engenharia Civil, Facol, projetoscad01@gmail.com

** Professor MSc. Engenharia Civil, Facol, renatoguilherme3@gmail.com

Conforme o experimento, duas cargas concentradas iguais foram aplicadas, até a ruptura, na face superior da viga modelada numericamente e equidistantes do meio do vão, ou seja, 0,35 m, com velocidade de 1 kN/s, conforme a Figura 2 (c). O comando auxiliar *constraint coupling*, localizado no menu *interaction* no ABAQUS, que tem a função de evitar a concentração de esforços no ponto de aplicação da carga concentrada, também foi utilizado. Além destas cargas o peso próprio da viga também foi considerado.

Por fim, ressalta-se que o parâmetro de não-linearidade geométrica foi ativado (*NLGEOM=ON), para que fosse considerado o efeito de grandes deslocamentos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção foram comparadas as temperaturas e carga de ruptura da viga de concreto armado registradas durante os experimentos com as obtidas através do modelo numérico.

A Figura 4 apresenta a comparação das temperaturas na seção transversal da viga obtidas através do modelo numérico e medidas durante o ensaio. O ponto escolhido para comparação está representado na Figura 4 (b), em vermelho. Este ponto era um dos pontos onde havia termopares posicionados no experimento, permitindo assim a comparação numérico-experimental. O gradiente de temperatura na seção de concreto é obtido através dos resultados numéricos e é representado na mesma Figura 4 (b).

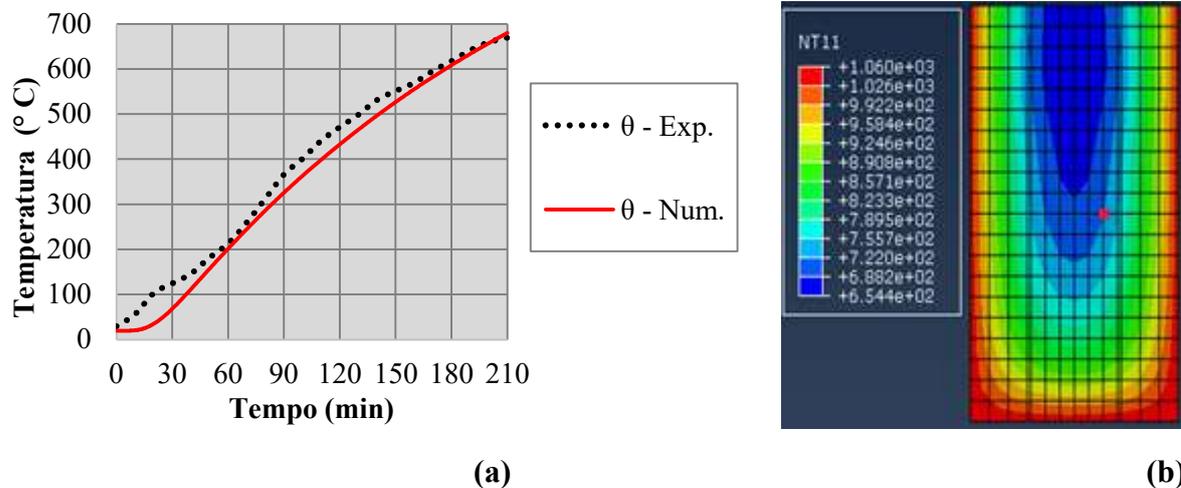


Figura 4. Evolução das temperaturas no concreto, num. x exp., no ensaio de 210min (a) e gradiente de temperatura na seção transversal, no meio do vão, no instante $t = 210\text{min}$ (b).

Fica evidente a baixa condutividade do concreto gerando altos gradientes de temperatura (Figura 4). Este gradiente pode contribuir para a ocorrência de lascamentos, principalmente nos cantos vivos da seção transversal. No ensaio experimental realizado não houve lascamento, provavelmente por ser um concreto com resistência não tão elevada ($f_c = 47,6 \text{ MPa}$) e apresentar baixa umidade (4,4%). Sendo assim, pode-se concluir que o modelo numérico foi capaz de representar a distribuição de temperaturas nas vigas de concreto armado com resultados muito próximos dos registrados experimentalmente.

No modelo numérico mecânico de forma a permitir a comparação entre as cargas obtidas numericamente e experimentalmente, adotou-se como critério de falha o valor do deslocamento

*Aluno de graduação em Engenharia Civil, Facol, projetoscad01@gmail.com

** Professor MSc. Engenharia Civil, Facol, renatoguilherme3@gmail.com

vertical no meio do vão (flecha) para a carga máxima suportada pela viga. Este valor foi definido conforme a expressão recomendada pela NBR 6118 (2014) para estruturas de concreto fissuradas em função da carga de ruptura aplicada a viga. O aquecimento de 210min provocou uma redução considerável na resistência residual da mesma, a carga de ruptura nesta situação foi de 47,6 kN, ou seja, 60% da carga de ruptura ambiente (Tabela 1).

Tabela 1. Carga de Ruptura experimental e numérica

Experimento	Flecha no meio vão (mm)	Carga Ruptura Experimental (kN)	Carga Ruptura numérica (kN)	Erro (%)
Ambiente	5,3	78,6	74,5	5,2
210 min.	3,7	47,6	44,9	5,7

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um modelo numérico tridimensional, não linear, desenvolvido em elementos finitos comparado com um programa experimental para determinar a resistência residual de vigas de concreto armado após um incêndio. Baseado nestes resultados pode-se destacar o seguinte:

- As vigas de concreto armado apresentaram redução significativa na sua resistência residual em 210 min. de exposição ao fogo.
- A abordagem numérica desenvolvida para análise térmica produziu resultados bastante satisfatórios quando comparados com os obtidos experimentalmente;
- A abordagem numérica desenvolvida para análise mecânica residual produziu resultados precisos com erros inferiores a 7% quando comparados com o experimento;
- O modelo numérico apresentado pode ser utilizado para prever o comportamento térmico e mecânico (residual) de vigas de concreto armado bi-apoiadas após o incêndio.

5 REFERÊNCIAS

- ABNT (2014). “NBR-6118: Projeto de Estruturas de Concreto”. Rio de Janeiro.
- ABNT (2013). “NBR-14323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio - procedimento”. Rio de Janeiro.
- ABNT (2012). “NBR-15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio”. Rio de Janeiro.
- Guo, Z., Shi, X. (2011) “Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures”. Elsevier, eBook ISBN: 9780123869630, 336p.
- Maraveas, C., Fasoulakis, Z., Tsavdaridis, K. D. (2017), "Post-fire assessment and reinstatement of steel structures". Journal of structural fire engineering, v. 8, n. 2, p. 181-201.
- Pires, T. A. “Gerenciamento de riscos de incêndio: Avaliação do impacto em estruturas de concreto armado através de uma análise experimental de vigas isostáticas”. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, (2007)

*Aluno de graduação em Engenharia Civil, Facol, projetoscad01@gmail.com

** Professor MSc. Engenharia Civil, Facol, renatoguilherme3@gmail.com