

ESTUDO DE CASO: FALHAS POR FLAMBAGEM DE ESTRUTURAS METÁLICAS DE UM PÓRTICO SUBMETIDO À SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Rômulo Ferreira da Silva, romulofs@poli.ufrj.br¹
José Márcio Vasconcellos, jmarcio@peno.coppe.ufrj.br²

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Caixa Postal 68508, CEP 21941-972, Rio de Janeiro/RJ

²Programa de Engenharia Naval e Oceânica – COPPE/UFRJ, Caixa Postal 68508, CEP 21941-972, Rio de Janeiro/RJ

Resumo: *Este trabalho de pesquisa, desenvolvido no Laboratório de Educação Continuada Offshore da Universidade Federal do Rio de Janeiro, tem por objetivo apresentar a simulação dos efeitos de flambagem ocorridos em uma situação de incêndio que ocorre próximo à uma estrutura do tipo pórtico, através de modelos computacionais não-lineares baseados no método dos elementos finitos, com o auxílio da ferramenta de informática ANSYS, simulando isoladamente o comportamento de vigas e pilares. A temperatura média da seção é utilizada como parâmetro para determinar a diminuição do módulo de elasticidade do material, sendo a única propriedade que influi diretamente no fenômeno estudado. Em seguida, obtêm-se numericamente o valor da carga crítica em que a estrutura falha por flambagem, correlacionando-se temperatura e carga crítica. Enfim, efetua-se uma comparação dos resultados obtidos computacionalmente com aqueles originados da aplicação de fórmulas clássicas, como aquela de Leonhard Euler.*

Palavras-chave: *Incêndio; Segurança de estruturas; Estruturas metálicas; Flambagem; Método dos elementos finitos.*

1. INTRODUÇÃO

As estruturas são concebidas para resistir a determinados carregamentos sob condições normais de uso. No entanto, certas ocorrências, mesmo raras, devem ser consideradas, pois podem levá-las ao colapso. Tratando-se de estruturas metálicas, formadas em sua grande parte de elementos esbeltos, a ocorrência de altas temperaturas é particularmente perigosa, pois os metais em geral, particularmente o aço, tendem a sofrer grande perda de resistência e diminuição considerável do módulo de elasticidade, contribuindo expressivamente para o surgimento de deflexões laterais. Especialmente numa situação de incêndio, os elementos comprimidos de um sistema estrutural podem falhar por flambagem, colapsando de forma repentina e dramática. Portanto faz-se necessário o dimensionamento de estruturas metálicas com resistência mínima a situações extremas, visando haver tempo para evacuação da mesma. De fato, este é um assunto amplamente estudado, com boa quantidade de literatura disponível e abordado nas principais normas técnicas.

Em elementos curtos, a força de compressão pode ser aumentada até que ocorra o escoamento do material em todos os pontos da seção transversal. Para barras consideradas longas, à medida que se aumenta a força de compressão também se aumenta a instabilidade geométrica da estrutura, isto é, aumenta-se o risco de ocorrência de flambagem. Então, ao passo que a esbelteza do elemento estrutural é aumentada, mais difícil é atingir o escoamento do material, pois a ocorrência do segundo tipo de falha torna-se mais comum. O limite entre os dois tipos de falha, ou seja, a carga que, quando aplicada axialmente no elemento, causa deformações geométricas excessivas e repentinas é chamada carga crítica de flambagem por flexão (TIMOSHENKO, S., 1994). Como o aço é um material de grande resistência, a redução das seções transversais normalmente resulta em elementos estruturais muito esbeltos e, portanto, muito mais sensíveis a problemas de estabilidade. Por isso motivo faz-se necessária a verificação quanto a falha por flambagem, sobretudo em situações de incêndio.

Neste trabalho voltou-se para a análise teórica e numérica da falha por flambagem das estruturas isoladas de um pórtico com estrutura de aço submetido a temperaturas elevadas, tal qual um incêndio. Para isto, foram elaborados modelos isolados de pilares e vigas sob condições de apoios usuais, para assim investigar a carga crítica de falha por flambagem para várias temperaturas médias das seções, com módulos de elasticidades inversamente proporcionais a elevação da temperatura. Foram descartados os efeitos das deformações axiais, conforme recomenda a NBR-14323.

Salienta-se que o modelo numérico empregado é não-linear, levando em consideração as grandes deformidades estruturais. O modelo clássico, por si, é baseado em deformações infinitesimais, sendo este trabalho, também um meio de comparar o comportamento de ambos os modelos (linear e não-linear).

Os modelos computacionais foram concebidos com o uso da ferramenta ANSYS, que utiliza o método dos elementos finitos como base. Primeiramente analisou-se numericamente o problema proposto. Para isso utilizou-se modelos em elementos finitos. Em seguida, utilizou-se a teoria de resistência dos materiais para validar o modelo computacional proposto.

2. METODOLOGIA

A estrutura utilizada para estudo de caso neste artigo é um pórtico genérico formado por dois pilares e uma viga, cujos tipos de ligação e condições de apoio são variáveis. A ligação entre viga-pilar é chamada de nó, podendo ser do tipo rígida (soldada, aparafusada etc.) ou do tipo articulada (um pino, por exemplo). De fato, o estudo proposto leva em consideração apenas os elementos isolados atuando independentemente, considerando diversos cenários possíveis tanto para temperatura quanto para condições de apoio.

Os elementos são estudados separadamente submetidos a cargas compressivas perfeitamente axiais e são impostas pequenas imperfeições geométricas iniciais. Considerou-se o uso de aço estrutural com módulo de elasticidade longitudinal em temperatura ambiente (de 0°C até 20°C, isto é, de 273,15K até 293,15K) de 210 Gpa, coeficiente de Poisson de 0,3 e limite de escoamento de 250 Mpa, considerado aço carbono de média resistência (SILVA, V. P., VARGAS, M.R. 2005).

Optou-se por utilizar um perfil comercial metálico leve do tipo I com as seguintes características: massa = 5,45 kg/m; altura = 101,6mm; largura da mesa = 57,2mm; espessura da mesa = 3,05mm; espessura da alma = 3,18mm.

O módulo de Elasticidade é considerado variável de acordo com a temperatura média da seção, utilizando para isso a curva simplificada da Fig.(1), montada a partir de dados da literatura técnica disponível (SILVA, V. P., VARGAS, M.R. 2005).

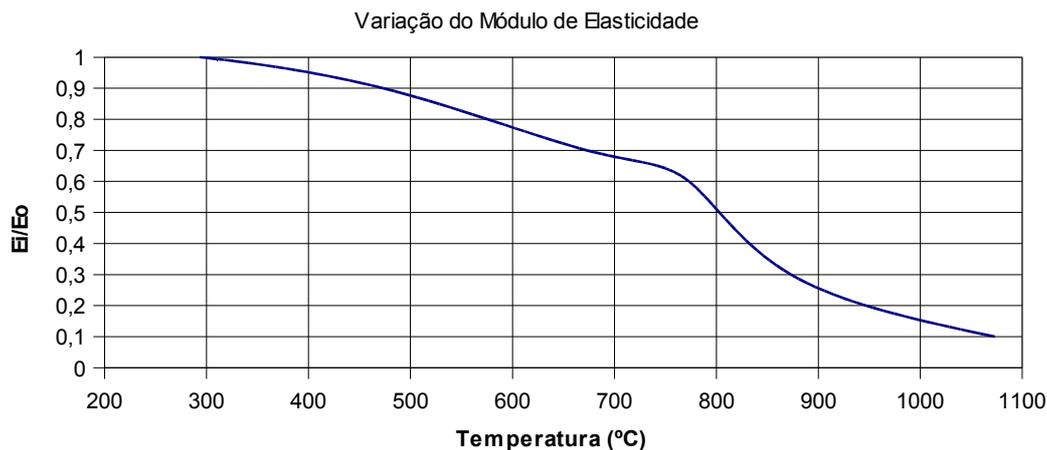


Figura 1. Variação do módulo de elasticidade longitudinal do aço estrutural, sendo E_0 o módulo de elasticidade à temperatura ambiente e E_i o respectivo módulo na temperatura dada.

A temperatura é considerada, então, constante em todo o elemento, aquecendo-o uniformemente. Optou-se pela análise discreta, ou seja, a curva de incêndio padrão foi substituída por um conjunto restrito de temperaturas, limitado superiormente pelo valor de 800°C e inferiormente por 20°C. A análise não é temporal, considerando-se a temperatura constante para uma determinada variação de carga.

A análise será feita com o uso de métodos numéricos não-lineares e também pelo método analítico de Euler (GERE, J., TIMOSHENKO, S. 1990). Neste trabalho desconsidera-se a variação da resistência ao escoamento em função da temperatura, uma vez que o objetivo é de traçar a variação da carga crítica com a variação da temperatura média da seção do elemento. Também se desconsidera a flambagem por torção, especialmente em elementos do tipo viga com grandes distâncias entre contenções laterais, sendo considerada unicamente esta falha devido à flexão.

2.1. Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é uma ferramenta relativamente nova da engenharia: seu aparecimento data da década de 1950, com fins aeronáuticos. Trata-se de um utensílio matemático intimamente relacionado com a evolução da computação, pois o processamento demandado na resolução de um problema é enormemente maior que a utilização de soluções analíticas.

A utilização deste método permite analisar problemas dividindo-se e resolvendo-se um problema maior em pequenos elementos (origem do nome de elementos finitos), e então obter o comportamento do todo. De fato, trata-se de um método numérico que exige a resolução de grandes matrizes (tão maiores quanto o número de elementos finitos).

A resolução de um problema através deste método exige a divisão do problema em elementos de geometria simples e com número de nós de acordo com a precisão requerida (malha). Em seguida, as matrizes ditas elementares são construídas, responsáveis pelas características do material entre outros, e por último impõe-se as condições do problema, isto é, as cargas, deslocamentos, cargas térmicas etc.

Atualmente são várias as ferramentas computacionais comerciais que utilizam o método dos elementos finitos como base para resolução de problemas. Isto evita que o utilizador perca tempo escrevendo o próprio código, inclusive evita erros de programação, tão frequentes em algoritmos tão complexos. Para este trabalho utilizou-se a ferramenta ANSYS.

2.2. Teoria da flambagem por compressão

A teoria clássica de flambagem, isto é, segundo a teoria de pilares de Euler (GERE, J., TIMOSHENKO, S. 1990), a carga crítica que causa instabilidade geométrica numa peça comprimida tem seu valor dado pela Eq.(1). Onde n é o modo de flambagem (utiliza-se o primeiro modo de flambagem neste trabalho), L_e é o comprimento efetivo de flambagem, E é o módulo de elasticidade longitudinal do material e I é o menor módulo de inércia do elemento estrutural.

$$P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L_e} \quad (1)$$

Esta equação caracteriza a interação do esforço compressivo axial com o módulo de rigidez à flexão EI do elemento. Trata-se de uma teoria baseada nos fundamentos da elasticidade, logo sugerindo que as deformações não-plásticas do material são decorrentes unicamente da força que L_e é aplicada, não deixando deformações permanentes mesmo após o alívio do esforço aplicado.

Presume-se que o fenômeno dar-se-á no eixo de menor inércia da seção transversal do elemento estrutural, pois o mesmo possui menor rigidez à flexão. Também se conclui que a carga crítica de flambagem por flexão P é diretamente proporcional ao módulo de elasticidade longitudinal E (Módulo de Young). Também se considera que todo o elemento é uniforme.

O valor do comprimento efetivo de flambagem L_e depende das condições de apoio do elemento estrutural estudado. Com efeito, não se utiliza o real valor do comprimento da barra na Eq.(1), exceto para barras biarticuladas. Substituiu-se o comprimento real por um outro equivalente relativo ao comprimento L real, de acordo com a Tab.(1).

Tabela 1. Valores adotados para o comprimento efetivo L_e de acordo com as condições de apoio do elemento.

Condição de Apoio	L_e
Simplesmente engastada	$2L$
Biarticulada	L
Bi-engastada	$L/2$
Articulada - engastada	$0,7L$

3. RESULTADOS

3.1 - Análise numérica

Inicialmente, a proposta foi de modelizar tridimensionalmente os elementos estruturais. Para tal, utilizou-se do elemento finito tipo BEAM189, que é um elemento quadrático (três nós) e seis graus de liberdade em cada nó. No entanto verificou-se que para o estudo em questão, flambagem por flexão, o emprego de um elemento bidimensional BEAM3, elemento linear (dois nós) e três graus de liberdade em cada nó, levaria a bons resultados com bem menor esforço computacional.

Para simular as condições limites de um elemento real, foram utilizados modelos bi-engastados, biarticulados, simplesmente engastados e engastados-articulados. O elemento estudado tinha 1000mm de comprimento, com as características geométricas da seção descrita na introdução deste trabalho. A variação de temperatura foi aplicada etapa por etapa, isto é, o modelo foi calculado para diferentes temperaturas como se toda a seção estivesse sob a mesma temperatura média.

Aplica-se uma pequena carga descentralizadora, ou seja, uma força fora do eixo para que o modelo flambe sob a menor carga possível, caso contrário o algoritmo do utensílio informático utilizado aplicaria os esforços axiais perfeitamente centralizados, não resultando em instabilidade geométrica. Então, se aplica incrementalmente um esforço

axial no elemento estrutural e monitora-se os deslocamentos axiais do elemento no ponto de aplicação da força. Considera-se como carga crítica de flambagem aquela que causa uma deformação brusca, conforme bem exemplificado na Fig. (2) e na Fig. (3).

Na Fig. (2) se observa que a estrutura apresenta um deslocamento axial abrupto a partir de um pequeno acréscimo de carga, sendo esta considerada a carga crítica de flambagem da coluna estudada. No caso supracitado Fig.(3) trata-se da coluna simplesmente engastada sob temperatura média da seção constante e igual a 200°C. Esta análise não-linear é repetida, para as mesmas condições de apoio, para as temperaturas de 0°C (273,15K), 20°C (293,15K), 200°C (473,15K), 400°C (673,15K), 500°C (773,15K), 600°C (873,15K) e 800°C (1073,15K), utilizando-se o módulo de elasticidade E variável de acordo com a carga térmica em questão. Então, este procedimento é aplicado para outras condições de apoio.

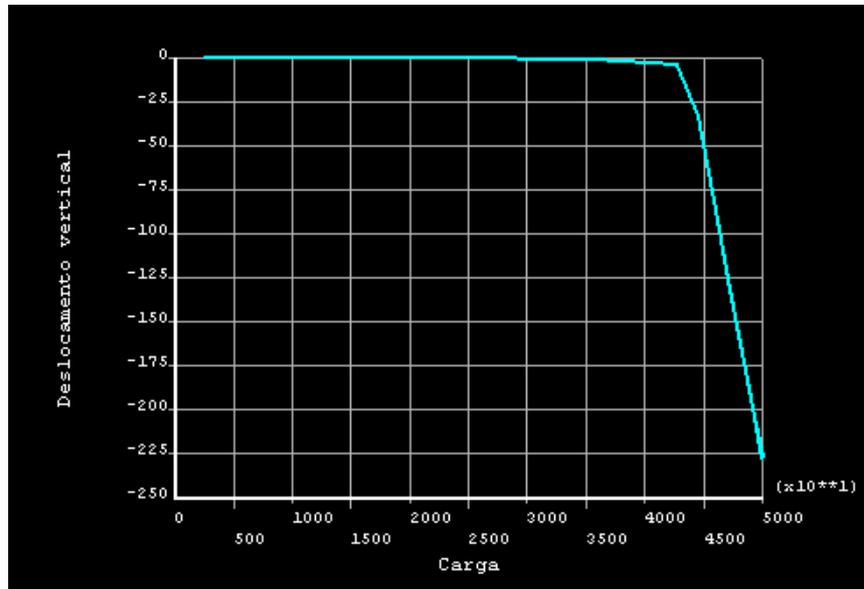


Figura 2. Histórico de incrementos de carga axial num elemento simplesmente engastado sob temperatura de 200°C até a ocorrência de flambagem, caracterizada pelo abrupto deslocamento vertical.

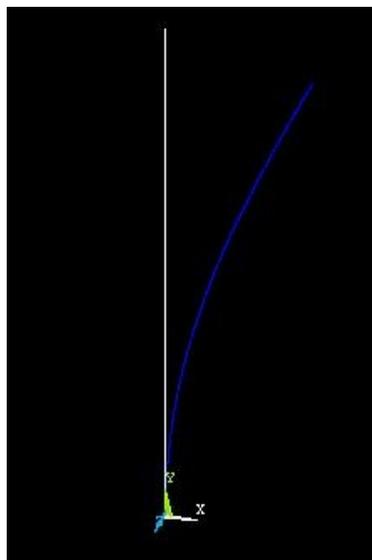


Figura 3. Elemento estrutural simplesmente engastado sendo solicitado axialmente por esforço compressivo maior que a carga crítica de flambagem por flexão.

3.2 - Análise clássica

Efetou-se o cálculo da carga crítica de instabilidade geométrica para os mesmos modelos estruturais utilizados para a simulação numérica. Para tal, lançou-se mão da Eq. (1), isto é, aplicou-se a fórmula clássica de Euler com comprimento específico L_e equivalente à condição de apoio dos casos em questão, de acordo com a Tab.(1). Repetiu-se a rotina para as temperaturas de 0°C (273,15K), 20°C (293,15K), 200°C (473,15K), 400°C (673,15K), 500°C (773,15K), 600°C (873,15K) e 800°C (1073,15K), com variação equivalente do módulo de Young do material.

3.3 – Comparação de resultados

Os resultados Fig. (4), Fig. (5), Fig. (6) e Fig. (7) comparam o comportamento de ambas as metodologias para com a variação de temperatura e condições de apoio. Salienta-se a grande aproximação dos valores das cargas críticas dos dois métodos que, mesmo utilizando princípios distintos, mostram-se equivalentes para análise de flambagem elástica por flexão. A análise não-linear se mostraria de maior utilidade caso o intuito fosse determinar o comportamento do elemento estrutural após o limite elástico.

A proporcionalidade do módulo da carga crítica com o módulo de elasticidade longitudinal é perceptível em ambas as metodologias, mesmo quando se considera uma análise mais sofisticada, como é o caso da não-linear. Em parte isso se deve à natureza inicialmente elástica do fenômeno de flambagem, baseada na lei elástica de Hooke, para tensão abaixo do limite de proporcionalidade do material estudado.

Observa-se que até temperaturas de 400°C, a redução da carga crítica ocorre de forma pouco significativa, sendo a tensão de flambagem não muito menor que aquela sob condições normais de uso da estrutura. No entanto, para temperaturas superiores a resistência à instabilidade reduz-se drasticamente, em grande parte devido à própria natureza do material que tem seu módulo de elasticidade longitudinal acentuadamente diminuído. Portanto, a flambagem de peças comprimidas, sobretudo colunas e pilares, é um ponto a ser verificado numa estrutura, sob pena de ultrapassar o estado limite último da mesma.

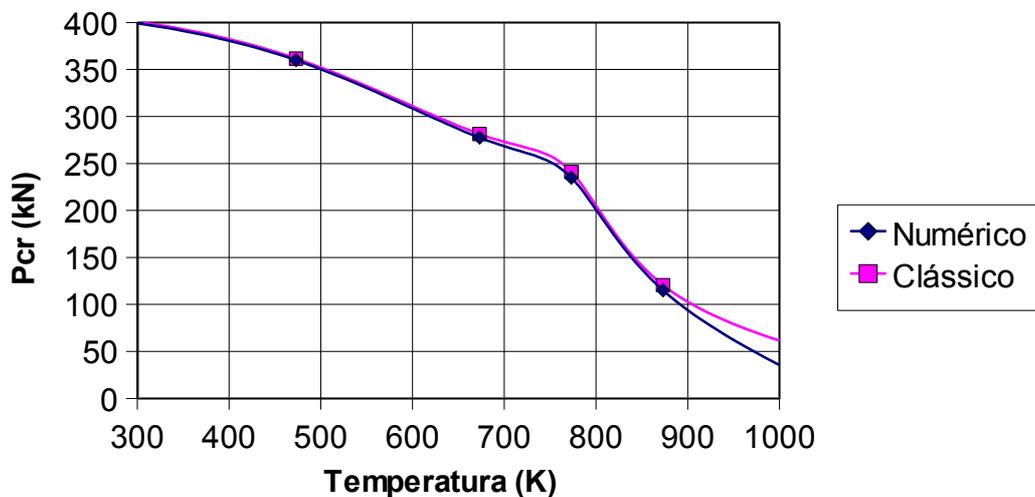


Figura 4. Viga com engaste e articulação analisada numérica e analiticamente para determinação de carga crítica de flambagem para temperaturas entre 0°C (273,15K) e 800°C (1073,15K).

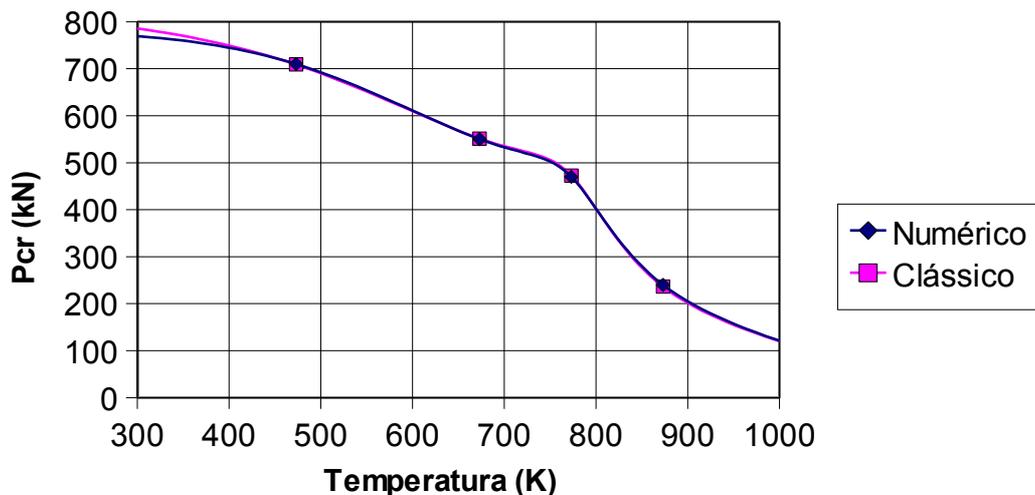


Figura 5. Viga bi-engastada analisada numérica e analiticamente para determinação de carga crítica de flambagem para temperaturas entre 0°C (273,15K) e 800°C (1073,15K).

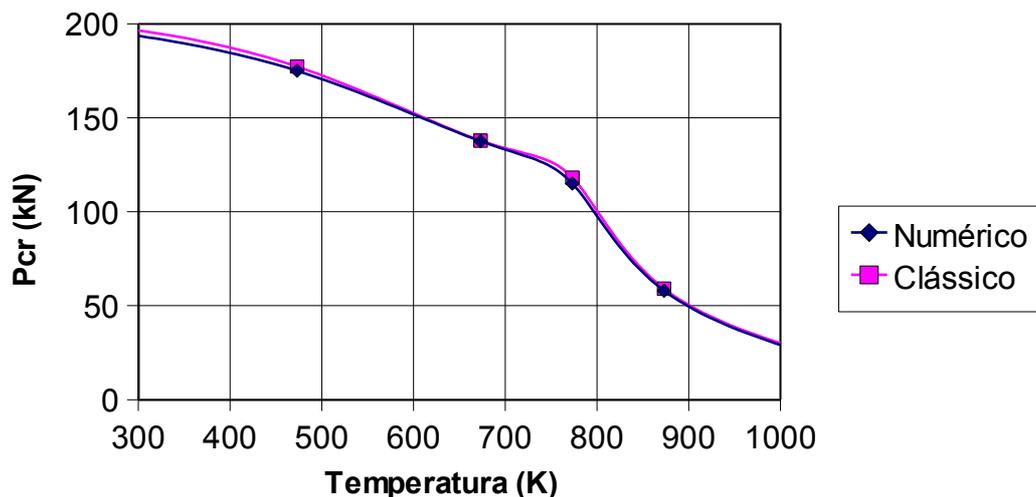


Figura 6. Viga biarticulada analisada numérica e analiticamente para determinação de carga crítica de flambagem para temperaturas entre 0°C (273,15K) e 800°C (1073,15K)..

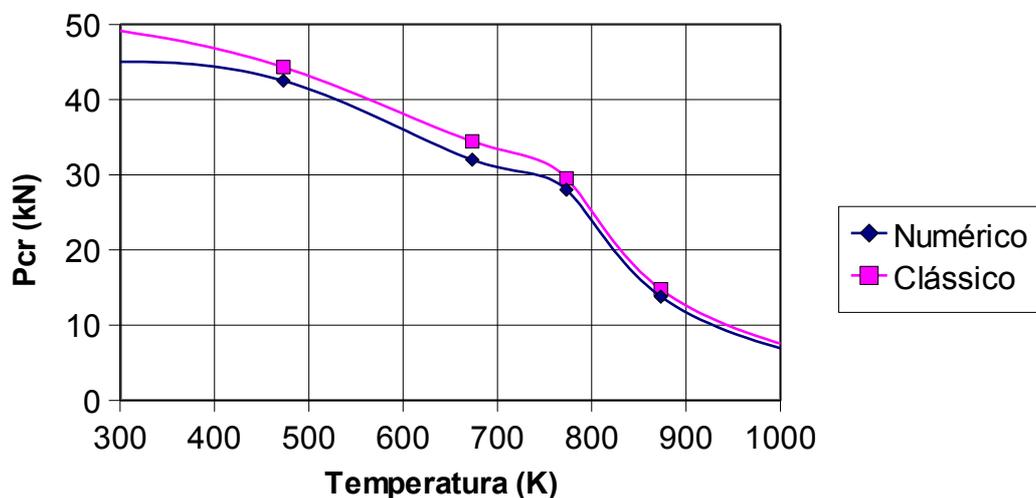


Figura 7. Viga simplesmente engastada analisada numérica e analiticamente para determinação de carga crítica de flambagem para temperaturas entre 0°C (273,15K) e 800°C (1073,15K).

4. CONCLUSÃO

Apresentou-se neste artigo um estudo de caso em que os elementos de um pórtico genérico tiveram seus comportamentos estudados isoladamente a fim de comparar o método numérico e a análise clássica de carga de flambagem por flexão. Observou-se uma boa correspondência entre ambas as metodologias e consequentemente uma validação do modelo computacional utilizado.

Salienta-se que, para futuros trabalhos, a análise completa do pórtico considerando-se condições reais de junção dos elementos, seja por pinos, seja por solda, e não mais como elementos separados, poderá fornecer resultados mais condizentes com aplicações reais. No entanto, conforme objetivo inicial, o presente estudo já demonstra de maneira satisfatória o comportamento estrutural quando da elevação de temperatura, sobretudo para caso de elementos isolados sob força compressiva, mesmo que tenham sido adotadas hipóteses simplificadoras. Por outro lado, também se demonstrou a utilidade de ferramentas computacionais, através do método dos elementos finitos, para resolução de problemas de engenharia em geral.

5. REFERÊNCIAS

- GERE, J., TIMOSHENKO, S. 1990. "Mechanics of Materials", 3 Ed. PWS, KENT Publ. Co.
 SILVA, V. P. 2001. "Estruturas de Aço em Situação de Incêndio". São Paulo. Zigurate Editora.
 SILVA, V. P., VARGAS, M.R. 2005. "Resistência ao fogo das estruturas de aço". Rio de Janeiro. IBS/CBCA.
 TIMOSHENKO, S., 1994. "Resistência dos Materiais – volume 2". Rio de Janeiro. Ed. Livros Técnicos e Científicos.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

CASE STUDY: FAILURE BY BUCKLING OF STEEL STRUCTURES OF A PORTICO-TYPE UNDER FIRE CONDITION

Rômulo Ferreira da Silva, romulofs@poli.ufrj.br¹
José Márcio Vasconcellos, jmarcio@peno.coppe.ufrj.br²

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Caixa Postal 68508, CEP 21941-972, Rio de Janeiro/RJ

²Programa de Engenharia Naval e Oceânica – COPPE/UFRJ, Caixa Postal 68508, CEP 21941-972, Rio de Janeiro/RJ

Abstract. *This paper, research developed at the Laboratory of Continuing Education Offshore of the Federal University of Rio de Janeiro, has the objective to present a way to simulate the buckling effects of a portico-type structure under fire conditions by means of computer non-linear models based on the finite element method by using the computational tool ANSYS, simulating separately the behavior of the beams. The average temperature of the section is used as a parameter to determine the decrease in modulus of the material, the only property that directly influences the phenomenon studied. Then, we obtain numerically the value of the critical load in which the structure fails by buckling, correlating temperature and critical load. Finally, it makes a comparison of computational results with those arising from the application of classical formulas, like that of Leonhard Euler*

Keywords: *Fire; Safety structures; Metallic structures; Buckling; Finite Element Method.*