



## ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS E DA DEFORMAÇÃO INICIAL NA RESISTÊNCIA DE COLUNAS METÁLICAS

*Alexandre Rossi<sup>1</sup>, Carlos Humberto Martins<sup>2</sup>, Felipe Piana Vendramell Ferreira<sup>3</sup>*

**RESUMO:** Existem métodos de análise clássicos da influência das tensões residuais em estruturas metálicas que permitem conclusões matemáticas refinadas dos fenômenos físicos que acontecem nas estruturas. Porém pesquisas experimentais pode tornar-se caro em demasia dependendo dos fatores a serem analisados e alguns dados muitas vezes não podem ser coletados por inacessibilidade da instrumentação, ou por impossibilidade de monitoramento. Porém por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), a obtenção de modelos teóricos onde se possa, satisfatoriamente, analisar os efeitos do comportamento estrutural sob influência das tensões residuais proposta torna-se mais fácil e real. Este método tem inúmeras aplicações nas áreas de Engenharia, Física e Matemática, tais como: análise das estruturas, estudo das vibrações, transferência de calor, ondas eletromagnéticas, dentre outras. As tensões residuais aparecem nos perfis estruturais e chapas de aço durante o processo de fabricação e permanecem, inevitavelmente, se nenhuma técnica de alívio de tensões for utilizada. Essas tensões residuais têm um papel importante no dimensionamento dos pilares de aço, pois, essas tensões são responsáveis pela redução da resistência à compressão. Portanto este trabalho pretende fazer uma análise numérica, através do *software Abaqus*, sobre o comportamento estrutural de pilares de aço. Esses pilares são constituídos por perfis laminados de aço de abas paralelas que apresentam tensões residuais adquiridas durante seu processo de fabricação. Com esse software será possível a análise da influência da distribuição das tensões residuais na resistência à compressão, através da carga crítica de flambagem, que será comparada com os valores obtidos através do método de cálculo fornecido pela NBR 8800:2008.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tensões residuais, carga crítica, pilares, Abaqus.

### 1 INTRODUÇÃO

Existem métodos de análise clássicos da influência das tensões residuais em estruturas metálicas que permitem conclusões matemáticas refinadas dos fenômenos físicos que acontecem nas estruturas. Porém pesquisas experimentais pode tornar-se caro em demasia dependendo dos fatores a serem analisados e alguns dados muitas vezes não podem ser coletados por inacessibilidade da instrumentação, ou por impossibilidade de monitoramento. Por exemplo, neste caso, a obtenção de dados relativos às diversas distribuições de tensões residuais torna-se mais simples.

Por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), a obtenção de modelos teóricos onde se possa, satisfatoriamente, analisar os efeitos do comportamento estrutural sob influência das tensões residuais proposta torna-se mais fácil e real.

A partir dos resultados que serão obtidos numericamente será possível analisar o desempenho dos pilares em perfis de aço, incorporando parâmetros relativos a distribuição das tensões residuais, bem como analisar a influência da variação de alguns parâmetros, como do índice de esbeltez do pilar.

#### 1.1 Perfis Laminados de Abas Paralelas

Os pilares metálicos utilizados na construção civil são normalmente pilares de perfis metálicos de abas paralelas, esses perfis são fabricados em altas temperaturas em usinas siderúrgicas, e um dos seus processos de fabricação é conhecido como laminação, o qual consiste na passagem sucessiva por rolos até se atingir a forma desejada.

<sup>1</sup> Acadêmico do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá (UEM), Departamento de Engenharia Civil (DEC), Maringá/PR. alexandre-rossi@hotmail.com;

<sup>2</sup> Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>., Universidade Estadual de Maringá – UEM, Departamento de Engenharia Civil – DEC, chmartins@uem.br;

<sup>3</sup> Graduando, Universidade Estadual de Maringá-UEM, Programa de Iniciação Científica – PIC, fpiana@live.com.

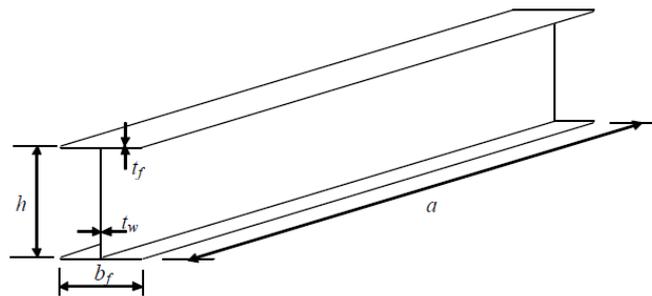


Figura 1 – Perfil laminado

Fonte: Abreu (2010)

A vantagem da utilização de elementos metálicos na construção se dá por fatores como a redução no tempo da obra, diminuição de custos com mão de obra, possibilidades de ampliações e adaptações, entre algumas outras vantagens. De acordo com PINHO (2008) os perfis laminados apresentam uma maior padronização do que perfis soldados, o que pode levar a modulação de projetos, além do mais pode-se verificar no mercado uma grande variedade de bitolas.

### 1.2 Tensões Residuais em Pilares de Aço

As tensões residuais aparecem nos perfis estruturais e chapas de aço durante o processo de fabricação e permanecem, inevitavelmente, se nenhuma técnica de alívio de tensões for utilizada. Devido ao resfriamento não uniforme, após a laminação ou soldagem da peça, surgem deformações plásticas e, conseqüentemente, tensões residuais que podem, em alguns casos, atingir o mesmo nível de grandeza da tensão de escoamento do material. As tensões residuais têm um papel importante no dimensionamento dos pilares de aço, pois, sendo a principal causa da não linearidade do diagrama tensão x deformação na região inelástica, conforme afirmam Alpsten e Tall (1970), elas afetam, significativamente, a resistência à compressão.

Em perfis laminados a quente, o processo de formação das tensões residuais impõe que as extremidades das mesas e a região central da alma fiquem comprimidas, enquanto as junções entre alma e mesa fiquem tracionadas devido ao resfriamento lento. Para perfis soldados com chapas de bordas laminadas, a solda de união entre mesas e alma introduz tensões residuais de compressão nas extremidades das mesas, ampliando a região das tensões residuais de compressão, afetando, de forma adversa, a resistência dos pilares, se comparada com os pilares compostos por perfis laminados a quente. Nos perfis soldados com chapas cortadas a maçarico, o corte introduz tensões de tração nas bordas das chapas devido ao calor, agindo, favoravelmente, na resistência à compressão (Bjorhovde & Tall, 1960; Mc Falls & Tall, 1969; ECCS, 1976).

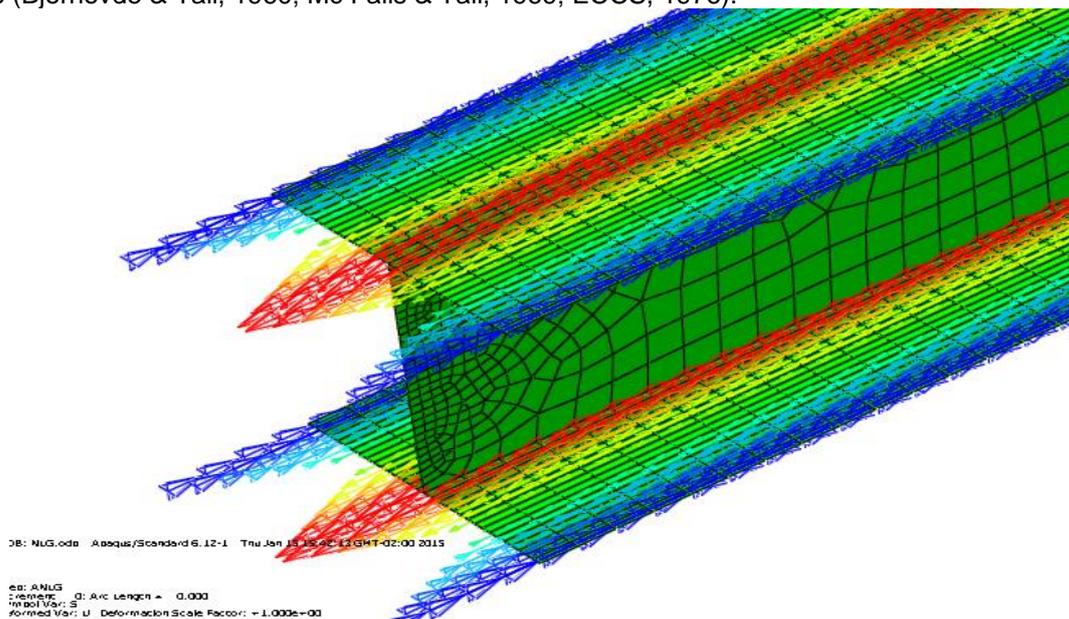


Figura 2 – Exemplo de distribuição de tensão residual no software Abaqus

Fonte: Rossi (2015)



A literatura técnica tem adotado, de forma simplificada, as distribuições parabólica ou linear para a variação das tensões residuais dos perfis laminados e soldados. Vários pesquisadores (Kanchanalai, 1977; Chen & Toma, 1994; Chen et al., 1996; Kim & Chen, 1996a, 1996b, entre outros) utilizam a distribuição linear nas mesas e constante na alma nos modelos de análise que considerem as tensões residuais. Entretanto, para perfis com grande altura de alma, a variação das tensões ao longo da alma deve ser, também, considerada. Assim, uma boa aproximação seria considerar distribuições parabólicas ou lineares, tanto nas mesas, quanto na alma. O funcionamento das estruturas compostas por perfis de aço laminados, soldados ou cortado, como é o caso dos pilares metálicos, depende essencialmente das tensões residuais presente neles.

### 1.3 Carga crítica de Euler – Flambagem

A condição necessária para que uma estrutura (viga, pilar, etc.) tenha um comportamento adequado na sua vida útil é que não sejam atingidos os chamados estados limites, isto é, os estados nos quais a estrutura deixará de atender às suas funções de projeto. Existem dois tipos de estados limites: estados limites últimos e estados limites de utilização. Este se relaciona a utilização econômica e à integridade dos materiais suportados pela estrutura, bem como o conforto dos usuários. Já aquele está ligado ao colapso, parcial ou total, de uma estrutura, devido ao esgotamento da capacidade portante da estrutura.

Nos pilares, os estados limites últimos devido à flexão estão geralmente ligados a um dos seguintes fatores: a plastificação total de uma ou mais seções transversais (formação de rótulas plásticas), a flambagem local da mesa comprimida, a qual ocorre quando a mesa possui esbeltez acima de determinados valores, determinados por normas, a flambagem local da alma, análoga à anterior, porém devido à esbeltez elevada da alma.

A carga crítica de Euler, em teoria a carga axial P pode ser aumentada até que uma falha ocorra por fratura ou escoamento do material. Entretanto, quando a carga crítica Pcr é atingida, a coluna está no limite de tornar-se instável, de modo que uma pequena força lateral F, quando removida, vai fazê-la permanecer na posição fletida. Qualquer pequena redução de P para menos de Pcr permite que a coluna fique reta e qualquer aumento de P, além de Pcr, provoca aumento adicional da deformação lateral. A habilidade de restauração baseia-se em sua resistência à flexão.

A equação que relaciona o comprimento de uma estrutura com a carga crítica de Euler é dada pela equação seguinte:

$$P_{CRI} = \frac{\pi^2 EI}{L_f^2} \tag{1}$$

em que: E : módulo de elasticidade do material;  
I : momento de inércia do eixo analisado;  
L<sub>f</sub> : comprimento de flambagem;

Um dos principais fatores que afetam a flambagem, deflexão lateral, são as condições de contorno. Um exemplo são as formas de travamento, que afetam diretamente sobre o comprimento de flambagem ( L<sub>f</sub> ) da estrutura, que pode ser visto na figura a seguir.

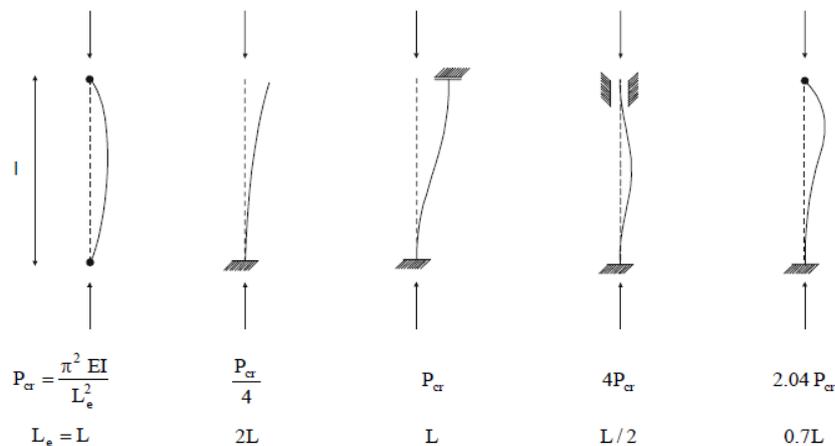


Figura 3 – Comprimentos de flambagem  
Fonte: Pinheiro (1989)



## 1.4 NBR 8800 (2008)

A norma brasileira de referência ABNT NBR 8800:2008 (Projeto e execução de estruturas de Aço de Edifícios – Métodos dos Estados Limites) estabelece um método para o cálculo da força axial resistente de cálculo, presente no item 5.3.2 da norma.

A força axial de compressão resistente de cálculo,  $N_{c,Rd}$ , de uma estrutura, associada aos estados-limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local, deve ser determinada pela expressão:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{at}}$$

Onde:

$\chi$  é o fator de redução associado à resistência à compressão;

$Q$  é o fator de redução total associado à flambagem local;

$A_g$  é a área bruta da seção transversal da barra.

Para a determinação dos parâmetros consultar a NBR 8800 (2008) e seus anexos.

## 2 METODOLOGIA

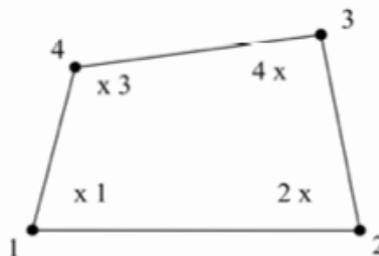
### 2.1. Generalidades do Modelo Numérico

Utilizou-se para realização das análise numérica o software computacional ABAQUS, o qual tem por base o método dos elementos finitos. O uso do programa se adequou aos objetivos pois possui uma extensa biblioteca de elementos que podem modelar virtualmente qualquer geometria, além de uma extensa lista de modelos de comportamento de materiais capazes de simular a maioria dos materiais utilizados na engenharia.

O método dos elementos finitos utilizado no programa é baseado na aproximação do ponto de equilíbrio de um corpo sob o ponto de vista Lagrangiano, isto é, analisando cada ponto material do corpo como função de suas coordenadas (x,y,z) no espaço e do tempo. As equações de equilíbrio são obtidas através do método do trabalho virtual.

Nos pilares de perfis metálicos de abas paralelas estudadas, a espessura das mesas e da alma se torna insignificante quando comparadas ao comprimento do vão. Por esse motivo, foi utilizado no trabalho um modelo de casca (Shell) para efetuar as análises, em detrimento de um modelo sólido.

O elemento finito utilizado foi o S4 , de quatro nós, por estar-se trabalhando apenas com geometrias retangulares.



**Figura 4** – Elemento finito utilizado

Fonte: Manual Abaqus (2012)

Esse elemento finito tem curvatura dupla, integração completa, com deformação finita de membrana e de aplicação geral. Além disso, possui seis graus de liberdade por nó, referentes a 3 translações e a 3 rotações segundo um sistema de 3 eixos (x,y,z.). Os pilares analisadas foram todas discretizadas utilizando malhas compostas pelo elemento finito S4. Os quais foram considerados como biapoiadas, com comprimento de flambagem  $L_f = 2 L$ .



Para a definição da geometria da viga utilizou-se o sistema geral de coordenadas do ABAQUS, em que a origem está localizada na metade da altura da seção transversal, no meio do vão da viga. A direção do eixo y coincide com a da altura da alma, e o eixo z com a do comprimento do vão.

## 2.2. Condições de Contorno

Para a simulação de um pilar biapoiado os travamentos foram realizados de forma diferente em cada extremidade do pilar, na extremidade carregada foi realizado o travamento da translação entorno do eixo x e y, e liberada na direção z, que corresponde com a direção da aplicação da carga. Já a rotação foi travada na direção x e z e liberada e y. Em relação a extremidade apostada a da aplicação da carga a translação foi travada em todos os eixos e a rotação liberada somente na direção y. Isso para a análise na direção de menor inercia do pilar.

Durante o processo de aplicação da carga, devido a problemas de plasticidade, a extremidade na qual a carga seria aplicada foi dividida assim como a carga total, que foi aplicada em cada um dos nós da estrutura.

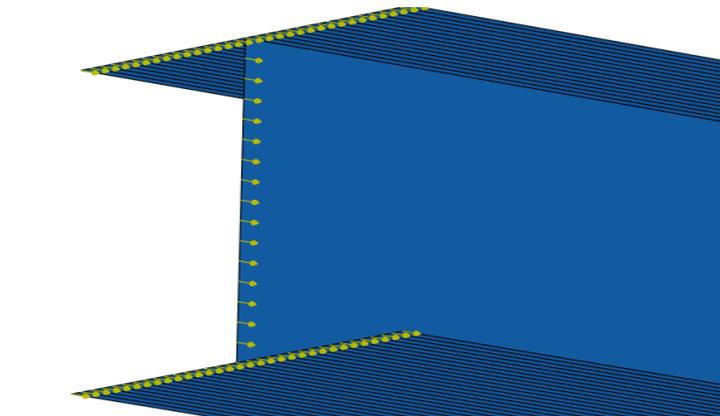


Figura 5 – Distribuição do carregamento  
Fonte: Autor (2015)

## 2.3. Propriedade do Material

Adotou-se nos modelos o diagrama de tensão versus deformação do aço como o mostrado na próxima figura, sendo ele composto por uma zona elástica, a qual permanece até que se alcance a tensão de escoamento  $f_y$ , e por uma zona inelástica, constituída por três retas que perdura até a resistência de ruptura  $f_u$ .

O aço estrutural considerado foi o ASTM A572-GRAU 50, o qual é utilizado para fabricação de perfis laminados no Brasil. Este aço possui modulo de elasticidade transversal E igual a 200 GPa, Resistencia ao escoamento  $f_y$  igual a 345 MPa e resistência de ruptura  $f_u$  igual a 450 MPa.

As deformações correspondentes ao final de cada zona (E, I, II e III) constam na tabela 1.

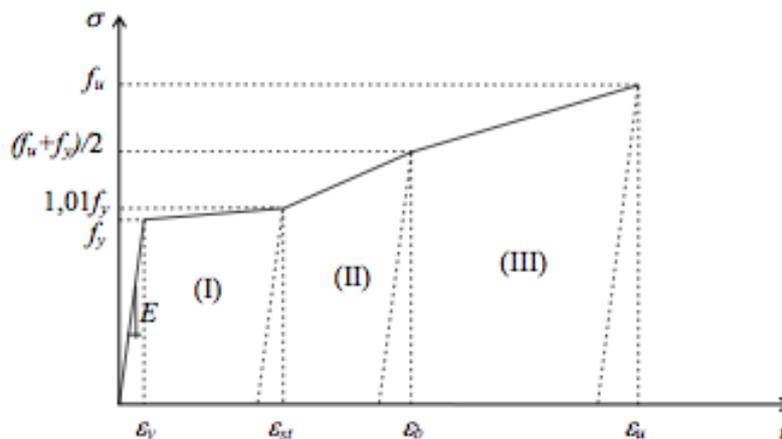


Figura 6 – Diagrama tensão-deformação  
Fonte: Bezerra (2010)



**Tabela 1:** Deformações correspondentes ao fim de cada região

Região	Tensão ( $\sigma$ , MPa)	Deformação ( $\epsilon$ , m/m)
E	345,6	0
I	355,8	0,01726
II	442,55	0,05394
III	576,73	0,15719

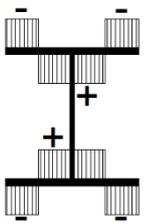
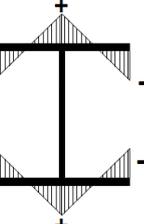
Fonte: Autor (2015)

Assim, foram dadas condições para o programa ABAQUS realizar simulações do comportamento elasto-plástico do aço, possibilitando também análises não-lineares.

#### 2.4. Modelos de Tensões Residuais

Para os modelos de tensão residual simulados se utilizou o perfil laminado de abas paralelas **W200x46,1**, padrão GERDAUAÇOMINAS, será analisado um pilar birrotulado com os índices de esbeltez 18, 36, 54, 72, 90, 108, 126, 144, 162, 180, 198, 216 e 225, cuja mesa do perfil, por toda sua extensão, foi dividido em 16 partes para a distribuição das tensões residuais. O aço escolhido tem módulo de elasticidade  $E = 20000 \text{ kN/cm}^2$  e tensão de escoamento  $\sigma_y = 34,5 \text{ kN/cm}^2$ . O valor da tensão residual de compressão máxima  $\sigma_{rc}$  foi adotado como sendo  $0,3\sigma_y$ , conforme estudam Kanchanalai (1977), Chen e Toma (1994), Chen et al. (1996), Kim e Chen (1996a, 1996b), entre outros. O carregamento foi incrementado, gradativamente, de 0,5% até a força normal de escoamento da seção na compressão centrada do perfil  $P_y = A_f y = 1990,10 \text{ kN}$ .

**Tabela 1:** Configuração das tensões residuais.

CONFIGURAÇÃO	DISTRIBUIÇÃO		TENSÃO RESIDUAL DE TRAÇÃO ( $\sigma_{rt}$ )	MODELO
	MESA	ÁLMA		
	LINEAR	SEM	$\sigma_{rt} = -\sigma_{rc}$	1
	LINEAR	SEM	$\sigma_{rt} = -\sigma_{rc}$	2
	LINEAR	CONST.	$\sigma_{rt} = \frac{t_f b_f}{t_f b_f + t_w d_w} \sigma_{rc}$	3



			Onde: $d_w = d - 2t_f$	
	LINEAR	LINEAR	$\sigma_{rt} = -\sigma_{rc}$	4
	PARAB.	CONST.	$\sigma_{rt} = \frac{2t_f b_f}{4t_f b_f + 3t_w d_w} \sigma_{rc}$	5

### 2.5. Análise Numérica

Inicialmente, para parâmetro de comparação, realizou-se uma análise linear, para a obtenção pelo software, da carga crítica de Euler. Essas cargas críticas dadas pelo ABAQUS são chamadas de autovalores, além desses valores também se obtêm os chamados modos de flambagem, que são os autovetores. Na figura 9 pode-se observar a flambagem de um pilar pelo software Abaqus para a abtenção da carga crítica de Euler.

Para os modelos foi feita uma análise com a consideração das não-linearidades do material, bem como a não-linearidade da geometria. Utilizou-se para isso o processo incremental iterativo Riks modificado, um processo fornecido pelo ABAQUS.

O problema posterior à flambagem exato não pode ser analisado diretamente devido à descontinuidade da resposta no ponto em que o valor da carga alcança o valor da carga crítica de flambagem. Para que esse problema possa ser resolvido, obtendo uma resposta continua, é introduzido um imperfeição inicial na geometria “perfeita” que o modelo possui. A introdução dessa imperfeição física é feita multiplicando-se o autovetor correspondente ao modo de flambagem por um fator que tem por objetivo trazer a imperfeição. Para essa imperfeição, utilizou-se o fator L/1000, sendo L o comprimento destravado do pilar. Introduz-se também as tensões residuais, conforme a conveniência.

O método de Riks não permite a obtenção direta da carga crítica, pois os dois são incógnitas. A análise tem fim quando a solução (carga e deslocamento) satisfaz um critério de parada. No modelo executado, o critério de parada adotado foi o ponto em que a análise atingisse 100 incrementos, ou o valor máximo dos 100 incrementos. Após a obtenção deste valor do incremento, esse deve ser multiplicado pelo autovalor, aplicado para a análise não-linear, para a obtenção da carga crítica.

## 3 RESULTADOS

Nos gráficos a seguir pode ser analisado os resultados obtidos pela simulação com os diversos modelos de distribuição de tensão residual e os valores obtidos pela NBR 8800:2008, além dos valores obtidos pela equação de Euler.

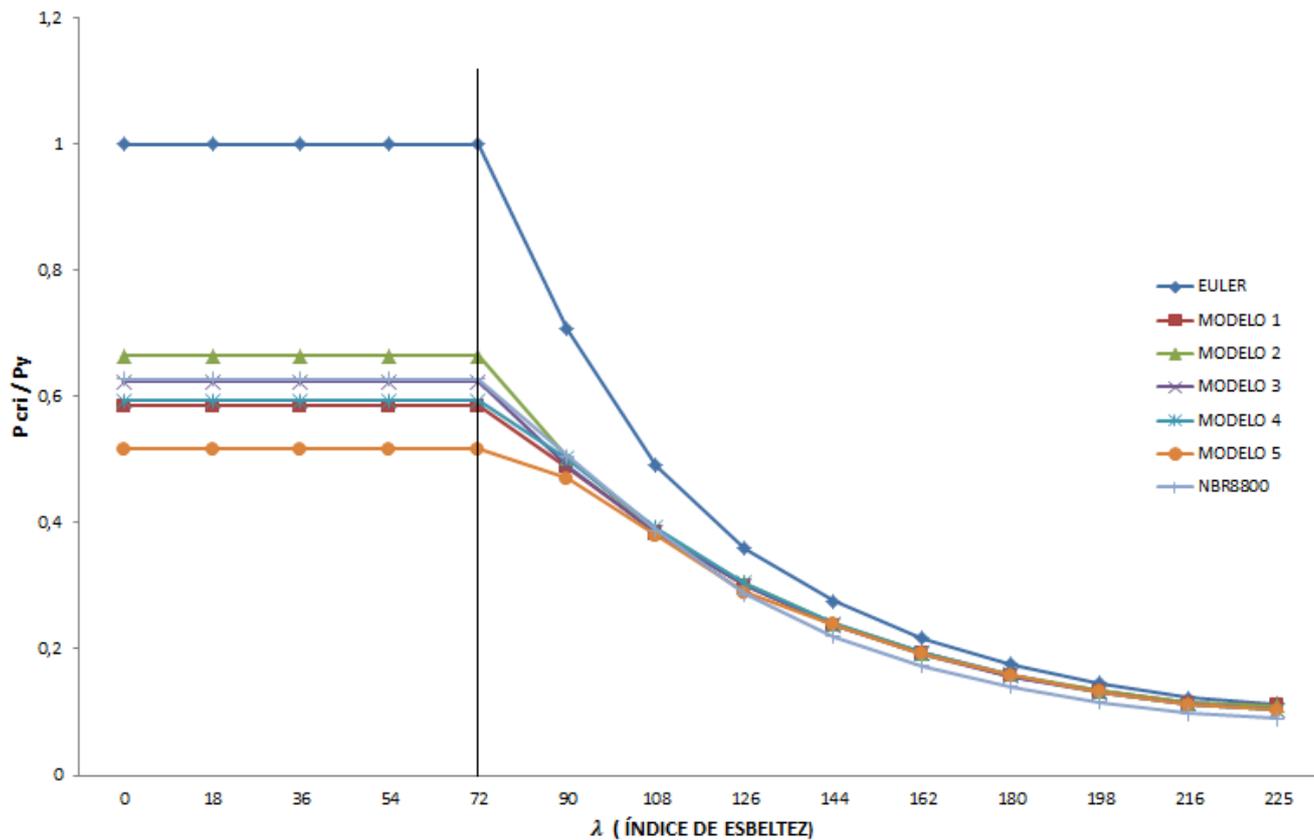


Figura 8 – Gráfico Pcr/Py X λ

Fonte: Autor (2015)

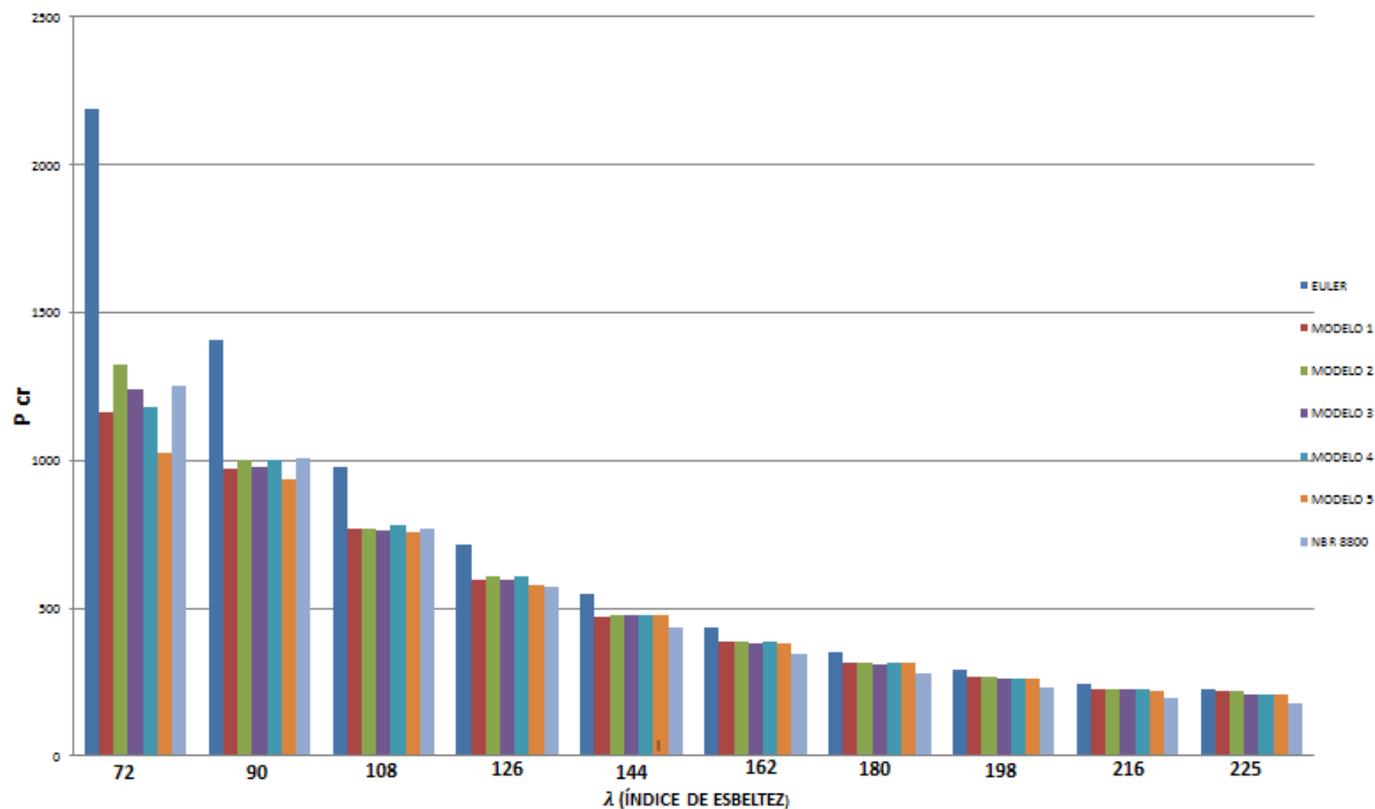
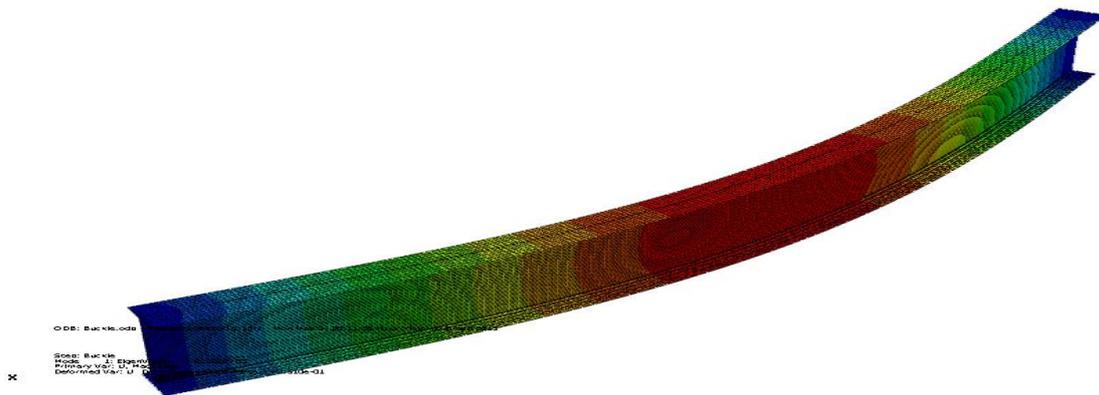


Figura 9 – Gráfico Pcr X λ

Fonte: Autor (2015)

**Figura 9 – Flambagem em perfil simulado**

Fonte: Autor (2015)

#### 4 CONCLUSÃO

De acordo com as análises realizadas no software Abaqus se observou que quanto mais curto o pilar, ou seja, quanto menor o índice de esbeltez, maior é a influência das tensões residuais com relação às cargas críticas de Euler, ou seja, quando se realiza o dimensionamento de pilares com baixo índice de esbeltez maior deve ser a preocupação com o efeito das tensões residuais.

Pode-se observar também que de acordo com os resultados apresentados na figura 8, existe um patamar em que as tensões residuais não possuem mais efeito sobre a carga crítica de flambagem do pilar, esse patamar, o qual está marcado o seu início com a linha vertical traçada na figura 8, indica o ponto no qual o pilar atinge o seu ELU, estado limite último, não pela flambagem, mas sim pela plastificação do material. Esse patamar que corresponde ao ponto em que o material se plastifica é aquele em que  $P_{cri} = P_y$ , e que de acordo com a equação 1, corresponde ao comprimento perto de 3,72 m ou índice de esbeltez de 72.

Concluiu-se também que os diversos modelos de tensões residuais aplicados não apresentam grande diferença, quanto ao resultado da carga crítica de flambagem, em pilares com maiores índices de esbeltez, ou seja, quanto maior o comprimento do pilar menor a diferença dos resultados obtidos para cada modelo. Assim também pode-se observar que para valores maiores do índice de esbeltez as curvas da figura 8 se aproximam da curva ideal de Euler. Além disso, observa-se que o modelo 5 é o qual apresenta maior diferença com a curva de Euler, sendo portanto o modelo que requer maior atenção para o dimensionamento de pilares.

Além disso pode-se observar que os valores obtidos pela NBR 8800:2008 é mais moderada para valores mais elevados de índice de esbeltez, ou seja, os valores de  $P_{cri}$  são menores do que os obtidos nas simulações, já para valores pequenos de índice de esbeltez a valores da NBR se aproximam mais do modelo com distribuição constante de tensão residual

Portanto concluímos que as tensões residuais possuem papel importante na resistência a compressão dos pilares metálicos, e deve ser um fator que deve ser levado em consideração pelos calculistas estruturais.

#### REFERÊNCIAS:

ALMEIDA A. C. B. (2006) **Análise Inelástica de Pórticos Planos Considerando a Plasticidade Distribuída e o Efeito das Tensões Residuais nos Perfis Estruturais de Aço**. 2006. 165 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ABREU P. M. L (2010) **Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares**. 2010. 76 p. Programa de pós-graduação em engenharia de estruturas - Universidade Federal de Minas Gerais.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, **NBR 8800 – Projeto e execução de estruturas de Aço de Edifícios** – Métodos dos Estados Limites, Rio de Janeiro, 2008.