

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE ELASTO-PLÁSTICA DE PÓRTICOS DE AÇO PARA PAVILHÕES INDUSTRIAIS¹

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE FOR ELASTO-PLASTIC ANALYSIS OF PORTAL FRAMES FOR INDUSTRIAL BUILDINGS

GUILHERME SANTANA ALENCAR

UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro/RJ.
guilhermesalencar@gmail.com

EDSON TEJERINA CALDERÓN

UEG - Universidade Estadual de Goiás, Docente do Curso de Engenharia Civil, Anápolis/GO.
edtejerin@uol.com.br

JOSÉ GUILHERME SANTOS DA SILVA

UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro/RJ.
jgss@uerj.br

Resumo: As propriedades físicas do aço conferem ao material uma aptidão particular para a análise de sistemas estruturais com base no emprego de metodologias de dimensionamento plástico. O dimensionamento plástico de estruturas de aço é empregado, por exemplo, no projeto de pavilhões industriais com perfis laminados. Assim sendo, este trabalho de pesquisa apresenta como objetivo principal a modelagem numérica, análise e dimensionamento de pórticos metálicos para pavilhões industriais, onde os esforços são obtidos a partir de uma análise elasto-plástica. O método utilizado é o das análises elásticas sucessivas, com sucessiva formação de rótulas plásticas. Para tal, foi desenvolvido um programa computacional. A ferramenta numérica desenvolvida conta com um pré-processador gráfico com interface amigável para o usuário, auxiliando o mesmo na edição e visualização do modelo estrutural. Após a fase de análise, os resultados obtidos são convenientemente visualizados por um pós-processador gráfico que exhibe os deslocamentos e esforços do sistema estrutural investigado. Estes esforços são utilizados para o dimensionamento dos perfis estruturais, e, também, são comparados com a análise linear-elástica. Os resultados obtidos indicam que os modelos estruturais investigados neste estudo podem ser projetados de forma mais eficiente e econômica, com base no emprego de análises elasto-plásticas.

Palavras-chave: Pórticos de aço. Pavilhões industriais. Dimensionamento plástico. Modelagem computacional.

Abstract: The physical properties of steel give to the material a particular suitability for analysis of structural systems based on the use of plastic design methodologies. Plastic design of steel structures is employed, eg, in the design of industrial buildings with rolled profiles. Therefore, this research work has as main goal the numerical modeling, analysis and design of steel frames for industrial buildings, where results are obtained from an elasto-plastic analysis. The method used is that of successive elastic analysis, with successive formation of plastic hinges. A computational program was developed. The The numerical tool developed has a graphical

¹ Texto encaminhado pelo primeiro autor e apresentado no Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2014), Fortaleza (Ceará, Brasil), 23 a 26/11/2014.

preprocessor with friendly user interface, aiding in the same screen edition and visualization of the structural model. After the analysis phase, the results obtained are conveniently visualized by a graphic post-processor that displays the displacement of the structural system and results investigated. These results are used for the sizing of structural members, and are also compared with the linear elastic analysis. The results indicate that the structural models investigated in this study can be designed more efficiently and economically based on the use of elasto-plastic analysis.

Key-words: Steel frames. Industrial Buildings. Plastic design. Computational modeling.

1 INTRODUÇÃO

No mercado brasileiro da construção em aço observa-se atualmente uma predominância de estruturas de um único pavimento, destinadas ao uso comercial e industrial, como por exemplo, os galpões, ou pavilhões. Dentro desse importante segmento, determinados sistemas estruturais podem ser mais competitivos caso sejam empregados métodos de dimensionamento plástico. O dimensionamento plástico de estruturas em aço pode ser utilizado, por exemplo, no projeto de pavilhões industriais com perfis laminados. Assim sendo, este trabalho de pesquisa apresenta como objetivo principal a modelagem numérica, a análise e o dimensionamento de pórticos metálicos para pavilhões industriais, com esforços obtidos a partir de uma análise elasto-plástica.

Com a publicação da especificação LFRD em 1986 passou-se a enfatizar a importância de verificar os elementos em dois estados, primeiro sob cargas de serviço, quando geralmente as estruturas permanecem no regime elástico, e depois sob cargas majoradas, quando há a probabilidade de ocorrer um comportamento não-linear. Segundo McGuire (1992), desde que os regulamentos passaram a adotar o método dos estados limites, deve-se abandonar qualquer noção remanescente de que “dimensionamento elástico” e “dimensionamento plástico” são filosofias independentes competindo entre si.

Atualmente, a análise estrutural elasto-plástica no estado limite último está bem estabelecida no Reino Unido e em países de língua inglesa, mas não é maciçamente utilizada em outros países, como é observado por Salter et al (2004, p. 32). Segundo o AISC (1959), construções com base em análises elasto-plásticas expeditas são realizadas intensivamente no Reino Unido desde 1954, como pode ser observado na obra *The Steel Skeleton* (Baker et al, 1954) e Neal (1956). Após a consolidação das pesquisas em métodos de dimensionamento plástico na década de 50, as universidades, os institutos de pesquisa e as associações de promoção do aço na construção civil passaram a publicar tabelas técnicas e ábacos que pudessem popularizar estes métodos entre os engenheiros estruturais. Uma das primeiras publicações que continham tais ábacos foi o guia do AISC intitulado *Plastic Design in Steel*,

de 1959, fruto das pesquisas realizadas no Laboratório de Engenharia John Fritz da Universidade Lehigh nos Estados Unidos. Atualmente, estas publicações podem ser encontradas no mercado editorial técnico-científico da Europa e dos Estados Unidos, como Surtees e Yeap (1996) e Salter et al (2004) do *Steel Construction Institute*.

Sabe-se, no entanto, que o grande número de parâmetros que influenciam na escolha da solução (parâmetros geométricos, modulação do galpão, localização das restrições locais dos elementos, estado de carregamento, propriedades dos materiais, condições de apoio, etc), acaba por restringir o uso das tabelas e dos ábacos a casos particulares. Assim, diante dessas limitações, percebeu-se a necessidade de desenvolver ferramentas computacionais que pudessem auxiliar o engenheiro estrutural em estudos preliminares de pavilhões em aço cobrindo as mais variadas condições. Dentre essas ferramentas, destaca-se, por exemplo, o *PortalPlus*, criado pela organização francesa CTICM (Centro Técnico da Construção Metálica Industrializada) e disponibilizado gratuitamente. Com este programa é possível obter os esforços e as deformações deste tipo de estrutura com base numa análise elástica e dimensionar os perfis metálicos com base no regulamento europeu. Decidiu-se, assim, neste trabalho, desenvolver uma ferramenta que pudesse complementar o uso do *PortalPlus* e fosse capaz de realizar uma análise elasto-plástica de modo a conhecer a resposta não-linear física de pavilhões industriais em aço. O programa desenvolvido no presente trabalho deve ser considerado como uma ferramenta extra para o engenheiro estrutural, e não pretende ser um programa para o projeto definitivo deste tipo de estrutura, que deverá incluir verificações adicionais.

2 MODELO ESTRUTURAL

As dimensões que definem o modelo estrutural de um pavilhão industrial com perfis laminados são mostradas na

Figura 1, onde se dividem em dois tipos, a saber, dimensões construtivas e teóricas. As ligações, tanto entre os elementos de viga e pilar, como entre os pilares e a fundação podem assumir comportamento flexível, semi-rígido ou rígido.

Quanto aos reforços existentes na ligação viga-coluna do pórtico, estes podem ser formados a partir de corte da mesma seção utilizada para a viga e soldadas nesta. Além de facilitar o lançamento da viga na coluna, ao oferecer uma maior área de contato por meio de uma chapa de topo, os reforços tem a função de melhorar a eficiência estrutural global do pórtico, pois geralmente as solicitações máximas ocorrem nestas ligações.

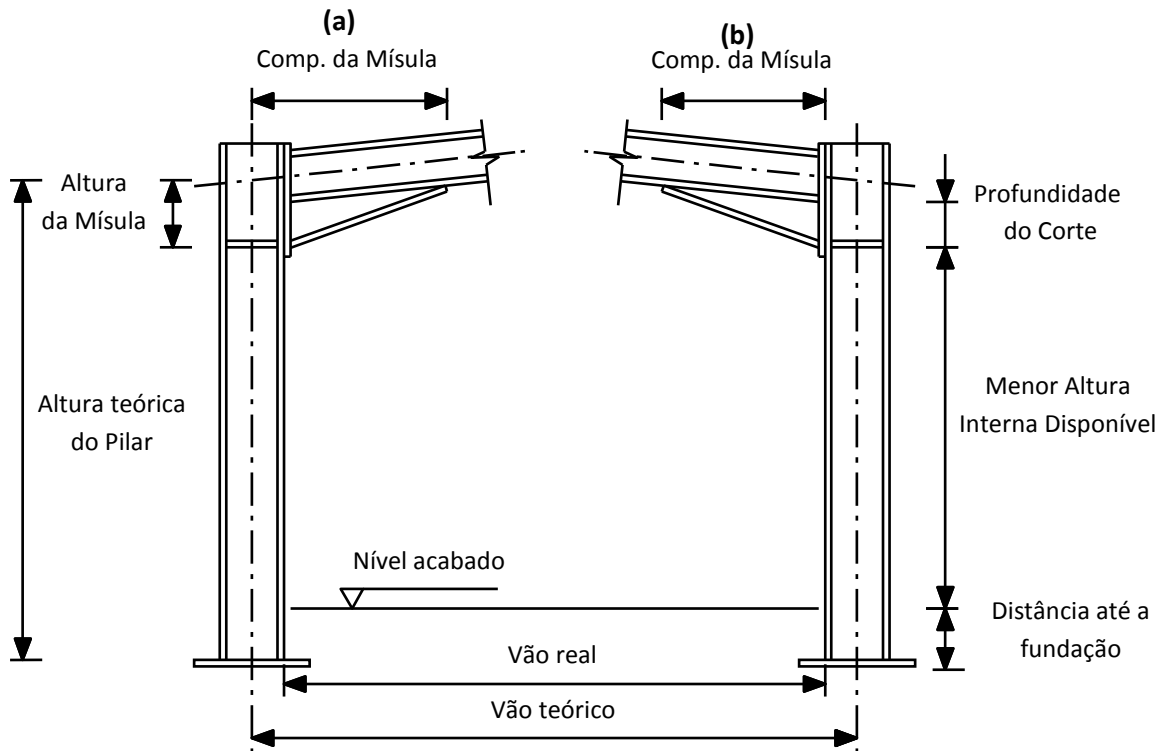


Figura 1. Definição geométrica da estrutura, (a) dimensões teóricas do modelo estrutural, (b) dimensões reais da estrutura. Fonte: Autores, 2014.

É geralmente aceito que este reforço será mais eficiente em termos de projeto se a sua altura máxima abaixo da mesa for aproximadamente igual à altura da viga e o comprimento teórico do reforço for aproximadamente 10% do vão teórico (Salter et al, 2004, p. 16). Para a análise, interessa conhecer como as propriedades geométricas da seção variam a cada posição. De maneira prática, uma boa simplificação para o cálculo da inércia é desconsiderar a mesa intermediária da seção [ver Figura 2 (b)]. Calcula-se agora a inércia de um perfil I de altura $h+b_1$, onde h é a altura da seção, b_1 é a altura do reforço, bf é a largura das mesas, e tw e tf são as espessuras da alma e da mesa, respectivamente:

$$I_x = \frac{bf(b_1 + h)^3 - (bf - tw)(b_1 + h - 2tf)^3}{12} \quad (1)$$

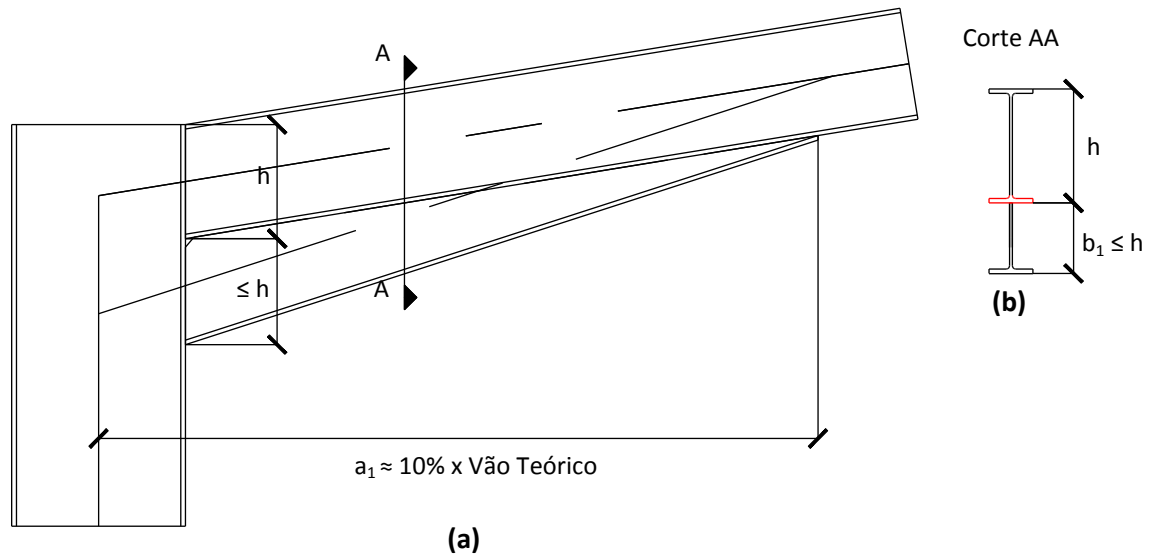


Figura 2. (a) Aspecto geral do reforço (b) Corte AA exibindo a seção. Fonte: Autores, 2014

A inércia da seção da Figura 2 (b) também pode ser calculada de modo mais rigoroso através do Teorema de Steiner. A Figura 3 compara a inércia exata obtida pelo Teorema de Steiner com a inércia simplificada obtida pela Eq. (1), para o perfil W360x39. O erro advindo da simplificação é a favor da segurança, e torna-se menor com o aumento da altura do reforço.

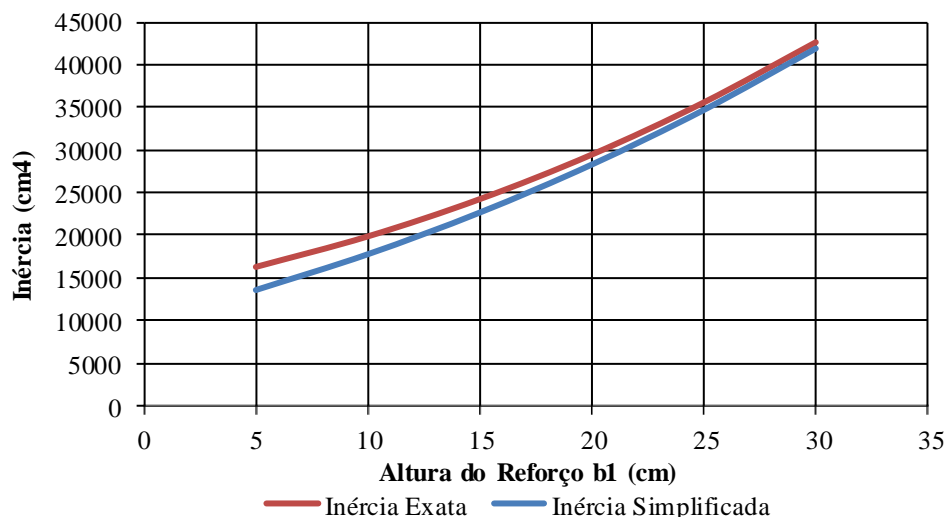


Figura 3. Variação da Inércia com variação da altura de um reforço para o perfil W360x39. Fonte: Autores, 2014.

3 METODOLOGIA

O método empregado na análise estrutural será o das Análises Elásticas Sucessivas. Sempre que um nó do modelo estrutural atingir o momento plástico da seção, a análise reinicia-se e o modelo é modificado com o aparecimento de uma rótula física com momento

constante. Em cada etapa, os deslocamentos e os esforços são obtidos através de uma formulação matricial clássica do método dos deslocamentos. Este processo é iterativo, e ocorre até que a estrutura fique instável por causa de um número excessivo de rótulas físicas.

A função de escoamento Φ que traduz o comportamento descrito está representada na Equação (2), onde M é o momento de cálculo atuante e M_p é o momento plástico da seção.

$$\Phi = \frac{|M|}{M_p} \leq 1,0 \quad (2)$$

Uma rotina de computador baseada neste procedimento foi desenvolvida, e abrange o caso de pórticos planos com carregamentos nodais.

3.1 Pré-dimensionamento estrutural

Nesta seção será apresentado um método de pré-dimensionamento devido a Horne (1979) para o pavilhão abaixo, cujas propriedades geométricas estão representadas na Figura 4 (a) e são h_1 , altura da coluna, h_2 , altura da água, L_1 , metade do vão teórico, a_1 , comprimento do reforço e b_1 , altura do reforço.

O método é baseado no Método das Forças, o que implica a adoção de uma estrutura isostática principal, como representada na Figura 4 (b), onde M , V e H são os esforços do nó C e na Figura 4 (c) tem-se o diagrama de momentos fletores correspondente. Para um estágio de pré-dimensionamento, a combinação de ações que inclui a sobrecarga como ação variável principal e o peso próprio dos elementos da cobertura é suficiente, como representado pelo carregamento de cálculo q_d na Figura 5. Depois de pré-dimensionado, todas as demais combinações deverão ser verificadas, com especial atenção à ação do vento.

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 recomenda, no item B.5.1, que, nas coberturas comuns, na ausência de especificação mais rigorosa, deve ser prevista uma sobrecarga característica de $0,25 \text{ kN/m}^2$, em projeção horizontal. Quanto ao peso próprio dos elementos da cobertura, D'Alambert (2005) recomenda adotar para este tipo de edificação os seguintes valores: $0,05 \text{ kN/m}^2$ para terças e tirantes, $0,05 \text{ kN/m}^2$ para contraventamentos e entre $0,06$ a $0,12 \text{ kN/m}^2$ para as telhas.

Em relação ao peso próprio da viga, este é de difícil estimativa *a priori*, em função do número de variáveis que influenciam o problema. Alternativamente, Salter et al (2004) propõe uma relação para a altura dos perfis das vigas para pavilhões industriais entre aproximadamente vão/50 e vão/60. Este critério, no entanto, é conservador, pois, se for considerado o vão de 45 metros, para este critério, a menor altura aconselhada seria de 750

mm. Mas, no mercado da construção em aço com perfis laminados no Brasil, a maior altura disponível é de 616 mm, isto é, o W 610x174. Além disso, este critério tem o problema, que, nas estruturas metálicas, perfis laminados de altura aproximadamente iguais podem ter pesos bastante distintos (compare, por exemplo, o W 360x32,9 de altura 348 mm e o W 360x79, com mais de o dobro do peso e de 354 mm de altura).

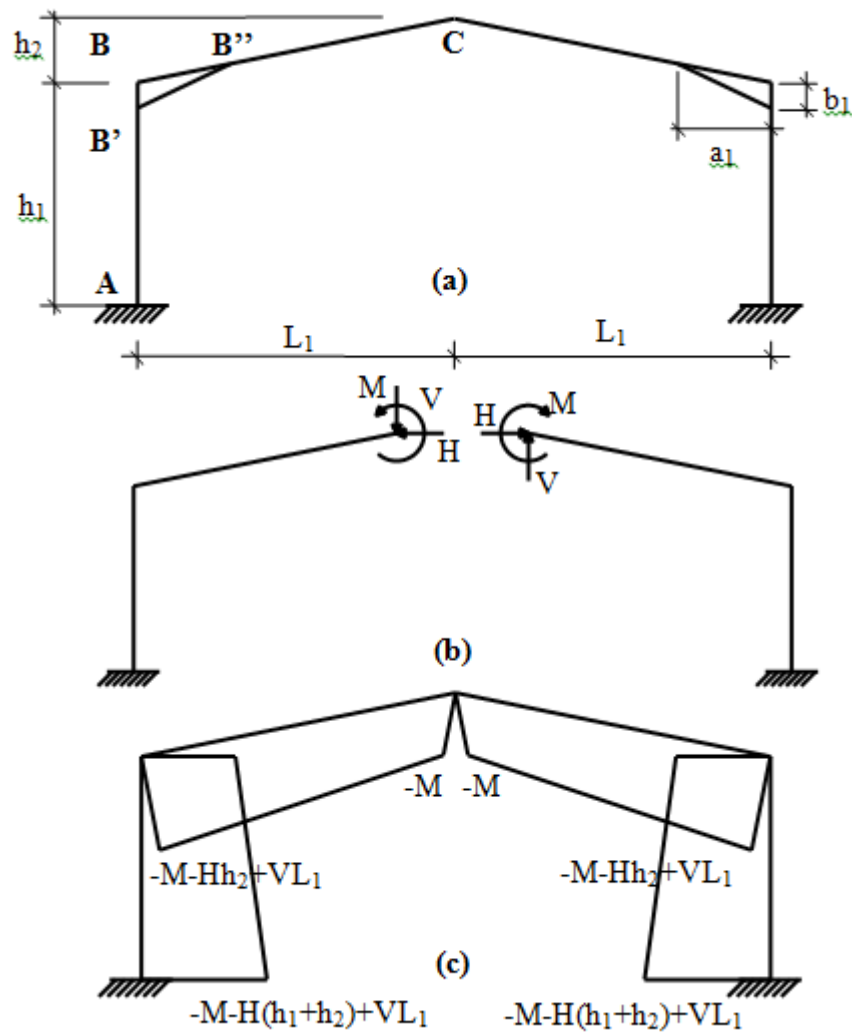


Figura 4. (a) Dimensões do modelo teórico (b) Estrutura isostática base (b) Diagrama de momento fletor na estrutura isostática base. Fonte: Autores, 2014.

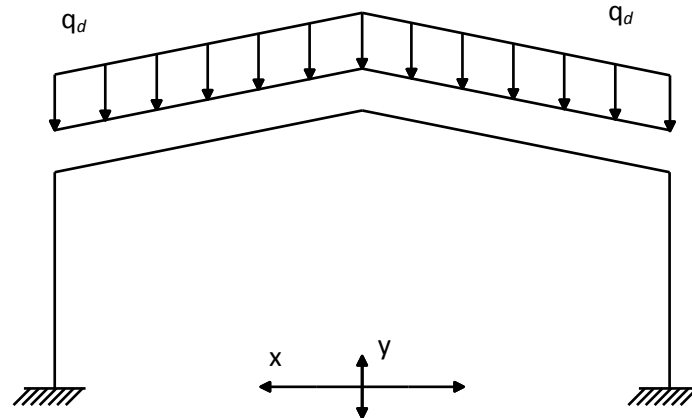


Figura 5. Carregamento gravitacional. Fonte: Autores, 2014

Assim, um critério prático é limitar o peso linear do perfil laminado a 50% do carregamento de cálculo, sendo que soluções que se aproximam disso já têm boas chances de serem consideradas como antieconômicas. Por exemplo, utilizando os coeficientes em combinação última da Tabela 1 da ABNT NBR 8800:2008, e um espaçamento entre pórticos de 6 m, chega-se ao seguinte carregamento de cálculo q_d :

$$q_d = 6 \cdot [1,35 \cdot (0,05 + 0,05 + 0,12) + 1,5 \cdot (0,25)] = 4,03 \text{ kN/m} \quad (3)$$

Para vencer os maiores vãos de pavilhões industriais com perfis laminados, que estão entre 45 e 50 metros, suponha que a solução mais antieconômica seja adotada para as vigas, isto é, o W 610x174 (1,71 kN/m), o último perfil disponível na tabela comercial. Então, o seu peso em combinação última representaria 57% do carregamento calculado na Equação (3). No entanto, soluções mais econômicas estão, na verdade, em aproximadamente até 10 ou 30% do carregamento calculado para suportar. Este critério é, portanto, uma boa estimativa para o peso próprio do perfil da viga a ser incluído no carregamento de cálculo em níveis de pré-dimensionamento.

Conhecendo-se o carregamento de cálculo, pode-se agora estabelecer no sistema isostático principal o efeito dessa carga distribuída, através do equilíbrio de momentos tendo como origem o ápice, chegando-se às Equações (4), onde M_x^{BC} representa o valor do momento fletor da viga entre os nós BC numa abscissa x qualquer.

$$\left\{ \begin{array}{l} M_A = \frac{q_d L_1^2}{2} - M - H(h_1 + h_2) + VL_1 \\ M_{B'} = \frac{q_d L_1^2}{2} - M - H(b_1 + h_2) + VL_1 \\ M_B = \frac{q_d L_1^2}{2} - M - Hh_2 + VL_1 \\ M_{B''} = \frac{q_d (L_1 - a_1)^2}{2} - M - \frac{Hh_2(L_1 - a_1)}{2} + V(L_1 - a_1) \\ M_x^{BC} = \frac{q_d x^2}{2} - M - \frac{Hh_2 x}{L_1} + Vx \\ M_C = -M \end{array} \right. \quad (4)$$

O sistema de Equações (4) é indeterminado, a não ser que seja adotada uma hipótese para a plastificação das seções. A hipótese mais aceita para a posição das rótulas plásticas para pórticos com simetria geométrica e de carregamento é indicada na

Figura 6.

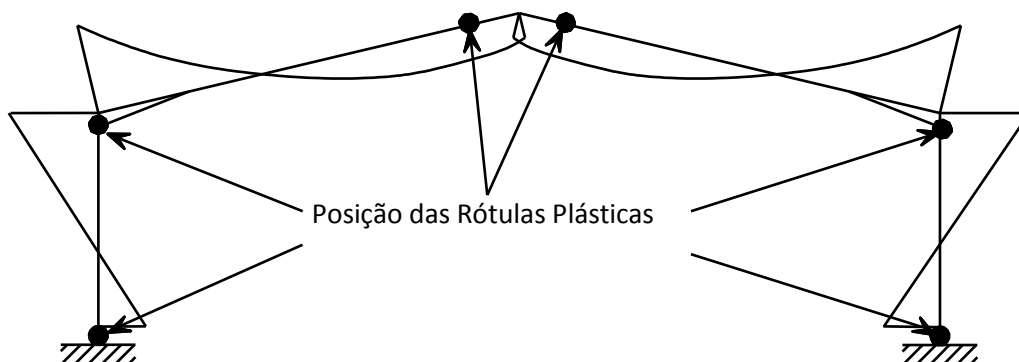


Figura 6. Hipótese adotada da posição das rótulas plásticas. Fonte: Autores, 2014

Assim, desprezando o esforço cortante nas Equações (4), que é mínimo, e igualando ao momento plástico as seções que se plastificam, chega-se ao seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} M_A = \frac{q_d L_1^2}{2} - M - H(h_1 + h_2) = Mp_{\text{pilar}} = \beta Mp_{\text{viga}} \\ M_{B'} = \frac{q_d L_1^2}{2} - M - H(b_1 + h_2) = -Mp_{\text{pilar}} = -\beta Mp_{\text{viga}} \\ M_x^{BC} = \frac{q_d x^2}{2} - M - \frac{Hh_2 x}{L_1} = Mp_{\text{viga}} \end{cases} \quad (5)$$

Resolvendo-se as Equações (5), chega-se à expressão abaixo para o momento plástico:

$$Mp_{\text{viga}} = \frac{q_d (x^2 - L_1^2)(b_1 - h_1)L_1}{2L_1 [b_1 - h_1 - \beta(b_1 + h_1 + 2h_2)] + 4h_2\beta x} \quad (6)$$

Derivando-se a Equação (6) em relação à abscissa x e igualando a zero, obtêm-se a posição de momento fletor máximo entre os nós BC, que coincidirá com a posição da rótula plástica.

$$x = \frac{L_1 \left(\pm \sqrt{[(b_1 + h_1)\beta - b_1 + h_1][(b_1 + 4h_2 + h_1)\beta - b_1 + h_1]} + (b_1 + h_1 + 2h_2)\beta - b_1 + h_1 \right)}{\beta h_2} \quad (7)$$

A Equação (7) dá a posição da rótula plástica na viga BC, e é útil para determinação da modulação das terças e restrição apropriada das mesas. Retornando com o valor de x nas Equações (5) e (6) obtêm-se os esforços aproximados do ápice e pode-se pré-dimensionar a viga e o pilar com base na resistência plástica das seções.

3.2 Estabilidade de pórticos de vigas inclinadas

O dimensionamento plástico de estruturas metálicas resulta geralmente em estruturas bastante esbeltas, o que aumenta o risco de instabilidade dos elementos, podendo ser necessário verificar a estabilidade global e local da estrutura para uma análise de segunda ordem. Existem diversas maneiras de avaliar os efeitos de segunda ordem, seja através de métodos exatos ou aproximados.

Os métodos aproximados desenvolveram-se numa época em que não havia meios computacionais suficientemente difundidos para permitir análises exatas, e exibem bons resultados quando comparados com os métodos exatos. Destaca-se, por exemplo, para estruturas em Concreto Armado, o método baseado no coeficiente γ_z , recomendado pela ABNT NBR 6118:2014. Para Estruturas Metálicas, a ABNT NBR 8800:2008 adota o método baseado nos Coeficientes B_1 e B_2 da norma americana AISC 360-10, de mesma filosofia do

método da carga crítica elástica α_{cr} da norma europeia EN1993-1-1:2010 (cláusula 5.2.1(4)B). Estes coeficientes são úteis para avaliar a sensibilidade da estrutura quanto aos efeitos de segunda ordem, e, dependendo de certos limites, o engenheiro estrutural pode ficar obrigado a realizar uma análise de segunda ordem com amplificação dos esforços. De um modo geral, uma correlação entre os coeficientes dos dois regulamentos pode ser estabelecida:

$$B_2 \approx \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \quad (8)$$

O Anexo D da ABNT NBR 8800:2008 fornece fórmulas para o cálculo do coeficiente B_2 , mas, apesar de a norma brasileira não fazer restrição destas equações para determinadas tipologias, a norma europeia restringe as equações disponíveis para o cálculo de α_{cr} , para o caso de pórticos com vigas de inclinação e esforços axiais reduzidos (veja as cláusulas 5.2.2(5)B e 5.2.1(4)B) – isto é, as equações disponíveis são aplicáveis na verdade a pórticos regulares de edifício de múltiplos andares, como mostra implicitamente a Figura D.1 da norma brasileira. No caso de pórticos de vigas inclinadas, como os analisados neste trabalho, a viga pode ser condicionante para a estabilidade da estrutura e o esforço axial atuante na viga pode ser suficiente para reduzir significativamente a estabilidade do pórtico (Simões e Gervásio, 2007, p. 114). Deste modo, para levar em conta o esforço axial da viga inclinada, King (2001) recomenda equações alternativas para o cálculo do coeficiente α_{cr} especificamente para tipologias de pavilhões industriais de vigas inclinadas, com bases rotuladas ou engastadas.

O cálculo de α_{cr} deve ser realizado para todas as combinações últimas de ações, e será crítico o menor valor α_{cr} . Assim, a estrutura estará dispensada de uma análise de segunda ordem se, de acordo com a cláusula 5.2.1(3) da EN 1993-1-1:2010 forem atendidos os seguintes limites:

$$\begin{aligned} \alpha_{cr} &\geq 10 \text{ (em análise elástica)} \\ \alpha_{cr} &\geq 15 \text{ (em análise plástica)} \end{aligned} \quad (9)$$

Na norma brasileira, estes limites são análogos a limitar o coeficiente B_2 em aproximadamente 1,1, classificando-se a estrutura, então, como de pequena deslocabilidade.

4 PROGRAMA COMPUTACIONAL

O programa desenvolvido neste trabalho foi denominado *plasticFrame Tool* e escrito na linguagem de programação PHP, com recurso à Orientação de Objetos. A interface gráfica foi desenvolvida em HTML5, CSS e jQuery, que possibilita a atualização dos resultados integrando as fases de pré- e pós-processamento, como na Figura 7, onde pode-se alterar as dimensões da estrutura e visualizar o diagrama de momentos fletores.

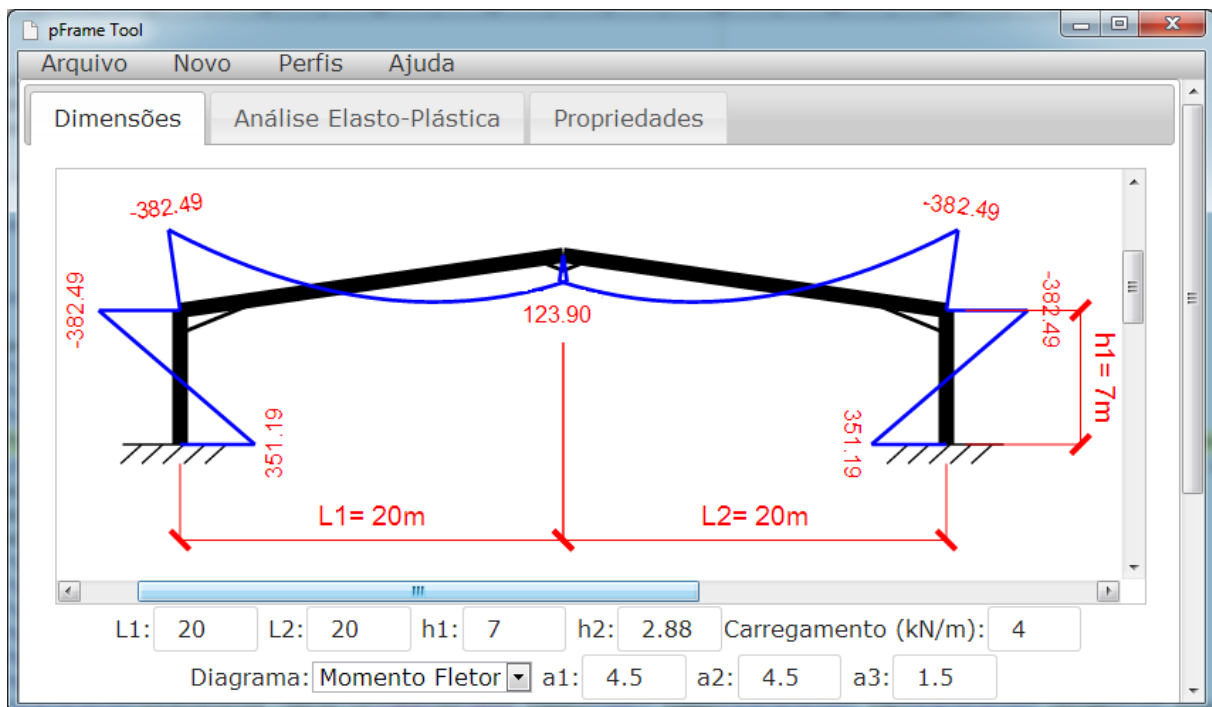


Figura 7. Dimensões do pórtico e Momentos Fletores em kNm. Fonte: Autores, 2014

A rotina de análises elásticas sucessivas para análise não-linear física foi desenvolvida em FORTRAN. O programa permite visualizar os diagramas de esforços cortantes, normais e de momento fletor, além da deformada da estrutura. Como o programa foi desenvolvido para ser executado sob um navegador, é independente de plataforma e pode ser executado tanto num computador *Desktop* (qualquer sistema operacional) como num *mobile*. É permitido ao usuário alterar as propriedades geométricas dos pórticos; a altura e o comprimento dos reforços; as propriedades do material (módulo de elasticidade do aço, tensão de escoamento); os limites de deformação exigidos; as condições de apoio (se engastado, se apoiado). Os perfis disponíveis para escolha são os perfis laminados W da siderúrgica Gerdau Açominas, e estão gravados num banco de dados. A Figura 8 mostra o aspecto da deformada exagerada de um pórtico de aço.

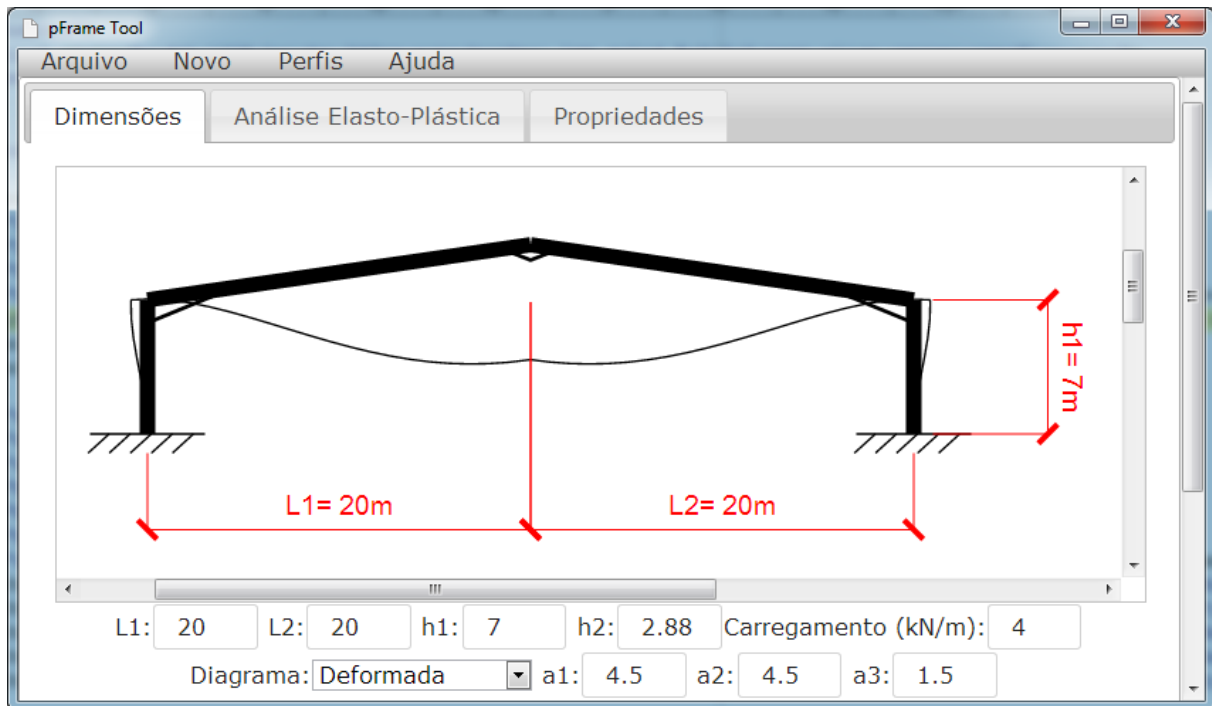


Figura 8. Aspecto da deformada exagerada de um pórtico em aço. Fonte: Autores, 2014

Os gráficos gerados automaticamente pelo programa estão no formato *SVG*, sigla para *Standard Vector Graphics*. Este formato foi adotado, pois permite a visualização de imagens vetoriais em diversos navegadores. Além disso, este é facilmente convertido em *DXF*, formato vetorial popularmente utilizado entre engenheiros e arquitetos.

5 EXEMPLOS NUMÉRICOS

5.1 Pórtico de Moy

O exemplo a seguir é inspirado em Moy (1981) e foi modelado para validar os resultados de uma análise elasto-plástica. Trata-se de um pórtico bi-engastado [ver Figura 9]. Foi utilizado o perfil W 360x44 para os pilares e a viga. O material é o aço ASTM A572 Grau 50, com de tensão de escoamento de 345 Mpa e módulo de Young de 200 GPa. O momento plástico da seção é de 270,60 kNm. As cargas H e V possuem intensidade igual a 1 kN e estão multiplicadas por um fator de carregamento λ . O pórtico foi analisado segundo o método das análises elásticas sucessivas, cuja metodologia foi descrita anteriormente. Os resultados da análise encontram-se na Tabela 1, divididos em etapas da análise.

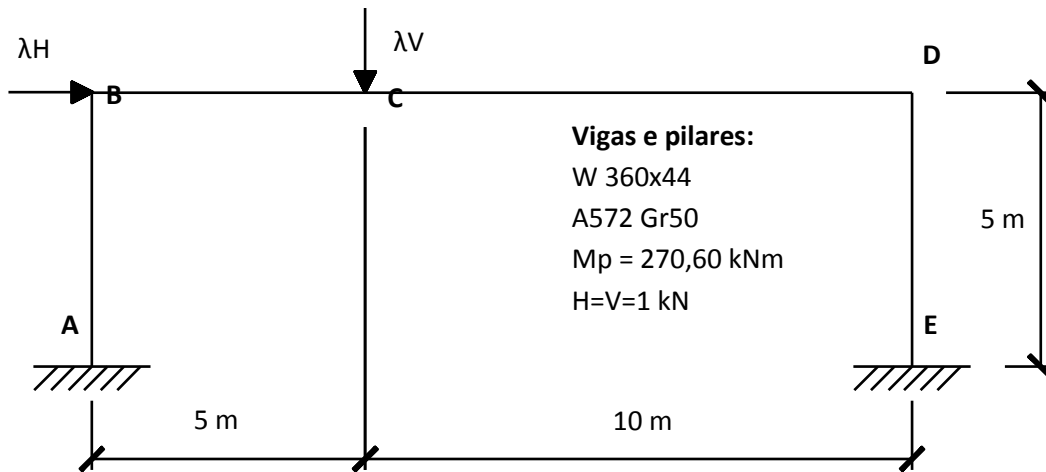


Figura 9. Pórtico de aço com viga e pilares em perfil W 360x44. Fonte: Autores, 2014

Tabela 1. Resultados das análises elásticas sucessivas do pórtico de Moy.

Nº. da Análise	Nó da Rótula	Momentos Fletores (kNm)					λ
		A	B	C	D	E	
1º	E	123,04	82,40	225,97	220,22	270,60	106,29
2º	C	173,92	84,92	270,60	262,42	270,60	124,41
3º	D	181,93	90,97	270,60	270,60	270,60	126,43
4º	A	270,60	135,30	270,60	270,60	270,60	135,30

Fonte: Autores, 2014

O procedimento é interrompido na 4º análise, obtendo-se uma carga última de colapso plástico de 135,3 kN, valor que também pode ser obtido pela geometria do mecanismo de colapso mais crítico, como representado na Figura 10.

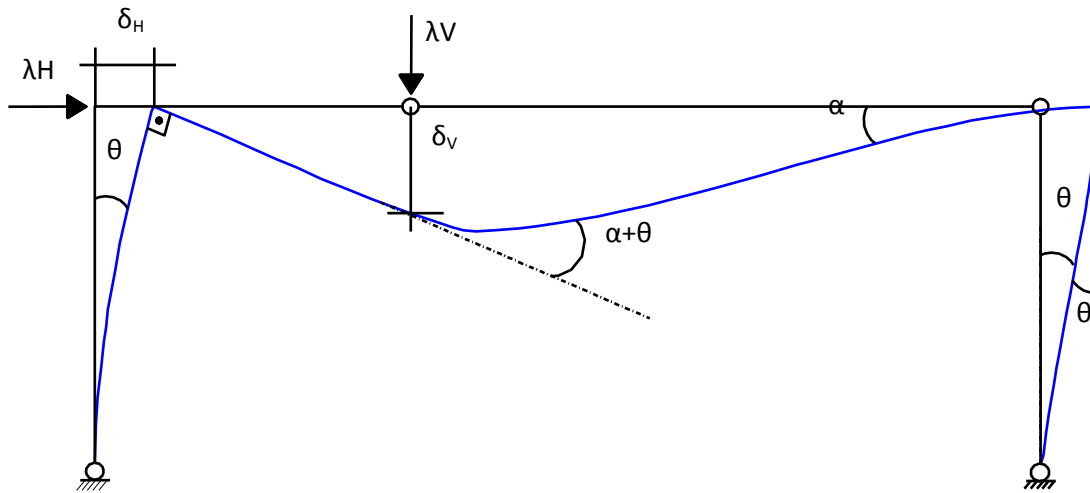


Figura 10. Mecanismo de colapso combinado de viga e andar do exemplo 1. Fonte: Autores, 2014

Pela geometria do mecanismo de colapso e assumindo pequenos deslocamentos, chega-se às Equações (10), onde δ_V e δ_H são os deslocamentos vertical e horizontal dos nós C e B, respectivamente, e α e θ são as rotações dos nós D e E, respectivamente.

$$\begin{cases} \delta_V = \delta_H = 10 \cdot \tan(\alpha) = 10\alpha \\ \delta_H = 5 \cdot \tan(\theta) = 5\theta \\ \alpha = \theta / 2 \end{cases} \quad (10)$$

Aplicando-se o princípio dos Trabalhos Virtuais e utilizando as Equações (10) chega-se ao valor do multiplicador último de colapso plástico, que coincide com o valor obtido numericamente [ver Equações (11)].

$$\begin{aligned} Mp \cdot \theta + Mp \cdot (\theta + \alpha) + Mp \cdot (\theta + \alpha) + Mp \cdot \theta &= \lambda \cdot V \cdot \delta_V + \lambda \cdot H \cdot \delta_H \\ \lambda &= \frac{5Mp}{10} = 135,3 \end{aligned} \quad (11)$$

O programa também é capaz de obter os deslocamentos dos nós em cada etapa da análise. O gráfico da Figura 11 exhibe o deslocamento horizontal do nó B, com o comportamento característico de uma análise estrutural com não linearidade física, com perda da rigidez global da estrutura conforme o carregamento é incrementado.

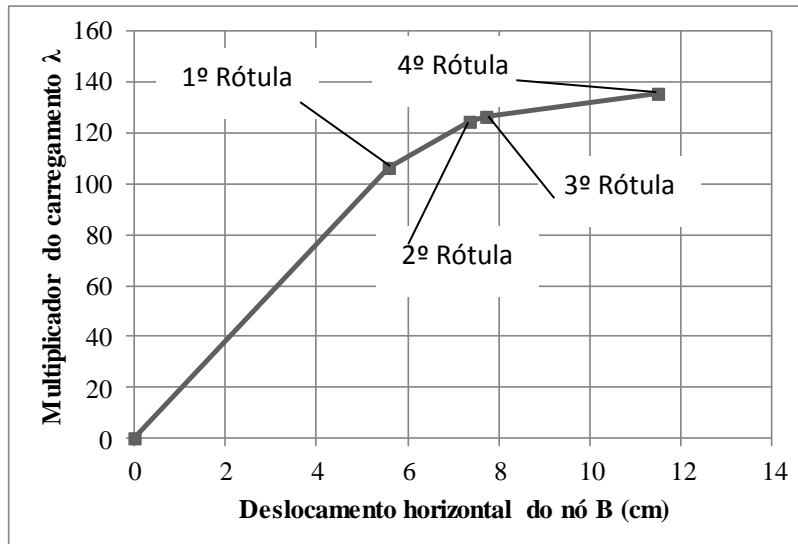


Figura 11. Multiplicador do carregamento versus Deslocamento horizontal do nó B. Fonte: Autores, 2014

5.2 Pórtico para pavilhão industrial

Considere um pórtico para pavilhão industrial com as seguintes propriedades geométricas: $L_1 = 30$ m, $h_1 = 6$ m, $h_2 = 1,5$ m, $b_1 = 0,8$ m, $a_1 = 3$ m, $\beta = 1,00$ e espaçamento entre pórticos de 7,5 m. Da Eq. (7) obtêm-se a posição da rótula plástica $x = 1,51$ m. O carregamento de cálculo é estimado segundo a Eq. (12), sendo o peso próprio do perfil estimado em 10% do carregamento de cálculo:

$$qd_{ELU} = 7,5 \cdot [1,35 \cdot (0,05 + 0,05 + 0,12) + 1,5 \cdot 0,25] \cdot (1,00 + 0,10) = 5,54 \text{ kN/m} \quad (12)$$

Substituindo este valor na Equação (6), e reajustando a posição da rótula plástica para coincidir com a restrição oferecida pela terça, isto é, $x = 2$ m, obtêm-se o valor do momento plástico da viga e do pilar igual a 218,03 kNm. Com um aço com tensão de escoamento f_y de 345 Mpa, obtêm-se o módulo plástico Z_x necessário para a viga e o pilar, onde γ_{al} é o ponderador das resistências da ABNT NBR 8800:2008:

$$Z_x = \frac{\gamma_{al} M_p}{f_y} = \frac{1,1 \times 21803 \text{ kNcm}}{34,5 \text{ kN/cm}^2} = 695,17 \text{ cm}^3 \quad (13)$$

Escolhe-se, portanto, o perfil W 410x38,8 ($Z_x = 736,8 \text{ cm}^3$). O pré-dimensionamento do pórtico utilizando este perfil é mostrado na Figura 12. Agora, com o perfil selecionado deve-se recalculer o carregamento de cálculo:

$$q_{d_{ELU}} = 7,5 \cdot [1,35 \cdot (0,05 + 0,05 + 0,12) + 1,5 \cdot 0,25] + 38,8 \cdot 9,81 / 1000 = 5,42 \text{ kN/m} \quad (14)$$

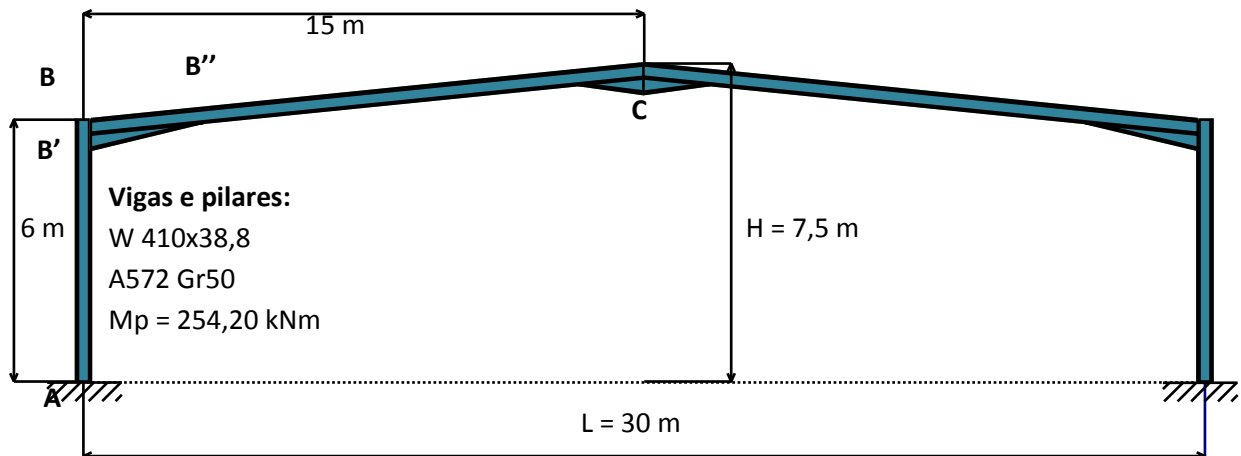


Figura 12. Pórtico para pavilhão industrial. Fonte: Autores, 2014

Procede-se agora a uma análise elasto-plástica do modelo estrutural, obtendo-se os esforços de momento fletor em estado limite último, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados das análises elásticas sucessivas do pórtico para pavilhão industrial.

Nó da Rótula	Momentos Fletores (kNm)					λ	q_d (kN/m)
	A	B'	B	B''	C		
B'	211,74	-254,20	-325,88	-137,90	68,27	0,913	5,06
A	254,20	-254,20	-332,41	-130,80	76,68	1,020	5,53
BC ($\chi=4,05m$)	254,20	-254,20	-332,43	-137,38	149,98	1,626	8,81

Fonte: Autores, 2014

Segundo a Tabela 2, os primeiros nós a plastificarem estarão nas colunas para um carregamento distribuído de 5,06 kN/m, menor que o carregamento de cálculo em estado limite último. Observe que, caso fosse empregado somente uma análise elástica, o perfil selecionado para a coluna deveria ser substituído pelo próximo da série com momento de plastificação superior, isto é, o W 410x46,1. Ainda, a Figura 13 mostra a posição das rótulas plásticas e o fator de carga associado a cada uma das análises.

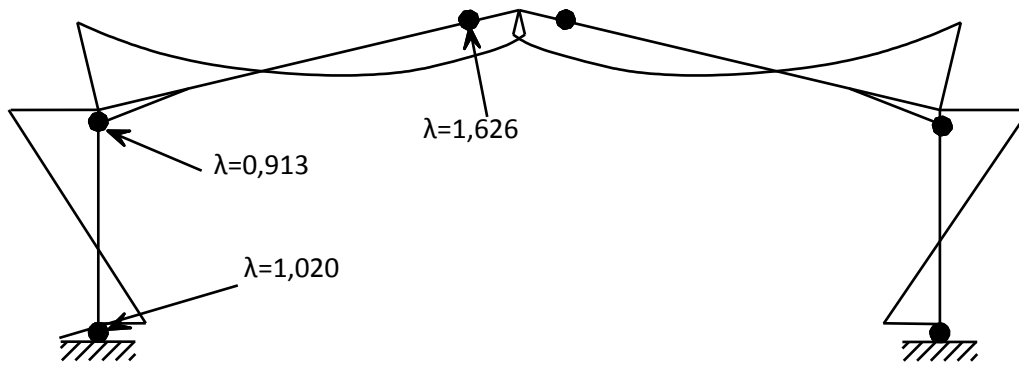


Figura 13. Posição das rótulas plásticas (supercolapso) e fator de carga associado. Fonte: Autores, 2014

Para o estado limite de serviço, com carregamento de cálculo segundo a Equação (15), a estrutura permanece no regime elástico e as deformações vertical e horizontal máximas são de aproximadamente $L/222$ e $H/393$, respectivamente, em que L é. respeitando, portanto, limites de deformação razoáveis.

$$qd_{ELS} = 7,5.[1,00.(0,05 + 0,05 + 0,12) + 0,70.0,25] + 38,8.9,81/10^3 = 3,34kN/m \quad (15)$$

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estruturas de galpões ou pavilhões industriais em aço com perfis laminados possuem uma infinidade de aplicações na construção e na indústria, tais como lojas, academias, ginásios cobertos, depósitos, garagens, entre outros. Portanto, neste trabalho foi desenvolvida uma rotina de análise elasto-plástica de pórticos planos em aço, que acompanha uma interface gráfica que torna fácil a inserção dos dados e visualização dos resultados pelo usuário.

Analisou-se um pórtico exemplo com características dos perfis e materiais utilizados no Brasil e que pudesse validar os resultados de uma análise elasto-plástica encontrada na bibliografia (Moy, 1981). Além disso, o resultado também foi validado por um método clássico de análise elasto-plástica via Princípio dos Trabalhos Virtuais.

Foi apresentado um método de pré-dimensionamento dos perfis, com exemplo de aplicação em um pórtico de pavilhão industrial com 30 metros de vão, 6 metros de altura, 7,5 metros de espaçamento entre pórticos e 10 % de inclinação da cobertura. Neste exemplo, mostrou-se que o perfil W410x38,8 pode ser adotado para a coluna e a viga deste pavilhão, para as condições de carregamento apresentadas. Os resultados da análise mostraram que caso não se assumisse a plastificação da seção B' [ver Fig. 12], seria necessário adotar o perfil

W410x46,1 para as colunas. Assim, os resultados obtidos indicam que os modelos estruturais investigados neste estudo podem ser projetados de forma mais eficiente e econômica, aproveitando a capacidade plástica das seções com redução de aproximadamente 18% do peso das colunas, com base no emprego de análises elasto-plásticas.

7 REFERÊNCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Plastic design in steel**. Chicago: AISC, 1959.

BAKER, J. F.; HEYMAN, J.; HORNE, M. R. **The steel skeleton**. Cambridge: Cambridge University Press, 1954.

D'ALAMBERT, F. **Galpões em pórticos com perfis estruturais laminados**. Belo Horizonte: GERDAU / AÇOMINAS, 2005. Disponível em: <http://www.skylightestruturas.com.br/downloads/manual_galpao.pdf>. Acesso em: 12/12/2014.

HORNE, M. R. *Plastic theory of structures*. Oxford: Pergamon Press, 1971.

KING, C. M., **In-plane stability of portal frames to BS 5950-1:2000**. Leeds: Steel Construction Institute, 2001.

MCGUIRE, W. **Computers and steel design**. Chicago: Engineering Journal / AISC, 1992.

MCGUIRE, W., GALLAGHER, R. H.; ZIEMIAN, R. D. **Matrix structural analysis**. New York: Wiley, 2000.

MOY, S. J. *Plastic methods for steel and concrete structures*. London: Macmillan Press, 1981.

NEAL, B.G. *The plastic methods of structural analysis*. London: Chapman & Hall, 1956.

SALTER, P. R., MALISK, A. S., KING, C. M. **Design of single-span steel portal frames to BS 5950-1:2000**. Leeds: Steel Construction Institute / British Library, 2004.

SILVA, L. S., GERVÁSIO, H.. **Manual de dimensionamento de estruturas metálicas: métodos avançados**. Coimbra, 2007.

SIMÕES, R.A.D. *Manual de dimensionamento de estruturas metálicas*. Coimbra: CMM, 2007.

SURTEES, J. O., YEAP, S. H. Load-strength charts for pitched roof, haunched steel portal frames with partial base restraint. **The Structural Engineer**, London, v. 74, n. 1, 1996. Disponível em: <<http://www.istructe.org/journal/volumes/volume-74-%28published-in-1996%29/issues/issue-1/articles/load-strength-charts-for-pitched-roof,-haunched-st>>. Acesso em: 02/12/2014.

