

O USO DIDÁTICO DE ENSAIOS NA DISCIPLINA DE ESTRUTURAS METÁLICAS

Carlos Eduardo Javaroni – javaroni@feb.unesp.br

Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Unesp, Campus de Bauru
Av. Eng. Luis Edmundo Carrijo Coube, 14-01
17033-360 – Bauru – São Paulo

***Resumo:** No ensino da disciplina Estruturas Metálicas o entendimento dos modos de falhas relacionados à flambagem local e global é de fundamental importância para a previsão da resistência nominal da barra, quer seja comprimida ou fletida. Entretanto, o fenômeno da flambagem exige o conhecimento de conceitos abstratos e o uso de equações matemáticas que causam, muitas vezes, grande falta de interesse de muitos alunos pelo tema abordado. Trata-se de um fenômeno de difícil visualização e compreensão pelo aluno, principalmente nos perfis abertos de paredes finas, sujeitos aos modos de flambagem geralmente não abordados nas disciplinas de Resistência dos Materiais nas quais se apresenta a flambagem por flexão somente. Desta forma, a apresentação desses modos de falhas aos alunos através da realização de ensaio muito pode contribuir no processo ensino-aprendizado da disciplina. Este artigo apresenta alguns experimentos conduzidos com os alunos, em sala de aula e em laboratório específico, no desenvolvimento da disciplina Estruturas Metálicas do curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Unesp, campus de Bauru.*

***Palavras-chave:** Ensino, Estruturas metálicas, Flambagem, Análise experimental.*

1 INTRODUÇÃO

Nos cursos de Engenharia Civil, o fenômeno da flambagem é abordado inicialmente nas disciplinas de Resistência dos Materiais, tratando-se da flambagem de Euler ou flambagem por flexão.

Entretanto, no ensino de disciplinas de Estruturas Metálicas, outros modos de flambagem estão associados às falhas das barras pelas particularidades das seções transversais utilizadas, em geral, abertas e de paredes finas.

O modo de flambagem por flexão já apresenta dificuldades adicionais relacionadas aos diferentes comprimentos efetivos de flambagem associados aos respectivos planos de flambagem. Os comprimentos efetivos de flambagem podem variar para cada plano tendo-se em vista a existência de diferentes tipos de vinculação e a existência ou não de contraventamentos.

Outros modos de flambagem, como os modos locais de chapa e distorcional, bem como a flambagem por torção, são estranhos aos alunos.

A resistência de um perfil de aço, seja uma barra comprimida ou uma viga, depende do conhecimento dos modos possíveis de falha para a sua previsão correta.

Muitas vezes não basta a apresentação de fotografias ou imagens para o melhor entendimento do fenômeno, sendo que, a visualização da falha durante a realização de um experimento específico torna o processo de ensino-aprendizagem mais atraente e a convicção de que a ocorrência do fenômeno é, de fato, a ruína da barra.

Complementando o ensaio, pode-se realizar a avaliação teórica da carga crítica para o experimento realizado e comparar esse valor com o resultado medido experimentalmente. Associa-se assim, o conceito teórico ao fenômeno físico onde se percebe uma maior motivação do aluno.

Os experimentos têm seus custos, exigem equipamentos e laboratórios específicos para serem realizados, requisitos nem sempre disponíveis na Instituição de Ensino. Entretanto, podem-se utilizar barras de pequenas dimensões com dispositivos de ensaios simples, muitas vezes rudimentares, os quais podem ser levados em sala de aula para a realização do ensaio.

Como parte do ensino da disciplina de Estruturas Metálicas, os alunos do curso de Engenharia Civil da Unesp, campus de Bauru, tem a oportunidade de assistirem aos ensaios realizados em laboratórios e a outros em sala de aula, onde os modos de flambagem podem ser observados para as barras comprimidas e para as vigas. Perfis já ensaiados armazenados e em momento oportuno, são apresentados aos alunos discutindo-se o modo de falha ocorrido.

2 MODOS DE FLAMBAGEM

Os perfis de aço estão sujeitos aos modos de falha por flambagem sob carregamentos menores que aqueles que correspondem à plastificação total ou parcial da sua seção transversal, fato que pode reduzir significativamente a sua resistência de projeto.

A flambagem pode ser classificada como sendo do tipo local ou global, podendo ocorrer um tipo ou interação entre eles. O tipo de instabilidade está condicionado às características geométricas dos perfis e às condições de vínculos e de carregamentos.

2.1 Barras axialmente comprimidas

A falha de um elemento comprimido poderá ocorrer por escoamento, flambagem global ou flambagem local das partes componentes do perfil. O colapso por escoamento poderá ocorrer nas barras com baixos valores do índice de esbeltez global (λ) e baixos valores de esbeltez local (relações b/t), isto é, nas barras “curtas” e com espessura de chapa relativamente alta. Entretanto, na grande maioria dos casos, o colapso é governado por fenômenos de instabilidade global ou local, ocorrendo, muitas vezes, a interação dos mesmos.

Com relação à flambagem global (flambagem da barra), é comum considerar-se apenas o caso particular da flambagem por flexão. Quando se trata de seções com dupla simetria, como por exemplo: seções quadradas, retangulares, circulares e tipo “I”, a flambagem por flexão é, de fato, predominante, porém, nem sempre crítica. Caso contrário, ou seja, para seções monossimétricas ou assimétricas, a análise do caso geral de instabilidade, a flambagem por flexão e torção, não deve ser desprezada.

No caso de seções duplamente simétricas, a flambagem dar-se-á por flexão em torno dos eixos principais (x ou y) ou por torção em torno do eixo longitudinal (z). O menor valor das respectivas forças críticas encontradas indicará a direção crítica.

No caso de seções monossimétricas, a flambagem dar-se-á por flexão em torno do eixo de não simetria ou por flexão em torno do eixo de simetria associada com torção. A condição crítica será dada pelo menor valor entre os dois valores de forças críticas correspondentes.

Já para as seções assimétricas, o modo combinado envolvendo flexão em torno dos dois eixos principais e torção ocorrerá sempre, e o valor da força crítica será o menor valor encontrado da solução da equação diferencial que governa o fenômeno.

No caso da flambagem local de chapa, esta se caracteriza pela ondulação dos elementos planos que compõe a seção transversal do perfil, podendo ocorrer na mesa ou na alma do perfil.

A flambagem por distorção caracteriza-se por apresentar rotação de cada aba e enrijecedor em torno da junção alma e aba em direções opostas e translação.

Nas fotos da “Figura 1” podem ser observados alguns modos de flambagem ocorridos para alguns tipos de barras comprimidas em ensaios realizados pelo autor junto ao Laboratório de Engenharia de Estruturas da Faculdade de Engenharia da Unesp de Bauru.

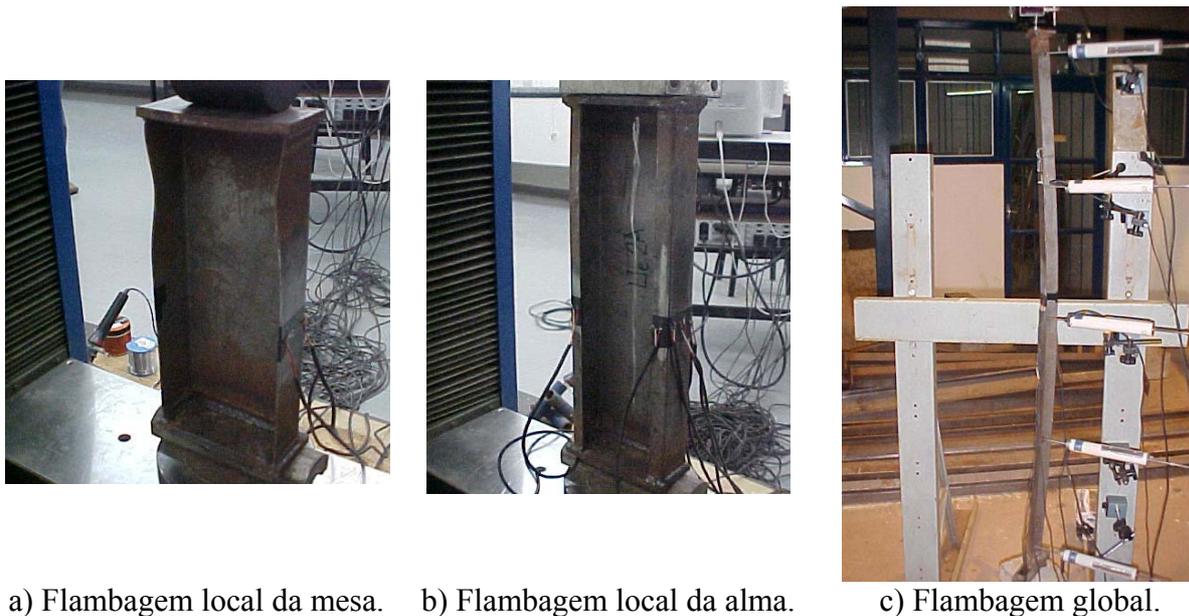


Figura 1 – Modos de flambagem para barras comprimidas.

2.2 Barras fletidas

As barras fletidas, ou simplesmente vigas, caracterizam-se por receberem forças perpendiculares ao seu eixo, originando os esforços de flexão: momento fletor e força cortante. Outros esforços podem aparecer em conjunto, como esforços de compressão (flexo-compressão) ou momento fletor nos dois eixos de flexão (flexão oblíqua).

No projeto de vigas em perfis de aço a resistência ao momento fletor deve ser determinada considerando-se os possíveis modos de falha: escoamento de uma fibra extrema da seção transversal ou plastificação, flambagem lateral com torção ou instabilidades locais (mesa e alma).

O início de escoamento da seção transversal ou a sua plastificação somente ocorrerá se os modos de flambagem local e global estiverem impedidos.

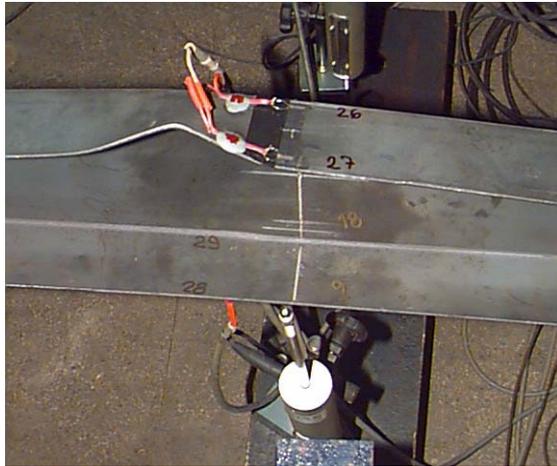
A flambagem local da mesa poderá ocorrer dependendo da relação de sua largura para a sua espessura. Evidentemente a flambagem somente poderá ocorrer na mesa comprimida, a qual estará sujeita à tensão uniforme de compressão.

A flambagem local da alma depende da relação da altura da alma pela espessura da chapa de aço, entretanto, este elemento estará sujeito à tensão gradiente. Ainda, a flambagem local da alma poderá ocorrer devido à existência das tensões tangenciais.

A flambagem distorcional ocorre com a rotação da parte comprimida da alma juntamente com a aba, podendo ocorrer translação na sua junção ou não.

A flambagem lateral com torção, ou seja, a flambagem global da barra ocorre com uma combinação de flexão e torção na viga.

Na “Figura 2”, as fotos ilustram dois modos de falha por flambagem local.



a) Flambagem local de chapa.



b) Flambagem distorcional.

Figura 2 – Flambagem local em perfis fletidos (JAVARONI, 1999, 2004).

Na “Figura 3” pode ser observado o modo de falha global, a flambagem lateral com torção.



Figura 3 – Flambagem lateral com torção de vigas (JAVARONI, 1999).

3 ASPECTOS TEÓRICOS

Na determinação da resistência nominal das barras de aço a correta avaliação da carga crítica de flambagem é fundamental.

Nos perfis de aço duas situações distintas devem ser observadas. A primeira no que diz respeito à flambagem global da barra e a segunda no que se refere à flambagem local da seção transversal da barra.

3.1 Flambagem local

Na análise dos perfis de aço sujeitos às tensões de compressão os elementos de chapa que compõe a seção transversal (mesa e alma) podem sofrer flambagem independentemente da barra como um todo.

Para a análise desse comportamento idealiza-se o elemento da seção como sendo uma chapa submetida à compressão. Na “Figura 4” podem ser observadas as idealizações feitas para os elementos de chapas de um perfil tipo I. Para a mesa comprimida, sob tensão constante, a idealização é de uma chapa apoiada em uma borda e livre na outra. Já para a alma do perfil, as duas bordas da chapa são apoiadas e a tensão de compressão é variável. Na “Figura 4” também pode ser observado a posição deformada da chapa após a flambagem.

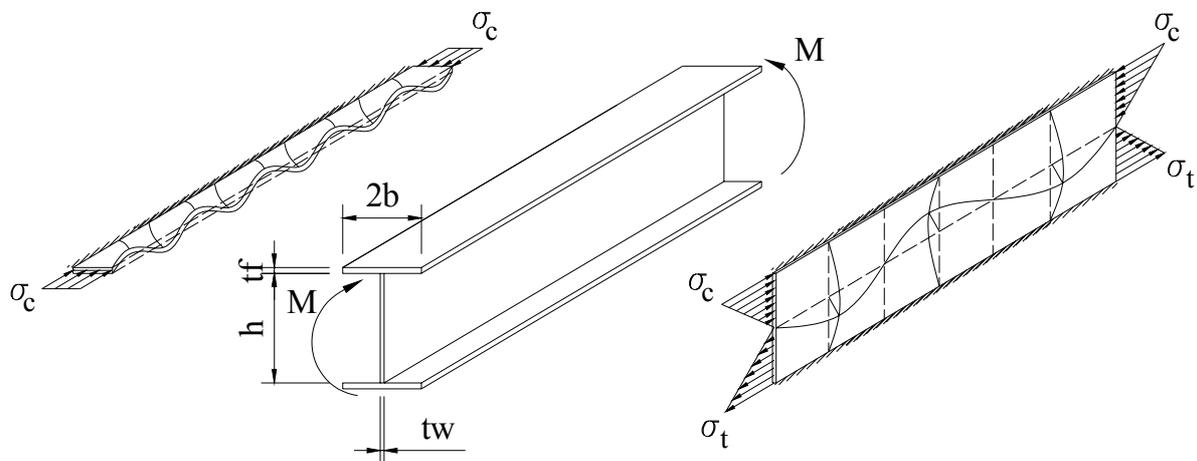


Figura 4 – Flambagem local para os elementos de chapa de um perfil tipo I.

A tensão crítica de flambagem de chapa é utilizada como referência, “Equação (1)”.

$$\sigma_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (1)$$

Pode-se observar de imediato, que o índice de esbeltez de uma chapa é dado pela relação largura/espessura do elemento, diferentemente do que se tem para a barra. Na “Equação (1)” E é o módulo de elasticidade do aço, ν é o coeficiente de Poisson para o aço e k é o coeficiente de flambagem de chapas, o qual depende das condições de apoio, das condições de carregamento e da relação comprimento/largura da chapa.

Outro modo de flambagem local é a flambagem por distorção que, para barras comprimidas, se caracteriza por apresentar rotação de cada aba e enrijecedores em torno da junção alma e aba em direções opostas. Quando submetidas à flexão, ocorre a flambagem da parte comprimida da alma juntamente com a aba, podendo ocorrer translação da junção da alma com a mesa na direção normal à alma ou não. Na “Figura 5” ilustram-se as diferentes situações da forma deformada para a seção transversal.

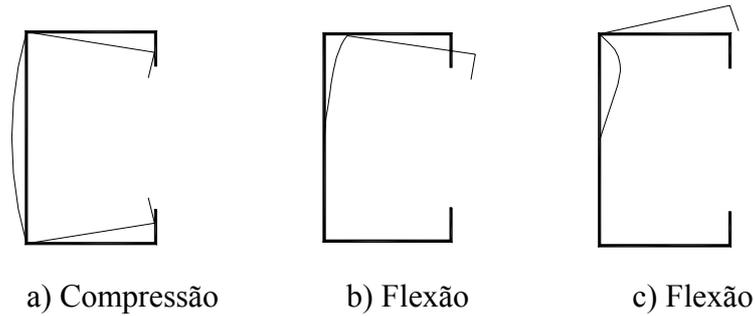


Figura 5 – Instabilidade por distorção.

O modo de instabilidade por distorção tem sido estudado sistematicamente por (HANCOCK, 1985) entre outros pesquisadores sob sua orientação, cujos estudos conduziram a expressões analíticas para o cálculo da carga crítica para barras comprimidas e para barras fletidas, (HANCOCK, 1985, 1997).

Tem-se como base para a obtenção da expressão analítica para o cálculo da carga crítica as equações obtidas por (TIMOSHENKO & GERE, 1961) e por (VLASOV, 1962) para a instabilidade de uma barra comprimida com apoio elástico contínuo.

O modelo representativo desses estudos idealiza a mesa e enrijecedor comprimido do perfil como uma barra comprimida sujeita à instabilidade por flexo-torção, apoiada elasticamente na alma. Este apoio é representado por uma mola lateral e outra mola rotacional. A seção formada pela parte comprimida é considerada indeformável no seu plano.

A expressão analítica é obtida inicialmente para uma barra comprimida, e posteriormente alterada para barras fletidas. Esta alteração corresponde a uma modificação no coeficiente da mola rotacional.

3.2 Flambagem global

A carga crítica de flambagem para o modo de instabilidade global, quer seja para uma barra comprimida, quer seja para uma barra fletida, pode ser obtida através das equações gerais da instabilidade por flexo-torção (VLASOV, 1962).

Em função dos esforços (N ou M), o sistema de equações diferenciais pode ser particularizado para barras axialmente comprimidas por uma força N ($M=0$), obtendo-se as equações diferenciais que governam o fenômeno, “Equação (2)”.

$$EI_x v^{iv} + Nv'' - Nx_0 \phi'' = 0 \quad (2.a)$$

$$EI_y u^{iv} + Nu'' + Ny_0 \phi'' = 0 \quad (2.b)$$

$$EC_\omega \phi^{iv} - (GI_t - Nr_0^2) \phi'' + Ny_0 u'' - Nx_0 v'' = 0 \quad (2.c)$$

Para uma barra fletida sob momento fletor constante ($N=0$ e $M \neq 0$), de seção transversal duplamente simétrica, as equações diferenciais gerais da instabilidade por flexo-torção ficam reduzidas à “Equação 3”.

$$EI_x v^{iv} = 0 \quad (3.a)$$

$$EI_y u^{iv} + M_x \phi'' = 0 \quad (3.b)$$

$$EC_\omega \phi^{iv} - GI_t \phi'' + M_x u'' = 0 \quad (3.c)$$

Dependendo das condições de carregamento, das condições de vínculo e carregamento da barra e de sua seção transversal, poderão ocorrer as seguintes situações:

- Flambagem por flexão com elástica u ou v , flambagem de Euler;
- Flambagem por torção com elástica ϕ , flambagem puramente torcional;
- Flambagem por flexão e torção com elásticas u ou v e ϕ , flambagem lateral com torção.

Nas equações anteriores, x_0 e y_0 são as coordenadas do centro de torção da seção e I_x e I_y são os momentos de inércia de segunda ordem em relação aos eixos principais x e y , respectivamente. C_ω é a constante de empenamento, I_t o momento de inércia à torção e r_0 é o raio de giração polar.

4 O USO DE ENSAIOS PARA FINS DIDÁTICOS

O equacionamento teórico do fenômeno é fundamental para o Engenheiro e não pode ser suprimido. Entretanto, durante a apresentação da formulação teórica, nota-se certa dificuldade por parte do aluno no aprendizado e assimilação dessas equações, tendo-se em vista que, a teoria da flexo-torção não é abordada nas disciplinas básicas, como Resistência dos Materiais.

A visualização “in loco” do problema da flambagem, quer seja para barras comprimidas, quer seja para barras fletidas, traz outra motivação para a aula e desperta o interesse do aluno no assunto.

A realização do experimento também permite a comparação entre o valor medido em ensaio e o valor obtido de acordo com a formulação teórica. Isto possibilita uma abordagem profícua, discutindo-se hipóteses de apoio, travamentos laterais, excentricidade do carregamento, entre outras possibilidades.

Por outro lado, a realização de experimento exige custos, os quais nem sempre podem ser absorvidos pelas instituições de ensino, e também exigem a existência de espaço físico adequado e equipamentos apropriados. Sob estes aspectos, no curso de Engenharia Civil, quando há possibilidade de conciliar ensaio de projeto de pesquisa com aula, os alunos são levados até as dependências do laboratório para assistirem à realização de pelo menos um ensaio.

Na “Figura 6” pode-se observar um ensaio de flexão em perfil tipo U enrijecido sendo acompanhado pelos alunos da disciplina Estruturas Metálicas do curso de Engenharia Civil.

Neste ensaio tinha-se como objetivo o estudo da instabilidade por distorção em perfis de aço formados a frio quando fletidos.

Aos alunos são apresentados os dispositivos de ensaio, a instrumentação utilizada (strain gage, transdutores de deslocamento, células de carga, vínculos de garfo e travamentos laterais) e o sistema de aquisição de dados, bem como, o funcionamento de todo o conjunto. Depois de realizado o ensaio, em sala de aula são discutidos os resultados obtidos.

A quantidade de alunos matriculados na disciplina e a periculosidade inerente ao ensaio são outros inconvenientes neste tipo de procedimento.

Como alternativa ao ensaio em perfis com grandes dimensões realizado em laboratório, pode-se trabalhar com pequenos perfis, conseqüentemente, pequenos carregamentos, na própria sala de aula.



Figura 6 – Ensaio de flexão em perfis tipo U enrijecido assistido por alunos.

Na disciplina de Estruturas Metálicas, já por vários anos, tem-se levado pelo menos um ensaio didático para a sala de aula.

O problema colocado para o aluno é calcular a força concentrada para a situação esquematizada abaixo, “Figura 7”.

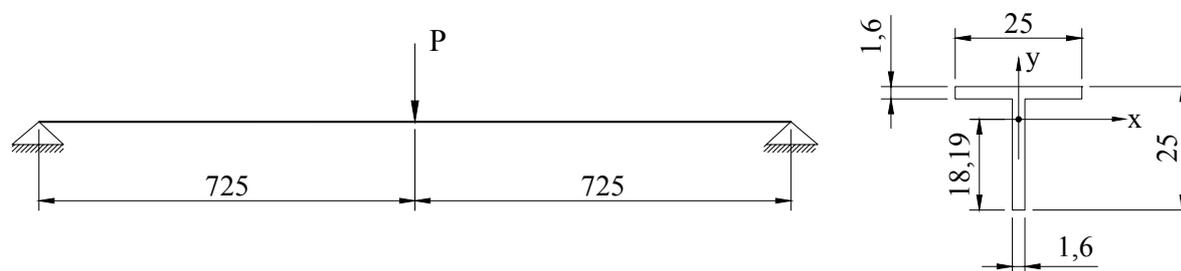


Figura 7 – Modelo para resolução teórica e ensaio (dimensões em mm).

Trata-se de um perfil tipo “T”, em alumínio, com dimensões da seção transversal e comprimento indicados na “Figura 7”.

Para este perfil duas situações são exploradas. A primeira, usando-o como seção “T” e a segunda, realizando-se o ensaio como seção “T” invertida.

Da análise teórica discute-se o procedimento adotado para perfis “T” com um eixo de simetria no plano médio da alma, fletidos em torno do eixo perpendicular à alma, apresentado na tabela 27 da NBR 8800 (ABNT, 1986). De acordo com a formulação, considerando-se a mesa comprimida, obtém-se o valor do momento fletor crítico de flambagem elástica, $M_{cr} = 72,25 \text{ kNmm}$.

Invertendo-se a posição do perfil, ou seja, a mesa agora tracionada, obtém o novo valor de momento fletor crítico de flambagem elástica, $M_{cr} = 40,65 \text{ kNmm}$.

Esses valores de M_{cr} são obtidos passando-se os dados do perfil, sem mencionar que o mesmo será ensaiado posteriormente.

Deve-se observar que para o cálculo teórico de M_{cr} utilizou-se a expressão do coeficiente de flexão C_b conforme “Equação 4”.

$$C_b = \frac{12.5M_{\max}}{2.5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (4)$$

Os valores dos momentos fletores são tomados como indicado na “Figura 8”.

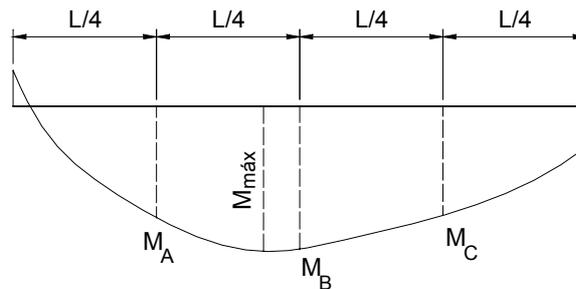


Figura 8 – Diagrama de momento fletor e valores utilizados no cálculo de C_b .

Após a análise teórica do problema, o perfil é ensaiado na própria sala de aula com dispositivos simples para os apoios (feitos em madeira) e para o carregamento (gancho, baldes e areia), “Figura 9”.



Figura 9 – Perfil preparado para ensaio (“T” invertido).

Da simplicidade do ensaio, muitas discussões: excentricidade do carregamento; os vínculos; mesa tracionada e mesa comprimida; os resultados teórico e experimental; fixando os conceitos apresentados nas aulas expositivas. Além disso, percebe-se a curiosidades dos alunos pelos resultados a serem obtidos, motivando a sua participação nas aulas.

O ensaio é realizado inicialmente com a seção “T” invertida, adicionando-se, gradativamente, areia no balde. Constatado a ocorrência da flambagem lateral com torção, facilmente visualizada, o carregamento é interrompido e o balde com a areia pesado. Desse ensaio obteve-se o valor de $P_{cr} = 9,4 \text{ kgf}$ e a posição deformada do perfil pode ser observada na “Figura 10”. Para esse valor de P_{cr} e de acordo com o esquema estático indicado na “Figura 7” tem-se $M_{cr} = 34,07 \text{ kNmm}$.

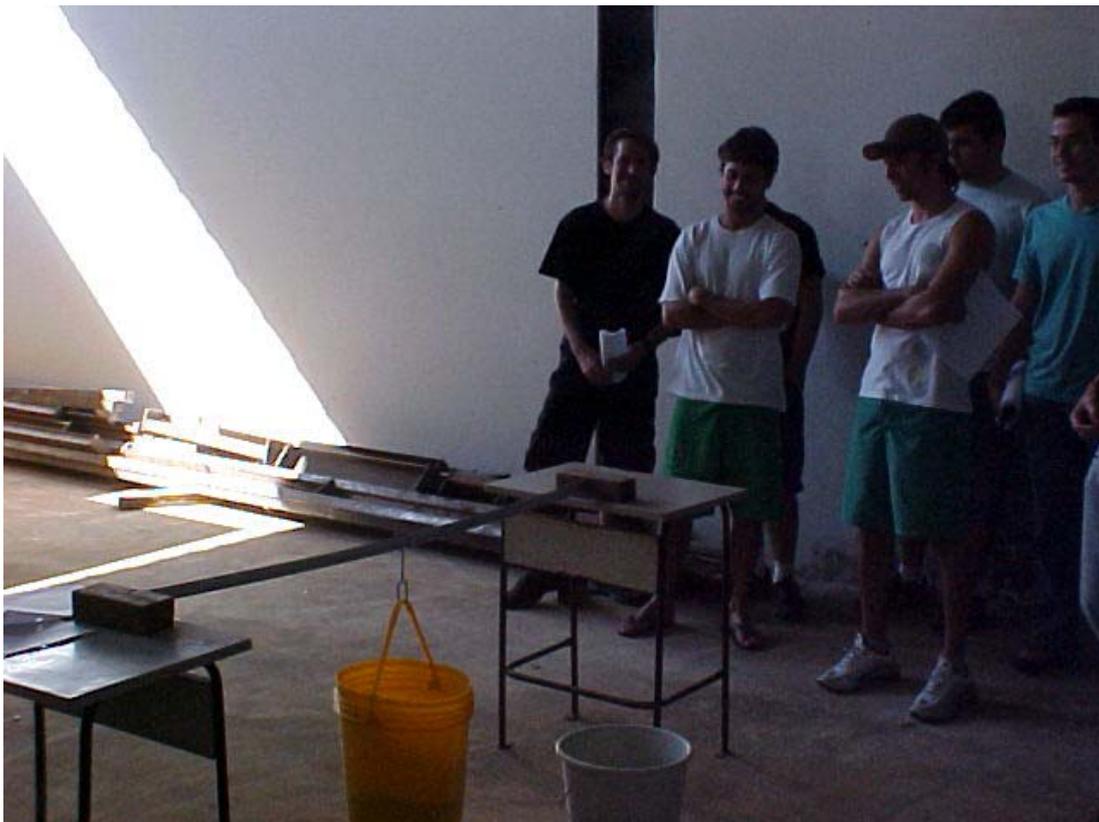


Figura 10 – Falha do perfil ensaiado com a mesa tracionada.

Como esse valor de força é pequeno, após o descarregamento, o perfil pode ser ensaiado novamente, alternando-se a posição da mesa.

Procedendo-se como no ensaio anterior, obtém-se, agora com a mesa comprimida, $P_{cr} = 20,40 \text{ kgf}$, o que corresponde a $M_{cr} = 73,95 \text{ kNmm}$. A posição final do perfil pode ser observada na “Figura 11”.

Os valores teóricos comparados com os experimentais apresentaram boa aproximação. No caso da mesa tracionada, o valor experimental resultou menor, fato este esperado pela excentricidade da força aplicada em relação ao centro de cisalhamento da seção transversal.

No segundo caso, a aproximação dos resultados foi considerada muito boa pelos alunos, pois a excentricidade da aplicação da força é praticamente nula.



Figura 10 – Falha do perfil ensaiado com a mesa comprimida.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No ensino da disciplina de Estruturas Metálicas o correto entendimento do fenômeno da flambagem é fundamental.

Os recursos áudio-visuais muito auxiliam na ilustração em sala de aula, porém, a visualização do fenômeno “in loco”, podendo o aluno participar da sua ocorrência, fixa o conceito teórico obtido em aulas expositivas.

A conjugação da teoria com a realização de ensaios traz resultados bastante satisfatórios para a relação ensino-aprendizado, além de permitir uma maior dinâmica na aula, com intensiva participação discente. De maneira geral, pode-se afirmar que os ensaios, em qualquer que seja a disciplina, aumentam a motivação dos alunos e facilitam a compreensão dos respectivos conteúdos programáticos.

Como os ensaios demandam custos, a opção com pequenos perfis, os quais podem ser obtidos por doações, permite a realização do ensaio na própria sala de aula, despertando a motivação do aluno e, principalmente, fazendo a comprovação da validade dos conceitos teóricos ensinados quando confrontados com os resultados experimentais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios. NBR 8.800. ABNT, Rio de Janeiro, 1986.

HANCOCK, G. J. Design for distortional buckling of flexural members. **Thin-Walled Structures**, v.27, n.1, p.3-12, 1997.

HANCOCK, G. J. Distortional buckling of steel storage rack columns. **Journal of Structural Engineering**, ASCE, v.111, n.12, p.2770-2783, 1985.

JAVARONI, C. E. **Perfis de aço formados a frio: instabilidade por distorção na flexão**. Bauru, 46p., 2004. Relatório Técnico. Faculdade de Engenharia, Unesp.

JAVARONI, C. E. **Perfis de aço conformados a frio submetidos à flexão: Análise teórico-experimental**. São Carlos, 255p., 1999. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. **Theory of elastic stability**. New York: McGraw-Hill, 1961.

VLASSOV, B. Z. **Pièces longues en voiles minces**. Paris: Eyrolles, 1962.

THE DIDACTIC USE OF TEST ON A COURSE OF STEEL STRUCTURES

Abstract: *In the graduation teaching in steel structures the knowledge the buckling modes is necessary. However, the phenomenon of the buckling demands the knowledge of abstract concepts and the use of mathematical equations cause disinterest for the subject in many students. The phenomenon is of difficult visualization and understanding for the students, mainly in the steel profiles. The presentation in these failure modes through didactic tests, in classroom or specific laboratories, much can contribute in the process teach-learning of disciplines. This article presents some experiments lead with the students, in classroom and in specific laboratory, development on a course Steel Structures of the course of Civil Engineering of the College of Engineering of the Unesp, campus of Bauru. Certainly, the tests contributed to a better understanding of the involved theoretical concepts.*

Key-words: *Teaching, Steel structures, buckling, Tests.*