

UMA FERRAMENTA GRÁFICA PARA O ENSINO E PROJETO DE ESTRUTURAS DE AÇO NA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UERJ

Luciano R. Ornelas de Lima - luciano@eng.uerj.br

José G. Santos da Silva - jgss@uerj.br

Lauro C. de Sá - lauro.sa@light.com.br

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Faculdade de Engenharia, FEN.

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã.

CEP: 22550-900 - Rio de Janeiro - RJ.

Resumo: *O projeto no estado limite último de vigas de aço submetidas à flexão simples considera, para as seções críticas, o momento fletor e o esforço cortante resistentes de projeto para compara-los aos respectivos esforços solicitantes de projeto. Além disso, deve-se verificar, também, os deslocamentos no estado limite de utilização. Dois fenômenos devem ser considerados: a flambagem local e a flambagem lateral que afetam significativamente o comportamento de vigas em estruturas de aço. Considerando-se uma experiência acadêmica obtida ao longo de sete anos na Faculdade de Engenharia da UERJ, tem sido verificado que um grande número de alunos de graduação em engenharia possui uma dificuldade considerável em visualizar e compreender os fenômenos relacionados com a análise de estruturas e, em particular, o comportamento de sistemas estruturais em aço. Levando em conta todos estes fatores, este trabalho apresenta a experiência pedagógica obtida com base no desenvolvimento de uma ferramenta gráfica educacional empregada para o dimensionamento de vigas de aço. O software foi desenvolvido em linguagem Delphi, de modo a fornecer uma interface gráfica bastante agradável para o aluno permitindo ao mesmo, um melhor entendimento, passo a passo, de todas as etapas a serem consideradas no dimensionamento e projeto de vigas de aço. O principal objetivo da elaboração deste programa é permitir aos alunos de graduação do curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UERJ, FEN/UERJ, um melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos no dimensionamento de estruturas de aço.*

Palavras-chave: *Ensino de Engenharia, Ferramentas Gráficas, Estruturas de Aço, Análise Estrutural.*

1. INTRODUÇÃO

Em todas as áreas de conhecimento, tecnológicas ou não, um impacto cada vez maior dos mais recentes desenvolvimentos da informática vem sendo observado. Um dos instrumentos mais efetivos para acelerar este processo de desenvolvimento é caracterizado pelo treinamento e esclarecimento dos novos profissionais que irão competir no mercado de trabalho.

Desta forma, conforme citado por ALMEIDA *et al.* (1998), as universidades, como instituições de ensino e pesquisa, devem assumir esta responsabilidade e treinar adequadamente estes novos profissionais, alertando-os para os aspectos positivos e negativos destas mudanças tecnológicas, sem esquecer os ensinamentos básicos e fundamentais de cada profissão.

A utilização de programas computacionais para análise e dimensionamento de estruturas deve ser acompanhada de uma supervisão adequada. A maioria destes programas funciona como um sistema fechado (tipo “caixa preta”) fornecendo resultados, consistentes ou não, dependendo de como foram fornecidos os dados de entrada do problema a ser resolvido.

Alguns dos erros mais freqüentes ocorrem por uso incorreto de unidades, definição incorreta das condições de suporte, entre outros. Cabe a cada engenheiro ter a capacidade de analisar os resultados advindos do programa e decidir se os mesmos são coerentes.

Assim sendo, este trabalho apresenta, de forma resumida, o desenvolvimento de um programa didático, gráfico interativo, intitulado ANBE – Análise Básica Estrutural, concebido inicialmente para dimensionamento de vigas em estruturas de aço.

A idéia do desenvolvimento deste programa educacional segue a mesma direção de outros trabalhos já desenvolvidos e em desenvolvimento na Faculdade de Engenharia da UERJ, FEN/UERJ, por diversos autores, ALMEIDA et al (1997), VELLASCO et al (1999), SILVA et al (2000), SILVA et al (2001) e SILVA et al (2002).

2. FUNDAMENTOS DO DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE AÇO

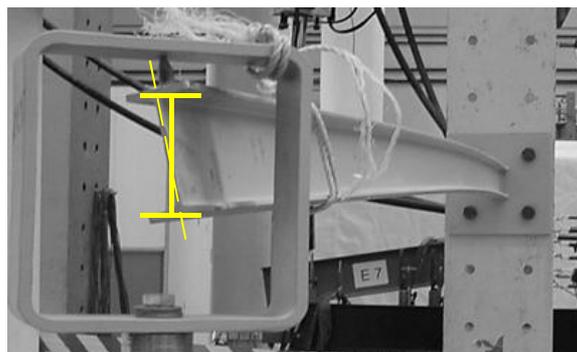
O projeto no estado limite último de vigas sujeitas à flexão, em estruturas de aço, considera nas seções críticas, o momento fletor e o esforço cortante resistentes de projeto para compará-los aos respectivos esforços solicitantes. Além disso, deve-se verificar os deslocamentos no estado limite de utilização.

A resistência à flexão deve considerar a flambagem local e a flambagem lateral que podem ser observadas na Figura 1. A primeira é caracterizada pela perda de instabilidade das chapas comprimidas que compõem o perfil e a segunda, provoca perda de equilíbrio no plano principal de flexão, geralmente vertical, ocasionando deslocamentos laterais e rotações de torção. A experiência didática obtida ao longo dos anos nos cursos de graduação da FEN/UERJ (Mecânica Técnica, Resistência dos Materiais, Estruturas de Aço, etc.), mostra que o aluno tem bastante dificuldade de visualizar e entender esses fenômenos físicos.

A resistência ao esforço cortante deve ser verificada considerando-se que a flambagem da chapa de alma sujeita às tensões cisalhantes pode afetar seu comportamento. Um exemplo típico de flambagem de alma em um perfil metálico provocada por cisalhamento pode ser observado na Figura 2, VELLASCO (1992).



(a) flambagem local



(b) flambagem lateral

Figura 1 - Flambagem local e lateral de uma viga constituída de perfil I metálico.

Deste modo, o desenvolvimento do programa educacional ANBE, apresentado neste trabalho, além de contribuir para minorar algumas deficiências dos alunos de graduação, possibilita um melhor aproveitamento durante o curso através da simulação de vários exemplos de dimensionamento de vigas em estruturas de aço. Em cada um destes exemplos, dependendo do tipo de seção transversal escolhida, o fenômeno crítico no dimensionamento

poderá ser diferente, possibilitando ao aluno adquirir censo crítico suficiente para avaliar a melhor solução estrutural para o problema em estudo.

Na seqüência do texto, apresentam-se, de forma resumida, os princípios básicos de dimensionamento de vigas em estruturas de aço.

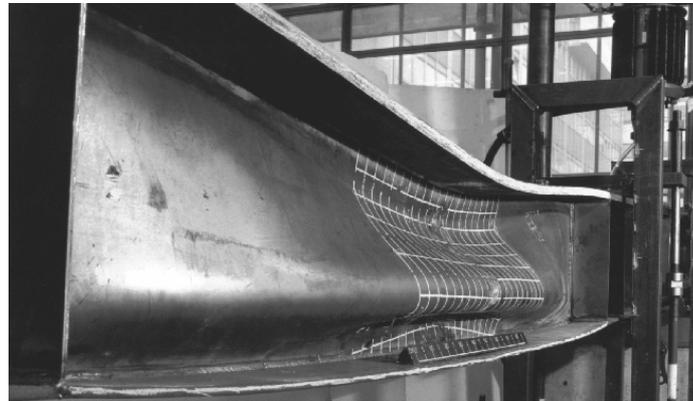


Figura 2 - Flambagem vertical da alma de uma viga constituída de perfil I metálico.

2.1 Dimensionamento de vigas à flexão

O comportamento de vigas bi-apoiadas submetidas a uma carga uniformemente distribuída pode ser observado na Figura 3, através da relação momento x curvatura com os respectivos diagramas de tensões normais na seção no meio do vão, em três pontos distintos dessa curva. Admite-se que não há flambagem local ou lateral da viga. Enquanto a tensão atuante, σ , é menor do que a tensão de escoamento do material, f_y , a curva apresenta um comportamento linear até atingir M_y que corresponde ao momento fletor no instante em que a plastificação da seção começa a ocorrer. A plastificação total da seção transversal caracteriza o momento plástico, M_{pl} , representado abaixo.

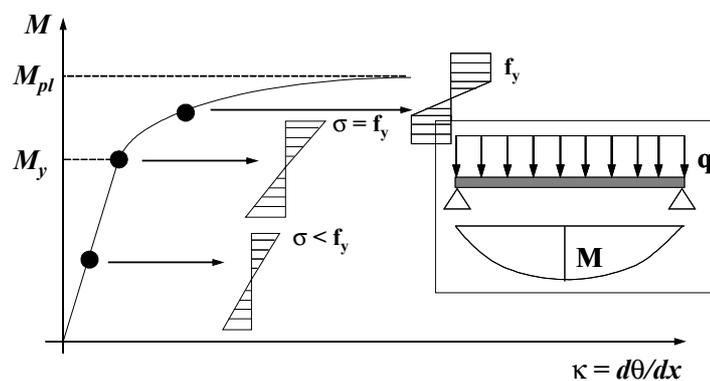


Figura 3 - Relação momento x curvatura de uma viga bi-apoiada.

Para que uma viga possa ter o comportamento ilustrado na Figura 3 é necessário que as chapas que compõe a seção transversal não sofram flambagem antes que o momento atinja o momento de plastificação.

Assim sendo, para efeito de flambagem local a norma brasileira ABNT - NBR8800 (1986) classifica a seção transversal de vigas de acordo com o índice de esbeltez ($\lambda = b/t$) das chapas que a compõe, nas seguintes classes:

- **Classe 1** - Seções Super-Compactas ($0 < \lambda \leq \lambda_{pl}$) - são seções formadas de chapas tão pouco esbeltas que permitem não só a formação do momento plástico como também admitem grandes rotações da seção. Estas rotações são usadas no método de cálculo plástico.
- **Classe 2** - Seções Compactas ($\lambda_{pl} < \lambda \leq \lambda_p$) - são seções formadas de chapas pouco esbeltas que permitem a obtenção do momento plástico, mas não permitem grandes rotações da seção sem flambagem de suas chapas.
- **Classes 3** - Seções Semi-Compactas ($\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$) - são seções formadas de chapas cuja esbelteza permite a obtenção do momento M_y (mas não do momento M_{pl}) sem que haja flambagem local.
- **Classe 4** - Seções Esbeltas ($\lambda > \lambda_r$) - são seções formadas de chapas esbeltas sujeitas a flambagem local de um dos seus elementos comprimidos quando submetidos a momentos menores que M_y .

A resistência à flexão de vigas em estruturas de aço, $M_{d\ res}$, pode ser obtida através da equação (1) onde M_n representa o momento resistente nominal. O valor de M_n depende do tipo de seção conforme descrito acima e pode ser obtido através das equações apresentadas na Tabela 1 e observado na Figura 4.

$$M_{d\ res} = \phi_b M_n \text{ .com } \phi_b = 0,90 \quad (1)$$

Tabela 1 – Resistência nominal à flexão de vigas em estruturas de aço

Classe	Designação	Momento Nominal (M_n)
1	Seções Supercompactas	$M_n = M_{pl} = Z \cdot f_y$ (2)
2	Seções Compactas	$M_n = M_{pl} = Z \cdot f_y$ (3)
3	Seções Semi-compactas	Interpolação linear entre M_{pl} e M_r (4)
4	Seções Esbeltas	$M_n = M_{cr} = W \cdot f_{cr}$ (5)

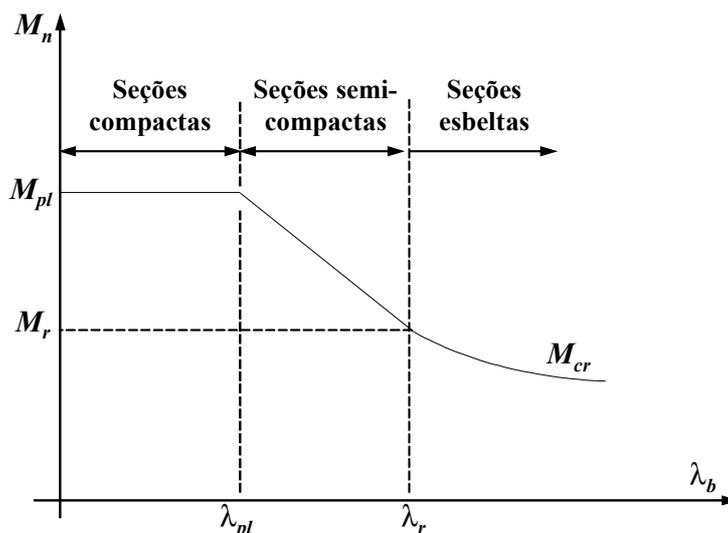


Figura 4 - Variação de momento nominal resistente de vigas I carregadas no plano da alma.

2.2 Dimensionamento de vigas ao cisalhamento

A resistência de vigas em aço ao cisalhamento é dada basicamente pela resistência da alma da viga onde duas verificações devem ser realizadas: flambagem sob ação de tensões cisalhantes e flambagem sob ação de tensões normais e de cisalhamento. Para perfis laminados, o índice de esbeltez da alma é pequeno possuindo assim, resistência à flambagem suficiente para atender aos esforços solicitantes, de modo que a resistência é determinada pelo escoamento por cisalhamento do material, σ_v , que corresponde a 60% da tensão de escoamento por tração, σ_y .

Desta forma, para que uma viga resista ao cisalhamento é necessário que:

$$V_d \leq \phi V_n \text{ com } \phi = 0,90 \quad (6)$$

onde V_d é o esforço cortante majorado de cálculo atuante e V_n é a resistência nominal ao esforço cortante da viga. A princípio sugere-se admitir que a viga não possui enrijecedores transversais. A partir desta hipótese, a resistência ao cortante nominal, V_n , é calculada de acordo com o índice de esbeltez da alma da viga a ser dimensionada.

$$V_n = V_{pl} \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (7)$$

$$V_n = h t_w \tau_{cr} = \frac{\lambda_p}{\lambda} V_{pl} \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (8)$$

$$V_n = h t_w \tau_{cr} = 1,28 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 V_{pl} \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (9)$$

onde

$$\lambda = \frac{h}{t_w}, \lambda_p = 1,08 \sqrt{\frac{K E}{f_y}} \text{ e } \lambda_r = 1,40 \sqrt{\frac{K E}{f_y}} \quad (10a,b,c)$$

em que K considera a presença de enrijecedores transversais soldados à alma da viga.

A Figura 5 faz uma síntese das equações apresentadas acima para cálculo da resistência ao esforço cortante em função do índice de esbeltez da alma da viga, $\lambda = h/t_w$.

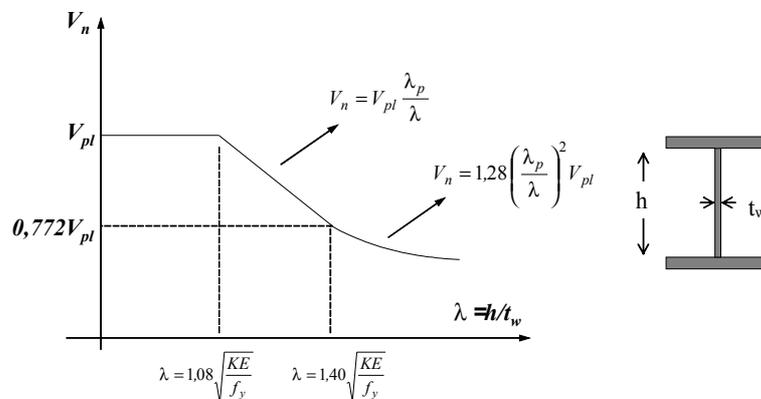


Figura 5 - Resistência ao esforço cortante de vigas com variação da esbeltez da alma.

3. PROGRAMA ANBE

O programa ANBE foi desenvolvido, principalmente, para ser utilizado no ensino de estruturas de aço no curso de graduação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, FEN/UERJ. Utilizou-se a linguagem de programação Delphi (BORLAND, 2003) através de uma arquitetura baseada em um sistema de janelas que pode ser utilizado em plataforma *Windows* ou em plataforma *Linux*, utilizando-se recursos de programação orientada a objetos.

Vale ressaltar, ainda, que a utilização de programas para plataforma *Linux* tem crescido muito nos últimos anos por ser uma plataforma gratuita e de código fonte aberto, largamente utilizada, principalmente em universidades públicas. Dentro deste princípio, o usuário informa ao programa os dados necessários ao dimensionamento de uma viga em estrutura de aço, ou seja, condições de extremidade, tipos de carregamentos, existência de contraventamento, vãos (distâncias entre apoios).

O desenvolvimento deste projeto de ensino/pesquisa compreendeu, até o presente momento, a realização das seguintes etapas:

- revisão bibliográfica sobre o assunto em questão: dimensionamento de estruturas de aço;
- estudo detalhado sobre todos os aspectos associados com a Norma Brasileira de Projeto e Execução de Estruturas de Aço em Edifícios (NBR8800, 1986);
- estudo da linguagem de programação Delphi (BORLAND, 2003);
- elaboração, implementação e execução de testes iniciais no programa educacional ANBE.

A seguir são apresentadas as principais etapas necessárias a utilização do programa educacional apresentado neste trabalho. Ao iniciar o programa, surge a tela apresentada na Figura 6(a) com o termo de responsabilidade a ser aceito pelo usuário. Já a Figura 6(b) apresenta a tela principal do programa onde podem ser observados os menus e as áreas destinadas à definição do tipo de viga a ser verificado, escolha da seção transversal do perfil, material e resultados.



(a) tela inicial - apresentação

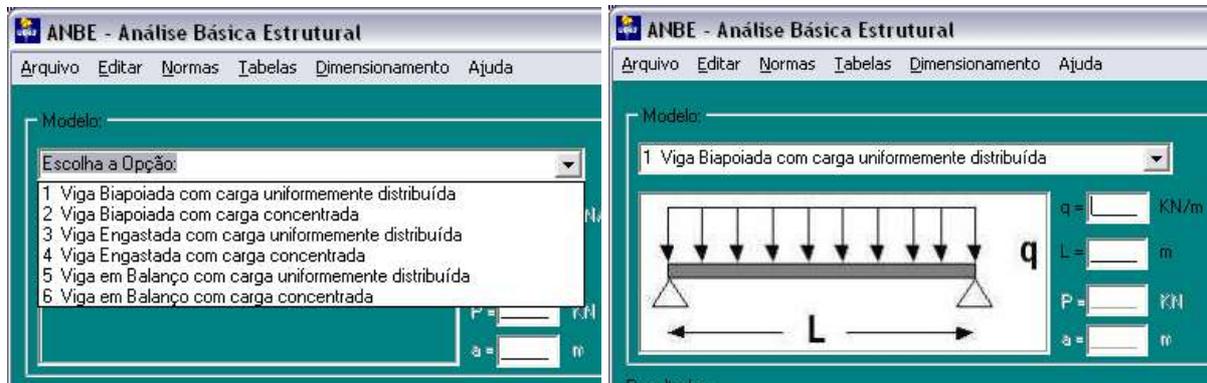
(b) janela principal do programa

Figura 6 - Janelas principais do programa ANBE.

A primeira informação a ser fornecida pelo usuário diz respeito ao tipo de viga a ser verificado onde seis tipos diferentes estão implementados: viga bi-apoiada com carga uniformemente distribuída ou concentrada, viga engastada com carga uniformemente distribuída ou concentrada e viga contínua com um vão em balanço, também com duas opções de carregamentos, carga uniformemente distribuída nos dois vãos ou concentrada em algum ponto da parte em balanço.

Depois de feita esta escolha, a figura da viga é apresentada e os campos com as informações necessárias tornam-se habilitados (com mudança de cor). Internamente, o

programa calcula o momento fletor e esforço cortante máximos a serem utilizados na verificação da viga de aço. A Figura 7 apresenta esta etapa do processo de definição dos parâmetros da viga e na Figura 8 podem ser observados os seis tipos de vigas implementados no programa educacional ANBE.



(a) definição do tipo de viga

(b) carregamento e distância entre apoios

Figura 7 - Informações do tipo de viga, carregamento e distâncias.

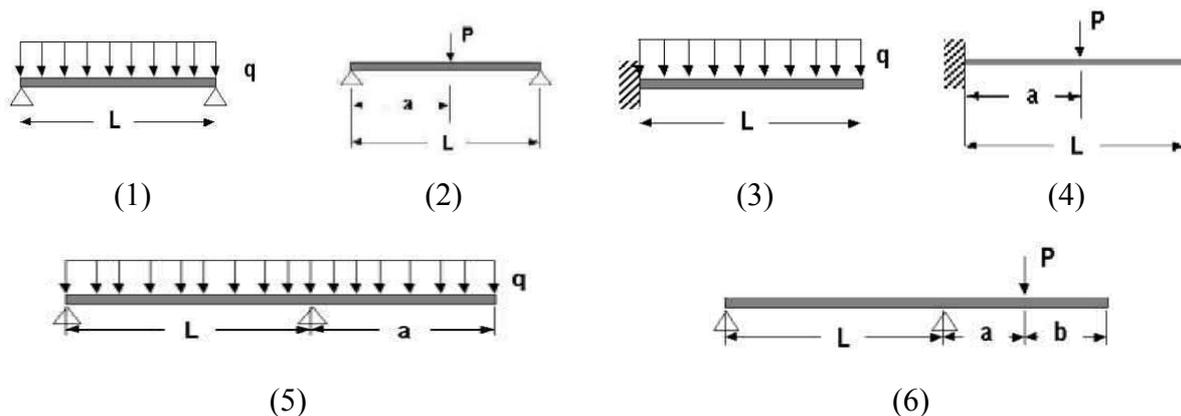


Figura 8 - Tipos de vigas existentes no programa ANBE.

O próximo passo consiste da escolha prévia de um perfil VS (viga soldada) a ser utilizado na verificação bem como a definição do tipo de aço (MR250, AR290, AR345, etc). O programa oferece uma lista com todos perfis VS de acordo com o catálogo da Açominas, conforme pode ser observado na Figura 9.

Após a definição de todas as propriedades geométricas e mecânicas, o programa educacional ANBE está pronto para efetuar a verificação, bastando para isso, escolher a opção *Calcular* no menu *Dimensionamento*. Com isso, o programa apresenta os resultados na área destinada informando se o perfil escolhido atende às solicitações de projeto.

Na seqüência, também são fornecidos os valores utilizados nas equações para cálculo da resistência à flexão e do esforço cortante de forma a possibilitar que aluno possa entender as inúmeras diferenças conceituais entre cada um dos casos de viga implementados no programa. A janela do programa com os resultados pode ser observada na Figura 10.

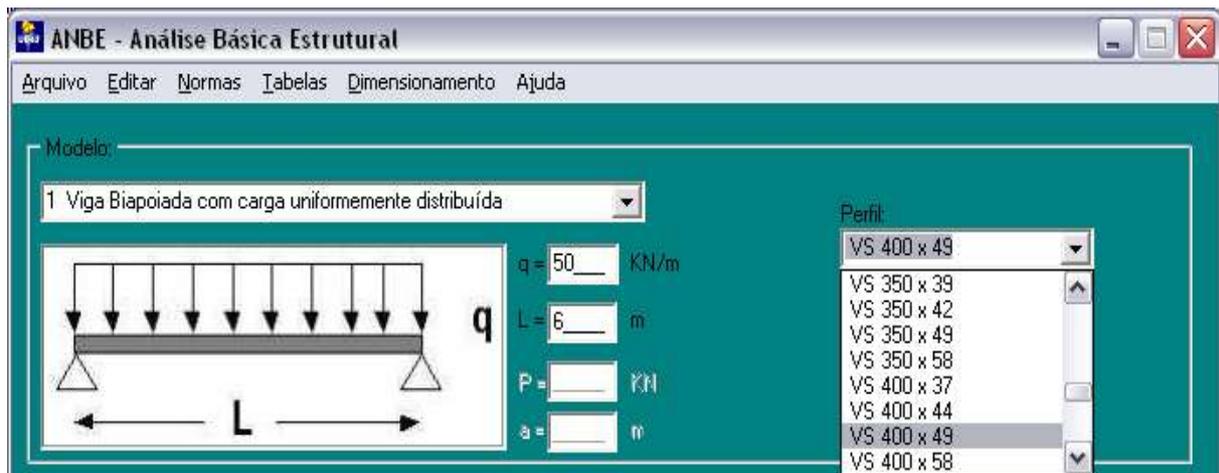


Figura 9 - Escolha do perfil VS (viga soldada) a ser verificado.

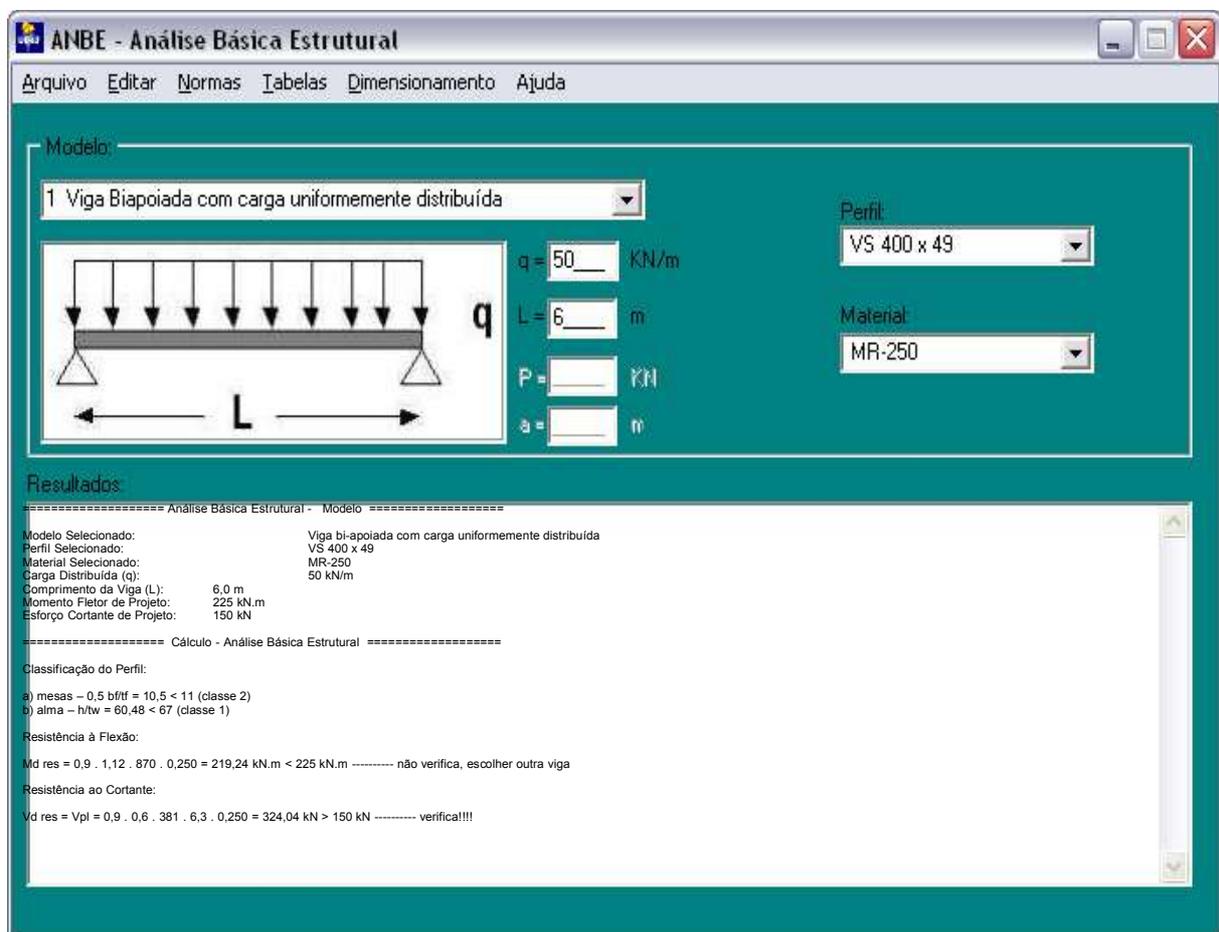


Figura 10 - Tela com apresentação dos resultados finais da análise.

Finalmente, no menu *Ajuda*, o aluno/usuário pode encontrar as informações sobre os autores do programa no item *Sobre* e no item *Tópicos*, uma descrição detalhada de toda a parte teórica referente ao dimensionamento de vigas em estruturas de aço contendo todas as equações utilizadas neste dimensionamento, além de exemplos numéricos utilizando o próprio programa. Ambas as telas podem ser visualizadas na Figura 11.



Figura 11 - Itens do menu *Ajuda*.

Cabe ressaltar ao leitor que esta ferramenta educacional começa a ser empregada preliminarmente na disciplina de Resistência dos Materiais da FEN/UERJ. Evidentemente, objetiva-se estender o uso do programa para outras disciplinas pertencentes à grade curricular do curso de graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UERJ, tais como: Estruturas Metálicas e Tópicos Especiais em Estruturas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É notório que um grande número de alunos de graduação em engenharia civil possui uma dificuldade considerável em visualizar e compreender os fenômenos relacionados com a análise de estruturas e, em particular, o comportamento de sistemas estruturais em aço.

Considerando-se todos estes fatores, este trabalho de ensino/pesquisa contribui com mais algumas informações sobre a experiência pedagógica obtida a partir do desenvolvimento de uma ferramenta gráfica educacional para dimensionamento de vigas de aço.

Esta ferramenta denominada comumente de programa ANBE (Análise Básica Estrutural), tem como objetivo principal fornecer aos alunos/usuários um meio de fixação dos conceitos teóricos apresentados em sala de aula através da realização de diversos tipos de análise, mediante o emprego de configurações distintas para as vigas de aço.

Convém chamar a atenção do leitor no tocante à experiência didática obtida com a disciplina de Resistência dos Materiais. Tal experiência tem mostrado que o programa ANBE motiva os alunos de graduação em engenharia e auxilia os mesmos no entendimento dos fenômenos físicos discutidos ao longo de todo o trabalho.

Percebe-se, claramente, que a discussão acerca dos aspectos teóricos, referentes ao problema em estudo, já mencionado em detalhe anteriormente, tem sido colocada em sala de aula de uma maneira mais clara por parte dos alunos, já que o programa ANBE permite aos mesmos uma maior versatilidade com referência, por exemplo, a resolução de problemas que podem ocorrer na prática de projeto.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem a Direção da Faculdade de Engenharia, FEN/UERJ, e ao Laboratório de Computação do Ciclo Básico, LabBas/FEN/UERJ.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto e Execução de Estruturas de Aço em Edifícios (Método dos Estados Limites). NBR8800, 1986.
- ALMEIDA, M.T.; VELLASCO, P.C.G.S.; ANDRADE, S.A.L. Ferramentas Gráficas para Ensino de Comportamento Estrutural. Terceiro Encontro de Professores da Faculdade de Engenharia da UERJ. Rio de Janeiro, Volume I, p. 51-70, 1997.
- ALMEIDA, N.N.; GOUVÊA, M.E.M.; VELLASCO, P.C.G. da S.; GERSCOVICH, D.M.S.; SOEIRO, F.J.C.P.; SILVA FILHO, B.S. The Computer in Engineering Education: An Experience International Conference in Engineering Education, ICEE, Rio de Janeiro, 1998 (publicado em CD-ROM).
- SILVA, J.G.S. da, ALMEIDA, N.N. de, SANTIAGO, R.A. Desenvolvimento de um Sistema Gráfico Interativo para o Ensino de Disciplinas da Graduação nos Cursos de Engenharia: Projeto MecNet. Revista de Ensino de Engenharia - ABENGE. Brasil, v.19, n.2, p.9-19, 2000.
- SILVA, J.G.S. da, VELLASCO, P.C.G. da S., ALMEIDA, N.N. de. DINEST - An Educational Software for Structural Dynamic Design and Behaviour. International Conference in Engineering Education, ICEE2002, Manchester, agosto de 2002 (publicado em CD-ROM).
- SILVA, J.G.S. da, LIMA, J.S.A. Um Sistema Gráfico Interativo para o Ensino e Projeto do Efeito do Vento sobre o Comportamento Estrutural de Torres de Aço. Revista de Ensino de Engenharia - ABENGE. Brasil, v.20, n.2, p.9-14, 2001.
- VELLASCO, P.C.G. da S.; SILVA, J.G.S. da; TAKEY, T.H.; ROSA, Y.S.; ALMEIDA, N. N. de; FILHO, M.C. Um Sistema Gráfico para o Ensino e Projeto do Efeito do Vento em Estruturas. XXVII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, CD-ROM, Natal, 1999.
- VELLASCO, P.C.G. da S., Local Web Buckling in Tapered Composite Beams. PhD Thesis. Imperial College, London, 1992.

**A GRAPHIC TOOL FOR THE STEEL STRUCTURES EDUCATION
AND DESIGN IN THE FACULTY OF ENGINEERING OF THE UERJ**

Abstract: *The limit state design of steel beams subjected to simple bending considers, for critical sections, the bending and shears resistances to be compared with the factored service load actions. Besides, it should be verified the displacements in the serviceability state limit. Two phenomena should be considered: the local buckling and the lateral buckling that affect significantly the steel beams behavior. Actually, considering the academic experience along seven years in the Faculty of Engineering of the UERJ, it was verified that a high number of undergraduate engineering students possesses a considerable difficulty in to visualize and to understand the phenomena related with the structural analysis specially the steel structural systems behavior. Based on all these comments, this work presents the pedagogic experience obtained through the development of an educational graphic tool for evaluation of steel beams. The educational software was developed in Delphi language, in way to supply a quite pleasant graphic interface for the user allowing to the same, a better understanding, step by step, of all of the stages to be considered in the steel beams evaluation and design. The main objective of the development of this program is to allow to the undergraduate students of the Civil Engineering Course of Faculty of Engineering of the UERJ, FEN/UERJ, a better understanding of the physical phenomena involved in the evaluation of steel structures.*

Keywords: *Engineering Education, Graphic Tools, Steel Structures and Structural Analysis.*