



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA VERIFICAÇÃO DE
PERFIL I LAMINADO OU SOLDADO CONFORME
NBR 8800:2008**

Alan Rodrigo Simsen

Lajeado, Novembro de 2014

Alan Rodrigo Simsen

**PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA VERIFICAÇÃO DE
PERFIL I LAMINADO OU SOLDADO CONFORME
NBR 8800:2008**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CETEC), do Centro Universitário Univates, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

ORIENTADOR: Prof. Rodrigo Bertoldi

Lajeado, Novembro de 2014

Alan Rodrigo Simsen

**PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA VERIFICAÇÃO DE
PERFIL I LAMINADO OU SOLDADO CONFORME
NBR 8800:2008**

Este trabalho foi julgado adequado e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: _____

Prof. Rodrigo Bertoldi, UNIVATES.

Especialista em Projetos de Estruturas de Aço para Edificações pela
Faculdade SENAI - Porto Alegre, Brasil.

Banca Examinadora:

Prof. Paulo Fernando Salvador, UNIVATES.

Doutor em Engenharia Civil pela UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

Prof. Rodrigo Bertoldi, UNIVATES.

Especialista em Projetos de Estruturas de Aço para Edificações pela
Faculdade SENAI - Porto Alegre, Brasil.

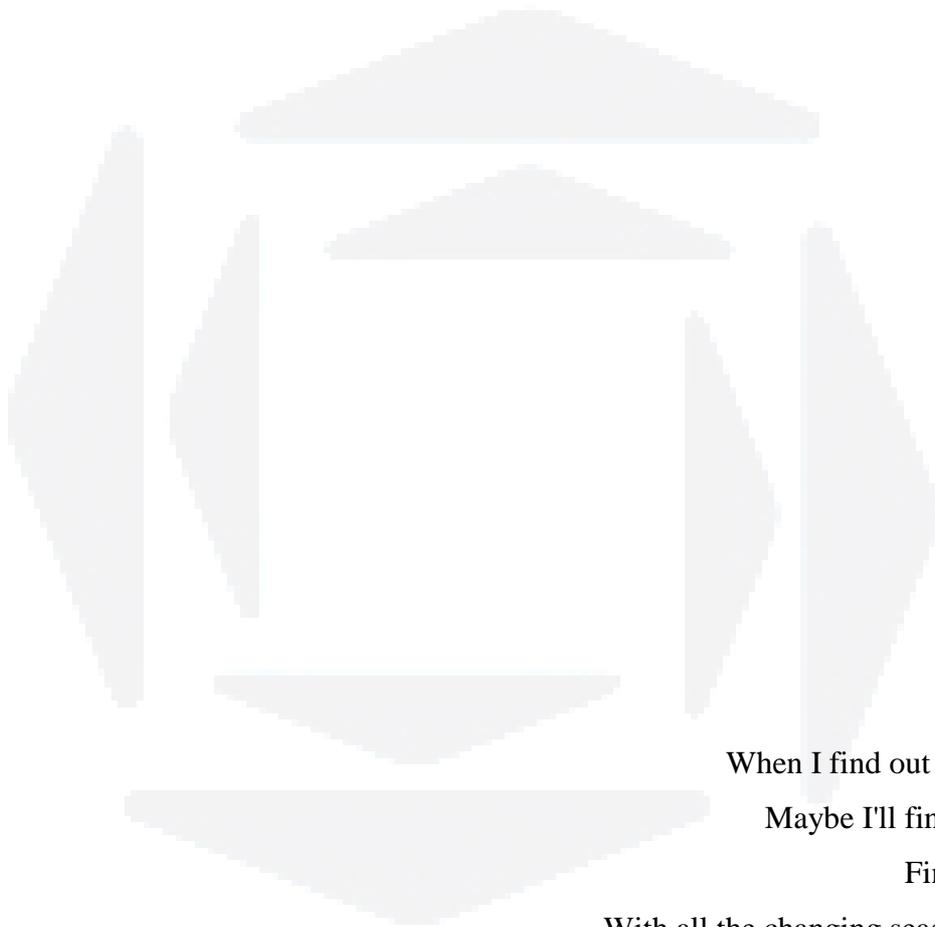
Arq. Claudio José Ferri, C.F. Construções Ltda.

Arquiteto pela UNISINOS, São Leopoldo, Brasil.

Coordenador do Curso de Engenharia Civil: _____

Prof. MSc. Emanuele Amanda Gauer

Lajeado, 17 de Novembro de 2014.



When I find out all the reasons
Maybe I'll find another way
Find another day
With all the changing seasons of my life
Maybe I'll get it right next time
And now that you've been broken down
Got your head out of the clouds
back down on the ground
And you don't talk so loud
An you don't walk so proud
Any more, and what for

(William Bruce Rose Jr.)

RESUMO

O trabalho tem como finalidade a elaboração de um programa computacional para verificar o dimensionamento de perfis metálicos do tipo I, laminados e soldados, submetidos a esforços de tração, compressão, flexão, cisalhamento, flexo-tração e flexo-compressão, tendo como base a NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. O programa foi elaborado utilizando-se a linguagem de programação *Visual Basic*, que possibilitou a criação da interface gráfica, prática e acessível para o usuário. O programa determina, a partir dos dados informados pelo usuário, os esforços resistentes de cada perfil e os compara com os esforços solicitantes também informados pelo usuário. Contando com uma ferramenta de informação de erros caso algum valor informado ou resultante encontre-se em desacordo com a norma em questão.

Palavras chave: Dimensionamento. Perfil I. Aço.

ABSTRACT

The work aimed at developing a computer program to check the sizing of metal profiles of type I, laminates and soldiers, subjected to efforts tensile, compression, flexure, shear, flexion-traction and flexion-compression, based on the NBR 8800: 2008 - Design of steel structures and composite structures of steel and concrete of buildings. The program was developed using the Visual Basic programming language, which enabled the creation of graphical, practical and accessible interface for the user. The program determines, from the data entered by the user, the resilient efforts of each profile and compares them to the requestor forces also informed by the user. Including an information tool of errors if any resulting or informed value find himself at odds with the rule in question.

Keywords: Sizing. Profile I. Steel.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Diagrama de colapso por escoamento..... | 22 |
| Figura 2: Flambagem local | 22 |
| Figura 3: Flambagem global por flexão | 23 |
| Figura 4: Flambagem global por torção | 23 |
| Figura 5: Flambagem global por flexo-torção..... | 24 |
| Figura 6: Arquivo de instalação do programa | 41 |
| Figura 7: Janela inicial de instalação do programa..... | 42 |
| Figura 8: Janela intermediária de instalação do programa | 42 |
| Figura 9: Janela final de instalação do programa | 43 |
| Figura 10: Diretório de instalação | 44 |
| Figura 11: Atalho do programa na área de trabalho | 45 |
| Figura 12: Dimensionamento | 46 |
| Figura 13: Dados de Projeto | 48 |
| Figura 14: Status Perfil | 49 |
| Figura 15: Resultados | 50 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Deslocamentos máximos admissíveis pela tabela C1 da NBR 8800:2008 | 25 |
|---|----|

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentadora |
| CBCA | Centro Brasileiro de Construção em Aço |
| FLT | Flambagem Lateral com Torção |
| FLM | Flambagem Lateral da Mesa Comprimida |
| FLA | Flambagem Local da Alma |
| PDF | <i>Portable Document Format</i> |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1.INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1. Objetivos..... | 14 |
| 1.2. Objetivos específicos | 15 |
| 1.3. Justificativa do trabalho..... | 15 |
| 1.4. Delimitação do trabalho..... | 16 |
| 1.5. Estrutura do trabalho | 16 |
| 2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 18 |
| 2.1. Estruturas metálicas | 18 |
| 2.2. Dimensionamento de perfis I..... | 21 |
| 2.3. Uso de programas | 26 |
| 2.4. Programa livre e educacional | 31 |
| 2.5. Tipos de programas | 32 |
| 2.6. Custo do projeto | 32 |
| 2.7. Projetistas | 33 |
| 2.8. Programas existentes | 35 |
| 3.METODOLOGIA..... | 37 |
| 3.1. Materiais empregados..... | 37 |
| 3.2. Metodologia..... | 38 |
| 4.FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA | 40 |
| 4.1. Instalação do programa..... | 40 |

| | |
|---|------------|
| 4.2. Utilização do programa | 45 |
| 4.3. Passo a passo | 51 |
| 4.4. Impressão de relatório | 52 |
| 4.5. Roteiro de cálculo | 52 |
| 4.6. Mensagens de erro | 70 |
| 4.7. Exemplo de cálculo | 73 |
| 4.8. Testes..... | 76 |
| | |
| 5.CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 77 |
| | |
| REFERÊNCIAS | 80 |
| | |
| APÊNDICE A – Memorial de cálculo do primeiro perfil I do tipo laminado. | 83 |
| APÊNDICE B - Memorial de cálculo do segundo perfil I do tipo laminado. | 92 |
| APÊNDICE C - Memorial de cálculo do perfil I do tipo soldado. | 101 |

1. INTRODUÇÃO

Em 1830 surgiram peças laminadas de ferro, sendo que em 1854 surge o perfil “I” na França. Já em 1868, Willian Le Baron Jenney, abriu um escritório em Chicago onde testou e consagrou projetos estruturais metálicos que estão nos padrões atuais desse modelo de construção. (BELLEI; PINHO; PINHO, 2004).

Conforme Simões Coelho (2005), em 1885 ocorreu um grande avanço nas construções em estruturas metálicas, momento em que o aço doce substitui o ferro até então utilizado, depois da introdução desse novo aço pela empresa Carnegie Steel Company nos Estados Unidos, o ferro perdeu mercado até não ser mais utilizado.

Na década de 1920 ocorreu o início do desenvolvimento da indústria siderúrgica no Brasil, com a criação da Companhia Siderúrgica Belgo Mineira (BELLEI; PINHO; PINHO, 2004). E segundo Dias (2002), em 1957 foi construído o primeiro edifício em estrutura metálica do Brasil e logo após, em 1959, o primeiro prédio comercial com vinte e quatro pavimentos e 73 metros de altura.

Segundo o Centro Brasileiro de Construção em Aço (CBCA, 20--), estatísticas da construção civil em aço apontam um crescente aumento na utilização de sistemas metálicos, sendo que entre 2011 e 2012 obteve-se um aumento de 8,9%, e no mesmo período representava aproximadamente 14% do volume total de edificações.

A busca em elevar o setor da construção civil a um patamar mais industrializado vem crescendo nos últimos anos, pois não é necessária a utilização de sistemas complexos como até então se acreditava. Dessa forma não são necessárias muitas mudanças no processo, a

introdução de sistemas metálicos representa um avanço, pois permite criar um padrão, permitindo a fabricação seriada e industrializada, obtendo maior controle e menor custo com mão de obra (PENTEADO, 2003).

O aprimoramento da construção se torna possível através da utilização do aço, que proporciona maior liberdade nos projetos arquitetônicos, permitindo projetos arrojados, com maior área útil, se comparadas a estruturas de concreto armado, já que possui perfis mais resistentes e ligeiramente menores que os de concreto, e onde existe a necessidade de ampliações e reformas a construção metálica se mostra mais flexível (CBCA, 20--).

Ainda para o mesmo instituto, a construção em aço permite menores prazos de execução, onde a redução de tempo pode ir até 40% quando comparado com sistemas de concreto armado, antecipando o retorno de capital investido. Conseqüentemente se obtém uma redução na mão de obra e de materiais, onde o desperdício pode diminuir cerca de 25%, permitindo uma melhor organização do canteiro de obras e um alívio de cargas nas fundações.

A precisão construtiva e o controle de fabricação do material permitem uma garantia de qualidade do produto final, onde os materiais e métodos construtivos possuem maior fiscalização quando comparado a estruturas de concreto armado. Sendo o aço totalmente reciclável ajudando na preservação do meio ambiente (DIAS, 2002).

O sistema é compatível com os demais materiais utilizados nas obras, como acontece com os tipos existentes de fechamento, admitindo métodos convencionais como o tijolo e pré-fabricados, tais como painéis de concreto (CBCA, 20--).

A utilização de sistemas com maior tecnologia aplicada aumenta consideravelmente a produtividade do setor. Com estruturas de aço busca-se um maior planejamento e maior controle de produção, pois permite a maior incorporação de tecnologia no seu processo de fabricação (SABBATINI, 1989).

Perfis de aço do tipo I estão normalmente submetidos a esforços de tração, compressão, flexão, cisalhamento ou a interação de dois ou mais desses esforços. Estes podem ser do tipo laminado ou soldado, no primeiro caso o perfil vem pronto da siderúrgica e no segundo, o mesmo necessita do trabalho de solda de chapas metálicas. Essas chapas podem ser planas ou formadas a frio no formato de “U” para composição do peça como um todo.

O dimensionamento dos perfis laminados e soldados formados por chapas planas é contemplado pela NBR 8800:2008, já o dimensionamento do composto por dois perfis “U” formados a frio, é abordado pela NBR 14762:2010.

A verificação da resistência destes perfis submetidos a diferentes tipos de esforços decorrentes de sua utilização é bastante trabalhosa para ser executada manualmente. No final o resultado é a resistência do perfil analisado, sendo que se o mesmo não atender às solicitações, deverá ser feita nova verificação com outro perfil com parâmetros de resistência superiores. Essa verificação pode ser executada com certa facilidade por uma linha de programação que contemple todas as etapas do dimensionamento.

O trabalho tratará da elaboração de um programa computacional que executa todas as verificações a serem feitas nos perfis I laminados e soldados formados por chapas planas, a partir das características geométricas e solicitações de projeto indicados, apresentando por final a resistência e o aproveitamento da resistência do perfil.

1.1. Objetivos

Elaborar um programa computacional que auxilie no dimensionamento de perfis metálicos do tipo I laminados e soldados, utilizando a linguagem de programação *Visual Basic*.

Automatizar o processo de verificação da resistência dos perfis de modo interativo, em que o usuário consiga verificar em quais parâmetros o perfil atende ou não as solicitações a que está submetido.

Auxiliar profissionais e estudantes da área de estruturas metálicas, a realizar a verificação do dimensionamento do perfil através de um memorial de cálculo detalhado para cada situação em análise.

1.2. Objetivos específicos

Aprofundar o conhecimento no dimensionamento de estruturas metálicas, buscando entender os conceitos e as verificações apresentadas pela norma.

Apresentar uma solução que torne prática a obtenção de resultados, onde o usuário tem acesso a uma ferramenta automatizada que verifica todas as etapas de dimensionamento apresentadas pela NBR 8800:2008.

Tornar possível a verificação de inúmeros perfis em um curto intervalo de tempo. Assim o usuário poderá concluir quais as características que condicionam o dimensionamento em cada caso analisado.

Desenvolver um programa que se torne transparente para o usuário, onde se pode verificar e entender todos os cálculos desenvolvidos pelo programa, bem como todos os dados utilizados para execução das verificações.

1.3. Justificativa do trabalho

O dimensionamento de perfis metálicos possui um grande número de verificações a serem realizadas. Torna-se necessário, assim, a sistematização dos processos para análise dos perfis, o que torna viável a elaboração de um programa computacional que verifica, a partir de parâmetros fornecidos, o completo dimensionamento de um perfil submetido a diversos tipos de esforços.

Dessa forma procurou-se desenvolver um programa de fácil utilização, limitando o erro do usuário com indicação de mensagens de erro, apresentando ainda, um relatório de verificações detalhado. Essa ferramenta de relatório é encontrada em programas comerciais pagos e se torna muito útil para a verificação do cálculo executado pelo programa, tornando acessível ao usuário toda rotina de verificações realizada.

Diante da demanda no mercado de estruturas metálicas e falta de profissionais qualificados, justifica-se a criação de uma ferramenta que agilize o processo de verificação dessas estruturas, e que auxilie na obtenção de conhecimento para estudantes de engenharia.

Através de pesquisa realizada observou-se que os programas gratuitos de dimensionamento de estruturas metálicas, elaborados dentro de universidades, encontram-se desatualizados, portanto, em desacordo com a norma vigente.

1.4. Delimitação do trabalho

O trabalho contém as seguintes restrições:

- ✓ Análise de perfis I laminados ou soldados compostos por chapas planas;
- ✓ Perfis com índice de esbeltez limite menor que 200 para esforço de compressão;
- ✓ Perfis com índice de esbeltez limite menor que 300 para esforço de tração;
- ✓ O programa analisa perfis fletidos em torno dos dois eixos, porém conforme limitação imposta pela NBR 8800:2008, obrigatoriamente a maior inércia deve ser em torno do eixo perpendicular a alma;
- ✓ Analisando perfis com alma não esbelta, que não se enquadram no Anexo H da NBR 8800:2008;
- ✓ Utilização de uma única linguagem de programação;
- ✓ Verificação da força axial de tração por escoamento da seção bruta;
- ✓ Não será determinada a flecha dos perfis;

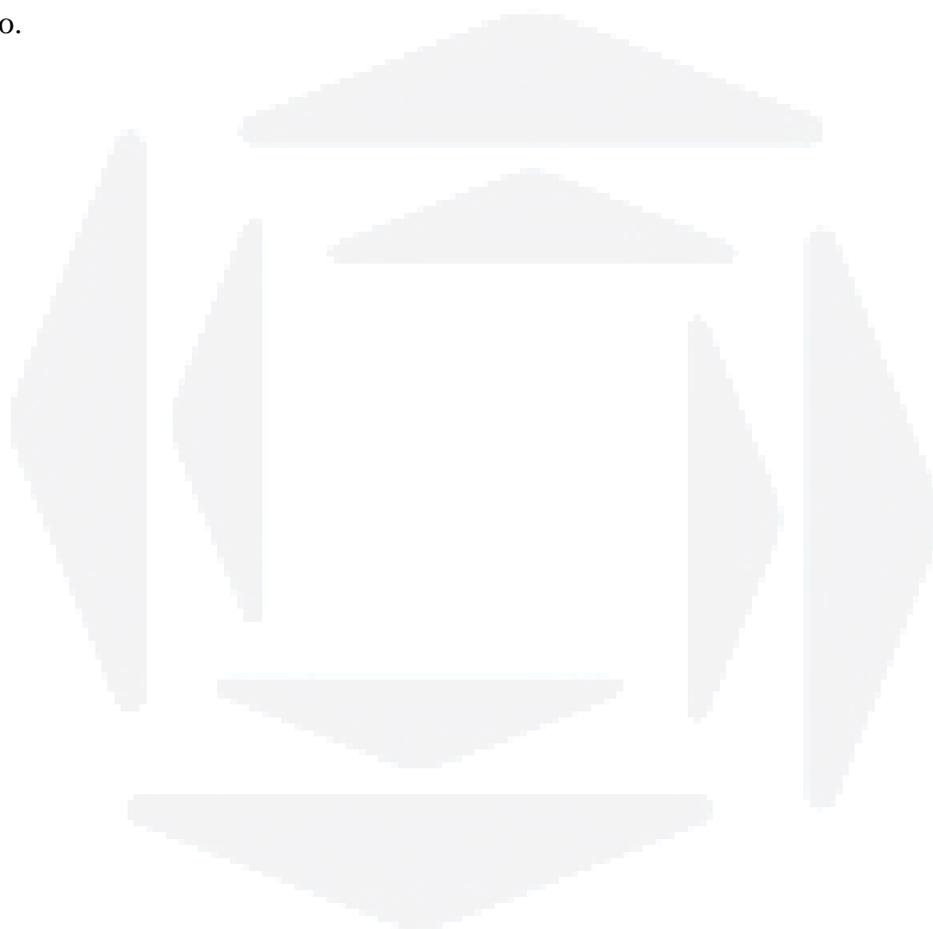
1.5. Estrutura do trabalho

O segundo capítulo é constituído pela revisão bibliográfica do trabalho, abordando estruturas metálicas, dimensionamento de perfis I, utilização de programas computacionais na engenharia, tipos e programas disponíveis, com uma descrição básica dos sistemas, buscando abordar as principais ferramentas dos mesmos.

O terceiro capítulo apresentará os materiais utilizados no desenvolvimento e metodologia de elaboração do trabalho.

O quarto capítulo constituído pela apresentação do programa, indicando o seu funcionamento, obtenção de resultados, memorial de cálculo, descrição das mensagens de erro e um exemplo prático de utilização do programa.

O quinto capítulo apresenta o que foi concluído com o desenvolvimento deste trabalho.



2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estruturas metálicas

As estruturas metálicas, atualmente no Brasil, estão se consolidando, observa-se isso através do crescimento contínuo da utilização dessa tecnologia, permitido pelo aumento do conhecimento dos profissionais da área, variedade de produtos oferecidos e as vantagens do sistema, como soluções arrojadas, alta qualidade e grande eficiência (GUARNIER, 2009).

A fabricação de estruturas metálicas acontece por meio de processos de fabricação industrial, que são caracterizados pela racionalização. A eficiência no processo de fabricação e montagem fica condicionada ao bom dimensionamento e detalhamento durante a fase de projeto, a partir disso é possível se usufruir das vantagens do sistema (BELLEI; PINHO; PINHO, 2004).

Para Guarnier (2009), o profissional dessa área deve possuir conhecimentos específicos, que geralmente não são obtidos numa graduação. Embora atualmente o conhecimento seja mais difundido, o número de profissionais capacitados não é suficiente para acompanhar a demanda do mercado.

A deficiência na etapa de projeto leva a problemas de montagem, patologias, maior chance de erros, menor qualidade, menor velocidade e conseqüentemente diminuição do lucro do investidor (BELLEI; PINHO; PINHO, 2004).

A utilização do sistema de estrutura em aço leva a inúmeras vantagens apontadas por Castro (1999):

- ✓ O material possui homogeneidade, pois é industrializado e possui um rígido controle de produção;
- ✓ O material possui alto módulo de elasticidade e resistência, o que leva a utilização de uma estrutura mais esbelta e leve, aliviando as cargas das fundações e melhorando o transporte da mesma, permitindo vãos maiores, flexibilizando os espaços, reduzindo o número de pilares;
- ✓ A estrutura possui uma montagem mais simples que a de concreto armado, o que gera uma maior velocidade na execução, melhorando o cronograma, diminuindo custos diretos e indiretos, tornando a obra mais competitiva;
- ✓ A estrutura quando projetada e prevista anteriormente, permite a desmontagem e montagem em outro local, através de ligações parafusadas, é possível também com ligações soldadas, porém essas ligações exigem um trabalho maior para serem desfeitas e refeitas, perde-se assim um pouco de eficácia;
- ✓ Por ter uma fabricação industrializada, a estrutura possui uma alta precisão, já que o controle sobre a fabricação é mais efetivo, gerando também uma grande diminuição do desperdício;

Em contrapartida existem algumas limitações que atrasam a difusão desse sistema construtivo, apontadas por Teixeira (2007):

- ✓ Desembolso financeiro imediato para compra da estrutura. Sendo esta fabricada e montada no local em pouco tempo, o pagamento da mesma geralmente deve ocorrer nesse curto espaço de tempo, sendo que representa um valor elevado se analisada de forma isolada;
- ✓ Como estruturas metálicas são na sua grande maioria esbeltas e deformáveis, é necessário o cuidado para que o deslocamento máximo e as vibrações previstas para esse tipo de estruturas em norma, não acabem prejudicando outros materiais empregados, que não são compatíveis, e venham a apresentar patologias;

- ✓ Por ser uma tecnologia diferente das demais, como por exemplo, a de concreto armado, necessita de profissionais qualificados nessa área, sendo que ainda é notável uma deficiência nesse tipo de profissionais devido ao ensino e estudos nessa área serem pouco difundidos nas universidades;
- ✓ A estrutura por possuir perfis esbeltos e geralmente com pouca massa, acaba prejudicando o conforto termo-acústico das edificações, sendo necessária a previsão de materiais complementares para corrigir essa deficiência;
- ✓ O material precisa de proteção extra contra corrosão e contra situações de incêndio, a primeira para garantir a durabilidade da estrutura e a segunda para aumentar o tempo de resistência ao fogo e garantir a evacuação com segurança dos ocupantes em situação de incêndio;
- ✓ Fatores culturais voltados ao concreto armado, sendo muitas vezes o principal limitante;
- ✓ O uso dessa tecnologia envolve uma mudança de pensamento de como conceber a obra, pois a filosofia de trabalho deve ser revista e adotada outra com ideologias mais industrializadas, pensando a edificação como um produto de fabricação seriada e não artesanal.

Ainda conforme Teixeira (2007) é extremamente necessário a definição do sistema construtivo na fase inicial de projeto, pois as vantagens do sistema metálico somente são obtidas por completo nesse caso. Castro (1999) complementa que na maioria dos casos ocorre a adaptação de projeto em concreto armado para a utilização de estruturas metálicas, propiciando problemas desnecessários e, dessa forma, o projeto em aço torna-se economicamente não competitivo.

Corroborando com essa afirmativa, Teixeira (2007) afirma:

“Acredita-se que a etapa de projetos deve ser ainda mais valorizada em empreendimentos que utilizem sistemas construtivos metálicos. Por conceber a ideia de industrialização da construção, este sistema construtivo é menos sujeito a improvisações de obra devido à, por exemplo, deficiências nos projetos. Problemas de projeto interferem na agilidade do processo construtivo e na qualidade do produto, o que reduz a competitividade da construção metálica. Desta forma, as etapas de dimensionamento e detalhamento do processo de projeto devem assegurar as vantagens da construção metálica.”

A falta de compatibilização de projetos no sistema estrutural em aço, assim como nas estruturas de concreto armado, também é prejudicial. A falta de contato entre os diversos projetistas de uma obra e a falta da exposição do cliente de suas reais necessidades geram interferências entre os projetos depois da obra pronta, prejudicando o acabamento da edificação, levando a uma diminuição do valor do produto final (MORAES, 2000).

2.2. Dimensionamento de perfis I

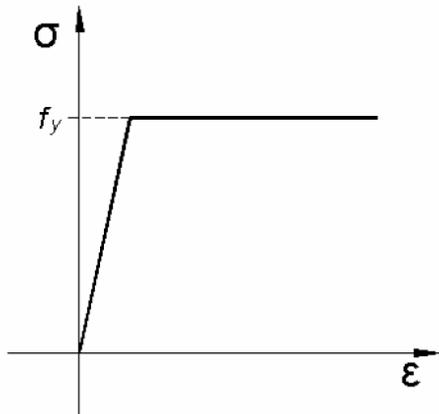
A NBR 8800:2008 estabelece que para perfis do tipo I soldados ou laminados submetidos à tração, sejam feitas duas verificações, escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida, essa última somente para perfis que contenham furos, caso contrário a primeira verificação irá prevalecer no dimensionamento.

Segundo a mesma norma, as barras comprimidas podem ser levadas ao colapso por três maneiras diferentes ou pela interação delas:

- ✓ Por escoamento;
- ✓ Por flambagem local;
- ✓ Por flambagem global:
 - Flambagem por flexão;
 - Flambagem por torção;
 - Flambagem por flexo-torção.

O colapso por escoamento ocorre quando a tensão atuante atingir a tensão de escoamento, este é observado em perfis muito curtos com paredes espessas. Através da Figura 1 é possível verificar como ocorre o colapso por escoamento puro. Pelas características robustas do perfil, o mesmo atinge a tensão de escoamento sem flambar, vale ressaltar que este tipo de ruptura é difícil de ocorrer em termos práticos, pois em estruturas metálicas comumente se trabalha com perfis esbeltos (PFEIL, 2008).

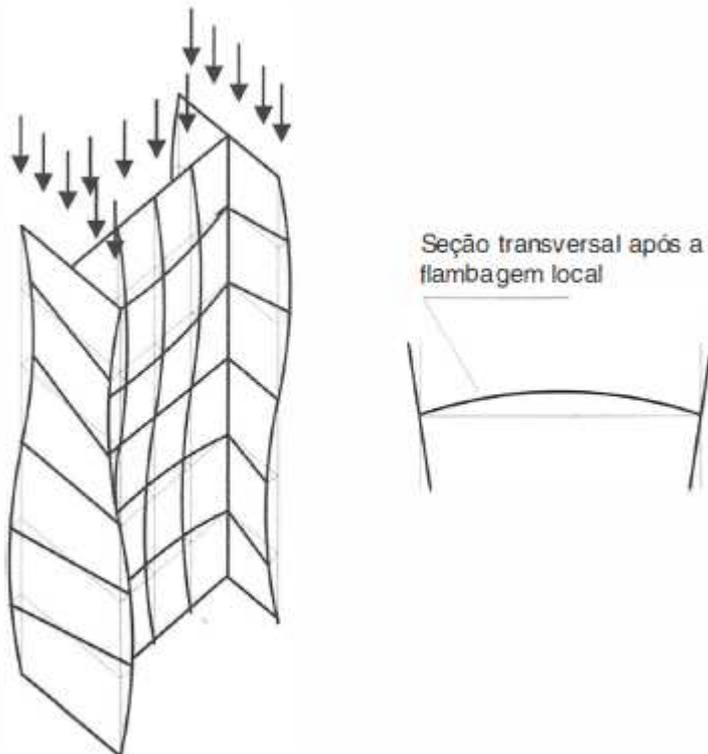
Figura 1: Diagrama de colapso por escoamento



Fonte: Adaptado de Pfeil (2008).

Ainda para o mesmo autor, a flambagem local ocorre quando a mesa, ou alma ou os dois elementos do perfil flambam localmente, esse tipo de flambagem ocorre puramente somente em perfis com índice de esbeltez muito baixo, no caso de perfis curtos e que possuam os elementos constituintes muito finos.

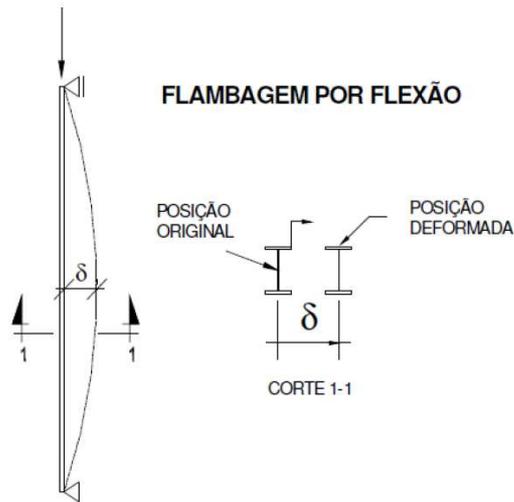
Figura 2: Flambagem local



Fonte: Adaptado de Pfeil (2008).

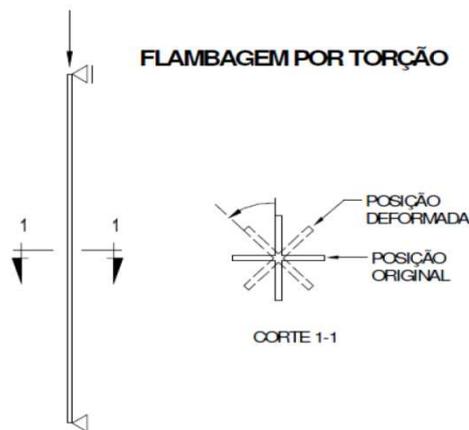
Segundo a NBR 8800:2008 a flambagem global pode ocorrer por flambagem por flexão que ocorre em perfis que tem a característica de dupla simetria, por flambagem por torção que é caracterizada pelo perfil manter seu eixo geométrico na posição original e somente girar em torno desse e por último a flambagem por flexo-torção que é caracterizada pela ocorrência das duas flambagens supracitadas.

Figura 3: Flambagem global por flexão



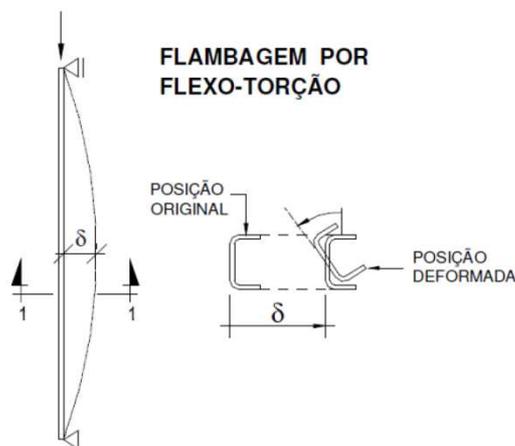
Fonte: Adaptado de Pfeil (2008).

Figura 4: Flambagem global por torção



Fonte: Adaptado de Pfeil (2008).

Figura 5: Flambagem global por flexo-torção



Fonte: Adaptado de Pfeil (2008).

A mesma norma ainda aborda que deve ser determinado o índice de esbeltez limite para barras comprimidas, índice este que não deve ser ultrapassado para restrição da flambagem do perfil.

A determinação de resistência de barras fletidas é feita através de dois critérios, o primeiro deles no estado limite último onde se determina o momento resistente de cálculo, (M_{Rd}) e força cortante resistente de cálculo (V_{Rd}), o segundo se faz no estado limite de serviço onde ocorre a verificação da flecha máxima do elemento (f_{max}).

Segundo o Anexo G da NBR 8800:2008, o momento fletor resistente de cálculo, para perfis do tipo “I” fletidos em torno do eixo de maior inércia, deve ser determinado levando em consideração os estados limites:

- ✓ FLT – Flambagem Lateral com Torção;
- ✓ FLM – Flambagem Lateral da mesa comprimida;
- ✓ FLA – Flambagem Local da Alma;

O mesmo anexo determina que o momento fletor resistente de cálculo, para perfis do tipo “I” fletidos em torno do eixo de menor inércia, deve ser determinado levando em consideração o estado limite de flambagem lateral da mesa.

A NBR 8800:2008 também determina que a força resistente de cisalhamento deva ser determinada considerando-se os estados limites de escoamento e flambagem por cisalhamento.

A mesma norma ainda determina que os perfis devem ser verificados quando submetidos a combinação de dois esforços, sendo eles a flexão combinada com esforço axial de tração ou de compressão.

Para verificar se o dimensionamento do perfil atende os critérios do estado limite de serviço, deverá ser determinada a flecha máxima de serviço, essa deve ser obrigatoriamente menor que a flecha máxima admissível indicada pela tabela C1 da NBR 8800:2008.

Tabela 1: Deslocamentos máximos admissíveis pela tabela C1 da NBR 8800:2008

| Descrição | δ | (1) |
|---|--------------|-------|
| Travessas de fechamento | L/180 | (2) |
| | L/120 | (3-4) |
| Terças de cobertura (7) | L/180 | (5) |
| | L/120 | (6) |
| Vigas de cobertura (7) | L/250 | (8) |
| Vigas de piso | L/350 | (8) |
| Vigas que suportam pilares | L/500 | (8) |
| Vigas de rolamento: (9) | | |
| Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade inferior a 200 kN | L/600 | (10) |
| Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade superior a 200 kN, exceto pontes siderúrgicas | L/800 | (10) |
| Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade igual ao superior a 200 kN | L/1000 | (10) |
| Deslocamento horizontal, exceto para pontes rolantes siderúrgicas | L/400 | |
| Deslocamento horizontal para pontes rolantes siderúrgicas | L/600 | |
| Galpões em geral e edifícios de um pavimento: | | |
| Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base | H/300 | |
| Deslocamento horizontal do nível da viga de rolamento em relação à base | H/400(11-12) | |
| Edifícios de dois ou mais pavimentos: | | |
| Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base | H/400 | |
| Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos | L/500 | (13) |

- (1) - L é o vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico em balanço, H é a altura total do pilar, ou a distância do nível da viga de rolamento à base.
- (2) - Deslocamento paralelo ao plano de fechamento (entre linhas de tirantes, caso estes existam).
- (3) - Deslocamento perpendicular ao plano de fechamento.
- (4) - Considerar apenas as ações variáveis perpendiculares ao plano de fechamento (vento no fechamento) com seu valor característico.
- (5) - Considerar combinações raras de serviço, utilizando-se as ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente.
- (6) - Considerar apenas ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente (vento de sucção) com seu valor característico.
- (7) - Deve-se também evitar a ocorrência de empoçamento, com atenção aos telhados de pequena declividade.
- (8) - Caso haja paredes de alvenaria sobre ou sob uma viga, solidarizadas com essa viga, o deslocamento vertical também não deve exceder a 15 mm.
- (9) - Considerar combinações raras de serviço.
- (10) - Valor não majorado pelo coeficiente de impacto.
- (11) - No caso de pontes rolantes siderúrgicas, o deslocamento também não pode ser superior a 50 mm.
- (12) - O diferencial do deslocamento horizontal entre pilares do pórtico que suportam as vigas de rolamento não pode superar 15 mm.
- (13) - Tomar apenas o deslocamento provocado pelas forças cortantes no andar considerado, desprezando-se os deslocamentos de corpo rígido provocados pelas deformações axiais dos pilares e vigas.

Fonte: Adaptado de NBR 8800 (2008).

A determinação da flecha máxima pode ser feita com auxílio de software de análise estrutural, que possui a possibilidade do dimensionamento da flecha máxima de serviço que determinado elemento está submetido conforme seu carregamento, momento de inércia, módulo de elasticidade e vinculações (QUEIROS, 2007).

2.3. Uso de programas

Com a evolução tecnológica, a régua de cálculo foi extinta, dando lugar as calculadoras até que as mesmas fossem substituídas pelos computadores com alto poder de processamento. Surge assim a possibilidade de utilização destes para processar rotinas de cálculo que auxiliam o trabalho de engenheiros, aliviando dessa forma a sua carga de trabalho. A cada ano esses programas estão incorporando mais ferramentas e opções para os

usuários, tentando aproximar a experiência dentro do programa ao que acontece na realidade com as estruturas (MONTEIRO, 2009).

Com o desenvolvimento e popularização dos computadores, o setor de projetos da construção civil tornou-se informatizado, sendo que atualmente praticamente não existem profissionais que não dependam dessa tecnologia (SARAIVA; LIMA, 2012).

Para Monteiro (2009), a utilização de programas na área de estruturas possui inúmeros pontos positivos, dentro deles é possível destacar a possibilidade de analisar várias alternativas de estruturas para uma mesma situação, em busca da melhor solução, tudo em pouquíssimo tempo se comparado ao modo que era feito antes do surgimento dessas ferramentas. Pode-se obter o refinamento do cálculo estrutural, racionalização do uso de materiais na obra, menor número de profissionais para elaboração do projeto, além de possibilitar que os profissionais envolvidos no projeto troquem informações facilmente.

Conforme Saraiva e Lima (2012), para a atuação dos engenheiros, além do diploma, é indispensável que o profissional tenha um profundo conhecimento na utilização de programas computacionais, pois nas várias etapas da construção civil o seu uso é essencial.

Para Guarnier (2009), a utilização de programas auxilia os profissionais, gera ganho de tempo e de recursos, além da diminuição de erros. Dessa forma ganham espaço dentro dos escritórios de projeto, sendo bem aceitos pelos profissionais. Porém, não se tornando dispensável a verificação pelo usuário dos resultados apresentados.

Ainda conforme o mesmo autor existe a dificuldade de treinamento de pessoal para utilização desses programas, sendo que os já treinados são valorizados dentro das empresas. Para contratação de novos funcionários esse treinamento é visto como pré-requisito para delegação de uma boa função.

O uso e disseminação de programas computacionais dentro das universidades tornam-se fundamentais para o desenvolvimento dos profissionais que estão entrando no mercado de trabalho, buscando assim a excelência tanto na pesquisa como na formação de profissionais técnicos (SARAIVA; LIMA, 2012).

Mesmo com o uso crescente de programas nas universidades, em geral, os estudantes não são motivados a utilizarem os mesmos, devido a duas questões, a análise estrutural requer um elevado conhecimento prévio e requer grande abstração por parte do aluno, tornando

muito difícil adquirir e assimilar tal conhecimento. Além de não existirem muitas opções de programas didáticos que realmente sejam educacionais com o objetivo de fazer o usuário compreender a teoria durante a utilização do mesmo (PRAVIA; PASQUETTI. CHIARELLO, 2001).

Durante os últimos anos é visível a evolução dos programas na área de projeto estrutural, sendo possível perceber que quanto maior a capacidade de cálculo dos programas, mais o domínio do usuário de todas as ferramentas é prejudicado, tornando questionável a utilização de programas que tornem o trabalho muito automático (OLIVEIRA; LOURENÇO, 2001).

Ainda para os mesmos autores, atualmente existem inúmeros programas disponíveis no mercado, porém o marketing sobre o produto está voltado quase que exclusivamente para a forma de utilização e não para aspectos de cálculo, sendo este último geralmente ausente ou mal esclarecido. O programa atua com uma programação fechada, faz as verificações, porém o usuário não consegue ter acesso total a metodologia e aos parâmetros que são utilizados para isso. Dessa forma, os projetos apresentam-se cada vez mais como o resultado de programas automáticos, onde o papel e responsabilidade do engenheiro estão diluídos dentro do processo do programa. O projetista está muitas vezes limitado a ser um manipulador de programa e não exerce o seu papel dentro da cadeia de projetos, resultando em projetos de baixa qualidade.

Como as empresas que comercializam os softwares não se responsabilizam sobre os resultados obtidos pelo usuário, torna-se necessário a verificação do produto por alguém, além de definir uma política de qualidade no setor. Assim, a criação de entidades independentes que analisam os programas, bem como a existência de mecanismos de controle e acompanhamento da evolução é fundamental (OLIVEIRA; LOURENÇO, 2001).

Ainda conforme os mesmos autores, os manuais disponibilizados pelas empresas não trazem todas as informações necessárias no que tange a exposição de metodologias de cálculo, por estarem cada vez mais preocupadas com a questão da facilidade de utilização, omitindo tais informações. Porém, apesar da complexidade de tais programas, certos testes simples podem ser capazes de verificar e diagnosticar o comportamento dos mesmos.

A ideia de que a partir de um clique o projeto sai pronto deve ser apagada, já que as respostas apresentadas pelos programas nem sempre estão corretas, tanto que os produtores

conscientes afirmam que seus programas não estão imunes a erros e que cabe ao usuário avaliar a consistência dos resultados. A qualidade do projeto final está ligada a qualidade dos dados fornecidos e modelagem da estrutura, o que torna o resultado totalmente dependente do usuário e não do programa (MONTEIRO, 2009).

Para o mesmo autor o uso de programas torna o cálculo estrutural mais cômodo, onde o projetista possui muito mais tempo para pensar no modelo estrutural em si, do que ficar calculando manualmente os elementos estruturais. O programa funciona como uma espécie de calculadora, onde sua principal função é realizar tarefas repetitivas, aliviando a carga de trabalho dos projetistas. Porém, os riscos são muito maiores, pois aceitar respostas sem questioná-las pode acarretar em grandes prejuízos.

É indispensável a preocupação sobre as consequências que podem levar a um dimensionamento deficiente de uma estrutura, sendo muito perigosas em termos de vidas humanas ou em termos meramente econômicos. Portanto, é discutível engenheiros sem experiência prévia assumirem a responsabilidade de um projeto estrutural gerado em programas automáticos de dimensionamento, sendo de extrema importância a maior interação possível entre o usuário e programa, tornando os resultados palpáveis aos olhos do projetista (OLIVEIRA; LOURENÇO, 2001).

O programa sempre trará resultados, até mesmo se alguma verificação ou cálculo não estiverem corretos, apresentando o resultado da mesma forma visual do que se o cálculo estivesse correto, cabe ao projetista ter o conhecimento prévio necessário para avaliação destes resultados e aceitação dos mesmos (FISCHER, 2003).

O grande problema na utilização de programas não está ligado com o programa em si, mas na forma que o mesmo é utilizado, a interface entre o usuário e programa esta cada vez mais amigável, sendo que atualmente pessoas que nunca atuaram como projetistas estruturais sentem-se habilitados a projetar. Deficiências de projeto só serão percebidas durante a execução ou quando a estrutura estiver pronta e surgirem patologias. Cabe aos contratantes de projeto analisar o profissional, avaliar suas obras já executadas, histórico, qualidade, dentre outros pontos (MONTEIRO, 2009).

Assim, a tarefa de contratar ficou difícil, antes da informatização um escritório pequeno teria no mínimo cinco pessoas no quadro de funcionários, ou seja, manter essa estrutura tinha um custo alto, geralmente só absorvido por profissionais com experiência na

área. Hoje, munido de um programa, o engenheiro pode projetar dentro da própria casa, sem nenhuma experiência (MONTEIRO, 2009).

Ainda conforme o mesmo autor, os novos engenheiros devem entrar no mercado de trabalho conscientizados de como utilizar corretamente os programas, em contrapartida dentro das universidades não existe carga horária para transmitir o conteúdo necessário para utilizar todos os programas disponíveis para a área ampla da engenharia, cabendo aos professores a tarefa de orientar seus alunos dos cuidados que os mesmos devem ter na manipulação desses programas.

Kimura (2007) aponta alguns cuidados que devem ser tomados na utilização de programas computacionais que envolvem cálculo estrutural:

- ✓ Previsão de resultados: é indispensável que o usuário tenha algum conhecimento prévio e que tenha a capacidade de prever alguns resultados, erros pequenos não entram nessa validação, porém esses não são tão prejudiciais como erros maiores e muitas vezes grotescos;
- ✓ Visão crítica: aliada ao item anterior, refere-se a ter uma visão crítica, não aceitando todos os resultados apresentados pelo programa e questioná-los quando se acreditar necessário;
- ✓ Validação manual: caso algum resultado apresentado seja duvidoso, muitas vezes por uma simples verificação manual, é possível esclarecer se o resultado está correto ou se possui algum erro;
- ✓ Visão global da estrutura: o projetista deve ter uma visão global da estrutura, entendendo o comportamento da mesma, prevendo dessa forma o comportamento do elemento isolado que está analisando;
- ✓ Controle: cada projetista deve criar seus próprios meios de controle sobre o projeto, buscando identificar erros e eliminá-los;
- ✓ Experiência: por parte do projetista é indispensável que o mesmo tenha experiência para fazer um projeto estrutural, se o mesmo não possuir, a procura por ajuda de profissionais que tenham essa experiência é uma boa saída, pois muitas vezes já sabem o comportamento de determinadas estruturas;

- ✓ Gestão de erros: erros acontecem e são comuns, cabe ao usuário criar um sistema de gestão para diminuir ou eliminá-los;
- ✓ Aprendizado contínuo: a área de projetos estruturais é uma área de aprendizado constante, onde o entendimento das estruturas leva bastante tempo para ser adquirido, e pela variedade e complexidade dos projetos, é impossível conhecer todos os tipos de estruturas existentes;
- ✓ Pós análise: muito importante para um bom profissional, depois do projeto finalizado é bom que o projetista visite a obra e entenda como está sendo executado o projeto e verifique se tudo está sendo feito como previsto, buscando alimentar uma base de dados de quais medidas adotar nos projetos futuros.

2.4. Programa livre e educacional

Atualmente, a grande maioria dos programas da área de engenharia de estruturas são pagos, sendo em muitos casos o valor da licença inviável para estudantes e alguns profissionais da área. Outro fator é a questão de que programas pagos não podem ser usados, copiados, estudados, modificados e redistribuídos sem algumas restrições, dessa forma o único meio do usuário participar do aperfeiçoamento do programa é através de fóruns promovidos pelos fabricantes, porém o usuário muitas vezes não consegue aprimorar o programa para o seu uso em especial (SARAIVA; LIMA, 2012).

Ainda para os mesmos autores, as vantagens apresentadas pelos programas proprietários são a consolidação e presença em quase todas as empresas e universidades de grande porte. Porém o cenário está mudando com o aumento da pesquisa e utilização de programas livres, pois com eles é possível a modificação e aperfeiçoamento que podem gerar grandes melhorias técnicas desses programas. Além de serem gratuitos ou com valor baixo de venda, garantem o acesso a todos que trabalham na área de engenharia, sendo que este tipo de tecnologia é de extrema importância para os profissionais dos dias atuais.

Para Pravia e Kripka (1999), o programa educativo é aquele que busca auxiliar na aprendizagem do usuário, favorecendo o desenvolvimento e reforço do conhecimento. O programa deve ser explícito, não tendo uma programação fechada e através de memoriais de cálculo apresentar todos os parâmetros utilizados para o dimensionamento, o que geralmente

não acontece nos programas pagos ou nos não educacionais. A apresentação desses parâmetros instiga o poder crítico e assimilação de conteúdos do usuário.

2.5. Tipos de programas

Na área da engenharia estrutural existem vários tipos de programas, cada um destinado a uma função específica, segundo Kimura (2007), existem os seguintes tipos:

- ✓ De análise: usual para estruturas de grande porte, o mesmo não dimensiona nem detalha os elementos estruturais, apenas faz a verificação dos esforços e deslocamentos que a estrutura está submetida;
- ✓ De desenho: são destinados a criação de desenhos genéricos, não exclusivamente para engenharia de estruturas, mas utilizados para criação de detalhamentos específicos não realizados automaticamente por outros programas;
- ✓ De dimensionamento ou verificação de elementos isolados: não verifica esforços nem deslocamentos de elementos, é utilizado para dimensionar elementos isolados da estrutura através dos esforços já conhecidos ou obtidos com programas de análise;
- ✓ De sistema integrado: o mais completo de todos, incorpora todos os acima citados, sendo possível analisar a estrutura, dimensionar e detalhar. O mais utilizado na área de estruturas, pois com um único programa é possível executar todas as verificações até a geração e impressão das pranchas de projeto.

2.6. Custo do projeto

Segundo Monteiro (2009), através de uma análise do comportamento dos custos de projeto, em relação à informatização do processo, resulta numa redução de tempo de desenvolvimento em torno de 40%, comparando os dias atuais ao ano de 1982, o que se mostrou próximo a redução do valor real do projeto. Cabe salientar que a forma como projetamos atualmente mudou, podemos apontar as seguintes mudanças:

✓ O nível de formação dos profissionais que trabalham com projeto mudou, antes da utilização de programas, cerca de 20% dos profissionais tinham a formação de engenheiro, contra cerca de 80% de engenheiros atualmente. As atribuições que antes eram de profissionais com menor formação e que tinham um custo menor para empresa, hoje são de responsabilidade desses engenheiros;

✓ Com todas as facilidades que surgiram, algumas preocupações estão mais presentes que anteriormente, como a compatibilização de projetos. Hoje se consome mais tempo na fase inicial do projeto, onde acontece a concepção e análise das alternativas viáveis para cada estrutura;

✓ Existe o custo de compra e manutenção dos programas e do equipamento que antes não existiam e devem ser levados em conta, já que apresentam um valor significativo;

✓ Outro ponto crítico é que a informatização aumentou o custo para as empresas, devido ao aumento de impostos. Com essa situação estima-se que os projetos custam hoje aproximadamente 90% do valor praticado em 1982, porém o valor praticado pelo mercado atualmente é cerca de 60% do valor de 1982.

Monteiro (2009), afirma que dessa forma existe uma diferença entre os valores, onde as empresas em média cobram menos do que deveriam, se comparado ao ano de 1982, porém essa diferença foi absorvida pelas empresas de projeto, através da própria informatização, diminuição do padrão econômico, aumento da jornada de trabalho e fuga dos profissionais da área.

2.7. Projetistas

Conforme Fischer (2003), juntamente com a evolução dos materiais e métodos estruturais, ocorreu um grande avanço nas estruturas que podem ser mais esbeltas e arrojadadas. Paralelamente a isso, o dimensionamento das mesmas tornou-se cada vez mais complexo, sendo que atualmente é imprescindível a utilização de programas para executar tarefas de verificação. O projeto era baseado em modelos matemáticos simples, pois só haviam ferramentas para isso, como calculadora e prancheta, o dimensionamento era feito

manualmente, o consumo de tempo era extremamente alto e acarretava em resultados imprecisos devido ao grande número de simplificações que eram feitas.

A busca por soluções rápidas e industrializadas para as indústria de estruturas abriu campo de aplicação para as estruturas metálicas. Isso trouxe à tona, a necessidade de projetistas especializados na área, onde ainda existe grande déficit (ROCHA, 2013).

Ainda para o mesmo autor, os profissionais necessários atualmente para a área de cálculo estrutural de estruturas metálicas são engenheiros civis com especialização na área, experiência profissional e conhecimento de outras estruturas, pois a estrutura de aço vem sendo utilizada em conjunto com outras estruturas, como as de concreto armado para aceleração do processo construtivo. O grande problema em encontrar profissionais com conhecimento em estruturas metálicas é devido ao fato do assunto ser pouco abordado dentro das universidades (ROCHA, 2013).

O mesmo autor indica algumas atribuições dos projetistas:

- ✓ Composição do projeto básico de concepção da estrutura, com locação de vigas, colunas, pórticos e estruturas especiais, além de definição do material a ser utilizado. Projeto executivo onde é feito o dimensionamento dos elementos anteriormente previstos e ajustes quando necessários, dimensionamento das ligações e detalhamento de montagem, ligações e peças para fabricação.
- ✓ Elaborar memorial de cálculo de todos os elementos e ligações, além de gerar um quantitativo de materiais para posterior orçamento.
- ✓ A grande parte da jornada de trabalho do projetista ocorre dentro do escritório, porém visitas à obras são extremamente necessárias para verificação do atendimento das especificações de projeto e para esclarecer dúvidas da equipe de fabricação ou montagem.
- ✓ O projetista também deve ter o papel de orientador de arquitetos que não possuam experiência na área de estruturas metálicas e que estejam projetando edificações em que sua concepção arquitetônica está baseada neste tipo de estrutura.

2.8. Programas existentes

Através de pesquisa na internet foram encontrados dois programas gratuitos que podem ser facilmente obtidos por meio de download, os quais atuam na área de estruturas metálicas.

O primeiro denominado “VISUALMETAL 1.5” desenvolvido por Zacarias M. C. Praviana Universidade de Passo Fundo consiste numa calculadora de perfis, onde é possível a definição de qual tipo de aço será utilizado e após a escolha do aço existe uma variedade de tipos de perfis que podem ser utilizados. Após são lançadas as características geométricas do perfil e os carregamentos definidos pelo projeto. O programa faz a verificação e indica quais requisitos o perfil atende, gerando por fim um memorial de cálculo.

O programa ainda conta com uma biblioteca de perfis laminados, possuindo a função de encontrar qual atende as solicitações de cálculo com o menor consumo de aço por metro linear da seção.

O programa encontra-se atualmente desatualizado, pois não está conforme a NBR 8800:2008. No site, onde é possível fazer o download do mesmo, obtém-se a informação de um projeto em andamento que estaria atualizando o programa para atendimento da norma supracitada.

O segundo programa denominado “AutoMETAL– V & M do Brasil - UNICAMP” desenvolvido por Nilto Calixto Silvana Universidade Estadual de Campinas, faz a análise estrutural de pórticos planos de treliças compostas por perfis tubulares, dimensiona os perfis e gera os detalhamentos da estrutura dimensionada.

O programa da mesma forma que o anterior, encontra-se desatualizado, pois não está conforma a NBR 8800:2008, não sendo encontrada nenhuma informação de projeto de manutenção do programa.

Segundo Fischer (2003), no mercado dos softwares pagos, existem dois programas mais utilizados atualmente, o primeiro “mCalcPerfis” desenvolvido e comercializado pela Stabile Engenharia LTDA. e o segundo “Metálicas 3D” comercializado pela Multiplus Softwares Técnicos.

O primeiro possui a interface e funcionamento muito próximos ao “VISUALMETAL 1.5”, porém dimensiona mais tipos de perfis e está em constante manutenção e atualização por ser um software comercializado e não livre.

O segundo possui algumas das características do “AutoMETAL – V & M do Brasil - UNICAMP”, porém a sua análise acontece em três dimensões e o mesmo dimensiona diversos tipos de perfis, não somente tubulares, além de fazer o dimensionamento de estruturas de madeira.



3. METODOLOGIA

3.1. Materiais empregados

Para desenvolver este trabalho foram utilizados livros, monografias, dissertações, artigos e normas técnicas para elaboração da pesquisa do referencial teórico, bem como para elaboração da rotina de verificação dos perfis e posterior validação dos resultados obtidos.

O principal programa utilizado para elaboração do programa foi o “Microsoft Office Excel”, desenvolvido e comercializado pela Microsoft, onde foram desenvolvidas planilhas de verificação dos perfis conforme a NBR 8800:2008. Através do mesmo programa foi automatizada a inserção e obtenção de dados dentro de planilhas com linguagem de programação *Visual Basic*, inserindo e apresentando esses dados através de um *layout* desenvolvido especificamente para o programa.

O programa foi desenvolvido de modo que o usuário final não tenha acesso a planilha de verificações, não podendo alterar a mesma, evitando dessa forma a utilização indevida e inexperiente.

Foi utilizado o programa “AutoCad 2014”, desenvolvido e comercializado pela Autodesk, para elaboração dos componentes gráficos que constituem o *layout* do programa desenvolvido.

Também utilizou-se o programa “mCalcPerfis”, desenvolvido e comercializado pela Stabile Engenharia, para comprovação e comparação dos resultados obtidos pelo programa desenvolvido.

3.2. Metodologia

Para a realização do referencial teórico foram realizadas pesquisas no material supracitado, a fim de colocar o leitor dentro do parâmetro atual do mercado de estruturas metálicas, apontando suas características e quais são os requisitos para o dimensionamento dessas.

Também foi abordado como está a utilização dos programas nos escritórios de projeto, quais os tipos de programas existentes no mercado, diferenciando os pagos e gratuitos, além de traçar o perfil do profissional que trabalha com esse tipo de tecnologia.

Foi contemplada a mudança da maneira de projetar, a variação de custo e valores cobrados por um projeto estrutural, e por fim realizada uma pesquisa dos principais programas disponíveis, sendo os mesmos desenvolvidos dentro de universidades ou programas pagos comercializados pelas respectivas empresas.

Como o principal documento de referência para dimensionamento de perfis I é a NBR 8800:2008, a mesma foi estudada de modo a criar uma sequência lógica de quais verificações devem ser feitas no perfil e qual a ordem em que as mesmas devem ocorrer. A verificação segue quase que exclusivamente o artigo 5 e os anexos E, F e G da referida norma.

Com a sequência de verificação definida, a mesma foi lançada dentro de uma planilha do programa Excel, onde todas as condições foram automatizadas, de modo que fosse apresentado o resultado final com as resistências do perfil analisado, utilizando somente os lançamentos dos dados iniciais pelo usuário, excluindo-o de qualquer cálculo manual de verificação do perfil.

Durante a criação do programa foi necessário a criação de mensagens de erros emitidas pelo programa caso o perfil encontre-se em desacordo com a norma ou ainda o usuário tenha atribuído algum dado inconsistente, para que através destas, seja realizada a comunicação entre o usuário e a linha de programação.

Com as planilhas prontas, a próxima etapa foi o desenvolvimento do *layout* do programa e programação deste, de maneira que o usuário informe os dados requisitados pelo programa e o mesmo retorne, para o usuário, os resultados obtidos para aqueles dados informados.

Com o programa funcionando, foram realizados testes, comparando os resultados do programa com exercícios resolvidos em livros e com programas computacionais disponíveis no mercado.

Depois de realizados testes de funcionamento, foi revisto o *layout* do programa, com as devidas adaptações observadas nos testes, dando uma aparência agradável e funcional de modo que o usuário possa ver em desenhos, qual dado o programa está solicitando, evitando que o usuário necessite verificar em bibliografias qual o significado de cada dado.

Por fim, foi realizada a composição de um memorial de cálculo detalhado, onde são apresentadas todas as verificações realizadas pelo programa, apresentando os valores utilizados e resultados obtidos.

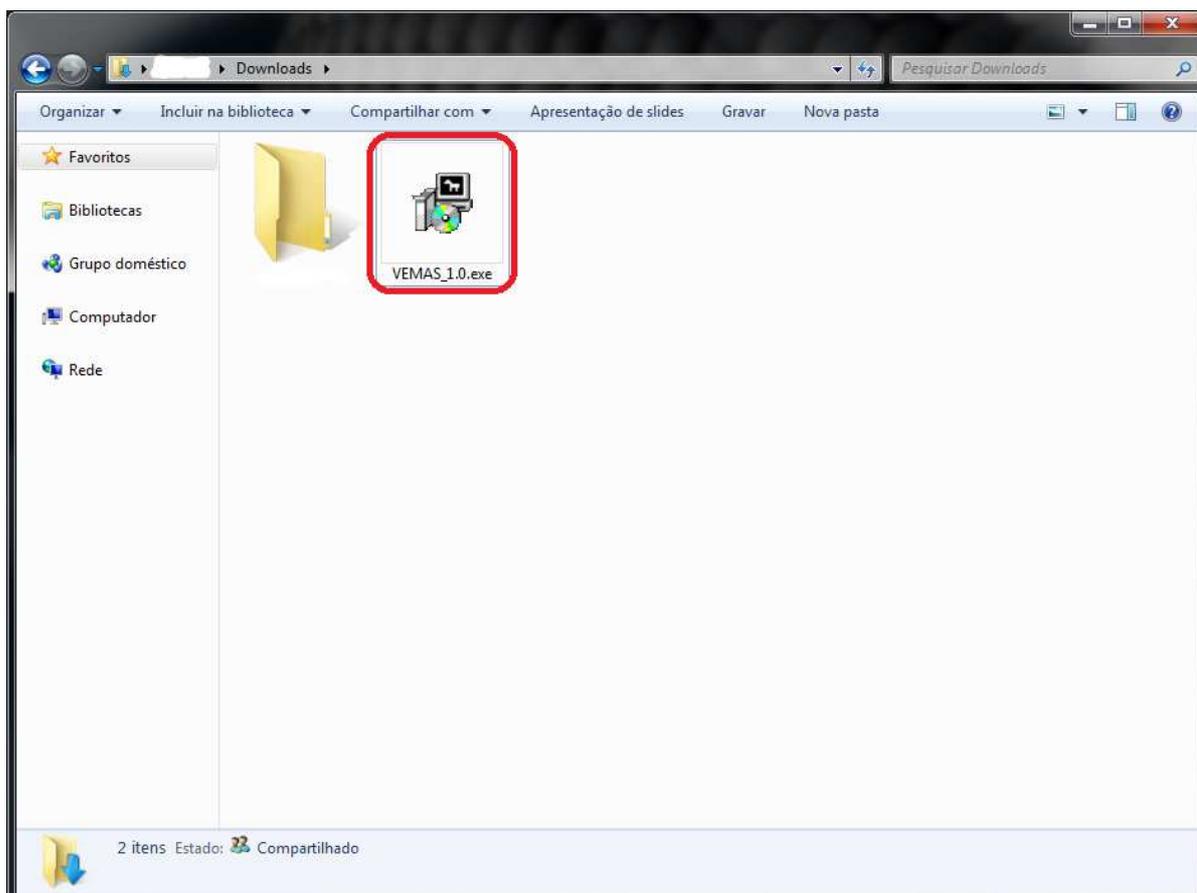
Durante a composição do memorial procurou-se esclarecer a verificação feita pelo programa, apresentando todas as verificações e parâmetros de cálculo, não sendo uma programação fechada, como é o caso de alguns programas existentes no mercado, demonstrando ao usuário todo processo realizado e a partir de que dados foram obtidos os resultados.

4. FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA

4.1. Instalação do programa

Para obter o arquivo de instalação do programa, denominado “VEMAS_1.0.exe”, deve ser solicitado através do email *vemassoftware@gmail.com*, optou se por distribuir o programa por email, pois caso ocorra alguma atualização, pode ser repassado para toda lista de emails que já receberam o programa, com um comunicado de atualização. O mesmo email pode ser utilizado para esclarecer dúvidas sobre a utilização do programa ou sobre a metodologia utilizada nas verificações. Na Figura 6 é possível observar o arquivo de instalação do programa.

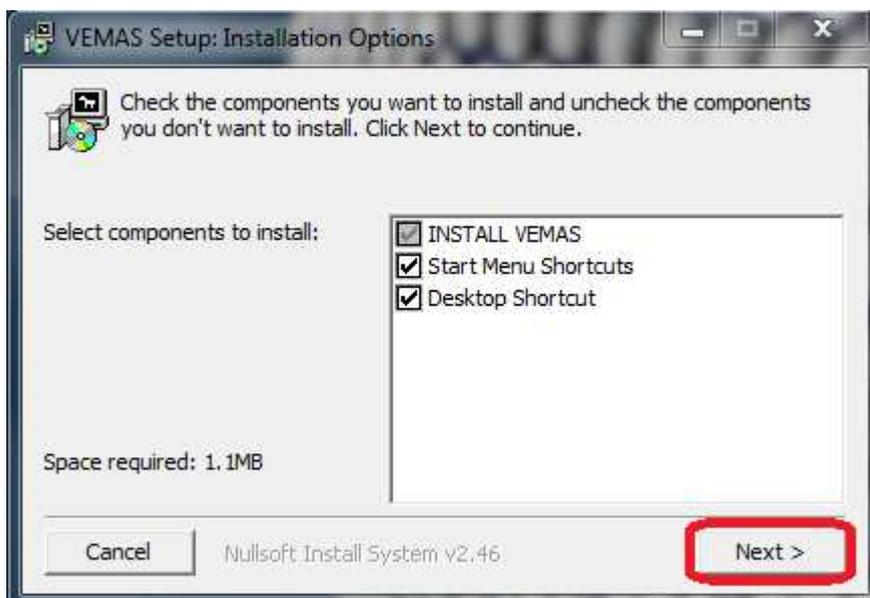
Figura 6: Arquivo de instalação do programa



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

No arquivo acima citado, com um duplo clique é exibida a janela inicial de instalação, apresentada na Figura 7, nesta o usuário deve clicar no botão "Next", concordando que os arquivos do programa sejam copiados para o seu computador.

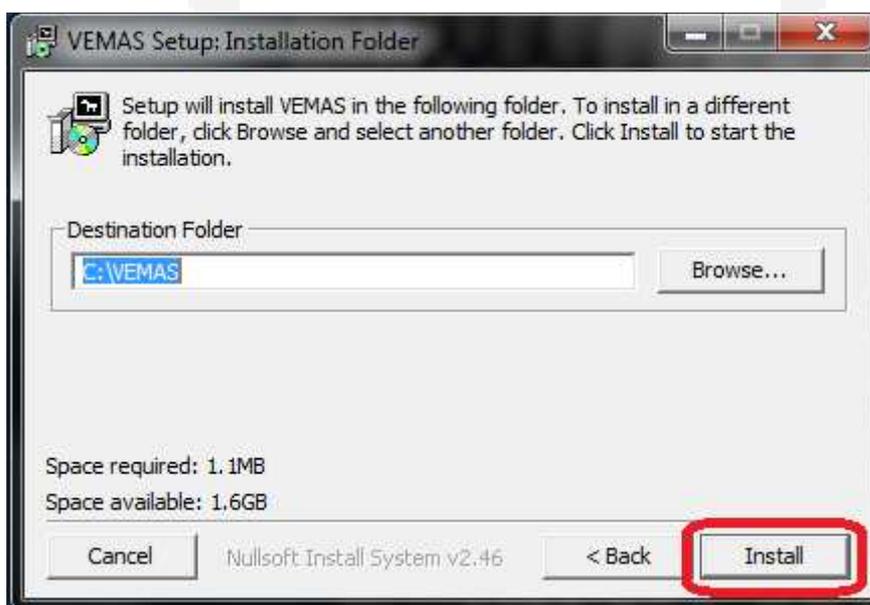
Figura 7: Janela inicial de instalação do programa



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Após o clique, a instalação irá para a próxima janela, Figura 8, nessa é indicado o diretório onde serão salvos os arquivos do programa, este não deve ser alterado, o usuário deve clicar em “*Install*” e a instalação prosseguirá.

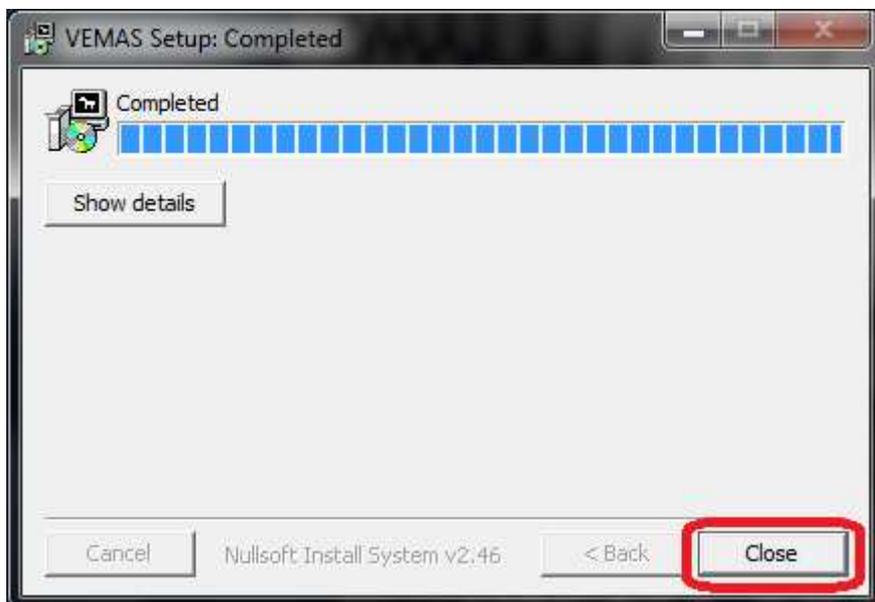
Figura 8: Janela intermediária de instalação do programa



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Na última janela de instalação, Figura 9, o usuário deve clicar no botão “Close” e a partir disso o programa está instalado e pode ser utilizado.

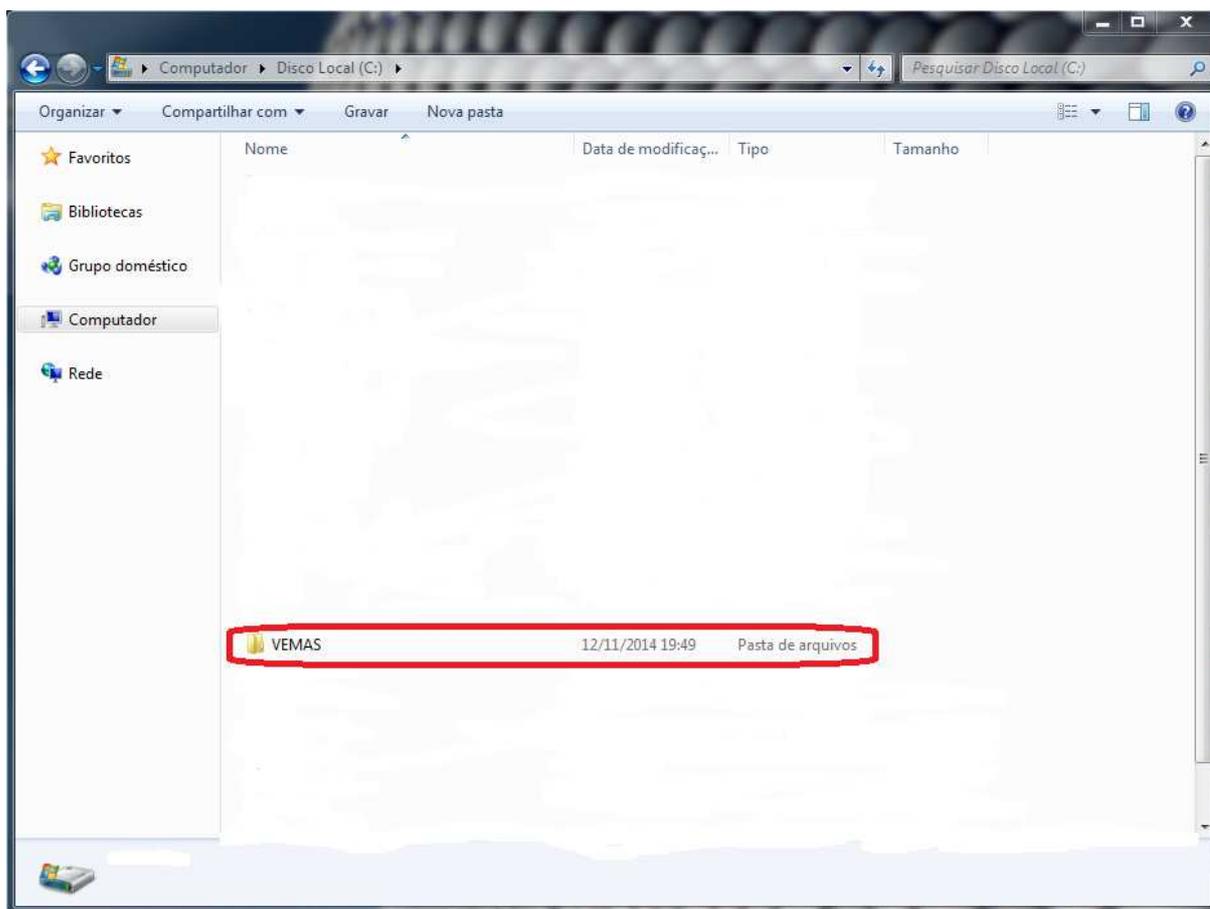
Figura 9: Janela final de instalação do programa



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

O programa criará uma pasta chamada "VEMAS" dentro do diretório "C:\", indicada na Figura 10, onde ficarão armazenados os arquivos necessários para o funcionamento do programa.

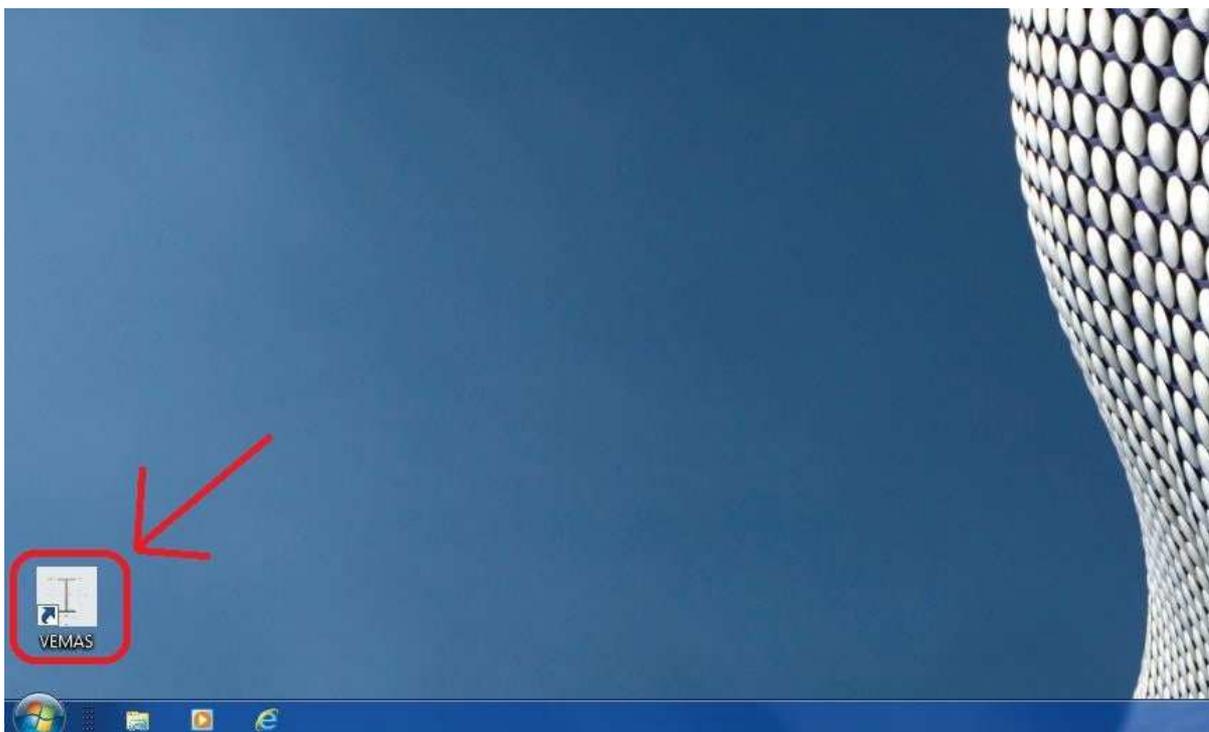
Figura 10: Diretório de instalação



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Ainda será criado um atalho na área de trabalho denominado "VEMAS", indicado na Figura 11, onde através de um duplo clique sobre este, o usuário iniciará o programa.

Figura 11: Atalho do programa na área de trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Requisitos de sistema:

- ✓ *Windows 7* ou superior;
- ✓ Ter o pacote *office 2007* ou superior instalado no computador.

4.2. Utilização do programa

O programa é dividido em janelas, em algumas são requisitados dados ao usuário, em outra é retornado ao usuário a análise do perfil que esta sendo verificado. Por fim, uma janela será exibida, onde é possível verificar os resultados gerados na verificação do perfil, além de uma comparação com os valores das solicitações informados anteriormente.

O programa conta com figuras para indicação e compreensão dos dados que estão sendo solicitados, porém nem todos dados conseguem ser expressos por figuras, dessa forma criou-se a ferramenta de legenda, onde caso o usuário não saiba o que informar em determinado campo, basta posicionar o cursor do mouse sobre o campo e aguardar, será

aberta uma legenda com a indicação do que deve ser informado, o mesmo acontece se o usuário posicionar o cursor sobre os botões.

Para iniciar, o usuário deve dar um duplo clique sobre o atalho denominado "VEMAS", Figura 11, localizado na área de trabalho. Dessa forma é aberta a janela inicial do programa, apresentada a seguir:

Figura 12: Dimensionamento

1 Perfil I - Laminado | Perfil I - Soldado **2**

5 DADOS DO PERFIL

| | | |
|----|----------|--------|
| fy | 3450 | kg/cm2 |
| bf | 17,10 | cm |
| tf | 1,16 | cm |
| d | 35,50 | cm |
| tw | 0,72 | cm |
| d' | 30,80 | cm |
| Ag | 64,80 | cm2 |
| Ix | 14222,00 | cm4 |
| Iy | 968,00 | cm4 |
| rx | 14,81 | cm |
| ry | 3,87 | cm |
| J | 24,65 | cm4 |

3

4 VALORES PADRÕES

E = módulo de elasticidade do aço = 2.000.000 kg/cm2
G = mód. de elást. transversal do aço = 770.000 kg/cm2
Conforme 4.5.2.9.NBR 8800:2008
 γ_{a1} = coeficiente de segurança do aço = 1,10
Conforme Tabela 3 - NBR 8800:2008

6 INFORMAR DADOS

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Na Figura 12 é possível analisar a janela inicial do programa, denominada "Dimensionamento", nessa é possível identificar o seguinte:

- ✓ Item 1: primeira aba localizada na parte superior esquerda denominada "Perfil I - Laminado", essa aba dá acesso a janela onde são informados os dados respectivos a verificação de perfis I laminado.
- ✓ Item 2: segunda aba localizada na parte superior esquerda denominada "Perfil I - Soldado", essa aba dá acesso a janela onde são informados os dados respectivos a verificação de perfis I soldados
- ✓ Item 3: figura localizada na parte superior direita, nessa é apresentada a imagem de um perfil onde é indicado a que cada dado corresponde, bem como os eixos analisados, evitando dessa forma que o usuário necessite verificar em alguma bibliografia o que cada dado indica.
- ✓ Item 4: na parte inferior direita são apresentados os valores utilizados como padrão pelo programa, sendo eles módulo de elasticidade do aço, módulo de elasticidade transversal e coeficiente de segurança do material.
- ✓ Item 5: na parte intermediária a esquerda, são apresentados vários campos com a indicação de qual dado e em qual unidade o mesmo deve ser informado pelo usuário. Para inserir dados, pode ser usado um simples clique na tecla "ENTER" ou através da utilização do mouse.
- ✓ Item 6: na parte inferior esquerda está o botão "INFORMAR DADOS", que após o usuário ter informado todos os dados e conferido o lançamento dos mesmos, basta clicar neste botão e a partir disso os dados serão informados ao sistema e o programa passa para a próxima janela.

Na Figura 13 é apresentada a janela seguinte, denominada "Dados de Projeto".

Figura 13: Dados de Projeto

| Rótulo | Valor | Unidade |
|--------|-------|---------|
| Nt,Sd | 1500 | kg |
| Nc,Sd | 4500 | kg |
| Mx,Sd | 8000 | kg.m |
| My,Sd | 3000 | kg.m |
| Cb | 1 | |
| Vx,Sd | 1000 | kg |
| Vy,Sd | 2000 | kg |
| Kx | 1 | |
| Lx | 600 | cm |
| Ky | 1 | |
| Ly | 300 | cm |
| Kz | 1 | |
| Lz | 300 | cm |
| Lb | 300 | cm |

INFORMAR DADOS

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

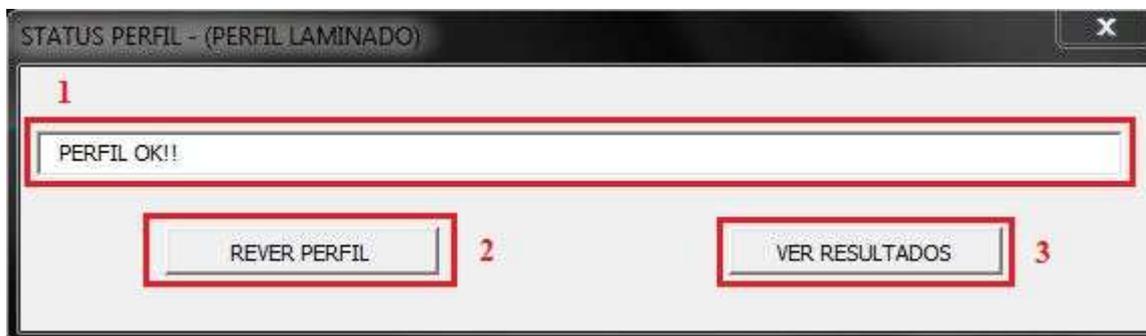
Da mesma forma para os dois tipos de perfil, é apresentado o seguinte:

✓ Item 1: na parte intermediária são apresentados vários campos com a indicação de qual dado de projeto, resultante da análise estrutural do projeto, e em qual unidade o mesmo deve ser informado pelo usuário. Para inserir dados pode ser usado um simples clique na tecla “ENTER” ou através da utilização do mouse.

✓ Item 2: na parte inferior está o botão “INFORMAR DADOS”, que após o usuário ter informado todos os dados e conferido o lançamento dos mesmos, basta clicar neste botão e a partir disso os dados são informados ao sistema e o programa passa para a próxima janela.

Na Figura 14 é apresentada a janela que é de extrema importância, pois é nela que ocorre a comunicação entre o programa e o usuário, esta é denominada "Status do Perfil".

Figura 14: Status Perfil



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Para os dois tipos de perfil é possível observar:

- ✓ Item 1: no centro da janela está o campo onde aparecem as mensagens de erro para o usuário, é a partir dessa mensagem que o usuário define o que será necessário alterar no perfil.
- ✓ Item 2: na parte inferior esquerda está o botão “REVER PERFIL”, onde com um clique, o usuário é redirecionado para a janela inicial do programa para que possa trocar o perfil que está utilizando, através da alteração de suas características geométricas.
- ✓ Item 3: na parte inferior direita está o botão “VER RESULTADOS”, onde após clicar, o usuário é direcionado para a janela onde são apresentados os resultados obtidos na verificação do perfil.

Mesmo que o perfil possua algum erro, o botão “VER RESULTADOS” pode ser acessado pelo usuário, dessa forma são apresentados ao usuário os resultados obtidos com os dados informados. É possível observar em quais verificações o perfil não está atendo a norma. Ainda é informado o aproveitamento atual do perfil em cada tipo de esforço que o perfil está submetido, podendo assim fazer uma escolha adequada de qual perfil deva ser utilizado na próxima verificação.

Na Figura 15 é apresentada a janela de resultados, denominada "Resultados".

Figura 15: Resultados

RESULTADOS - (PERFIL LAMINADO)

| | | | | | | | | | |
|-------|---|------|-------|---|-----------|------|------------------|--------|---|
| Nt,Sd | 1 | 1500 | Nt,Rd | 2 | 203236,36 | kg | 0,738 | % | 3 |
| Nc,Sd | | 4500 | Nc,Rd | | 127552,82 | kg | 3,528 | % | |
| Mx,Sd | | 8000 | Mx,Rd | | 23205,24 | kg.m | 34,475 | % | |
| My,Sd | | 3000 | My,Rd | | 5326,32 | kg.m | 56,324 | % | |
| Vx,Sd | | 1000 | Vx,Rd | | 74655,49 | kg | 1,339 | % | |
| Vy,Sd | | 2000 | Vy,Rd | | 48099,27 | kg | 4,158 | % | |
| | | | | | | | FLEXO TRAÇÃO | 91,168 | % |
| | | | | | | | FLEXO COMPRESSÃO | 92,563 | % |

VEMAS

Programa desenvolvido por:
Alan Rodrigo Simsen

Trabalho de conclusão de curso de Eng. Civil
2014 B

Orientador: Rodrigo Bertoldi

Contato: vemassoftware@gmail.com

Todos direitos reservados.

Os resultados obtidos através da utilização do programa são de responsabilidade do usuário.

REVER PERFIL 4

IMPRIMIR RELATÓRIO 5

NOVO DIMENSIONAMENTO 6

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Para os dois tipos de perfil é possível observar:

- ✓ Item 1: na parte superior esquerda os campos onde são informados ao usuário os esforços solicitantes anteriormente informados.
- ✓ Item 2: na parte superior intermediária estão os campos onde são apresentados, ao usuário, os esforços resistentes conforme as verificações feitas pelo programa.
- ✓ Item 3: na parte superior direita estão os campos onde é informado o aproveitamento do perfil em cada tipo de esforço ou combinação de esforços que esta submetido, podendo o usuário verificar em quais esforços o perfil atende ou não, as verificações da norma.

✓ Item 4: na parte inferior direita, o primeiro botão de cima para baixo, é o “REVER PERFIL”, onde caso o perfil não atenda as solicitações a que esta submetido, o usuário pode voltar para a primeira janela, onde são informadas as características do perfil.

✓ Item 5: na parte inferior direita o segundo botão, de cima para baixo, é o “IMPRIMIR RELATÓRIO”, onde através deste, o usuário pode gerar um relatório de cálculo que será impresso direto na impressora definida como impressora padrão do *Windows*.

✓ Item 6: na parte inferior direita o último botão, de cima para baixo, é o “NOVO DIMENSIONAMENTO”, onde o usuário volta para a primeira janela, em que são informadas as características do perfil.

4.3. Passo a passo

O programa está baseado numa rotina onde são fornecidos dados pelo usuário e o mesmo retorna os resultados obtidos com as verificações pré-programadas, devem ser observados os seguintes passos:

✓ Passo 1: neste ocorre o fornecimento dos dados do perfil a ser verificado, onde na janela “Dimensionamento”, Figura 12, nos campos disponíveis, são informados os dados requisitados nas unidades de medida descritas ao lado. No final do lançamento ocorre a verificação, por parte do usuário, dos dados e posterior confirmação dos mesmos clicando sobre o botão "INFORMAR DADOS";

✓ Passo 2: neste ocorre o fornecimento dos dados de projeto, obtidos na análise da estrutura, onde na janela “Dados de projeto”, Figura 13, nos campos disponíveis, são informados os dados requisitados nas unidades de medida descritas ao lado. No final do lançamento ocorre a verificação, por parte do usuário, dos dados e posterior confirmação dos mesmos clicando sobre o botão "INFORMAR DADOS";

✓ Passo 3: neste ocorre a comunicação do programa com o usuário, onde na janela “Status do perfil”, Figura 14, caso o perfil não atenda a alguma das verificações, são apresentados os erros do mesmo e se o perfil estiver atendendo todas verificações, aparecerá a mensagem de confirmação para o usuário. Nesta janela o usuário pode voltar à janela inicial

do programa para alterar algum valor, através do botão “REVER PERFIL” ou poderá ir para a janela de resultados através do botão “VER RESULTADOS”;

✓ Passo 4: neste ocorre a apresentação dos resultados ao usuário, onde na janela “Resultados”, Figura 15, é possível verificar as solicitações informadas ao programa, as resistências do perfil em cada uma das verificações e uma comparação percentual entre estes valores. Nesta janela o usuário pode voltar à janela inicial do programa para alterar algum valor, através do botão “REVER PERFIL”. Imprimir um memorial de cálculo, através do botão “IMPRIMIR RELATÓRIO” ou poderá ir para a janela inicial para uma nova verificação através do botão “NOVO DIMENSIONAMENTO”;

4.4. Impressão de relatório

Um ponto muito importante no programa é a geração de um memorial de cálculo detalhado de todas as verificações que o programa realiza. Acionando o botão “IMPRIMIR RELATÓRIO” da janela “Resultados”, Figura 15, o relatório é enviado diretamente para a impressão na impressora configurada como impressora padrão do *Windows*.

O usuário pode gerar esse relatório no formato *Portable Document Format* (PDF), para tanto, o usuário deve ter instalado em seu computador uma impressora virtual que gere arquivos nesse formato, e esta deve estar configurada como impressora padrão do *Windows*. Dessa forma, no momento em que o arquivo é impresso, a impressora virtual requisitará ao usuário onde o mesmo deseja salvar o arquivo com o relatório.

4.5. Roteiro de cálculo

Serão abordados o dimensionamento dos dois tipos de perfis I utilizados no programa, laminado e o soldado, que segundo a NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, no seu item 4.5.2.9, possuem módulo de elasticidade de (E) igual a 200.000 MPa, módulo de elasticidade transversal (G) igual a 77.000 MPa e coeficiente de Poisson (ν_a) sendo 0,3.

4.5.1. Perfil tracionado

4.5.1.1. Limitação do índice de esbeltez

Segundo a NBR 8800:2008 no seu item 5.2.8.1 perfis submetidos à tração não devem ter um índice de esbeltez maior que 300, que deve ser determinado pela seguinte expressão para os dois eixos do perfil, no caso de perfil “T”.

$$\lambda = \frac{K.L}{r} \quad (01)$$

Onde:

K= coeficiente de flambagem;

L = comprimento destravado;

r = raio de giro do perfil no eixo analisado.

4.5.1.2. escoamento da seção bruta

Os perfis submetidos ao esforço de tração devem ser dimensionados segundo o item 5.2 da NBR 8800:2008, onde o escoamento da seção bruta é dado pelo seguinte:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (02)$$

Onde:

$N_{t,Rd}$ = força axial de tração resistente de cálculo;

A_g = área da seção bruta do perfil;

f_y = tensão limite de escoamento do aço;

γ_{a1} = coeficiente de segurança do material;

Obtida a força axial de tração resistente de cálculo, a mesma deve ser comparada com a força axial solicitante de cálculo ($N_{t,Sd}$), sendo que o valor obtido na equação abaixo não deve superar 1,0.

$$\frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} \leq 1,0 \quad (03)$$

4.5.2. Barras comprimidas

4.5.2.1. Limitação do índice de esbeltez

Segundo a NBR 8800:2008 no seu item 5.3.4.1 perfis submetidos à compressão não devem ter um índice de esbeltez maior que 200, que deve ser determinado pela equação (01) para os dois eixos do perfil, no caso de perfil “I”.

4.5.2.2. Resistência à Flambagem local

A consideração do efeito da flambagem local de barras axialmente comprimidas deve ser feito de acordo com o Anexo F da NBR 8800:2008, onde o mesmo é considerado por meio de um coeficiente (Q) chamado Fator de Forma, que reduzirá a resistência de cálculo dos perfis.

Para o dimensionamento de perfis “I” submetidos à compressão, será utilizada a fórmula de (Q) para perfis compostos por elementos mistos, ou seja, compostos por elementos (AL) e (AA), que segundo a mesma norma são elementos apoiado-livre (mesas) e apoiado-apoiado (alma) respectivamente. Utiliza-se a seguinte equação:

$$Q = Q_s \cdot Q_a \quad (04)$$

Onde:

Q_s = coeficiente para elementos comprimidos “AL”;

Q_a = coeficiente para elementos comprimidos “AA”.

4.5.2.3. Elementos comprimidos “AL”

Inicialmente deve ser verificado a esbeltez limite (λ_r) para elementos “AL”, expressa por $(b/t)_{lim}$ na Tabela F.1 da NBR 8800:2008, se essa relação superar o valor da equação (05) para elementos AL de perfis “I” laminados e o valor da equação (06) para perfis soldados, deve ser determinado o (Q_s), o valor de $(b/t)_{lim}$ não superando o resultado dessas equações utiliza-se como (Q_s) sendo igual a 1,0.

$$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (05)$$

$$0,64 \sqrt{\frac{E}{f_y/k_c}} \quad (06)$$

Onde:

E = módulo de elasticidade do aço;

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}} \quad (07)$$

Respeitando $0,35 \leq k_c \leq 0,76$.

Sendo:

h = altura da alma;

t_w = espessura da alma.

Para determinação de (Q_s) de perfil “I” laminado, utiliza-se as expressões para os elementos pertencentes ao Grupo 4 da Tabela F.1 da NBR 8800:2008.

Segundo o item F.2.b do anexo F da mesma norma a expressão a ser utilizada é a seguinte:

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < b/t \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (08)$$

$$Q_s = \frac{0,69 \cdot E}{f_y \cdot \frac{b^2}{t}}, \text{ para } b/t > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (09)$$

Onde: (b) e (t) são a largura e espessura do elemento, respectivamente obtidos conforme a Tabela F.1 da referida norma.

Para determinação de (Q_s) de perfil “I” soldado utiliza-se as expressões para os elementos pertencentes ao Grupo 5 da Tabela F.1 da NBR 8800:2008.

Segundo o item F.2.c do anexo F da mesma norma a expressão a ser utilizada é a seguinte:

$$Q_s = 1,415 - 0,65 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E k_c}}, \text{ para } 0,64 \sqrt{\frac{E}{f_y \cdot k_c}} < b/t \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y \cdot k_c}} \quad (10)$$

$$Q_s = \frac{0,90 \cdot E \cdot k_c}{f_y \cdot \frac{b^2}{t}}, \text{ para } b/t > 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y \cdot k_c}} \quad (11)$$

Onde: (b) e (t) são a largura e espessura do elemento, respectivamente obtidos conforme a Tabela F.1 da referida norma.

4.5.2.4. Elementos comprimidos “AA”

Inicialmente deve ser verificado a esbeltez limite (λ_r) para elementos “AA”, expressa por $(b/t)_{lim}$ na Tabela F.1 da NBR 8800:2008, se essa relação superar o valor da equação (12) para elementos “AA” de perfis “I”, deve ser determinado o (Q_a), o valor de $(b/t)_{lim}$ não superando o resultado dessa equação utiliza-se como (Q_a) sendo igual a 1,0.

$$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (12)$$

Onde: (b) e (t) são a largura e espessura do elemento, respectivamente obtidos conforme a Tabela F.1 da referida norma.

Para determinação de (Q_a) deve ser seguido o item F.3 do anexo F da NBR 8800:2008, onde a expressão a ser utilizada é a seguinte:

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (13)$$

Sendo:

A_{ef} = área efetiva da seção transversal, determinada por:

$$A_{ef} = A_g - \sum(b - b_{ef})t \quad (14)$$

Onde, (b_{ef}) é a largura efetiva de um elemento comprimido “AA”, que pode ser determinada pelo que segue:

$$b_{ef} = 1,92 \cdot t \sqrt{\frac{E}{\sigma} \left(1 - \left(\frac{C_a}{b/t} \right) \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right)} \leq b \quad (15)$$

Onde:

σ = é a tensão que pode atuar no elemento analisado, tomando igual a ($\sigma = \chi \cdot f_y$), com (χ) obtido conforme item 5.3.3.1 da NBR 8800:2008.

C_a = é um coeficiente igual a 0,34 para todos os elementos que não se enquadram em mesas e almas de seções tubulares retangulares.

4.5.2.5. Resistência à flambagem global

Para determinação de ($N_{c,Rd}$), força normal de compressão resistente de cálculo para perfis “I”, considerando os estados limites últimos de flexão, torção, flexo-torção e flambagem local, deve ser utilizada a seguinte expressão:

$$N_C = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{1,10} \quad (16)$$

Onde (χ) é o fator de redução associado à resistência à compressão, este fator de redução deve ser determinado conforme o item 5.3.3.1 da NBR 8800:2008, onde são possíveis duas equações que dependem do índice de esbeltez reduzido (λ_o) que deve ser determinado conforme o item 5.3.3.2 da mesma norma.

Para determinação do (λ_o) deve ser utilizada a seguinte equação 17:

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} \quad (17)$$

Onde:

N_e = força normal de flambagem elástica da barra, obtida conforme Anexo E da NBR 8800:2008.

Quando $\lambda_o \leq 1,5$ para determinação de (χ) utiliza-se:

$$\chi = 0,658^{\lambda_o^2} \quad (18)$$

E para $\lambda_o > 1,5$:

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_o^2} \quad (19)$$

4.5.2.6. Determinação (N_e)

(N_e) é a força axial de flambagem elástica, para determinação dessa força em perfil “I” que é duplamente simétrico serão aplicadas três equações:

A primeira para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia “x” da seção transversal:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} \quad (20)$$

Onde:

I_x = inércia do perfil em torno do eixo “x”;

K_x = coeficiente de flambagem para o eixo “x”;

L_x = comprimento destravado em relação ao eixo “x”.

A segunda verificação é para flambagem por flexão em relação ao eixo principal de inércia “y” da seção transversal:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} \quad (21)$$

Onde:

I_y = inércia do perfil em torno do eixo “y”;

K_y = coeficiente de flambagem para o eixo “y”;

L_y = comprimento destravado em relação ao eixo “y”.

A terceira é para flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal “z”:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + G \cdot J \quad (22)$$

Onde:

r_o = raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção, dado por,
 $\sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2 + y_o^2}$, sendo (x_o) e (y_o) as coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais “x” e “y” respectivamente, em relação ao centróide da seção e (r_x) e (r_y) os raios de giro da seção em torno dos eixos “x” e “y” respectivamente;

C_w = é a constante de empenamento da seção, para seções tipo “I” (BELLEI; PINHO; PINHO, 2004):

$$C_w = \frac{t_f \cdot b_f^3}{12} \cdot \frac{(d-t_f)^2}{2} \quad (23)$$

Sendo (t_f) a espessura da mesa, (d) é altura total da seção, medida perpendicularmente ao eixo de flexão e (b_f) é largura da mesa;

K_z = coeficiente de flambagem para o eixo Z;

L_z = comprimento destravado em relação ao eixo Z.

G = é o módulo de elasticidade transversal do aço;

J = é o módulo de inércia à torção uniforme.

Feitas as verificações acima, (N_e) é determinado como sendo igual ao menor valor obtido entre (N_{ex}) , (N_{ey}) e (N_{ez}) .

4.5.3. Perfil fletido em torno do eixo de maior inércia “X”

4.5.3.1. Determinação do momento fletor resistente de cálculo.

Primeiramente deve ser verificado o momento fletor máximo resistente de cálculo, segundo o item 5.4.2.2 da NBR 8800:2008:

$$M_{Rd} = \frac{1,50 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (24)$$

Onde:

W = módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

Para a determinação de momento resistente de cálculo para o estado limite FLT é necessário calcular o fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme, (C_b), para o comprimento destravado (L_b), onde este é definido como a distância entre dois pontos de contenção lateral, essa contenção deve ser em relação ao deslocamento e a torção.

Define-se (C_b) como o coeficiente de equivalência de momento como:

$$C_b = \left(\frac{12,5 \cdot M_{\max}}{2,5 \cdot M_{\max} + 3 \cdot M_a + 4 \cdot M_b + 3 \cdot M_c} \right) R_m \leq 3,0 \quad (25)$$

Onde:

M_{\max} = momento máximo solicitante de cálculo, em módulo, no comprimento destravado;

M_A = momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado;

M_B = momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado;

M_C = momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado;

R_m = parâmetro de monosimetria da seção transversal igual a 1,0 para perfis “I”.

Para determinação de (M_{Rd}) deve ser analisada primeiramente a Tabela G.1 do Anexo G da NBR 8800:2008, onde para o dimensionamento de seções de perfil tipo “I” com dois eixos de simetria e fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia utiliza-se a primeira seção da tabela.

Para cada caso analisado, flambagem lateral por torção (FLT), flambagem lateral da mesa (FLM) e flambagem lateral da alma (FLA), determina-se, parâmetro de esbeltez (λ),

parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação (λ_p) e parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento (λ_r).

4.5.3.2. Flambagem Lateral por Torção (FLT)

Determinam-se os parâmetros de esbeltez através das seguintes fórmulas:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (26)$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (27)$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_x \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2}{I_y}}} \quad (28)$$

Onde:

L_b = comprimento destravado para o efeito de torção;

r_y = raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão;

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) \cdot W}{E \cdot J} \quad (29)$$

Obtidos os valores dos parâmetros de esbeltez, para $(\lambda) \leq (\lambda_p)$ determina se (M_{Rd}) com a equação:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad (30)$$

Onde (M_{pl}) é o momento fletor de plastificação de seção, igual à multiplicação entre o módulo plástico da seção (Z) e (f_y).

Para perfis “I”, segundo Arruda (2008), o módulo plástico de seção em torno do eixo de maior inércia é dado por:

$$Z = b_f \cdot t_f \cdot (d - t_f) + \frac{t_w \cdot (d - 2t_f)^2}{4} \quad (31)$$

Para $(\lambda_p) < (\lambda) \leq (\lambda_r)$ determina se (M_{Rd}) com a equação:

$$M_{Rd} = C_b / \gamma_{a1} \left((M_{pl} - (M_{pl} - M_r)) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \right) \quad (32)$$

Onde (M_r) é o momento fletor correspondente ao início de escoamento, determinado por:

$$M_r = (f_y - \sigma_r) \cdot W \quad (33)$$

Para $(\lambda) > (\lambda_r)$ determina de (M_{Rd}) com a equação:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1} \quad (34)$$

Onde (M_{cr}) é o momento fletor de flambagem elástica, determinado por:

$$M_{cr} = \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y}} \left(1 + 0,039 \cdot \frac{J \cdot L_b^2}{C_w} \right) \quad (35)$$

4.5.3.3. Flambagem Lateral da mesa comprimida (FLM)

Determinam-se os parâmetros de esbeltez através das seguintes fórmulas:

$$\lambda = \frac{b/2}{t_f} \quad (36)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (37)$$

Para perfis laminados:

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \quad (38)$$

Para perfis soldados:

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r) / k_c}} \quad (39)$$

Onde:

b = largura da mesa;

σ_r = tensão residual de compressão nas mesas, tomado igual a $(0,30.f_y)$;

k_c = já determinado anteriormente em 4.5.2.3.

Para $(\lambda) \leq (\lambda_p)$ determina de (M_{Rd}) com a equação:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad (40)$$

O momento fletor de plastificação é igual ao já determinado anteriormente na flambagem lateral por torção.

Para $(\lambda_p) < (\lambda) \leq (\lambda_r)$ determina de (M_{Rd}) com a equação:

$$M_{Rd} = C_b / \gamma_{a1} \left(\left(M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \right) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \right) \quad (41)$$

Onde:

$$M_r = (f_y - \sigma_r) \cdot W \quad (42)$$

Para $(\lambda) > (\lambda_r)$ determina de (M_{Rd}) com a equação:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1} \quad (43)$$

Onde:

Para perfis laminados:

$$M_{cr} = \frac{0,69 \cdot E}{\lambda^2} \cdot W_c \quad (44)$$

Para perfis soldados:

$$M_{cr} = \frac{0,90 \cdot E \cdot k_c}{\lambda^2} \cdot W_c \quad (45)$$

W_c = módulo resistente elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de flexão;

k_c = já determinado anteriormente em 4.5.2.3.

4.5.3.4. Flambagem Lateral da alma (FLA)

Determinam-se os parâmetros de esbeltez através das seguintes fórmulas:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (46)$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (47)$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (48)$$

Onde:

h = altura da alma, tomada igual à distância entre faces internas das mesas nos perfis soldados e igual a este valor menos os dois raios de concordância entre mesa e alma nos perfis laminados;

t_w = espessura da alma.

Para $(\lambda) \leq (\lambda_p)$ determina de (M_{Rd}) com a equação:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad (49)$$

Para $(\lambda_p) < (\lambda) \leq (\lambda_r)$ determina de (M_{Rd}) com a equação:

$$M_{Rd} = C_b / \gamma_{a1} \left(\left(M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \right) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \right) \quad (50)$$

Onde o momento fletor correspondente ao início de escoamento (M_r), é determinado pela multiplicação entre (W) e (f_y).

Para (λ) > (λ_r) determina de (M_{Rd}) com a equação:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1} \quad (51)$$

Onde (M_{cr}) deve ser determinado conforme o Anexo H da NBR 8800:2008, que trata do dimensionamento de perfis com alma esbelta.

Determinados os valores do momento resistente para as quatro verificações, momento máximo resistente, flambagem lateral por torção, flambagem lateral da mesa e flambagem lateral da alma, o valor a ser utilizado para comparação com o momento solicitante deverá ser o menor valor obtido entre as verificações.

4.5.4. Perfil fletido em torno do eixo de menor inércia “Y”

A determinação da resistência de perfil I fletido em torno do eixo de menor inércia é feita através dos mesmos critérios que no eixo de maior inércia, variando algumas verificações.

4.5.4.1. Determinação do momento fletor resistente de cálculo

Primeiramente deve ser verificado o momento fletor máximo resistente de cálculo, segundo o item 5.4.2.2 da NBR 8800:2008:

$$M_{Rd} = \frac{1,50 \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (52)$$

Onde:

W = módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

A determinação segundo o Anexo G da NBR 8800:2008, o momento fletor resistente de cálculo deve ser determinado levando em consideração o estado limite de flambagem lateral da mesa comprimida (FLM).

A Tabela G.1 do Anexo G da NBR 8800:2008, determina para o dimensionamento de seções de perfil tipo “I” com dois eixos de simetria e fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia, que deve ser verificado o parâmetro de esbeltez (λ), parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação (λ_p) e parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento (λ_r).

4.5.4.2. Flambagem Lateral da mesa comprimida (FLM)

Determinam-se os parâmetros de esbeltez através das seguintes fórmulas:

$$\lambda = \frac{b/2}{t_f} \quad (53)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (54)$$

Para perfis laminados:

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \quad (55)$$

Para perfis soldados:

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)/k_c}} \quad (56)$$

Onde:

Para $(\lambda) \leq (\lambda_p)$ determina de (M_{Rd}) com a equação:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad (57)$$

Onde (M_{pl}) é o momento fletor de plastificação de seção, igual a multiplicação entre o módulo plástico da seção (Z) e (f_y).

Para perfis “I”, segundo Arruda (2008), o módulo plástico de seção em torno do eixo de menor inércia é dado por:

$$Z = \frac{b_f^2 \cdot t_f}{2} + \frac{(d-2 \cdot t_f) \cdot t_w^2}{4} \quad (58)$$

Para $(\lambda_p) < (\lambda) \leq (\lambda_r)$ determina de (M_{Rd}) com a equação:

$$M_{Rd} = C_b / \gamma_{a1} \left((M_{pl} - (M_{pl} - M_r)) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \right) \quad (59)$$

Onde:

$$M_r = (f_y - \sigma_r) \cdot W \quad (60)$$

Para $(\lambda) > (\lambda_r)$ determina de (M_{Rd}) com a equação:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1} \quad (61)$$

Onde:

Para perfis laminados:

$$M_{cr} = \frac{0,69 \cdot E}{\lambda^2} \cdot W_c \quad (62)$$

Para perfis soldados:

$$M_{cr} = \frac{0,90 \cdot E \cdot k_c}{\lambda^2} \cdot W_c \quad (63)$$

W_c = módulo resistente elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de flexão.

4.5.5. Cisalhamento no sentido perpendicular a alma

A força cortante resistente de cálculo (V_{Rd}), considerando os estados limites de escoamento e flambagem por cisalhamento, para perfil “I” com cisalhamento no eixo perpendicular a alma, será obtido através da análise dos parâmetros de esbeltez.

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (64)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{f_y}} \quad (65)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{f_y}} \quad (66)$$

Onde (k_v) é igual a 5,0 para almas sem enrijecedores transversais.

Para ($\lambda \leq \lambda_p$) determina de (V_{Rd}) com a equação:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{1,1} \quad (67)$$

Onde:

V_{pl} = força cortante correspondente a plastificação da alma por cisalhamento, que pode ser determinada por:

$$V_{pl} = 0,60 \cdot A_w \cdot f_y \quad (68)$$

Sendo (A_w) é a área efetiva de cisalhamento:

$$A_w = 2 \cdot b_f \cdot t_f \quad (69)$$

Para ($\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$) determina de (V_{Rd}) com a equação:

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{V_{pl}}{1,1} \quad (70)$$

Para ($\lambda > \lambda_r$) determina de (V_{Rd}) com a equação:

$$V_{Rd} = 1,24 \cdot \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^2 \cdot \frac{V_{pl}}{1,1} \quad (71)$$

4.5.6. Cisalhamento no sentido paralelo a alma

A força resistente ao cisalhamento no sentido paralelo a alma, segue a mesma sequência de cálculo em que o cisalhamento ocorre no sentido perpendicular a alma, porém a área efetiva de cisalhamento passa a ser a área da alma que é calculada da seguinte forma:

$$A_w = d \cdot t_w \quad (72)$$

Os parâmetros de esbeltez são determinados do mesmo modo, a força cortante correspondente a plastificação, também é determinada da mesma forma, porém alterando-se o valor da área efetiva ao cisalhamento. Por fim, conforme os parâmetros de esbeltez, é determinada a força resistente ao cisalhamento.

4.5.7. Flexo-tração e compressão

Um perfil de aço submetido à flexo-tração, combinação de tração e flexão atuando simultaneamente, ou ainda, flexo-compressão, combinação de compressão e flexão, deve ser dimensionado segundo item 5.5 da NBR 8800:2008.

Nesses elementos observam-se os seguintes tipos de ruína, que deverão ser consideradas no dimensionamento:

- ✓ Tração com Flexão onde ocorre falha, geralmente, por escoamento;
- ✓ Compressão com flexão em torno de um eixo de simetria, onde ocorre o colapso no plano de flexão, devido às deformações excessivas de flexão, porém sem torção;
- ✓ Compressão com flexão em torno do eixo de maior inércia quando ocorre instabilidade lateral com torção.

Para a atuação simultânea da força axial de tração ou compressão com momentos fletores, deve ser respeitado o valor máximo de 1,0 para interação abaixo:

Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0 \quad (73)$$

Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2$:

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \leq 1,0 \quad (74)$$

Onde:

N_{Sd} = força normal solicitante de cálculo de tração ou compressão, a que se aplicar;

N_{Rd} = força normal resistente de cálculo de tração ou compressão, a que se aplicar;

$M_{Sd,x}$ e $M_{Sd,y}$ = momentos fletores solicitantes de cálculo, respectivamente em torno dos eixos “x” e “y” de seção transversal;

$M_{Rd,x}$ e $M_{Rd,y}$ = momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em torno dos eixos “x” e “y” de seção transversal.

Para as aplicações acima são necessários os resultados de (N_{Rd}), ($M_{Sd,x}$) e ($M_{Sd,y}$), que ainda não são conhecidos, o valor de (N_{Rd}) é obtido do dimensionamento de barras submetidas à força axial tração conforme o item 5.2, ou de compressão, conforme item 5.3 da NBR 8800:2008 e ($M_{Sd,x}$) e ($M_{Sd,y}$) são obtidos a partir do dimensionamento de barras submetidas a flexão, conforme item 5.4.

4.6. Mensagens de erro

A criação de mensagens de erro tornou-se necessária para orientar o usuário do que estava acontecendo com o perfil analisado, sendo utilizadas como ferramenta de comunicação entre o programa e o usuário. Dessa forma foram criadas as mensagens que seguem:

- ✓ # ERRO 1 : PERFIL NÃO ATENDE A SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO: ocorre quando o perfil analisado possui a força axial de tração resistente de cálculo ($N_{t,Rd}$) menor que a força axial de tração solicitante de cálculo ($N_{t,Sd}$), dessa forma o perfil não atende as condições de resistência, sendo que o perfil deve ser revisto.
- ✓ # ERRO 2 : PERFIL NÃO ATENDE O ÍNDICE DE ESBELTEZ LIMITE A TRAÇÃO: ocorre quando o índice de esbeltez (λ), supera em uma ou nas duas direções o valor de 300, que é o limite imposto pela NBR 8800:2008 no seu item 5.2.8.1, a solução é adotar um perfil com outras características geométricas.
- ✓ # ERRO 3 : PERFIL NÃO ATENDE O ÍNDICE DE ESBELTEZ LIMITE A COMPRESSÃO: ocorre quando o índice de esbeltez (λ), supera em uma ou nas duas direções o valor de 200, que é o limite imposto pela NBR 8800:2008 no seu item 5.3.4.1, a solução é adotar um perfil com outras características geométricas.
- ✓ # ERRO 4 : PERFIL NÃO ATENDE A SOLICITAÇÃO DE COMPRESSÃO: ocorre quando o perfil analisado possui a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) menor que a força axial de compressão solicitante de cálculo ($N_{c,Sd}$), dessa forma o perfil não atende as condições de resistência e o perfil deve ser revisto.
- ✓ # ERRO 5 : PERFIL COM ALMA ESBELTA, REVER PERFIL: ocorre quando o perfil analisado possui o parâmetro de esbeltez (λ) da alma maior que o parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento (λ_r), enquadrando a análise do perfil no Anexo H da NBR 8800:2008, que não está abordado no programa desenvolvido, a solução é adotar um perfil com outras características geométricas.
- ✓ # ERRO 6 : PERFIL NÃO ATENDE A SOLICITAÇÃO DE MOMENTO FLETOR EM TORNO DO EIXO X: ocorre quando o perfil analisado possui o momento fletor resistente de cálculo ($M_{x,Rd}$) menor que o momento fletor solicitante de cálculo ($M_{x,Sd}$), dessa forma o perfil não atende as condições de resistência e o perfil deve ser revisto.
- ✓ # ERRO 7 : PERFIL NÃO ATENDE A SOLICITAÇÃO DE MOMENTO FLETOR EM TORNO DO EIXO Y: ocorre quando o perfil analisado possui o momento fletor resistente de cálculo ($M_{y,Rd}$) menor que o momento fletor solicitante de cálculo ($M_{y,Sd}$), dessa forma o perfil não atende as condições de resistência e deve ser revisto.

✓ # ERRO 8 : PERFIL NÃO ATENDE A SOLICITAÇÃO DE CISCALHAMENTO NO EIXO X: ocorre quando o perfil analisado possui a força cortante resistente de cálculo (V_{xRd}) menor que a força cortante solicitante de cálculo (V_{xSd}), dessa forma o perfil não atende as condições de resistência e o perfil deve ser revisto.

✓ # ERRO 9 : PERFIL NÃO ATENDE A SOLICITAÇÃO DE CISCALHAMENTO NO EIXO Y: ocorre quando o perfil analisado possui a força cortante resistente de cálculo (V_{yRd}) menor que a força cortante solicitante de cálculo (V_{ySd}), dessa forma o perfil não atende as condições de resistência e o perfil deve ser revisto.

✓ # ERRO 10: PERFIL NÃO ATENDE A SOLICITAÇÃO DE FLEXO-COMPRESSÃO: ocorre quando o perfil analisado não atende as condições de resistência para a interação entre as forças de compressão e flexão, o perfil deve ser revisto.

✓ # ERRO 11: PERFIL NÃO ATENDE A SOLICITAÇÃO DE FLEXO-TRAÇÃO: ocorre quando o perfil analisado não atende as condições de resistência para a interação entre as forças de tração e flexão, o perfil deve ser revisto.

✓ # ERRO12: I_y É MAIOR QUE I_x , CASO NÃO PREVISTO EM NORMA: ocorre quando o momento de inércia em torno do eixo “y”, (I_y), informado pelo usuário supera o valor informado para o momento de inércia em torno do eixo “x”, (I_x), caso que não está previsto na NBR 8800:2008, dessa forma o perfil ou os dados informados devem ser revisados.

✓ # ERRO13: d' É MAIOR QUE d , REVER DADOS INFORMADOS: ocorre quando o valor de (d') informado pelo usuário supera o valor informado para (d), essas informações são incoerentes, pois em nenhum caso a altura interna entre as mesas supera o valor para altura total do perfil, os dados informados devem ser revisados.

✓ PERFIL OK!! = esta mensagem é apresentada quando o perfil em análise atende a todos os critérios da norma e está resistindo aos esforços solicitantes de projeto.

4.7. Exemplo de cálculo

Por fim, para ilustrar e demonstrar a utilização do programa, será realizada a verificação de dois perfis laminados e um soldado, ambos submetidos as mesmas solicitações. Para isso foi criado um caso hipotético que possui as seguintes solicitações no perfil, todas já ponderadas:

- ✓ $N_{t,Sd}$ = solicitação axial de tração = 1.500 kg;
- ✓ $N_{c,Sd}$ = solicitação axial de compressão = 4.500 kg;
- ✓ $M_{x,Sd}$ = solicitação de flexão em torno do eixo “x” = 8.000 kg;
- ✓ $M_{y,Sd}$ = solicitação de flexão em torno do eixo “y” = 3.000 kg;
- ✓ C_b = fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme = 1,00;
- ✓ $V_{x,Sd}$ = solicitação de cisalhamento no eixo “x” = 1.000 kg;
- ✓ $V_{y,Sd}$ = solicitação de cisalhamento no eixo “y” = 2.000 kg.

Sendo que este perfil está sendo hipoteticamente utilizado como um pilar de um pavilhão e as características de projeto onde o perfil será empregado são as que seguem:

- ✓ K_x = coeficiente de flambagem para o eixo “x” = 1,00;
- ✓ L_x = comprimento destravado em relação ao eixo “x” = 600;
- ✓ K_y = coeficiente de flambagem para o eixo “y” = 1,00;
- ✓ L_y = comprimento destravado em relação ao eixo “y” = 300;
- ✓ K_z = coeficiente de flambagem para o eixo “z” = 1,00;
- ✓ L_z = comprimento destravado em relação ao eixo “z” = 300;
- ✓ L_b = comprimento destravado em relação ao eixo “x” = 300.

4.7.1. Exemplo numérico Perfil I Laminado

4.7.1.1. Primeiro perfil

O perfil laminado, W360 x 32,90, a ser verificado possui as características descritas abaixo e a verificação realizada pelo programa pode ser analisada no memorial de cálculo impresso diretamente do programa constante no Apêndice A:

- ✓ f_y = tensão limite de escoamento do aço = 3.450 kg/cm²;
- ✓ b_f = largura total da mesa = 12,70 cm;
- ✓ t_f = espessura da mesa = 0,85 cm;
- ✓ d = altura total da alma = 34,90 cm;
- ✓ t_w = espessura da alma = 0,58 cm;
- ✓ d' = altura interna plana da alma = 30,80 cm;
- ✓ A_g = área da seção bruta do perfil = 42,10 cm²;
- ✓ I_x = inércia do perfil em torno do eixo “x” = 8.358,00 cm⁴;
- ✓ I_y = inércia do perfil em torno do eixo “y” = 291,00 cm⁴;
- ✓ r_x = raio de giro em torno do eixo “x” = 14,09 cm;
- ✓ r_y = raio de giro em torno do eixo “y” = 2,63 cm;
- ✓ J = é o módulo de inércia à torção uniforme = 9,15 cm⁴.

4.7.1.2. Segundo perfil

Como o primeiro perfil laminado verificado não atendeu a todas as verificações realizadas, será utilizado um perfil, W360 x 51,00, com outras características geométricas para o exemplo e a verificação realizada pelo programa pode ser analisada no memorial de cálculo impresso diretamente do programa constante no Apêndice B, abaixo as características do perfil utilizado:

- ✓ f_y = tensão limite de escoamento do aço = 3.450 kg/cm²;
- ✓ b_f = largura total da mesa = 17,10 cm;
- ✓ t_f = espessura da mesa = 1,16 cm;
- ✓ d = altura total da alma = 35,50 cm;
- ✓ t_w = espessura da alma = 0,72 cm;
- ✓ d' = altura interna plana da alma = 30,8 cm;
- ✓ A_g = área da seção bruta do perfil = 64,80 cm²;
- ✓ I_x = inércia do perfil em torno do eixo “x” = 14.222,00 cm⁴;
- ✓ I_y = inércia do perfil em torno do eixo “y” = 968,00 cm⁴;
- ✓ r_x = raio de giro em torno do eixo “x” = 14,81 cm;
- ✓ r_y = raio de giro em torno do eixo “y” = 3,87 cm;
- ✓ J = é o módulo de inércia à torção uniforme = 24,75 cm⁴.

O lançamento dos dados desse perfil pode ser visualizado nas Figuras 12, 13, 14 e 15, onde o mesmo foi lançado no programa para ilustração da utilização.

4.7.2. Exemplo numérico Perfil I Soldado

O perfil soldado a ser verificado possui as características descritas abaixo e a verificação realizada pelo programa pode ser analisada no memorial de cálculo impresso diretamente do programa constante no Apêndice C:

- ✓ f_y = tensão limite de escoamento do aço = 2.500 kg/cm²;
- ✓ b_f = largura total da mesa = 25,00 cm;
- ✓ t_f = espessura da mesa = 1,00 cm;

- ✓ d = altura total da alma = 40,00 cm;
- ✓ t_w = espessura da alma = 0,40 cm;
- ✓ A_g = área da seção bruta do perfil = 65,20 cm²;
- ✓ I_x = inércia do perfil em torno do eixo “x” = 20.845,73 cm⁴;
- ✓ I_y = inércia do perfil em torno do eixo “y” = 2.604,37 cm⁴;
- ✓ r_x = raio de giro em torno do eixo “x” = 17,88 cm;
- ✓ r_y = raio de giro em torno do eixo “y” = 6,32 cm;
- ✓ J = é o módulo de inércia à torção uniforme = 17,52 cm⁴.

4.8. Testes

Durante a elaboração do programa foram utilizados dois programas pagos para comprovação dos resultados, de modo que foram realizadas verificações de diversos perfis para que fosse possível analisar o resultado de todas verificações realizadas pelo programa criado. Foram observadas pequenas diferenças oriundas de arredondamentos realizados por um ou outro programa, porém estas não foram significativas, não chegando a nenhum dos casos ultrapassar o índice de um ponto percentual.

Outra diferença encontrada, essa por sua vez mais significativa, é em relação a verificação do esforço de cisalhamento resistente no eixo perpendicular a alma, em que um dos programas pagos utiliza como área resistente ao cisalhamento a área da alma do perfil, diferente do indicado pela NBR 8800:2008 no seu item 5.4.3.5, onde a mesma indica a utilização da área referente as duas mesas do perfil. Além da utilização do coeficiente k_v igual a 5,00, sendo que a norma no mesmo item indica a utilização de 1,20.

A última diferença encontrada é em relação a verificação de flambagem lateral da mesa, quando o perfil é verificado a flexão em torno do eixo perpendicular a alma, onde um dos programas pagos utiliza para o cálculo do momento crítico, metade do valor de W_c , diminuindo o momento total resistente pela metade, quando o perfil tiver $\lambda > \lambda_r$.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o avanço da construção civil a busca por soluções mais inteligentes é evidente, com maior tecnologia aplicada, menos desperdícios e retrabalhos. Dessa forma nota-se o aumento do uso do aço sobre o concreto armado, por apresentar uma solução mais adequada nesses quesitos.

O uso crescente do aço é devido a seu processo de fabricação ser mais simples, onde não são necessárias formas, amarração de armaduras e nem espera da cura do material, como acontece no concreto armado. Atualmente é um produto industrializado que já chega pronto para ser instalado no canteiro de obras, se assemelhando aos demais produtos industrializados da construção civil, como esquadrias.

Um fator muito importante ecologicamente é a questão que grande parte do aço é reciclada. Assim, o meio ambiente é mantido mais limpo e não é agredido para obtenção de nova matéria prima.

Da mesma forma é possível observar a evolução das estruturas em geral, tornando as mesmas mais esbeltas e arrojadas. Essa evolução trouxe consigo uma demanda por projetos cada vez mais complexos, porém, atualmente cada vez mais, o tempo para a realização do projeto é menor.

Assim, foi necessário criar uma solução para que fosse possível elaborar o dimensionamento de uma forma mais rápida e precisa. Aliando esse fato à evolução da informática, criaram-se os programas com rotinas pré-programadas, que realizam da mesma forma ou até mais precisa, o dimensionamento, antes feito manualmente, aliviando a carga de

trabalho repetitiva dos profissionais, permitindo que os mesmos tenham mais tempo para focar na concepção da estrutura e busca por outras possibilidades.

Com a elaboração do programa, notou-se que para o dimensionamento de um perfil I, existem inúmeras verificações a serem feitas, com um grande número de variáveis e com varias unidades de medidas envolvidas, que se feitas manualmente, o risco de ocorrerem erros é muito grande, além de demandar muito tempo.

O programa, após ser testado inúmeras vezes, elimina quase que inteiramente a chance de erro nas tarefas repetitivas, tornando-se assim confiável para utilização de profissionais e estudantes da área de estruturas metálicas.

O usuário ainda é responsável por informar a maioria dos dados necessários ao dimensionamento, não perdendo a percepção do que esta condicionando o dimensionamento do perfil.

Como o programa faz todas as verificações e o usuário faz somente o lançamento dos dados do perfil e de projeto, o tempo necessário para verificação de cada perfil diminuiu muito, quando comparado ao cálculo manual. Assim, o usuário pode fazer inúmeras verificações no mesmo tempo em que faria uma, manualmente.

Através da elaboração do trabalho foi possível observar que as equações utilizadas para verificação de perfis metálicos são muitas vezes aplicadas sem entendermos o que esta sendo simulado e o que as mesmas expressam.

Nos testes comparativos realizados entre o programa desenvolvido e programas pagos, foi possível observar pequenas diferenças entre os resultados, oriundas de arredondamentos realizados durante as verificações por parte dos programas pagos e algumas simplificações da norma técnica. As diferenças por arredondamentos não foram significativas. Já, as oriundas de simplificações da norma, por parte dos programas pagos, foram mais expressivas, porém em todos os casos estavam a favor da segurança e conferiram uma resistência menor ao perfil do que o indicado por norma.

É imprescindível salientar que a responsabilidade de utilização e manipulação dos resultados apresentados pelo programa, é totalmente do usuário, não sendo o desenvolvedor do programa responsável pela má utilização ou manipulação dos resultados. O programa

realiza verificações a partir de dados alimentados pelo usuário, o fornecimento de dados incoerentes acabará em resultados não confiáveis.

Como proposições para trabalhos futuros, pode-se incluir novos tipos de perfis e configurações de perfis padrões disponíveis no mercado, fazendo com que o usuário lance o carregamento e o programa determine qual perfil, dentro do rol pré-configurado, atenda as solicitações e consuma a menor quantidade de aço.



REFERÊNCIAS

ARRUDA, Antonio S. S. **Utilização do método plástico no dimensionamento de estruturas metálicas**. Monografia – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto e estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7007**: Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

BELLEI, Ildoney H.; PINHO, Fernando O.; PINHO, Mauro O.; **Edifícios de múltiplos andares em aço**. São Paulo: Pini, 2004, 454 p.

CASTRO, E.M.C.; **Patologia dos edifícios em estrutura metálica**. Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1999.

CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Construção em aço**. 20---. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/>>. Acesso em: 02 fev. 2014.

CHEMIN, Beatriz F. **Manual da Univates para Trabalhos Acadêmicos**: Planejamento, elaboração e Apresentação. 2. ed. Lajeado: Univates, 2012. E-book. Disponível em: <www.univates.br>. Acesso em: 28 abr. 2014.

DIAS, Luís A. M.; **Estruturas de Aço**: Conceitos, técnicas de linguagem. São Paulo, Editora Zigate, ed. 4. 2002, 196 p.

FISCHER, Nádia. **Softwares auxiliam o cálculo estrutural**. 2003. Editora Pini. São Paulo. Disponível em: <<http://piniweb.pini.com.br/construcao/noticias/softwares-auxiliam-o-calculo-estrutural-80278-1.aspx>>. Acesso em: 18 de Agosto de 2014.

GUARNIER, Christiane R. F.; **Metodologias de detalhamento de estruturas metálicas**. Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto 2009.

ITO, Márcia L. **Estruturas metálicas: Estudo de viabilidade em edifícios comerciais.** Monografia – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2005.

KIMURA, Alio. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculos de edifícios com o uso de sistemas computacionais.** São Paulo: Pini, 2007, 624 p. ISBN 978-85-7266-182-9

MONTEIRO, Marcos. **Softwares transformam a engenharia estrutural.** 2009. Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/softwares-transformam-a-engenharia-estrutural/>>. Acesso em: 18 de Agosto de 2014.

MORAES, F.R.; **Uma contribuição ao estudo do processo de projeto de empreendimentos em construção metálica – uma visão segundo a filosofia de produção.** Dissertação Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2000.

OLIVEIRA, António F.M.; LOURENÇO, Paulo B. **Comparação de programas comerciais de cálculo automático para estruturas porticadas.** Departamento de Engenharia Civil – Universidade do Minho, Azurém 2001.

PEDREIRA, Fernando L. A. B. **Análise comparativa de soluções de coberturas metálicas em grandes vãos em perfis tubulares.** Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2012.

PFEIL, Walter. **Estruturas de aço: dimensionamento prático.** Rio de Janeiro: LTC, 2009, 357pg ISBN 978-85-216-1611-5

QUEIROS, Luciano O.A. **Análise estrutural de galpões pré-moldados em concreto considerando a influência da rigidez nas ligações viga-pilar.** 2007. 119p. Dissertação Mestrado. Universidade Federal de Alagoas. Maceió.

ROCHA, Ana P. **Projetista de estruturas metálicas.** 2013. Revista Thecne. Ed 193. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/193/artigo285998-1.aspx>>. Acesso em: 18 de Agosto de 2014.

SABBATINI, Fernando H. **Alvenaria Estrutural - Materiais, execução da estrutura e controle tecnológico:** Requisitos e critérios mínimos a serem atendidos para solicitação de financiamento de edifícios em alvenaria estrutural junto à Caixa Econômica Federal. 2003. Caixa Econômica Federal. Diretoria de Parcerias e Apoio ao Desenvolvimento Urbano.

_____. **Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos:** formulação e aplicação de uma metodologia. 1989. Tese Doutorado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo.

SARAIVA, Adriano de A.; LIMA, Dalila. **Software livre aplicado academicamente e profissionalmente na engenharia mecânica.** In: Congresso Nacional Universidade, EAD e Software Livre. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 2012.

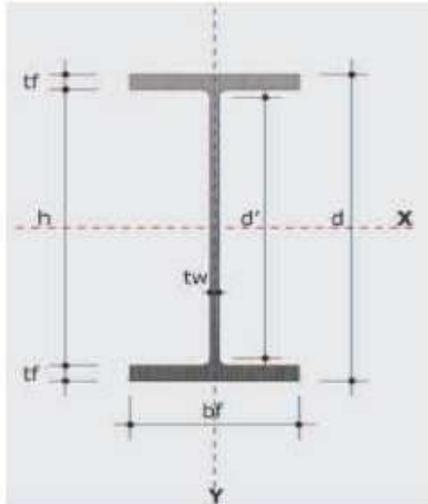
SIDERÚRGICA E METALÚRGICA GERDAU AÇOMINAS S. A. **Perfis estruturais Gerdau – Informações Técnicas.** Disponível em: <<http://www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/>> Acesso em: 25 fev. 2014.

TEIXEIRA, Renata B.; **Análise da gestão do processo estrutural de construções metálicas.**
Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.



APÊNDICE A – Memorial de cálculo do primeiro perfil I do tipo laminado.

MEMORIAL DE CÁLCULO



| Dados do PERFIL | | | | | |
|-----------------|---------|-----------------|---------------|---------|--------------------|
| A_g | 42,10 | cm ² | γ_{a1} | 1,10 | |
| b_f | 12,70 | cm | f_y | 3450 | kg/cm ² |
| t_f | 0,85 | cm | E | 2000000 | kg/cm ² |
| d | 34,90 | cm | G | 770000 | kg/cm ² |
| t_{we} | 0,58 | cm | I | 9,15 | cm ⁴ |
| d' | 30,8 | cm | r_x | 14,09 | cm |
| I_x | 8358,00 | cm ⁴ | r_y | 2,63 | cm |
| I_y | 291,00 | cm ⁴ | | | |

| Dados de PROJETO | | | | | |
|------------------|---------|------|------------|---------|----|
| L_{ox} | 600 | cm | L_b | 300 | cm |
| L_{oy} | 300 | cm | K_{ox} | 1 | |
| L_u | 300 | cm | K_{oy} | 1 | |
| N_{csd} | 1500,00 | kg | K_{ux} | 1 | |
| N_{osd} | 4500,00 | kg | C_b | 1,00 | |
| M_{xsd} | 8000,00 | kg.m | V_{xsd} | 1000,00 | kg |
| M_{yosd} | 3000,00 | kg.m | V_{yosd} | 2000,00 | kg |

| Lista de Erros | |
|----------------|---|
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO |
| OK | PERFIL ATENDE A LIMITAÇÃO DO ÍND. DE ESB. LIMITE A TRAÇÃO |
| OK | PERFIL ATENDE A LIMITAÇÃO DO ÍND. DE ESB. LIM. A COMPRESSÃO |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE COMPRESSÃO |
| OK | PERFIL ATENDE OS PARÂMETROS DO ANEXO G DA NBR 8800/2008 |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE MOMENTO FLETOR EM TORNO DO EIXO X |
| X | # ERRO 7 : PERFIL NÃO ATENDE A SOLICITAÇÃO DE MOMENTO FLETOR EM TORNO DO EIXO Y |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO NO EIXO X |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO NO EIXO Y |
| X | # ERRO 11 : PERFIL NÃO ATENDE A SOLICITAÇÃO DE FLEXO-TRAÇÃO |
| X | # ERRO 10 : PERFIL NÃO ATENDE A SOLICITAÇÃO DE FLEXO-COMPRESSÃO |

| I - Verificação de resistência a tração, segundo Item 5.2 NBR 8800/2008 | |
|---|-----------------------------------|
| Limitação do índice de esbeltez (Artigo 5.2.8) | |
| Valor limite de 300. | |
| $\lambda = \frac{KL}{r}$ | |
| | $\lambda_x = 42,58$ |
| | $\lambda_y = 114,07$ |
| PERFIL ATENDE A LIMITAÇÃO DO ÍND. DE ESB. LIMITE A TRAÇÃO | |
| $N_{e,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}}$ | |
| | $N_{t,Rd} = 132040,91 \text{ kg}$ |
| | $N_{t,Sd} = 1500,00 \text{ kg}$ |

| | |
|--|--------|
| $\frac{N_{red}}{N_{crd}}$ | 0,01 |
| Utilização do perfil | 1,14 % |
| PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO | |

2 - Verificação de resistência a compressão, segundo Item 5.3 NBR 8800/2008

Limitação do índice de esbeltez (Artigo 5.3.4)
 Valor limite de 200.

$\lambda_x = 42,58$

$\lambda = \frac{KL}{r}$

$\lambda_y = 114,07$

PERFIL ATENDE A LIMITAÇÃO DO ÍND. DE ESB. LIM. A COMPRESSÃO
 Flambagem local de barras axialmente comprimidas (Anexo F)

Determinação do valor redução para elementos AL - Mesas

$b/t = 7,47$ $0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 13,48$ $1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 24,80$

Para $b/t < 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ $Q_s = 1,00$

$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$, para $0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < b/t \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ $Q_s = 1,19$

$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \cdot \frac{b^2}{t}}$, para $b/t > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ $Q_s = 7,17$

Logo, $Q_s = 1,00$

Determinação do valor redução para elementos AA - Alma

$b/t = 53,10$ $1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 35,87$

Para $b/t < 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ $Q_a = 1,00$

Para $b/t > 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$, determina-se:

$$b_{ef} = 1,92t \sqrt{\frac{E}{\sigma} \left(1 - \left(\frac{C_u}{b/t} \right) \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right)} \leq b = 22,68 \text{ cm}$$

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef})t = 37,39 \text{ cm}^2$$

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} = 0,888$$

Logo, $Q_a = 0,89$

Determinação valor de redução total "Q"

$$Q = Q_s \cdot Q_a \quad Q = 0,89$$

Força axial de flambagem elástica (Anexo E)

$$N_{cx} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad N_{cx} = 458278,63 \text{ kg}$$

$$N_{cy} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad N_{cy} = 63823,44 \text{ kg}$$

$$N_{cz} = 124087,32 \text{ kg}$$

$$N_{ca} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \frac{\pi^2 E C_w}{(K_x L_x)^2} + GJ \quad N_e = 63823,44 \text{ kg}$$

Fator de redução (Artigo 5.3.3)

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad \lambda_o = 1,42$$

Fator de redução total associado à resistência à compressão

$$\text{para } \lambda_o \leq 1,5 \quad \chi = 0,658 \lambda_o^2 \quad \chi = 0,43$$

$$\text{para } \lambda_o > 1,5 \quad \chi = \frac{0,877}{\lambda_o^2}$$

Resistência à compressão (Artigo 5.3.2)

$$N_c = \frac{\chi Q A_g f_y}{1,10} \quad N_{c,Rd} = 50326,00 \text{ kg}$$

$$N_{c,Sd} = 4500,00 \text{ kg}$$

Utilização do perfil 8,94 %

PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE COMPRESSÃO

3 - Resistência a flexão em torno do eixo X, segundo Item 5.4.2 NBR 8800/2008

Momento máximo resistente de cálculo (Artigo 5.4.2.2)

$$M_{Rd} = \frac{1,50Wf_y}{\gamma_{a1}} \quad MRd = 22533,29 \text{ kg.m}$$

Estado limite último de flambagem lateral com torção (FLT - Anexo G)

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad \lambda = 114,07$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_p = 42,38$$

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_x J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_{tw} \beta_1^2}{I_y}}} \quad \lambda_r = 120,93$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r)W \quad M_r = 11567,09 \text{ kg.m}$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_{tw}}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_{tw}}\right)} \quad M_{cr} = 12755,23 \text{ kg.m}$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W}{EJ} \quad \beta_1 = 0,063$$

$$C_{tw} = 84111,05 \text{ cm}^6$$

$$Z = b_f t_f (d - t_f) + \frac{t_w (d - 2t_f)^2}{4} \quad Z = 527,39 \text{ cm}^3$$

$$M_{pl} = Z f_y \quad M_{pl} = 18195,11 \text{ kg.m}$$

Para $\lambda < \lambda_p$, $M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad MRd = 16541,01 \text{ kg.m}$

Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$,

$$M_{Rd} = \frac{L_b}{\gamma_{a1}} \left((M_{pl} - (M_{pl} - M_r)) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \right) \quad MRd = 11041,91 \text{ kg.m}$$

Para $\lambda > \lambda_r$, $M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1} \quad MRd = 11595,66 \text{ kg.m}$

Como $\lambda_p < \lambda < \lambda_r \quad MRd = \boxed{11041,91} \text{ kg.m}$

Estado limite último de flambagem local da mesa comprimida (FLM - Anexo G)

$$\lambda = \frac{b/2}{t_f} \qquad \lambda = 7,47$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_p = 9,15$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \qquad \lambda_r = 23,89$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r) W \qquad M_r = 11567,09 \text{ kg.m}$$

$$M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_o \qquad M_{cr} = 118434,01 \text{ kg.m}$$

$$M_{pl} = Z f_y \qquad M_{pl} = 18195,11 \text{ kg.m}$$

Para $\lambda < \lambda_p$, $M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \qquad M_{Rd} = 16541,01 \text{ kg.m}$

Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$,
 $M_{Rd} = C_b/\gamma_{R1} \left((M_{pl} - (M_{pl} - M_r)) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \right) \qquad M_{Rd} = 17227,43 \text{ kg.m}$

Para $\lambda > \lambda_r$, $M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1} \qquad M_{Rd} = 107667,28 \text{ kg.m}$

Como $\lambda < \lambda_p$ $M_{Rd} = \boxed{16541,01} \text{ kg.m}$

Estado limite último de flambagem local da alma (FLA - Anexo G)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \qquad \lambda = 53,10$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_p = 90,53$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_r = 137,24$$

$$M_r = f_y W \qquad M_r = 16524,41 \text{ kg.m}$$

Para $\lambda < \lambda_p$, $M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1}$ $MRd = 16541,01 \text{ kg.m}$

Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$,

$$M_{Rd} = C_b / \gamma_{a1} \left((M_{pl} - (M_{pl} - M_r)) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \right) \quad MRd = 17757,98 \text{ kg.m}$$

Para $\lambda > \lambda_r$, deve ser verificado a ANEXO H da NBR 8800/2008.

Como $\lambda < \lambda_p$ $MRd = 16541,01 \text{ kg.m}$

Logo,

$M_{x,Rd} = 11041,91 \text{ kg.m}$

$M_{x,Sd} = 8000,00 \text{ kg.m}$

Utilização do perfil **72,45%**

PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE MOMENTO FLETOR EM TORNO DO EIXO X

4 - Resistência a flexão em torno do eixo Y, segundo Item 5.4.2 NBR 8800/2008

Momento máximo resistente de cálculo (Artigo 5.4.2.2)

$$M_{Rd} = \frac{1,50 W_f f_y}{\gamma_{a1}} \quad MRd = 2155,94 \text{ kg.m}$$

Estado limite último de flambagem local da mesa comprimida (FLM - Anexo G)

$$\lambda = \frac{b/2}{t_f} \quad \lambda = 7,47$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_p = 9,15$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \quad \lambda_r = 23,89$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r) W \quad M_r = 1106,72 \text{ kg.m}$$

$$M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_c \quad M_{cr} = 11331,54 \text{ kg.m}$$

| | |
|---|-----------------------------------|
| $Z = \frac{b_f^2 t_f}{2} + \frac{(d - 2t_f)t_w}{4}$ | $Z = 71,34 \text{ cm}^3$ |
| $M_{pl} = Z f_y$ | $M_{pl} = 2461,24 \text{ kg.m}$ |
| Para $\lambda < \lambda_p$, $M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1}$ | $M_{Rd} = 2237,49 \text{ kg.m}$ |
| Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, $M_{Rd} = C_b / \gamma_{M1} \left((M_{pl} - (M_{pl} - M_r)) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \right)$ | $M_{Rd} = 2377,77 \text{ kg.m}$ |
| Para $\lambda > \lambda_r$, $M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1}$ | $M_{Rd} = 10301,40 \text{ kg.m}$ |
| Logo, | |
| | $M_{y,Rd} = 2155,94 \text{ kg.m}$ |
| | $M_{y,Sd} = 3000,00 \text{ kg.m}$ |
| Utilização do perfil | 139,13% |
| # ERRO 7 : PERFIL NÃO ATENDE A SOLICITAÇÃO DE MOMENTO FLETOR EM TORNO DO EIXO Y | |

| 5 - Resistência ao cisalhamento no eixo X, segundo Item 5.4.3 NBR 8800/2008 | |
|---|---------------------------------|
| $\lambda = \frac{h}{t_w}$ | $\lambda = 7,47$ |
| $\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}}$ | $\lambda_p = 29,01$ |
| $\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}}$ | $\lambda_r = 36,13$ |
| $A_{ov} = 2 b_f t_f$ | $A_{ov} = 21,59 \text{ cm}^2$ |
| $V_{pl} = 0,60 A_{ov} f_y$ | $V_{pl} = 44691,30 \text{ kg}$ |
| Para $\lambda < \lambda_p$, $V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{1,1}$ | $V_{Rd} = 40628,45 \text{ kg}$ |
| Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, $V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{V_{pl}}{1,1}$ | $V_{Rd} = 157784,47 \text{ kg}$ |
| Para $\lambda > \lambda_r$, $V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^4 \cdot \frac{V_{pl}}{1,1}$ | $V_{Rd} = 759836,07 \text{ kg}$ |

| | | | |
|----------------------------|----------------------|----------|----|
| Como $\lambda < \lambda_p$ | $V_{x,Rd} =$ | 40628,45 | kg |
| | $V_{x,Sd} =$ | 1000,00 | kg |
| | Utilização do perfil | 2,46 | % |

PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO NO EIXO X

| | | | |
|--|---|---------------|-----------------------|
| 6 - Resistência ao cisalhamento no eixo Y, segundo Item 5.4.3 NBR 8800/2008 | | | |
| $\lambda = \frac{h}{t_w}$ | | $\lambda =$ | 53,10 |
| $\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{Ek_y}{f_y}}$ | | $\lambda_p =$ | 59,22 |
| $\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{Ek_y}{f_y}}$ | | $\lambda_r =$ | 73,76 |
| $A_{wv} = d t_w$ | | $A_{wv} =$ | 20,24 cm ² |
| $V_{pl} = 0,60 A_{wv} f_y$ | | $V_{pl} =$ | 41900,94 kg |
| Para $\lambda < \lambda_p$, | $V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{1,1}$ | $V_{Rd} =$ | 38091,76 kg |
| Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, | $V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{V_{pl}}{1,1}$ | $V_{Rd} =$ | 42480,68 kg |
| Para $\lambda > \lambda_r$, | $V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^4 \cdot \frac{V_{pl}}{1,1}$ | $V_{Rd} =$ | 58745,36 kg |
| | Como $\lambda < \lambda_p$ | $V_{x,Rd} =$ | 38091,76 kg |
| | | $V_{x,Sd} =$ | 2000,00 kg |
| | Utilização do perfil | 5,25 | % |

PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO NO EIXO Y

7 - Resistência ao esforço de tração e flexão, Item 5.5.1.2 NBR 8800/2008

Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0$$

Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} < 0,2$

$$\frac{N_{sd}}{2N_{Rd}} + \frac{M_{sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{sd,y}}{M_{Rd,y}} \leq 1,0$$

Nsd/Nrd = 0,01
 Logo
 Utilização do perfil **212,17** %

ERRO 11 : PERFIL NÃO ATENDE A SOLICITAÇÃO DE FLEXO-TRAÇÃO

8 - Resistência ao esforço de compressão e flexão, Item 5.5.1.2 NBR 8800/2008

Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0$$

Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} < 0,2$

$$\frac{N_{sd}}{2N_{Rd}} + \frac{M_{sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{sd,y}}{M_{Rd,y}} \leq 1,0$$

Nsd/Nrd = 0,09
 Logo
 Utilização do perfil **216,07** %

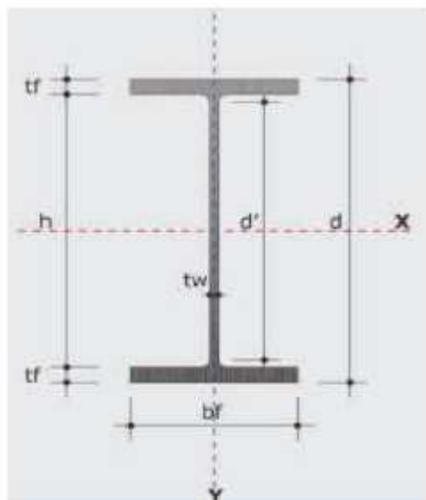
ERRO 10 : PERFIL NÃO ATENDE A SOLICITAÇÃO DE FLEXO-COMPRESSÃO

Os resultados obtidos através da utilização do programa são de responsabilidade do usuário.

Desenvolvido por: Alan Rodrigo Simsen Contato: alan_rodri_s@hotmail.com

APÊNDICE B - Memorial de cálculo do segundo perfil I do tipo laminado.

MEMORIAL DE CÁLCULO



| Dados do PERFIL | | | | | |
|-----------------|----------|-----------------|---------------|---------|--------------------|
| A_g | 64,80 | cm ² | γ_{a1} | 1,10 | |
| b_f | 17,10 | cm | f_y | 3450 | kg/cm ² |
| t_f | 1,16 | cm | E | 2000000 | kg/cm ² |
| d | 35,50 | cm | G | 770000 | kg/cm ² |
| t_w | 0,72 | cm | I | 24,65 | cm ⁴ |
| d' | 30,8 | cm | r_x | 14,81 | cm |
| I_x | 14222,00 | cm ⁴ | r_y | 3,87 | cm |
| I_y | 968,00 | cm ⁴ | | | |

| Dados de PROJETO | | | | | |
|------------------|---------|------|-----------|---------|----|
| L_x | 600 | cm | L_b | 300 | cm |
| L_y | 300 | cm | K_x | 1 | |
| L_u | 300 | cm | K_y | 1 | |
| N_{cnd} | 1500,00 | kg | K_z | 1 | |
| N_{csd} | 4500,00 | kg | C_b | 1,00 | |
| M_{xsd} | 8000,00 | kg.m | V_{xsd} | 1000,00 | kg |
| M_{ygd} | 3000,00 | kg.m | V_{ygd} | 2000,00 | kg |

| Lista de Erros | |
|----------------|--|
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO |
| OK | PERFIL ATENDE A LIMITAÇÃO DO ÍND. DE ESB. LIMITE A TRAÇÃO |
| OK | PERFIL ATENDE A LIMITAÇÃO DO ÍND. DE ESB. LIM. A COMPRESSÃO |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE COMPRESSÃO |
| OK | PERFIL ATENDE OS PARÂMETROS DO ANEXO G DA NBR 8800/2008 |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE MOMENTO FLETOR EM TORNO DO EIXO X |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE MOMENTO FLETOR EM TORNO DO EIXO Y |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO NO EIXO X |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO NO EIXO Y |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE FLEXO-TRAÇÃO |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE FLEXO-COMPRESSÃO |

| 1 - Verificação de resistência a tração, segundo Item 5.2 NBR 8800/2008 | |
|---|-----------------------------------|
| Limitação do índice de esbeltez (Artigo 5.2.8) | |
| Valor limite de 300. | |
| $\lambda = \frac{KL}{r}$ | $\lambda_x = 40,51$ |
| | $\lambda_y = 77,52$ |
| PERFIL ATENDE A LIMITAÇÃO DO ÍND. DE ESB. LIMITE A TRAÇÃO | |
| $N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}}$ | $N_{t,Rd} = 203236,36 \text{ kg}$ |
| | $N_{t,Sd} = 1500,00 \text{ kg}$ |

| | | |
|--|------------------------------|--------|
| | $\frac{N_{solic}}{N_{crad}}$ | 0,01 |
| Utilização do perfil | | 0,74 % |
| PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO | | |

2 - Verificação de resistência a compressão, segundo Item 5.3 NBR 8800/2008

Limitação do índice de esbeltez (Artigo 5.3.4)

Valor limite de 200.

$\lambda_x = 40,51$

$$\lambda = \frac{KL}{r}$$

$\lambda_y = 77,52$

PERFIL ATENDE A LIMITAÇÃO DO ÍND. DE ESB. LIM. A COMPRESSÃO

Flambagem local de barras axialmente comprimidas (Anexo F)

Determinação do valor redução para elementos AL - Mesas

$b/t = 7,37$

$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 13,48$

$1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 24,80$

Para $b/t < 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

$Q_s = 1,00$

$Q_s = 1,415 - 0,34 \frac{b}{r} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$

, para $0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < b/t \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

$Q_s = 1,19$

$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \cdot \frac{b^2}{t}}$

, para $b/t > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

$Q_s = 7,36$

Logo,

$Q_s = 1,00$

Determinação do valor redução para elementos AA - Alma

$b/t = 42,78$

$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 35,87$

Para $b/t < 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

$Q_a = 1,00$

Para $b/t > 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$, determina-se:

$$b_{ef} = 1,92t \sqrt{\frac{E}{G} \left(1 - \left(\frac{C_u}{b/t} \right) \sqrt{\frac{E}{G}} \right)} \leq b = 26,91 \text{ cm}$$

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef})t = 62,00 \text{ cm}^2$$

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} = 0,957$$

Logo, $Q_a = 0,96$

Determinação valor de redução total "Q"

$$Q = Q_s \cdot Q_a \quad Q = 0,96$$

Força axial de flambagem elástica (Anexo E)

$$N_{ux} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad N_{ux} = 779808,41 \text{ kg}$$

$$N_{uy} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad N_{uy} = 212306,16 \text{ kg}$$

$$N_{uz} = 347768,46 \text{ kg}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \quad N_e = 212306,16 \text{ kg}$$

Fator de redução (Artigo 5.3.3)

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{QA_s f_y}{N_e}} \quad \lambda_o = 1,00$$

Fator de redução total associado à resistência à compressão

para $\lambda_o \leq 1,5$ $\chi = 0,658^{\lambda_o^2}$ $\chi = 0,66$

para $\lambda_o > 1,5$ $\chi = \frac{0,877}{\lambda_o^2}$

Resistência à compressão (Artigo 5.3.2)

$$N_c = \frac{\chi QA_s f_y}{1,10} \quad N_{c,Rd} = 127552,82 \text{ kg}$$

$$N_{c,Sd} = 4500,00 \text{ kg}$$

Utilização do perfil 3,53 %

PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE COMPRESSÃO

3 - Resistência a flexão em torno do eixo X, segundo Item 5.4.2 NBR 8800/2008

Momento máximo resistente de cálculo (Artigo 5.4.2.2)

$$M_{Rd} = \frac{1,50Wf_y}{\gamma_{a1}} \quad MRd = 37694,67 \quad \text{kg.m}$$

Estado limite último de flambagem lateral com torção (FLT - Anexo G)

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad \lambda = 77,52$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_p = 42,38$$

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_x J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 27 C_{tw} \beta_1^2 / I_y}} \quad \lambda_r = 122,63$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r)W \quad M_r = 19349,93 \quad \text{kg.m}$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_{tw}}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_{tw}}\right)} \quad M_{cr} = 30336,97 \quad \text{kg.m}$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W}{EJ} \quad \beta_1 = 0,039$$

$$C_{tw} = 284993,96 \quad \text{cm}^6$$

$$Z = b_f t_f (d - t_f) + \frac{t_w (d - 2t_f)^2}{4} \quad Z = 879,33 \quad \text{cm}^3$$

$$M_{pl} = Z f_y \quad M_{pl} = 30336,97 \quad \text{kg.m}$$

Para $\lambda < \lambda_p$, $M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad MRd = 27579,06 \quad \text{kg.m}$

Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, $M_{Rd} = \frac{L_b}{\gamma_{a1}} \left((M_{pl} - (M_{pl} - M_r)) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \right) \quad MRd = 23205,24 \quad \text{kg.m}$

Para $\lambda > \lambda_r$, $M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1} \quad MRd = 27579,06 \quad \text{kg.m}$

Como $\lambda_p < \lambda < \lambda_r \quad MRd = 23205,24 \quad \text{kg.m}$

Estado limite último de flambagem local da mesa comprimida (FLM - Anexo G)

$$\lambda = \frac{b/2}{t_f} \qquad \lambda = 7,37$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_p = 9,15$$

$$\lambda_r = 0,88 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \qquad \lambda_r = 23,89$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r) W \qquad M_r = 19349,93 \text{ kg.m}$$

$$M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_\alpha \qquad M_{cr} = 203528,46 \text{ kg.m}$$

$$M_{pl} = Z f_y \qquad M_{pl} = 30336,97 \text{ kg.m}$$

Para $\lambda < \lambda_p$, $M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \qquad M_{Rd} = 27579,06 \text{ kg.m}$

Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$,

$$M_{Rd} = C_b / \gamma_{s1} \left((M_{pl} - (M_{pl} - M_r)) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \right) \qquad M_{Rd} = 28784,63 \text{ kg.m}$$

Para $\lambda > \lambda_r$, $M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1} \qquad M_{Rd} = 185025,88 \text{ kg.m}$

Como $\lambda < \lambda_p$ $M_{Rd} = \boxed{27579,06} \text{ kg.m}$

Estado limite último de flambagem local da alma (FLA - Anexo G)

$$\lambda = \frac{h}{t_{wv}} \qquad \lambda = 42,78$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_p = 90,53$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_r = 137,24$$

$$M_r = f_y W \qquad M_r = 27642,76 \text{ kg.m}$$

Para $\lambda < \lambda_p$, $M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1}$ MRd = 27579,06 kg.m

Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$,

$$M_{Rd} = C_b / \gamma_{a1} \left((M_{pl} - (M_{pl} - M_r)) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \right)$$
MRd = 30083,02 kg.m

Para $\lambda > \lambda_r$, deve ser verificado a ANEXO H da NBR 8800/2008.

Como $\lambda < \lambda_p$ MRd = 27579,06 kg.m

Logo,

Mx,Rd = 23205,24 kg.m

Mx,Sd = 8000,00 kg.m

Utilização do perfil 34,48 %

PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE MOMENTO FLETOR EM TORNO DO EIXO X

4 - Resistência a flexão em torno do eixo Y, segundo Item 5.4.2 NBR 8800/2008

Momento máximo resistente de cálculo (Artigo 5.4.2.2)

$$M_{Rd} = \frac{1,50 W_f f_y}{\gamma_{a1}}$$
MRd = 5326,32 kg.m

Estado limite último de flambagem local da mesa comprimida (FLM - Anexo G)

$$\lambda = \frac{b/2}{t_f}$$
 $\lambda = 7,37$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$
 $\lambda_p = 9,15$

$$\lambda_r = 0,63 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}}$$
 $\lambda_r = 23,89$

$$M_r = (f_y - \sigma_r) W$$
Mr = 2734,18 kg.m

$$M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_\alpha$$
Mcr = 28758,89 kg.m

| | |
|---|---|
| $Z = \frac{b_f^2 t_f}{2} + \frac{(d - 2t_f)t_w^2}{4}$ | $Z = 173,90 \text{ cm}^3$ |
| $M_{pl} = Z f_y$ | $M_{pl} = 5999,48 \text{ kg.m}$ |
| Para $\lambda < \lambda_p$, $M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1}$ | $M_{Rd} = 5454,07 \text{ kg.m}$ |
| Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, $M_{Rd} = C_b / \gamma_{m1} \left((M_{pl} - (M_{pl} - M_r)) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \right)$ | $M_{Rd} = 5812,36 \text{ kg.m}$ |
| Para $\lambda > \lambda_r$, $M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1}$ | $M_{Rd} = 26144,44 \text{ kg.m}$ |
| Logo, | |
| | $M_{y,Rd} = 5326,32 \text{ kg.m}$ |
| | $M_{y,Sd} = 3000,00 \text{ kg.m}$ |
| Utilização do perfil | 56,32 % |
| PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE MOMENTO FLETOR EM TORNO DO EIXO Y | |

5 - Resistência ao cisalhamento no eixo X, segundo Item 5.4.3 NBR 8800/2008

| | |
|---|----------------------------------|
| $\lambda = \frac{h}{t_w}$ | $\lambda = 7,37$ |
| $\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{E k_y}{f_y}}$ | $\lambda_p = 29,01$ |
| $\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{E k_y}{f_y}}$ | $\lambda_r = 36,13$ |
| $A_{wv} = 2 b_f t_f$ | $A_{wv} = 39,67 \text{ cm}^2$ |
| $V_{pl} = 0,60 A_{wv} f_y$ | $V_{pl} = 82121,04 \text{ kg}$ |
| Para $\lambda < \lambda_p$, $V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{1,1}$ | $V_{Rd} = 74655,49 \text{ kg}$ |
| Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, $V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{V_{pl}}{1,1}$ | $V_{Rd} = 293861,30 \text{ kg}$ |
| Para $\lambda > \lambda_r$, $V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^4 \cdot \frac{V_{pl}}{1,1}$ | $V_{Rd} = 1434315,55 \text{ kg}$ |

| | |
|--|--------------------------|
| Como $\lambda < \lambda_p$ | $V_{x,Rd} = 74655,49$ kg |
| | $V_{x,Sd} = 1000,00$ kg |
| Utilização do perfil | 1,34 % |
| PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO NO EIXO X | |

| | |
|--|---|
| 6 - Resistência ao cisalhamento no eixo Y, segundo Item 5.4.3 NBR 8800/2008 | |
| $\lambda = \frac{h}{t_w}$ | $\lambda = 42,78$ |
| $\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{Ek_v}{f_y}}$ | $\lambda_p = 59,22$ |
| $\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{Ek_v}{f_y}}$ | $\lambda_r = 73,76$ |
| $A_w = dt_w$ | $A_w = 25,56$ cm ² |
| $V_{pl} = 0,60 A_w f_y$ | $V_{pl} = 52909,20$ kg |
| Para $\lambda < \lambda_p$, | $V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{1,1}$ |
| Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, | $V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{V_{pl}}{1,1}$ |
| Para $\lambda > \lambda_r$, | $V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^4 \cdot \frac{V_{pl}}{1,1}$ |
| Como $\lambda < \lambda_p$ | $V_{x,Rd} = 48099,27$ kg |
| | $V_{x,Sd} = 2000,00$ kg |
| Utilização do perfil | 4,16 % |
| PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO NO EIXO Y | |

7 -Resistência ao esforço de tração e flexão, Item 5.5.1.2 NBR 8800/2008

Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0$$

Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} < 0,2$

$$\frac{N_{sd}}{2N_{Rd}} + \frac{M_{sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{sd,y}}{M_{Rd,y}} \leq 1,0$$

Nsd/Nrd = 0,01
 Logo
 Utilização do perfil **91,17** %

PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE FLEXO-TRAÇÃO

8 -Resistência ao esforço de compressão e flexão, Item 5.5.1.2 NBR 8800/2008

Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0$$

Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} < 0,2$

$$\frac{N_{sd}}{2N_{Rd}} + \frac{M_{sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{sd,y}}{M_{Rd,y}} \leq 1,0$$

Nsd/Nrd = 0,04
 Logo
 Utilização do perfil **92,56** %

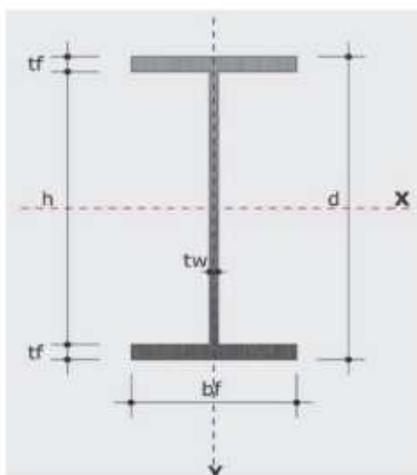
PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE FLEXO-COMPRESSÃO

Os resultados obtidos através da utilização do programa são de responsabilidade do usuário.

Desenvolvido por: Alan Rodrigo Simsen Contato: alan_rodriguez@hotmail.com

APÊNDICE C - Memorial de cálculo do perfil I do tipo soldado.

MEMORIAL DE CÁLCULO



| Dados do PERFIL | | | | | |
|-----------------|----------|-----------------|---------------|---------|--------------------|
| A_g | 65,20 | cm ² | γ_{a1} | 1,10 | |
| b_f | 25,00 | cm | f_y | 2500 | kg/cm ² |
| t_f | 1,00 | cm | E | 2000000 | kg/cm ² |
| d | 40,00 | cm | G | 770000 | kg/cm ² |
| t_w | 0,40 | cm | J | 17,52 | cm ⁴ |
| I_x | 20845,73 | cm ⁴ | r_x | 17,88 | cm |
| I_y | 2604,37 | cm ⁴ | r_y | 6,32 | cm |

| Dados de PROJETO | | | | | |
|------------------|---------|------|-----------|---------|----|
| L_x | 600 | cm | L_b | 300 | cm |
| L_y | 300 | cm | K_x | 1 | |
| L_u | 300 | cm | K_y | 1 | |
| N_{tSd} | 1500,00 | kg | K_a | 1 | |
| N_{oSd} | 4500,00 | kg | C_b | 1,00 | |
| M_{xSd} | 8000,00 | kg.m | V_{vSd} | 1000,00 | kg |
| M_{ySd} | 3000,00 | kg.m | V_{vEd} | 2000,00 | kg |

| Lista de Erros | |
|----------------|--|
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO |
| OK | PERFIL ATENDE A LIMITAÇÃO DO ÍND. DE ESB. LIMITE A TRAÇÃO |
| OK | PERFIL ATENDE A LIMITAÇÃO DO ÍND. DE ESB. LIMITE A COMPRESSÃO |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE COMPRESSÃO |
| OK | PERFIL ATENDE OS PARÂMETROS DO ANEXO G DA NBR 8800/2008 |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE MOMENTO FLETOR EM TORNO DO EIXO X |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE MOMENTO FLETOR EM TORNO DO EIXO Y |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO NO EIXO X |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO NO EIXO Y |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE FLEXO-TRAÇÃO |
| OK | PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE FLEXO-COMPRESSÃO |

| 1 - Verificação de resistência a tração, segundo Item 5.2 NBR 8800/2008 | |
|---|-----------------------------------|
| Limitação do índice de esbeltez (Artigo 5.2.8) | |
| Valor limite de 300. | |
| $\lambda = \frac{KL}{r}$ | $\lambda_x = 33,56$ |
| | $\lambda_y = 47,47$ |
| PERFIL ATENDE A LIMITAÇÃO DO ÍND. DE ESB. LIMITE A TRAÇÃO | |
| $N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}}$ | $N_{t,Rd} = 148181,82 \text{ kg}$ |
| | $N_{t,Sd} = 1500,00 \text{ kg}$ |

| | |
|--|--------|
| $\frac{N_{c\acute{a}d}}{N_{c\acute{a}d}}$ | 0,01 |
| Utilização do perfil | 1,01 % |
| PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE TRAÇÃO | |

2 - Verificação de resistência a compressão, segundo Item 5.3 NBR 8800/2008

Limitação do índice de esbeltez (Artigo 5.3.4)
 Valor limite de 200. $\lambda_x = 33,56$

$$\lambda = \frac{KL}{r}$$

$\lambda_y = 47,47$

PERFIL ATENDE A LIMITAÇÃO DO ÍND. DE ESB. LIMITE A COMPRESSÃO
 Flambagem local de barras axialmente comprimidas (Anexo F)

Determinação do valor redução para elementos AL - Mesas

$b/t = 12,50$ $k_2 = \frac{4}{\sqrt{t/t_w}}$ 0,410 $0,64 \sqrt{\frac{E}{f_y/k_2}}$ 11,60 $1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y \cdot k_2}}$ 21,20

Para $b/t < 0,64 \sqrt{\frac{E}{f_y/k_2}}$ $Q_s = 1,00$

$Q_s = 1,415 - 0,65 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{Ek_2}}$, para $0,54 \sqrt{\frac{E}{f_y/k_2}} < b/t \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y \cdot k_2}}$ $Q_s = 0,97$

$Q_s = \frac{0,90 \cdot E \cdot k_2}{f_y \cdot \frac{b^2}{t}}$, para $b/t > 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y \cdot k_2}}$ $Q_s = 1,89$

Logo, $Q_s = 0,97$

Determinação do valor redução para elementos AA - Alma

$b/t = 95,00$ $1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ 42,14

Para $b/t < 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ $Q_a = 1,00$

Para $b/t > 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$, determina-se:

$$b_{ef} = 1,92t \sqrt{\frac{E}{\sigma} \left(1 - \left(\frac{C_u}{b/t} \right) \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right)} \leq b = 19,52 \text{ cm}$$

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef})t = 57,81 \text{ cm}^2$$

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} = 0,887$$

Logo, $Q_a = 0,89$

Determinação valor de redução total "Q"

$$Q = Q_s \cdot Q_a = 0,86$$

Força axial de flambagem elástica (Anexo E)

$$N_{crx} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad N_{ex} = 1142995,21 \text{ kg}$$

$$N_{cry} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad N_{ey} = 571202,04 \text{ kg}$$

$$N_{ez} = 641341,95 \text{ kg}$$

$$N_{eaz} = \frac{1}{r_o^2} \left(\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right) \quad N_e = 571202,0388 \text{ kg}$$

Fator de redução (Artigo 5.3.3)

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{QA_s f_y}{N_e}} \quad \lambda_o = 0,49$$

Fator de redução total associado à resistência à compressão

para $\lambda_o \leq 1,5$ $\chi = 0,658 \lambda_o^2$ $\chi = 0,90$

para $\lambda_o > 1,5$ $\chi = \frac{0,877}{\lambda_o^2}$

Resistência à compressão (Artigo 5.3.2)

$$N_c = \frac{\chi QA_s f_y}{1,10} \quad N_{c,Rd} = 114638,62 \text{ kg}$$

$$N_{c,Sd} = 4500,00 \text{ kg}$$

Utilização do perfil **3,93%**

PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE COMPRESSÃO

3 - Resistência a flexão em torno do eixo X, segundo Item 5.4.2 NBR 8800/2008

Momento máximo resistente de cálculo (Artigo 5.4.2.2)

$$M_{Rd} = \frac{1,50Wf_y}{\gamma_{s1}} \quad MRd = 35532,50 \quad \text{kg.m}$$

Estado limite último de flambagem lateral com torção (FLT - Anexo G)

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad \lambda = 47,47$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_p = 49,78$$

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_x J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 27 C_{tw} \beta_1^2 / I_y}} \quad \lambda_r = 129,06$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r)W \quad M_r = 18240,02 \quad \text{kg.m}$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_{tw}}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_{tw}}\right)} \quad M_{cr} = 27985,00 \quad \text{kg.m}$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W}{EJ} \quad \beta_1 = 0,052$$

$$C_{tw} = 990234,38 \quad \text{cm}^6$$

$$Z = b_f t_f (d - t_f) + \frac{t_w (d - 2t_f)^2}{4} \quad Z = 1119,40 \quad \text{cm}^3$$

$$M_{pl} = Z f_y \quad M_{pl} = 27985,00 \quad \text{kg.m}$$

$$\text{Para } \lambda < \lambda_p, \quad M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad MRd = 25440,91 \quad \text{kg.m}$$

$$\text{Para } \lambda_p < \lambda < \lambda_r, \quad M_{Rd} = \frac{L_b}{\gamma_{s1}} \left((M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)}) \right) \quad MRd = 25440,91 \quad \text{kg.m}$$

$$\text{Para } \lambda > \lambda_r, \quad M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1} \quad MRd = 25440,91 \quad \text{kg.m}$$

$$\text{Como } \lambda < \lambda_p \quad MRd = 25440,91 \quad \text{kg.m}$$

Estado limite último de flambagem local da mesa comprimida (FLM - Anexo G)

$$\lambda = \frac{b/2}{t_f} \qquad \lambda = 12,50$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_p = 10,75$$

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)/k_s}} \qquad \lambda_r = 20,57$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r) W \qquad M_r = 18240,02 \text{ kg.m}$$

$$M_{cr} = \frac{0,90 \cdot E \cdot k_s \cdot W_c}{\lambda^2} \qquad M_{cr} = 49276,27 \text{ kg.m}$$

$$M_{pl} = Z f_y \qquad M_{pl} = 27985,00 \text{ kg.m}$$

Para $\lambda < \lambda_p$, $M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \qquad M_{Rd} = 25440,91 \text{ kg.m}$

Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$,

$$M_{Rd} = C_b / \gamma_{a1} \left((M_{pl} - (M_{pl} - M_r)) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \right) \qquad M_{Rd} = 23861,33 \text{ kg.m}$$

Para $\lambda > \lambda_r$, $M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1} \qquad M_{Rd} = 44796,61 \text{ kg.m}$

Como $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$ $M_{Rd} = \boxed{23861,33} \text{ kg.m}$

Estado limite último de flambagem local da alma (FLA - Anexo G)

$$\lambda = \frac{h}{t_{av}} \qquad \lambda = 95,00$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_p = 106,35$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_r = 161,22$$

$$M_r = f_y W \qquad M_r = 26057,17 \text{ kg.m}$$

Para $\lambda < \lambda_p$, $M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1}$ MRd = 25440,91 kg.m

Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$,

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left((M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)}) \right) \quad \text{MRd} = 25803,39 \text{ kg.m}$$

Para $\lambda > \lambda_r$, deve ser verificado a ANEXO H da NBR 8800/2008.

Como $\lambda < \lambda_p$ MRd = 25440,91 kg.m

Logo,

Mx,Rd = 23861,33 kg.m

Mx,Sd = 8000,00 kg.m

Utilização do perfil 33,53 %

PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE MOMENTO FLETOR EM TORNO DO EIXO X

4 - Resistência a flexão em torno do eixo Y, segundo Item 5.4.2 NBR 8800/2008

Momento máximo resistente de cálculo (Artigo 5.4.2.2)

$$M_{Rd} = \frac{1,50 W_f f_y}{\gamma_{a1}} \quad \text{MRd} = 7102,82 \text{ kg.m}$$

Estado limite último de flambagem local da mesa comprimida (FLM - Anexo G)

$$\lambda = \frac{b/2}{t_f} \quad \lambda = 12,50$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_p = 10,75$$

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_c) / k_c}} \quad \lambda_r = 20,57$$

$$M_r = (f_y - \sigma_c) W \quad M_r = 3646,12 \text{ kg.m}$$

$$M_{cr} = \frac{0,90 \cdot E \cdot I_c}{\lambda^2} \cdot W_2 \quad M_{cr} = 9850,16 \text{ kg.m}$$

| | |
|---|---|
| $Z = \frac{b_f^2 t_f}{2} + \frac{(\alpha - 2t_f)t_{wv}^2}{4}$ | $Z = 314,02 \text{ cm}^3$ |
| $M_{pl} = Zf_y$ | $MP1 = 7850,50 \text{ kg.m}$ |
| Para $\lambda < \lambda_p$, $M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,1}$ | $MRd = 7136,82 \text{ kg.m}$ |
| Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, $M_{Rd} = C_b / \gamma_{m1} \left((M_{pl} - (M_{pl} - M_r)) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \right)$ | $MRd = 6455,32 \text{ kg.m}$ |
| Para $\lambda > \lambda_r$, $M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{1,1}$ | $MRd = 8954,69 \text{ kg.m}$ |
| Logo, | |
| | $M_{y,Rd} = 6455,32 \text{ kg.m}$ |
| | $M_{y,Sd} = 3000,00 \text{ kg.m}$ |
| Utilização do perfil | 46,47 % |
| PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE MOMENTO FLETOR EM TORNO DO EIXO Y | |

5 - Resistência ao cisalhamento no eixo X, segundo Item 5.4.3 NBR 8800/2008

| | |
|---|---------------------------------|
| $\lambda = \frac{h}{t_w}$ | $\lambda = 12,50$ |
| $\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{Ek_y}{f_y}}$ | $\lambda_p = 34,08$ |
| $\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{Ek_y}{f_y}}$ | $\lambda_r = 42,45$ |
| $A_{wv} = 2b_f t_f$ | $A_{wv} = 50,00 \text{ cm}^2$ |
| $V_{pl} = 0,60 A_{wv} f_y$ | $V_{pl} = 75000,00 \text{ kg}$ |
| Para $\lambda < \lambda_p$, $V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{1,1}$ | $V_{Rd} = 68181,82 \text{ kg}$ |
| Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, $V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{V_{pl}}{1,1}$ | $V_{Rd} = 185903,20 \text{ kg}$ |
| Para $\lambda > \lambda_r$, $V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^4 \cdot \frac{V_{pl}}{1,1}$ | $V_{Rd} = 628531,20 \text{ kg}$ |

| | |
|--|--------------------------|
| Como $\lambda < \lambda_p$ | $V_{x,Rd} = 68181,82$ kg |
| | $V_{x,Sd} = 1000$ kg |
| Utilização do perfil | 1,47 % |
| PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO NO EIXO X | |

| | |
|--|---|
| 6 - Resistência ao cisalhamento no eixo Y, segundo Item 5.4.3 NBR 8800/2008 | |
| $\lambda = \frac{h}{t_w}$ | $\lambda = 95,00$ |
| $\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{Ek_y}{f_y}}$ | $\lambda_p = 69,57$ |
| $\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{Ek_y}{f_y}}$ | $\lambda_r = 86,65$ |
| $A_{cv} = dt_w$ | $A_{cv} = 16,00$ cm ² |
| $V_{pl} = 0,60A_{cv}f_y$ | $V_{pl} = 24000,00$ kg |
| Para $\lambda < \lambda_p$, | $V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{1,1}$ |
| Para $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$, | $V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \frac{V_{pl}}{1,1}$ |
| Para $\lambda > \lambda_r$, | $V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^4 \cdot \frac{V_{pl}}{1,1}$ |
| Como $\lambda > \lambda_r$ | $V_{x,Rd} = 14509,03$ kg |
| | $V_{x,Sd} = 2000,00$ kg |
| Utilização do perfil | 13,79 % |
| PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE CISALHAMENTO NO EIXO Y | |

7 - Resistência ao esforço de tração e flexão, Item 5.5.1.2 NBR 8800/2008

Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0$$

Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} < 0,2$

$$\frac{N_{sd}}{2N_{Rd}} + \frac{M_{sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{sd,y}}{M_{Rd,y}} \leq 1,0$$

Nsd/Nrd = 0,01
Logo
Utilização do perfil 80,51 %

PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE FLECO-TRAÇÃO

8 - Resistência ao esforço de compressão e flexão, Item 5.5.1.2 NBR 8800/2008

Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0$$

Para $\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} < 0,2$

$$\frac{N_{sd}}{2N_{Rd}} + \frac{M_{sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{sd,y}}{M_{Rd,y}} \leq 1,0$$

Nsd/Nrd = 0,04
Logo
Utilização do perfil 81,96 %

PERFIL ATENDE A SOLICITAÇÃO DE FLECO-COMPRESSÃO

Os resultados obtidos através da utilização do programa são de responsabilidade do usuário.

Desenvolvido por: Alan Rodrigo Simsen Contato: alan_rodri_s@hotmail.com