



**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

Gilnei Artur Drehmer

**OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS FORMADAS
POR PERFIS “T” SOLDADOS**

Passo Fundo

2005

Gilnei Artur Drehmer

**OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS FORMADAS
POR PERFIS “T” SOLDADOS**

Dissertação de Mestrado

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

Gilnei Artur Drehmer

ORIENTADOR: Prof. Dr. Moacir Kripka

**OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS FORMADAS
POR PERFIS “I” SOLDADOS**

**Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia e Arquitetura da
Universidade de Passo Fundo, para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia.**

Passo Fundo

2005

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação:

“Otimização de Estruturas Metálicas formadas por Perfis “I” Soldados”

Elaborada por:

Gilnei Artur Drehmer

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia

Aprovado em: 18/04/2005
Pela Comissão Examinadora

Prof. Dr. Moacir Kripka
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Loureiro Ribeiro
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP

Prof. Dr. Ignácio Iturrioz
Universidade Federal do Rio Grande do Sul -
UFRGS

Prof. Dr. Antônio Thomé
Coord. Prog. Pós-Graduação em Engenharia

Prof. Dr. Mário José Paluch
UPF – Faculdade de Engenharia e
Arquitetura

Prof. Dr. Raul Oscar Curadelli
UPF – Faculdade de Engenharia e
Arquitetura

Passo Fundo
2005

RESUMO

O objetivo, em muitos problemas de dimensionamentos ótimos de estruturas, é minimizar o custo ao mesmo tempo em que se satisfaz aos critérios de normas e especificações. Tradicionalmente, os problemas de dimensionamento têm sido resolvidos pela tentativa e erro, ditados pelas especificações de cálculo e guiados pela experiência e intuição do engenheiro. Entretanto, pesquisadores têm continuamente desenvolvido ferramentas de análise e otimização para auxiliar os engenheiros em alguns dos processos trabalhosos de cálculo a fim de chegarem ao “dimensionamento ótimo”. Nas últimas décadas, a inovação nessas ferramentas de cálculo tem crescido com o aumento da velocidade de processamento dos computadores. Como o custo das estruturas metálicas está diretamente ligado ao peso, propõem-se o desenvolvimento e a implementação de uma formulação para a otimização de estruturas formadas por perfis “I” soldados, utilizando como base as espessuras comerciais de chapas existentes no mercado para a formação dos perfis. A verificação foi feita conforme a norma brasileira NBR8800/1986. A otimização de perfis soldados está limitada a seções, carregamentos e propriedades dos materiais conhecidos, sendo feita a minimização do peso pelo uso de um método heurístico, o Método do Recozimento Simulado (Simulated Annealing). Alguns exemplos são apresentados para efetuar a verificação da formulação aqui proposta, assim como comentários, conclusões e sugestões para continuidade do tema.

Palavras-chave: Perfis I soldados, Estrutura metálica, Otimização.

ABSTRACT

The main goal, in the design of structures, it is to minimize the cost while it is satisfied the criteria of codes and specifications. Traditionally, the design has been resolved for trial and error, dictated by the code limitations and guided by the experience and intuition of the Engineer. However, researchers have been developing analysis and optimizing tools to aid the engineers in some of the difficult processes of calculation and to help to obtain "the best" design. In the last decades, the innovation in those calculation tools has been growing with the increase of computers speed. As cost of the steel structures is directly linked to the weight, is presented in this work the development and the implementation of a formulation for structural optimization of welded I sections, using as base data commercial thickness in the Brazilian market, and doing the calculations according with the Brazilian Code NBR8800/1986. The proposal is worked on dimensions of sections, loads and materials properties used in the steel market. To minimize the weight of the welded I section is used an heuristic method, Simulated Annealing, some examples are presented to verify the formulation implemented, as well as comments, conclusions and suggestions for continuity of this research.

Keywords: Welded I section, steel structures, optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo de processo para projetos de estruturas	15
Figura 2 – Esquema genérico do método do recozimento simulado.....	23
Figura 3 – Propriedades geométricas dos perfis I soldados simétricos.....	28
Figura 4 – Curvas de flambagem	33
Figura 5 – Distribuição de tensões normais na flexão.....	37
Figura 6 – Diagrama $M_n \times \lambda$	37
Figura 7 – Dados de entrada do problema – seções com esforços	50
Figura 8 – Dados de entrada do problema - vigas.....	53
Figura 9 – Implementação do Método do Recozimento Simulado	57
Figura 10 – Gráfico da aferição dos parâmetros do método de otimização	59
Figura 11 – Gráfico do resultado da otimização do CS300x76.....	64
Figura 12 – Variação das relações d/b_f com o aumento do esforço de compressão.....	68
Figura 13 – Gráfico das relações de altura x vão relacionadas a Bellei (1994)	71
Figura 14 – Gráfico das relações de altura x vão relacionadas a Rebello (2003).....	72
Figura 15 – Gráfico das áreas das seções em função dos vãos das vigas.....	73
Figura 16– Fluxograma de resistência à tração	80
Figura 17– Fluxograma de resistência à compressão	81
Figura 18– Fluxograma de resistência do momento fletor FLA	82
Figura 19– Fluxograma de resistência do momento fletor FLM.....	82
Figura 20– Fluxograma de resistência do momento fletor FLT.....	83
Figura 21– Fluxograma de resistência do momento fletor.....	83
Figura 22– Fluxograma de resistência à força cortante.....	84
Figura 23– Fluxograma de resistência à flexotração	85
Figura 24– Fluxograma de resistência à flexocompressão.....	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Chapas comerciais produzidas pelas siderúrgicas no Brasil	29
Quadro 2 – Coeficiente de flambagem K para barras isoladas	32
Quadro 3 – Curvas de flambagem para perfis I soldados.....	32
Quadro 4 – Classificação das vigas.....	38
Quadro 5 – Dimensões do perfil I para aferição dos parâmetros	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Coefficientes de ponderação.....	25
Tabela 2 –	Fatores de combinação	25
Tabela 3 –	Valores máximos recomendados para deformações.....	26
Tabela 4 –	Testes de compressão considerando restrições g_6 e g_7 e maior seção	62
Tabela 5 –	Testes de compressão considerando restrições g_6 e g_7 e menor seção	63
Tabela 6 –	Testes de compressão não considerando restrições g_6 e g_7 e maior seção	63
Tabela 7 –	Testes de compressão não considerando restrições g_6 e g_7 e menor seção	63
Tabela 8 –	Áreas de perfis tipo CS à compressão	65
Tabela 9 –	Testes de perfis submetidos à flexão	66
Tabela 10 –	Testes de perfis submetidos à flexo-compressão	68
Tabela 11 –	Perfis otimizados para as vigas	70
Tabela 12 –	Perfis padronizados do tipo VS para as vigas	71
Tabela 13 –	Relação entre as áreas dos perfis otimizados e os perfis padronizados.....	74

NOTAÇÃO

Letras romanas maiúsculas

A_{ef} = área efetiva

A_g = área bruta

A_w = área efetiva de cisalhamento

C_b = coeficiente utilizado no dimensionamento à flexão simples ou composta

C_w = constante de empenamento da seção transversal

CFC = Relação entre esforços solicitantes e resistentes para flexo-compressão

CFT = Relação entre esforços solicitantes e resistentes para flexo-tração

E = módulo de elasticidade do aço, 205000 MPa

G = módulo de elasticidade transversal do aço, $G = 0,385 E$

I_x = momento de inércia em relação ao eixo x

I_y = momento de inércia em relação ao eixo y

I_T = momento de inércia a torção

K_x = parâmetro utilizado no cálculo do comprimento de flambagem segundo eixo x

K_y = parâmetro utilizado no cálculo do comprimento de flambagem segundo eixo y

L_b = comprimento do trecho sem contenção lateral

L_{flx} = comprimento de flambagem segundo o eixo x

L_{fly} = comprimento de flambagem segundo o eixo y

M_{cr} = momento crítico

M_n = resistência nominal ao momento fletor

M_{pl} = momento de plastificação

M_r = momento fletor correspondente ao início de escoamento, incluindo ou não o efeito de tensão residual

M_{rd} = momento fletor de cálculo resistente

M_{sd} = momento fletor de cálculo solicitante

N_e = carga de flambagem elástica

N_{ex} = carga de flambagem elástica segundo o eixo x

N_n = resistência nominal a força normal

N_{sd} = força normal de cálculo solicitante

N_{rd} = força normal de cálculo resistente

N_y = força normal de escoamento da seção, $N_y = A_g \cdot F_y$

Q = coeficiente de redução que considera a flambagem local

Q_a = relação entre a área efetiva e a área bruta da seção da barra

Q_s = fator de redução usado no cálculo de elementos esbeltos comprimidos não enrijecidos

V_n = resistência nominal à força cortante

V_{pl} = força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento

V_{rd} = força cortante de cálculo resistente

V_{sd} = força cortante de cálculo solicitante

W_x = módulo de resistência elástico em relação ao eixo x

W_y = módulo de resistência elástico em relação ao eixo y

Z_x = módulo de resistência plástico em relação ao eixo x

Z_y = módulo de resistência plástico em relação ao eixo y

Letras romanas minúsculas

b_{ef} = largura efetiva

b_f = largura da mesa

d = altura de seção

f_r = tensão residual, a ser considerada igual a 115MPa

f_u = limite de resistência à tração do aço, valor nominal especificado

f_y = limite de escoamento do aço, valor nominal especificado

h = distância entre as faces internas das mesas dos perfis “I”

k = coeficiente de flambagem

r_x = raio de giração em relação ao eixo x

r_y = raio de giração em relação ao eixo y

r_T = raio de giração da seção formada pela mesa comprimida mais 1/3 da região comprimida da alma, calculado em relação ao eixo situado no plano médio da alma

t_f = espessura da mesa

t_w = espessura da alma

Letras gregas

α_x = coeficiente para flambagem de acordo com o tipo de seção em relação ao eixo x

α_y = coeficiente para flambagem de acordo com o tipo de seção em relação ao eixo y

β_x = coeficiente para flambagem de seções submetidas à compressão em relação ao eixo x

β_y = coeficiente para flambagem de seções submetidas à compressão em relação ao eixo y

β_1 = coeficiente para FLT de seções submetidas à flexão

β_2 = coeficiente para FLT de seções submetidas à flexão

ϕ_b = coeficiente de resistência ao momento fletor

ϕ_c = coeficiente de resistência na compressão

ϕ_t = coeficiente de resistência na tração

ϕ_v = coeficiente de resistência à força cortante

λ_x = parâmetro de esbeltez em relação ao eixo x

λ_y = parâmetro de esbeltez em relação ao eixo y

$\bar{\lambda}_x$ = parâmetro de esbeltez para barras comprimidas em relação ao eixo x

$\bar{\lambda}_y$ = parâmetro de esbeltez para barras comprimidas em relação ao eixo y

$\lambda_{m\acute{a}x}$ = parâmetro de esbeltez máximo

λ_p = parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação

λ_r = parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento , com ou sem tensão residual

ρ_x = coeficiente que reflete a influência da flambagem por flexão em relação ao eixo x

ρ_y = coeficiente que reflete a influência da flambagem por flexão em relação ao eixo y

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 INTRODUÇÃO	14
2.2 OTIMIZAÇÃO	16
2.2.1 CONCEITOS GERAIS.....	16
2.2.2 MÉTODO DO RECOZIMENTO SIMULADO (SIMULATED ANNEALING).....	18
2.3 DIMENSIONAMENTO DE PERFIS SOLDADOS	23
2.3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	23
2.3.2 PROPRIEDADES FÍSICAS E GEOMÉTRICAS DOS PERFIS.....	27
2.3.3 MATERIAIS DISPONÍVEIS NO MERCADO NACIONAL	29
2.3.4 VERIFICAÇÃO AO ESFORÇO AXIAL.....	30
2.3.5 FLEXÃO EM RELAÇÃO AO EIXO X.....	36
2.3.6 ESFORÇO CORTANTE.....	41
2.3.7 EFEITOS COMBINADOS.....	43
2.4 PESQUISAS CORRELATAS.....	45
3 FORMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO.....	48
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	48
3.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO.....	49
3.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	56
3.4 AFERIÇÃO DOS PARÂMETROS.....	57
4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	61
4.1 INTRODUÇÃO	61
4.2 ANÁLISE DE SEÇÕES COM ESFORÇOS E COMPRIMENTOS PREVIAMENTE DEFINIDOS.....	62
4.2.1 COMPRESSÃO	62
4.2.2 FLEXÃO.....	65
4.2.3 FLEXO-COMPRESSÃO.....	67
4.3 ANÁLISE DE SEÇÕES DE VIGAS BIAPOIADAS	68
5 CONCLUSÕES	75
5.1 CONCLUSÕES DA PESQUISA	75
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
ANEXO A.....	80

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de estruturas metálicas é geralmente desenvolvido na base da tentativa e erro, baseado em especificações de cálculo e guiado pela experiência do engenheiro, procurando sempre o menor custo da estrutura. Entretanto, atualmente, com a necessidade cada vez maior da redução dos custos, a rapidez com que um projeto deve ser efetuado e, aliado a isso, a velocidade de processamento dos computadores, torna-se fundamental a busca de processos que incorporem métodos computacionais mais velozes e complexos na avaliação, como as técnicas de otimização, que podem ajudar a obter dimensionamentos mais eficientes e mais econômicos.

O uso de uma técnica de otimização pode ajudar na busca do melhor dimensionamento, porque pode selecionar a melhor solução entre as inúmeras possíveis, tendo como base os critérios e restrições de projeto definidos num modelo matemático, no qual a solução ótima é obtida através de um processo sistemático de busca.

O objetivo desta dissertação é avaliar perfis “I” soldados de aço, buscando a menor área da seção transversal quando são submetidos aos diversos tipos de esforços. A busca da menor área será feita utilizando um método heurístico, o Método do Recozimento Simulado, atendendo aos requisitos da norma brasileira de dimensionamento de perfis em aço para edifícios NBR8800/1986 e às limitações de materiais encontrados no mercado nacional. Para isso, é necessária a implementação do algoritmo de otimização juntamente com o algoritmo de verificação de perfis “I” soldados, a fim de que as relações entre a solicitação e a resistência dos perfis sejam restrições da formulação do problema. As relações entre as dimensões referentes ao processo de fabricação indicadas na norma de padronização de perfis “I” soldados NBR5884/2000 também podem ser aplicadas como restrições ao processo de otimização.

O Método do Recozimento Simulado consiste na busca global da solução e foi desenvolvido em analogia ao processo de recozimento dos metais, destacando-se sua fácil implementação computacional e o reduzido número de parâmetros de controle.

Como justificativa para este trabalho, pode-se afirmar que a estrutura metálica é utilizada em todo o mundo, isoladamente ou em combinação com outro material, como o concreto. Seu uso se deve a uma série de fatores, dos quais os mais importantes são a grande resistência, a boa ductilidade, a facilidade de fabricação e, sobretudo, o fato de ser um material inteiramente reciclável. Além dessas, podem ser citadas outras vantagens, como facilidade de montagem, facilidade de efetuar modificações em obra, uniformidade em suas propriedades, baixo peso próprio e um controle dimensional que permite a redução das perdas, as quais, em obras, são praticamente inexistentes. (MAUFOUZ, 1999).

Independentemente dessas vantagens, é conveniente salientar que algumas das maiores fábricas de estruturas metálicas do país se localizam na região de abrangência da Universidade de Passo Fundo, o que justifica fortemente o desenvolvimento deste trabalho.

Além da revisão bibliográfica referente à otimização e ao dimensionamento de estruturas de aço, apresentam-se trabalhos relacionados ao assunto, destacando-se que, até o momento, não foram encontrados estudos relativos à otimização de perfis “I” soldados de aço que utilizem como base de dimensionamento a norma brasileira NBR8800/1986.

Para a validação do método, foram feitas algumas verificações comparando os resultados obtidos com seções padronizadas conforme a norma NBR5884/2000. Na aplicação do método, fizeram-se testes comparativos, considerando os perfis de maneira isolada, submetidos a esforços previamente definidos; buscou-se a seção ótima comparando-a ao perfil de referência.

Também foi feita a análise de vigas biapoiadas submetidas à carga uniformemente distribuída, fazendo-se um comparativo entre as curvas obtidas e as recomendações de Belley (1994) e os gráficos de Rebello (2003).

Por fim, são apresentadas as conclusões referentes à formulação do problema, bem como a avaliação dos resultados obtidos, apresentando-se sugestões para trabalhos futuros relativos ao assunto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

O objetivo do projeto estrutural é o de, simultaneamente, atender às condições de serviço e à confiabilidade do dimensionamento e minimizar o custo total da estrutura.

Na maioria dos casos, o problema de projetar uma estrutura de aço não apresenta solução fácil ou exequível dentro de um círculo fechado em si mesmo no início do projeto. Todavia, existem algumas soluções iniciais ou preliminares que permitem iniciar um problema complexo. Um dos meios mais importantes de se resolver um problema de projeto é o computador, com o qual pode ser obtida uma solução satisfatória, que atenda aos critérios de projeto e às exigências de desempenho da estrutura.

Com o auxílio de um computador, um sistema integrado de projeto poderá ser executado em parte ou em sua totalidade com grande eficiência. Esse sistema pode ser usado como uma ferramenta de análise que permite sintetizar rapidamente o problema através de um certo número de iterações sucessivas. A Figura 1 mostra o fluxograma de operações envolvidas no desenvolvimento de um projeto de estruturas.

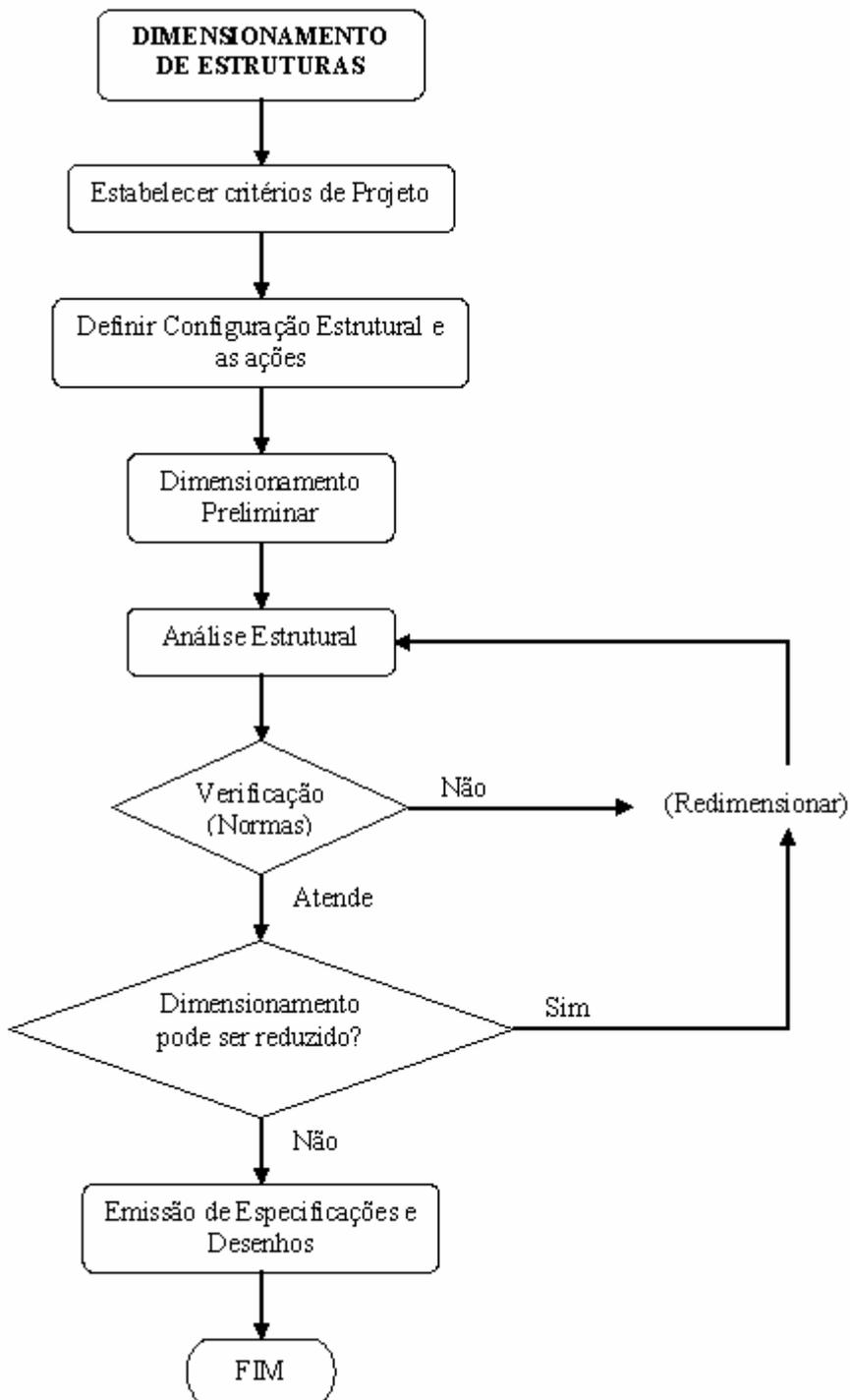


Figura 1 – Fluxo de processo para projetos de estruturas

Na avaliação da possibilidade de redução das seções, os métodos tradicionais de tentativas têm se mostrado pouco eficientes. Por isso, têm sido desenvolvidas técnicas de otimização procurando uma forma sistematizada de melhorar a solução. Dentre essas, as heurísticas vêm tendo aplicação crescente, especialmente quando aplicadas a problemas de difícil tratamento matemático.

Na literatura técnica estrangeira encontram-se diversos trabalhos relativos à otimização de estruturas metálicas, dos quais podem ser destacados Das (2003), Mahfouz (1999), Schinler (2001), Fontán (2001) e Hernández (2001), que têm uma relação direta com o assunto aqui estudado. No entanto, não se conhecem trabalhos realizados de acordo com a norma brasileira NBR8800/1986, tampouco softwares disponíveis que efetuam a otimização de estruturas metálicas.

Em razão da flexibilidade dos métodos heurísticos, optou-se pelo emprego do Método do Recozimento Simulado para a otimização estrutural de estruturas metálicas objetivando a minimização da área da seção transversal de perfis “I” soldados.

2.2 Otimização

2.2.1 Conceitos Gerais

Otimização é um termo muito utilizado no cotidiano, pois sempre que se pretende aumentar a eficiência de determinado processo ou produto está se tentando otimizar. A otimização pode ser feita, além da experiência e do bom senso, pelo uso de ferramentas e técnicas desenvolvidas para auxiliar os trabalhos de otimização.

Basicamente, a otimização consiste em maximizar ou minimizar uma função numérica de uma ou várias variáveis, chamada de função objetivo, podendo existir restrições, que formam um conjunto de especificações ou limitações feitas ao projeto. Um problema de otimização consiste em minimizar ou maximizar uma função objetivo, sujeita ou não a restrições de desigualdade, de igualdade e também a restrições laterais. A função objetivo e as funções de restrição podem ser funções lineares ou não lineares em relação às variáveis de projeto, implícitas ou explícitas e calculadas por técnicas analíticas ou numéricas.

Um problema geral de otimização pode ser definido por:

Minimizar:

$$F(X), \quad X = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T, \quad X \in \mathfrak{R} \quad (01)$$

Sujeita a:

$$g_j(X) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (02)$$

$$h_k(X) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (03)$$

$$X_i^{(L)} \leq X \leq X_i^{(U)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (04)$$

onde $F(X)$ representa a função objetivo; g_j e h_k são as restrições de desigualdade e de igualdade e $X_i^{(L)}$ e $X_i^{(U)}$ são as restrições laterais. Todas essas funções assumem valores em \mathfrak{R} e são, na maioria dos casos, não lineares.

De acordo com Silva (2002), a área da engenharia que tem sido intensamente estudada desde o século XIX é a otimização estrutural, tendo como objetivo básico a redução de peso da estrutura, mas mantendo o seu desempenho.

Vanderplaats (1984) apresenta algumas vantagens do uso da otimização, das quais uma das principais é a redução de tempo dedicado ao projeto, além da possibilidade do tratamento simultâneo de uma grande quantidade de variáveis e restrições de difícil visualização gráfica ou tabular. A obtenção de um produto aprimorado e de soluções não tradicionais e de menor custo não ocorre com base na intuição ou na experiência do engenheiro e a interação homem-máquina é reduzida.

Em contrapartida, Vanderplaats (1984) menciona como limitação o aumento do tempo computacional quando do aumento do número de variáveis de projeto; com isso, podem surgir funções descontínuas que apresentam lenta convergência e funções com muitos mínimos locais, porém o mínimo global raramente é obtido. Técnicas de otimização não têm nenhuma experiência armazenada ou intuição na qual se basear, limitando-se à gama de aplicabilidade do programa de análise. Assim, se o programa de análise não for teoricamente preciso, os resultados de otimização podem conduzir a equívocos, o que implica que se tenha cuidado particularmente na formulação do problema de cálculo automatizado.

Para se chegar ao projeto ótimo, vários métodos podem ser adotados, dos quais o mais antigo é o método da tentativa e erro.

As técnicas clássicas de otimização são conhecidas há mais de um século, sendo utilizadas na física e na geometria, usando os métodos analíticos como o cálculo diferencial e o cálculo variacional. Essas técnicas clássicas de otimização são confiáveis e possuem aplicações nos mais diversos campos da engenharia e de outras ciências, porém, podem apresentar algumas dificuldades numéricas e problemas de robustez, relacionados com a falta de continuidade das funções a serem otimizadas ou de suas restrições, funções não convexas, multimodalidade, existência de ruídos nas funções, necessidade de se trabalhar com valores discretos para as variáveis e existência de mínimos ou máximos locais.

Os métodos numéricos de otimização são essencialmente classificados em métodos de programação matemática e métodos probabilísticos.

Os métodos de programação matemática são classificados em métodos de programação linear, de programação não linear e métodos baseados em teorias de aproximações, como programação linear seqüencial (PLS) ou programação quadrática seqüencial (PQS). Por sua vez, os métodos de programação não linear são classificados em métodos para solução de problemas de otimização sem restrição e com restrição. Esses métodos fornecem um mínimo

local, a menos que o problema somente possua um único mínimo, o qual, nesse caso, será o mínimo global.

Os métodos probabilísticos procuram encontrar o mínimo global do problema de otimização evitando os mínimos locais, baseando-se num processo de busca randômica guiada por decisões probabilísticas. Além disso, são ferramentas poderosas para problemas com variáveis discretas.

Dessa forma, os estudos dos métodos heurísticos com busca randômica controlada por critérios probabilísticos aparecem como forte tendência nos últimos anos, principalmente devido ao avanço computacional, visto que exigem um número elevado de avaliações da função objetivo. Dentre esses métodos, podem ser destacados os mais conhecidos, como o Método dos Algoritmos Genéticos e o Método do Recozimento Simulado. Na seqüência, é apresentado um estudo mais detalhado sobre o Método do Recozimento Simulado por ser o adotado neste trabalho. A opção por este método se deve à fácil implementação computacional e ao reduzido número de parâmetros de controle.

2.2.2 Método do Recozimento Simulado (Simulated Annealing)

O Método do Recozimento Simulado é um método randômico para encontrar satisfatórias soluções para problemas de otimização difíceis. A técnica foi aplicada pela primeira vez a problemas de otimização combinatória por Kirkpatrick (1983) e independente por Cerny (apud SILVA, 1998). Estes autores mostraram que conceitos da mecânica estatística para simular processos de recozimento, propostos inicialmente por Metrópolis (apud SILVA, 1998), podiam ser estendidos para resolver problemas de otimização em geral, especialmente para problemas de otimização combinatória.

O Método do Recozimento Simulado talvez seja mais facilmente explicado como uma extensão da simples e familiar heurística de busca local. A busca local somente requer a definição de um esquema de vizinhança e de um método de avaliação do custo de uma solução particular. O algoritmo busca iterativamente a vizinhança da solução corrente para obter uma solução de melhor qualidade, que passará a ser a nova solução. Quando não há soluções na vizinhança corrente que melhorem a qualidade da solução, o algoritmo termina num ótimo local, o qual depende da solução inicial e pode ser pouco eficiente. A armadilha do ótimo local faz a busca local uma heurística não muito eficiente para muitos problemas de otimização combinatória.

Uma propriedade desejável de qualquer algoritmo é a habilidade de achar uma solução satisfatória independente do ponto de partida.

Uma forma de escapar da armadilha da otimalidade local é reiniciar a busca local de várias soluções iniciais diferentes e utilizar a melhor solução encontrada como solução do algoritmo. Tal estratégia reduz a dependência da solução inicial, mas apresenta um outro problema, que consiste em determinar quando parar o algoritmo. Pode ser observado que repetidas buscas locais convergem assintoticamente para a solução ótima usando todas as soluções como ponto de partida, o que não é viável em problemas grandes.

O padrão do método oferece uma forma de escapar do ótimo local analisando a vizinhança da solução corrente e aceitando uma solução que traga melhora; aceita também soluções que piorem a solução corrente com uma probabilidade que é menor quanto maior for a distância entre essa solução e a solução corrente.

Na física da matéria condensada, o recozimento é um processo térmico para obter estados de baixa energia num banho quente. O processo consiste em incrementar a temperatura do banho quente para um valor máximo no qual o sólido derreta e, após, reduzir cuidadosamente a temperatura do banho quente até que as partículas se organizem no estado de baixa energia do sólido.

Na fase líquida todas as partículas do sólido arranjam-se aleatoriamente. No estado de baixa energia, as partículas formam um arranjo altamente estruturado, conhecido como “cristal”, no qual a energia do sistema é mínima. O estado fundamental do sólido é obtido somente se a temperatura máxima for suficientemente alta e o resfriamento for feito suficientemente lento; em caso contrário, o sólido é congelado num estado metaestável em vez do estado fundamental.

O contrário do recozimento é um processo conhecido como “têmpera”, no qual a temperatura do banho quente é baixada rapidamente, o que resulta novamente num estado metaestável.

Por volta de 1953, Metrópolis et al.(apud SILVA, 1998) introduziram um algoritmo simples para simular a evolução de um sólido num banho quente em equilíbrio térmico. O algoritmo introduzido por esses autores é baseado em técnicas de Monte Carlo e gera uma seqüência de estados do sólido, como descrito a seguir. Dado um estado corrente i do sólido com energia E_i , o estado subsequente j é gerado aplicando-se um mecanismo de perturbação que transforma o estado corrente no próximo estado por uma pequena distorção. A energia do próximo estado é E_j . Se a diferença de energia $E_j - E_i$ é menor ou igual a zero, o estado j é aceito como estado corrente. Se a diferença de energia é maior que zero, o estado j é aceito com uma certa probabilidade que é dada por:

$$p = \exp\left(\frac{E_i - E_j}{k_B T}\right) \quad (05)$$

onde T é a temperatura do banho quente e k_B é uma constante física conhecida como constante de Boltzmann. A regra de aceitação descrita é conhecida como “critério de Metrópolis” e o algoritmo que o usa, como “algoritmo de Metrópolis”.

Se a redução da temperatura é feita suficientemente lenta, o sólido pode encontrar o equilíbrio térmico em cada temperatura, o que é obtido gerando um grande número de transições numa determinada temperatura. O equilíbrio térmico é caracterizado pela distribuição de Boltzmann, e a probabilidade de sólidos no estado i com energia E_i na temperatura T , e é dado por

$$P_T \{X = i\} = \frac{1}{Z(T)} \exp\left(\frac{-E_i}{k_B T}\right) \quad (06)$$

onde X é uma variável estocástica denotando o estado corrente do sólido e $Z(T)$ é a função partição, que é definida como

$$Z(T) = \sum_j \exp\left(\frac{-E_j}{k_B T}\right) \quad (07)$$

onde o somatório abrange todos os possíveis estados.

O algoritmo de Metrópolis pode ser aplicado para gerar uma seqüência de soluções de um problema de otimização combinatória, assumindo, para isso, uma analogia entre um sistema físico de partículas e um problema de otimização combinatória, no qual as soluções num problema de otimização são equivalentes a estados num sistema físico; o custo de uma solução é equivalente à energia de um estado; a seleção de uma solução vizinha num problema de otimização é equivalente à perturbação de um estado físico; o ótimo global de um problema combinatório é equivalente ao estado fundamental de um sistema de partículas e um ótimo local de um problema combinatório é equivalente ao esfriamento rápido no sistema físico.

Através dessa analogia e aplicando sucessivamente o algoritmo de Metrópolis para um problema de otimização combinatória em temperaturas decrescentes, a técnica de otimização conhecida como Método do Recozimento Simulado foi definida.

Para um problema geral de otimização combinatória, assumindo que a minimização da função objetivo é a meta, uma formulação é:

$$\text{Minimizar } f(i) \quad (08)$$

$$\text{Sujeita a } i \in S \quad (09)$$

onde S é o espaço de soluções, i é uma solução, $f(i)$ é a função objetivo e $N(i)$ é a estrutura de vizinhança.

O teste de Metrópolis depende do parâmetro de controle e da magnitude da troca na qualidade da solução. Numa dada temperatura, pequenos acréscimos na função objetivo (assumindo minimização) são mais facilmente aceitáveis que grandes acréscimos, o que dá efetivamente ao algoritmo alguma quantidade de orientação. Desde que o objetivo é encontrar a solução com custo mínimo, o algoritmo geralmente prefere mover ‘colina abaixo’ ao invés de ‘colina acima’, embora, no início, quando a temperatura é alta, qualquer solução seja aceita. Com a redução da temperatura, soluções de pior qualidade são menos prováveis de serem aceitas. Eventualmente, o Método do Recozimento Simulado degenera para um estágio em que é análogo ao algoritmo de busca local, com a notável diferença de que a condição de parada não assegura, necessariamente, que o algoritmo termine num ótimo local. No entanto, é proposto que o algoritmo terminará numa solução que é muito próxima da otimalidade global.

Quando T passa a ser um parâmetro de controle, a constante de Boltzmann não tem analogia num problema de otimização, sendo eliminada. No entanto, é usual referir-se a T como a temperatura, e a taxa do modo pelo qual T é reduzida é chamada “programa de resfriamento”. Convém ressaltar que a velocidade de convergência do algoritmo depende muito da escolha do número L de iterações e da temperatura T para cada iteração. Não é recomendável tratar esses dois parâmetros como indicadores governando equilíbrio térmico, mas devem ser manipulados para melhorar a eficiência do algoritmo. É mais prudente investigar o padrão do recozimento como uma técnica de otimização sem as restrições de qualquer significado físico dado pelos vários parâmetros.

Em termos puramente teóricos, tem sido mostrado que o algoritmo converge para um conjunto de soluções ótimas globais quando o tempo tende para o infinito. Entretanto, quando implementado o algoritmo, considerações práticas devem ser dadas ao programa de resfriamento para assegurar convergência para uma solução de boa qualidade num tempo razoável.

No Recozimento Simulado a temperatura não é constante, mas é reduzida após um número de iterações. Isso pode ser considerado também como um número de diferentes cadeias homogêneas, ou como uma simples cadeia não-homogênea, em que a probabilidade de transição não depende somente dos estados, mas também da temperatura, isto é, as probabilidades são dependentes do número de iterações.

É importante salientar que há muitos parâmetros a serem ajustados para um determinado problema; se encontrados bons parâmetros para o problema, poucos ajustes serão necessários para outras instâncias do mesmo.

A maneira pela qual a temperatura é reduzida dá o nome ao programa de resfriamento, sendo a temperatura reduzida pela multiplicação por um fator fixo $\alpha < 1$:

$$T_{k+1} = \alpha T_k \quad (10)$$

De acordo com a sugestão de Silva (1998), como a temperatura deve ser reduzida lentamente, o valor de α é usualmente selecionado entre 0,8 e 0,99 com tendência a valores próximos de 1. O valor de α usado no algoritmo afeta o tempo de execução e a qualidade desejada para a solução. Se o valor dele for pequeno, a temperatura resfria rapidamente, levando a que o algoritmo pare rapidamente, porém ofereça soluções pouco eficientes. Se α estiver próximo de 1, a temperatura reduz-se lentamente, exigindo maior tempo de execução e, por consequência, garantindo soluções de melhor qualidade.

O programa de resfriamento tenta restabelecer o equilíbrio após cada redução de temperatura executando um número L fixo de iterações de movimentos pela vizinhança. O número de transições requeridas para restabelecer esse equilíbrio depende da variação da temperatura e do tamanho do problema. O programa de resfriamento ignora a variação da temperatura e estabelece um tamanho suficiente, que pode ser atrelado ao tamanho do problema.

O algoritmo do Recozimento Simulado deve parar quando estiver congelado. Determinar quando o sistema está congelado não é claro, mas deve significar que há uma pequena ou nenhuma possibilidade de escapar da solução corrente. O método utilizado é parar quando a solução corrente permanece a mesma para um número “ s ” de cadeias consecutivas. Essa condição de parada deve ocorrer somente em baixas temperaturas. O valor de s pode afetar o algoritmo provocando parada prematura, resultando numa solução que não é a melhor que o algoritmo pode encontrar. Se o valor de s não afeta o algoritmo, a condição de parada usada não está atuando o suficiente para reconhecer que o sistema já está congelado.

Dadas essas definições, um esquema genérico do método do recozimento simulado é mostrado na Figura 2.

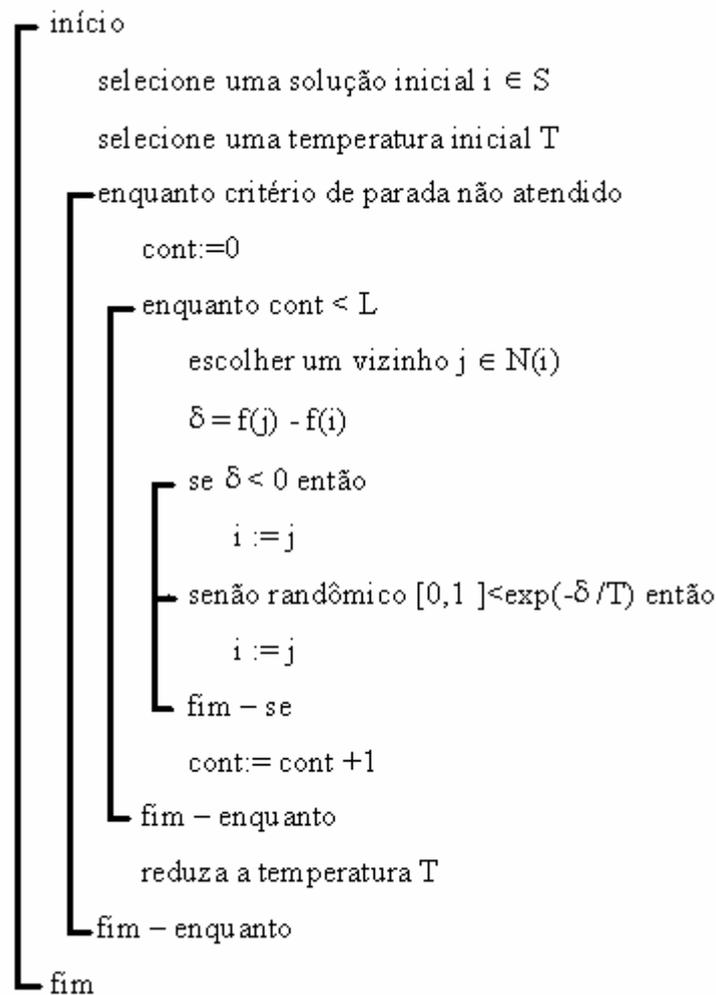


Figura 2 – Esquema genérico do método do recozimento simulado

2.3 Dimensionamento de Perfis Soldados

2.3.1 Considerações Gerais

O dimensionamento correto de uma estrutura deve assegurar o desempenho estrutural e a solução mais econômica possível. Ao longo do tempo, o processo de dimensionamento sofreu mudanças, ou seja, evoluiu tanto que hoje existem várias normas, as quais fornecem as exigências mínimas para o projeto de estruturas seguras.

Os métodos de dimensionamento mais importantes são Método das Tensões Admissíveis, Método dos Coeficientes das Ações e Método dos Estados Limites. Este último é o que está substituindo, gradativamente, o Método das Tensões Admissíveis nas normas de dimensionamento.

A norma NBR8800/1986 é baseada no Método dos Estados Limites, pelo qual devem ser respeitados os estados limites últimos, relacionados ao colapso total ou parcial da estrutura, como perda de equilíbrio, ruptura por qualquer tipo de solicitação, instabilidade

total ou parcial, flambagem global de barras, flambagem local de elementos de barras, e os estados limites de utilização, relacionados ao comportamento da estrutura, impedindo sua utilização para o fim a que se destina, como deformações excessivas ou vibrações excessivas.

Como critério de dimensionamento, deve ser satisfeita a seguinte inequação:

$$S_d \leq R_d \quad (11)$$

onde S_d é a sollicitação de cálculo e R_d é a resistência de cálculo.

A sollicitação de cálculo S_d é definida por uma combinação de carregamentos onde os esforços nominais A_j são fatorados conforme mostra a equação:

$$S_d = \sum \gamma_j \psi_j A_j \quad (12)$$

onde: $\gamma_j \geq 1$ e $\psi_j \leq 1$.

A resistência de cálculo R_d é determinada conforme os requisitos da norma, sendo minorada por um coeficiente de redução interna ϕ e este tem seus valores definidos em função do tipo de sollicitação:

$$R_d = \phi R_n \quad (13)$$

A NBR8800/1986 considera três tipos de combinações de ações para determinar os estados limites últimos:

- combinações normais: com os carregamentos possíveis durante a vida útil da estrutura;
- combinações construtivas: com os carregamentos possíveis durante a construção ou montagem da estrutura;
- combinações excepcionais: com os carregamentos devidos a acidentes.

As combinações são definidas pelas seguintes expressões:

- combinações normais e construtivas

$$S_d = \sum \gamma_g G + \gamma_{q1} Q_1 + \sum \gamma_{qj} \Psi_j Q_j \quad (14)$$

- combinações excepcionais

$$S_d = \sum \gamma_g G + E + \sum \gamma_{qj} \Psi_j Q_j \quad (15)$$

Onde :

G = ação permanente

γ_g = coeficiente de majoração de ação permanente

Q_1 = ação variável principal

γ_{q1} = coeficiente de majoração de ação permanente principal

Q_j = demais ações variáveis

γ_{qj} = coeficientes de majoração das demais ações variáveis

Ψ_j = fatores de combinação

E = ação excepcional (explosões, choques de veículos, efeitos sísmicos)

Os fatores de combinação são apresentados nas tabelas do item 4.8.1 da NBR8800/1986, aqui reproduzidos nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Coeficientes de ponderação

Combinações	Ações permanentes		Ações variáveis			
	Grande variabilidade	Pequena variabilidade	Recalques diferenciais	Variação de temperatura	Ações decorrentes do uso	Demais ações variáveis
	$\gamma_g^{(a)}$	$\gamma_g^{(b)}$	γ_q	$\gamma_q^{(c)}$	$\gamma_q^{(d)}$	γ_q
Normais	1,4 (0,9)	1,3 (1,0)	1,2	1,2	1,5	1,4
Durante a construção	1,3 (0,9)	1,2 (1,0)	1,2	1,0	1,3	1,2
Excepcionais	1,2 (0,9)	1,1 (1,0)	0	0	1,1	1,0

Fonte: NBR8800/1986

Notas: a) Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não entram nas combinações.

b) São consideradas cargas permanentes de pequena variabilidade os pesos próprios de elementos metálicos e pré-fabricados, com controle rigoroso de peso. Excluem-se os revestimentos feitos *in-loco* destes elementos.

c) A variação de temperatura citada não inclui a gerada por equipamentos (esta deve ser considerada como ação decorrente do uso da edificação).

d) Ações decorrentes do uso da edificação incluem: sobrecarga em pisos e em coberturas, cargas de pontes rolantes, cargas de outros equipamentos, etc.

Tabela 2 – Fatores de combinação

Ações	$\psi^{(A)}$
Sobrecargas em pisos de bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens; conteúdo de silos e reservatórios	0,75
Cargas de equipamentos, incluindo pontes-rolantes, e sobrecargas em pisos diferentes dos anteriores	0,65
Pressão dinâmica do vento	0,6
Variações de temperatura	0,6

Fonte: NBR8800/1986

(A) Os coeficientes ψ devem ser tomados iguais a 1,0 para as ações variáveis não citadas nesta tabela e também para as ações variáveis nela citadas, quando forem de mesma natureza da ação variável predominante Q_1 ; todas as ações variáveis decorrentes do uso de uma edificação (sobrecargas em pisos e em coberturas, cargas de pontes-rolantes e de outros equipamentos), por exemplo, são consideradas de mesma natureza.

Para os estados limites de utilização é necessário verificar o comportamento da estrutura sob ação das cargas em serviço, o que é feito utilizando-se combinações de ações nominais associadas ao tipo de resposta pesquisada. Os valores dos limites de deformações para barras de estruturas e de conjuntos de elementos estruturais estão indicados no Anexo C da NBR8800/1986 e estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores máximos recomendados para deformações

Edifícios industriais	Deformações verticais	Ações a considerar:		
		Sobrecarga	Barras biapoiadas suportando elementos de cobertura inelásticos	$\frac{1}{240}$ do vão
		Sobrecarga	Barras biapoiadas suportando elementos de cobertura elásticos	$\frac{1}{180}$ do vão
		Sobrecarga	Barras biapoiadas suportando pisos	$\frac{1}{360}$ do vão
		Cargas máximas por roda (sem impacto)	Vigas de rolamento biapoiadas para pontes rolantes com capacidade de 200kN ou mais.	$\frac{1}{800}$ do vão
	Cargas máximas por roda (sem impacto)	Vigas de rolamento biapoiadas para pontes rolantes com capacidade inferior a 200kN	$\frac{1}{600}$ do vão	
Deformações horizontais	Força transversal da ponte	Vigas de rolamento biapoiadas para pontes rolantes	$\frac{1}{600}$ do vão	
	Força transversal da ponte ou vento	Deslocamento horizontal da coluna, relativo à base (ver nota b)	$\frac{1}{400}$ a $\frac{1}{200}$ da altura	
Outros edifícios	Deformações verticais	Sobrecarga	Barras biapoiadas de pisos e coberturas, suportando construção e acabamentos sujeitos à fissuração	$\frac{1}{360}$ do vão
		Sobrecarga	Idem, não sujeitos à fissuração	$\frac{1}{300}$ do vão
	Deformações horizontais	Vento	Deslocamento horizontal do edifício, relativo à base, devido a todos os efeitos	$\frac{1}{400}$ da altura do edifício
		Vento	Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos, devido à força horizontal total no andar entre os dois pisos considerados, quando fachadas e divisórias (ou suas ligações com a estrutura) não absorverem as deformações da estrutura	$\frac{1}{500}$ da altura do andar
		Vento	Idem, quando absorverem	$\frac{1}{400}$ da altura do andar

Fonte: NBR8800/1986

Como o presente trabalho trata apenas da otimização de perfis “I” soldados, os estudos em seqüência referem-se especificamente a este perfil, bem como todas as formulações.

2.3.2 Propriedades físicas e geométricas dos perfis

As propriedades físicas são comuns a todos os tipos de aço estrutural na faixa normal de temperaturas atmosféricas e estão especificadas no item 4.6.9 da NBR8800/1986:

E = módulo de elasticidade = 205.000MPa

ν = coeficiente de Poisson = 0,3

β = coeficiente de dilatação térmica = $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

γ = peso específico = 77kN/m³

As propriedades geométricas são calculadas conforme a norma NBR5884/2000 e estão indicadas na Figura 3. Estas propriedades são:

A_g – área bruta da seção transversal

I_x – momento de inércia da seção em relação ao eixo x

I_y – momento de inércia da seção em relação ao eixo y

W_x – módulo resistente da seção em relação ao eixo x

W_y – módulo resistente da seção em relação ao eixo y

r_x – raio de giração da seção em relação ao eixo x

r_y – raio de giração da seção em relação ao eixo y

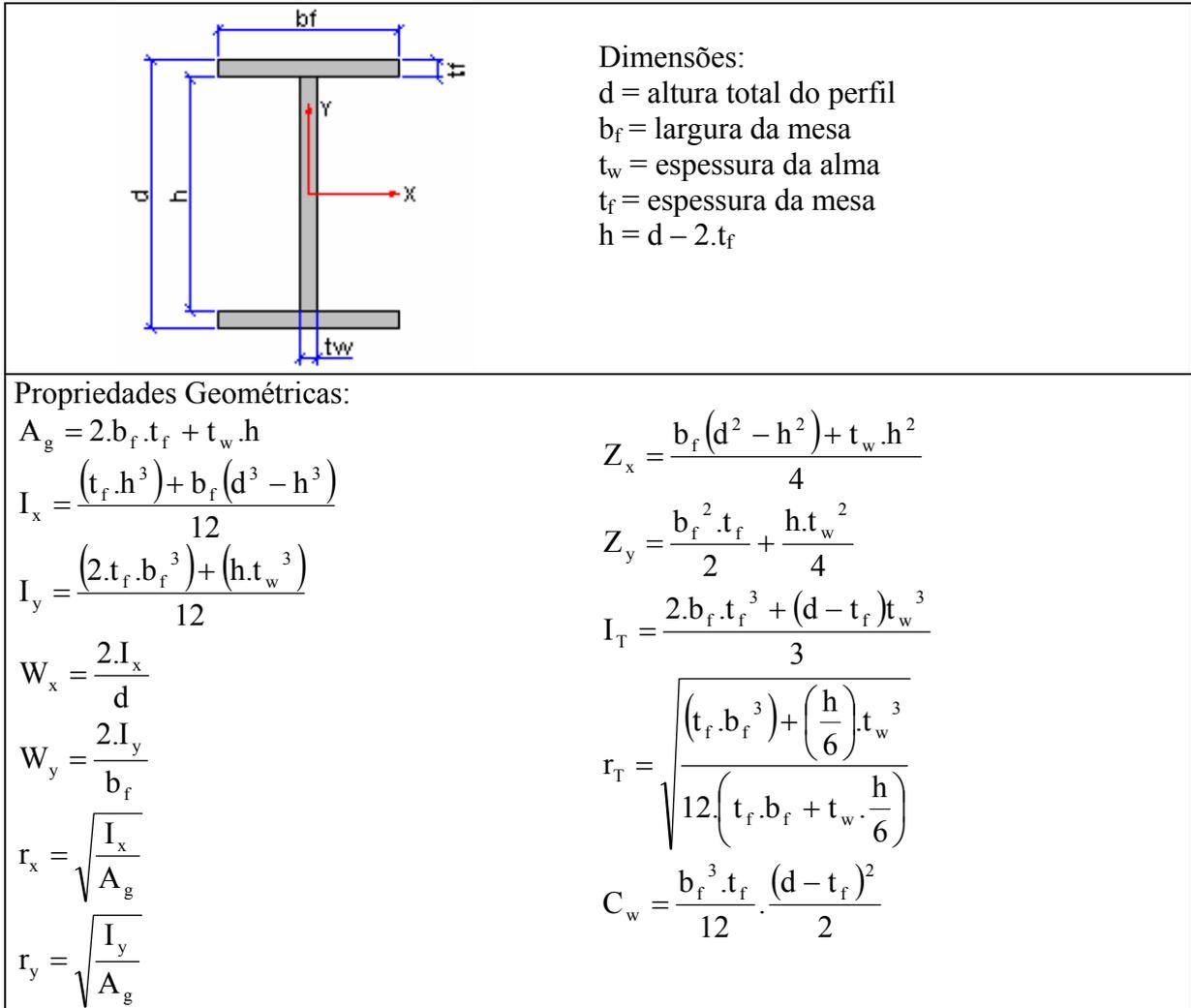
Z_x – módulo plástico da seção em relação ao eixo x

Z_y – módulo plástico da seção em relação ao eixo y

I_T – momento de inércia à torção da seção

r_T – raio de giração à torção da seção

C_w – constante de empenamento da seção



Fonte: NBR5884/2000

Figura 3 – Propriedades geométricas dos perfis I soldados simétricos

Com o objetivo de facilitar o trabalho dos projetistas, foram padronizados na norma NBR5884/2000 os perfis simétricos em:

- Série CS: perfis soldados tipo pilar com relação $d/b_f = 1$, relacionados na tabela B.1, do anexo B da NBR5884/2000;
- Série CVS: perfis soldados tipo viga-pilar com relação $1 < d/b_f \leq 1,5$, relacionados na tabela B.2, do anexo B da NBR5884/2000;
- Série VS: perfis soldados tipo viga com relação $1,5 < d/b_f \leq 4$, relacionados na tabela B.3, do anexo B da NBR5884/2000;
- Série PS: perfis soldados que não estejam relacionados nas tabelas do anexo B da NBR5884/2004.

2.3.3 Materiais disponíveis no mercado nacional

De acordo com o que as siderúrgicas brasileiras oferecem em relação aos tipos de materiais e espessuras para chapas planas geralmente aplicadas na fabricação de perfis “I” soldados, foi elaborado um resumo com os tipos de materiais disponíveis no mercado brasileiro. Nele constam os nomes comerciais, as propriedades mecânicas necessárias para o dimensionamento e espessuras padronizadas.

Esses dados estão apresentados no Quadro 1, onde se observa que são siderúrgicas que produzem chapas planas, cada uma com seus respectivos produtos, e podem fornecer o aço ASTM A36 e ASTM A572 Grau 50, este último muito usado na fabricação de elementos de estruturas pesadas. Outros tipos de aço estrutural não contemplados pelo Quadro 1 são possíveis de serem fornecidos pelas siderúrgicas, porém é necessário que a solicitação seja feita com um determinado prazo para a usina fazer a sua programação.

SIDERÚRGICA	DESCRIÇÃO COMERCIAL	f_y (MPa)	f_u (MPa)
CSN	CSN COR 420	300	420
	CSN COR 500	380	500
COSIPA	COS AR COR 400	250	380/520
	COS AR COR 400E	300	380/520
	COS AR COR 500	375	490/630
	COS CIVIL 300	300	400/550
	COS CIVIL 350	350	490
USIMINAS	USI-SAC-250 ⁽¹⁾	250	402/510
	USI-SAC-300 ⁽¹⁾	300	402
	USI-SAC-350 ⁽¹⁾	353	490
	USI-SAC-450	461	569/716
	USI-CIVIL-300 ⁽²⁾	300	400
	USI-CIVIL-350 ⁽²⁾	350	450
	USI-FIRE-300 ⁽³⁾	300	400
	USI-FIRE-350 ⁽³⁾	350	490/640
CSN - COSIPA USIMINAS	ASTM A 36	250	400/550
	ASTM A 572 Grau 50	345	450
Notas:			
1 – Equivalência com produtos antigos:			
USI-SAC-250 ↔ SAC-41			
USI-SAC-300 ↔ SAC-41-E			
USI-SAC-350 ↔ SAC-50			
2 – Similaridades entre aços:			
USI-CIVIL-300 ↔ ASTM A 572 Grau 42			
USI-CIVIL-350 ↔ ASTM A 572 Grau 50			
3 – Os aços USI-FIRE-300 e 350 são aços que, além da resistência à corrosão atmosférica, têm a propriedade de manutenção da tensão de escoamento em temperaturas elevadas.			
4 – f _y = Tensão de escoamento; f _u = Tensão de ruptura.			
5 – Espessuras comerciais das chapas: 4.75, 6.35, 8.0, 9.5, 12.5, 16.0, 19.0, 22.4, 25.0, 31.5, 37.5, 44.5, 50.0mm. Essas espessuras podem ser fornecidas por todas as usinas.			

Quadro 1 – Chapas comerciais produzidas pelas siderúrgicas no Brasil

2.3.4 Verificação ao Esforço Axial

O esforço axial atuante pode ser de tração ou de compressão.

Tração:

Quando um elemento é submetido exclusivamente à força normal de tração, podem ocorrer dois tipos de estados limites últimos: o escoamento da seção bruta (ESB) e a ruptura da seção líquida (RSL).

O primeiro estado limite (ESB) está relacionado ao escoamento generalizado da seção bruta ao longo do elemento, sendo a resistência de cálculo dada pela seguinte equação, conforme item 5.2.3.a da NBR8800/1986:

$$N_{rd} = \phi_t N_n = 0,9.A_g f_y \quad (16)$$

O segundo estado limite (RSL) está relacionado a peças tracionadas que são unidas por parafusos, podendo ocorrer o colapso por ruptura da seção devido à sua redução. Para este caso, a norma NBR8800/1986 propõe o uso do conceito de seção líquida efetiva para levar em conta as tensões concentradas na região da ligação, pois não são distribuídas uniformemente em toda a seção transversal da peça. A resistência de projeto é dada pela seguinte equação, conforme item 5.2.3.b da NBR8800/1986:

$$N_{rd} = \phi_t N_n = 0,75.A_e f_u \quad (17)$$

Para o estado limite de utilização, a norma preconiza um valor limite de esbeltez para evitar a flexibilidade excessiva, limitado a 240 para peças principais e a 300 para peças secundárias, conforme item 5.2.6, da NBR8800/1986.

Compressão:

O colapso de um elemento comprimido pode ocorrer por escoamento, flambagem local, flambagem global ou, ainda, por uma interação entre flambagem local e global.

O colapso por escoamento pode ocorrer em elementos com índices de esbeltez baixos, ou seja, elementos com pequeno comprimento e com espessuras relativamente altas. Porém, na maioria dos casos, o colapso ocorre por flambagem local ou global e, muitas vezes, pela combinação dos dois fenômenos.

A flambagem local é aquela em que os elementos de um perfil comprimido flambam antes que a tensão determinada pela análise global seja atingida. É calculada em função das relações largura/espessura dos elementos componentes da seção. Para levar isso em conta no dimensionamento, o Anexo E da norma NBR8800/1986 apresenta os limites das relações para as seções que podem ser dimensionadas de acordo com esta norma.

Se os elementos componentes de um perfil tiverem valores das relações largura/espessura superiores aos limites, deve ser levada em conta a redução da capacidade resistente devido à ocorrência de flambagem local, considerada pelo coeficiente redutor Q . Esses elementos são classificados como elementos comprimidos não enrijecidos e elementos comprimidos enrijecidos.

Os elementos comprimidos não enrijecidos são os elementos que têm uma borda livre, paralela às tensões de compressão, e o fator de redução usado no cálculo é representado na NBR8800/1986 por Q_s , que é a relação entre a tensão crítica de flambagem e a tensão de escoamento do material.

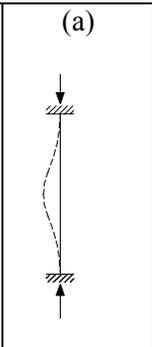
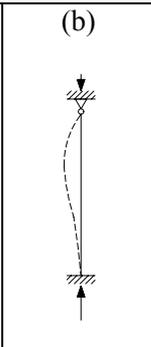
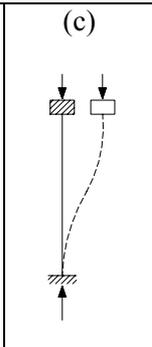
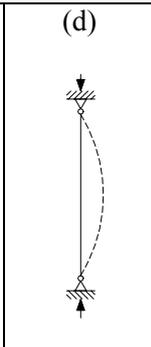
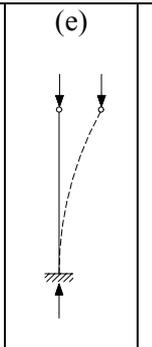
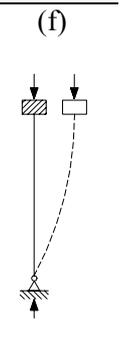
Os elementos comprimidos enrijecidos são os que têm as duas bordas paralelas às tensões de compressão apoiadas lateralmente em toda sua extensão. O fator adotado pela NBR8800/1986 é o Q_a baseado no conceito da largura efetiva; deve ser determinada uma largura efetiva b_{ef} para esses elementos, obtendo-se uma área efetiva A_{ef} . O fator Q_a é a relação entre a área efetiva A_{ef} e a área bruta A_g da seção da barra.

Para seções que apresentam elementos não enrijecidos e enrijecidos, é adotado um coeficiente Q , que é a multiplicação do fator Q_s pelo fator Q_a .

No caso de perfis “I” duplamente simétricos, a flambagem global pode se dar por flexão num dos eixos principais x e y , ou por torção em torno do eixo longitudinal z . Geralmente, a flambagem global por flexão é predominante e alguns autores, como Pfeil (2000) e Queiroz (1993), sugerem que não seja feita a verificação da flambagem global por torção.

Na flambagem global deve ser levado em conta o fator K , que é um parâmetro para determinar o comprimento efetivo de flambagem da barra comprimida, determinado nos Anexos H e I da NBR8800/1986.

A NBR8800/1986 apresenta na Figura 16 do Anexo H os valores de K para elementos isolados, situação essa aplicável à maioria dos casos encontrados na prática, indicados no Quadro 2 deste trabalho. Nesse quadro vê-se que constam dois valores para o K , o valor recomendado um pouco maior para alguns casos. De acordo com Pfeil (2000), pela dificuldade prática de materializar as condições de apoio ideais, as normas recomendam, em alguns casos, valores de K superiores aos teóricos.

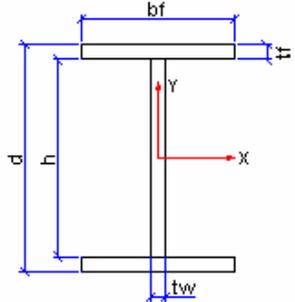
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados para o dimensionamento	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	   	Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres				

Fonte: NBR8800/1986

Quadro 2 – Coeficiente de flambagem K para barras isoladas

Para o caso da flambagem global por flexão em torno dos eixos principais x e y, em função desse parâmetro de flambagem, do comprimento do elemento e do raio de giração em relação ao eixo principal considerado, é determinado o coeficiente que reflete a influência da flambagem por flexão em relação aos eixos principais, representado por ρ .

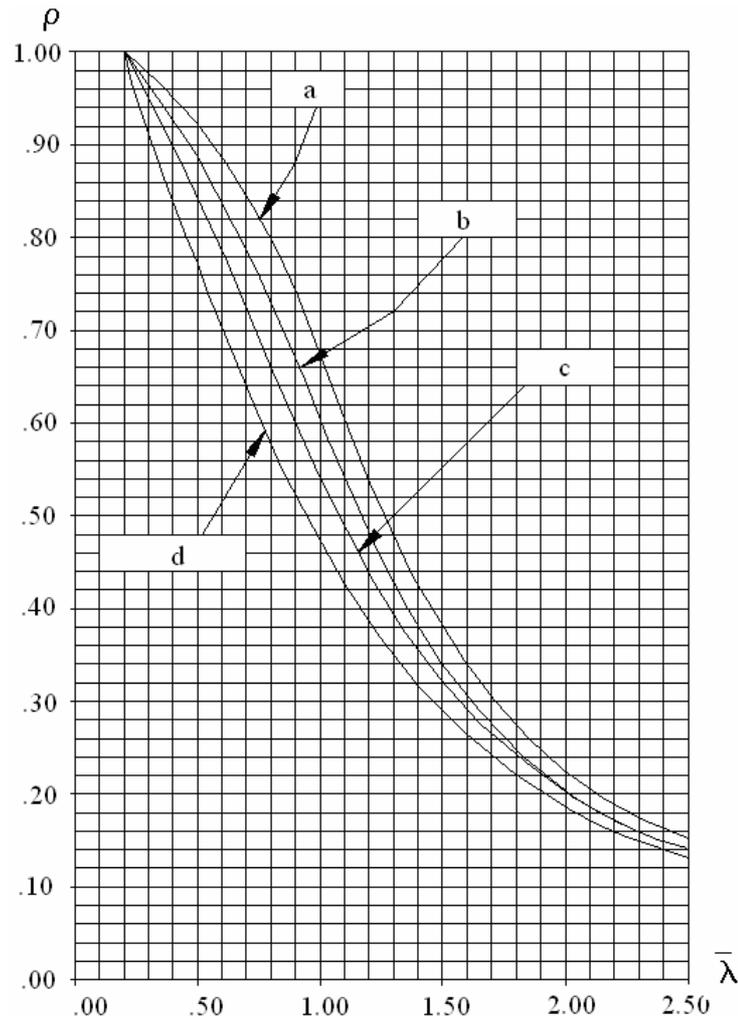
O coeficiente ρ depende também de um coeficiente de flambagem de acordo com o tipo de seção, tendo seus valores para a seção em relação aos eixos principais x e y e é representado por α . A NBR8800/1986 apresenta os valores de α relacionados às curvas de flambagem. As curvas referentes a perfis “I” soldados são indicadas no Quadro 3.

Seção transversal	Flambagem em torno do eixo	Curva de flambagem	
	$t_i \leq 40\text{mm}$	x – x	b
		y – y	c
	$t_i > 40\text{mm}$	x – x	C
		y – y	D

Fonte: Adaptado da NBR8800/1986

Quadro 3 – Curvas de flambagem para perfis I soldados

As curvas de flambagem estão indicadas na Figura 4 e foram obtidas através de uma série de ensaios pela Convenção Européia da Construção Metálica. Foram ensaiadas 1.567 colunas com os diversos perfis existentes em 1959, conforme Salles (1993). Os ensaios permitiram corrigir as curvas teóricas, demonstrando a existência de um patamar de escoamento quando $\bar{\lambda} < 0,2$, sendo este o parâmetro de esbeltez para colunas comprimidas, o qual é apresentado junto da formulação da norma.



Fonte: NBR8800/1986

Figura 4 – Curvas de flambagem

Como pode ser observado na Figura 4, a NBR8800/1986 apresenta o gráfico dos valores de ρ em função de $\bar{\lambda}$, que é o parâmetro de esbeltez para barras comprimidas e é adimensional. Por isso, pode ser adotado para qualquer tipo de aço.

A determinação da resistência de barras comprimidas axialmente para os estados limites de flambagem global por torção é feita de acordo com o Anexo J da NBR8800/1986. Como

neste trabalho são avaliados apenas perfis “I” soldados, não será feita a implementação dessa verificação baseado nos argumentos de Pfeil (2000) e Queiroz (1993).

Para os estados limites de utilização, é limitada a esbeltez global dos perfis comprimidos, visto que o índice de esbeltez λ não pode ser superior a 200.

Na seqüência, é apresentada a marcha de cálculo de acordo com a norma NBR8800/1986 referente à verificação de perfis “I” soldados submetidos a esforços de compressão:

Verificação da flambagem local

a) Mesas (Tabela 1 – Classe 3 e item E-2.b da NBR8800/1986)

$$\text{Se } \frac{b_f}{2t_f} \leq 0,55 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ então } Q_s = 1,00 \quad (18.a)$$

$$\text{Se } 0,55 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b_f}{2t_f} \leq 1,02 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ então } Q_s = 1,42 - 0,76 \frac{b_f}{2t_f} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (18.b)$$

$$\text{Se } \frac{b_f}{2t_f} > 1,02 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ então } Q_s = \frac{0,67E}{f_y \left(\frac{b_f}{2t_f} \right)^2} \quad (18.c)$$

b) Alma (Tabela 1 – Classe 3 – NBR8800/1986)

$$\text{Se } \frac{h}{t_w} \leq 1,47 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ então } Q_a = 1,00 \quad (19)$$

Se a relação acima não for atendida, deve ser obtida a dimensão efetiva de acordo com a equação indicada no item E-3.1.b da NBR8800/1986), sendo necessário realizar várias iterações para a obtenção final da dimensão efetiva.

$$h_{ef} = \frac{797t_w}{\sqrt{f_y}} \left[1 - \frac{140}{\left(\frac{h}{t_w} \right) \sqrt{f_y}} \right] \leq h \quad (20)$$

Área efetiva conforme item E-3.2 – NBR8800/1986

$$A_{ef} = A_g - (h - h_{ef})t_w \quad (21)$$

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (22)$$

Coefficiente Q conforme item E-1 da NBR8800/1986:

$$Q = Q_a Q_s \quad (23)$$

Verificação da flambagem global por flexão conforme item 5.3.4 da NBR8800/1986:

$$\lambda_x = \frac{L_x}{r_x} \quad (24.a)$$

$$\lambda_y = \frac{L_y}{r_y} \quad (24.b)$$

$$\bar{\lambda}_x = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{Qf_y}{E}} \quad (25.a)$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{Qf_y}{E}} \quad (25.b)$$

Se $\bar{\lambda}_x > 0,2$, então o perfil não atende à limitação de esbeltez em relação ao eixo x

Se $\bar{\lambda}_y > 0,2$, então o perfil não atende à limitação de esbeltez em relação ao eixo y

Caso contrário:

- Eixo x

$$\text{Se } t_f \leq 40\text{mm} \quad \Rightarrow \quad \alpha_x = 0,281 \text{ (curva B)}$$

$$\text{Se } t_f > 40\text{mm} \quad \Rightarrow \quad \alpha_x = 0,384 \text{ (curva C)}$$

- Eixo y

$$\text{Se } t_f \leq 40\text{mm} \quad \Rightarrow \quad \alpha_y = 0,384 \text{ (curva C)}$$

$$\text{Se } t_f > 40\text{mm} \quad \Rightarrow \quad \alpha_y = 0,572 \text{ (curva D)}$$

$$\beta_x = \frac{1}{2\bar{\lambda}_x^2} \left[1 + \alpha_x \sqrt{\bar{\lambda}_x^2 - 0,04} + \bar{\lambda}_x^2 \right] \quad (26.a)$$

$$\beta_y = \frac{1}{2\bar{\lambda}_y^2} \left[1 + \alpha_y \sqrt{\bar{\lambda}_y^2 - 0,04} + \bar{\lambda}_y^2 \right] \quad (26.b)$$

$$\rho_x = \beta_x - \sqrt{\beta_x^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}_x^2}} \quad (27.a)$$

$$\rho_y = \beta_y - \sqrt{\beta_y^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}_y^2}} \quad (27.b)$$

Adota-se o menor valor entre ρ_x e ρ_y , assumido como o valor de ρ na equação 28.

Resistência de cálculo conforme item 5.3.4.1 da NBR8800/1986:

$$N_{rd} = \phi_c N_n = 0,90 \rho Q A_g f_y \quad (28)$$

2.3.5 Flexão em relação ao eixo x

A flexão pode introduzir efeitos locais ou globais, pois parte da seção fica submetida à compressão e a outra, à tração. Dessa forma, o cálculo de elementos fletidos envolve verificações de instabilidades locais e instabilidades globais. Portanto, para determinar a capacidade resistente de elementos submetidos à flexão, verifica-se, além da plastificação total da peça, a flambagem local da mesa e da alma e a flambagem lateral com torção.

Na plastificação os perfis podem desenvolver o momento de plastificação, mesmo quando o dimensionamento é feito utilizando o processo no regime elástico, dado pela equação:

$$M_{pl} = Z_x f_y \quad (29)$$

onde M_{pl} é o momento de plastificação da seção, Z_x é o módulo de resistência plástico em relação ao eixo x da seção e f_y é o limite de escoamento nominal especificado para o aço da seção.

A flambagem local é a perda de estabilidade das chapas comprimidas do perfil, reduzindo, assim, o momento resistente. Pode ocorrer a flambagem local da alma (FLA) e a flambagem local da mesa (FLM), aquela causada por tensões normais provocadas pelo momento fletor na alma dos perfis e esta, pelas tensões normais de compressão provocadas pelo momento fletor na mesa comprimida.

A flambagem lateral é a perda do equilíbrio no plano principal de flexão, por flexão lateral ou torção, provocando deslocamentos perpendiculares ao plano de carregamento. Como em perfis “I” a rigidez à torção é muito pequena, é preciso conter lateralmente o perfil para evitar a flambagem lateral, efeito chamado de “flambagem lateral com torção” (FLT).

Além desses efeitos, a viga pode perder resistência em razão da possibilidade de flambagem da chapa da alma, provocada pelas tensões cisalhantes; assim, deve ser dimensionada para resistir ao esforço cortante, conforme apresentado no item 2.3.6 deste trabalho.

Os tipos mais adequados de seções para trabalhar a flexão são aqueles com maior inércia no plano da flexão, ou seja, com áreas afastadas do centro geométrico, demonstrando, assim, a vantagem do uso de perfis “I” para resistir aos momentos fletores em relação ao eixo x da seção. Contudo, devem ser tomados cuidados com as limitações de flambagem da norma NBR8800/1986.

Na ocorrência da flexão, ocorre uma distribuição linear de tensões normais na seção transversal, variando de tração numa fibra extrema da viga à compressão na outra fibra

extrema da seção. O aumento do momento fletor aumenta as tensões até atingir a tensão de escoamento, podendo formar a rótula plástica e a provável falha do perfil, como visto na Figura 5.

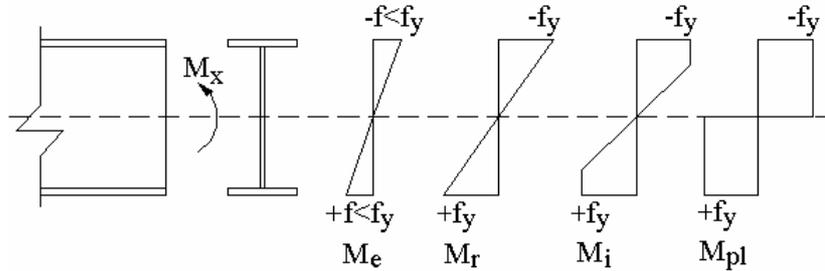


Figura 5 – Distribuição de tensões normais na flexão

Na Figura 5, M_x é o momento fletor atuante em relação ao eixo principal x da seção. O aumento gradativo desse momento fletor aumenta também as tensões das fibras extremas da seção, onde M_e é o momento fletor elástico, ou seja, quando as fibras extremas ainda não atingiram a tensão de escoamento do material; M_r é o momento fletor correspondente ao início de escoamento, quando as fibras extremas atingem a tensão de escoamento do material; M_i é o momento fletor intermediário, onde a seção já apresenta uma parte da seção escoada e M_{pl} é o momento fletor de plastificação, representando a plastificação total da seção transversal.

A resistência à flexão nominal M_n é definida por vários estados limites, cada um determinado em função do parâmetro de esbelte λ , conforme pode ser resumido no gráfico da Figura 6.

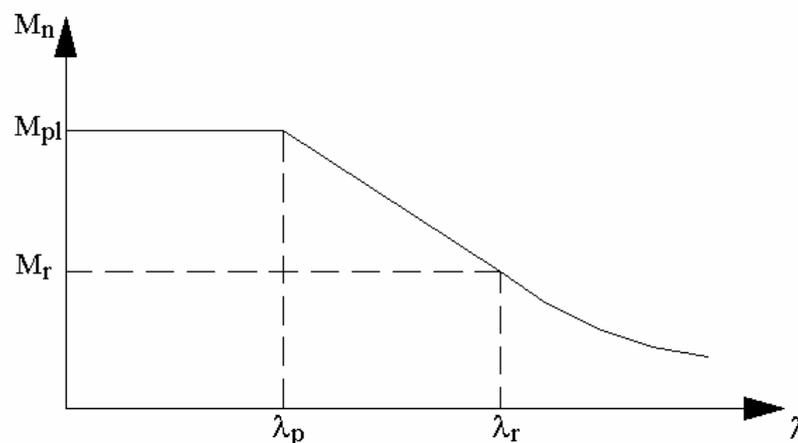


Figura 6 – Diagrama $M_n \times \lambda$

Na Figura 6, λ_p é o parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação da seção transversal e λ_r é o parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento. Assim, pode-se verificar que:

- no trecho em que a esbeltez da seção λ é maior que o parâmetro de esbeltez λ_r , o momento nominal M_n é menor que M_r e ocorrem tensões máximas inferiores ao escoamento; é neste trecho que ocorre flambagem elástica;
- no ponto em que a esbeltez λ é igual ao parâmetro λ_r , o momento nominal é igual a M_r e ocorre o início do escoamento;
- no trecho intermediário entre λ_p e λ_r , o momento nominal M_n está entre M_r e M_{pl} , ocorrem valores do momento equivalentes à plastificação parcial da seção e ocorre flambagem inelástica;
- no trecho em que a esbeltez da seção λ é menor que o parâmetro de esbeltez λ_p , o momento nominal M_n é igual a M_{pl} , ocorrendo o momento equivalente à plastificação total da seção.

Os valores dos limites de esbeltez e as equações para determinar os momentos fletores nominais estão apresentados na marcha de cálculo deste trabalho.

A NBR8800/1986 classifica os elementos de uma seção quanto à ocorrência de flambagem local, como mostrado no Quadro 4. Apesar de não constar na NBR8800/1986, as designações indicadas no Quadro 4 são muito comuns no meio técnico.

CLASSE	DESIGNAÇÃO	COMPORTAMENTO
1	SUPERCOMPACTA	Permite atingir a plastificação e a redistribuição de esforços
2	COMPACTA	Permite atingir a plastificação, mas não a redistribuição
3	SEMICOMPACTA	Permite atingir apenas o momento de escoamento
4	ESBELTA	A flambagem ocorre antes do início da plastificação (NBR8800/1986 – Anexo F)

Quadro 4 – Classificação das vigas

Os valores limites para determinar a classe das seções de perfis “I” com dois eixos de simetria, fletidas no plano da alma, são dados pela Tabela 27 da NBR8800/1986, sendo apresentadas na marcha de cálculo deste trabalho.

Fazendo uma relação entre a Figura 6 e a classificação do Quadro 4, de acordo com as relações largura/espessura, pode ser apresentado o seguinte resumo:

- $\lambda \leq \lambda_p$ seção compacta ou supercompacta (Classe 1 ou 2)
- $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ seção semicompacta (Classe 3)
- $\lambda > \lambda_r$ seção esbelta (Classe 4)

Na seqüência, é apresentada a marcha de cálculo de acordo com a norma NBR8800/1986 referente à verificação de perfis “I” soldados submetidos a esforços de flexão em relação ao eixo x.

Verificação da flambagem local da alma (FLA)

Conforme item 5.4, da NBR8800/1986, o momento de plastificação M_{pl} é:

$$M_{pl} = Z_x f_y \quad (29)$$

O momento resistente e os parâmetros de esbeltez são de acordo com a Tabela 27 do Anexo D da NBR8800/1986

$$M_r = W_x f_y \quad (30)$$

$$\lambda_p = 3,50 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (31)$$

$$\lambda_r = 5,60 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (32)$$

Esbeltez da alma:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (33)$$

$$\text{Se } \lambda \leq \lambda_p \quad \text{então } M_n = M_{pl} \quad (34.a)$$

$$\text{Se } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_w \quad \text{então } M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \quad (34.b)$$

Se $\lambda_r \leq \lambda$ o perfil possui alma esbelta e terá de ser calculado pelo Anexo F da NBR8800, não sendo abordado neste trabalho.

Verificação da flambagem local da mesa (FLM)

Conforme item 5.4, da NBR8800/1986, o momento de plastificação M_{pl} é:

$$M_{pl} = Z_x f_y \quad (29)$$

O momento resistente e os parâmetros de esbeltez são de acordo com a Tabela 27 do Anexo D da NBR8800/1986:

$$M_r = W_x (f_y - f_r) \quad (35)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (36)$$

$$\lambda_r = 0,62 \sqrt{\frac{E W_x}{M_r}} \quad (37)$$

Esbeltez da mesa:

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \quad (38)$$

$$\text{Se } \lambda \leq \lambda_p \quad M_n = M_{pl} \quad (39.a)$$

$$\text{Se } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \quad (39.b)$$

$$\text{Se } \lambda_r \leq \lambda \quad M_n = \frac{0,38EW_x}{\lambda^2} \quad (39.c)$$

Verificação da flambagem lateral com torção (FLT)

$$M_{pl} = Z_x f_y \quad (29)$$

O momento resistente e os parâmetros de esbeltez são de acordo com a Tabela 27, do Anexo D da NBR8800/1986:

$$M_r = W_x (f_y - f_r) \quad (35)$$

$$\lambda_p = 1,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (40)$$

$$\lambda_r = \frac{0,708C_b\beta_1}{M_r} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{4\beta_2 M_r^2}{C_b^2 \beta_1^2}}} \quad (41)$$

Esbeltez do perfil:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (42)$$

considerando:

$$G = 0,385E \quad (42)$$

$$\beta_1 = \pi \sqrt{GEI_T A_g} \quad (43)$$

$$\beta_2 = \frac{\pi^2 E A_g (d - t_f)^2}{4G I_T} \quad (44)$$

onde L_b é o comprimento destravado, que é a distância entre os pontos de travamento lateral e C_b é o coeficiente que leva em conta o efeito favorável de o momento não ser uniforme no segmento L_b , sendo dado por:

$$C_b = 1,75 + 1,05 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + 0,3 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2 \leq 2,3 \quad (45)$$

Na Equação 45, $\frac{M_1}{M_2}$ é a relação entre o menor e o maior dos momentos fletores de

cálculo nas extremidades apoiadas das barras.

De acordo com o item 5.4.3.1, para qualquer caso, $C_b = 1,0$ será correto ou estará a favor da segurança; dessa forma, será adotada essa condição.

$$\text{Se } \lambda \leq \lambda_p \quad M_n = M_{pl} \quad (39.a)$$

$$\text{Se } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \quad (39.b)$$

$$\text{Se } \lambda_r \leq \lambda \quad M_n = \frac{C_b \beta_1}{\lambda} \sqrt{1 + \frac{\beta_2}{\lambda^2}} \quad (46)$$

O momento nominal a ser adotado é o menor dos três valores obtidos para FLA, FLM e FLT.

Além disso, deve ser satisfeita a seguinte inequação:

$$M_n \leq 1,25 W_x f_y \quad (47)$$

Resistência de cálculo ao momento fletor:

$$M_{rd} = \phi_b M_n = 0,9 M_n \quad (48)$$

Além dessas verificações dos elementos submetidos à flexão, também devem ser verificados os estados limites de utilização, mediante a verificação das deformações respeitando as limitações indicadas no Anexo C da NBR8800/1986, mostrados na Tabela 3 deste trabalho.

2.3.6 Esforço Cortante

As almas dos perfis “I” servem principalmente para ligar as mesas e para absorver os esforços cortantes. Por razões econômicas, procura-se concentrar massas nas mesas para obter maior inércia reduzindo a espessura das almas e o dimensionamento das almas é feito para flambagem sob tensões cisalhantes e flambagem sob tensões normais e de cisalhamento.

A expressão fornecida pela resistência dos materiais para determinar a tensão de cisalhamento em casos de flexão simples é adaptada pela NBR8800/1986. Substituindo o diagrama da resistência dos materiais por um diagrama constante equivalente à tensão média de cisalhamento da alma, obtém-se a seguinte equação:

$$\tau_d = \frac{V_{sd}}{A_w} \quad (49)$$

onde V_{sd} é o esforço cortante solicitante de cálculo e A_w é a área da alma.

Para a verificação da flambagem por cisalhamento puro é considerado um fator de flambagem “k”, que é determinado em função da relação $\frac{a}{h}$, onde “a” é a distância entre os enrijecedores transversais e “h” é a altura livre da alma. De acordo com a NBR8800/1986, para relações superiores a 3 ou para vigas sem enrijecedores, é adotado o valor de “k” igual a 5,34.

Como o trabalho aqui proposto se restringe a perfis “I” sem enrijecedores da alma, será adotado este valor.

Para perfis I, o diagrama de esforço apresenta uma variação brusca da tensão de cisalhamento na transição da mesa para a alma em virtude da variação brusca das larguras da seção transversal da mesa e da alma. Apresenta, assim, pequenos valores de tensão de cisalhamento na mesa, os quais são desprezados pela NBR8800/1986.

Na seqüência, é apresentada a marcha de cálculo de acordo com a norma NBR8800/1986 referente à verificação de almas de perfis “I” soldados submetidas a esforços cortantes.

Esbeltez da alma:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (33)$$

Conforme item 5.5.2 da NBR8800/1986 e considerando elementos sem uso de enrijecedores, tem-se:

$$\lambda_p = 1,08 \sqrt{\frac{5,34E}{f_y}} \quad (50)$$

$$\lambda_r = 1,40 \sqrt{\frac{5,34E}{f_y}} \quad (51)$$

$$\text{Se } \lambda \leq \lambda_p \quad V_n = 0,6h t_w f_y \quad (52)$$

$$\text{Se } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad V_n = 0,6h t_w f_y \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right) \quad (53)$$

$$\text{Se } \lambda_r \leq \lambda \quad V_n = 1,28 * 0,6h t_w f_y \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \quad (54)$$

Resistência de cálculo ao esforço cortante:

$$V_{rd} = \phi_v V_n = 0,9V_n \quad (55)$$

2.3.7 Efeitos Combinados

Os estados limites últimos aplicáveis a elementos submetidos a efeitos combinados são os mesmos citados para barras tracionadas, barras comprimidas e barras sujeitas à flexão, levando-se em conta, entretanto, a interação da força normal com a flexão.

Os elementos submetidos à flexo-tração e à flexo-compressão são geralmente vigas e colunas de pórticos, podendo ocorrer os seguintes modos de falha:

- tração com flexão: em geral, escoamento;
- compressão com flexão em torno de um eixo de simetria (sem FLT): instabilidade no plano de flexão (sem torção);
- compressão com flexão em torno do eixo de maior inércia: flambagem lateral com torção (FLT).

Conforme item 5.6.1.1 da NBR8800/1986, para aplicar as considerações de efeitos combinados, devem ser satisfeitas as seguintes condições:

- barras prismáticas com um ou dois eixos de simetria;
- carregamentos atuando sempre no plano de simetria;
- cumprir a relação $\frac{h}{t_w} \leq 5,6 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Para a verificação aplicam-se duas equações de interação, que relacionam os esforços normais e a flexão; a primeira equação é a da resistência e leva em conta a teoria da primeira ordem, onde são considerados os efeitos da flambagem local e global na flexão; a segunda é a da estabilidade e leva em conta a teoria da segunda ordem, ou seja, a deformação provocada pelo esforço normal de compressão, que provoca esforços maiores de flexão.

Equações de Interação:

Equação 1 – Resistência, conforme item 5.6.1.3.1 da NBR8800/1986

$$\frac{N_{sd}}{\Phi_{c,t} N_n} + \frac{M_{sd}}{\Phi_b M_n} \leq 1,0 \quad (56)$$

onde:

N_{sd} é força normal de cálculo, podendo ser tração ou compressão;

M_{dx} = momento fletor de cálculo em torno de x;

$\Phi_{c,t} N_n$ = resistência de cálculo para cargas axiais, podendo ser tração ou compressão;

- compressão: $\phi_c N_n = 0,9 Q N_y = 0,9 Q A_g f_y$

Q = determinado do mesmo modo que na compressão simples

- tração: $\phi_t N_n = 0,9 A_g f_y$

Se o esforço normal for de compressão, o efeito simultâneo da força normal e momento fletor é mais crítico quanto à flambagem, sendo necessário levar em conta algumas considerações quanto ao momento fletor:

FLT: considerar $C_b = 1,00$ (mais desfavorável)

FLA: altera-se o parâmetro λ_p :

$$\text{para } \frac{N_d}{0,9N_y} \leq 0,207 \quad \lambda_p = 3,5 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left(1 - 2,8 \frac{N_d}{0,9N_y} \right) \quad (57)$$

$$\text{para } \frac{N_d}{0,9N_y} > 0,207 \quad \lambda_p = 1,47 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (58)$$

Onde:

$$N_y = A_g f_y \quad (59)$$

Equação 2 – Estabilidade, conforme item 5.6.1.3.2 da NBR8800/1986

$$\frac{N_{sd}}{\Phi_c N_n} + \frac{C_{mx} M_{sd}}{\left(1 - \frac{N_d}{0,73N_{ex}} \right) \Phi_b M_{nx}} \leq 1,0 \quad (60)$$

Esta equação é utilizada somente quando N_n for de compressão, onde:

$$N_n = Q_p A_g f_y \quad (61)$$

Para $Q_a < 1,0$, determina-se h_{ef} conforme a equação dada no Anexo D da NBR8800/1986, sendo que não se usa o processo iterativo como na compressão simples:

$$h_{ef} = \frac{862t_w}{\sqrt{f_y}} \left[1 - \frac{152}{\left(\frac{h}{t_w} \right) \sqrt{f_y}} \right] \leq h \quad (62)$$

N_{ex} é a carga de flambagem elástica por flexão, onde:

$$N_{ex} = \frac{A_g f_y}{\bar{\lambda}_x^2} \quad (63)$$

$$\bar{\lambda}_x = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (64)$$

C_{mx} é o coeficiente de equivalência dos momentos, igual a 1 para momento constante ao longo da barra e para carga uniforme em viga simplesmente apoiada; para todos os outros casos é menor que 1. De modo geral, os cálculos podem ser feitos com o valor igual a 1.

2.4 Pesquisas correlatas

Diversos trabalhos podem ser encontrados relacionados ao assunto, destacando-se alguns que apresentam maior afinidade, como os de Das (2003), Hernández (2001), Fontán (2001), Mahfouz (1999) e Schinler (2001).; Faz-se, em seqüência, um breve comentário sobre os trabalhos desenvolvidos por estes autores, bem como sobre suas conclusões.

O trabalho de Das (2003) consiste no desenvolvimento de um modelo de otimização para minimizar o peso de pórticos planos formados por perfis “I” soldados em aço, sendo sujeito a tensões de compressão, compressão na flexão e tração na flexão; foram limitadas as tensões em 138 N/mm^2 e foi utilizado o programa MINOS, que se destina a problemas de otimização não-lineares. O modelo para a busca do peso mínimo é um pórtico plano com um módulo e um nível, usando perfis com mesa superior diferente da inferior. A otimização foi feita com variáveis contínuas, variando as dimensões das chapas componentes dos perfis de 50 mm a 900 mm e as espessuras, de 5 mm a 10mm . As principais conclusões desse trabalho foram que o peso se reduz significativamente quando são usados perfis “I” soldados em substituição aos perfis “I” laminados e que a otimização de pórticos pode ser aplicada com sucesso considerando perfis “I” soldados. A desvantagem que os autores apresentam é o número de variáveis de decisão, que aumentam significativamente. Para trabalhos futuros sugere a otimização de pórticos com maior número de elementos, chegando a pórticos tridimensionais, e a avaliação dos aspectos econômicos em termos de custos e benefícios.

O trabalho de Hernández (2001) trata do desenvolvimento de um programa de otimização de perfis I laminados de abas paralelas chamado BASO. Procurou obter uma seção ótima modificando as espessuras da alma e da mesa, a largura da mesa e a altura do perfil com o menor consumo de material para satisfazer a esforços internos fixos. A pesquisa baseou-se na norma espanhola considerando seções com esforços axiais, momentos fletores e esforços de cisalhamento em relação aos eixos x e y da seção. No trabalho foram limitadas as relações largura/espessura para que não ocorresse flambagem local; os comprimentos também foram limitados para que não ocorresse redução da resistência por flambagem global do elemento. Isso, na realidade, não significa que a seção adotada seja a ótima, pois o campo de variação da

seção é muito limitado e geralmente se trabalha com seções que apresentam alguma esbeltez. O código foi desenvolvido baseado em três métodos de otimização, de escolha pelo usuário, os quais são: o Método Modificado das Direções Eficientes, a Programação Linear Seqüencial (PLS) e a Programação Quadrática Seqüencial (PQS). O autor concluiu que pode ser reduzido significativamente o material e que os regulamentos completos das normas podem ser incorporados aos programas de otimização.

O trabalho de Fontán (2001) também se refere a perfis I laminados de abas paralelas, tendo sugerido novas séries de perfis laminados, mais eficientes que as existentes no mercado. De acordo com o autor, as séries de perfis laminados que existem têm um intervalo muito grande entre as propriedades, conduzindo a que seja necessária a criação de seções especiais, que, no caso, são os perfis I soldados. Para o autor, os perfis soldados exigem um controle muito rígido na soldagem, sendo ideal a produção de seções somente laminadas, não somente as padronizadas, mas também as solicitadas pelos consumidores. Esses perfis são usados principalmente para esforços de flexão; por isso, as limitações impostas para a otimização foram para esta condição, porém também foi trabalhado com seções totalmente efetivas. O programa desenvolvido pelos autores é o SAFO (Secciones de Acero de Forma Óptima), o qual utiliza os mesmos métodos de otimização que o trabalho de Hernández (2001). O autor avaliaram todos os perfis laminados existentes no mercado espanhol e propuseram uma série equivalente de perfis otimizados utilizando variáveis contínuas para as dimensões da seção; arredondando a altura e a largura do perfil a cada milímetro e as espessuras da alma e da mesa em décimos de milímetros, obtiveram uma considerável eficiência, reduzindo significativamente o peso de material, porém houve o inconveniente de não haver alturas de perfis padronizadas.

Mahfouz (1999) fez a otimização do dimensionamento de estruturas bidimensionais e tridimensionais, procurando a menor seção possível dentro de uma tabela de perfis laminados que satisfizessem às condições de resistência e de estabilidade referentes à norma britânica BS5950. Utilizou o método dos Algoritmos Genéticos para a otimização, fazendo a ligação com o programa de análise estrutural ANSYS. Com a série de testes em exemplos de estruturas, concluiu que a integração entre um programa de análise, um método de otimização e as especificações de cálculo das normas pode ser uma poderosa ferramenta para auxiliar os engenheiros da área de estruturas metálicas. Além disso, afirmou que a questão de flambagem em estruturas de aço é o que tem a maior importância e que deve ser implementado

juntamente com as técnicas de otimização. Como sugestões para trabalhos futuros, considera que é importante fazer estudos envolvendo perfis I soldados para fazer a otimização estrutural.

Schinler (2001), em sua tese de mestrado, desenvolveu um algoritmo de otimização para o dimensionamento de estruturas de aço considerando ligações rígidas e semi-rígidas, adotando como variáveis as seções transversais e a rigidez das conexões. Da mesma forma que o trabalho de Mahfouz (1999), utilizou tabelas com seções predefinidas; a busca foi feita dentro dessa lista em conjunto com alguns fatores de modificação para considerar a rigidez das conexões com o objetivo de encontrar a combinação de seções ótimas. De acordo com os testes feitos, concluiu que o programa apresenta resultados muito bons para estruturas de dimensões moderadas, porém, para estruturas de maior porte, faltaram seções e tipos de conexões para satisfazer às solicitações. O autor usou o método dos Algoritmos Genéticos para fazer a otimização em conjunto com um programa de análise estrutural, utilizando os critérios da norma americana AISC, baseada no método dos estados limites para a verificação dos perfis. Da mesma forma como os trabalhos anteriores, limitou as relações largura/espessura para não ter problemas de instabilidade local.

3 FORMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

3.1 Considerações Iniciais

Para formular o problema de otimização de perfis soldados levou-se em conta o seguinte:

- a) as prescrições da norma NBR8800/1986 nos aspectos já expostos no capítulo 2 deste trabalho, ou seja, para cada seção analisada devem ser respeitadas as restrições nos diferentes estados limites;
- b) as recomendações da norma NBR5884/2000 referentes às relações entre as dimensões dos perfis, visto que podem ou não ser consideradas no cálculo;
- c) a siderurgia brasileira produz de maneira padronizada chapas com espessuras que variam de 4,75 mm a 50 mm; assim, medidas intermediárias aos valores apresentadas no Quadro 1, do capítulo 2, não são possíveis de serem atribuídas, pois as siderúrgicas não produzem essas espessuras comercialmente;
- d) as dimensões das chapas também se constituem em restrições a serem consideradas na formulação do problema, adotando-se como limites superiores das dimensões das mesas e da alma 2.000 mm, em razão da largura de chapas padronizadas pelas usinas;
- e) as fábricas de estruturas, devido a limitações do processo produtivo, no caso o processo de solda por arco submerso, apresentam algumas restrições à fabricação de perfis I soldados, visto que as dimensões mínimas para a maioria delas são de 100 mm para a largura da mesa e de 150 mm para a altura da seção do perfil. São esses os valores mínimos adotados para os limites inferiores das dimensões das mesas e da altura no presente trabalho.

3.2 Formulação do problema de otimização

De acordo com as limitações de materiais, seja pela produção siderúrgica de chapas, seja pela produção de perfis I nas fábricas de estruturas, o objetivo é otimizar a seção transversal de perfis I soldados, obtendo-se, para isso, a menor seção transversal possível para parâmetros fixos. Esses parâmetros podem variar em função de alguns requisitos que podem previamente ser estabelecidos, como o comprimento do elemento, as solicitações axiais, de flexão e cisalhamento e as relações entre as dimensões da seção.

Levando em conta as considerações anteriores, foi desenvolvida a formulação de duas situações de otimização. A primeira formulação leva em consideração apenas as restrições de dimensionamento através dos estados limites últimos e das especificações do material e dos perfis, não levando em conta as recomendações da norma NBR8800/1986 referentes aos estados limites de utilização.

A segunda formulação leva em conta os estados limites de utilização, sendo formulada a otimização de vigas biapoiadas submetidas a carga distribuída uniforme, em que é necessária a determinação dos esforços atuantes para a verificação das restrições do problema de otimização.

3.2.1 Seções com esforços e comprimentos previamente definidos

Para a formulação do problema de otimização são considerados os parâmetros de entrada do problema, que são os esforços atuantes no elemento, os comprimentos do elemento e as dimensões da seção do elemento, sendo esses valores previamente definidos.

Dos parâmetros para os dados de entrada, têm-se as dimensões da seção transversal, sendo:

d – altura da seção;

d_f – largura da mesa;

t_w – espessura da alma;

t_f – espessura da mesa.

Essas são as variáveis de projeto que sofrem alterações nas suas dimensões para ser obtida a seção ótima, ou seja, de menor área.

Os outros parâmetros que devem ser informados são valores fixos e não devem ser alterados durante o processo de otimização, pois são os que irão determinar a seção do perfil e são dados por:

N_{sd} – esforço axial solicitante de cálculo, sendo tração, se for positivo, e compressão, se for negativo;

M_{sd} – momento fletor solicitante de cálculo em relação ao eixo x da seção transversal;

V_{sd} – esforço de cisalhamento solicitante de cálculo;

L_x – comprimento de flambagem em relação ao eixo x da seção transversal;

L_y – comprimento de flambagem em relação ao eixo y da seção transversal;

L_b – comprimento destravado do perfil;

f_y – tensão de escoamento do aço;

f_u – tensão de ruptura do aço.

Os dados de entrada citados anteriormente estão indicados na Figura 7.

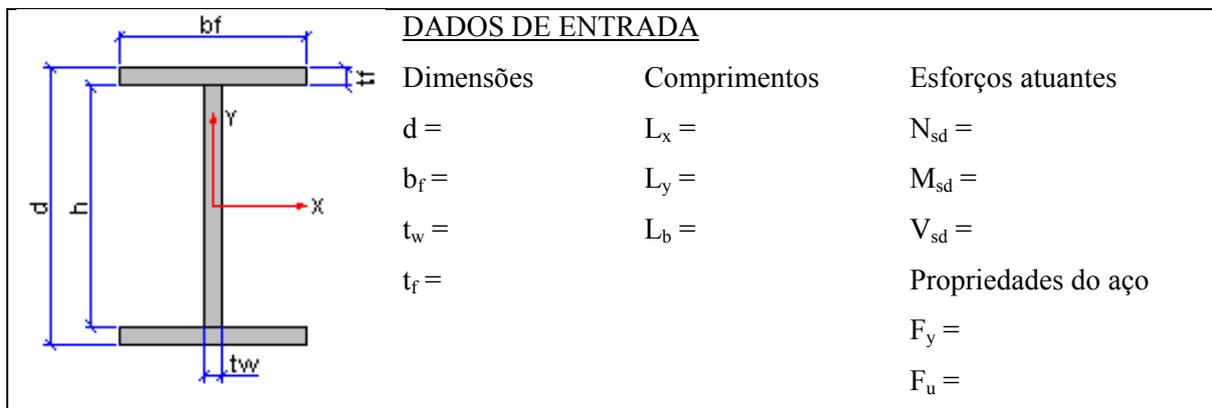


Figura 7 – Dados de entrada do problema – seções com esforços

É conveniente salientar que, quando é feita a busca pela menor área, automaticamente, é o menor peso que se encontra, o que é parâmetro comum em todo tipo de projeto. Tendo uma geometria definida e uma solução estrutural adotada, procura-se o menor peso possível para essa estrutura, satisfazendo a todos os requisitos das normas.

Dados esses parâmetros de entrada, pode ser definida a função objetivo:

Minimizar a área da seção, descrito como:

$$F(d, b_f, t_w, t_f) = 2b_f t_f + (d - 2t_f) t_w \quad (65)$$

Com relação às variáveis de projeto, foram efetuadas as seguintes considerações:

- as espessuras da mesa t_f e da alma t_w são variáveis discretas, ficando no intervalo de validade das variáveis em razão das limitações do processo de fabricação, visto que os equipamentos já estão limitados a essas condições, ou seja, a espessura mínima para a mesa é de 6.35 mm e a espessura mínima para a alma, é de 4.75 mm portanto, são esses os limites inferiores. Para os limites superiores, adotou-se a espessura de 50 mm para a mesa e para a alma, sendo consideradas as espessuras intermediárias

conforme consta no Quadro 1 deste trabalho. Outras espessuras são possíveis, mas não fazem parte do padrão de fornecimento das siderúrgicas, sendo feitas somente por encomenda;

- as dimensões mínimas da largura da mesa b_f e a altura do perfil d também são definidas em função das limitações do processo de fabricação. As dimensões máximas foram definidas em função da largura máxima de fornecimento de chapas pelas siderúrgicas. Em função da precisão do processo de fabricação, considerou-se suficiente adotar essas variáveis como discretas, variando de um em um milímetro;
- as recomendações da norma NBR5884/2000 também podem ser inseridas como restrições de projeto. Para este estudo, estão definidas como restrições optativas, fazendo-se a escolha entre levar em conta ou não tais restrições. Essas recomendações estão indicadas no item 2.3.2;
- além de ser uma recomendação da norma NBR5884/2000, a condição de a seção apresentar largura não superior a altura ser uma restrição do processo de fabricação em virtude das limitações do processo de soldagem, não é possível fazer esse tipo de seção.

Desta forma, têm-se os seguintes intervalos para as variáveis de projeto:

$$b_f \in [100,101,\dots,2.000]$$

$$d \in [150,151,\dots,2.000]$$

$$t_f \in [6.35,8.0,9.5,12.5,16.0,19.0,22.4,25.0,28.5,31.5,37.5,44.5,50.0]$$

$$t_w \in [4.75,6.35,8.0,9.5,12.5,16.0,19.0,22.4,25.0,28.5,31.5,37.5,44.5,50.0]$$

As restrições de projeto são descritas de modo que a seção deva resistir aos esforços e são definidas por:

- N_{rd} é o valor do esforço axial resistente de cálculo, podendo ser de compressão ou de tração;
- M_{rd} é o momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo x , pois a verificação é feita somente para estruturas no plano, não contemplando esforços fora do plano;
- V_{rd} é o esforço de cisalhamento resistente de cálculo em relação ao eixo y , ou seja, com as ações na direção y da seção transversal;
- CFT é o valor da equação de iteração para o efeito combinado entre esforço axial de tração e o momento fletor em relação ao eixo x ;
- CFC é o valor da equação de iteração para o efeito combinado entre esforço axial de compressão e o momento fletor em relação ao eixo x .

As restrições de fabricação referentes às recomendações da norma NBR5884/2000 são as seguintes:

Relação largura x altura:

$$b_f \leq d \leq 4b_f \quad (66)$$

Relação espessura da alma x espessura da mesa:

$$t_w \leq t_f \quad (67)$$

Essas restrições podem ser levadas em conta ou não no processo de otimização. A não-consideração dessas restrições será feita para avaliar o comportamento do processo de otimização.

As restrições do problema são:

$$N_{sd} \leq N_{rd} \quad (68)$$

$$M_{sd} \leq M_{rd} \quad (69)$$

$$V_{sd} \leq V_{rd} \quad (70)$$

$$CFT \leq 1 \quad (71)$$

$$CFC \leq 1 \quad (72)$$

$$b_f \leq d \quad (73)$$

$$d \leq 4b_f \quad (74)$$

$$t_w \leq t_f \quad (67)$$

sendo reescritas na forma normalizada como:

$$g_1 = \frac{|N_{sd}|}{N_{rd}} - 1 \leq 0 \quad (75)$$

$$g_2 = \frac{|M_{sd}|}{M_{rd}} - 1 \leq 0 \quad (76)$$

$$g_3 = \frac{|V_{sd}|}{V_{rd}} - 1 \leq 0 \quad (77)$$

$$g_4 = CFT - 1 \leq 0 \quad (78)$$

$$g_5 = CFC - 1 \leq 0 \quad (79)$$

$$g_6 = \frac{b_f}{d} - 1 \leq 0 \quad (80)$$

$$g_7 = \frac{d}{4b_f} - 1 \leq 0 \quad (81)$$

$$g_8 = \frac{t_w}{t_f} - 1 \leq 0 \quad (82)$$

3.2.2 Seções de vigas biapoiadas

Para a formulação do problema de otimização de seções de vigas biapoiadas, mudam alguns parâmetros, sendo necessária a informação dos carregamentos atuantes na viga, não mais dos valores dos esforços atuantes. Os esforços são calculados em função da combinação dos carregamentos informados e do peso próprio da viga, que é gerado a cada iteração.

O fator inserido na formulação do problema é a deformação máxima que pode ter uma viga, sendo esse o estado limite de utilização e que passa a ser uma nova restrição do problema.

Como dados de entrada, é necessário informar as dimensões da seção inicial, o vão da viga e o comprimento destravado, as cargas atuantes e as propriedades do aço a ser utilizado, representado na Figura 8.

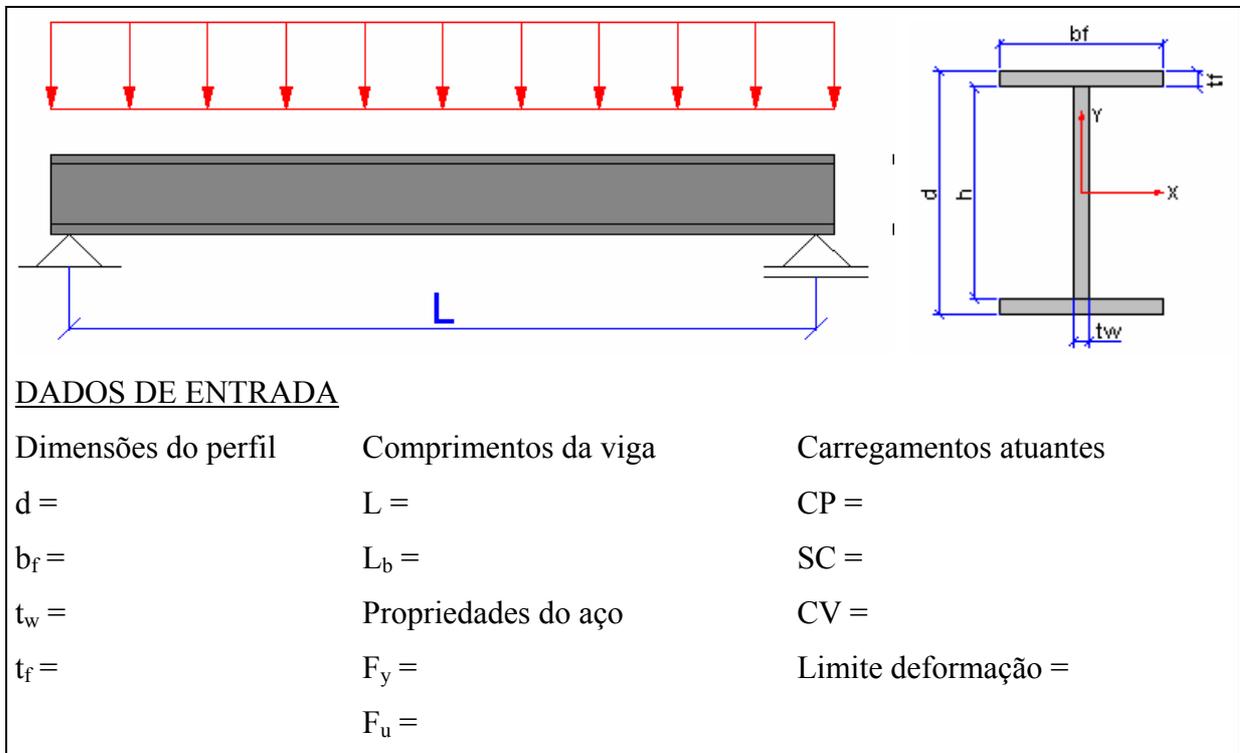


Figura 8 – Dados de entrada do problema - vigas

Os carregamentos aos quais a viga pode estar submetida são os seguintes:

- CP – carga permanente nominal, sendo composta da carga proveniente do peso próprio da viga e de todos os elementos componentes da construção, como o peso da laje, do revestimento e de todos os elementos que estão permanentemente se apoiando sobre a viga. A carga do peso próprio da seção varia em função da seção gerada a cada iteração, adotando o peso da viga no cálculo efetuado

automaticamente; os pesos dos outros elementos suportados pela viga devem ser informados como parâmetros de entrada;

- SC – sobrecarga decorrente do uso e ocupação da edificação, determinada de acordo com as recomendações da norma NBR6120/1980, para vigas de piso, e de acordo com o item B.3.6.1 da NBR8800/1986, para vigas de cobertura;
- CV – carga de vento atuante para o caso de vigas de cobertura, determinada de acordo com a norma NBR6123/1988.

Conforme o item 2.3.1. deste trabalho, são denominadas as ações permanentes por G e as ações variáveis por Q, sendo Q_1 a ação variável principal e as outras ações Q_j , as demais ações variáveis.

Para este caso, adotaram-se as denominações de CP, SC e CV para as ações da carga permanente, sobrecarga e carga de vento, respectivamente.

Para a determinação dos esforços de cálculo para a verificação dos estados limites últimos, é necessário combinar as ações, as quais devem ser de acordo com a equação 14 deste trabalho. Para este caso específico, podem-se ter duas combinações de ações: uma em que a sobrecarga é predominante e a outra em que o vento é predominante:

$$C_1 = \gamma_g CP + \gamma_q SC \quad (83)$$

onde:

C_1 – combinação 1

$\gamma_g = 1.3$, considerando pequena variabilidade

CP – carga permanente

$\gamma_q = 1.5$

SC – sobrecarga

$$C_2 = \gamma_g CP + \gamma_q CV \quad (84)$$

onde:

C_2 – combinação 2

$\gamma_g = 1.0$, considerando pequena variabilidade e favorável à segurança

CP – carga permanente

$\gamma_q = 1.4$

CV – carga de vento

Para essas combinações, não foi considerada a segunda carga variável, porque reduz o efeito máximo que está sendo avaliado. As demais ações variáveis fazem parte das combinações somente se provocam um acréscimo do efeito máximo.

Partindo dessas combinações, podem ser determinados os valores dos esforços de momento fletor de cálculo M_{sd} e esforço cortante de cálculo V_{sd} atuantes, calculados para cada iteração pelas equações.

Além da verificação dos estados limites últimos, faz-se necessária a verificação dos estados limites de utilização. Os valores máximos recomendados para deformações de vigas estão no Anexo C da NBR8800/1986 e são indicados também na Tabela 3 deste trabalho. Como o valor dessa deformação varia em função do uso e do comprimento da viga, é conveniente que o usuário informe o valor limite da norma.

Dessa forma, as restrições de projeto são:

- M_{rd} é o momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo x, pois a verificação é feita somente para estruturas no plano, não contemplando esforços fora do plano;
- V_{rd} é o esforço de cisalhamento resistente de cálculo em relação ao eixo y, ou seja, com as ações na direção y da seção transversal;
- δ_{max} é a deformação limite.

As restrições do problema são:

$$g_1 = \frac{|N_{sd}|}{N_{rd}} - 1 \leq 0 \quad (75)$$

$$g_2 = \frac{|M_{sd}|}{M_{rd}} - 1 \leq 0 \quad (76)$$

$$g_3 = \frac{|V_{sd}|}{V_{rd}} - 1 \leq 0 \quad (77)$$

$$g_4 = CFT - 1 \leq 0 \quad (78)$$

$$g_5 = CFC - 1 \leq 0 \quad (79)$$

$$g_6 = \frac{b_f}{d} - 1 \leq 0 \quad (80)$$

$$g_7 = \frac{d}{4b_f} - 1 \leq 0 \quad (81)$$

$$g_8 = \frac{t_w}{t_f} - 1 \leq 0 \quad (82)$$

$$g_9 = \frac{\delta}{\delta_{max}} - 1 \leq 0 \quad (85)$$

Cabe salientar que, das restrições do problema, as equações 75 a 82 são as mesmas da formulação do problema do item 3.2.1 deste trabalho, no qual se insere a restrição relacionada à deformação, representada pela equação 85.

3.3 Implementação computacional

A seguir é apresentado o processo computacional de otimização de perfis I soldados empregado neste trabalho. Na Figura 9 expõe-se um diagrama lógico do processo de otimização através do Método do Recozimento Simulado.

Sendo dadas as solicitações de cálculo, os comprimentos do perfil e as dimensões iniciais do perfil dentro do intervalo das variáveis possíveis, inicia-se o processo de verificação selecionando-se também os parâmetros do método, como o número de cálculos L da função objetivo para uma mesma temperatura, a temperatura inicial T e o redutor de temperatura α . Feita a escolha inicial e calculada a função objetivo, é feita a verificação do atendimento às restrições; caso alguma destas não seja atendida, é penalizada a solução.

O mesmo é feito para as novas escolhas que atendem a todas as restrições: se a nova solução for melhor que a anterior, adota-se esta solução; se for pior, determina-se uma probabilidade de adoção ainda que piore a função. Esse processo é feito de forma iterativa, levando em conta o número de iterações atribuídas. Após, reduz-se a temperatura, considerando os parâmetros de redução inicialmente definidos, e o processo iterativo é executado até ocorrer a convergência.

No presente trabalho, optou-se pela penalização para o caso de alguma das restrições não ser atendida, da forma:

$$F_{(x)} = f_{(x)} + P \quad (86)$$

onde:

$$P = \phi g_{(x)}^2 \quad (87)$$

Na expressão anterior, ϕ é um fator de penalização das restrições não atendidas para a solução atual, podendo ser atribuído um valor muito alto para este fator. Para este caso, foi adotado o valor de $\phi = 1 \times 10^{20}$ e P é adicionado ao valor da função objeto, assumindo-se este como o novo valor da função objetivo.

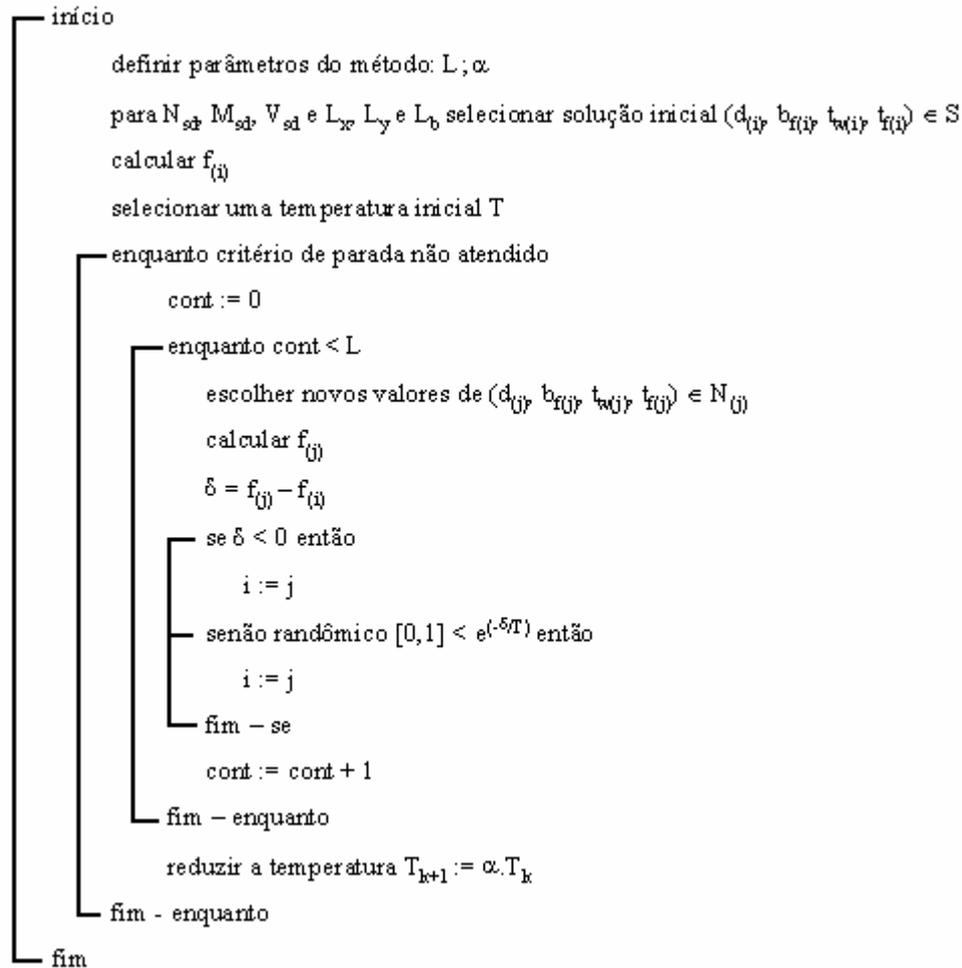


Figura 9 – Implementação do Método do Recozimento Simulado

A implementação computacional foi feita em linguagem Fortran 90, sendo o processo lógico referente à otimização pelo Método do Recozimento Simulado adaptado do código fonte implementado por Kripka (2004) a partir do proposto por Goffe (1996). O processo lógico referente ao dimensionamento de perfis “T” soldados foi desenvolvido pelo autor deste trabalho, sendo os fluxogramas utilizados para a implementação apresentados no Anexo A deste trabalho.

3.4 Aferição dos Parâmetros

A aferição dos parâmetros adotados foi feita alterando-se os valores da temperatura inicial T e o redutor de temperatura α , sendo efetuada uma série de testes para cada valor adotado. Os resultados foram confrontados e, com isso, foi feita a escolha dos parâmetros que apresentaram o melhor comportamento em termos de resultados e frequência dos melhores resultados.

Uma vez que a recomendação é de que a temperatura inicial T seja suficientemente grande para permitir, virtualmente, que todas as transições sejam aceitas, partiu-se de um valor inicial de 10, gradativamente aumentado até 100. Então, foi adotado o valor de 100 por apresentar os melhores resultados.

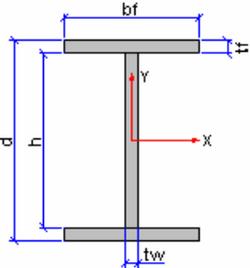
Para o valor do redutor de temperatura α , de acordo com Silva (1998), é geralmente adotado um valor entre 0,80 e 0,99. Partindo de um valor 0,90, chegou-se a 0,98 como o valor do redutor de temperatura que apresenta o melhor comportamento, visto que, com esse parâmetro, ocorrem 109.761 iterações.

Foram feitas várias combinações dos parâmetros T e α e efetuados vários testes para essas combinações, tendo sido obtido como o melhor desempenho o valor de $T=100$ e $\alpha=0,98$.

Dessas combinações, o fator que mais influenciou os resultados foi a variação do valor de α , ao passo que o valor da temperatura inicial T não afetou significativamente os resultados finais. Para os parâmetros adotados, na maioria dos testes as áreas convergiram entre 20.000 e 60.000 iterações.

Na seqüência, é apresentado um exemplo que demonstra os melhores resultados de uma série de testes efetuados para a avaliação de um perfil submetido ao esforço axial de compressão, adotando como seção de referência o perfil CS300x76, tabelado na NBR5884/2000, cuja resistência à compressão é de 1.851kN considerando comprimento de 3.000mm.

Os testes foram feitos partindo da seção inicial e levando em conta os limites inferiores e superiores, como demonstrado no Quadro 5.

	Dimensões adotadas	
	Limite Inferior	Limite Superior
	$d = 150\text{mm}$	$d = 2.000\text{mm}$
	$b_f = 100\text{mm}$	$b_f = 2.000\text{mm}$
	$t_w = 4,75\text{mm}$	$t_w = 50,0\text{mm}$
	$t_f = 6,35\text{mm}$	$t_f = 50,0\text{mm}$
	$A = 19,22\text{cm}^2$	$A = 2.950\text{cm}^2$

Quadro 5 – Dimensões do perfil I para aferição dos parâmetros

A Figura 10 apresenta os melhores resultados dos testes efetuados, observando-se que os valores das áreas convergiram para valores próximos ao valor da área do perfil de

referência. Partindo da menor seção inicial, foi obtida a melhor solução com 21.521 iterações; ao passo que, partindo da maior seção possível, a melhor solução foi obtida com 61.841 iterações e a área obtida para as duas situações foi de 95,91 cm².

É importante observar que o gráfico da figura não está em escala, sendo apenas esquemático, pois o objetivo é demonstrar como ocorre a convergência partindo das dimensões de seções possíveis de acordo com os limites inferiores e superiores estabelecidos na formulação do problema. Pela configuração de convergência, pode ser observado que a seção inicialmente atribuída não afeta o resultado final da otimização.

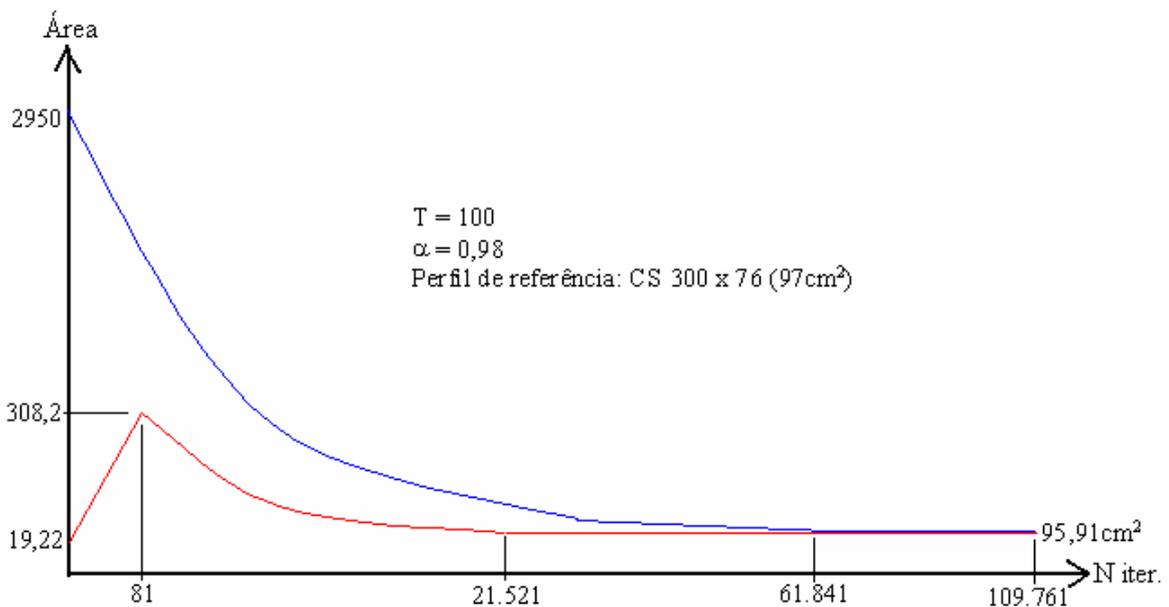


Figura 10 – Gráfico da aferição dos parâmetros do método de otimização

Outros parâmetros também foram testados, como a variação da estrutura de vizinhança. A estrutura de vizinhança inicialmente atribuída considerou o intervalo de valores das variáveis d , b_f , t_w e t_f , optando-se por um valor intermediário, que ficou, para d e b_f , em 1.000 e, para t_w e t_f , em 6.

Fez-se a variação desses parâmetros adotando valores múltiplos desses, sendo combinados todos os valores. Com uma série de testes para cada situação, obteve-se a situação que apresentou o maior número de testes convergindo para um valor ótimo da função.

É importante salientar que todas as situações chegaram a valores próximos do valor de referência, porém a combinação de parâmetros que convergiu com a maior frequência foi aquela em que foram adotados como valores para a temperatura $T = 100$; variação de

temperatura $\alpha = 0,98$; a estrutura de vizinhança com espaço de busca no intervalo de 6 para t_w e t_f e de 1.000 para d e b_f .

Diversas formas para a atualização desses parâmetros são encontradas na bibliografia, porém, como o principal objetivo era avaliar a aplicabilidade do método para otimização de perfis soldados, optou-se pela implementação de uma forma simples. Pode-se, no entanto, fazer uma avaliação bem aprofundada sobre a influência dos parâmetros no comportamento da otimização implementada com o intuito de melhorar o desempenho.

4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

4.1 Introdução

Com o objetivo de validar a implementação proposta neste trabalho, foram realizados diversos testes comparando os resultados obtidos por otimização com os perfis tabelados, conforme a norma NBR5884/2000.

Os testes foram feitos levando em conta as duas situações de formulação propostas no capítulo 3 deste trabalho. De acordo com a primeira formulação, foi feita a procura da seção que atende aos esforços previamente definidos, adotando-se como referência os perfis padronizados CS, CVS e VS da norma NBR5884/2000. Em função da resistência dos perfis, foram obtidas seções que atendam a todas as restrições do problema. Nesta avaliação, o conjunto de testes iniciais fixou-se como dados os esforços atuantes e os comprimentos, procurando a seção mínima que atendesse às prescrições da norma NBR8800/1986.

Na formulação de problema de otimização para vigas, foram feitas buscas por seções ótimas de vigas biapoiadas com carregamentos uniformes, variando os vãos e os carregamentos, atendendo, além dos estados limites últimos, aos estados limites de utilização, inserindo como restrição a deformação da viga. Nesta última avaliação, além do atendimento aos requisitos da norma, buscou-se fazer um comparativo das relações entre o vão e a altura da viga obtida com as relações recomendadas por Bellei (1994) e Rebello (2003).

Em função do caráter probabilístico do método de otimização aqui utilizado, foram feitas algumas séries de testes para cada situação, avaliando-se os resultados encontrados. Apesar de não haver garantia do ótimo global matemático, os resultados apresentam valores que, uma vez adotados, representam ganhos significativos aos valores obtidos pelos processos usuais.

4.2 Análise de seções com esforços e comprimentos previamente definidos

4.2.1 Compressão

Para efetuar as verificações de elementos submetidos a esforços de compressão, foram adotados perfis tipo CS como perfis de referência, considerando a sua resistência à compressão com comprimentos preestabelecidos.

Como primeiro exemplo numérico foi testado o perfil CS300x76, cuja área é de 97 cm², para o qual a resistência de cálculo à compressão é de 1851 kN, considerando o comprimento de 3.000 mm para L_x e L_y .

Com a definição dos parâmetros, foi feita uma série de dez testes para cada uma das situações adotadas, fazendo-se a busca da seção ótima, levando em conta as restrições relativas à relação largura/espessura expressas nas restrições g_6 e g_7 e, também fazendo a busca desprezando essas restrições. Além disso, fez-se a busca tomando como seção inicial a menor e a maior seção possível em função dos limites para os intervalos das variáveis de projeto impostas na formulação do problema de otimização.

Procedendo aos testes, foram obtidas as seções para cada teste, apresentadas nas tabelas 4, 5, 6 e 7, nas quais, os testes em negrito representam a melhor solução obtida na série.

Nas Tabelas 4 a 7, N_{Ref}/N_{dr} é a relação entre o esforço resistente da seção de referência e o esforço resistente da seção do teste e A/A_{Ref} é a relação entre a área obtida pelo teste com a área da seção de referência. Assim, valores inferiores à unidade indicam que a seção obtida apresenta desempenho melhor que a seção de referência.

Tabela 4 – Testes de compressão considerando restrições g_6 e g_7 e maior seção

	d	b_f	t_w	t_f	A	N_{dr}	N_{Ref}/N_{dr}	A/A_{Ref}
Seção de referência	300	300	8,00	12,50	97,00	1851,0	1,00	1,00
Seção inicial	2000	2000	50,00	50,00	2950,00	59020,2	31,87	30,41
Teste 1	276	276	4,75	16,00	99,91	1881,8	0,98	1,03
Teste 2	390	270	9,50	12,50	102,17	1853,1	1,00	1,05
Teste 3	319	319	6,35	12,50	98,42	1908,4	0,97	1,01
Teste 4	312	312	6,35	12,50	96,22	1859,8	1,00	0,99
Teste 5	331	331	4,75	12,50	97,28	1852,1	1,00	1,00
Teste 6	311	311	6,35	12,50	95,91	1852,9	1,00	0,99
Teste 7	294	290	6,35	16,00	99,84	1853,8	1,00	1,03
Teste 8	241	241	4,75	19,00	101,22	1860,6	1,00	1,04
Teste 9	301	301	8,00	12,50	97,33	1859,5	1,00	1,00
Teste 10	351	309	6,35	12,50	97,95	1851,3	1,00	1,01

Tabela 5 – Testes de compressão considerando restrições g_6 e g_7 e menor seção

	d	b_f	t_w	t_f	A	N_{dr}	N_{Ref}/N_{dr}	A/A_{Ref}
Seção de referência	300	300	8,00	12,50	97,00	1851,0	1,00	1,00
Seção inicial	150	100	4,75	6,35	19,22	151,8	12,20	0,19
Teste 1	300	300	8,00	12,50	97,00	1851,7	1,00	1,00
Teste 2	331	331	4,75	12,50	97,29	1852,1	1,00	1,00
Teste 3	332	331	4,75	12,50	97,33	1852,2	1,00	1,00
Teste 4	312	312	6,35	12,50	96,22	1859,8	1,00	0,99
Teste 5	311	311	6,35	12,50	95,91	1852,9	1,00	0,99
Teste 6	370	364	9,50	9,50	102,51	1852,0	1,00	1,06
Teste 7	301	301	8,00	12,50	97,33	1859,5	1,00	1,00
Teste 8	300	300	8,00	12,50	97,00	1851,7	1,00	1,00
Teste 9	314	314	6,35	12,50	96,85	1873,7	0,99	0,99
Teste 10	333	333	4,75	12,50	97,88	1865,1	0,99	1,01

Tabela 6 – Testes de compressão não considerando restrições g_6 e g_7 e maior seção

	d	b_f	t_w	t_f	A	N_{dr}	N_{Ref}/N_{dr}	A/A_{Ref}
Seção de referência	300	300	8,00	12,50	97,00	1851,0	1,00	1,00
Seção inicial	2000	2000	50,00	50,00	2950,00	59020,2	31,87	30,41
Teste 1	298	290	9,50	12,50	98,44	1851,7	1,00	1,02
Teste 2	164	330	8,00	12,50	93,62	1851,5	1,00	0,96
Teste 3	307	312	6,35	12,50	95,91	1858,1	1,00	0,99
Teste 4	260	320	6,35	12,50	94,92	1856,9	1,00	0,98
Teste 5	301	312	6,35	12,50	95,53	1852,0	1,00	0,98
Teste 6	270	318	6,35	12,50	95,06	1855,5	1,00	0,98
Teste 7	189	340	4,75	12,50	92,79	1852,8	1,00	0,96
Teste 8	236	274	4,75	16,00	97,37	1852,2	1,00	1,00
Teste 9	310	312	9,50	12,50	105,08	1852,9	1,00	1,08
Teste 10	150	271	9,50	16,00	97,93	1853,8	1,00	1,01

Tabela 7 – Testes de compressão não considerando restrições g_6 e g_7 e menor seção

	d	b_f	t_w	t_f	A	N_{dr}	N_{Ref}/N_{dr}	A/A_{Ref}
Seção de referência	300	300	8,00	12,50	97,00	1851,0	1,00	1,00
Seção inicial	150	100	4,75	6,35	19,22	151,8	12,20	0,19
Teste 1	196	339	4,75	12,50	92,87	1852,8	1,00	0,96
Teste 2	169	336	6,35	12,50	93,14	1852,9	1,00	0,96
Teste 3	150	340	6,35	12,50	92,94	1855,5	1,00	0,96
Teste 4	240	230	8,00	19,00	103,56	1854,7	1,00	1,07
Teste 5	150	340	6,35	12,50	92,94	1855,5	1,00	0,96
Teste 6	255	239	4,75	19,00	101,13	1851,6	1,00	1,04
Teste 7	278	306	8,00	12,50	96,74	1860,5	1,00	0,99
Teste 8	158	345	4,75	12,50	92,57	1856,5	1,00	0,95
Teste 9	200	301	12,50	12,50	97,13	1856,1	1,00	1,00
Teste 10	259	309	8,00	12,50	95,97	1853,6	1,00	0,99

Os valores expostos nas Tabelas 4, 5, 6 e 7 permitem concluir que há uma tendência de o processo de otimização sempre encontrar seções com áreas próximas à área da seção de referência, o que permite validar a eficiência do processo de otimização.

A ocorrência de várias seções que atendem a todas as restrições impostas deve-se ao fato de existir uma gama enorme de soluções possíveis e, em muitos casos, com área maior que a área de referência.

Pode, também, ser observado que, quando não são impostas as restrições da NBR5884/2000 referentes à relação entre as dimensões da seção, há uma redução maior da área da seção transversal, como pode ser visto na Figura 11.

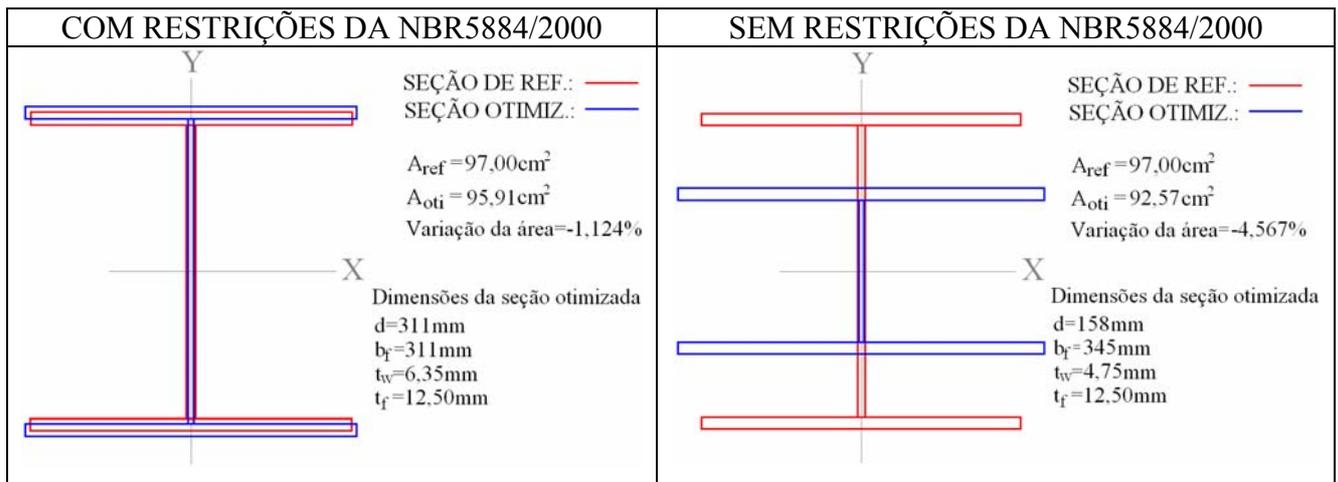


Figura 11 – Gráfico do resultado da otimização do CS300x76

Essa tendência de a altura da seção ser menor que a largura, ao não atender as recomendações da norma, não respeita as limitações decorrentes do processo produtivo, segundo as quais a largura da seção não pode ser superior à altura da seção.

Com relação à viabilidade da produção de seções que não atendam às restrições da NBR5884/2000, faz-se necessária a avaliação do comportamento dessas seções quanto às prescrições da norma de dimensionamento NBR8800/1986, pois esta não faz alusão a isso. Além disso, não se tem conhecimento da existência desse tipo de perfil na prática da construção metálica, o que justifica a avaliação através de análises numéricas e experimentais para validar a possibilidade de seu uso.

Outro conjunto foi testado seguindo os mesmos critérios adotados no teste anterior. Pôde-se observar que a maioria das seções estudadas não apresenta redução significativa de área, visto que somente os perfis com áreas maiores apresentam redução entre 5% e 6,5% para seções que atendam às restrições da NBR5884/2000 e podem chegar a uma redução próxima a 10% quando as restrições não são impostas, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 – Áreas de perfis tipo CS à compressão

Perfil de referência		Otimização – melhor solução					
		Com restrições NBR5884/2000			Sem restrições NBR5884/2000		
Perfil	A_{Ref}	A_{oti}	A_{oti}/A_{Ref}	Redução(%)	A_{oti}	A_{oti}/A_{Ref}	Redução(%)
CS400x106	135,6	135,6	1,000	0,00	132,8	0,979	2,06
CS400x248	316,0	299,4	0,947	5,25	285,3	0,903	9,71
CS500x172	218,5	218,5	1,000	0,00	210,5	0,963	3,66
CS500x378	481,3	450,2	0,935	6,46	450,0	0,935	6,50
CS600x250	317,9	317,9	1,000	0,00	304,9	0,959	4,09

Esses estudos podem fornecer algumas orientações quanto ao que foi estabelecido na definição e formulação do problema. A primeira orientação refere-se à padronização da norma NBR5884/2000, porque perfis tabelados nessa norma já têm configurações que apresentam eficiência, levando em conta os aspectos de produção de peças de aço formando perfis “I”. A segunda orientação refere-se ao método de otimização, o que pode ser confirmado na sua eficiência, pois apresenta soluções coerentes com os resultados desejados.

Foi feita uma avaliação considerando o esforço resistente da seção de referência aumentado em 10%, no caso o perfil CS300x76. Mantendo as mesmas considerações, o esforço atuante passou para 20367 kN. A seção padronizada na NBR5884/2000 que resiste a esse esforço é o perfil CS350x89, cuja área é de 113,5 cm² e apresenta uma resistência 10% superior ao esforço solicitado.

Com a otimização, foi encontrada a menor área de 104,9 cm², apresentando uma redução da área em 7,56% em relação ao CS350x89, o que confirma a vantagem do uso do processo de otimização para seções com esforços intermediários aos resistentes das seções padronizadas, pois, atendendo a todas as restrições de projeto, qualquer seção é possível de ser produzida, não sendo obrigatoriamente necessário seguir uma padronização.

4.2.2 Flexão

Para efetuar as verificações de elementos submetidos à flexão foram adotados perfis do tipo VS como perfis de referência, considerando a sua resistência à flexão com comprimento destravado preestabelecido.

A seqüência de testes foi a mesma para todas as situações. Tendo sido escolhidos alguns perfis VS, fez-se a busca da seção ótima levando em conta as restrições relativas à norma NBR5884/2000 e também desprezando essas restrições. Além disso, fez-se a busca tomando como seção inicial a menor e a maior seção possível em função dos limites para os intervalos das variáveis de projeto impostas na formulação do problema de otimização.

Da série de testes foram escolhidos os perfis que obtiveram o melhor desempenho, indicados na Tabela 9. Na tabela, todos os comprimentos destravados foram considerados de

2.000 mm, exceto o perfil VS600x81, posicionado na última linha, que foi considerado de 5.000 mm. Esse perfil foi considerado para os dois comprimentos destravados apenas para ilustrar, pois a resistência à flexão do perfil VS600x81 é a mesma para até o comprimento destravado de 5.000 mm. Pode ser observado que o perfil otimizado para o comprimento de 2.000 mm apresenta uma área menor que para o comprimento de 5.000 mm; além disso, apresenta uma área bem menor que o perfil de referência.

Tabela 9 – Testes de perfis submetidos à flexão

PERFIL DE REFERÊNCIA							PERFIL OTIMIZADO							Redução
Designação	d	b _f	t _w	t _f	A	d/b _f	d	b _f	t _w	t _f	A	d/b _f	(%)	
VS300x23	300	120	4,75	6,35	28,89	2,50	308	117	4,75	6,35	28,89	2,63	0,00	
VS300x46	300	180	4,75	12,50	58,06	1,67	510	157	4,75	6,35	43,56	3,25	24,97	
VS400x28	400	140	4,75	6,35	36,18	2,86	410	130	4,75	6,35	35,38	3,15	2,21	
VS400x53	400	200	4,75	12,50	67,81	2,00	685	172	4,75	6,35	53,78	3,98	20,69	
VS500x61	500	250	6,35	9,50	78,04	2,00	699	180	4,75	8,00	61,24	3,88	21,53	
VS600x81	600	300	8,00	9,50	103,48	2,00	757	210	4,75	9,50	74,96	3,60	27,56	
VS600x81	600	300	8,00	9,50	103,48	2,00	775	245	4,75	9,50	82,46	3,16	20,31	

Como pode ser observada na tabela, a redução da área dos perfis otimizados é muito grande em relação aos perfis de referência para algumas situações, A redução é maior para seções de referência com áreas maiores, ao passo que áreas pequenas de referência não apresentam variações significativas.

Vários fatores influenciam esse comportamento, como o comprimento destravado, as dimensões da seção, o valor do esforço e as relações entre altura e largura, que influenciam diretamente o dimensionamento.

Pelos testes feitos, podem ser feitas algumas observações importantes. Foi confirmada a tendência dos perfis de manterem as relações d/b_f dentro do intervalo recomendado pela norma NBR5884/2000, mesmo que não sejam impostas as restrições da norma. Em alguns testes das séries realizadas ocorreu a otimização de algum perfil que não atendeu aos limites da norma, porém, em todos os casos, a seção obtida apresentou pior desempenho. Foi confirmada através desses testes a validade das limitações de relações entre a altura e a largura dos perfis.

De maneira geral, pode ser afirmado que seções com relação d/b_f inferior a 1,5 apresentam mesas com larguras e espessuras grandes, ao passo que, com relação d/b_f superior a 4,0, as mesas reduzem-se significativamente, porém a espessura da alma é maior, conduzindo a que aumente a área da seção transversal e os efeitos localizados na alma se tornem preponderantes.

Outra observação importante é com relação ao comprimento destravado, pois as seções adotadas como referência com larguras maiores e, conseqüentemente, áreas maiores sofreram uma variação maior na área pelo método de otimização, pois os mesmos foram mantidos com um comprimento de flambagem constante, no caso o valor de 2000 mm. Isso não representa, definitivamente, que os perfis tabelados na norma não sejam eficientes, e, sim, que, com as diversas situações de uso, podem-se reduzir as seções significativamente se aplicado algum método de otimização.

Um fator importante e que não pode ser omitido em nenhum caso da otimização é que foi estabelecido que a seção deve ter uma altura ou largura limitada. Na prática, é muito comum ocorrer algum tipo de limitação, tendo de ser obedecida uma altura de projeto previamente fixada. Esse tipo de condição geralmente conduz a uma seção que não apresenta um desempenho ótimo. Para o caso das seções na Tabela 9, os perfis ótimos apresentam alturas maiores que as alturas dos perfis de referência, alguns chegando a ter altura 70% superior aos perfis padronizados. Para estes casos, a redução da altura deveria ser compensada pelo aumento das mesas do perfil, podendo ser a espessura t_f ou a largura b_f .

De uma forma geral, pode ser afirmado que a otimização de perfis soldados submetidos a esforços de flexão é mais representativa que a dos perfis submetidos a esforços de compressão e que a restrição da relação entre a altura e a largura não afeta o desempenho da seção.

4.2.3 Flexo-compressão

Para efetuar as verificações de elementos submetidos à flexo-compressão foram adotados perfis tipo CVS como perfis de referência, cuja relação de $1,0 \leq d/b_f < 1,5$ é obedecida, considerando comprimento destravado preestabelecido.

Para os esforços foram adotados 15.000 kN.cm para o momento fletor e 65 kN para o esforço de compressão, cujos valores atendem às equações de interação dos efeitos combinados para o perfil CVS300x47. Com esse valor, foram feitas as séries de testes para obter a seção otimizada.

Em seguida, foi feito o incremento gradativo do esforço normal de compressão, mantendo o valor do momento fletor fixo, procurando atender às equações de interação para as seções seguintes. Com o incremento do esforço normal, foram obtidas as seções ótimas para cada situação.

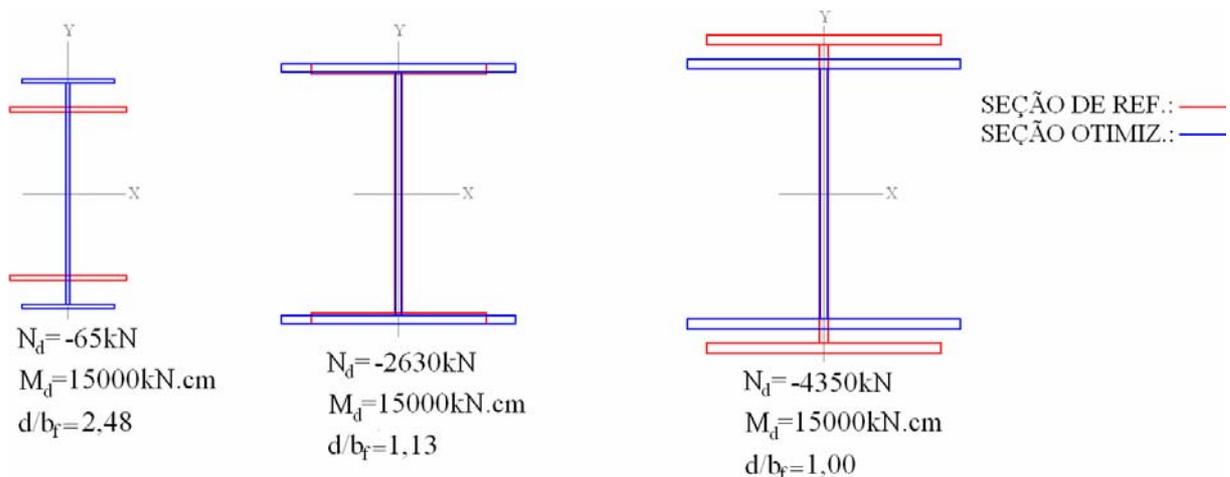
Desses testes foram escolhidos os perfis que obtiveram o melhor desempenho para cada situação de esforço, indicados na Tabela 10.

Tabela 10 – Testes de perfis submetidos à flexo-compressão

PERFIL DE REFERÊNCIA							PERFIL OTIMIZADO						Red.
Designação	d	b _f	t _w	t _f	A	N _d	d	b _f	t _w	t _f	A	d/b _f	(%)
CVS300x47	300	200	8,0	9,5	60,48	65	397	160	8,00	8,00	56,08	2,48	7,28
CVS300x57	300	200	8,0	12,5	72,00	310	401	180	8,00	9,50	64,76	2,23	10,06
CVS300x66	300	250	8,0	12,5	84,50	600	490	196	8,00	9,50	74,92	2,50	11,34
CVS350x98	350	250	9,5	19,0	124,64	1550	487	318	8,00	12,50	116,46	1,53	6,56
CVS400x116	400	300	9,5	19,0	148,39	2230	488	316	9,50	16,00	144,44	1,54	2,66
CVS450x130	450	300	12,5	19,0	190,75	2630	450	400	8,00	16,00	161,44	1,13	2,45
CVS500x150	500	350	12,5	19,0	190,75	3300	489	480	8,00	16,00	190,19	1,02	0,29
CVS500x162	500	350	16,0	19,0	206,92	3600	480	440	8,00	19,00	202,56	1,09	2,11
CVS550x184	550	400	16,0	19,0	233,92	4350	467	467	12,50	19,00	231,09	1,00	1,21

Na Tabela 10 pode ser observado que, aumentando o esforço normal de compressão, o valor da relação entre a altura da seção e a largura dos perfis vai se reduzindo até atingir a unidade. Isso demonstra que o esforço de compressão passa a ser preponderante, ao passo que, com esforço de compressão atuante pequeno, a relação entre a altura e a largura aumenta.

Esse comportamento pode ser mais bem visualizado na Figura 12, onde são mostradas sobrepostas a seção de referência e a seção ótima para cada situação.

Figura 12 – Variação das relações d/b_f com o aumento do esforço de compressão

4.3 Análise de seções de vigas biapoiadas

Na construção metálica é muito comum o uso de vigas biapoiadas para sustentação de pisos, geralmente formados por lajes de concreto armado, lajes pré-moldadas ou com forma de aço incorporada.

Antes de iniciar o processo de otimização, é necessário definir os parâmetros para a determinação dos esforços e deformações atuantes nas vigas. Todos os testes anteriores foram feitos efetuando-se apenas a verificação de seções com esforços previamente determinados, sendo desprezado o estado limite de utilização dos elementos. A partir dessas análises, passa-

se a ter outros fatores envolvidos, devendo ser definidos alguns parâmetros para a otimização e calculados os esforços e as deformações atuantes nas vigas.

Com o intuito de demonstrar através de gráficos as curvas das relações entre o vão das vigas e suas respectivas alturas e também a relação entre os vãos e as áreas, foi definida a faixa de sobrecargas atuantes nas vigas. Com base na norma NBR6120/1980, foram estabelecidos dois valores extremos para a sobrecarga, adotando-se 2 kN/m^2 para a menor sobrecarga e 6 kN/m^2 para a maior, gerando, dessa forma, duas curvas de desempenho. Esses valores extremos absorvem a maior parte das necessidades em termos de uso das edificações. Ainda, com o objetivo de padronização, foi considerada uma modulação de 3.000 mm entre as vigas para a determinação da carga distribuída sobre elas, aplicando-se como carregamento constante sobre as vigas 6 kN/m e 18 kN/m, respectivamente.

Para levar em conta a carga permanente, foi adotada uma carga distribuída de 3 kN/m^2 para absorver o peso próprio da laje, gerando uma carga de 9 kN/m na viga. O peso próprio da viga é calculado levando em conta a seção obtida a cada iteração, sendo os esforços determinados automaticamente na avaliação pelo programa.

Com a definição da função da viga, de acordo com a Tabela 26 do Anexo C da NBR8800/1986, foi estabelecido o valor limite para a deformação de $L/360$. Esta tabela está apresentada na Tabela 3 deste trabalho.

Foram adotadas as combinações de ações para determinar os esforços e a deformação. Como são apenas dois carregamentos atuantes na viga, são consideradas as seguintes combinações de ações:

$$C_1 = 1,3CP + 1,5SC \quad (88)$$

$$C_2 = 1,0SC \quad (89)$$

A combinação C_1 é utilizada na verificação da seção determinar os esforços de cálculo atuantes, representada pela equação 88, e a combinação C_2 é utilizada para determinar a deformação atuante na viga, representada pela equação 89.

Os comprimentos de vigas verificados foram estabelecidos em função do gráfico de relações para pré-dimensionamento de vigas de aço elaborados pelo professor Philip A. Corkill, traduzido e adaptado por Rebello (2003). Baseado nessa figura, os comprimentos de vigas adotados foram de 3.000 mm a 21.000 mm, variando a cada 1.000 mm.

Da mesma forma que com os outros testes, foi feita uma série de dez testes tomando como seção inicial a menor seção possível e dez testes com a maior seção possível, em razão dos limites para os intervalos das variáveis de projeto impostas na formulação do problema de otimização.

Como foi confirmado nas séries de testes efetuados para a verificação de perfis submetidos à flexão, há a tendência de os perfis ótimos estarem dentro das relações entre altura e largura previstas pela NBR5884/2000. Todos os testes foram efetuados considerando as relações d/b_f como restrição do problema.

Na seqüência, é apresentada a Tabela 11 com as dimensões das seções ótimas encontradas para cada vão de viga, sendo indicadas as vigas com menor área para a sobrecarga de 6 kN/m e de 18 kN/m.

Tabela 11 – Perfis otimizados para as vigas

L (mm)	SC = 6kN/m						SC = 18kN/m					
	d	b_f	t_w	t_f	A	L/d	d	b_f	t_w	t_f	A	L/d
3.000	150	100	4,75	6,35	19,22	20,0	227	100	4,75	6,35	22,88	13,2
4.000	220	100	4,75	6,35	22,55	18,2	346	100	4,75	6,35	28,53	11,5
5.000	306	100	4,75	6,35	26,73	16,2	450	115	4,75	6,35	35,38	11,1
6.000	398	100	4,75	6,35	31,00	15,1	540	140	4,75	6,35	42,83	11,1
7.000	460	117	4,75	6,35	36,11	15,2	656	165	4,75	6,35	51,51	10,7
8.000	520	141	4,75	6,35	42,00	15,4	610	184	4,75	9,50	63,03	13,1
9.000	611	155	4,75	6,35	48,10	14,7	720	183	6,35	8,00	73,98	12,5
10.000	704	178	4,75	6,35	55,44	14,2	827	207	6,35	8,00	84,62	12,1
11.000	705	184	4,75	8,00	62,17	15,6	858	220	6,35	9,50	95,08	12,8
12.000	701	200	4,75	9,50	70,40	17,1	946	247	6,35	9,50	105,79	12,7
13.000	783	200	6,35	8,00	80,70	16,6	862	270	6,35	12,50	120,65	15,1
14.000	782	210	6,35	9,50	88,35	17,9	949	241	8,00	12,50	134,17	14,7
15.000	870	220	6,35	9,50	95,84	17,2	1.030	262	8,00	12,50	145,90	14,6
16.000	940	239	6,35	9,50	103,89	17,0	1.107	285	8,00	12,50	157,81	14,4
17.000	1.012	259	6,35	9,50	112,27	16,8	1.200	304	8,00	12,50	170,00	14,2
18.000	950	268	6,35	12,50	125,74	18,9	1.250	340	8,00	12,50	183,00	14,4
19.000	1.030	269	6,35	12,50	131,07	18,4	1.170	297	9,50	16,00	203,15	16,2
20.000	1.020	256	6,35	16,00	144,66	19,6	1.250	330	9,50	16,00	221,31	16,0
21.000	1.030	295	8,00	12,50	154,15	20,4	1.270	358	9,50	16,00	232,17	16,5

Para fazer o comparativo entre as alturas e as áreas, foi feita a verificação dos perfis padronizados do tipo VS pela NBR5884/2000, sendo escolhidas as seções de menor área e que atendessem aos requisitos da NBR8800/1986. Essas seções estão indicadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Perfis padronizados do tipo VS para as vigas

L (mm)	SC = 6kN/m			SC = 18kN/m		
	Designação	A	L/d	Designação	A	L/d
3.000	VS150x15	19,22	20,0	VS200x20	25,41	15,0
4.000	VS200x19	24,14	20,0	VS300x25	31,43	13,3
5.000	VS300x23	28,89	16,7	VS400x32	40,64	12,5
6.000	VS350x26	33,80	17,1	VS400x41	52,30	15,0
7.000	VS400x32	40,64	17,5	VS450x51	65,37	15,6
8.000	VS400x38	48,50	20,0	VS450x60	76,99	17,8
9.000	VS400x49	62,19	22,5	VS500x73	92,66	18,0
10.000	VS450x59	74,87	22,2	VS500x86	109,72	20,0
11.000	VS500x61	78,04	22,0	VS600x95	121,00	18,3
12.000	VS500x73	92,66	24,0	VS700x105	134,00	17,1
13.000	VS550x75	95,84	23,6	VS750x108	138,00	17,3
14.000	VS550x88	112,89	25,4	VS850x120	153,50	16,5
15.000	VS600x95	121,00	25,0	VS900x124	157,50	16,7
16.000	VS650x98	125,00	24,6	VS900x142	181,44	17,8
17.000	VS700x105	134,00	24,3	VS900x142	181,44	18,9
18.000	VS800x111	142,00	22,5	VS900x159	201,96	20,0
19.000	VS850x120	153,50	22,3	VS950x180	229,22	20,0
20.000	VS900x124	157,50	22,2	VS1000x180	228,96	20,0
21.000	VS950x127	161,50	22,1	VS1100x199	252,89	19,1

Com base nas informações contidas nas tabelas 11 e 12 e considerando as recomendações de Bellei (1994), é apresentado na Figura 13 o gráfico com as alturas relacionadas aos vãos das vigas para as seções obtidas via otimização e as seções padronizadas, no qual as linhas inferiores referem-se às alturas das seções obtidas considerando a sobrecarga de 6 kN/m e as linhas superiores, à sobrecarga de 18 kN/m. Bellei (1994) recomenda o uso de vigas com alturas obedecendo às relações Vão/20 a Vão/25, sendo a linha inferior representada pela relação Vão/25 e a superior, pela relação Vão/20.

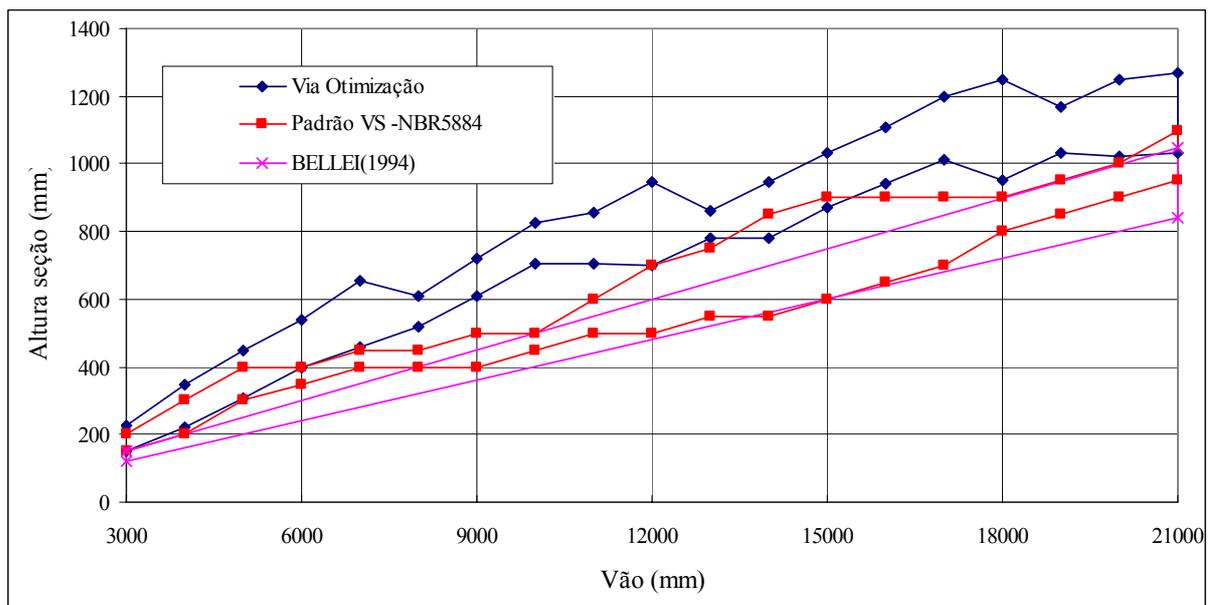


Figura 13 – Gráfico das relações de altura x vão relacionadas a Bellei (1994)

Da mesma maneira, foi gerado o gráfico referente aos valores contidos nas tabelas 11 e 12 e relacionados com a curva recomendada por Rebello (2003), a qual não apresenta valores numéricos, apenas o desenho esquemático indicando a relação vão/altura. As curvas estão indicadas na Figura 14.

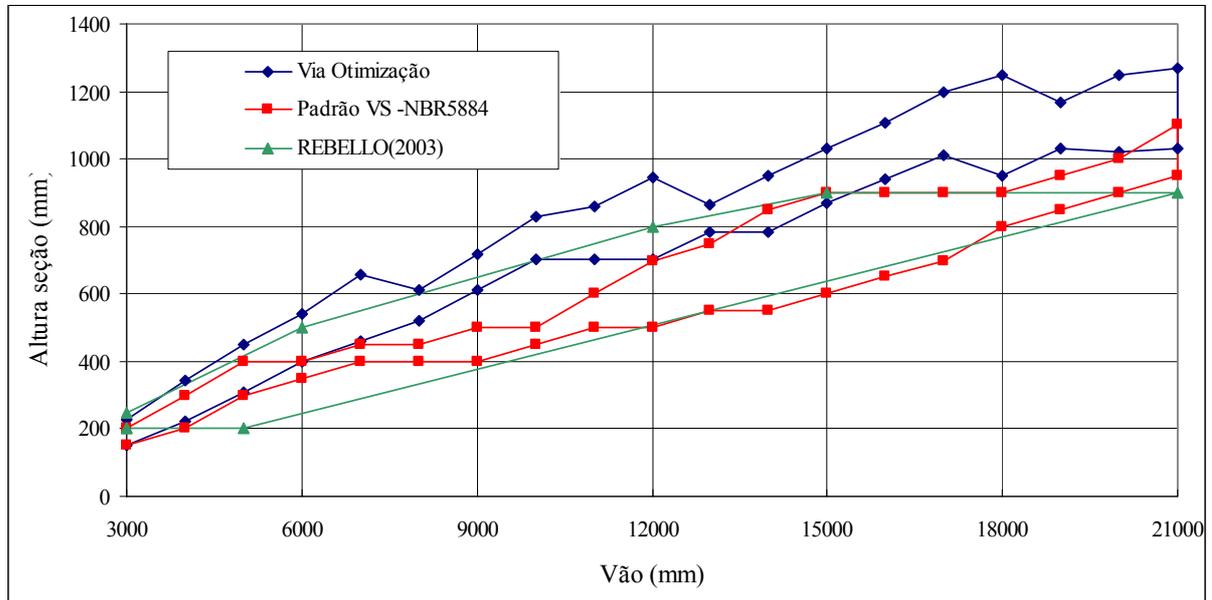


Figura 14 – Gráfico das relações de altura x vão relacionadas a Rebello (2003)

Os gráficos mostram as alturas das seções para cada vão, levando em conta as cargas aplicadas para o dimensionamento pelo processo de otimização e para a verificação das seções padronizadas do tipo VS, sendo confrontados os valores com o gráficos de Bellei (1994) e Rebello (2003). Pode ser observado que há uma tendência de as alturas apresentarem valores muito próximos entre os métodos adotados; com o uso do processo de otimização, há a predominância de seções mais altas que as seções padronizadas e também em relação aos valores sugeridos por Bellei (1994) e Rebello (2003), principalmente para os vãos maiores.

É importante salientar que a adoção dos intervalos das sobrecargas baseou-se na possibilidade de atender à maioria das situações práticas, não se levando em conta os fatores adotados para as curvas de pré-dimensionamento de Bellei (1994) e Rebello (2003), visto que não explicitam os valores de referência nos seus trabalhos, apenas considerando essas relações como referência para pré-dimensionamento de vigas biapoiadas. Dessa forma, admite-se ser verdadeira a suposição dos valores das cargas pelo fato de as curvas das vigas padronizadas ficarem dentro dos intervalos de pré-dimensionamento propostos por Bellei (1994) e Rebello (2003).

De uma maneira geral, pode ser observada a validade das curvas de pré-dimensionamento propostas por Bellei (1994) e Rebello (2003), bem como das curvas obtidas pela aplicação do método de otimização.

Além das relações entre os vãos das vigas e as alturas das seções, foi feita a comparação entre as áreas das seções obtidas via otimização e as vigas do tipo VS padronizadas pela NBR5884/2000. Essas curvas estão indicadas no gráfico da Figura 15.

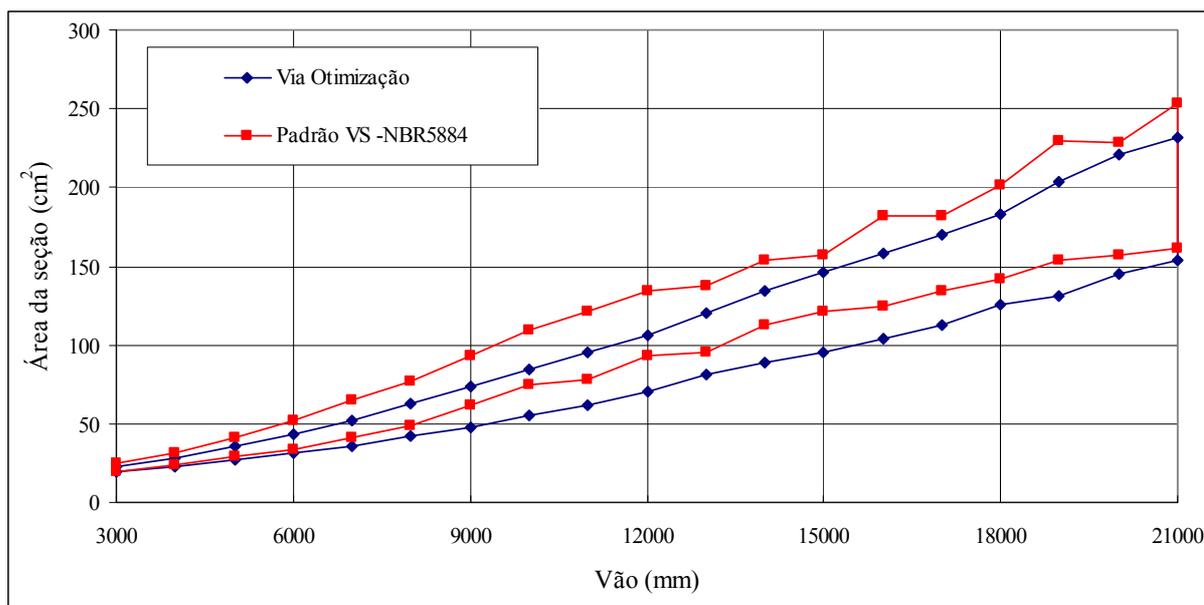


Figura 15 – Gráfico das áreas das seções em função dos vãos das vigas

Com base nos resultados apresentados na Figura 15, observa-se claramente que há uma redução de área dos perfis obtidos pela otimização em relação aos perfis VS padronizados pela NBR5884/2000.

As relações entre as áreas obtidas pela otimização e as áreas dos perfis VS estão indicadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Relação entre as áreas dos perfis otimizados e os perfis padronizados

L (mm)	SC = 6kN/m			SC = 18kN/m		
	A _{Otimizada}	A _{VS}	A _{Oti} /A _{VS}	A _{Otimizada}	A _{VS}	A _{Oti} /A _{VS}
3.000	19,22	19,22	1,00	22,88	25,41	0,90
4.000	22,55	24,14	0,93	28,53	31,43	0,91
5.000	26,73	28,89	0,93	35,38	40,64	0,87
6.000	31,00	33,80	0,92	42,83	52,30	0,82
7.000	36,11	40,64	0,89	51,51	65,37	0,79
8.000	42,00	48,50	0,87	63,03	76,99	0,82
9.000	48,10	62,19	0,77	73,98	92,66	0,80
10.000	55,44	74,87	0,74	84,62	109,72	0,77
11.000	62,17	78,04	0,80	95,08	121,00	0,79
12.000	70,40	92,66	0,76	105,79	134,00	0,79
13.000	80,70	95,84	0,84	120,65	138,00	0,87
14.000	88,35	112,89	0,78	134,17	153,50	0,87
15.000	95,84	121,00	0,79	145,90	157,50	0,93
16.000	103,89	125,00	0,83	157,81	181,44	0,87
17.000	112,27	134,00	0,84	170,00	181,44	0,94
18.000	125,74	142,00	0,89	183,00	201,96	0,91
19.000	131,07	153,50	0,85	203,15	229,22	0,89
20.000	144,66	157,50	0,92	221,31	228,96	0,97
21.000	154,15	161,50	0,95	232,17	252,89	0,92

De acordo com a tabela, a maior redução de área está entre os vãos de 9.000 mm e 12.000 mm, chegando a 26% no vão de 10.000 mm para a sobrecarga de 6 kN/m. Porém, na maioria dos casos, a redução está na faixa de 10% a 15%.

Como pode ser observado, há a tendência de se obterem seções menores quando são aplicados métodos de otimização, porém faz-se necessário salientar que essa redução é válida para fábricas de estruturas que possuem os equipamentos de solda por arco submerso, as quais podem produzir a seção como desejarem, desde que atendam às limitações do processo e às considerações de norma.

Por outro lado, se a fábrica não possui equipamento para a produção de perfis I soldados, pode se tornar mais onerosa a aquisição de perfis com dimensões não padronizadas conforme a norma NBR5884/2000, pois muitos fornecedores produzem as seções seriadas e as mantêm em estoque. Neste caso, há a necessidade de fazer uma avaliação criteriosa em relação ao uso de perfis não padronizados.

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões da pesquisa

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver e implementar uma formulação para a otimização de perfis “I” soldados de aço para a busca da seção de menor área, com o processo de otimização implementado através do Método do Recozimento Simulado (Simulated Annealing).

A verificação dos perfis foi feita baseando-se nas prescrições da norma NBR8800/1986, atendendo a todos os seus requisitos. Além disso, as considerações da norma de perfis soldados NBR5884/2000 e da norma de cargas NBR6120/1980 foram avaliadas.

A partir do programa desenvolvido, foram realizados diversos testes comparativos com base em perfis padronizados conforme a NBR5884/2000. Pelos resultados obtidos, pode-se afirmar que a formulação proposta neste trabalho atingiu seus objetivos e chegou-se às seguintes conclusões:

- há uma tendência de o processo de otimização sempre encontrar seções com áreas próximas à área da seção de referência, o que permite validar a eficiência do processo de otimização;
- a ocorrência de várias seções que atendem a todas as restrições impostas deve-se ao fato de existir uma enorme gama de soluções possíveis e, em muitos casos, com área maior que a área de referência;
- quando não são impostas as restrições da NBR5884/2000, referentes à relação entre as dimensões da seção, há uma redução maior da área da seção transversal, porém há a predominância de seções que não atendem aos requisitos da NBR5884/2000 para o caso de esforços de compressão; quando o esforço for de flexão, as seções ótimas predominantemente atendem às restrições. De uma maneira geral, pode ser afirmado que seções com relação d/b_f inferior a 1,5 apresentam mesas com larguras e espessuras grandes, ao passo que, com relação d/b_f superior a 4,0, as mesas

reduzem-se significativamente, contudo a espessura da alma é maior, levando a que aumente a área da seção transversal e os efeitos localizados na alma se tornem preponderantes;

- a padronização da norma NBR5884/2000 apresenta perfis tabelados nessa norma já com seções eficientes, levando em conta os aspectos de produção de peças de aço formando seções do tipo “I”;
- o uso do processo de otimização para seções com valores intermediários aos dos esforços resistentes dos perfis padronizados apresenta vantagem, porque atende a todas as restrições de projeto; qualquer seção é possível de ser produzida, não sendo obrigatoriamente necessário seguir uma padronização;
- de uma forma geral, pode ser afirmado que a otimização de perfis soldados submetidos a esforços de flexão é mais representativa que os perfis submetidos a esforços de compressão e que a restrição da relação entre a altura e a largura não é determinante na obtenção do ótimo;
- para situações de esforços de flexo-compressão, estabelecendo-se um valor para a flexão e aumentando-se gradativamente o esforço normal de compressão, o valor da relação entre a altura da seção e a largura dos perfis vai se reduzindo até atingir a unidade. Isso demonstra que o esforço de compressão passa a ser preponderante, ao passo que, com esforço de compressão atuante pequeno, a relação entre a altura e a largura aumenta;
- na aplicação da formulação referente às vigas, são determinadas as alturas das seções para cada vão, levando em conta as cargas aplicadas para o dimensionamento pelo processo de otimização e para a verificação das seções padronizadas do tipo VS. Confrontados os valores com os gráficos de Bellei (1994) e Rebello (2003), pode ser observado que há uma tendência de as alturas apresentarem valores muito próximos entre os métodos adotados, visto que através do uso do processo de otimização há a predominância de seções mais altas que as seções padronizadas e também em relação aos valores sugeridos por Rebello (2003), principalmente para os vãos maiores;
- de uma maneira geral, pode ser observada a validade das curvas de pré-dimensionamento para as alturas de vigas propostas por Bellei (1994) e Rebello (2003), bem como para as curvas obtidas através da aplicação do método de otimização;

- na comparação das áreas obtidas através da otimização com o dimensionamento levando em conta os perfis VS padronizados pela NBR5884/2000, pode ser observado claramente que há uma redução de área dos perfis obtidos através da otimização em relação aos perfis VS, com a maioria das vigas apresentando uma redução na faixa de 10% a 15%.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos com a implementação do programa de otimização e da sua aplicação em testes práticos, conclui-se que o Método do Recozimento Simulado pode ser aplicado com eficiência para a otimização de estruturas formadas por perfis “I” soldados em aço, permitindo que se possa sugerir a continuidade e ampliação de estudos relacionados ao assunto.

A continuidade de estudos pode se dar nos seguintes aspectos:

- avaliar os parâmetros adotados no método de otimização com o intuito de melhorar o desempenho da implementação e buscar soluções mais eficientes;
- ampliar a aplicação do método de otimização para outros tipos de seções, como, por exemplo, o uso de otimização de perfis formados à frio, os quais podem apresentar uma variação muito grande em formas e dimensões;
- aplicar o método de otimização em conjunto com a análise estrutural, fazendo a interação entre a análise e o dimensionamento, o que permitirá a avaliação de estruturas complexas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6023(NB 66)*: Informação e documentação: referências - elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

_____. *NBR 5884*: Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico: Especificação. Rio de Janeiro, 2000.

_____. *NBR 6120*: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações: Procedimento. Rio de Janeiro, 1980.

_____. *NBR 8800(NB 14)*: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios: Procedimento. Rio de Janeiro, 1986.

ANDREOLI, R. V.; CARVALHO, J. C. *Apostila de FORTRAN*. INPE, 2001.

BELEGUNDU, A. D.; CHANDRUPATLA, T. R. *Optimization concepts and applications in engineering*. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

BELLEI, I. H. *Edifícios industriais em aço*. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 1994.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento da Indústria e Comércio. *Manual brasileiro para cálculo de estruturas metálicas*. Brasília, 1989. v. 1.

BURNS, S. A. *Recent advances in optimal structural design*. Illinois: The Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, 2002.

CRISTO, H. P. *Programação em Linguagem Fortran – Guia básico de programação em linguagem Fortran 77 e 90*. Belo Horizonte, 2003.

DAS, A.; MITRA S. *Minimum weight elastic design of rigid portal frames*. Índia: Technical Journals: Civil Engineering, v.84, p.130-135, Aug.2003.

FARKAS, J.; JÁRMAI, K. *Analysis and optimum design of metal structures*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997.

FONTÁN, A. N.; HERNÁNDEZ, S. *Shape optimization of steel standard profiles*. VII Computer Aided Optimum Design of Structures. Boston: WIT Press, 2001.

GOFFE, W.L. SIMANN: a global optimization algorithm using simulated annealing. *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, v. 1, n. 3, 1996.

HERNÁNDEZ, S.; LOSCOS, P. FONTÁN, A. N. *BASO*: a computer code for optimum design of steel bars. VII Computer Aided Optimum Design of Structures. Boston: WIT Press, 2001.

KIRPATRICK, S. ; GELLAT, C. D.; VECCHI, M. P. *Optimization by simulated annealing*. Science, v. 220, n. 4598, p. 671-680, May.1983.

- KRIPKA, M. *Optimization of trusses by simulated annealing*. J. Braz. Soc. Nech. Sci & Eng., v. 26, n. 2, p. 170-173, Apr./Jun. 2004.
- MAHFOUZ, S. Y. *Design optimization of structural steelwork*. 1999. Dissertation of Philosophy. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Bradford, UK, 1999.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. *Estruturas de aço – dimensionamento prático*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2000.
- QUEIROZ, G. *Elementos das estruturas de aço*. 4. ed. Belo Horizonte, 1993.
- RAUBER, J. (Coord.), et al. *Apresentação de trabalhos científicos: normas e orientações práticas*. Passo Fundo: UPF Editora, 2002.
- REBELLO, Y.C.P. *A concepção estrutural e a arquitetura*. 3. ed. São Paulo: Ziguarte, 2003.
- REKLAITIS, G. V. et al. *Engineering optimization – methods and applications*. Indiana: A Wiley – Interscience Publication, 1983.
- SALLES, J. J. et al. *Elementos de estruturas de aço – dimensionamento*. Apostila de Curso. São Carlos: EESC-USP, 1993.
- SARAMAGO, S. F. P. *Métodos de otimização randômica: algoritmos genéticos e recozimento simulado*. Minicurso do XXVI CNMAC. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2003.
- SCHINLER, D. C. *Design of partially restrained steel frames using advanced analysis and object-oriented evolutionary algorithm*. Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science. Faculty of the Graduate School, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, 2001.
- SILVA, E. C. N. *PMR 5215 – Otimização aplicada ao projeto de sistemas mecânicos*. Apostila de Curso. São Paulo: Escola Politécnica-USP, 2002.
- SILVA, P. S. *Projeto e análise de algoritmos* Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 1998.
- VANDERPLAATS, G. N. *Numerical optimization techniques for engineering design*. California: McGraw-Hill Book Company, 1984.

ANEXO A

Fluxogramas de verificação da resistência dos perfis, baseados nas prescrições da norma NBR8800/1986.

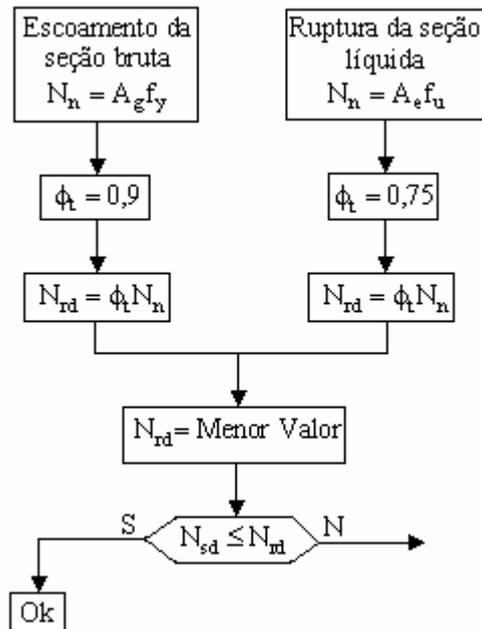


Figura 16– Fluxograma de resistência à tração

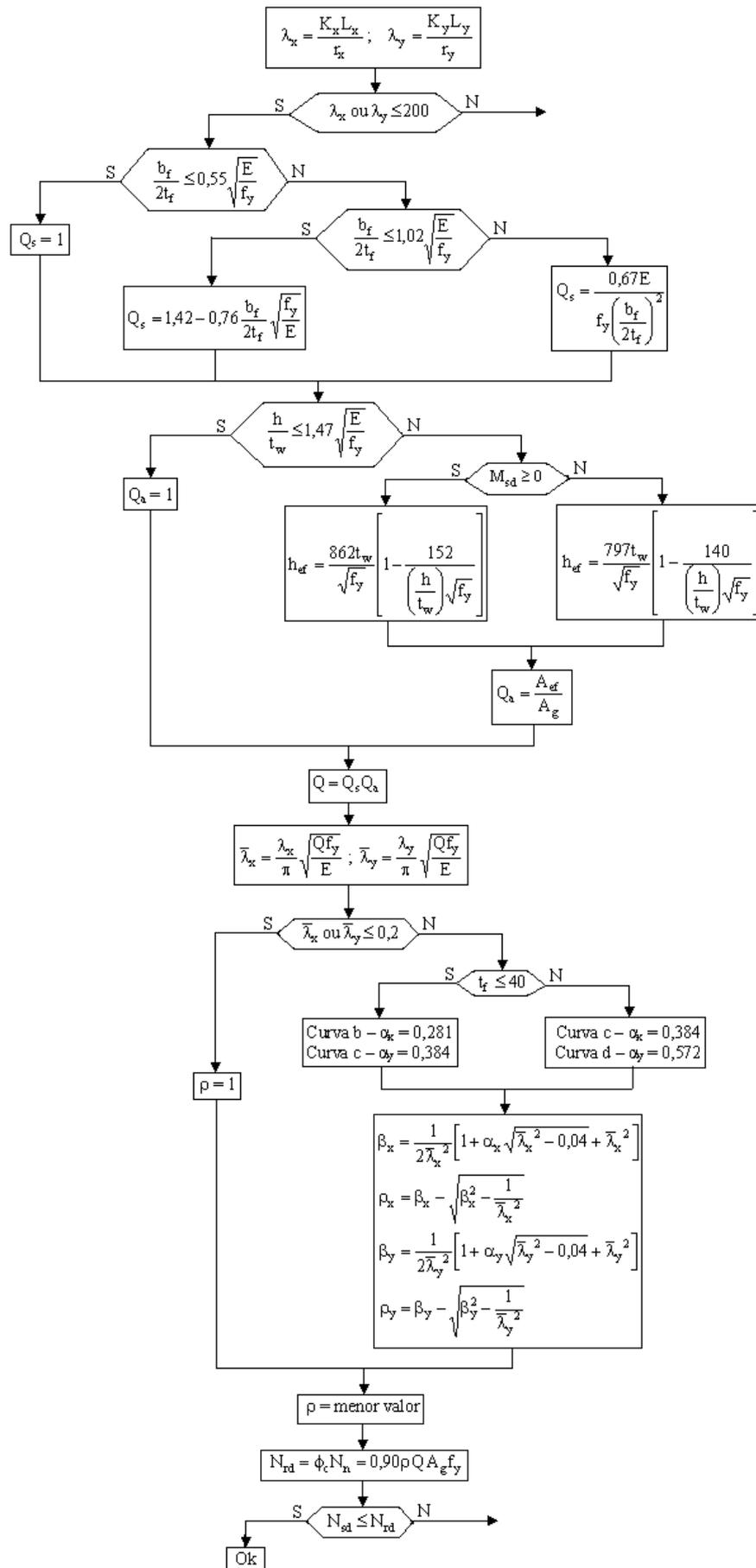


Figura 17– Fluxograma de resistência à compressão

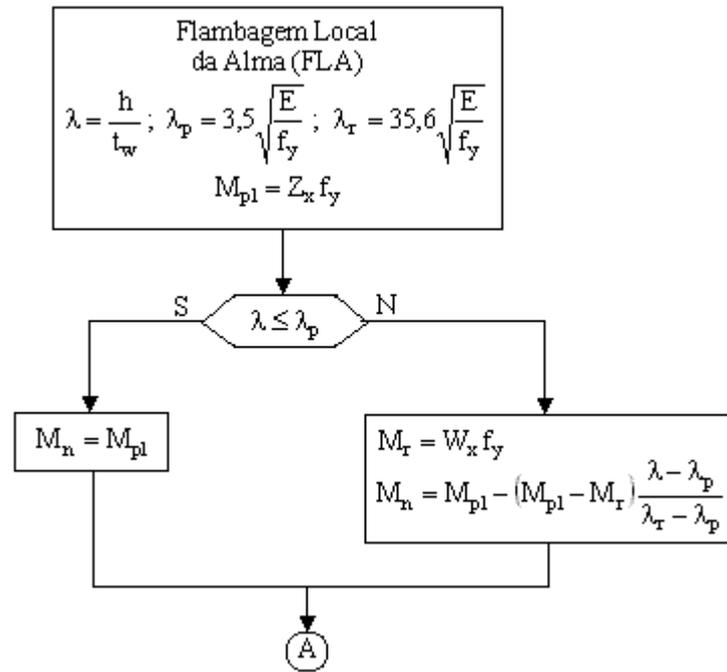


Figura 18– Fluxograma de resistência do momento fletor FLA

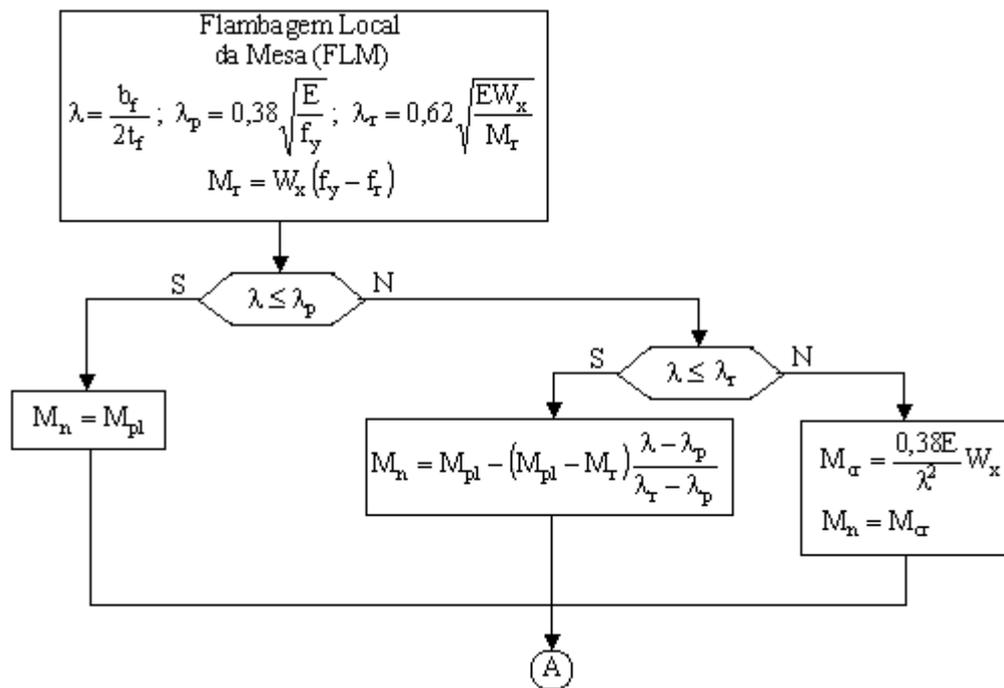


Figura 19– Fluxograma de resistência do momento fletor FLM

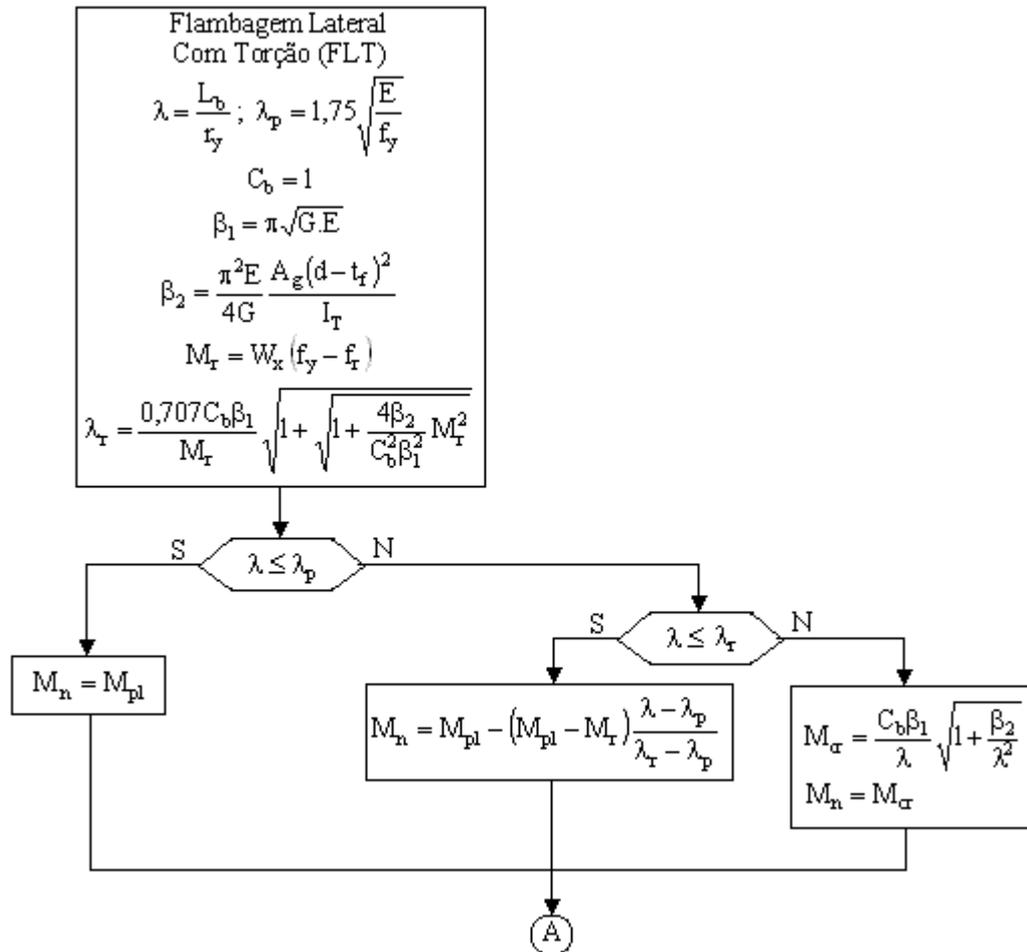


Figura 20– Fluxograma de resistência do momento fletor FLT

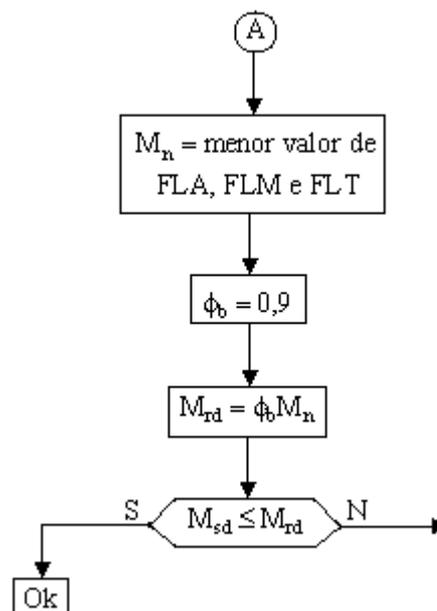


Figura 21– Fluxograma de resistência do momento fletor

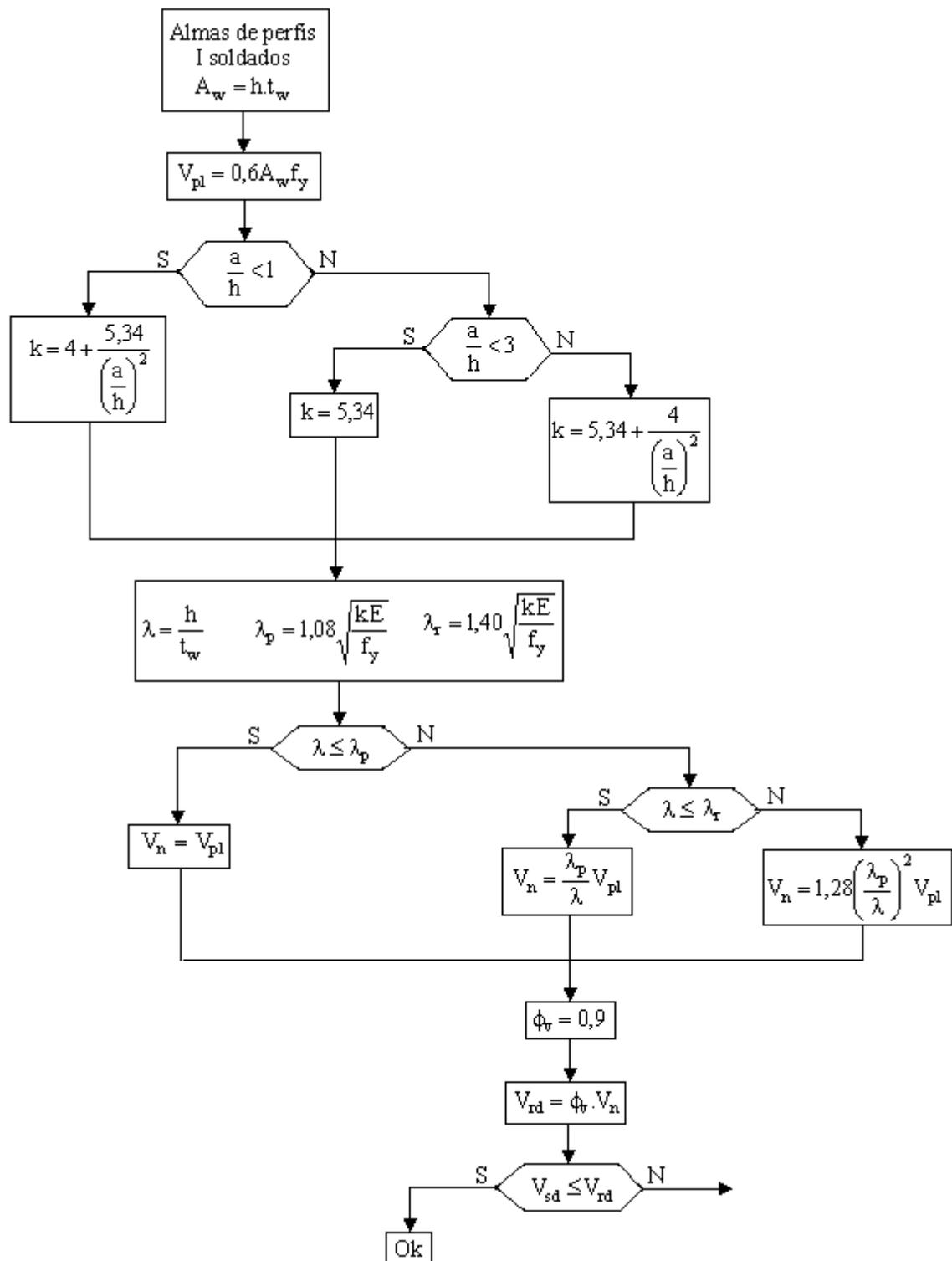


Figura 22– Fluxograma de resistência à força cortante

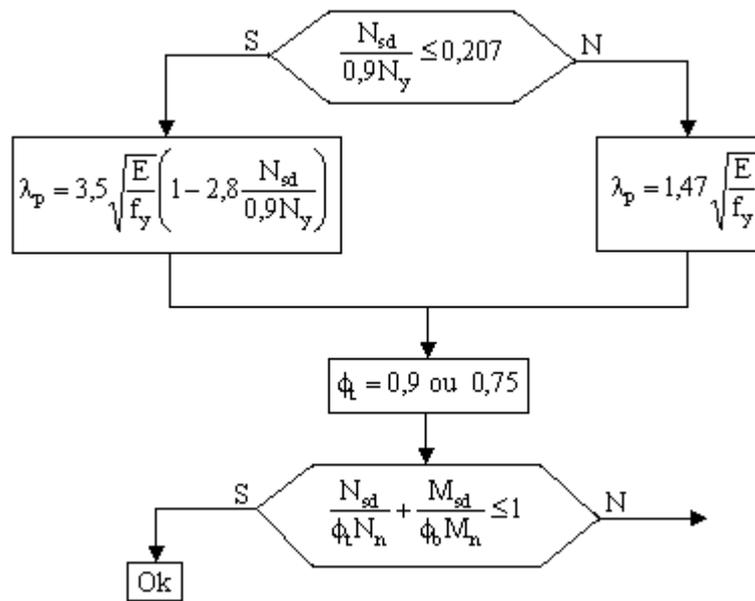


Figura 23– Fluxograma de resistência à flexotração

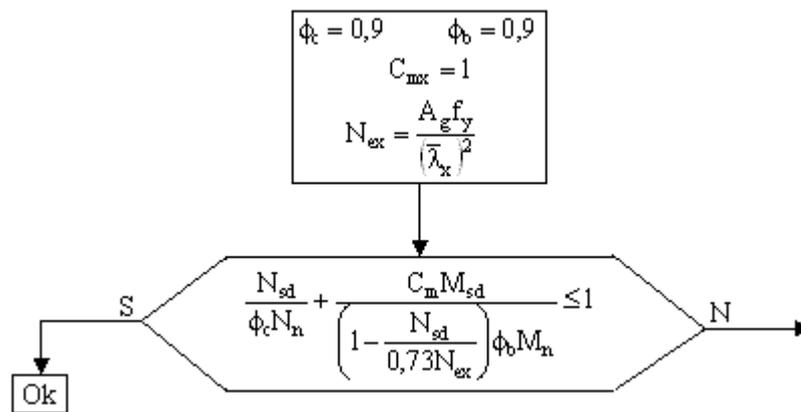


Figura 24– Fluxograma de resistência à flexocompressão