

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA RESIDÊNCIA CONSTITUÍDA POR PERFIS DE AÇO
GALVANIZADOS DE PEQUENA ESPESSURA FORMADOS A FRIO SEGUNDO O SISTEMA
CONSTRUTIVO A SECO – LIGHT STEEL FRAMING (LSF)

por

Rafael Cavicchioli Batista

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2011.

ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA RESIDENCIA CONSTITUÍDA POR PERFIS DE AÇO GALVANIZADOS DE PEQUENA ESPESSURA FORMADOS A FRIO SEGUNDO O SISTEMA CONSTRUTIVO A SECO – LIGHT STEEL FRAMING (LSF).

por

Rafael Cavicchioli Batista

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE **ENGENHEIRO MECÂNICO** APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Walter Jesus Casas

Prof. Dr. Jun Sérgio Ono Fonseca

Prof. Dr. Rogério José Marczak

Porto Alegre, 27 de junho de 2011.

Dedico esse trabalho a meus pais, Élcio e Valéria.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha família pelo apoio e suporte durante todo o meu curso de graduação.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Herbert Martins Gomes*, pela orientação oferecida desde o princípio do trabalho.

Aos professores *Ignácio Iturrioz* e *Gladimir Grigoletti* pela ajuda oferecida para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Engenheiro *Fernando Luiz Fim Birriel* por me apresentar a tecnologia e também possibilitar a experiência prática com o método construtivo Light Steel Framing.

Aos meus amigos, pela paciência e ajuda ao longo destes anos de convívio.

E de modo especial, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo ensino gratuito e de qualidade.

*O homem erudito é um descobridor de fatos que já existem
- mas o homem sábio é um criador de valores que não existem e que ele faz existir.*

Albert Einstein

BATISTA, R. C. **Análise estrutural de uma residência constituída por perfis de aço galvanizados de pequenas espessuras formados a frio segundo o sistema construtivo a seco - *Light Steel Framing (LSF)***. 2011. 31f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

O Mercado da construção civil no Brasil ainda é marcado pela predominância de métodos construtivos praticamente artesanais, caracterizados pelo grande desperdício de matéria prima e também pela baixa eficiência. Visando solucionar estes problemas, propõem-se o uso de novos métodos construtivos, de concepção racional e que sejam facilmente industrializados. Neste sentido, o presente trabalho propõe-se a verificar o desempenho e o comportamento estrutural de uma estrutura residencial constituída segundo um método construtivo de concepção racional mundialmente reconhecido, o Light Steel Framing. Onde, para isso, foi utilizado o mais novo método adotado pela norma brasileira de estruturas constituídas de perfis de aço formados a frio (NBR 14762, 2010), o Método da Resistência Direta. O estudo conclui que o comportamento e desempenho da estrutura em análise serão aprovados segundo os procedimentos verificados da norma brasileira vigente quando pré-dimensionados usando indicações do CBCA (Centro Brasileiro da Construção em Aço), e também alerta para a tomada de cuidados no uso da verificação via Método da Resistência Direta em situações específicas, devido às limitações do mesmo.

PALAVRAS-CHAVE: análise estrutural, *Light Steel Framing*, perfil chapa dobrada, flambagem.

BATISTA, R. C. **Structural analysis of a residence made with thin walled cold formed steel galvanized members under procedures of dry construction method – *Light Steel Framing (LSF)***. 2011. 31f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

The Brazilian market of civil construction still marked by the predominance of handmade construction method, characterized by the lower efficiency and for a large waste of materials. In order to solve these problems, one proposes the use of new constructions methods, design to avoid waste and be easily industrialized. In this sense, this present work will be determined to check and verify the behavior and performance of a structure made under procedures of dry construction method, the Light Steel Framing Method. For this, it will be used the newer method adopted by the Brazilian Standard of thin walled cold formed steel structure (NBR 14762, 2010), the Direct Strength Method. The study concludes that the analyzed structure would be approved by the Brazilian norm procedures if designed in accordance with the CBCA (Brazilian Center of Steel Construction) reports, and also warns to take care on the use of Direct Strength Method on specific situations, because of its limitations.

KEYWORDS: structural analysis, *Light Steel Framing*, cold formed sheet, buckling.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. Princípios do comportamento de barras com elementos esbeltos	2
2.2. Método da Resistência Direta (MRD)	2
3. LIGHT STEEL FRAMING (LSF).....	4
3.1. O Projeto	5
3.1.1. Materiais	8
4. ANÁLISE ESTRUTURAL.....	8
4.1. Carregamentos	9
4.1.1. Cargas Permanentes	10
4.1.2. Sobrecargas.....	10
4.1.3. Carga de vento.....	10
4.2. Esforços e Deslocamentos Obtidos.....	11
5. VERIFICAÇÃO	11
5.1. Carga Máxima Resistente (Carga Crítica)	12
5.2. Resultados	12
5.2.1. Viga de Piso (Ue 200x40x12x1,25 mm)	13
5.2.2. Montantes (Pilares) externos (Ue 140x40x12x0,95 mm).....	13
5.2.3. Montantes (Pilares) internos (Ue 90x40x12x0,95 mm).....	14
5.2.4. Viga de Telhado (Caibro) (Ue 90x40x12x0,95 mm).....	14
5.2.5. Viga de Forro (Ue 90x40x12x0,95 mm).....	14
5.2.6. Terças de telhado (Ripas) (Cr 20x30x12x0,95 mm)	15
6. CONCLUSÕES	16
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17
Apêndice A – Propriedades geométricas e dos materiais dos perfis de projeto.....	18
Apêndice B – Cargas de flambagem elástica obtidas pelo software CU-FSM.	19
Apêndice C – Procedimentos do Método da Resistência Direta.....	20

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Exemplo de edificação utilizando o sistema <i>Light Steel Framing</i>	1
Figura 2.1	- Flambagem Local e Distorcional de uma seção do tipo U enrijecido.....	2
Figura 2.2	- Gráfico tensão x Comprimento de semi-onda para uma barra sob compressão centrada.....	3
Figura 2.3	- Gráfico tensão x Comprimento de semi-onda para uma barra sob flexão simples.....	3
Figura 3.1	- Esquema estrutural típico de uma residência em <i>LSF</i>	4
Figura 3.2	- Planta Arquitetônica do Primeiro e segundo Pavimento	5
Figura 3.3	- Diretriz In-line Framing com espaçamento de 400 mm	5
Figura 3.4	- Modelo da estrutura analisada	6
Figura 3.5	- Tipos de Perfis formados a frio utilizados	6
Figura 3.6	- Laje Seca utilizada no segundo pavimento	7
Figura 4.1	- Estrutura de Barra utilizada na análise	8
Figura 4.2	- Esquema demonstrativo das rotulações do modelo	8
Figura A.1	- Referenciamento das dimensões dos perfis	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Materiais Utilizados no Projeto	9
Tabela 4.2 - Deslocamentos e Esforços obtidos na análise estrutural	11
Tabela 5.1 - Cargas Máximas Resistentes	11
Tabela A.1 - Propriedades geométrica da seção bruta dos perfis utilizados	17
Tabela B.1 - Cargas de flambagem elástica	18

LISTA DE SÍMBOLOS

λ_{dist}	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional.	(adm.)
λ_l	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local.	(adm.)
γ	Coefficientes de ponderação das ações ou das resistências, em geral.	(adm.)
f_y	Limite de escoamento do aço.	(MPa)
r_0	Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção.	(mm)
	$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2}$	
r_x e r_y	Raios de giração da seção bruta em relação aos eixos x e y , respectivamente.	(mm)
x_0 e y_0	Distâncias do centro de torção ao centróide nas direções dos eixos x e y , respectivamente.	(mm)
b_f	Dimensão da alma dos perfis.	(mm)
b_w	Dimensão da(s) mesa(s) dos perfis.	(mm)
CBCA	Centro Brasileiro de Construção em Aço	
C_b	Fator de modificação para momento fletor não uniforme, que a favor da segu- -rança pode ser tomado igual a 1,0.	(adm.)
C_w	Constante de empenamento da seção.	(mm ⁶)
C_r	Perfil tipo Cartola.	
D	Dimensão do(s) enrijecedor(es) dos perfis.	(mm)
E	Módulo de elasticidade.	(E = 200 000 MPa)
ELS	Estado Limite de Serviço	
ELU	Estado Limite Último	
G	Módulo de elasticidade transversal.	(G = 77 000 MPa)
I_g	Momento de inércia da seção bruta.	(mm ⁴)
$K_x L_x$	Comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo x .	(mm)
$K_y L_y$	Comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo y .	(mm)
$K_z L_z$	Comprimento efetivo de flambagem global por torção.	(mm)
LSF	Light Steel Framing	
M_A	Valor do momento fletor solicitante, em módulo, no 1° quadrante.	(kNm)
M_B	Valor do momento fletor solicitante, em módulo, no centro do trecho.	(kNm)
M_C	Valor do momento fletor solicitante, em módulo, no 3° quadrante.	(kNm)
M_e	Momento fletor de flambagem lateral com torção em regime elástico.	(kNm)
M_{max}	Valor máximo do momento fletor solicitante.	(kNm)
M_n	Momento fletor solicitante calculado considerando as combinações de ações para os estados limites de serviço (ELS).	(kNm)
M_{Rser}	Momento fletor resistente, porém substituindo o produto Wf_y por M_n .	(kNm)
N_{dist}	Força axial de flambagem distorcional elástica.	(kN)
N_l	Força axial de flambagem local elástica.	(kN)
N_{ex}	Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo X .	(kN)
N_{ey}	Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo y .	(kN)
N_{ez}	Força axial de flambagem global elástica por torção.	(kN)
N_y	Força normal máxima de compressão para o início do escoamento da seção.	(kN)
PFF	Perfis Formados a Frio.	
t	Dimensão da espessura dos elementos dos perfis. (Espessura do perfil)	(mm)
U	Perfil tipo U.	
U_e	Perfil tipo U enrijecido. (Com enrijecedores nas mesas)	
W	Modulo de resistência elástico da seção bruta em relação a fibra extrema que atinge o escoamento.	(mm ³)

1. INTRODUÇÃO

O mercado da construção civil no Brasil ainda é caracterizado pela predominância do uso de sistemas construtivos praticamente artesanais. Por se tratar de um método praticamente artesanal, este setor é caracterizado pela baixa produtividade, baixa eficiência, e principalmente pelo grande desperdício de matéria prima. Estas características causam problemas como o atual déficit habitacional, a grande quantidade de resíduos e também o alto consumo energético.

Visando alterar esta situação, o uso de novos métodos construtivos juntamente com o uso de novas tecnologias que permitam a industrialização e a racionalização dos processos construtivos mostra-se a melhor solução. Fez-se então uma pesquisa de mercado, onde foram verificados vários métodos construtivos, chegando-se então a um método construtivo existente há mais de 50 anos no mercado, e também bastante consolidado em países de primeiro mundo, caracterizado pelo alto nível de industrialização dos seus setores, o *Light Steel Framing* (LSF).

O *Light Steel Framing* (LSF), assim conhecido mundialmente, é um sistema construtivo industrializado de concepção racional, que tem como principal característica uma estrutura constituída por perfis de aço galvanizado de pequena espessura formados a frio, conforme a Figura 1.1, possibilitando uma construção a seco de grande rapidez de execução, além de estruturas mais leves e da fácil obtenção dos materiais.

Por ser um sistema construtivo baseado em uma estrutura constituída por perfis de aço de pequena espessura e grande comprimento, ou seja, constituída por perfis de alto índice de esbeltez, esta estrutura estará sujeita ao colapso pelo diversos modos de flambagem. Por apresentarem tais formas de colapso, os perfis de aço de pequena espessura formados a frio, possuem diversos métodos de análise, que comparados aos métodos de análise de perfis “comuns” de aço (NBR 8800:2008), são bastante trabalhosos e também complexos.

Dentre os diversos métodos de análise deste tipo de perfil descritos pela norma NBR 14762:2010, optou-se pelo Método da Resistência Direta (MRD), contido no anexo C desta norma. Comparados aos outros métodos, como o Método das Larguras Efetivas (MLE) e Método da Seção Efetiva (MSE), o MRD é menos trabalhoso e mais simples de ser aplicado, além de ser o mais recentemente desenvolvido também. Sua simplicidade se deve pelo fato de possuir uma menor quantidade de cálculos a serem realizados, devido à utilização em seus cálculos das propriedades geométricas da seção bruta, ou seja, as propriedades geométricas da seção transversal real do perfil, e não as propriedades geométricas da seção efetiva, utilizadas por outros métodos em seus cálculos.



Figura 1.1 - Exemplo de edificação utilizando o sistema *Light Steel Framing*.

1.1. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a verificação dos componentes (pilares, vigas, etc.) mais solicitados de uma estrutura residencial baseado no sistema construtivo LSF, segundo a norma brasileira NBR 14762:2010. Conforme esta norma, estes tipos de perfis (Perfis de aço formados a frio) devem ser analisados e verificados segundo os diversos modos de flambagem. Para isto, neste presente trabalho, serão utilizados os procedimentos descritos pelo método da resistência direta.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Princípios do comportamento de barras com elementos esbeltos

De acordo com Silva et al. 2008, os estados limites últimos das barras de seção transversal aberta, formadas por chapas de aço, a serem considerados no dimensionamento, frequentemente estão associados à instabilidade local, distorcional ou global.

Rodrigues, 2006 indica que elementos individuais de perfis formados a frio têm usualmente espessuras tão pequenas com relação à sua largura, que estes elementos esbeltos podem flambar em níveis de tensões menores que aquele correspondente à resistência ao escoamento do material, quando sujeitos a compressão, cisalhamento, flexão ou uma interação entre os mesmos. A flambagem local de cada elemento é, portanto, uma das mais importantes considerações de projeto com os perfis formados a frio.

Ainda Rodrigues, 2006 indica que além dos efeitos devidos aos modos de flambagem local de chapa ou de flambagem por distorção, descritos na Figura 2.1, nos perfis formados a frio pode ainda ocorrer a interação entre um desses modos e um dos modos globais de uma barra comprimida (flambagem por flexão, torção ou flexo-torção). Esta interação conduz a uma redução da capacidade portante da barra, podendo ocorrer a ruína por colapso súbito da peça, indicando um comportamento pós-crítico instável que é sempre não desejável num projeto.

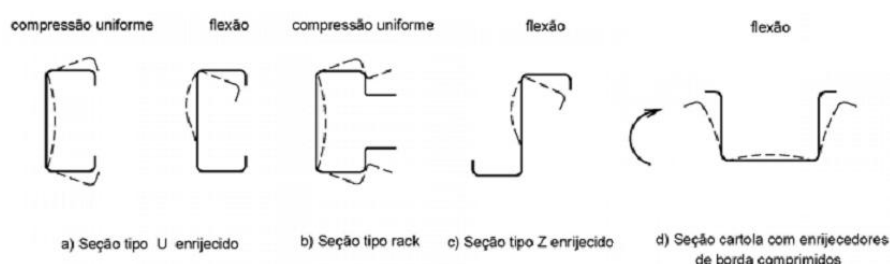


Figura 2.1 – Flambagem Local e Distorcional de uma seção do tipo U enrijecido.

No caso do comportamento pós-crítico dos perfis esbeltos (perfis fabricados com chapas de aço de pequena espessura), este é estável, permanecendo tais elementos com a capacidade portante mesmo após ser atingida sua carga crítica, caracterizando uma reserva de resistência pós-flambagem. O tratamento matemático deste fenômeno é muito trabalhoso, devido à complexidade do problema. Uma previsão teórica do comportamento pós-crítico pode ser encontrada a partir do critério das larguras efetivas, em vez de se utilizar as soluções obtidas por métodos numéricos, tais como o método dos elementos finitos (MEF) e o método das faixas finitas (MFF). No entanto, devem ser tomadas as devidas precauções quanto a utilização do critério das larguras efetivas, devido às limitações do método.

2.2. Método da Resistência Direta (MRD)

Os métodos convencionais de análise de perfis esbeltos de aço formados a frio, o Método da Largura Efetiva (MLE) e o Método da Seção Efetiva (MSE), consistem basicamente

em diminuir as larguras dos elementos que compõem os perfis, para o cálculo das propriedades geométricas, procedimento este que pode gerar cálculos trabalhosos e tediosos.

Para contornar esses problemas pode ser usado então o método da resistência direta. Segundo Grigoletti, et al. (2006) este método consiste, basicamente, em utilizar curvas de resistência ajustadas experimentalmente para calcular as cargas de colapso a partir da carga de flambagem elástica do perfil utilizado, e não de seus elementos isoladamente.

Vantagens do Método da Resistência direta (MRD) foram listadas por Grigoletti apud Schafer (2006), sendo algumas delas:

- A não necessidade da determinação das propriedades geométricas efetivas;
- Os cálculos não precisam ser feitos individualmente para todos os elementos dos perfis (Alma, Mesas, e ou Enrijecedores);
- Não há cálculos iterativos;
- Nos cálculos das resistências são utilizados as propriedades geométricas da seção bruta;
- É aplicável a um grupo maior de geometria de seções transversais;

Juntamente com o MRD, foi desenvolvido também um software, denominado CU-FSM (Cornell University Finite Strip Method), para a análise da flambagem elástica dos perfis formados a frio, ou seja, determinar os modos de flambagem. Este programa permite a análise da estabilidade elástica de perfis submetidos a qualquer distribuição de tensões normais nas extremidades, assim como a restrições dos graus de liberdade nos extremos e também ao empenamento da seção. A Figura 2.2 e 2.3, exemplificam os resultados fornecidos pelo CU-FSM para duas cargas distintas, bem como os modos de flambagem.

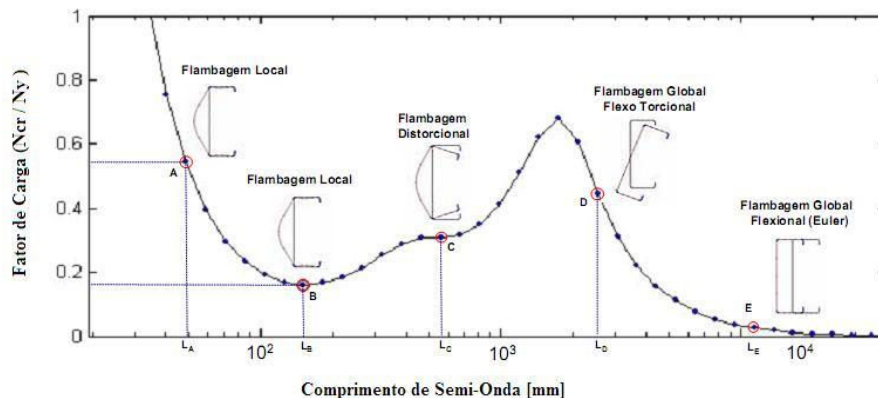


Figura 2.2 - Gráfico Fator de Carga x Comprimento de Semi-onda para uma barra com compressão centrada.

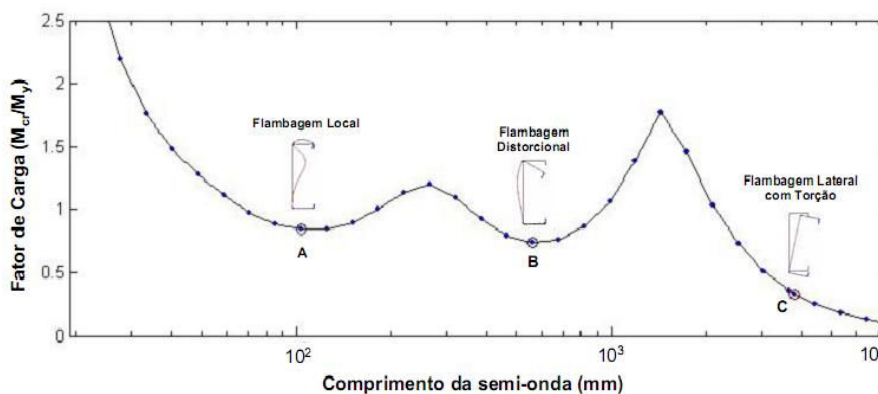


Figura 2.3 - Gráfico Fator de Carga x Comprimento de Semi-onda para uma barra sob flexão simples.

É importante ressaltar que o CU-FSM é um programa computacional baseado no método das faixas finitas (MFF), e que, por se basear neste método, está também restrito as limitações dele. Algumas destas limitações são:

- Este método utiliza somente condições de contorno com apoios simples;
- Barras que possuam variação de cargas axiais e de momento ao longo do comprimento da barra não podem ser consideradas;
- Não pode haver variação da seção transversal ao longo do comprimento da barra;
- A seção transversal da barra deve ser contínua, ou seja, não pode haver furos ao longo da barra.

3. LIGHT STEEL FRAMING (LSF)

Light Steel Framing, “Estrutura Leve de Aço” traduzido do inglês, é também conhecido como Sistema Auto-portante de construção a seco. Este sistema é uma evolução do sistema construtivo americano “Wood Framing”, aonde ao invés da utilização da madeira para a concepção dos perfis, usa-se perfis de aço galvanizado.

Ele é caracterizado por possuir um esqueleto estrutural feito com aço, formado por diversos elementos individuais (perfis de aço galvanizado formados a frio) ligados entre si, que em conjunto resistem às cargas de solicitação. Não se resumindo a apenas a estrutura de aço, o sistema LSF é composto por vários outros subsistemas, que além de estrutural, é também de fundação, de contraventamento, de isolamento térmico e acústico, de fechamento interno e externo e de instalações elétricas e hidráulicas. Na Figura 3.1 é possível visualizar esquematicamente, a estrutura de aço e outros subsistemas de uma edificação em LSF.

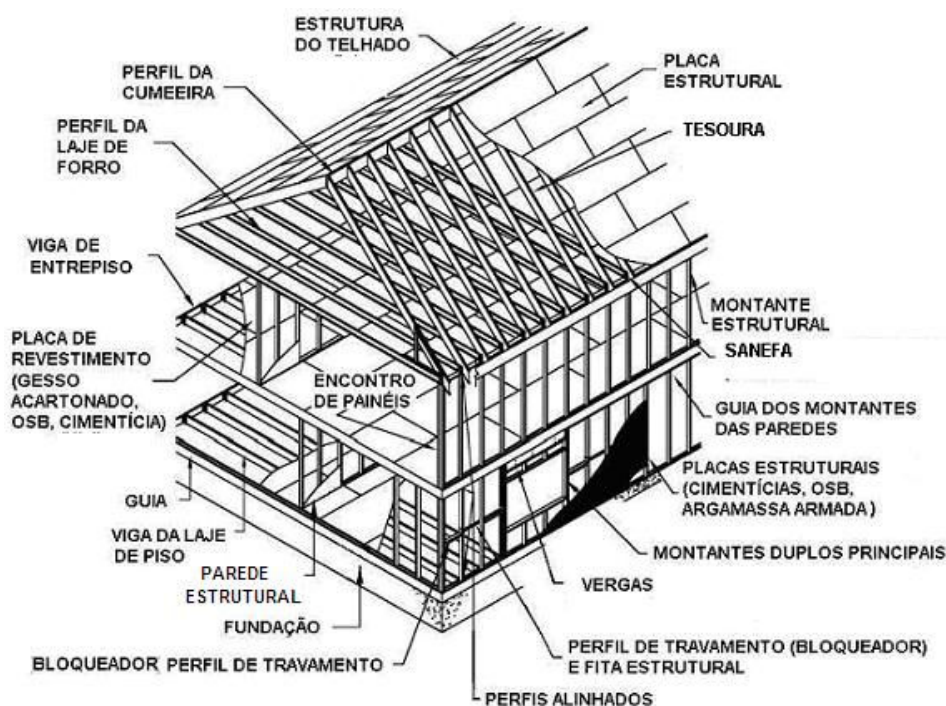


Figura 3.1 - Esquema estrutural típico de uma residência em LSF.

Para que o sistema cumpra com as funções para o qual foi projetado e construído é necessário que o projeto siga algumas diretrizes construtivas, para que seja possível o inter-relacionamento entre sistemas (LSF e Subsistemas). Além de garantir a alta velocidade de execução e também o correto desempenho do sistema.

O sistema construtivo LSF, comparado ao sistema convencional de construção no Brasil, apresenta diversas vantagens e benefícios. Algumas delas são:

- Produtos que constituem o sistema são produtos padronizados, produzidos industrialmente, onde passa por rigorosos controles de qualidade;
- A estrutura é toda constituída de aço galvanizado, o que garante o desempenho estrutural, a durabilidade e longevidade da estrutura;
- É um processo construtivo a seco, o que minimiza o uso de recursos naturais e o desperdício;
- Rapidez de construção, pois trabalha com peças previamente montadas e de baixo peso;
- Usa-se materiais recicláveis e incombustíveis em sua concepção, como o aço da estrutura por exemplo.

Comparado com o sistema convencional, a alvenaria, o sistema LSF possui uma grande quantidade de detalhes construtivos, que pode gerar algumas desvantagens, como a necessidade de profissionais altamente qualificados.

3.1. O Projeto

A concepção do projeto da estrutura baseou-se em um projeto arquitetônico de uma residência uni familiar de dois pavimentos, onde no pavimento superior estão localizados três suítes (banheiros e quartos) e no pavimento inferior os demais cômodos, conforme mostra a Figura 3.2.

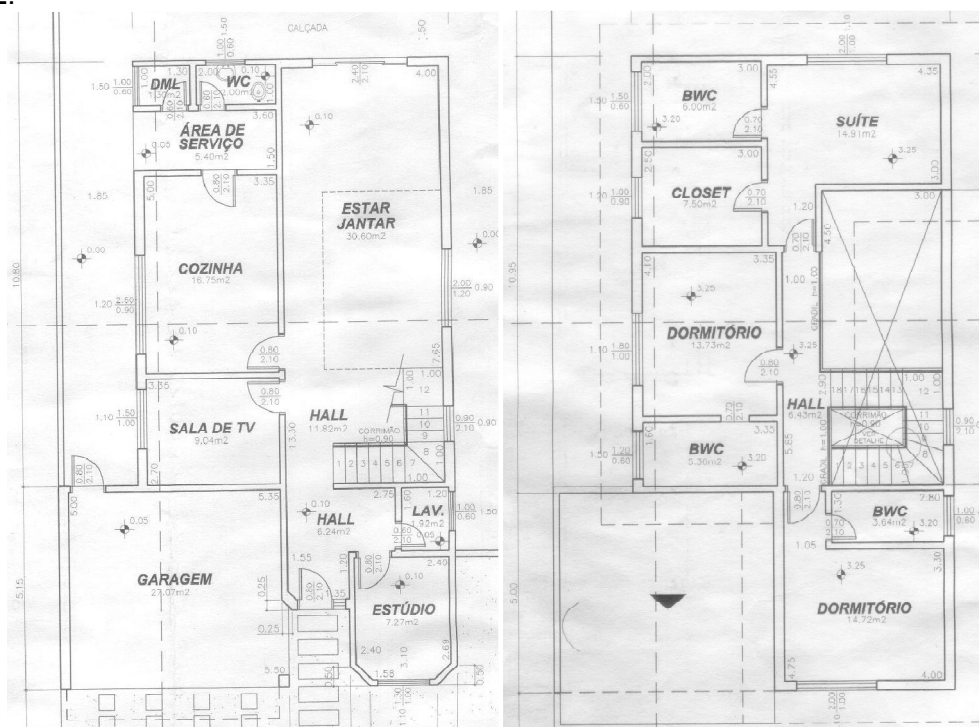


Figura 3.2 - Planta Arquitetônica do Primeiro e segundo Pavimento.

O Projeto baseou-se na diretriz construtiva “In-line Framing” com espaçamento de 400 mm entre os componentes. Segundo esta diretriz, a estrutura é montada de modo que seus componentes estejam alinhados (alma alinhada com alma) e espaçados igualmente, de modo que seja transmitido somente cargas axiais de um componente a outro. A Figura 3.3, exemplifica isto.

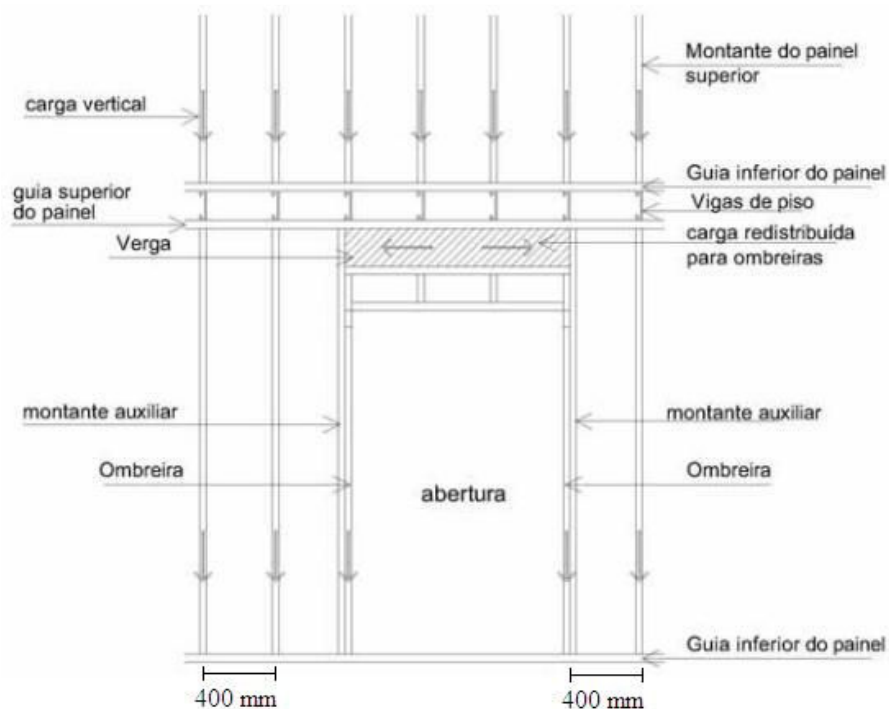


Figura 3.3 – Diretriz In-line Framing com espaçamento de 400 mm.

Através de procedimentos e detalhes construtivos, descritos pelo manual Steel Framing: Engenharia [Freitas, 2006], fez-se o modelo da estrutural da residência, onde foi adotado a metodologia de montagem por painéis. A estrutura foi modelada de modo que fosse utilizado somente aço em sua concepção, onde adota-se a utilização de contraventamento com fitas de aço cruzadas (contraventamento em X) ao invés de painéis estruturais de madeira (Placa OSB), conforme a Figura 3.4.

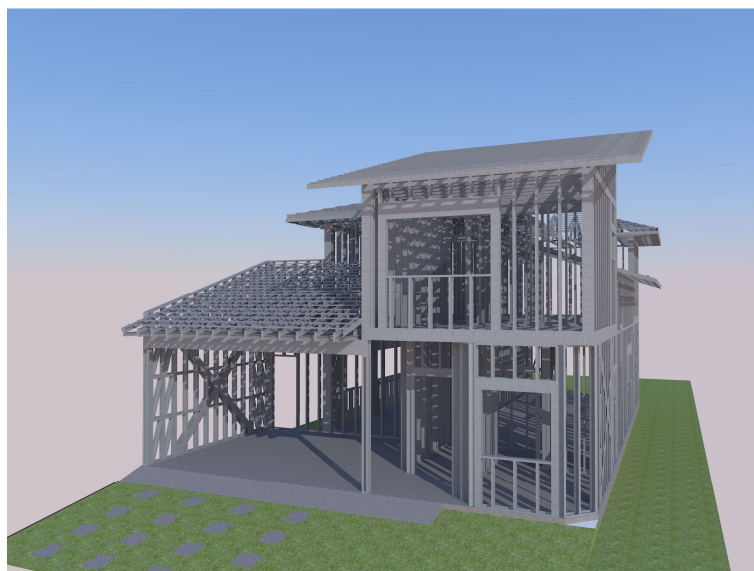


Figura 3.4 - Modelo da estrutura analisada.

A Figura 3.5 mostra quais os tipos de perfis formados a frio foram usados no projeto da estrutura, assim como a função que desempenhará. A designação dos perfis usados é dada da seguinte maneira, U_e (Tipo de perfil) \times b_w (Alma) \times b_f (Mesas ou abas) \times D (Enrijecedores) \times t (Espessura), todas dadas em milímetros.

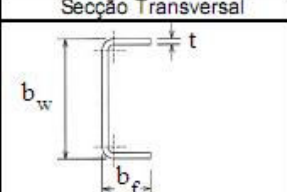
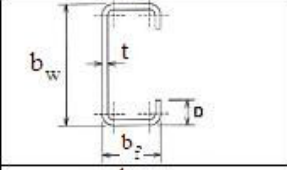
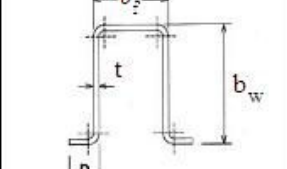
Seção Transversal	Designação NBR 6355:2003	Utilização
	U simples (U)	Guia Ripa Bloqueador Sanefa
	U enrijecido (Ue)	Bloqueador Enrijecedor de alma Montante Verga Viga
	Cartola (Cr)	Ripa

Figura 3.5 - Tipos de Perfis formados a frio utilizados.

Para a composição do painéis estruturais, fez-se o uso de parafusos estruturais para a união de seus componentes, onde para a seleção dos perfis dos painéis de cada pavimento (Paredes, segundo piso e aberturas), utilizou-se tabelas de elementos pré-dimensionados descritas no manual Steel Framing: Engenharia [Rodrigues, 2006].

Abaixo, são descritos os perfis, selecionados da tabela de pré-dimensionamento, para a composição dos painéis.

- Ue 200x40x12x1,25 mm - Vigas de piso;
- Ue 140x40x12x0,95 mm - Montantes externos (Pilares externos);
- Ue 90x40x12x0,95 mm - Montantes internos (Pilares Internos), vigas de forro, caibros, e tesouras de telhado;
- U 202x38x1,25 mm - Sanefa e Bloqueadores de painéis de piso;
- U 142x38x0,95 mm – Guia de montantes externos, bloqueadores e contraventamento (K) de painéis externos;
- U 92x38x0,95 mm – Guia de montantes internos, bloqueadores e contraventamento (K) de painéis internos;
- Cr 20x30x12x0,95 mm - Para terças (ripas) de telhado.
- 2Ue 300x40x12x1,25 mm - Vergas maiores que 2 metros;
- 2Ue 200x40x12x1,25 mm - Vergas maiores que 1 metro;
- 2Ue 90x40x12x1,25 mm - Vergas até 1 metros;

Além dos perfis descritos acima, fez-se o uso de chapas de aço galvanizadas de 0,95 mm de espessura por 100 mm de largura e também de fitas de aço de 0,95 mm de espessura por 50 mm de largura, onde estão empregadas no contraventamento em “X” em ambos os lados dos painéis da estrutura, e no travamento dos perfis, respectivamente.

Para o travamento dos perfis dos painéis fez-se o uso de bloqueadores nas extremidades e de fitas de aço, espaçados a cada 1000 mm. Este é um detalhe construtivo importante, pois os trava contra possíveis torções, empenamento e flambagem global dos elementos, diminuindo-se então os comprimentos efetivos de flambagem dos perfis.

Excluindo a fundação usada, que neste caso é uma laje tipo Radier, o projeto foi montando de maneira que possibilitasse uma perfeita construção a seco, ou seja, não necessitando de água em sua concepção. Um exemplo de processo construtivo adotado foi o projeto de piso seco do segundo pavimento, conforme demonstrado na Figura 3.2.

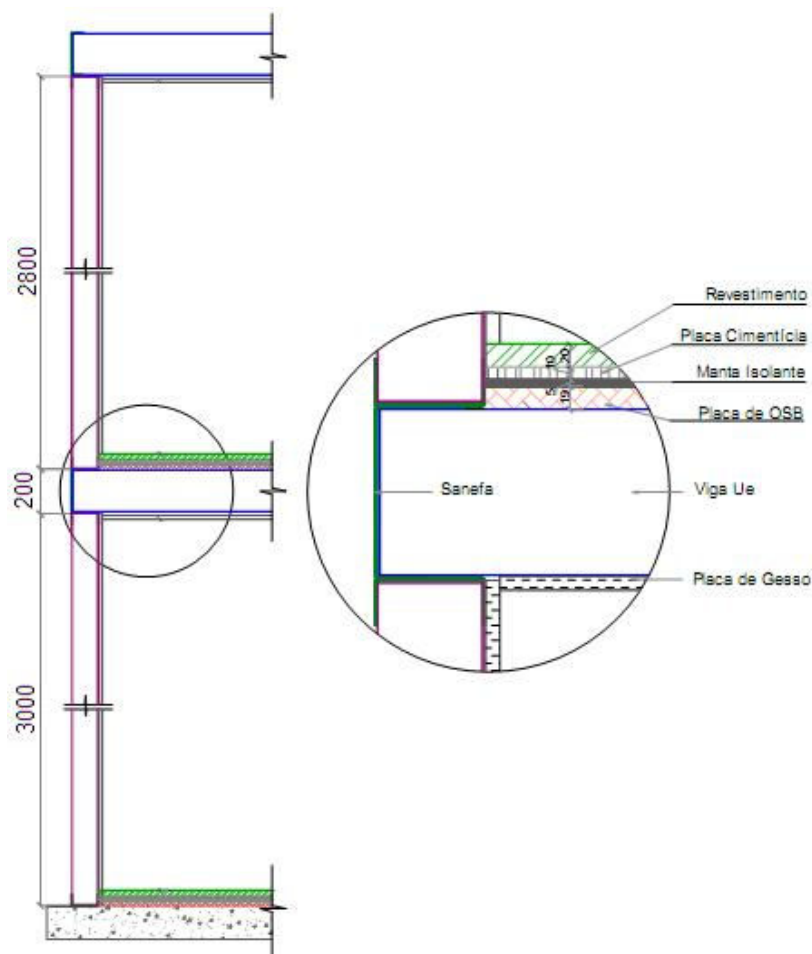


Figura 3.6- Laje Seca utilizada no segundo pavimento.

3.1.1. Materiais

Neste projeto foram selecionados componentes fabricados a partir do aço ZAR 250, com galvanização tipo B (275 g/m^2) e excelentes propriedades mecânicas, conforme descrito no Anexo 1.

4. ANÁLISE ESTRUTURAL

De acordo com a NBR 14762, 2010, o objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações na estrutura, visando efetuar verificações de estados-limites últimos e de serviço.

Neste trabalho, fez-se o uso da análise estrutural para encontrar os perfis mais solicitados da estrutura, para que posteriormente sejam verificados segundo os procedimentos da norma vigente (NBR 14762:2010).

Para a análise e obtenção dos esforços da estrutura metálica resultante de toda a residência, fez-se o uso de um software de análise de estrutura de barras, o *Metálicas 3D*, software desenvolvido pela Cype Ingenieros. Procedeu-se à discretização da estrutura metálica em barras a partir do projeto, totalizando por volta de 2500 elementos e 4400 nós, em seqüência à descrição das cargas e das condições de vinculação da residência, assim como as combinações de carregamentos desejadas, descrição dos perfis e dos materiais utilizados. Tudo é feito de maneira a tornar o mais próximo do projeto real, conforme a Figura 4.1.

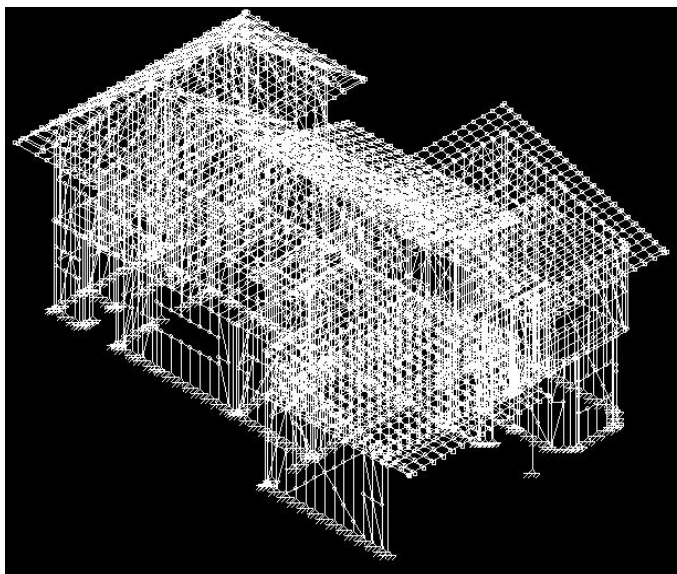


Figura 4.1 - Estrutura de Barra utilizada na análise.

Por se tratar de uma estrutura baixa, com aproximadamente 8 metros de altura, optou-se pelo uso método de análise global elástica de primeira ordem para o cálculo das solicitações e deslocamentos da estrutura.

No modelo em análise, foram feitas algumas simplificações, devido a não possibilidade de representação de todos os componentes existentes na estrutura, conforme instruções contidas no manual Steel Framing: Engenharia [Rodrigues, 2006].

Segundo o manual Steel Framing: Engenharia [Rodrigues, 2006], a estrutura deve ser modelada, de maneira que haja somente transferência de cargas axiais entre os perfis. Para isso, esta referência recomenda que a vinculação entre os componentes seja do tipo rotulado, ou seja, liberando as rotações em torno dos eixos principais, conforme demonstrado na Figura 4.2, e restringindo-se também a rotação dos perfis em torno do eixo de menor inércia, de maneira a impedir a instabilidade estrutural e numérica.

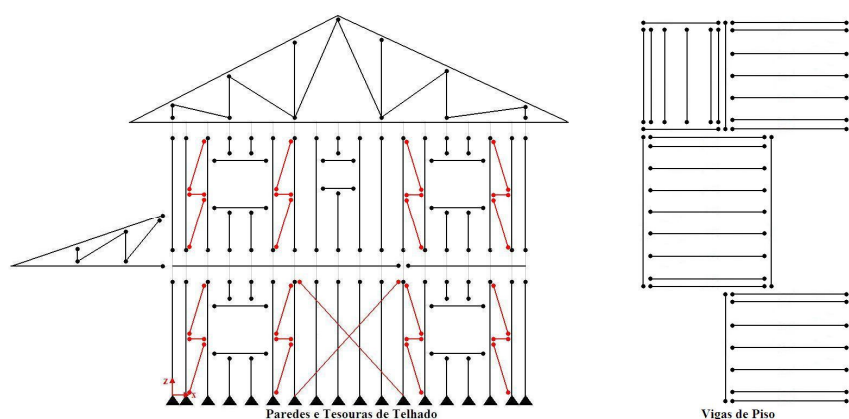


Figura 4.2 - Esquema demonstrativo das rotulações do modelo.

4.1. Carregamentos

Os carregamentos utilizados para o cálculo da análise estrutural foram retirados de normas específicas de carregamentos para edificações. Como os carregamentos são calculados, ou fornecidos, pelas normas, estes são em sua maioria dados por unidades de área, no caso N/m^2 , fez-se necessário a transformação destes carregamentos para unidades lineares (N/m) através do espaçamento adotado pela diretriz de projeto (400 mm).

4.1.1. Cargas Permanentes

Este tipo de carga é constituído pelo peso próprio da estrutura e pelo peso de todos os elementos fixos e instalações permanentes.

Através da Tabela 4.1, descrita abaixo, podemos chegar as cargas permanentes aplicadas em cada um dos tipos de perfis.

Tabela 4.2 – Materiais Utilizados no Projeto.

Material	Espessura [mm]	Cargas [kN/m ²]
<i>Placa de Gesso Acartonado</i>	12,50	0,120
<i>Placa Cimentícia</i>	10,00	0,130
<i>Placa OSB</i>	15,00	0,100
<i>Lã de Vidro (Isolante)</i>	100,00	0,040
<i>Revestimento Cerâmico</i>	10,00	0,150
<i>Telhas Cerâmica</i>	50,00	0,450
<i>ZAR250 - Ue 200x40x12</i>	1,25	0,030
<i>ZAR250 - Ue 90x40x12</i>	0,95	0,014
<i>ZAR250 - Ue 140x40x12</i>	0,95	0,018
<i>ZAR250 - Cr 20x30x12</i>	0,95	0,007

Conforme foram descritos os materiais no projeto e dados os valores das cargas destes elementos, chegamos então nas seguintes cargas permanentes:

- Piso - 0,220 kN/m (Piso/Laje Seca);
- Forro - 0,080 kN/m (Placa de Gesso Acartonado e Isolantes);
- Telhado - 0,200 kN/m (Telhado Cerâmico e Isolantes);
- Paredes – 0,200 kN/m (Fechamento com Textura).

4.1.2. Sobrecargas

É toda aquela que pode atuar eventualmente sobre a estrutura em função do seu uso, como por exemplo, pessoas e móveis.

A norma brasileira NBR 6120:1980 descreve quais as cargas a serem utilizados no dimensionamento da edificação. Neste trabalho foram adotados desta norma os seguintes carregamentos:

- Piso – 1,5 kN/m² (quartos e banheiros);
- Forro – 0,5 kN/m² (sem acesso a pessoas).

Para o telhado, foi adotado como sobrecarga, o carregamento de 0,75 kN/m², representando uma pessoa de 75 kg por metro quadrado de telhado, carga possivelmente utilizada na montagem do telhado.

4.1.3. Carga de vento

Para o dimensionamento das cargas de vento, fez-se uso dos procedimentos da norma NBR 6123, 1988, onde foram calculados carregamentos para duas direções principais de vento, sendo elas as mais críticas, o carregamento devido ao vento frontal e também ao vento lateral.

Os carregamentos foram dimensionados para uma velocidade básica de vento de 45 m/s ($V_0=45$ m/s), onde a estrutura residencial está situada dentro de um condomínio residencial, distante do centro urbano (subúrbio), e sobre um terreno levemente ondulado.

4.2. Esforços e Deslocamentos Obtidos

Os esforços e deslocamentos dos componentes utilizados na composição da estrutura residencial foram obtidos segundo procedimentos descritos pela norma NBR 14762:2010.

Segundo a norma NBR 14762:2010, os esforços devem ser obtidos a partir de combinações dos carregamentos para os Estados Limites Últimos (ELU). Onde estes estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil, durante a construção ou em situações especiais ou excepcionais.

Ainda segunda a norma NBR 14762:2010, os deslocamentos devem ser obtidos segundo o critério dos Estados Limites de Serviço (ELS), os quais estão relacionados com o desempenho da estrutura sob condições normais de utilização.

Os esforços da estrutura foram obtidos a partir do carregamento normal referentes aos Estados Limites Últimos. Onde foi obtida a carga máxima compressiva dos montantes internos conforme a equação 4.1, e para os demais componentes utilizou-se a equação 4.2.

$$F_d = PP + 1,5 SB_1 + 1,5 SB_2 \quad (4.1)$$

$$F_d = PP + 1,5 SB_1 + 1,4 V_{90} \quad (4.2)$$

Onde: F_d é a força máxima resultante do ELU;
 PP é o somatório de todas as cargas permanentes;
 SB_1 é o somatório das sobrecargas de piso e forro;
 SB_2 é a sobrecarga de telhado;
 V_{90} é a carga de vento, neste caso o vento lateral.

Já os deslocamentos máximos, foram obtidos a partir dos carregamentos referentes ao Estado Limite raras de serviço, conforme a equação 4.3, ou foram obtidos segundo critérios descritos pelo anexo A da norma NBR 14762:2010.

$$F_{serv} = PP + 0,4 SB_1 + V_{90} \quad (4.3)$$

A Tabela 4.2 descreve os dados, obtidos a partir da análise estrutural, necessários para a verificação de cada componente usado na residência.

5. VERIFICAÇÃO

Este trabalho ficou restrito apenas à verificação das cargas críticas de flambagem dos perfis mais solicitados de cada painel estrutural, faltando então o dimensionamento das ligações destes elementos.

A verificação das cargas críticas de flambagem dos perfis, foi baseada nos procedimentos descritos pela norma brasileira vigente para a verificação deste tipo de elementos, a NBR 14762:2010. Onde foram adotados os procedimentos do Método da Resistência Direta, por se tratar do mais novo procedimento adotado pela norma e também pela suas vantagens em relação aos outros métodos descritos.

De maneira a aumentar a segurança no projeto, não foi considerado o aumento da resistência dos perfis, causado pelo trabalho de formação a frio (Encruamento) dos mesmos. Este procedimento é descrito pela norma, e descreve também que imperfeições associadas aos componentes já estão incorporadas às expressões de dimensionamento, garantindo eficiência e segurança ao MRD.

Tabela 4.2 - Deslocamentos e Esforços obtidos na análise estrutural.

Viga de Piso (Ue 200x40x12x1,25 mm)				
Normal (Compressão)	$N_{C,SD}$		4,130	kN
Momento	M_{SD}		3,081	kNm
Flecha máxima de serviço (YZ)	$v_{yz,serv}$		4,864	mm
Montante (Pilar) externo (Ue 140x40x12x0,95 mm)				
Normal (Compressão)	$N_{C,SD}$		5,840	kN
Momento	M_{SD}		0,696	kNm
Flecha máxima de serviço (XY)	$v_{xy,serv}$		5,880	mm
Montante (Pilar) Interno (Ue 90x40x12x0,95 mm)				
Normal (Compressão)	$N_{C,SD}$		11,410	kN
Viga de Telhado (Caibro) (Ue 90x40x12x0,95 mm)				
Momento	M_{SD}		1,098	kNm
Flecha máxima de serviço (YZ)	$v_{yz,serv}$		5,044	mm
Viga de Forro (Ue 90x40x12x0,95 mm)				
Normal (Compressão)	$N_{C,SD}$		1,678	kN
Momento	M_{SD}		0,816	kNm
Flecha máxima de serviço (YZ)	$v_{yz,serv}$		11,675	Mm
Terça de Telhado (Ripa) (Cr 20x30x12x0,95 mm)				
Força Cortante	$V_{z,SD}$		0,296	kN
Momento	M_{SD}		0,047	kNm
Flecha máxima de serviço (YZ)	$v_{yz,serv}$		29,631	mm

5.1. Carga Máxima Resistente (Carga Crítica)

Os procedimentos para o cálculo das cargas máximas resistentes (cargas críticas) dos perfis mais solicitados de cada painel, são descritas no Anexo 1 deste trabalho. Seguindo estes procedimentos, foi possível obter as seguintes cargas críticas:

Tabela 5.1 – Cargas Máximas Resistentes.

Perfis	Compressão Centrada [kN]				Flexão Simples [kNm]			
	$N_{C,Re}$	$N_{C,L}$	$N_{C,Rdist}$	$N_{C,Rd}$	M_{Re}	M_{Rl}	M_{Rdist}	M_{Rd}
Ue 200x40x12x1,25	68,5	33,3	35,8	27,7	4,992	3,988	4,065	3,625
Ue 140x40x12x0,95	43,7	21,8	29,5	18,2	2,302	1,899	1,953	1,726
Ue 90x40x12x0,95	32,1	22,1	32,0	18,4	1,299	1,274	1,183	1,076
Cr 20x30x12x0,95	5,1	5,1	19,4	4,2	0,155	0,155	0,155	0,140

5.2. Resultados

Por questão de simplificação, foram verificados apenas os perfis mais solicitados de cada tipo de painel usado na estrutura. Desta maneira, analogamente, estará se verificando todos os outros perfis indiretamente, devido à similaridade entre componentes.

5.2.1. Viga de Piso (Ue 200x40x12x1,25 mm)

A viga de piso escolhida para análise está situada no piso da suíte dos fundos, e é também a região que apresenta o maior vão livre da estrutura ($L = 4115 \text{ mm}$), fato que explica por que é a mais solicitada.

Devido a ações de cargas combinadas, como por exemplo, cargas de vento e sobrecargas, agindo simultaneamente. Esta viga foi verificada segundo critérios de flexão composta, como segue abaixo.

- Força axial compressiva e Flexão combinados

$$(4,130/27,750) + (3,081/3,625) = 0,99 \leq 1,0 \quad (\text{Aprovado})$$

Onde as forças axiais compressivas são devidas as ações das cargas de vento.

Para a aprovação, o perfil deve atender também, além dos critérios de resistência, os critérios de deslocamentos. Onde o deslocamento máximo, deve ser obtido a partir das solicitações decorrentes do E.L.S. (v_{serv}), e devem ser menores que os deslocamentos obtidos a partir da seguinte equação:

$$v_{serv} \leq \frac{L}{350} \quad (5.1)$$

$$v_{max} = 4,864 \text{ mm} \leq \frac{L}{350} = \frac{4115}{350} = 11,757 \text{ mm} \quad (\text{Aprovado})$$

onde: v_{serv} é o deslocamento máximo permitido para o componente;
 L é o vão livre do componente.

Neste caso, como o momento de inércia efetivo (I_{ef}) é igual ao momento da seção bruta (I_g), podemos então considerar o deslocamento obtido na análise estrutural.

5.2.2. Montantes (Pilares) externos (Ue 140x40x12x0,95 mm)

Segundo o manual Steel Framing: Engenharia [Rodrigues, 2006], os montantes (Pilares) externos da estrutura, por se tratarem de vigas-colunas, devem ser verificado segundo o critério de flexo-compressão (Compressão e flexão combinado).

- Força axial compressiva e momento fletor combinados (flexo-compressão)

$$(5,840/18,230) + (0,696/1,726) = 0,73 \leq 1,0 \quad (\text{Aprovado})$$

O deslocamento horizontal verificado a seguir, é o máximo deslocamento horizontal que ocorre em toda a estrutura. Este deslocamento ocorre na extremidade de um montante do primeiro pavimento ($H = 3000 \text{ mm}$), por este motivo, não foi descrito a análise dos montantes internos quanto ao critério de deslocamento horizontal.

$$v_{serv} \leq \frac{L}{400} \quad (5.2)$$

$$v_{max} = 5,880 \text{ mm} \leq \frac{L}{400} = \frac{3000}{400} = 7,5 \text{ mm} \quad (\text{Aprovado})$$

5.2.3. Montantes (Pilares) internos (Ue 90x40x12x0,95 mm)

Segundo o manual Steel Framing: Engenharia [Rodrigues, 2006], os montantes (Pilares) internos da estrutura deve ser verificado segundo o critério de compressão ou tração agindo isoladamente. Neste trabalho, fez-se a verificação destes perfis segundo o critério de compressão, pois, neste caso, é o mais crítico.

- Força axial compressiva

$$N_{C,RD} \geq N_{C,SD} \quad (5.3)$$

$$N_{C,RD} = 27,750 \text{ kN} > N_{C,SD} = 4,130 \text{ kN} \quad (\text{Aprovado})$$

onde: $N_{C,RD}$ é a carga de resistência máxima a compressão do componente;

$N_{C,SD}$ é a carga compressiva máxima, obtida na análise estrutural.

5.2.4. Viga de Telhado (Caibro) (Ue 90x40x12x0,95 mm)

A viga (caibro) de telhado a ser analisado, encontra-se situado no telhado lateral da residência. Por possuir o maior vão livre ($L=3350$ mm), este telhado esta sujeito as maiores solicitações por esforços de flexão. Por este motivo, fez-se a verificação deste componente segundo o critério de flexão simples, conforme segue abaixo.

- Flexão simples

$$M_{RD} \geq M_{SD} \quad (5.4)$$

$$M_{RD} = 0,977 \text{ kNm} > M_{SD} = 1,098 \text{ kNm} \quad (\text{Aprovado})$$

Onde: M_{RD} é o momento de resistência máximo do componente;

M_{SD} é o momento de solicitação máximo obtida na análise estrutural.

Verificou-se também a flecha máxima possível para o componente, conforme descreve a equação 5.5 abaixo.

$$v_{serv} \leq \frac{L}{250} \quad (5.5)$$

$$v_{max} = 10,191 \text{ mm} \leq \frac{L}{250} = \frac{3350}{250} = 13,2 \text{ mm} \quad (\text{Aprovado})$$

Sobre a verificação deste tipo de componente, é importante citar que a carga máxima de momento, geralmente encontra-se próximos aos apoios, e que, segundo instruções construtivas, contidas no manual Steel Framing: Engenharia [Freitas, 2006], esta região deve ser reforçada.

5.2.5. Viga de Forro (Ue 90x40x12x0,95 mm)

A viga de forro a ser analisada, pertence a um painel estrutura de forro, e não de uma tesoura de telhado. Por este motivo, este componente apresenta o maior vão livre ($L=4115$ mm) assim como as maiores solicitações de flexão e também a maior flecha de deslocamento.

Por se tratar de um forro estrutural, que visa o enrijecimento da estrutura residencial, assim como o piso do segundo pavimento, este componente também estará sujeito a ação de

cargas compostas. Por este motivo, fez-se a verificação deste componente segundo o critério de flexo-compressão, conforme segue abaixo.

- Força axial compressiva e Flexão combinados

$$(1,678/18,48) + (0,816/1,076) = 0,85 \leq 1,0 \quad (\text{Aprovado})$$

Abaixo segue a equação retirada da norma NBR 14762, 2010 para a verificação deste componente segundo o critério de deslocamento máximo.

$$v_{serv} \leq \frac{L}{120} \quad (5.6)$$

$$v_{max} = 11,675 \text{ mm} \leq \frac{L}{120} = \frac{4000}{120} = 34,291 \text{ mm} \quad (\text{Aprovado})$$

Também neste caso, como o momento de inércia efetivo (I_{ef}) é igual ao momento da seção bruta (I_g), podemos então considerar o deslocamento obtido na análise estrutural.

5.2.6. Terças de telhado (Ripas) (Cr 20x30x12x0,95 mm)

A terça (ripa) de telhado mais solicitado, encontra-se no telhado principal, onde também possui o maior vão entre os apoios ($L=800$ mm) sobre os caibros.

Este tipo de elemento, por possuir diversos apoios intermediários, deve ser verificado segundo o critério de flexão composta, onde atuam principalmente as cargas de flexão e força cortantes combinados.

- Força cortante + Flexão combinados

$$(0,047/0,141)^2 + (0,296/4,909)^2 = 0,12 < 1,0 \quad (\text{Aprovado})$$

Fez-se a verificação das flechas de deslocamentos das terças de duas maneiras. A primeira foi à verificação da flecha máxima obtida entre os apoios intermediários (caibros), conforme descrito abaixo:

$$v_{serv} \leq \frac{L}{180} \quad (5.7)$$

$$v_{max} = 0,278 \text{ mm} \leq \frac{L}{180} = \frac{800}{180} = 4,444 \text{ mm} \quad (\text{Aprovado})$$

Na segunda maneira, verificou-se o deslocamento máximo obtido entre os apoios das extremidades, ou seja, verificou-se o deslocamento máximo sofrido pela verga. Conforme descrito abaixo, verificou-se este critério para o telhado com a maior flecha de deslocamento, o telhado lateral.

$$v_{max} = 29,631 \text{ mm} \leq \frac{L}{180} = \frac{7200}{180} = 40,00 \text{ mm} \quad (\text{Aprovado})$$

6. CONCLUSÕES

As verificações realizadas neste trabalho mostraram que a estrutura da residência é aprovada pela norma NBR 14762:2010, segundo os critérios de flambagem elástica. Faltando então a verificação das ligações dos perfis, que também é descrito por esta norma.

É possível notar também que muitos dos perfis, utilizados na composição da estrutura, encontram-se superdimensionados, sendo possível então uma otimização do projeto através do redimensionamento de seus componentes.

Ainda sobre otimização do projeto, Souza, 2005, comenta que o simples uso de perfis com enrijecedores na alma e nas mesas, em vez de perfis com almas e mesas “lisas”, aumenta a sua capacidade de resistência a flambagem.

É importante salientar também que, apesar da estrutura de aço ser dimensionado para suportar todas as cargas de edificação, o fechamento da estrutura por placas (cimentícias, OSB e gesso acartonado), ocasiona o efeito de diafragma rígido na estrutura, aumentando assim ainda mais a segurança na estrutura.

Quanto ao método da resistência direta, mostrou-se ser um método prático, rápido e de fácil aplicação. Porém, vale lembrar que este possui restrições e que estas devem ser respeitadas.

Alguns componentes (perfis) do sistema LSF, para que seja possível a passagem das tubulações de serviço, possuem furos em sua alma. Por este motivo, estes componentes não se enquadram dentro das limitações do Método da Resistência Direta, e, portanto devem ser analisado seguindo outro critério.

Para contornar este problema, a norma NBR 15253:2005, descreve alguns procedimentos práticos, que são aceitos no projeto estrutural, que devem ser realizados para a aprovação do perfil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas., “**NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**”, Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas., “**NBR 15253:2005 - Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis reticulados em edificações – Requisitos gerais**”, Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas., “**NBR 6355:2003 – Perfis de aço formados a frio - Padronização**”, Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas., “**NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações**”, Rio de Janeiro, 1988.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas., “**NBR 6120:1980 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**”, Rio de Janeiro, 1980.
- Corrêa, M. R., S., “**Aplicação do Método das Faixas Finitas na Análise de Estruturas Prismáticas**”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Estruturas – USP, São Carlos, 1983.
- Freitas, A. S., Castro, R. M., “**Steel Framing: Arquitetura**”, CBCA (Centro Brasileiro de Construção em Aço), Rio de Janeiro, 2006.
- Grigoletti, G., Iturrioz, I., Carvalho, P. R., Tamagna, A., “**Curso Básico de perfis de Aço formados a Frio**”, 2ª Edição, 2006.
- Inoue, H., Batista, E., Ribeiro, F., “**Análise da Estabilidade de Perfis de Paredes Finas**”, UFSJ, Rio de Janeiro, 2010.
- Rodrigues, F.C., “**Steel Framing: Engenharia**”, CBCA (Centro Brasileiro de Construção em Aço), Rio de Janeiro, 2006.
- Silva, E. L., Pignatta e Silva, V., “**Dimensionamento de Perfis Formados a Frio Conforme NBR 14762 e NBR 6355**”, CBCA (Centro Brasileiro de Construção em Aço), Rio de Janeiro, 2008.
- Souza, D. A., “**Análise Numérica de Colunas com Seções Enrijecidas e Não-Enrijecidas em Perfis Formados a Frio**”, Dissertação de Mestrado, PPGEC – UFOP, Ouro Preto, 2005.

Apêndice A – Propriedades geométricas e dos materiais dos perfis de projeto.

Neste anexo estão descritos as propriedades geométricas, e também as propriedades dos materiais, dos perfis utilizados no projeto. Conforme a NBR 14762:2010, foram adotados as seguintes propriedades dos materiais:

Aço dos Perfis: ZAR 250, com resistência de 250 MPa ao escoamento, e 360 MPa a ruptura.

($f_y = 250$ MPa; $f_u = 360$ MPa)

$E = 200.000$ MPa (Modulo de elasticidade longitudinal)

$G = 77.000$ MPa (Modulo de elasticidade transversal)

As propriedades geométricas dos perfis, descritas na Tabela A.1, foram calculados com base nas expressões apresentadas no anexo A da norma brasileira NBR 6355:2003. A Figura A.1 demonstra quais as referencias foram adotadas para o cálculo das propriedades geométricas da seção bruta de cada perfil utilizado.

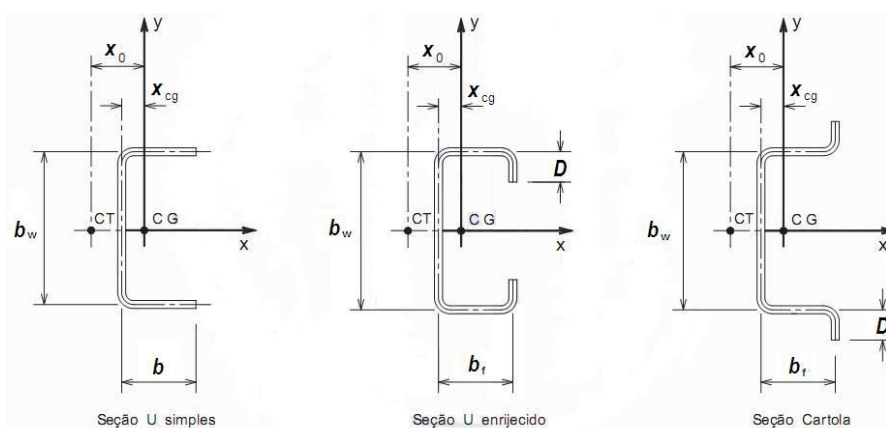


Figura A.1 – Referenciamento das dimensões dos perfis.

Tabela A.1 - Propriedades geométrica da seção bruta dos perfis utilizados.

	Propriedades Geométricas [NBR 6355:2003]		
	$U_e B_w \times B_f \times D \times t$		
	200	140	90
$A [mm^2]$	369,7	225,9	178,4
$X_{cg} [mm]$	7,9	9,9	12,7
$Y_{cg} [mm]$	99,4	69,5	44,5
$X_0 [mm]$	22,2	26,7	31,7
$Y_0 [mm]$	0	0	0
$I_x [mm^4]$	1.984.426	649.445	231.487,6
$I_y [mm^4]$	65.394,6	46.742,4	40.725,4
$I_t [mm^4]$	192,4	67,9	53,6
$C_w [mm^6]$	505.846.990	180.439.750	70.620.740
$R_0 [mm]$	77,7	61,6	50,3
$R_v [mm]$	13,3	14,4	15,1
$R_m [mm]$	1,9	1,4	1,4
$W_x [mm^3]$	19.969,1	9.341,2	5.199,0
$W_y [mm^3]$	2.116,1	1.608,4	1.543,3
$B_w [mm]$	200	140	90
$B_f [mm]$	40	40	40
$D [mm]$	12	12	12
$t [mm]$	1,25	0,95	0,95

Apêndice B – Cargas de flambagem elástica obtidas pelo software CU-FSM.

A Tabela B.1 apresenta os resultados fornecidos pelo software CU-FSM para todos os perfis utilizados no projeto. Onde as unidades dos Momentos fletores, das cargas axiais de compressão e dos comprimentos de semi-onda, são dadas por kNm , kN e mm respectivamente.

É importante ressaltar que o programa fornece apenas como resultado os fatores de cargas e também os comprimentos de semi-onda, descritos em vermelho. Os outros dados descritos na tabela foram obtidos a partir destes resultados e também das propriedades geométricas dos perfis, descrito no Apêndice A.

Tabela B.1 - Cargas de flambagem elástica.

Flexão Simples							
		Local			Distorcional		
	M_y	M_l / M_y	M_l	C.So	M_{dist} / M_y	M_{dist}	C.so
Ue 200x40x12x1,25 mm	4,992	0,83	4,143	110	1,13	5,640	420
Ue 140x40x12x0,95 mm	2,335	0,90	2,101	80	1,22	2,848	520
Ue 90x40x12x0,95 mm	1,299	1,56	2,026	45	1,59	2,065	460
Cr 20x30x12x0,95 mm	0,176	4,50	0,792	25	38	6,688	350
Compressão Centrada							
		Local			Distorcional		
	N_y	N_l / N_y	N_l	C.So	N_{dist} / N_y	N_{dist}	C.So
Ue 200x40x12x1,25 mm	92,42	0,15	13,86	150	0,25	23,10	450
Ue 140x40x12x0,95 mm	56,47	0,17	9,59	110	0,45	25,41	400
Ue 90x40x12x0,95 mm	44,6	0,39	17,39	70	0,90	40,14	500

Note-se que o valor da carga crítica (N_{Cr} ou M_{Cr}) é obtido por intermédio das relações a seguir:

$$N_{Cr} = (\text{Fator de carga})N_y \quad (\text{B.1})$$

$$N_y = A f_y \quad (\text{B.2})$$

$$M_{Cr} = (\text{Fator de carga})M_y \quad (\text{B.3})$$

$$M_y = w f_y \quad (\text{B.4})$$

onde:

f_y é o limite de escoamento do aço;

Fator de carga é o fator de tensão ou carga (obtido diretamente do CU-FSM);

w é módulo de resistência elástico da seção bruta em relação a fibra extrema que atinge o escoamento.

Apêndice C – Procedimentos do Método da Resistência Direta.

Neste anexo estão contidos os procedimentos referentes ao método da resistência direta, descritos pelo Anexo C da norma brasileira vigente para o dimensionamento de perfis de aço formados a frio, a NBR 14762:2010.

BARRAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO CENTRADA

O valor característico da força axial de compressão resistente $N_{C,Rk}$ deve ser tomado como o menor valor calculado para a flambagem global por flexão, torção ou flexo-torção ($N_{C,Re}$), local ($N_{C,Rl}$) e distorcional ($N_{C,Rdist}$) e depois dividido pelo coeficiente de ponderação ($\gamma = 1,2$), conforme a equação abaixo.

$$N_{C,Rd} = \frac{\min.(N_{C,Re}, N_{C,Rl}, N_{C,Rdist})}{\gamma} = \frac{\min.(N_{C,Re}, N_{C,Rl}, N_{C,Rdist})}{1,2} \quad (C1.1)$$

Flambagem Global por Flexão, Torção ou Flexo-torção ($N_{C,Re}$)

$$N_{C,Re} = (0,658\lambda_0^2) A f_y \quad \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad (C1.2)$$

$$N_{C,Re} = \left(\frac{0,877}{\lambda_0^2}\right) A f_y \quad \text{para } \lambda_0 > 1,5 \quad (C1.3)$$

$$\lambda_0 = \left(\frac{A f_y}{N_e}\right)^{0,5} \quad (C1.4)$$

Onde:

N_e deve ser tomado como o menor valor das forças axiais de flambagem global elástica (N_{ex} , N_{ey} e N_{ez}), conforme as seguintes equações:

$$N_e = \min.(N_{ex}, N_{ey}, N_{ez}) \quad (C1.5)$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \quad (C1.6)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad (C1.7)$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right] \quad (C1.8)$$

Flambagem Local ($N_{C,Rl}$)

$$N_{C,Rl} = N_{C,Re} \quad \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \quad (C1.9)$$

$$N_{C,Rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \frac{N_{C,Re}}{\lambda_l^{0,8}} \quad \text{para } \lambda_l > 0,776 \quad (C1.10)$$

$$\lambda_l = \left(\frac{N_{C,Re}}{N_l}\right)^{0,5} \quad (C1.11)$$

Flambagem Distorcional ($N_{C,Rdist}$):

$$N_{C,Rdist} = A f_y \quad \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,561 \quad (C1.12)$$

$$N_{C,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{A f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}} \quad \text{para } \lambda_{dist} > 0,561 \quad (C1.13)$$

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{A f_y}{N_{dist}}\right)^{0,5} \quad (C1.14)$$

BARRAS SUBMETIDAS À FLEXÃO SIMPLES

O valor característico do momento resistente (M_{Rd}) deve ser tomado como o menor valor calculado para a flambagem global (M_{Re}), local (M_{Rl}) e distorcional (M_{Rdist}) e depois dividido pelo coeficiente de ponderação ($\gamma = 1,1$), conforme a equação abaixo.

$$M_{Rd} = \frac{\min.(M_{Re}, M_{Rl}, M_{Rdist})}{\gamma} = \frac{\min.(M_{Re}, M_{Rl}, M_{Rdist})}{1,1} \quad (C1.15)$$

Flambagem Lateral com Torção (M_{Re}):

$$M_{Re} = W f_y \quad \text{para } \lambda_0 \leq 0,6 \quad (C1.16)$$

$$M_{Re} = 1,11 (1 - 0,278 \lambda_0^2) W f_y \quad \text{para } 0,6 < \lambda_0 < 1,336 \quad (C1.17)$$

$$M_{Re} = \frac{W f_y}{\lambda_0^2} \quad \text{para } \lambda_0 \geq 1,336 \quad (C1.18)$$

$$\lambda_0 = \left(\frac{W f_y}{M_e}\right)^{0,5} \quad (C1.19)$$

Onde:

M_e para barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica é dado por:

$$M_e = C_b r_0 \sqrt{N_{ey} N_{ez}} \quad (C1.20)$$

$C_b = 1,0$ (a favor da segurança) ou pela seguinte expressão:

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \quad (C1.21)$$

Flambagem Local (M_{Rl}):

$$M_{Rl} = M_{Re} \quad \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \quad (C1.22)$$

$$M_{Rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \frac{M_{Re}}{\lambda_l^{0,8}} \quad \text{para } \lambda_l > 0,776 \quad (C1.23)$$

$$\lambda_l = \left(\frac{M_{Re}}{M_l}\right)^{0,5} \quad (C1.24)$$

Flambagem Distorcional (M_{Rdist}):

$$M_{Rdist} = W f_y \quad \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,673 \quad (C1.25)$$

$$M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}}\right) \frac{W f_y}{\lambda_{dist}} \quad \text{para } \lambda_{dist} > 0,673 \quad (C1.26)$$

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{W f_y}{M_{dist}}\right)^{0,5} \quad (C1.27)$$

BARRAS SUBMETIDAS A FORÇA CORTANTE

A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} deve ser calculada por:

$$V_{Rd} = \frac{0,6 f_y h t}{\gamma} \quad \text{para } \frac{h}{t} \leq 1,08 \left(\frac{E k_v}{f_y}\right)^{0,5} \quad (C1.28)$$

$$V_{Rd} = \frac{0,65 t^2 (k_v f_y E)^{0,5}}{\gamma} \quad \text{para } 1,08 \left(\frac{E k_v}{f_y}\right)^{0,5} < \frac{h}{t} \leq 1,4 \left(\frac{E k_v}{f_y}\right)^{0,5} \quad (C1.29)$$

$$V_{Rd} = \frac{0,905 E k_v t^3 / h}{\gamma} \quad \text{para } \frac{h}{t} > 1,4 \left(\frac{E k_v}{f_y}\right)^{0,5} \quad (C1.30)$$

Onde: $\gamma = 1,10$; $k_v = 5,0$ (alma sem enrijecedores transversais); h é a largura da alma; e t é a espessura da alma.

BARRAS SUBMETIDAS A FLEXÃO COMPOSTA

Força cortante e momento fletor combinados:

Para barras sem enrijecedores transversais de alma, o momento fletor solicitante de cálculo e a força cortante solicitante de cálculo, devem satisfazer a expressão de interação a seguir:

$$\left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}\right)^2 \leq 1,0 \quad (C1.31)$$

Condição necessária para aprovação de barras sem enrijecedores intermediários.

Força normal e momento fletor combinados:

A força normal solicitante de cálculo e os momentos fletores solicitantes de cálculo devem satisfazer a expressão de interação indicada a seguir:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (C1.32)$$

CÁLCULO DE DESLOCAMENTOS

O cálculo de deslocamentos em barras submetidas à flexão deve ser feito considerando um momento de inércia efetivo da seção, dado por:

$$I_{ef} = I_g \left(\frac{M_{Rser}}{M_n}\right) \leq I_g \quad (C1.33)$$

onde: M_n é o momento fletor solicitante calculado considerando as combinações de ações para os estados limites de serviço.

M_{Rser} é o momento fletor resistente, porém substituindo o produto $W f_y$ por M_n

I_g é o momento de inércia da seção bruta.