

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CAMPUS JOINVILLE – CEM

ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA

MARCELO PRATTI JUNIOR

ANÁLISE DE DIMENSIONAMENTO DE PERFÍS DE COBERTURA METÁLICA

ESTUDO DE CASO

Joinville, 2015

MARCELO PRATTI JUNIOR

ANÁLISE DE DIMENSIONAMENTO DE PERFÍS DE COBERTURA METÁLICA
ESTUDO DE CASO

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para obtenção de graduação do curso de Engenharia de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Prof.^a Valéria
Bennack

Joinville, 2015

MARCELO PRATTI JUNIOR

ANÁLISE DE DIMENSIONAMENTO DE PERFÍS DE COBERTURA METÁLICA
ESTUDO DE CASO

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito para obtenção
de graduação do curso de Engenharia de
Infraestrutura, na Universidade Federal de
Santa Catarina.

Banca Examinadora

Prof.^a Esp. Valéria Bennack (Orientadora)

Prof. Dr. Luciano Senff

Prof.^a. Ma. Maria Rosane Vilpert Vitali

Joinville, 2015

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha família por todo amor, educação e princípios que me foram passados. Principalmente meus pais por todo apoio e por nunca medirem esforços para que esse objetivo fosse cumprido.

A professora Valéria Bennack pela orientação e toda atenção dispensada.

Aos engenheiros Milton K. Yoshinaga e Silvio M. Loureiro, diretores da empresa SGE Serviços Gerais em Estruturas Metálicas, e todos os funcionários pela oportunidade de estágio e por toda atenção e conhecimento que obtive durante o mesmo.

Por fim, toda gratidão aos meus amigos, que tornaram essa jornada mais fácil. Agradeço por todos os momentos de descontração, todas as experiências e aprendizados compartilhados. Desejo todo o sucesso pessoal e profissional para todos.

Obrigado a todos.

RESUMO

Sabe-se que, para obter um bom resultado em uma obra, independente do material utilizado, é indispensável um planejamento que contenha todas as etapas, assim como todas as normas e conceitos a serem seguidas em cada uma delas. Indispensável também a elaboração de um projeto que aborde todas as variáveis e possibilidades existentes para o caso, pois é necessário saber empregar corretamente o material para a finalidade de uso. Neste trabalho, o objeto de estudo será uma cobertura em estrutura metálica para galpão, apresentando a correta utilização de normas e critérios de coberturas em cada uma das etapas de sua concepção. Para alcançar o objetivo, serão utilizadas pesquisas onde é possível conceituar o material aço estrutural, suas propriedades, vantagens e desvantagens na construção civil, além de definir quais as funções das partes integrantes de uma cobertura, parâmetros de planejamento, fabricação e montagem. Posteriormente, será usado um projeto como base para estudo de caso, analisando resultados obtidos no dimensionamento baseado na teoria e os que foram obtidos através da utilização de softwares de cálculo estrutural.

PALAVRAS CHAVE: Aço; Cobertura; Estrutura Metálica; Dimensionamento.

ABSTRACT

It is known that, to get good results at a construction, no matter the material it is being used, it is essential a plan that contains all the steps, as well as, the rules and concepts to be followed. It is also essential to elaborate a project that contains all existing variables and possibilities for the case, because it is necessary to know how to handle properly the material for the purpose of the use. In this paper the study object is a steel structure roof for a shed, presenting the correct utilization of norms and criteria of roofs in each of the conception phase. To achieve the goal, researches where it is possible to determine the structural steel, its properties, pros and cons of its use on civil construction will be used, in addition to defining the function of the components of a roof, planning parameters, manufacture and mounting. Finally, a project will be used as a study of case, analyzing the results obtained in dimensioning based in theory, and the ones obtained utilizing structural calculus softwares.

KEY WORDS: steel, roof, steel structure, dimensioning.

LISTA FIGURAS

Figura 1 – Principais matérias primas do aço.....	3
Figura 2 - Curva tensão-deformação.....	8
Figura 3 – Diagrama convencional σ , ϵ dos aços	10
Figura 4 - Variedade de formas de perfis metálicos	14
Figura 5 - Variados tipos de barras.....	16
Figura 6 - Perfis laminados.....	19
Figura 7 - Perfis soldados.....	20
Figura 8 - Dimensões de perfil soldado	20
Figura 9 - Perfis formados a frio	21
Figura 10 - Tipos de tubos.....	22
Figura 11 - Estruturas metálicas de armazenagem e de obra de arte.....	23
Figura 12 - Estruturas metálicas de edifício.....	24
Figura 13 - Galpão metálico em pórtico de alma cheia.....	25
Figura 14 - Galpão metálico com tesoura treliçada	25
Figura 15 - Elementos de galpão.....	26
Figura 16 - Tipos de chubadores.....	27
Figura 17 - Placas de base.....	28
Figura 18 - Colunas metálicas	28
Figura 19 - Vigas metálicas	29
Figura 20 - Tesouras metálicas	30
Figura 21 - Terças metálicas	30
Figura 22 - Elementos de ligação	31
Figura 23 - Meios de ligação.....	32
Figura 24 - Chapas de cobertura e fechamento	34
Figura 25 - Processos de dobra do aço.....	39
Figura 26 - Traçagem	39
Figura 27 - Ferramentas para corte a chamas.....	41
Figura 28 - Máquina de corte a plasma	42
Figura 29 - Máquina de corte a laser	43
Figura 30 - Processos de serramento e torneamento.....	44
Figura 31 - Pré-montagem de fábrica	45

Figura 32 - Limpeza com jato abrasivo	47
Figura 33 - Pintura e galvanização	47
Figura 34 - Sequência de montagem.....	52
Figura 35 - Mapa de isopletas das velocidades básicas.....	56
Figura 36 - Coeficientes de forma aplicados neste estudo	59
Figura 37 - Coeficientes de forma para telhados	60
Figura 38 - Combinações de cargas do vento críticas	61
Figura 39 - Decomposição das cargas aplicadas	66
Figura 40 - Comprimentos efetivos perfil U enrijecido	70
Figura 41- Flambagem local da mesa	71
Figura 42- Flambagem local da alma	75
Figura 43 - Flambagem lateral de torção	78
Figura 44 - Disposição dos tirantes	86
Figura 46 - Área de influência respectiva para cada coluna	90
Figura 47 - Elementos de contraventamento	90
Figura 48 - Cargas permanentes atuantes na viga	91
Figura 49 - Componentes do eixo de Y da das cargas atuantes	93

LISTA TABELAS

Tabela 1 - Influência dos elementos de liga nas propriedades dos aços.....	7
Tabela 2 - Chapas grossas.....	15
Tabela 3 - Chapas laminadas a quente	15
Tabela 4 - Chapas laminadas a frio	16
Tabela 5 - Bitolas de barras redondas.....	17
Tabela 6 - Bitolas de barras quadradas.....	18
Tabela 7 - Bitolas de barra chata.....	18
Tabela 8 - Tubos redondos.....	22
Tabela 9 - Fator rugosidade (S_2)	57
Tabela 10 - Coeficientes de pressão e forma para paredes	58
Tabela 11 - Sobrecarga máxima para telhas	63
Tabela 12 - Características do conjunto de cantoneiras.....	88

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	1
1.1.1	OBJETIVO ESPECÍFICO	2
1.2	JUSTIFICATIVA	2
1.3	MÉTODO.....	2
2	CONCEITOS GERAIS DO AÇO	3
2.1	TIPOS DE AÇO ESTRUTURAL	4
2.1.1	AÇO-CARBONO	4
2.1.2	AÇO DE BAIXA-LIGA	5
2.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	7
2.2.1	CONSTANTES FÍSICAS DO AÇO.....	9
2.2.2	DUCTILIDADE E FRAGILIDADE.....	9
2.2.3	RESILIÊNCIA E TENACIDADE.....	10
2.2.4	FADIGA.....	11
3	VANTAGENS E DESVANTAGENS DE ESTRUTURAS EM AÇO.....	12
3.1	VANTAGENS	12
3.2	DESVANTAGENS.....	13
4	PRODUTOS DE AÇO ESTRUTURAL	14
4.1	CHAPAS.....	14
4.2	BARRAS.....	16
4.3	PERFIS LAMINADOS	19
4.4	PERFIS SOLDADOS.....	19
4.5	PERFIS FORMADOS A FRIO.....	21
4.6	TUBOS.....	21
5	ESTRUTURAS METÁLICAS	23

5.1	GALPÃO METÁLICO	24
5.1.1	CHUMBADORES	27
5.1.2	PLACAS DE BASE	27
5.1.3	COLUNAS	28
5.1.4	VIGAS	29
5.1.5	TESOURAS	29
5.1.6	TERÇAS	30
5.1.7	LIGAÇÕES	31
5.1.8	CONTRAVENTAMENTOS	33
5.1.9	CHAPAS DE FECHAMENTO E COBERTURA	33
6	ETAPAS DE EXECUÇÃO	35
6.1	PROJETO	35
6.1.1	ANTEPROJETO	35
6.1.2	PROJETO BÁSICO	36
6.1.3	DESENHOS DE FABRICAÇÃO	36
6.1.4	DIAGRAMA DE MONTAGEM	37
6.2	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	37
6.2.1	SUPRIMENTO	38
6.2.2	DOBRAMENTO, CALANDRAGEM E PRÉ-DEFORMAÇÃO	38
6.2.3	TRAÇAGEM	39
6.2.4	CORTES	40
6.2.5	FURAÇÃO	43
6.2.6	USINAGEM	44
6.2.7	PRÉ-MONTAGEM DE FABRICA	44
6.2.8	CONTROLE DE QUALIDADE	45
6.2.9	LIMPEZA E PROTEÇÃO	46

6.3	PROCESSOS DE MONTAGEM.....	48
6.3.1	EQUIPAMENTOS	48
6.3.2	ESCOLHA DO PROCESSO	49
6.3.3	ARMAZENAMENTO	50
6.3.4	LIGAÇÕES EM CAMPO	50
6.3.5	SEQUÊNCIA DE MONTAGEM	51
7	ESTUDO DE CASO – DIMENSIONAMENTO DE COBERTURA	53
7.1	CARACTERÍSTICAS DO GALPÃO.....	53
7.2	CARGAS ATUANTES NA ESTRUTURA	54
7.2.1	CARGAS PERMANENTES (CP).....	54
7.2.2	CARGAS ACIDENTAIS (CA).....	54
7.2.3	CARGAS DEVIDO AO VENTO (CV)	55
7.3	COMBINAÇÃO DE CARGAS.....	62
7.4	DIMENSIONAMENTO DE TELHAS	63
7.5	DIMENSIONAMENTO DAS TERÇAS	65
7.5.1	FLAMBAGEM LOCAL DA MESA	71
7.5.2	FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA	75
7.5.3	FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO.....	78
7.5.4	CISALHAMENTO	80
7.5.5	FLECHA.....	82
7.6	DIMENSIONAMENTO DOS TIRANTES	83
7.7	DIMENSIONAMENTO DE CONTRAVENTAMENTO	86
7.8	DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE COBERTURA.....	91
7.8.1	ESFORÇO FLETOR.....	92
7.8.2	ESFORÇO DE COMPRESSÃO	102
7.8.3	ESFORÇOS COMBINADOS	107

8 CONCLUSÃO	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
REFERÊNCIAS DE IMAGENS E TABELAS	112
ANEXO A – PLANTAS DE COBERTURA METÁLICA	114
.....	115
.....	116
.....	117
.....	118
ANEXO B – CATÁLOGOS DE PERFÍS DE AÇO	119
.....	120
.....	121
.....	122
123	
.....	124

1 INTRODUÇÃO

A indústria de estruturas metálicas, amplamente difundida em países como Estados Unidos, Reino Unido e Alemanha há décadas, vem apresentando um expressivo crescimento no Brasil nos últimos anos. O consumo de aço destinado às estruturas metálicas passou de 324 mil toneladas em 2002 para 1,6 milhão de toneladas em 2009, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e os desembolsos do BNDES destinados às empresas do setor saltaram de cerca de R\$ 6 milhões em 2001 para mais de R\$ 156 milhões em 2010.

O uso de estruturas metálicas atinge em 2015 cerca de 15% do setor de edificações no país, pretendendo atingir 20% das construções nos próximos 5 anos, de acordo com o Centro Brasileiro de Construção em Aço (CBCA).

Percebe-se cada vez mais que as indústrias buscam métodos mais vantajosos devido à exigência de grandes construções. A produção das estruturas nas instalações da indústria possibilita processos de produção mais eficientes e racionais, com grande variabilidade de formas, trabalhadores especializados, repetição de tarefas, controle de qualidade, além de deixar o canteiro de obras livre, gerando construções simplificadas, rápidas e limpas. Com menor tempo de execução, maior durabilidade, qualidade, e valores de resistências garantidas pelo processo de fabricação, as estruturas metálicas vêm ganhando o mercado nacional.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho visa apresentar as principais diretrizes para uma obra de cobertura de estrutura metálica, apresentando o material utilizado, suas propriedades, a estrutura e seus componentes, assim como procedimentos de fabricação e montagem.

1.1.1 OBJETIVO ESPECÍFICO

Utilizar as normas e métodos empregados no país para analisar o dimensionamento de uma cobertura metálica de um galpão através de um projeto fornecido por uma empresa do ramo.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com o crescimento da utilização de estruturas metálicas no país, dentre elas o galpão industrial, o trabalho visa apresentar como o andamento de uma obra deve prosseguir quanto ao seu planejamento, dimensionamento e execução; quais os equipamentos necessários e os métodos ideais a serem aplicados, assim como as dificuldades que podem ser encontradas.

1.3 MÉTODO

Este trabalho apresenta uma análise de dimensionamento de cobertura metálica de galpão, servindo de modelo para similares.

No cotidiano do engenheiro ou projetista, os cálculos são simplificados através de sua experiência profissional ou de programas de computador, como softwares de dimensionamento, que realizam os cálculos e escolhas de peças e suas respectivas dimensões, otimizando assim, o tempo e evitando longas rotinas de cálculo.

O trabalho é baseado por livros teóricos de conceituados autores da área, manuais e normas utilizadas no país. A geometria da estrutura utilizada será a fornecida pela empresa que executou o projeto, a qual prefere não ser citada no trabalho, e os resultados do dimensionamento das peças componentes da estrutura obtidos através dos cálculos presentes no trabalho, comparados com os utilizados na prática, definidos pelo software utilizado.

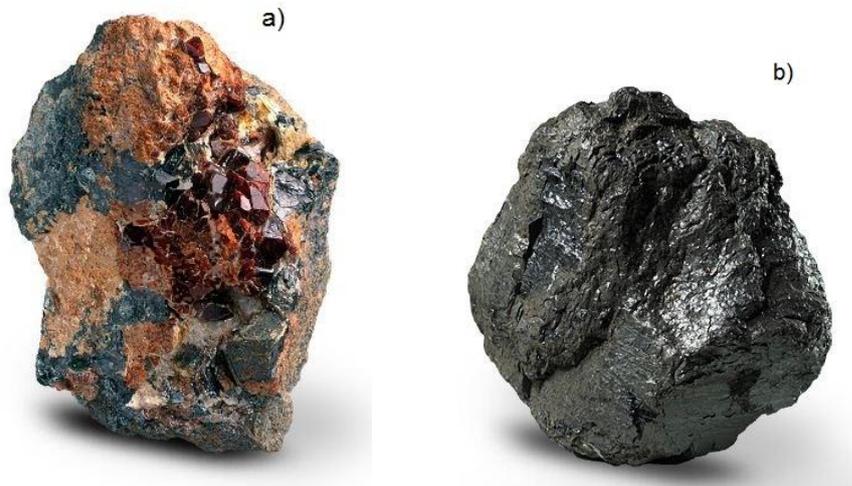
2 CONCEITOS GERAIS DO AÇO

O aço é a mais versátil e importante das ligas metálicas. Segundo Dias (1998) aço pode ser definido como uma liga composta de aproximadamente 98% de ferro, e pequenas quantidades de carbono (de 0,002% até 2,00%).

As principais matérias primas envolvidas na fabricação do aço são o minério de ferro (Figura 1 a) e o carvão mineral (Figura 1 b). Precisam de um preparo prévio devido ao fato de não serem encontrados puros na natureza, e os elementos indesejáveis podem diminuir a eficiência do processo da fabricação do aço e no aumento do consumo de energia. Após a eliminação das impurezas o ferro é liquefeito, quando recebe adições e forma para determinadas características desejadas.

Os aços estruturais são aqueles que, devido suas propriedades, são utilizados em estruturas que suportam e transmitem esforços mecânicos.

Figura 1 – Principais matérias primas do aço.



Fonte: Vale [1].

2.1 TIPOS DE AÇO ESTRUTURAL

De acordo com o Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), os principais requisitos para os aços destinados à aplicação estrutural são: elevada tensão de escoamento, elevada tenacidade, boa soldabilidade, homogeneidade, susceptibilidade de corte por chama sem endurecimento e boa trabalhabilidade em outras operações tais como furação e dobramento, sem que se origine fissuras ou defeitos.

Para maior parte das aplicações do aço estrutural, a importância da resistência mecânica é relativamente pequena, assim como o fator peso. Assim sendo, os aços-carbono comuns, laminados, sem quaisquer tratamentos térmicos, são plenamente satisfatórios e constituem porcentagem considerável de utilização.

Em outras aplicações, entretanto, exigem um material com peso relativamente baixo e alta resistência, por estar sujeito a esforços severos e choques repentinos, além de resistência à corrosão adequada, visto que nas seções mais leves, a perda de resistência por ação corrosiva poderia ser fatal. Nestas aplicações, os aços indicados são os de baixa-liga, ou também conhecidos como aços de alta resistência.

Ambos os tipos são adequados na construção civil, fazendo necessária uma comparação econômica, levando em conta a finalidade do uso. O aço-carbono possui resistência menor que o aço baixa-liga, porém possui um custo inferior por unidade de peso.

2.1.1 AÇO-CARBONO

Conforme a NBR 6215, aço carbono é aquele que não contém elementos de liga, apenas valores residuais de níquel, silício, entre outros. O aumento na sua resistência é obtido através do acréscimo de carbono, até uma determinada quantidade, em relação ao ferro. Este acréscimo também resulta em outras modificações de propriedades, como a redução da ductilidade (capacidade de se deformar plasticamente).

Dentre os aços-carbono, padronizados pela ASTM (Sociedade Americana de Testes e Materiais), pela ABNT (Associação Brasileira de Normas e Técnicas) ou EN (Normas Europeias), podemos destacar os tipos:

- ASTM-A7: o aço mais utilizado nos Estados Unidos até 1960, substituído posteriormente pelo A36;
- ASTM-A36: o aço estrutural mais utilizado e conhecido;
- MR250: aço com propriedades semelhantes ao A36, especificado pela ABNT;
- ASTM-A307: aço utilizado para fabricação de parafusos comuns;
- ASTM-A325: aço utilizado para fabricação de parafusos de alta resistência;
- S235: aço com propriedades semelhantes ao A36, especificado pela EN.

2.1.2 AÇO DE BAIXA-LIGA

De acordo com o Centro Brasileiro de Construção em Aço, aços de baixa-liga são aqueles com adição intencional de pequenos teores (1,5% - 5,0%) de outros elementos de liga como cromo, chumbo, cobre, silício, níquel, manganês, vanádio, entre outros, em combinações específicas. Segundo o CBCA, são utilizados toda vez que se deseja: aumentar a resistência mecânica permitindo um acréscimo da carga unitária da estrutura ou permitindo uma diminuição proporcional da seção; melhorar a resistência ao choque e o limite de fadiga; melhorar a resistência à corrosão atmosférica; elevar a relação do limite de escoamento para o limite de resistência à tração, sem perda apreciável da ductilidade.

Os efeitos de dois ou mais elementos utilizados simultaneamente difere dos efeitos de adições isoladas. Dentre alguns elementos de liga e características geradas (que serão apresentadas no próximo tópico), constam os principais na lista a seguir:

- Carbono (C): Aumentar o teor de carbono é a maneira mais econômica para obter aumento da resistência mecânica nos aços. Por outro lado, prejudica sensivelmente a ductilidade e a tenacidade.

- Cobre (Cu): Aumenta a resistência à corrosão atmosférica e a resistência à fadiga. Por outro lado reduz discretamente a ductilidade, tenacidade e a soldabilidade.
- Cromo (Cr): Aumenta a resistência mecânica à abrasão e à corrosão atmosférica, assim como o desempenho em temperaturas elevadas. Porém reduz a soldabilidade.
- Enxofre (S): Citado apenas para que seja controlado, pois é extremamente prejudicial ao aço. Reduz a soldabilidade e a ductilidade, especialmente para dobramento transversal.
- Fósforo (P): Aumenta a resistência à corrosão e a dureza. Por outro lado reduz a ductilidade e a soldabilidade.
- Manganês (Mn): Aumentar o teor de manganês é uma forma segura de aumentar a resistência à fadiga e o limite de escoamento. Prejudica a ductilidade, porém menos que o carbono. Reduz também a soldabilidade e a resistência à corrosão.
- Molibdênio (Mo): Aumenta a resistência à corrosão atmosférica, a soldabilidade e o limite de escoamento, além do comportamento em temperaturas elevadas.
- Níquel (Ni): Aumenta a resistência mecânica e à corrosão, assim como a tenacidade. Reduz a soldabilidade.
- Nióbio (Nb): Eleva a resistência mecânica e soldabilidade. Porém reduz a ductilidade.
- Silício (Si): Usado como desoxidante do aço. Melhora a resistência mecânica e a corrosão. Porém reduz a soldabilidade.
- Titânio (Ti): Aumenta o limite de resistência, resistência à abrasão e o desempenho em altas temperaturas.
- Vanádio (V): Aumenta o limite de resistência sem prejudicar a soldagem e a tenacidade.

Tabela 1 - Influência dos elementos de liga nas propriedades dos aços.

Propriedade/elemento	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ti	Cr	Nb	Ni	V
Resistência mecânica	+	+	+	-	+		+	+	+	+	+
Ductilidade	-	-		-				-	-		
Tenacidade	-			-					+	+	
Soldabilidade	-	-	-	-	-			-		-	
Resistência à corrosão	-		+		+	+	+	+		+	

Fonte: DIAS, 1998.

Onde (+) caracteriza efeitos positivos e (-) os efeitos negativos da liga.

Os principais tipos de aço baixa-liga são:

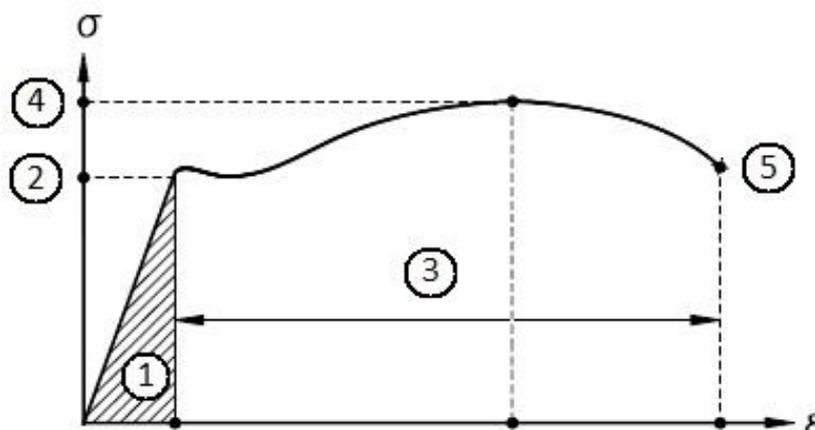
- ASTM A572/Grau 50: aço de alta resistência mais utilizado na fabricação de perfis;
- AR 350: aço com propriedades semelhantes ao A572, especificado pela ABNT;
- ASTM A588: aço muito utilizado quando necessária uma maior resistência à corrosão atmosférica;
- AR 350 COR: aço com propriedades semelhantes ao A588, especificado pela ABNT;

2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para se compreender o comportamento do aço, é essencial que o profissional conheça as propriedades do aço em uma determinada situação.

A curva tensão-deformação é uma descrição gráfica do comportamento mecânico de um material. Demonstra a relação entre uma carga ou força que esteja sendo aplicada (σ) e a deformação resultante da mesma (ϵ).

Figura 2 - Curva tensão-deformação



Fonte: Editado pelo autor, 2015.

Através do comportamento representado no gráfico, pode-se destacar pontos importantes, que fornecem informações sobre as propriedades do material.

- I. Regime elástico: também conhecido como elasticidade, é a capacidade que o material possui de se deformar quando submetido a ações externas e retornar ao seu estado inicial após o descarregamento, não apresentando deformações residuais;
- II. Limite de Elasticidade: o regime elástico se mantém até determinado valor de tensão aplicada, chamado de limite de elasticidade. Após esse valor o material apresenta um comportamento plástico.
- III. Regime plástico: ou simplesmente plasticidade é a capacidade que o material possui de se deformar quando submetido a ações externas e não retornar ao seu estado inicial quando descarregado, sofrendo deformações residuais, resultado de deslocamento relativo entre os átomos do material;
- IV. Limite de Resistência: é o valor máximo de tensão que um material suporta.
- V. Ruptura: após ultrapassar o limite de resistência o material sofre acelerada redução da seção transversal e queda brusca em sua resistência até entrar em colapso e romper.

2.2.1 CONSTANTES FÍSICAS DO AÇO

Qualquer aço estrutural em temperatura atmosférica possui algumas propriedades constantes. Para os cálculos deste trabalho, serão utilizados os valores empregados pela NBR 8800:

- Módulo de elasticidade: é a razão entre tensão exercida e a deformação sofrida pelo material ($E = 200000 \text{ MPa} \sim 205000 \text{ MPa}$);
- Módulo de elasticidade transversal: ($G = 77000 \text{ MPa} \sim 80000 \text{ MPa}$);
- Coeficiente de Poisson: relação entre deformação transversal e longitudinal devido à direção de aplicação da carga ($\nu = 0,3$);
- Coeficiente de dilatação térmica: variação de unidade de comprimento por grau de temperatura ($\beta = 1,2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$);
- Massa específica: razão entre a massa e o volume de um material ($\rho = 7,85 \text{ t/m}^3$).

2.2.2 DUCTILIDADE E FRAGILIDADE

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009), ductilidade é a capacidade do material de se deformar plasticamente quando sujeito a cargas elevadas. É muito importante, pois as grandes deformações servem como aviso prévio de ruptura, sem que haja colapso imediato.

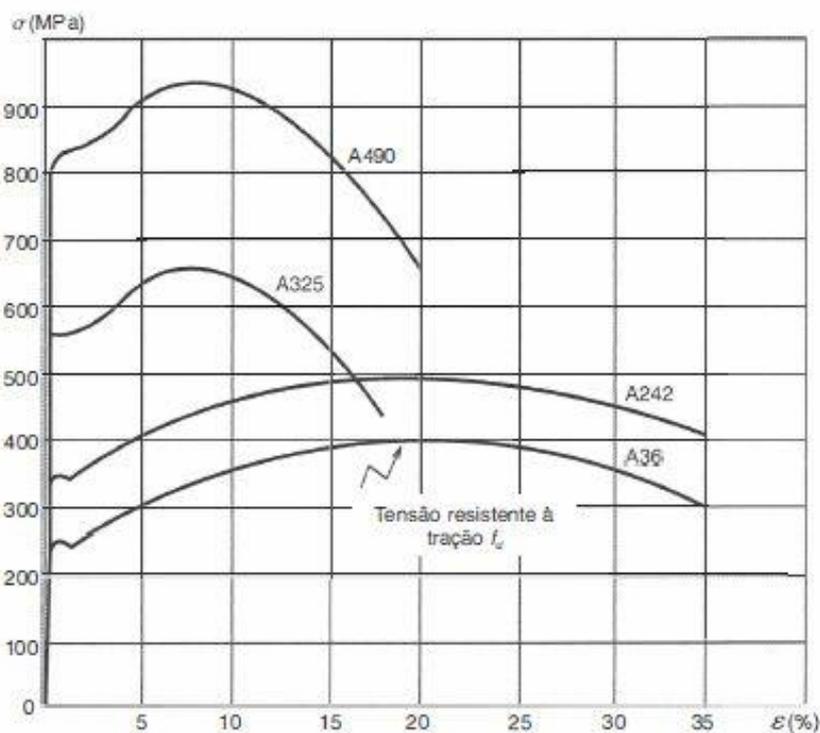
A ductilidade pode ser medida pela deformação unitária residual após a ruptura do material, em comparação a sua medida inicial.

Um material pouco dúctil é considerado frágil, isto é, um material que se rompe bruscamente, sem aviso prévio. O seu comportamento é analisado através da iniciação da fratura, quando o material perde sua ductilidade devido a uma tensão, e pela propagação dessa fratura.

É uma propriedade do material, ser mais ou menos dúctil, como podemos ver na Figura 3, se compararmos o aço A36 e o A325 (o aço A325 possui um limite de resistência maior, porém um regime plástico menor, o que o torna menos dúctil, ou

mais frágil, do que o aço A36). Porém, existem fatores que podem alterar, ou intensificar, essas propriedades, como baixas temperaturas e efeitos térmicos locais, como soldas.

Figura 3 – Diagrama convencional σ , ϵ dos aços ASTM A36, A242, A325 e A490.



Fonte: PFEIL e PFEIL, 2009.

2.2.3 RESILIÊNCIA E TENACIDADE

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009), ambas as propriedades se relacionam com a capacidade de absorver energia mecânica.

Resiliência é energia mecânica total que o material pode absorver em deformações elásticas, conseqüentemente, a quantidade de energia que o material consegue restituir.

Tenacidade é a energia mecânica total que o material pode absorver em deformações elásticas e plásticas até sua ruptura, isto é, energia necessária para romper o material.

2.2.4 FADIGA

Fadiga é o efeito de ruptura em tensões inferiores às consideradas resistentes em ensaios estáticos, que ocorre em peças sujeitas a esforços repetitivos.

A partir do momento que surge uma trinca no material, todo sistema fica instável, pois a seção restante não é capaz de suportar a carga aplicada. Assim, o estudo do efeito da fadiga é muito importante na concepção de estruturas, visto que ela é a maior causa individual de falhas em metais, sendo responsável por aproximadamente 90% de todas as falhas metálicas.

3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DE ESTRUTURAS EM AÇO

Com o desenvolvimento da construção civil, os métodos de construção são avaliados e comparados entre si, definindo quais os melhores critérios para cada situação. Como acontece com todos os materiais, o uso do aço para estruturas traz algumas vantagens e desvantagens.

A definição dos melhores critérios depende do desempenho estrutural, viabilidade econômica e do tempo disponível, tornando necessária uma avaliação e comparação destas situações e da finalidade da estrutura para decidir qual será o material ideal a ser utilizado na ocasião.

3.1 VANTAGENS

Podemos citar como principais vantagens da utilização do aço estrutural:

- Alta resistência do material permite aos elementos estruturais suportar grandes esforços. Podem-se assumir valores maiores de solicitação, ou dimensões de elementos menores comparados com estruturas de outros materiais;
- As estruturas metálicas no geral são mais leves, pois utilizam menos elementos e possuem maiores vãos, mesmo com massa específica alta em relação aos outros materiais. Isso gera uma economia no custo das fundações;
- O processo de fabricação proporciona um material homogêneo, com propriedades físicas e mecânicas definidas e constantes, oferecendo segurança. Este processo também proporciona uma padronização de trabalho, otimizando o tempo de fabricação;
- Conjuntos de elementos podem ser pré-montados na indústria, planejadamente e de forma mecanizada, o que evita erros, e reduz tempo de construção no canteiro, reduzindo assim, tempo e custo total da obra;
- Apresenta possibilidade de substituição de componentes da estrutura com facilidade, o que viabiliza eventuais ampliações, manutenções ou reforço;

- O material estocado, ou mesmo sobra de outra estrutura, pode facilmente ser trabalhado e reaproveitado, diminuindo perdas de materiais. Pode-se também reciclar o material gerado com cortes e furos;
- Compatível com componentes e outros sistemas construtivos industrializados, mesmo constituídos de outro material.

3.2 DESVANTAGENS

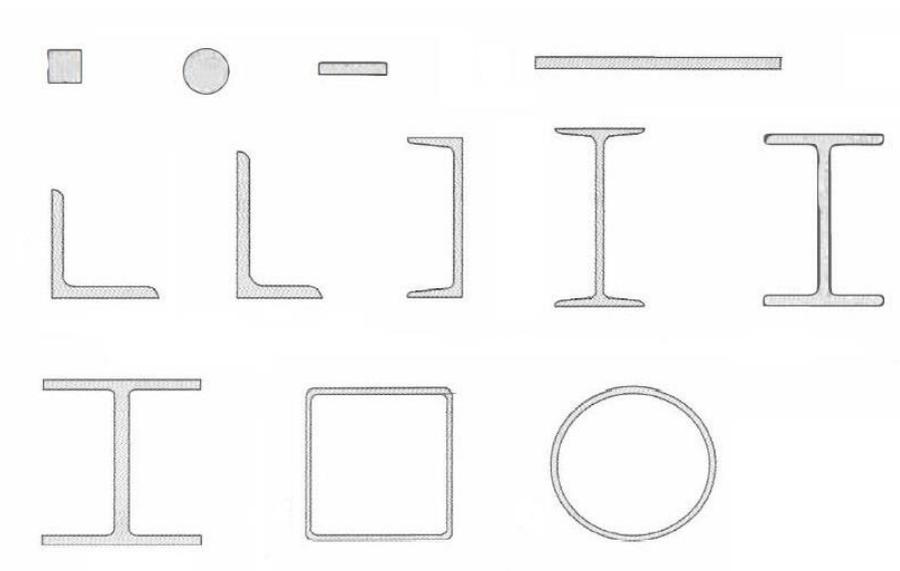
Podemos citar como principais desvantagens da utilização do aço estrutural:

- A principal desvantagem da estrutura metálica é o custo elevado em relação a estruturas realizadas com outros materiais;
- Necessidade de mão-de-obra e equipamentos especializados para fabricação e montagem;
- Limitação na variedade e disponibilidade de perfis estruturais, tornando necessário, com antecedência, verificar com fornecedores disponibilidade do material para não prejudicar o cronograma;
- Necessidade de tratamento superficial contra oxidação devido ao contato com ar ou água. Já existem aços de alta resistência à corrosão, como citado anteriormente, porém estes possuem um preço maior;
- Limitação de fabricação e montagem em fábrica devido a necessidade de transporte até o local da montagem final. Tanto os tamanhos das peças que serão transportadas, quanto a quantidade de viagens necessárias para transportar toda a estrutura interferem no custo com o transporte.

4 PRODUTOS DE AÇO ESTRUTURAL

As peças de aço estrutural podem ser encontradas no mercado sob diversas formas (Figura 4), com a finalidade de cumprir objetivos diferentes. As principais formas são:

Figura 4 - Variedade de formas de perfis metálicos



Fonte: PFEIL e PFEIL, 2009.

4.1 CHAPAS

Chapas são laminados planos, com uma das dimensões (espessura) muito menor que as demais (largura e comprimento). Encontram-se no mercado disponibilizado das seguintes formas:

- Chapas grossas: com espessura superior a 5,0 mm, comercializadas com as dimensões padrão, como mostra a Tabela 2. Usadas para formação de estruturas metálicas em geral;

Tabela 2 - Chapas grossas

ESPESSURAS PADRÃO (mm)		
6.30	19.00	44.50
8.00	22.40	50.00
9.50	25.00	63.00
12.50	31.50	75.00
16.00	37.50	100.00
LARGURAS PADRÃO (mm)		
1000	1500	2440
1200	2000	
COMPRImentos PADRÃO (mm)		
6000		12000

Fonte: Catálogo de Aços Planos Gerdau.

- Chapas laminadas a quente: com espessura entre 1,2 mm a 5,0 mm, fornecidas previamente cortadas ou em forma de bobinas. Usadas em perfis de chapa dobrada e estruturas de cobertura como vigas e terças. Comercializada com dimensões padrão mostradas na Tabela 3;

Tabela 3 - Chapas laminadas a quente

ESPESSURAS PADRÃO (mm)		
1.20	2.25	3.75
1.50	2.65	4.25
1.80	3.00	4.75
2.00	3.35	
LARGURAS PADRÃO (mm)		
1000	1200	1500
COMPRImentos PADRÃO (mm)		
2000	3000	6000

Fonte: Catálogo de Aços Planos Gerdau.

- Chapas laminadas a frio: com espessura padrão de 0,3 mm a 3,0 mm, fornecidas previamente cortadas ou em forma de bobinas. Usadas em

calhas, rufos e batentes. Comercializada com dimensões padrão mostradas na Tabela 4:

Tabela 4 - Chapas laminadas a frio

ESPESSURAS PADRÃO (mm)			
0.45	0.75	1.06	1.50
0.60	0.90	1.20	1.90
LARGURAS PADRÃO (mm)			
1000	1200	1500	
COMPRIMENTOS PADRÃO (mm)			
2000		3000	

Fonte: Catálogo de Aços Planos Gerdau.

4.2 BARRAS

Elementos que possuem uma dimensão (comprimento) muito maior que as outras duas (da seção transversal). Encontra-se no mercado disponibilizado nas seguintes formas:

Figura 5 - Variados tipos de barras



Fonte: Carbonix [2].

- Barra redonda: como diz o nome, é a barra que possui seção transversal redonda. Disponibilizadas em um amplo número de bitolas e em sua maioria em barras de 12 m (Tabela 5). Utilizadas normalmente como tirantes, contraventamentos, chumbadores e parafusos. Sendo “d” o diâmetro da seção transversal

Tabela 5 - Bitolas de barras redondas

Bitolas (d)		Peso Nominal	Bitolas (d)		Peso Nominal	Bitolas (d)		Peso Nominal
Pol	mm	kg/m	Pol	mm	kg/m	Pol	mm	kg/m
1/4"	6,35	0,25	1.5/16"	33,34	6,85	2.7/16"	61,91	23,63
5/16"	7,94	0,39	1.3/8"	34,93	7,52	2.1/2"	63,50	24,86
3/8"	9,53	0,56	1.7/16"	36,51	8,22	2.9/16"	65,08	26,11
1/2"	12,70	0,99	1.1/2"	38,10	8,95	2.5/8"	66,68	27,40
9/16"	14,29	1,26	1.9/16"	39,69	9,71	2.3/4"	69,85	30,08
5/8"	15,88	1,56	1.5/8"	41,28	10,50	2.13/16"	71,44	31,45
11/16"	17,46	1,88	1.11/16"	42,86	11,32	2.7/8"	73,03	32,87
3/4"	19,05	2,24	1.3/4"	44,45	12,18	3"	76,20	35,79
13/16"	20,64	2,63	1.13/16"	46,40	13,06	3.1/16"	77,79	37,30
7/8"	22,23	3,05	1.7/8"	47,63	13,98	3.1/8"	79,38	38,84
15/16"	23,8	3,49	2"	50,80	15,9	3.1/4"	82,55	42,01
1"	25,4	3,98	2.1/16"	52,39	16,92	3.7/16"	87,31	46,99
1.1/16"	26,99	4,49	2.1/8"	53,98	17,96	3.1/2"	88,90	48,73
1.1/8"	28,58	5,04	2.1/4"	57,15	20,14	3.3/4"	95,35	55,94
1.3/16"	30,16	5,60	2.5/16"	58,74	21,27	4"	101,60	63,64
1.1/4"	31,75	6,21	2.3/8"	60,33	22,43	4.1/16"	103,19	65,65

Fonte: Gerdau [3].

- Barra quadrada: barra com seção transversal quadrada, normalmente com comprimento definido de 12 m (Tabela 6), oferecendo menor perda de material e facilitando o cálculo da matéria-prima. Sendo “h” o tamanho do lado da seção transversal.

Tabela 6 - Bitolas de barras quadradas

BITOLAS (h)		Peso Nominal
polegadas	mm	Kg/m
1/4"	6,35	0,31
5/16"	7,94	0,50
3/8"	9,53	0,71
1/2"	12,70	1,27
5/8"	15,88	1,98
11/16"	17,46	2,39
3/4"	19,05	2,85
7/8"	22,23	3,88
1"	25,40	5,06
1.1/8"	28,58	6,41
1.1/4"	31,75	7,91
1.1/2"	38,10	11,15
1.3/4"	44,45	15,19
2"	50,80	20,26

Fonte: Gerdau [4].

- Barra chata: barra com seção transversal retangular possui superfícies lisas, sem cantos vivos. Sendo “e” a altura e “l” a largura da seção transversal, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Bitolas de barra chata

Tabela de Peso Nominal (kg/m)																			
Espessura (e)		Largura (l) pol e mm																	
pol	mm	3/8"	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1"	1.1/4"	1.1/2"	1.3/4"	2"	2.1/2"	3"	3.1/2"	4"	4.1/4"	4.1/2"	4.3/4"	6"
	2,50		0,25	0,31															
1/8"	3,18	0,24	0,32	0,40	0,48	0,55	0,63	0,79	0,95		1,27								
3/16"	4,76		0,47	0,79	0,71	0,83	0,95	1,19	1,42		1,90								
1/4"	6,35		0,63		0,95	1,11	1,27	1,58	1,90		2,53	3,17	3,80		5,06				7,60
5/16"	7,94						1,58	1,98	2,37		3,17	3,96	4,75		6,33				9,50
3/8"	9,53						1,90	2,38	2,85		3,80	4,75	5,70		7,60			9,03	11,40
1/2"	12,70					2,22	2,53	3,17	3,80		5,06	6,33	7,60		10,13				15,19
5/8"	15,88								4,75	5,54	6,33	7,92	9,50	11,08	12,67		11,40		19,00
11/16"	17,46													12,18					
3/4"	19,05										7,60	9,50	11,40	13,29	15,19				22,79
1"	25,40										10,13		15,19	17,73	20,26				30,39
1.1/4"	31,75														25,32				
1.1/2"	38,10														30,39	32,29			
2"	50,80													30,39					

Fonte: Gerdau [5].

4.3 PERFIS LAMINADOS

Elementos que apresentam grande eficiência estrutural, fabricados à quente nas usinas siderúrgicas. São os mais econômicos entre os perfis, pois dispensam trabalhos adicionais como dobras ou soldagens. Existem várias dimensões e pesos padronizados, porém o engenheiro ou projetista fica restrito a essas dimensões se optar por usar esse tipo de perfil. Caso contrário pode optar por perfis formados a frio (dobrados ou perfis soldados).

Figura 6 - Perfis laminados

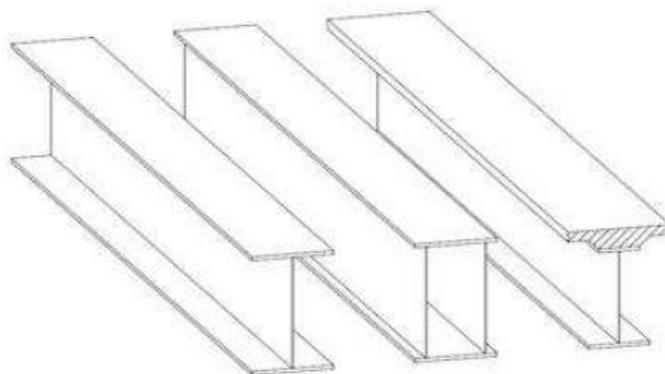


Fonte: CHAMBERLAIN, FICANHA e FABEANE, 2013.

4.4 PERFIS SOLDADOS

Perfil constituído por chapas de aço estrutural, unidas por soldagem, de forma a suprirem as limitações impostas pelos perfis laminados e atender as necessidades do comprador, desde que respeitem as relações altura/largura prevista na norma NBR 5884.

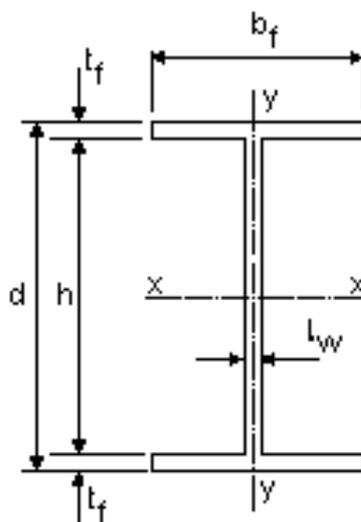
Figura 7 - Perfis soldados



Fonte: CHAMBERLAIN, FICANHA e FABEANE, 2013.

De acordo com a norma, as principais relações altura/largura (d/b_f) são:

Figura 8 - Dimensões de perfil soldado



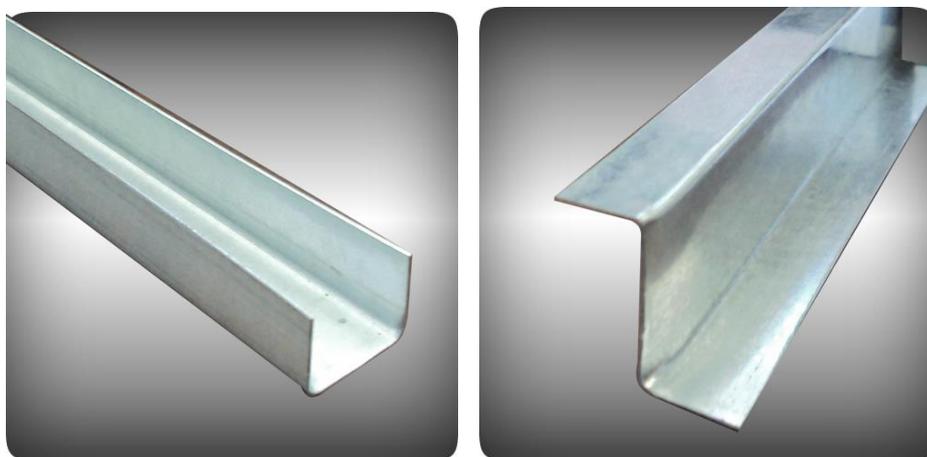
Fonte: Portal Metálica [6].

- Série CS: para colunas, com relação $(d/b_f) = 1$;
- Série CVS, para colunas e vigas, com relação $1 < (d/b_f) \leq 1,5$;
- Série VC: para vigas, com relação $1,5 < (d/b_f) \leq 4$;
- Série PS: para perfis soldados que não estejam nas séries anteriores.

4.5 PERFIS FORMADOS A FRIO

Perfis padronizados com algumas formas como L (cantoneira), U, Z, e suas respectivas variáveis, podem oferecer grande liberdade de criação, seguindo alguns critérios, como raios mínimos para evitar formação de fissuras. Também conhecidos como perfis de chapa dobrada, por ser esse o processo de geração das formas dos perfis.

Figura 9 - Perfis formados a frio

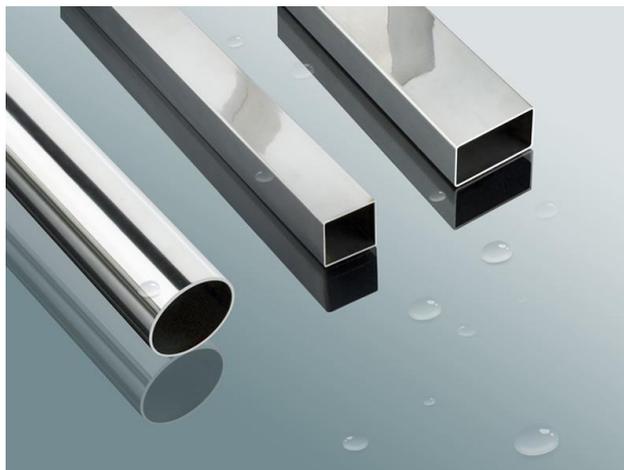


Fonte: Perfitassi Perfis Metálicos [7].

4.6 TUBOS

Produtos ocos, de seção retangular (sendo a quadrada uma variante desta) ou redonda. Podem ser produzidos soldando chapas dobradas, sendo chamados de tubos com costura, ou através de laminadores como os perfis, chamados tubos sem costura. Encontrados em diversos valores de diâmetro entre 6,3mm até 250mm e com várias espessuras para cada diâmetro, como mostra o exemplo da Tabela 8.

Figura 10 - Tipos de tubos



Fonte: Manutenção e Suprimentos [8].

Tabela 8 - Tubos redondos

Bitolas D		Espessura da parede mm	Peso teórico barra 6m
pol	mm		
1/4"	6,30	0,90	0,719
		1,20	0,906
5/16"	7,94	0,75	0,797
		0,90	0,937
		1,20	1,197
		1,50	1,429
3/8"	9,52	0,75	0,973
		0,90	1,148
		1,20	1,477
		1,50	1,780
13/32"	10,00	0,90	1,212
		1,20	1,562
		1,50	1,886
1/2"	12,70	0,75	1,326
		0,90	1,571
		1,20	2,042
		1,50	2,486
5/8"	15,87	0,75	1,678
		0,90	1,992
		1,20	2,604
		1,50	3,189
		1,90	3,927
		2,00	4,104

Fonte: Catálogo Tubos Oliveira.

5 ESTRUTURAS METÁLICAS

Segundo Dias (1998), existe uma variedade de tipos de estruturas que podem ser realizadas com aço estrutural. Podemos citar estruturas metálicas nos seguintes tipos:

- Estruturas de armazenagem;
- Estruturas de edifícios de múltiplos andares;
- Estruturas de galpões;
- Estruturas de obras de arte;
- Estruturas espaciais;
- Estruturas estaiadas ou tencionadas.
- Estruturas reticuladas;
- Estruturas tubulares;

Figura 11 - Estruturas metálicas de armazenagem e de obra de arte



Fonte: SA Gondolas [9]; Flickriver [10].

Figura 12 - Estruturas metálicas de edifício



Fonte: SGE [11].

Neste trabalho será enfatizada a estrutura de galpões. Galpões são espaços amplos sob a mesma cobertura, geralmente destinados à utilização comercial, industrial ou agrícola.

Os galpões metálicos mostram-se especialmente indicados nos casos onde há necessidade de grandes vãos, dispondo de uma área livre para trabalho ou maquinário maior, além da disponibilidade de adaptações, ampliações, reformas e mudança de ocupação de edifícios.

O sistema de galpões metálicos é perfeitamente compatível com qualquer tipo de material de fechamento, tanto vertical como horizontal, admitindo desde os mais convencionais como tijolos e blocos, componentes pré-moldados até fechamento metálico.

5.1 GALPÃO METÁLICO

Neste subitem do capítulo 5 são apresentados e comentados os principais elementos integrantes de um galpão com estrutura de aço. Esse tipo de estrutura pode apresentar várias concepções, variando a quantidade de águas de telhado (conceito que diz respeito ao número de planos inclinados que possui um telhado, cada direção

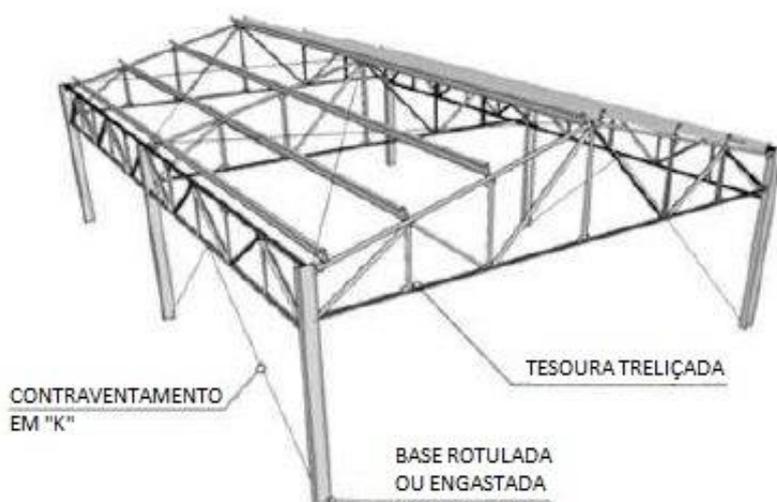
joga a água da chuva que cai sobre ele para um lado), tipo de vigas de cobertura, ser ou não geminado, tipo de treliça dos elementos, o fato de conter viga de rolamento ou não, dentre outros.

Figura 13 - Galpão metálico em pórtico de alma cheia



Fonte: CHAMBERLAIN, FICANHA e FABEANE, 2013.

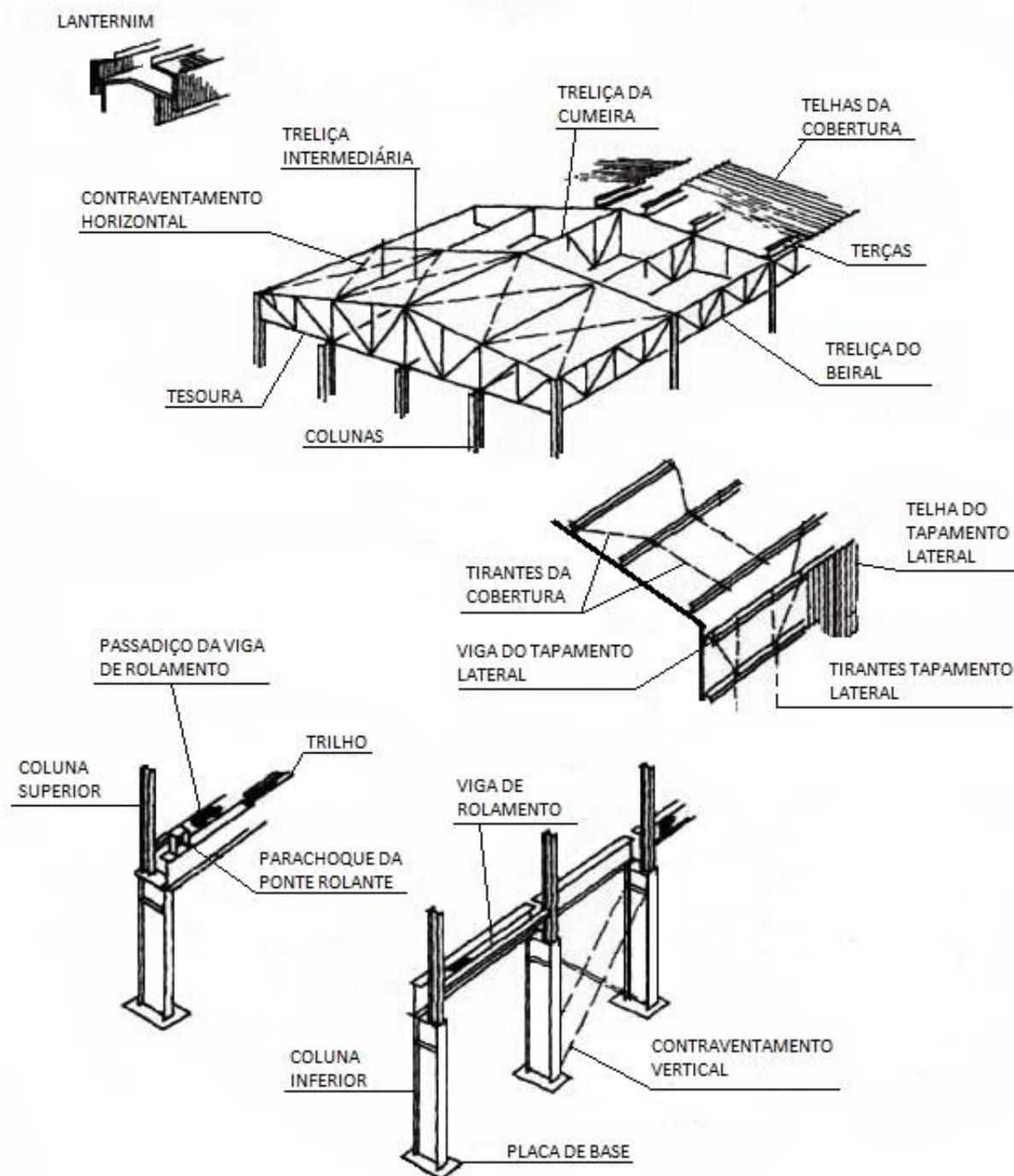
Figura 14 - Galpão metálico com tesoura treliçada



Fonte: CHAMBERLAIN, FICANHA e FABEANE, 2013.

De acordo com o Centro Brasileiro de Construção em Aço, o tipo mais comum de galpão apresenta apenas um vão transversal, viga de rolamento e cobertura com duas águas.

Figura 15 - Elementos de galpão



Fonte: Editado pelo autor, 2015.

5.1.1 CHUMBADORES

Chumbador é um sistema de fixação, utilizado para prender algo em uma superfície. Podem ser do tipo mecânico ou químico, que diferem no sistema utilizado para manter a fixação.

Em estruturas de galpões, o tipo usualmente utilizado é o mecânico. Consiste em barras de aço trabalhadas que tem a função de fixar a base das colunas nas fundações, normalmente feitas de concreto. As barras são posicionadas antes da concretagem da fundação, e ficam fixadas na estrutura após o endurecimento do concreto, garantindo a fixação da estrutura metálica.

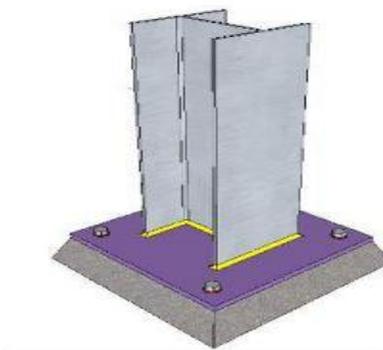
Figura 16 - Tipos de chumbadores



Fonte: Patison [12].

5.1.2 PLACAS DE BASE

Segundo Bellei (2010), as placas de base são responsáveis por fixar os chumbadores às colunas, além de atender e transmitir esforços provenientes da estrutura para os chumbadores e fundação.

Figura 17 - Placas de base

Fonte: MARCON, Construmetal 2015.

5.1.3 COLUNAS

Colunas são elementos ou conjuntos verticais destinados a receber esforços das estruturas correspondentes das vigas, piso, cobertura, sobrecargas e etc, e transferi-los para outros elementos como as fundações. São dimensionados de forma a resistir principalmente compressão e flambagem.

Figura 18 - Colunas metálicas

Fonte: Prefeitura de Dourado [13].

5.1.4 VIGAS

Vigas são elementos ou conjuntos destinados a receber esforços de estruturas como lajes, sobrecargas, coberturas entre outros, e transmiti-los para elementos como as colunas. Em estruturas de cobertura de galpões metálicos, são classificadas como terças ou tesouras.

Figura 19 - Vigas metálicas



Fonte: Portal Metálica [14].

5.1.5 TESOURAS

Tesouras são estruturas planas, formada por um ou mais componentes a fim de criar uma estrutura rígida, normalmente de forma triangular. São as vigas principais da estrutura de cobertura, recebendo as cargas do peso próprio, das terças, vento, cobertura, e sobrecargas como água da chuva. Essa estrutura é capaz de suportar grandes cargas ou vãos, sem auxílio de paredes internas.

Figura 20 - Tesouras metálicas



Fonte: Serralheria JM Kurten [15].

5.1.6 TERÇAS

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009) terças são vigas horizontais, colocadas perpendicularmente às tesouras com a finalidade de dar suporte às chapas de cobertura. São dimensionadas para suportar seu peso próprio, a ação dos ventos, estrutura de cobrimento e eventuais sobrecargas.

Figura 21 - Terças metálicas



Fonte: ConstruEficiência [16].

5.1.7 LIGAÇÕES

De acordo com a NBR 8800, as ligações em estruturas metálicas são compostas pelos elementos de ligação e os meios de ligação.

- ELEMENTOS DE LIGAÇÃO

Elementos de ligação são peças utilizadas para unir dois ou mais elementos de uma estrutura, possibilitando que os esforços de uma peça sejam transmitidos de forma correta e segura para a próxima.

Figura 22 - Elementos de ligação



Fonte: MARCON, Construmetal 2015.

Caso não sejam executados da maneira correta podem gerar esforços secundários, não previstos no dimensionamento, e comprometer a estrutura. Entre os cuidados que devem ser tomados podemos citar o formato do elemento, posicionamento de furos e de soldas, assim como localização no conjunto.

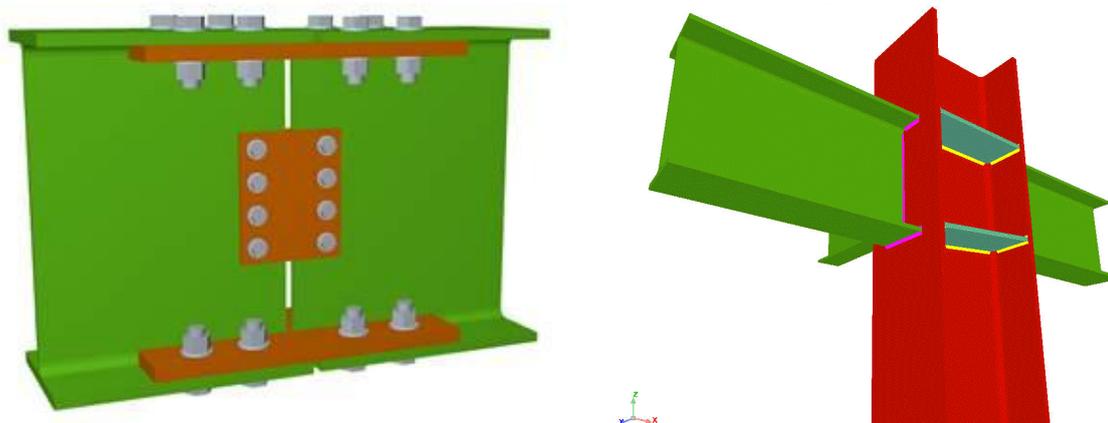
- MEIOS DE LIGAÇÃO

Meios de ligação são os elementos que promovem a união entre as partes da estrutura. Em estruturas metálicas os meios de ligação são principalmente as soldas e os parafusos.

As ligações soldadas resultam em peças e estruturas mais leves e com ligações mais simples, gerando economia de material. Porém esse meio de ligação requer cuidados como profissionais especializados, proteção contra intempéries e equipamentos específicos para garantir a qualidade do trabalho. Por isso são preferencialmente realizadas nas instalações da indústria, e posteriormente encaminhadas até o canteiro de obras, o que inviabiliza peças com dimensões muito grandes.

As ligações parafusadas são utilizadas para as montagens em campo, facilitando o serviço do trabalhador. Possibilita a desmontagem caso necessário, e o transporte de peças separadas. Existe também a vantagem em relação à retração do material, que por não ser um elemento único e rígido, permite certa maleabilidade.

Figura 23 - Meios de ligação



Fonte: Multiplus Softwares Técnicos [17].

5.1.8 CONTRAVENTAMENTOS

Segundo Bellei (2010), contraventamentos são peças utilizadas para garantir a estabilidade do conjunto durante sua montagem e vida útil.

Quando se projeta uma estrutura, as maiores cargas são as verticais, de peso próprio e sobrecargas. Em edificações altas ou construídas com elementos estruturais esbeltos, como em estruturas metálicas, os efeitos de vento ou de outras cargas horizontais eventuais tornam-se consideráveis e devem ser resistidas pelo contraventamento.

São classificados como contraventamentos horizontais e verticais, segundo seu posicionamento e função na estrutura.

- CONTRAVENTAMENTO HORIZONTAL

Geralmente encontrados no plano das terças, tesouras ou vigas. Funcionam, como dito, para garantir estabilidade, distribuindo cargas de ventos ou impactos ocasionais, como por exemplo, a movimentação de uma ponte rolante.

- CONTRAVENTAMENTO VERTICAL

Já os contraventamentos verticais encontram-se no plano das colunas. São responsáveis pela transmissão das cargas de ventos e ocasionais até as fundações, além de garantir estabilidade.

5.1.9 CHAPAS DE FECHAMENTO E COBERTURA

Chapas que envolvem a estrutura, a fim de proteger a estrutura e interior de intempéries como ventos, chuvas e em alguns casos fornecer isolamento térmico.

Normalmente são utilizadas chapas de aço galvanizado ou alumínio, por serem materiais leves e resistentes que podem receber tratamento ou pintura para evitar patologias. Possuem também uma boa comunicação com a estrutura, facilitando a montagem.

Figura 24 - Chapas de cobertura e fechamento



Fonte: Freire Rosa Engenharia [18].

6 ETAPAS DE EXECUÇÃO

6.1 PROJETO

6.1.1 ANTEPROJETO

Trata-se da primeira etapa da obra que se deseja realizar. Normalmente esta etapa é executada por arquitetos, projetistas ou engenheiros que tenham conhecimento no tipo de obra a ser concebida.

Consiste no levantamento da infraestrutura que a obra necessitará, quantificação do tempo e orçamento do projeto, com a finalidade de criar um plano para que o gestor possa conduzir o progresso da equipe e da obra.

- Determinam-se os objetivos do projeto;
- Lista-se a maioria do trabalho que precisa ser feito para atingir esses objetivos;
- Identificam-se os recursos necessários para executar cada elemento de cada tarefa;
- Definem-se as dependências entre tarefas;
- Cria-se um cronograma do projeto;
- Estipula-se um custo final para obra.

Conforme Dias (1998), é importante que o projeto de estrutura em aço comece a ser pensado com os conceitos inerentes ao material. Também é relevante analisar as possibilidades de padronização das peças, pois como todo sistema industrializado, a repetição torna o processo mais barato. Outro ponto importante é decidir se a estrutura ficará aparente ou revestida, já que expor o aço pode influenciar na necessidade de proteção contra corrosão e fogo.

6.1.2 PROJETO BÁSICO

Neste ponto se inicia o desenvolvimento dos projetos estruturais, visando adaptar o projeto arquitetônico à concepção estrutural mais adequada. Através de criteriosos cálculos, o dimensionamento da estrutura proporciona ao cliente ganhos como: rapidez na execução da obra, economia de investimentos em materiais excedentes.

São definidos os esforços atuantes, tipos de perfis a serem empregados, os comprimentos e características geométricas das seções transversais e longitudinais do galpão, tipos de ligações, esforços atuantes em pontos importantes da estrutura, quantidade estimada de aço, entre outros, como veremos detalhadamente no capítulo 7, através de um estudo de caso.

Ao final, são elaborados desenhos com representação da definição estrutural de acordo com o nível desejado de detalhes.

6.1.3 DESENHOS DE FABRICAÇÃO

Depois de planejamento adequado e definido o projeto básico, é iniciada a elaboração dos desenhos de fabricação. Por questão de confiabilidade, todo desenho de detalhe é elaborado, ou pelo menos verificado, por um projetista experiente antes de ser enviado para aprovação ou fabricação.

O desenho de fabricação tem por finalidade detalhar as peças da estrutura e suas ligações a fim de facilitar a visualização e, por consequência, a fabricação das mesmas.

Também conhecido por desenho de detalhe ou croqui, os desenhos de fabricação devem mostrar ao operário todas as informações para fabricação da peça como comprimentos das peças, localizações de dobras, chanfros, furos, parafusos, soldas e etc. para que sejam realizados da forma mais econômica e correta possível.

Segundo Dias (1998), nesta etapa, toda peça recebe uma determinada marca de identificação, que vai aparecer também no diagrama de montagem, para que possa ser identificada na montagem final.

6.1.4 DIAGRAMA DE MONTAGEM

Assim como os desenhos de fabricação, os diagramas de montagem são representações gráficas das peças da estrutura, mas por sua vez, não são representadas individualmente e sim montadas no conjunto ou na estrutura que formarão.

São disponibilizados para a empresa ou equipe encarregada pela montagem, com as marcas de identificação das peças, seu posicionamento, elementos e meios de ligação, entre outros, o que ajuda na escolha do método de montagem, na sequência de operações, equipamentos que serão necessários e os tempos necessários para cada ação.

6.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Segundo Bellei (2010) a montagem no campo obterá o resultado satisfatório caso haja compatibilidade rigorosa das dimensões de peças e furações com as medidas indicadas nos croquis, dentro das tolerâncias previstas em normas além da determinação dos melhores procedimentos de fabricação para os elementos estruturais, acompanhamento de sua evolução na oficina e correção dos processos quando necessário.

As etapas de fabricação sofrem algumas variações de fabricante para fabricante, as principais estão abordadas a seguir.

6.2.1 SUPRIMENTO

São elaboradas listas de materiais em função dos desenhos de projeto, permitindo providenciar com antecedência a quantidade de material necessário, seja pela verificação do estoque disponível, seja pela sua aquisição junto aos fornecedores, para não ocasionar nenhum atraso na fabricação das peças estruturais e conseqüentemente na entrega da estrutura.

Ao receber materiais, estes devem ser inspecionados de acordo com as normas vigentes quanto as suas características, qualidade e tolerância.

6.2.2 DOBRAMENTO, CALANDRAGEM E PRÉ-DEFORMAÇÃO

O dobramento das peças pode ser realizado a frio ou a quente. Para os materiais que sofrerem dobramento a frio deve-se levar em conta a resistência do material ao dobramento, ângulo e raio de dobramento, seção reta do material. Quando houver necessidade da aplicação de calor ao material para execução de dobramento, a temperatura não deverá ultrapassar os valores fornecidos pelos fabricantes ou por normas técnicas vigentes.

Calandragem é o processo de conformação pelo qual se dá forma a chapas e/ou laminados de metal, pela passagem entre rolos, conferindo-lhes assim curvatura, espessura constante e um acabamento de qualidade. No momento de ser utilizada, devem ser consideradas as mesmas recomendações adotadas no dobramento.

A pré-deformação é uma operação realizada com o objetivo de evitar a deformação provocada pelo aquecimento imposto à peça.

Figura 25 - Processos de dobra do aço

Fonte: Incase [19].

6.2.3 TRAÇAGEM

A traçagem é executada antes de se proceder à operação de usinagem, e consiste em marcar na peça os seus contornos e também inserções de retas (centro dos furos). Para traçar, o profissional utiliza ferramentas e instrumentos adequados como o riscador, a ferramenta mais básica da traçagem, que é uma espécie de estilete com pontas temperadas e aguçadas, para que risque o metal da peça a ser trabalhada e o traçado possa ser claramente visível.

Figura 26 - Traçagem

Fonte: Diário do Aço [20].

6.2.4 CORTES

Os processos usuais de corte para construção metálica são basicamente executados a calor ou mecânico. A escolha do método depende da complexidade do trabalho, tipo de material utilizado ou etapa da fabricação em que será realizado.

Podem ser executados cortes automaticamente através de informações via computador. Alguns fabricantes utilizam máquinas de controle numérico via computador, CNC (com comando numérico computadorizado), o que elimina a necessidade de gabaritos em tamanho natural e possíveis erros de mão-de-obra.

- CORTE A CHAMA

Conhecido como Oxicorte, o corte a chama é o processo de separação de metais utilizando-se calor e uma violenta reação de oxidação com oxigênio puro. O processo consiste em aplicar uma chama de aquecimento ao metal até o mesmo atingir seu ponto de ignição. Neste instante aplica-se um jato de oxigênio puro nesta área provocando a formação de óxidos líquidos do metal. Esta reação é altamente exotérmica, gerando calor que sustentará o próprio processo na sequência. A velocidade mecânica do jato de oxigênio puro promove a remoção do metal líquido separando assim a base metálica em duas partes.

Os defeitos mais comuns são provocados pela chama de pré-aquecimento inadequada; velocidade de corte irregular; superfície da chapa com ferrugem; distância do bico à chapa fora de especificação e bico de corte sujo ou danificado.

A capacidade do corte irá depender da dimensão dos equipamentos e das regulagens de pressão e vazão necessárias para a geração de calor e extração dos óxidos durante o corte. O processo pode ser manual ou mecanizado por kits portáteis ou máquinas de grande porte.

Figura 27 - Ferramentas para corte a chamas



Fonte: Harris Brastak [21]; MRT Busmar [22].

- CORTE A PLASMA

Hoje o corte a plasma é o processo de corte com maior crescimento na indústria, como excelente ferramenta para o corte de metais, em virtude da velocidade e precisão do corte.

O processo utiliza um arco transferido, confinado, para cortar metais. Este arco é estabelecido por uma corrente direta, na qual o eletrodo é conectado ao polo negativo e a peça de trabalho no positivo. Uma descarga de alta voltagem eleva consideravelmente o nível de energia, transformando o gás aquecido em gás plasma atingindo temperaturas superiores a 15000°C. O calor do arco confinado é concentrado em uma área específica da peça atingindo seu ponto de fusão. As partículas fundidas são continuamente removidas pelo jato de plasma para produzir o corte.

O processo de corte a plasma pode ser manual ou mecanizado, dependendo do material, espessura e nível de produção.

Figura 28 - Máquina de corte a plasma



Fonte: Tetraparts [23].

- CORTE A LASER

O laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) trata-se de um feixe de luz (que é energia luminosa concentrada em um raio único) que pode ser criado em diversos meios físico-químicos.

No processo ocorre a estimulação radioativa da luz, que é amplificada, produzindo um potente feixe de luz. Ao ser aplicado, esse feixe irá alterar a composição molecular da superfície do material a ser trabalhado, possibilitando, então, o corte perfeito dessa superfície.

Dentre as muitas vantagens oferecidas, é importante destacar que o corte a laser permite que as peças sejam cortadas com precisão, e quando controlados por computadores pode realizar o processo em uma só operação, poupando numerosas etapas em diversas máquinas que trabalham através de técnicas tradicionais.

Figura 29 - Máquina de corte a laser



Fonte: Nottable Metal Works [24].

6.2.5 FURAÇÃO

As especificações utilizadas para definições das ligações parafusadas são determinadas na NBR 8800.

Os furos podem ser efetuados com broca ou punção. Cerca de 80% dos furos são feitos por broca, que é uma forma de usinagem, sendo relevante a velocidade de rotação da broca, velocidade de avanço, tipo de material, etc. Nos casos da furação puncionada, deve ser levada em conta a capacidade do equipamento, espessura da chapa, diâmetro do furo e folga entre punção e matriz.

Assim como nos cortes, também podem ser realizados através de CNC (controle numérico computadorizado), isto é, controle da máquina por computador por meio de uma lista pré-programada de movimentos.

6.2.6 USINAGEM

Usinagem é todo processo mecânico onde a peça é a matéria-prima de um processo de cavaco, na prática isto significa submeter uma peça à ação de uma ferramenta, visando conferi-la forma, dimensões ou acabamento. Cavaco é a porção irregular de material da peça retirada pela ferramenta.

Existem vários processos de usinagem, entre eles serramento, aplainamento, torneamento, fresagem, brochamento, eletroerosão, jato abrasivo, entre outros.

Figura 30 - Processos de serramento e torneamento



Fonte: Usinagem Goto e Goto [25]; Monterini [26].

6.2.7 PRÉ-MONTAGEM DE FABRICA

Segundo Bellei (2010) a pré-montagem deve ser executada de forma que as dimensões das peças estejam de acordo com os desenhos de fabricação, dentro das tolerâncias previstas nas normas utilizadas.

Nessa etapa é possível constatar que as peças estão nas quantidades exatas, com os trabalhos necessários realizados e arranjados de maneira correta. Caso algum erro seja constatado, este pode ser facilmente e rapidamente corrigido, evitando a

ocorrência de imprecisões que seriam desastrosos para a montagem de campo, e de grandes atrasos no cronograma.

A parafusagem das conexões na oficina é feita com chaves manuais ou de impacto. A maioria das conexões contém parafusos usados, empregados apenas para garantir a pré-montagem. Não são os mesmos parafusos enviados para a montagem final para evitar algum dano ao parafuso que será utilizado.

A estrutura normalmente é desmontada para as próximas etapas, e permanece assim para facilitar o transporte para o local da montagem final.

Figura 31 - Pré-montagem de fábrica



Fonte: O autor, 2015.

6.2.8 CONTROLE DE QUALIDADE

O trabalho executado dentro de uma fábrica de estruturas metálicas está sujeito a diferentes métodos de inspeção executados pelo próprio fabricante a fim de evitar erros e gastos. A inspeção é executada por funcionário qualificado e certificado para exercer a função e atua paralelamente às fases do processo de fabricação. Em uma fábrica são realizadas geralmente inspeções como qualidade do aço que será

utilizado, dimensionamento das peças e dos trabalhos realizados nas mesmas, qualidade das soldas efetuadas, entre outros.

É o responsável pelo controle de qualidade que aprova ou não o trabalho de uma etapa para que esse possa seguir para a próxima, por exemplo, só depois de aprovada a pré-montagem, a estrutura pode ser desmontada e enviada para limpeza e proteção.

6.2.9 LIMPEZA E PROTEÇÃO

A limpeza da superfície metálica constitui etapa importantíssima do processo e está diretamente ligada ao bom desempenho do sistema de proteção. Ela é realizada com dois objetivos.

O primeiro e principal é a remoção de todos os materiais que possam impedir o contato direto da tinta ou revestimento com o aço. Podem ser pós, gorduras, óleos, ferrugem, cascas de laminação, resíduos de tintas e principalmente partes oxidadas. O segundo é fornecer rugosidade superficial ao substrato, contribuindo para o aumento da aderência do material de proteção.

Dentre os processos de limpeza empregados podemos citar alguns como solventes aplicados com panos; raspagem com escovas, raspadeiras ou lixadeiras; limpeza com chamas; mas o mais utilizado na indústria é a limpeza com jato abrasivo.

Este método é o mais aplicado e eficiente na preparação das superfícies, pois cumpre bem os dois objetivos da etapa, retirando as impurezas da peça, e removendo uma casca de laminação, com possíveis oxidações, gerando assim a rugosidade necessária. É utilizado um bico de jato ligado a um reservatório de areia ou granalha que é pulverizada sobre a superfície metálica, em alta velocidade, por uma tubulação de ar comprimido e um tubo maleável.

Figura 32 - Limpeza com jato abrasivo



Fonte: Aprieto Jateamento e Pintura Industrial [27].

A técnica de proteção pode ser efetuada através da galvanização (zincagem por imersão a quente) e/ou pintura, que funcionam basicamente da mesma maneira: impedindo o contato do material-base (aço), com o meio corrosivo.

As estruturas que não recebem devidas proteções sofrerão danos por corrosão durante o transporte, estocagem e montagem, antes mesmo de sua utilização, reduzindo assim o tempo útil da mesma.

Figura 33 - Pintura e galvanização



Fonte: Momsteel [28]; InfoEscola [29].

6.3 PROCESSOS DE MONTAGEM

Bellei (2010) cita que uma montagem bem elaborada requer principalmente um bom planejamento. As montagens de estruturas metálicas se caracterizam pela rapidez, precisão, adaptabilidade, confiabilidade e limpeza.

Segundo o CBCA (Centro Brasileiro de Construção de Aço), o planejamento da obra origina-se de uma listagem de todas as atividades necessárias a execução da obra, a começar pelas mais gerais. Cada atividade principal poderá ser subdividida em atividades menores, e assim cria-se um segundo nível, e assim por diante, até que se tenham detalhes suficientes, porém sem superficialidade e exagero.

Na maioria dos casos, deve-se haver um estudo para a melhor definição do processo de montagem, levando em conta os equipamentos que serão utilizados, o acesso à obra, às condições topográficas, locais e o prazo, para assim encontrar a solução mais viável e econômica. Todas as considerações contidas no planejamento de montagem devem ser levadas ao conhecimento dos montadores, juntos com os respectivos diagramas de montagem, para que se inicie o desenvolvimento das atividades.

6.3.1 EQUIPAMENTOS

Um bom planejamento de montagem envolve o conhecimento das funções e limitações das ferramentas e equipamentos disponíveis para a realização da tarefa. Fica sob a responsabilidade do engenheiro definir os equipamentos mais adequados e os sistemas de montagem que serão utilizados, visando soluções mais viáveis e econômicas possíveis.

Para a montagem de estruturas são utilizados equipamentos mecânicos e manuais que possibilitam movimentação das peças e sua fixação. Podemos citar:

- Equipamentos de içamento: utilizados para deslocar peças verticalmente, levando a peça à posição desejada. Os tipos mais comuns são gruas e guindastes;

- Equipamentos de movimentação horizontal: utilizado para movimentações horizontais, como entrega do material até o canteiro de obras, e desejavelmente, ao alcance do equipamento de içamento, evitando remanejamento. Caminhões e reboques são os mais usuais;
- Ferramentas elétricas: são aquelas que utilizam corrente elétrica para funcionar. Nos casos onde não há disponibilidade de energia elétrica, pode-se usar geradores para atender à necessidade, porém é uma alternativa mais cara. Máquinas de torque, parafusadeiras, furadeiras e esmerilhadeiras são algumas ferramentas que podem entrar nesse grupo;
- Ferramentas pneumáticas: As ferramentas pneumáticas são aquelas que funcionam por meio de ar comprimido, que é gerado por compressores que coletam o ar do ambiente de forma mecânica e aumentam sua pressão. Estão entre esse tipo de ferramentas as máquinas de torque, furadeiras, esmerilhadeiras, guinchos entre outros;
- Ferramentas manuais: Ferramentas que não necessitam de uma fonte de energia. Na montagem podemos citar o prumo, chaves de boca, talhas, nível, entre outros.

6.3.2 ESCOLHA DO PROCESSO

A escolha do processo de montagem visa sempre cumprir as definições para o orçamento, planejamento e prazo da obra. Deve-se levar em consideração os equipamentos disponíveis, condições topográficas locais, quantidade de trabalhadores necessários, acesso à obra e o tempo para cumprir cada tarefa.

É importante estar atento a vários fatores que podem influenciar na escolha do processo que será usado, como: ao porte da obra, para que gastos desproporcionais ou mão de obra excedente não ocorram; horários permitidos para trânsito de equipamentos de carga e descarga; espaço físico disponível para estocagem de peças; condições climáticas; edificações próximas, entre outros. Assim como informações sobre a estrutura: tipo de ligações em campo; utilização de almas cheias ou treliçadas; quais as peças mais pesadas; quais as peças mais longas; quantidade total de peças, etc.

6.3.3 ARMAZENAMENTO

De acordo com Dias (1998) a armazenagem está diretamente ligada com a movimentação ou transporte de carga. Um método adequado de armazenagem permite diminuir os custos de operação e acelera o ritmo dos trabalhos.

É primordial manter responsáveis pela armazenagem, atualizados com a situação das peças e com a evolução da obra. Eles podem prever necessidades de mudança do local de armazenagem, evitando grandes deslocamentos de maquinários; organizar as peças de forma que, as que serão continuamente utilizadas, sejam facilmente localizadas; evitar falta de peças e assim a paralisação da montagem; garantir a integridade do material, evitando deterioração ou tensões indesejadas dos materiais.

6.3.4 LIGAÇÕES EM CAMPO

O processo de parafusagem é muito utilizado na montagem de campo devido a sua facilidade de execução. Segundo Bellei (2010) é de extrema importância que o montador qualificado conheça as considerações de utilização do parafuso, para que dê o aperto ou torque adequado especificado por normas técnicas.

Os furos destinados a parafusos não devem ter folgas não definidas previamente ou serem alargados em campo. Os parafusos não podem apresentar qualquer matéria estranha que possa prejudicar o perfeito assentamento. Caso haja erros grosseiros de concordância o material deverá ser rejeitado e devolvido a fabricação.

As execuções de soldas são preferencialmente realizadas nas fábricas, devido ao maior controle de qualidade. Quando necessário que ocorra na obra, as ligações devem ser totalmente limpas e isentas de qualquer impureza, óleo ou graxa. Devem ser especificadas em projeto nos diagramas de montagem, onde estarão estabelecidos a localização das conexões soldas, o tamanho ou tipo de eletrodo, o tipo de junta, necessidade de pré-aquecimento, etc.

6.3.5 SEQUÊNCIA DE MONTAGEM

Para iniciar as atividades de montagem da estrutura, a movimentação de terra deve estar pronta assim como a execução das fundações já dimensionadas e posicionadas de acordo com os cálculos estruturais e os desenhos de montagem.

A principal preocupação durante a montagem é manter a estabilidade da estrutura. Muitas estruturas desmoronam devido a falta do entendimento das exigências de estabilidade. As tensões podem ser invertidas durante a montagem e comprometerem a estabilidade da estrutura, podendo levá-la ao colapso.

Como já mencionado, em construções de constituição linear como os galpões, a estabilidade longitudinal é feita pelos contraventamentos verticais e a estabilidade no plano horizontal pelos contraventamentos dos planos das terças ou das tesouras. Porém, antes que estejam montados, a estabilidade da estrutura deverá ser garantida com a utilização de estais provisórios. É importante garantir que os estais não fiquem em posição sujeitos a choques de veículos e equipamentos, o que poderia levar a estrutura à ruína. Em colunas de grande altura, deverão ser utilizados elementos provisórios, até que as estruturas sejam interligadas, propiciando o travamento e estabilidade.

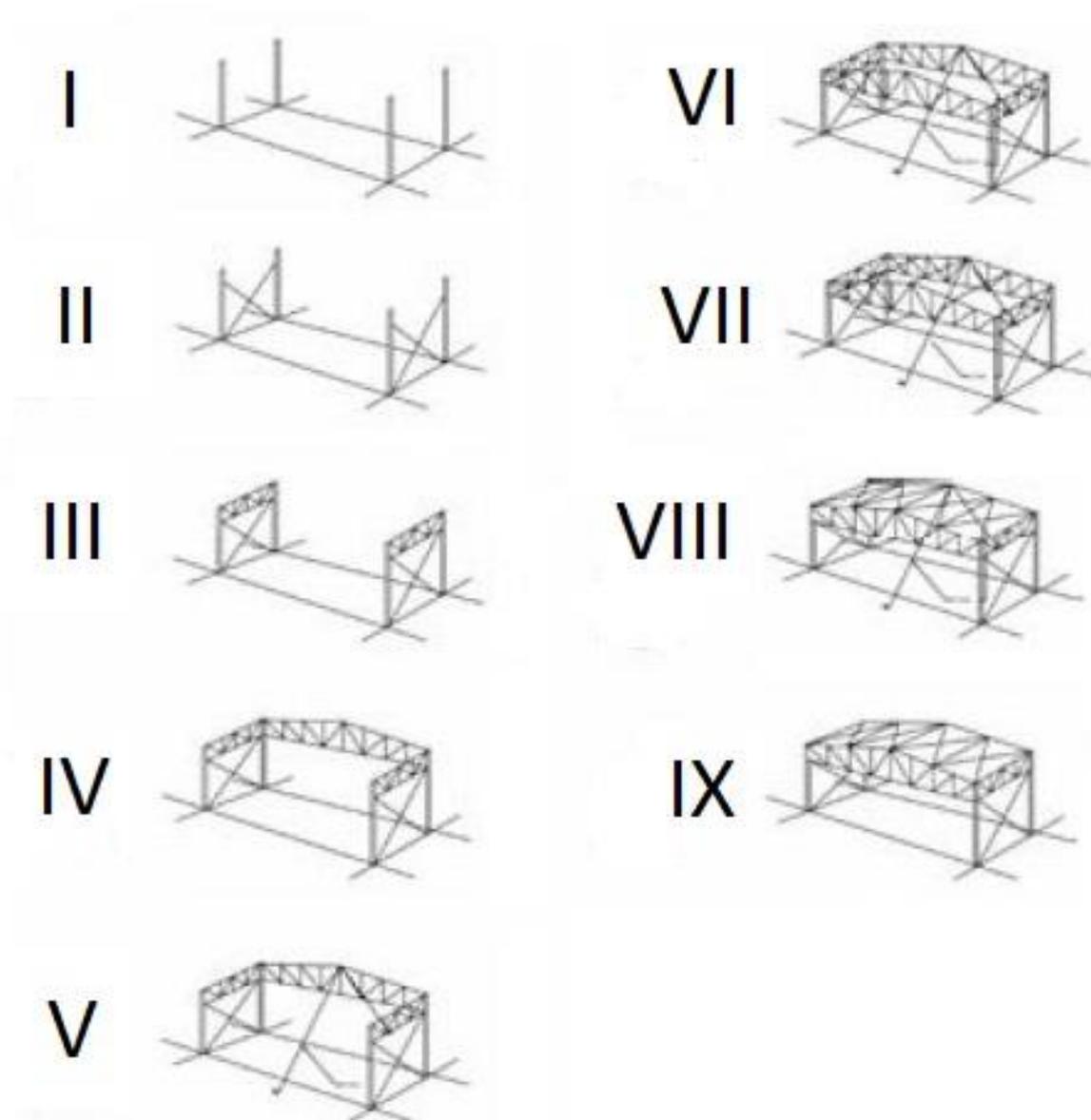
Segundo Bellei (2010) talvez seja necessário aplicar contraflechas durante o processo de montagem, isto ocorre geralmente em treliças ou vigas de rolamento que excedam vãos de 20 metros. Contraflecha é o deslocamento vertical intencional aplicado nas vigas, por meio do escoramento, contrário ao sentido da flecha formando, assim, uma 'barriga invertida' no elemento estrutural que retorna à posição horizontal após a retirada do escoramento.

Segue um roteiro de montagem como forma de garantir a estabilidade da estrutura:

- I. Montagem das colunas do vão de contraventamento;
- II. Montagem dos contraventamentos verticais;
- III. Montagem das vigas de interligação entre as colunas;
- IV. Montagem da tesoura entre as colunas do primeiro eixo;
- V. Estaiamento dessa tesoura;

- VI. Montagem da segunda tesoura;
- VII. Interligação da primeira e segunda tesouras com as terças de cobertura;
- VIII. Montagem dos contraventamentos do plano de cobertura;
- IX. Remoção dos estais, montagem dos demais eixos repetindo a seguinte sequencia no vão vizinho.

Figura 34 - Sequência de montagem



Fonte: Editado pelo autor, 2015.

7 ESTUDO DE CASO – DIMENSIONAMENTO DE COBERTURA

O estudo de caso apresenta uma análise de dimensionamento de perfis metálicos, utilizados em cobertura de galpões para uso gerais, servindo como modelo de cálculo para as instalações com características semelhantes.

Como dito anteriormente, o trabalho apresenta rotinas de cálculo, que no cotidiano do projetista, são simplificadas através de suas experiências anteriores ou de processos automatizados.

Este trabalho foi baseado nas normas NBR 8800 e NBR 6123, e segue o Sistema Internacional de Unidades (SI) de medidas.

Serão dimensionados os perfis das telhas, terças, tirantes, contraventamentos e vigas de cobertura.

7.1 CARACTERÍSTICAS DO GALPÃO

Será considerado para estudo de caso um galpão projetado para a região central do estado do Paraná, cujo projeto encontra-se no Anexo A, com as seguintes características:

- Galpão com uma água, com inclinação do telhado de 3°;
- Viga principal em alma cheia;
- Vão transversal com 5,76 m;
- Vão longitudinal com 6,25 m;
- Galpão sem ponte rolante;
- Altura de 5 m;
- Comprimento total do edifício 12,5 m;
- Materiais utilizados: telhas trapezoidais com altura de onda 40 mm e 0,65 mm de espessura de aço galvanizado; aço A 572-G50 nas vigas principais; e aço A-36 para os outros componentes.

A escolha do projeto levou em consideração o tipo de galpão. Foi escolhido um diferente do modelo básico e mais utilizado, facilmente encontrado em exemplos e estudo de casos.

Nem todas as informações contidas no trabalho estão disponíveis nos projetos fornecidos, de forma que foram obtidas através de consulta ao memorial descritivo disponibilizado pelos responsáveis pela obra.

7.2 CARGAS ATUANTES NA ESTRUTURA

De acordo com a NBR 8800, Anexo B, as cargas atuantes na estrutura do galpão são: cargas permanentes, cargas acidentais e cargas devido ao vento.

7.2.1 CARGAS PERMANENTES (CP)

Formada pelo peso próprio dos elementos constituintes da estrutura que está sendo analisada, incluindo peso de materiais de acabamento, equipamentos e instalações permanentes suportados pela mesma.

Segundo Bellei (2010), a carga permanente é uma carga vertical, e deve ser avaliada por partes, à medida que se dimensionam as peças.

No caso estudado não existem equipamentos ou instalações suportadas pela estrutura, sendo o peso próprio composto apenas pelo peso dos componentes da cobertura.

7.2.2 CARGAS ACIDENTAIS (CA)

São cargas uniformemente distribuídas atuando sobre a projeção horizontal da cobertura. A prática usual por projetistas ou empresas, em galpões de pequeno e

médio porte, é de adotar sobrecargas de $0,15 \text{ kN/m}^2$ para cobrir o acúmulo de poeira, sujeira ou água das chuvas.

A NBR 8800 prevê uma sobrecarga mínima de $0,25 \text{ kN/m}^2$ para coberturas, que será utilizada no estudo de caso.

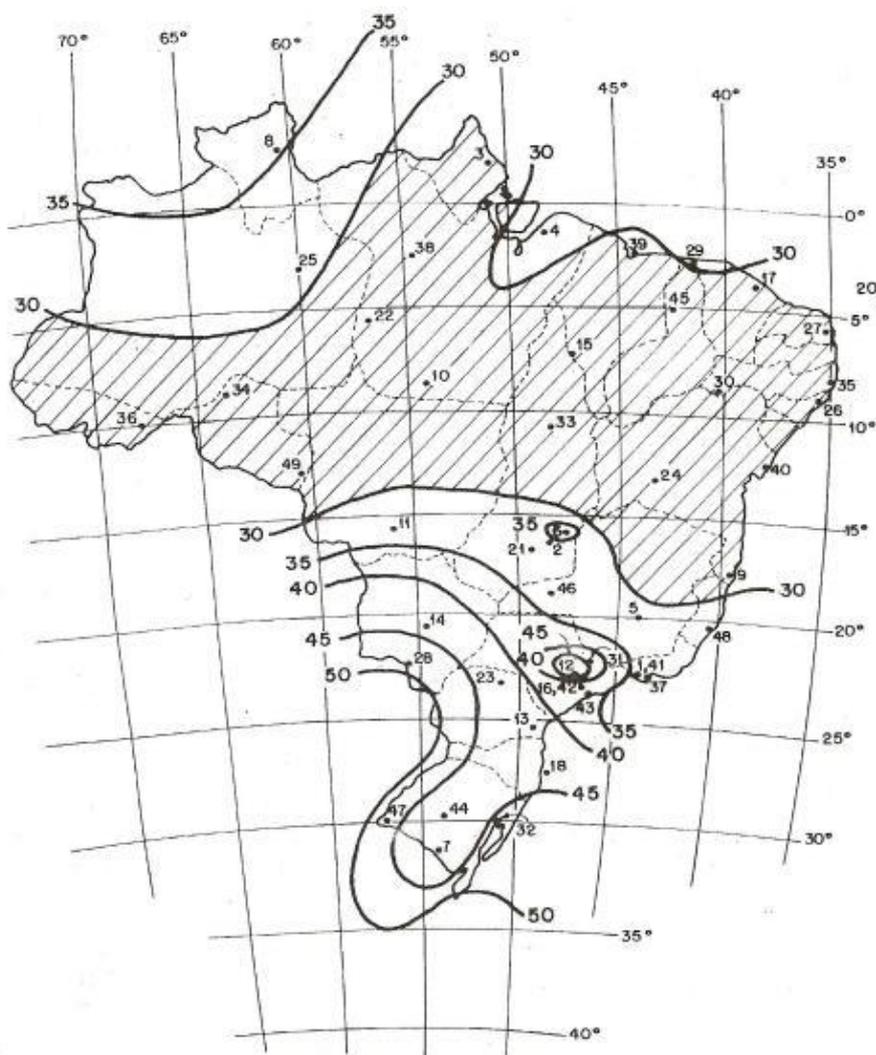
7.2.3 CARGAS DEVIDO AO VENTO (CV)

A ação do vento nas estruturas metálicas é uma das mais importantes a considerar, principalmente se não houver ações de ponte rolante, devido ao fato de ser uma estrutura relativamente leve. O descuido na avaliação dessas cargas pode colocar toda estrutura em colapso.

A ação do vento sobre estrutura será calculada de acordo com a NBR 6123, que apresenta os seguintes conceitos:

- Velocidade básica do vento (V_0): velocidade de uma rajada de três segundos de duração ultrapassada em média uma vez em cada 50 anos, que representa a vida útil de uma edificação. O valor é determinado através do gráfico das isopletas da velocidade básica com intervalos de 5 m/s (Figura 35). Para o estudo de caso, o valor adotado foi de $V_0 = 42 \text{ m/s}$. Valor obtido por interpolação, correspondente a região central do Paraná;

Figura 35 - Mapa de isopletas das velocidades básicas



Fonte: NBR 6123:1988.

- Fator topográfico (S_1): fator que considera as grandes variações na superfície do terreno como acelerações encontradas perto de colinas ou proteções conferidas por vales profundos. No projeto o valor adotado foi $S_1=1$, correspondente a terreno plano ou fracamente acidentado;
- Fator rugosidade (S_2): o fator rugosidade considera o efeito de três parâmetros combinados. Os efeitos são as condições da vizinhança da construção, a altura acima do terreno que se encontra e as dimensões da edificação. Considerando as características da obra utilizada no estudo,

adotou-se $S_2 = 0,74$ (Categoria V - terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados; Altura de 5 metros; Classe A - toda edificação na qual a maior dimensão não exceda 20 m;

Tabela 9 - Fator rugosidade (S_2)

H (m)	CATEGORIA														
	I			II			III			IV			V		
	CLASSE			CLASSE			CLASSE			CLASSE			CLASSE		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
<= 5	1.06	1.04	1.01	0.94	0.92	0.89	0.88	0.86	0.82	0.79	0.76	0.73	0.74	0.72	0.67
10	1.10	1.09	1.06	1.00	0.98	0.95	0.94	0.92	0.88	0.86	0.83	0.80	0.74	0.72	0.67
15	1.13	1.12	1.09	1.04	1.02	0.99	0.98	0.96	0.93	0.90	0.88	0.81	0.79	0.76	0.72
20	1.15	1.14	1.12	1.06	1.04	1.02	1.01	0.99	0.96	0.93	0.91	0.88	0.82	0.80	0.76
30	1.17	1.17	1.15	1.10	1.08	1.06	1.05	1.03	1.00	0.98	0.96	0.93	0.87	0.85	0.82
40	1.20	1.19	1.17	1.13	1.11	1.09	1.08	1.06	1.04	1.01	0.99	0.96	0.91	0.89	0.86
50	1.21	1.21	1.19	1.15	1.13	1.12	1.10	1.09	1.06	1.04	1.02	0.99	0.94	0.93	0.89
60	1.22	1.22	1.21	1.16	1.15	1.14	1.12	1.11	1.09	1.07	1.04	1.02	0.97	0.95	0.92
80	1.25	1.24	1.23	1.19	1.18	1.17	1.16	1.14	1.12	1.10	1.08	1.06	1.01	1.00	0.97
100	1.25	1.26	1.25	1.22	1.21	1.20	1.18	1.17	1.15	1.13	1.11	1.09	1.05	1.03	1.01
120	1.28	1.28	1.25	1.24	1.23	1.22	1.2	1.2	1.18	1.16	1.14	1.12	1.07	1.06	1.04
140	1.29	1.29	1.28	1.25	1.24	1.24	1.22	1.22	1.2	1.18	1.16	1.14	1.10	1.09	1.07

Fonte: NBR 6123:1988.

- Fator estatístico (S_3): considera o grau de segurança requerido e a probabilidade de 63% da velocidade básica seja igualada ou excedida durante a vida útil da edificação. Por se tratar de uma edificação e instalação industrial com baixo fator de ocupação, estipula-se $S_3 = 0,95$. Já para os elementos de vedação (telhas), o valor é $S_3 = 0,88$.
- Pressão dinâmica (q): corresponde a velocidade do vento, em condições normais de pressão e temperatura, adequada ao local onde a estrutura será construída:

$$q = 0,613 \cdot (V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3)^2$$

Assim teremos para pressão dinâmica atuante nas paredes (q_1) e na cobertura (q_2):

$$q_1 = 0,613 \cdot (42.1.0,74.0,95)^2$$

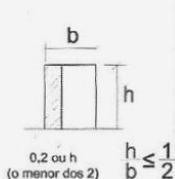
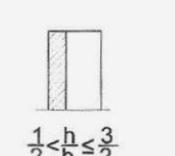
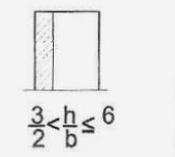
$$q_1 = 534,4 \text{ N/m}^2$$

$$q_2 = 0,613 \cdot (42.1.0,74.0,88)^2$$

$$q_2 = 458,5 \text{ N/m}^2$$

- Coeficientes de pressão e forma (C_{pe} e C_e) externos para paredes: coeficiente utilizado para determinar a força do vento sobre um elemento. É determinado pela tabela 4 da NBR6123, através de valores pré-determinados para diferentes dimensões da edificação.

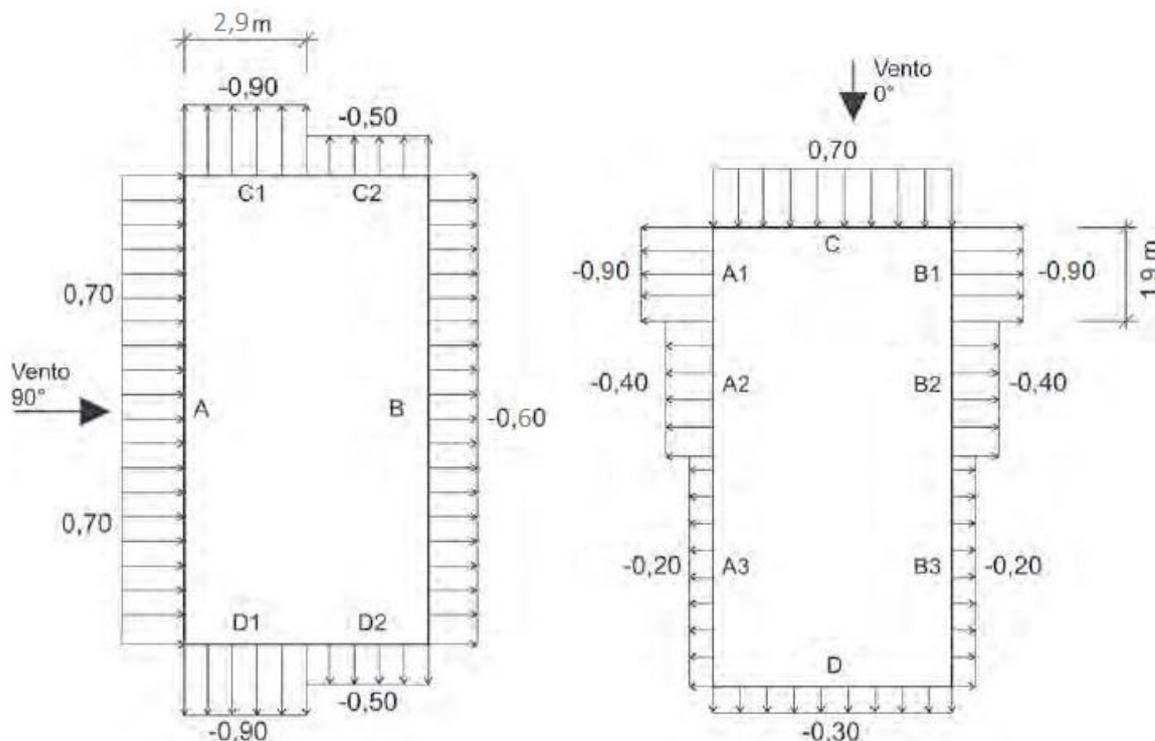
Tabela 10 - Coeficientes de pressão e forma para paredes

Altura relativa		Valores de C_e para								C_{pe} médio 
		$\alpha = 0^\circ$				$\alpha = 90^\circ$				
		A_1 e B_1	A_2 e B_2	C	D	A	B	C_1 e D_1	C_2 e D_2	
	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,8	-0,5	+0,7	-0,4	+0,7	-0,4	-0,8	-0,4	-0,9
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-0,8	-0,4	+0,7	-0,3	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,0
	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,9	-0,5	+0,7	-0,5	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,1
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-0,9	-0,4	+0,7	-0,3	+0,7	-0,6	-0,9	-0,5	-1,1
	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-1,0	-0,6	+0,8	-0,6	+0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-1,0	-0,5	+0,8	-0,3	+0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2

Fonte: NBR 6123:1988.

Neste estudo temos $h/b = 0,87$ e $a/b = 2,17$. Logo teremos para C_e :

Figura 36 - Coeficientes de forma aplicados neste estudo

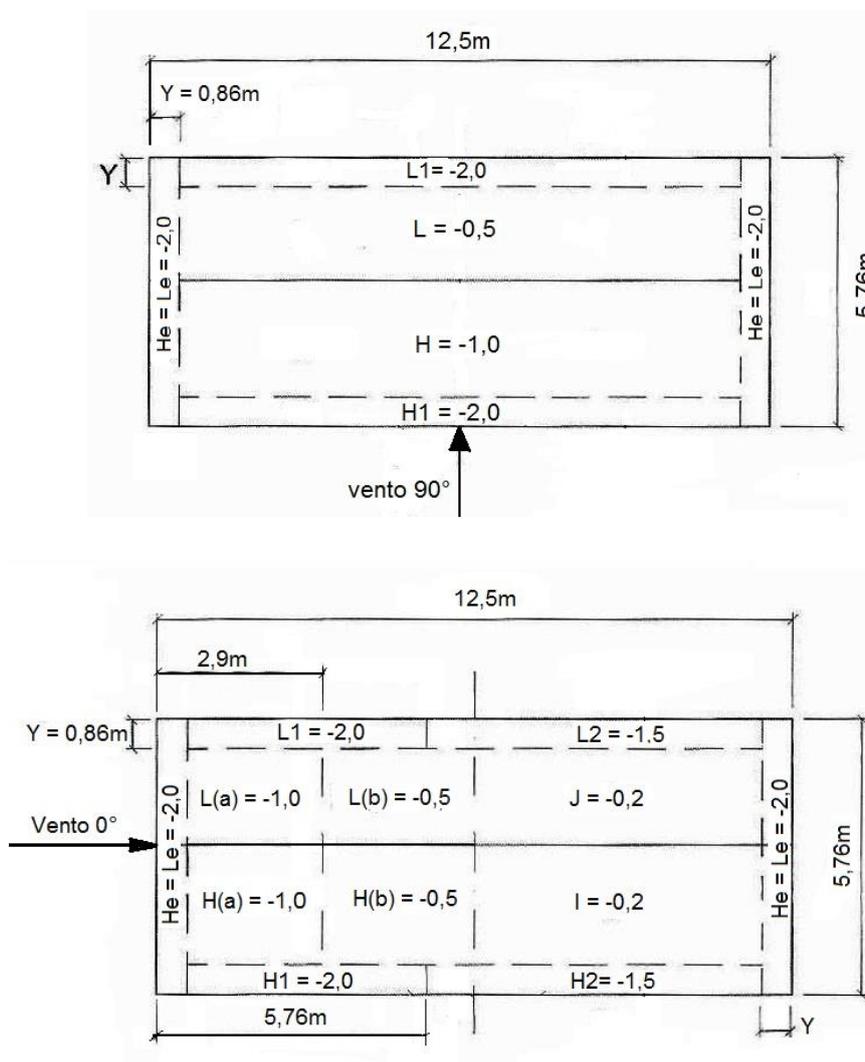


Fonte: Editado pelo autor, 2015.

E valor de C_{pe} médio = -1,1, o qual será usado para os cálculos de dimensionamento das vigas principais por ser o valor mais nocivo. Seria importante para o cálculo das vigas, contraventamento e fechamento lateral, caso fossem parte do estudo.

- Coeficientes de pressão externo e interno (C_{pe} e C_{pi}) e forma (C_e) para telhados: a força do vento depende da diferença de pressão nas faces interna e externa que gera na edificação. Os valores dos coeficientes e local onde atuam são dados pela tabela 5 da NBR 6123, diferenciando-os de acordo com as características da estrutura. Empregando as informações do galpão utilizado no estudo teremos:

Figura 37 - Coeficientes de forma para telhados



Fonte: Editado pelo autor, 2015.

E valor de C_{pe} médio = -2,0, o qual será usado para os cálculos de dimensionamento das telhas, terças, tirantes, contraventamentos e vigas principais por ser o valor mais nocivo.

- O valor do coeficiente de pressão interno é definido no item 6.2.5.b da NBR 6123, sendo $C_{pi} = -0,3$ ou $C_{pi} = 0$ (mais nocivo).

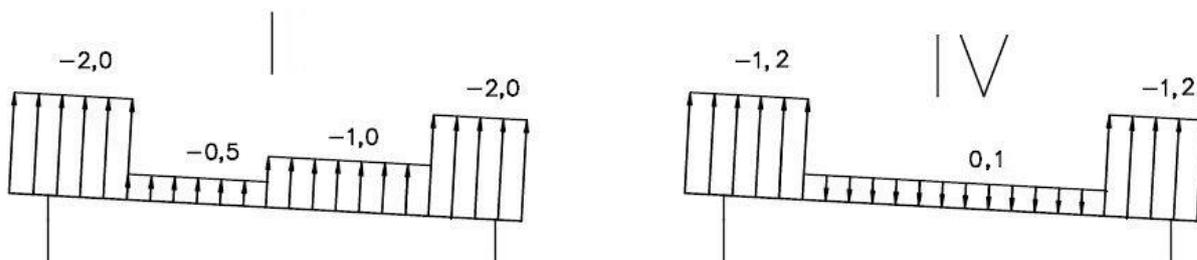
Combinações de situações de vento são usadas para determinar as cargas atuantes possíveis. A norma NBR 6123 considera que o vento não atua em duas

direções simultaneamente, isto é, ou teremos o vento incidindo a 90° ou a 0° , e cada um desses pode gerar um coeficiente de pressão interna de 0 ou -0,3:

- I. $C_{pe}(90^\circ) + C_{pi}(0)$;
- II. $C_{pe}(90^\circ) + C_{pi}(-0,3)$;
- III. $C_{pe}(0^\circ) + C_{pi}(0)$;
- IV. $C_{pe}(0^\circ) + C_{pi}(-0,3)$.

Os casos extremos acontecerão nas combinações I com efeito de sucção e IV com efeito de sobrepressão, como mostra a Figura 38:

Figura 38 - Combinações de cargas do vento críticas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

Embora os valores extremos aconteçam somente em parte da cobertura, o dimensionamento é feito para evitar qualquer tipo de dano, utilizando esses valores para estrutura como um todo.

Com isso serão testados os coeficientes de pressão extremos $C_{p1} = (-2,0)$ e $C_{p2} = (0,1)$ nos cálculos para dimensionamento dos componentes da cobertura e $C_{p3} = (-1,1)$ para as paredes. Onde C_p é o coeficiente de pressão resultante da diferença entre os coeficientes externo e interno. Sendo C_{p1} para vento de sucção e C_{p2} para vento de sobrepressão atuantes na cobertura e C_{p3} o coeficiente atuante nas paredes.

Calculando as cargas devido ao vento teremos:

- Para ventos de sucção na cobertura:

$$CV_1 = q_2 \cdot C_{p1} = 458,5 \cdot (-2,0) = -917 \text{ N/m}^2$$

- Para ventos de sobrepessão na cobertura:

$$CV_2 = q_2 \cdot C_{p2} = 458,5 \cdot (0,1) = 45,85 \text{ N/m}^2$$

- Para ventos nas paredes:

$$CV_3 = q_1 \cdot C_{p3} = 534,4 \cdot (-1,1) = -587,84 \text{ N/m}^2$$

7.3 COMBINAÇÃO DE CARGAS

De acordo com a NBR 8800, um carregamento é definido pela combinação das ações que têm probabilidade não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura. Essas combinações devem ser feitas de forma que possam ser determinadas todas as possibilidades, com seus efeitos mais desfavoráveis.

Em cada combinação devem estar presentes ações permanentes, ação variável que está sendo considerada principal e demais ações variáveis consideradas secundárias, com seus valores reduzidos de combinação.

Aplica-se a seguinte expressão:

$$Fd = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} \cdot F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \cdot \psi_{0j} \cdot F_{Qj,k})$$

Onde:

- $F_{Gi,k}$ representa valores característicos a cargas permanentes;
- $F_{Q1,k}$ representa a carga variável considerada principal na combinação;
- $F_{Qj,k}$ representa valores característicos das cargas variáveis secundárias;
- γ_g coeficiente de ponderação de cargas permanentes;
- γ_q coeficiente de ponderação de cargas variáveis;
- ψ_0 fator de combinação de cargas variáveis.

Para estruturas metálicas, a norma NBR 8800 estipula o valor do coeficiente de ponderação de cargas permanentes (γ_g) igual a 1,25 ou 1,00 (valor favorável a segurança da estrutura); valor do coeficiente de ponderação de carga variáveis (γ_q) da sobrecarga igual a 1,5 e do vento igual a 1,4; valor do fator de combinação de cargas variáveis (ψ_0) da sobrecarga igual a 0,7 e do vento igual a 0,6.

7.4 DIMENSIONAMENTO DE TELHAS

São basicamente chapas que cobrem a estrutura, protegendo-a de intempéries. Existe uma variedade muito grande de perfis no mercado, com variações entre cada fabricante, sendo necessário consultar catálogos nos fornecedores desejados para determinar as características exatas das telhas que serão aplicadas na estrutura.

Tabela 11 - Sobrecarga máxima para telhas

Dist. entre apoios	Sobrecarga Máxima para Telha MF 40 (kg/m ²)													
	Esp. Chapa (mm)	0,43			0,50			0,65			0,80			
	Nº Apoios	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	
1,50 m	Flecha	L/120	402	968	761	487	1.171	920	648	1.559	1.226	808	1.942	1.527
		L/180	269	645	508	325	780	614	432	1.039	817	539	1.295	1.018
	Lim. Resistência	160	134	153	200	173	198	273	270	307	340	398	454	
1,75 m	Flecha	L/120	253	610	479	307	737	580	408	982	772	509	1.223	962
		L/180	169	406	320	205	491	387	272	654	515	339	815	641
	Lim. Resistência	117	115	131	146	148	169	199	230	263	248	294	367	
2,00 m	Flecha	L/120	170	408	321	205	494	388	273	658	517	341	819	644
		L/180	113	272	214	137	329	259	182	438	345	227	546	430
	Lim. Resistência	89	100	114	111	129	147	151	178	223	189	224	281	
2,25 m	Flecha	L/120	119	287	225	144	347	273	192	462	363	239	575	452
		L/180	80	191	150	96	231	182	128	308	242	160	384	302
	Lim. Resistência	70	83	101	87	102	128	119	140	176	148	176	221	
2,50 m	Flecha	L/120	87	209	164	105	253	199	140	337	265	174	419	330
		L/180	58	139	110	70	169	133	93	224	177	116	280	220
	Lim. Resistência	56	67	83	70	82	103	95	113	142	119	142	178	

Fonte: BELLEI, 2010.

No projeto foram estipulados pelo projetista o tipo de telha e sua espessura, restando apenas determinar o espaçamento entre os apoios e determinar se serão resistentes ao esforço do vento. O tipo de telha utilizado foi o de aço galvanizado com 40 mm de altura e 0,65 mm de espessura, sem determinar um fornecedor específico.

Bellei (2010) oferece em seus anexos o catálogo de telhas do fabricante METFORM (Anexo B), o qual será utilizado para os cálculos.

Utilizando o valor disponibilizado no anexo, peso da telha é de 63,7 N/m², e aplicando os dados já conhecidos nas combinações de cargas possíveis, teremos:

- $CP+CA = 1,25 \cdot 63,7 + 1,5 \cdot 250 = 454,63 \text{ N/m}^2$;
- $CP+CV_1 = 1,0 \cdot 63,7 + 1,4 \cdot (-917) = -1220,1 \text{ N/m}^2$;
- $CP+CV_2 = 1,25 \cdot 63,7 + 1,4 \cdot 45,85 = 143,82 \text{ N/m}^2$;
- $CP+CA+CV_1 = 1,0 \cdot 63,7 + 1,5 \cdot 250 + 1,4 \cdot 0,6 \cdot (-917) = -331,58 \text{ N/m}^2$;
- $CP+CA+CV_2 = 1,25 \cdot 63,7 + 1,5 \cdot 250 + 1,4 \cdot 0,6 \cdot 45,86 = 493,15 \text{ N/m}^2$;
- $CP+CV_1+CA = 1,0 \cdot 63,7 + 1,4 \cdot (-917) + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 250 = -957,6 \text{ N/m}^2$;
- $CP+CV_2+CA = 1,25 \cdot 63,7 + 1,4 \cdot 45,85 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 250 = 406,31 \text{ N/m}^2$.

Onde CP é a componente da carga permanente; CA a componente da carga acidental; CV1 a componente do vento de sucção e CV2 do vento de sobrepressão.

Pode-se notar que para os ventos de sucção, o coeficiente de ponderação de cargas permanentes foi considerado igual a 1,0, pelo fato do valor ser favorável ao dimensionamento de um elemento mais resistente, e assim favorável à segurança da estrutura.

Os resultados de carga mais relevantes foram 1220,1 N/m² para o vento de sucção, e 493,15 N/m² para o vento de sobrepressão. Como o módulo do primeiro é maior, solicitando uma maior resistência, será o utilizado para o dimensionamento das telhas.

De acordo com o catálogo, a telha especificada pelo projetista suportaria a carga solicitada com quatro apoios e espaçamento de 2,5 m entre eles (1420 N/m²), ou então três apoios com espaçamento de 2,25 m (1400 N/m²).

Foram empregadas 15 telhas com 6,42m de comprimento cada. Considerando que cada uma, de acordo com a especificação do fornecedor possui 980 mm de largura, o que apresenta no total, largura excedente. Isso acontece devido à sobreposição de telhas que deve existir para a fixação das mesmas.

7.5 DIMENSIONAMENTO DAS TERÇAS

Como já citado anteriormente, as terças são vigas colocadas nas coberturas com a finalidade de suportar e fixar as telhas. Estão normalmente sujeitas às solicitações de flexão dupla, devido à inclinação das coberturas. Devido a essa inclinação, é comum utilização de tirantes intermediários (um tirante para vãos de 5m a 6 m e dois tirantes para vãos maiores) com a finalidade de diminuir o tamanho do vão no sentido de menor inércia.

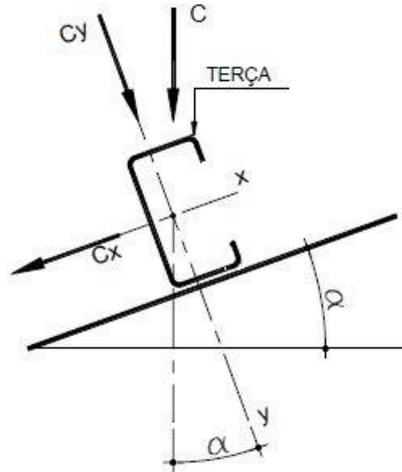
Para o dimensionamento, os pesos próprios de todos elementos devem ser considerados. No início do dimensionamento não se tem conhecimento de quais os perfis que serão utilizados e seus respectivos pesos. Na prática adota-se um valor de 40 N/m² a 60 N/m² para o peso próprio (terças e tirantes). Para este estudo de caso será usado o valor intermediário de 50 N/m². Os valores utilizados para o dimensionamento das telhas continuam os mesmos.

Multiplicando as cargas atuantes pelo espaçamento entre as terças, tem-se:

- Carga permanente (CP): $63,7 + 50 = 113,7 \cdot 1,55 = 172,82 \text{ N/m}$;
- Carga acidental (CA): $250 \cdot 1,55 = 380 \text{ N/m}^2$;
- Carga do vento de sucção (CV₁): $(-917) \cdot 1,55 = 1393,84 \text{ N/m}^2$;
- Carga do vento de sobrepressão (CV₂): $45,8 \cdot 1,55 = 69,62 \text{ N/m}^2$.

Como as cargas permanente e acidental atuam no sentido vertical, acabam atuando nos dois planos dos eixos da terça, devido à inclinação do telhado. Com isso tem-se flexão composta, tornando necessário decompor as cargas para que os cálculos sejam feitos para cada eixo. A carga do vento é considerada como atuando perpendicularmente com o plano das telhas.

Figura 39 - Decomposição das cargas aplicadas



Fonte: Editado pelo autor, 2015.

Onde:

- C_y representa a carga no eixo y ;
- C_x representa a carga no eixo x ;
- α é a inclinação da cobertura.

Como a inclinação (α) é de 3° tem-se para o eixo de maior inércia (x):

- $CP_y = 172,82 \cdot \cos 3^\circ = 172,58 \text{ N/m}$;
- $CA_y = 380 \cdot \cos 3^\circ = 379,5 \text{ N/m}$;
- $CV_{1y} = -1393,84 \text{ N/m}$;
- $CV_{2y} = 69,62 \text{ N/m}$.

Aplicando a combinação de cargas:

- $CP+CA = 1,25 \cdot 172,58 + 1,5 \cdot 379,5 = 785,67 \text{ N/m}$;
- $CP+CV_1 = 1,0 \cdot 172,58 + 1,4 \cdot (-1393,84) = -1778,8 \text{ N/m}$;
- $CP+CV_2 = 1,25 \cdot 172,58 + 1,4 \cdot 69,62 = 313,19 \text{ N/m}$;
- $CP+CA+CV_1 = 1,0 \cdot 172,58 + 1,5 \cdot 379,5 + 1,4 \cdot 0,6 \cdot (-1393,84) = -429,0 \text{ N/m}$;

- $CP+CA+CV_2 = 1,25 \cdot 172,58 + 1,5 \cdot 379,5 + 1,4 \cdot 0,6 \cdot 69,62 = 843,46 \text{ N/m};$
- $CP+CV_1+CA = 1,0 \cdot 172,58 + 1,4 \cdot (-1393,84) + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 379,5 = -1380,3 \text{ N/m};$
- $CP+CV_2+CA = 1,25 \cdot 172,58 + 1,4 \cdot 69,62 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 379,5 = 711,67 \text{ N/m}.$

Realizando o mesmo procedimento para o eixo de menor inércia (y), tem-se:

- $CP_x = 172,82 \cdot \text{sen } 3^\circ = 9,05 \text{ N/m};$
- $CA_x = 380 \cdot \text{sen } 3^\circ = 19,9 \text{ N/m};$
- $CV_{1x} = 0 \text{ N/m};$
- $CV_{2x} = 0 \text{ N/m}.$

Aplicando a combinação de cargas:

- $CP+CA = 1,25 \cdot 9,05 + 1,5 \cdot 19,9 = 41,16 \text{ N/m};$
- $CP+CV_1 = 1,25 \cdot 9,05 + 1,4 \cdot 0 = 11,31 \text{ N/m};$
- $CP+CV_2 = 1,25 \cdot 9,05 + 1,4 \cdot 0 = 11,31 \text{ N/m};$
- $CP+CA+CV_1 = 1,25 \cdot 9,05 + 1,5 \cdot 19,9 + 1,4 \cdot 0,6 \cdot 0 = 41,16 \text{ N/m};$
- $CP+CA+CV_2 = 1,25 \cdot 9,05 + 1,5 \cdot 19,9 + 1,4 \cdot 0,6 \cdot 0 = 41,16 \text{ N/m};$
- $CP+CV_1+CA = 1,25 \cdot 9,05 + 1,4 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 19,9 = 32,2 \text{ N/m};$
- $CP+CV_2+CA = 1,25 \cdot 9,05 + 1,4 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 19,9 = 32,2 \text{ N/m}.$

O projeto original da empresa especifica terças de perfil U enrijecido de aço A-36. O perfil escolhido é simétrico em relação ao eixo de maior inércia, tornando indiferente o sinal do esforço, já o eixo de menor inércia só possui valores positivos, o que nos permite desconsiderar cálculos para ventos de sobrepressão, pois o perfil escolhido para ventos de sucção já será capaz de suportar suas solicitações.

Conforme o projeto, as terças são vigas biapoiadas e devido ao comprimento maior que 6 m, com duas linhas de tirantes. Sabendo dessas informações e determinados quais serão os esforços máximos (-1778,8 N/m para o eixo de maior inércia e 41,16 N/m para o eixo de menor inércia), podemos calcular o momento máximo e a força cortante máxima em cada eixo:

- $M_x = (C_y \cdot L_x^2)/8 = (-1778,8 \cdot 6,25^2)/8 = -8685,55 \text{ N.m};$
- $M_y = (C_x \cdot L_y^2)/8 = (41,16 \cdot 2,08^2)/8 = 22,26 \text{ N.m};$
- $V = (C_y \cdot L_x)/2 = (-1778,8 \cdot 6,25)/2 = -5558,75 \text{ N}.$

Onde:

- M_x representa o momento máximo em torno do eixo x;
- M_y representa o momento máximo em torno do eixo y;
- C_y representa a carga no eixo y;
- C_x representa a carga no eixo x;
- V representa a força cortante;
- L_x representa o comprimento de flambagem no eixo x;
- L_y representa o comprimento de flambagem no eixo y.

A norma NBR 8800 não cobre o dimensionamento de perfis metálicos de chapa fina formados a frio, então será utilizada a forma usual, o método das tensões admissíveis. Neste método, o dimensionamento é considerado satisfatório quando a máxima tensão solicitante em cada seção é inferior a uma tensão resistente reduzida por um coeficiente de segurança, sendo essa tensão resistente suficiente para evitar qualquer tipo de ruptura, flambagem, plastificação ou perda de equilíbrio.

O que difere o método das tensões admissíveis do método dos estados limites, utilizado pela NBR 8800, é que o primeiro considera apenas um único coeficiente de segurança para expressar todas as incertezas, independentemente de sua origem. Além de não considerar reservas de resistência e redistribuição de momentos fletores existentes após o início da plastificação do elemento, sendo assim um método mais conservador.

A máxima tensão de flexão no método das tensões admissíveis é dada por:

$$f_{bx} = \frac{M_x}{W_{ef}} \leq F_{bx} = F$$

Onde:

- f_{bx} é a máxima tensão de flexão em relação ao eixo x;
- M_x é o momento em torno do eixo x;
- W_{ef} é o módulo resistente elástico efetivo;
- F é a tensão básica de projeto (limite de escoamento do aço multiplicado por um fator de segurança igual a 0,6).

O aço A-36 possui limite de escoamento $f_y = 250\text{MPa}$ ou 25 kN/cm^2 .

Como calculado anteriormente, o momento máximo nas terças é igual $M_x = -8685,55\text{ N.m}$ ou $-868,55\text{ kN.cm}$. A conversão é importante, pois as tabelas comerciais de perfis são apresentadas com os valores em centímetros.

Segundo o Centro Brasileiro de Construções em aço, para que não exista flambagem, devido à combinação dos momentos fletores em ambos os eixos os critérios abaixo devem ser atendidos:

- Para carregamentos sem vento:

$$\frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} < 1$$

- Para carregamentos com vento:

$$\frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} < 1,33$$

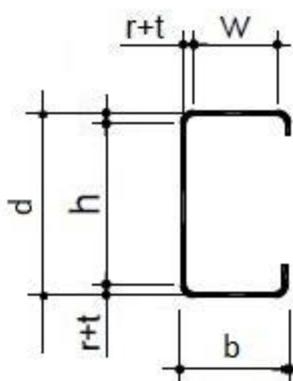
Utilizando a tabela de perfis U enrijecido (Anexo B), o perfil selecionado foi o perfil U200x75x25x2,66:

- $d = 200\text{ mm}$;
- $b = 75\text{ mm}$;
- $t = 2,66\text{ mm}$;

- $I_x = 605 \text{ cm}^4$;
- $W_x = 60,57 \text{ cm}^3$;
- $r_x = 7,83 \text{ cm}$;
- $I_y = 71,7 \text{ cm}^4$;
- $W_y = 13,54 \text{ cm}^3$;
- $r_y = 2,7 \text{ cm}$.

É necessário verificar se o perfil suporta a tensões de flexão atuantes em quatro situações: flambagem local da alma, flambagem local da mesa, flambagem lateral com torção e ruptura por cisalhamento. Por serem perfis formados por dobras, é necessário determinar qual a área efetiva do componente analisado que está sendo submetida ao esforço. Caso ultrapasse os valores limites da relação entre o comprimento do elemento e a espessura do elemento, significará que a dobra compromete certo comprimento, diminuindo a área que será realmente resistente aos esforços, como mostra a Figura 40:

Figura 40 - Comprimentos efetivos perfil U enrijecido



Fonte: Editado pelo autor, 2015

Onde:

- h representa a altura efetiva da alma;
- w representa a largura efetiva da mesa;
- r representa o raio de dobradura;

- t_w representa a espessura da alma;
- t_f representa a espessura da mesa;
- b representa a largura total da seção;
- d representa altura total da seção.

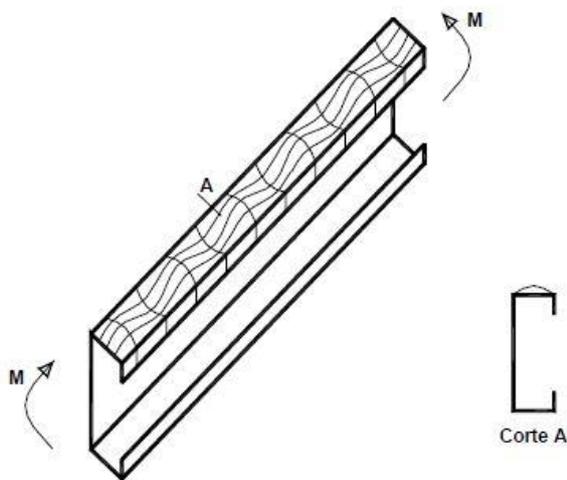
Como se tem uma única espessura para toda seção transversal, isto é, espessura da alma igual a espessura da mesa, tratam-se ambas como “ t ”. Para efeito de cálculo, considera-se o raio da dobra igual a espessura ($r = t$).

7.5.1 FLAMBAGEM LOCAL DA MESA

Flambagem é a perda de estabilidade de um corpo devido ao aparecimento de deformações levando-o rapidamente ao estado de ruptura. A deformação altera a característica do elemento e como foi projetado para suportar os esforços.

Em peças flexionadas, uma das partes do elemento que pode sofrer com o efeito da flambagem é a mesa. Torna-se necessário verificar se a mesa do perfil escolhido suporta as cargas solicitadas.

Figura 41- Flambagem local da mesa



Verificando a largura útil da mesa em perfis enrijecidos:

- Em relação ao eixo x:

$$\left(\frac{w}{t_r}\right)_{lim} = \frac{142}{\sqrt{F}}$$

$$se \quad \left(\frac{w}{t_r}\right) \leq \left(\frac{w}{t_r}\right)_{lim}$$

Onde:

- w representa a largura efetiva da mesa;
- t_f representa a espessura da mesa;
- F é a tensão básica de projeto (limite de escoamento do aço multiplicado por um fator de segurança igual a 0,6).

Se a condição for verdadeira, pode-se considerar $b = w$, logo $W_{x\text{ef}} = W_x$, isto é, a largura da mesa igual ao valor efetivo da largura que será utilizada nos cálculos como suportando os esforços.

A máxima tensão de flexão será:

$$f_{bx} = \frac{M_x}{W_x} \leq F_{bx} = 0,6 \cdot f_y$$

Com o perfil escolhido:

$$\left(\frac{w}{t}\right) = \frac{75 - 4 \cdot 2,66}{2,66} = 24,19$$

$$\left(\frac{w}{t}\right)_{lim} = \frac{142}{\sqrt{F}} = \frac{142}{\sqrt{25 \cdot 0,6}} = 36,66$$

$$\left(\frac{w}{t}\right) \leq \left(\frac{w}{t}\right)_{lim} \rightarrow f_{bx} = \frac{868,55}{60,57} = 14,34 \text{ kN/cm}^2$$

Caso a relação largura espessura seja maior que o valor limite, $b < w$, tornando necessária escolha de outro perfil.

Neste caso, trata-se de uma flexão dupla, o que faz indispensável a análise dos esforços de ambos os eixos, sendo o procedimento para o sentido de menor inércia sempre o seguinte:

- Em relação ao eixo y:

$$\lambda_{b^2} = \frac{W_y \cdot L_x^2}{b \cdot \left(\frac{I_x}{2}\right)}$$

Onde:

- λ_{b^2} é o índice de esbeltez;
- W_y é o módulo resistente elástico em relação ao eixo y;
- L_x é o comprimento de flambagem e, relação ao eixo x;
- b é a largura total da seção;
- I_x é o momento de inércia em relação ao eixo x.

Se:

$$\lambda_{b^2} \leq 3,55 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right); \rightarrow F_{bx} = 0,6 \cdot f_y$$

$$3,55 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right) \leq \lambda_{b^2} \leq 17,8 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right); \rightarrow F_{bx} = 0,67 \cdot f_y - \left(\frac{f_y^2}{53,3 \cdot E \cdot C_b}\right) \cdot \lambda_{b^2}$$

$$\lambda_{b^2} \geq 17,8 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right); \rightarrow F_{bx} = 5,92 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{\lambda_{b^2}}\right)$$

Onde:

- C_b é o coeficiente de equivalência de momentos na flexão;
- E é o módulo de elasticidade;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço.

A tensão máxima atuante de flexão será:

$$f_{by} = \frac{M_y}{W_y} \leq F_{by}$$

Sendo:

- f_{by} é a máxima tensão de flexão em relação ao eixo y;
- M_y é o momento em torno do eixo y;
- W_y é o módulo resistente elástico efetivo em relação ao eixo y;

Como se trata de viga simples biapoiada teremos $C_b = 1$. Assim, para o perfil escolhido:

$$\lambda_{b^2} = \frac{13,54 \cdot (625)^2}{7,5 \cdot \left(\frac{605}{2}\right)} = 2331,26$$

$$3,55 \cdot 20500 \cdot \left(\frac{1}{25}\right) = 2911$$

$$\lambda_{b^2} \leq 3,55 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right); \rightarrow f_{by} = \frac{22,26}{13,54} = 1,64 \leq 15$$

Para que não exista flambagem local na mesa, devido à combinação dos momentos fletores em ambos eixos, tratando-se de um carregamento com vento de sucção:

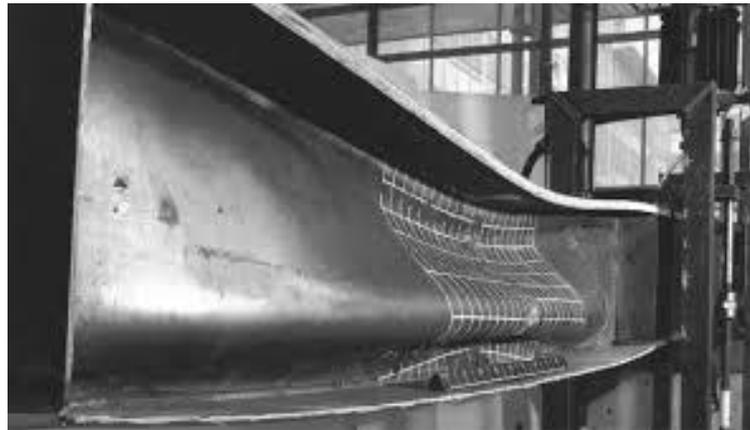
$$\frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} < 1,33$$

$$\frac{14,34}{15} + \frac{1,64}{15} = 1,07 < 1,33 \quad OK$$

7.5.2 FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA

Outra parte do elemento que pode sofrer perda de estabilidade é alma. Fazendo necessária a verificação.

Figura 42- Flambagem local da alma



Fonte: LIMA, SILVA e SÁ, 2004.

- Em relação ao eixo x:

Assim como na flambagem local da mesa, é necessário verificar se a relação elemento/espessura supera o valor limite, que nesse caso é igual a 150:

$$\left(\frac{h}{t_w}\right) \leq 150$$

Caso seja verdadeiro:

$$F_{bx} = \left[1,21 - 0,00041 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right) \cdot \sqrt{f_y}\right] \cdot 0,6 \cdot f_y \leq 0,6 \cdot f_y$$

$$f_{bx} = \frac{M_x}{W_x \cdot \left(\frac{d}{h}\right)} \leq F_{bx}$$

Onde:

- h representa a altura efetiva da alma;
- t_w representa a espessura da alma;
- d representa altura total da seção;
- M_x é o momento em torno do eixo x ;
- W_x é o módulo resistente elástico efetivo em relação ao eixo x ;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço.

Para o estudo de caso:

$$\left(\frac{h}{t_w}\right) = \left(\frac{200 - 4 \cdot 2,66}{2,66}\right) = 71,2 < 150$$

Assim:

$$F_{bx} = [1,21 - 0,00041 \cdot (71,2) \cdot \sqrt{25}] \cdot 0,6 \cdot 25 = 15,96 > 15$$

Adota-se o menor dos valores, $F_{bx} = 15$, então:

$$f_{bx} = \frac{868,55}{60,57 \cdot \left(\frac{200}{189,36}\right)} = 13,58$$

- Em relação ao eixo y , como já calculado para flambagem local da mesa:

$$\lambda_{b^2} = \frac{W_y \cdot L_x^2}{b \cdot \left(\frac{I_x}{2}\right)}$$

Se:

$$\lambda_{b^2} \leq 3,55 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right); \rightarrow F_{bx} = 0,6 \cdot f_y$$

$$3,55 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right) \leq \lambda_{b^2} \leq 17,8 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right); \rightarrow F_{bx} = 0,67 \cdot f_y - \left(\frac{f_y^2}{53,3 \cdot E \cdot C_b}\right) \cdot \lambda_{b^2}$$

$$\lambda_{b^2} \geq 17,8 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right); \rightarrow F_{bx} = 5,92 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{\lambda_{b^2}}\right)$$

A tensão máxima atuante de flexão será:

$$f_{by} = \frac{M_y}{W_y} \leq F_{by}$$

Como se trata de viga simples biapoiada teremos $C_b = 1$. Assim, para o perfil escolhido:

$$\lambda_{b^2} = \frac{13,54 \cdot (625)^2}{7,5 \cdot \left(\frac{605}{2}\right)} = 2331,26$$

$$3,55 \cdot 20500 \cdot \left(\frac{1}{25}\right) = 2911$$

$$\lambda_{b^2} \leq 3,55 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right); \rightarrow f_{by} = \frac{22,26}{13,54} = 1,64 \leq 15$$

Para que não exista flambagem local na alma, devido à combinação dos momentos fletores em ambos eixos, tratando-se de um carregamento com vento de sucção:

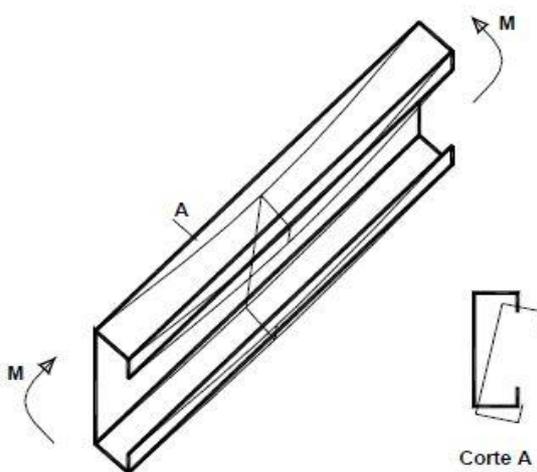
$$\frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} < 1,33$$

$$\frac{13,58}{15} + \frac{1,64}{15} = 1,015 < 1,33 \quad OK$$

7.5.3 FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO

A flambagem lateral com torção por sua vez acontece por perda de equilíbrio no plano principal de flexão, ocasionando descolamentos laterais e rotação de torção no elemento.

Figura 43 - Flambagem lateral de torção



Fonte: JAVARONI e GONÇALVEZ, 2002.

- Em relação ao eixo x:

$$\lambda_{b^2} = \frac{W_x \cdot L_y^2}{d \cdot \left(\frac{I_y}{2}\right)}$$

Onde:

- λ_{b^2} é o índice de esbeltez;
- W_x é o módulo resistente elástico em relação ao eixo x;
- L_y é o comprimento de flambagem e, relação ao eixo y;
- d representa altura total da seção;
- I_y é o momento de inércia em relação ao eixo y.

Se:

$$\lambda_{b^2} \leq 3,55 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right); \rightarrow F_{bx} = 0,6 \cdot f_y$$

$$3,55 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right) \leq \lambda_{b^2} \leq 17,8 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right); \rightarrow F_{bx} = 0,67 \cdot f_y - \left(\frac{f_y^2}{53,3 \cdot E \cdot C_b}\right) \cdot \lambda_{b^2}$$

$$\lambda_{b^2} \geq 17,8 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right); \rightarrow F_{bx} = 5,92 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{\lambda_{b^2}}\right)$$

Sendo:

- C_b é o coeficiente de equivalência de momentos na flexão;
- E é o módulo de elasticidade;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço.

A tensão máxima atuante de flexão será:

$$f_{bx} = \frac{M_x}{W_x} \leq F_{bx}$$

Assim:

$$\lambda_{b^2} = \frac{60,57 \cdot (208,3)^2}{20 \cdot \left(\frac{71,7}{2}\right)} = 3665,36$$

$$3,55 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right) = 3,55 \cdot 20500 \cdot \left(\frac{1}{25}\right) = 2911$$

$$17,8 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right) = 17,8 \cdot 20500 \cdot \left(\frac{1}{25}\right) = 14596$$

Logo:

$$3,55 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right) \leq \lambda_{b^2} \leq 17,8 \cdot E \cdot \left(\frac{C_b}{f_y}\right); \rightarrow F_{bx} = 0,67 \cdot f_y - \left(\frac{f_y^2}{53,3 \cdot E \cdot C_b}\right) \cdot \lambda_{b^2}$$

$$F_{bx} = 0,67 \cdot 25 - \left(\frac{25^2}{53,3 \cdot 20500 \cdot 1} \right) \cdot 3665,36 = 14,65$$

$$f_{bx} = \frac{868,55}{60,57} = 14,34 < F_{bx}$$

Para que não exista flambagem lateral com torção, devido à combinação dos momentos fletores em ambos eixos, tratando-se de um carregamento com vento de sucção:

$$\frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} < 1,33$$

Utilizando os valores para o eixo y já calculados:

$$\frac{14,34}{14,65} + \frac{1,64}{15} = 1,09 < 1,33 \quad OK$$

7.5.4 CISALHAMENTO

Nas análises anteriores constata-se que não ocorrerá flambagem devido às forças de flexão. Essas forças podem também causar ruptura por cisalhamento, logo, torna-se necessário realizar a verificação para este caso:

$$f_v = \frac{V}{h \cdot t} \leq F_v$$

Onde:

$$se \quad \left(\frac{h}{t} \right) \leq 136 \cdot \sqrt{\frac{k_v}{f_y}} \rightarrow F_v = 0,4 \cdot f_y$$

$$136 \cdot \sqrt{\frac{k_v}{f_y}} \leq \left(\frac{h}{t}\right) \leq 197 \cdot \sqrt{\frac{k_v}{f_y}} \rightarrow F_v = 54,7 \cdot \frac{\sqrt{(k_v \cdot f_y)}}{\left(\frac{h}{t}\right)} \leq 0,4 \cdot f_y$$

$$\left(\frac{h}{t}\right) \geq 197 \cdot \sqrt{\frac{k_v}{f_y}} \rightarrow F_v = \frac{10760 \cdot k_v}{\left(\frac{h}{t}\right)^2} \leq 0,4 \cdot f_y$$

Sendo:

- f_v é a tensão máxima de cisalhamento;
- V é o esforço cortante;
- h representa a altura efetiva da alma;
- F_v é a tensão básica de cisalhamento;
- k_v é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço.

Quando não houver enrijecedores transversais $k_v = 5,34$. Logo:

$$\left(\frac{h}{t}\right) = \frac{200 - 4 \cdot 2,66}{2,66} = 71,19$$

$$136 \cdot \sqrt{\frac{k_v}{f_y}} = 136 \cdot \sqrt{\frac{5,34}{25}} = 62,85$$

$$197 \cdot \sqrt{\frac{k_v}{f_y}} = 197 \cdot \sqrt{\frac{5,34}{25}} = 91,05$$

Tem-se então:

$$136 \cdot \sqrt{\frac{k_v}{f_y}} \leq \left(\frac{h}{t}\right) \leq 197 \cdot \sqrt{\frac{k_v}{f_y}} \rightarrow F_v = 54,7 \cdot \frac{\sqrt{(k_v \cdot f_y)}}{\left(\frac{h}{t}\right)} \leq 0,4 \cdot f_y$$

$$F_v = 54,7 \cdot \frac{\sqrt{(k_v \cdot f_y)}}{\left(\frac{h}{t}\right)} = 54,7 \cdot \frac{\sqrt{(5,34 \cdot 25)}}{71,19} = 8,88 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_v = \frac{V}{h \cdot t} = \frac{5,56}{18,94 \cdot 0,266} = 0,11 \text{ kN/cm}^2$$

Para que não exista ruptura por cisalhamento:

$$\left(\frac{f_{bx}}{F_{bx}}\right)^2 + \left(\frac{f_v}{F_v}\right)^2 < 1,0$$

$$\left(\frac{13,58}{15}\right)^2 + \left(\frac{0,11}{8,88}\right)^2 = 0,82 < 1,0 \quad OK$$

Como o responsável pela ruptura por cisalhamento é a flambagem local da alma, os valores f_{bx} e F_{bx} são os referentes à mesma.

7.5.5 FLECHA

Para finalizar a verificação do elemento, de acordo com o anexo C da NBR 8800, é necessária a verificação da flecha admissível. Para efeito de carga a flecha admissível para vigas biapoiadas suportando elementos de cobertura é 1/180 do vão, sendo calculada de acordo com a equação:

$$\delta = \frac{5 \cdot C \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

Onde:

- δ é a flecha;
- C é a carga aplicada;
- L é o comprimento de flambagem;
- I é o momento de inércia;
- E é o módulo de elasticidade.

Assim:

$$\frac{L}{180} = \frac{625}{180} = 3,47$$

$$\delta = \frac{5 \cdot 0,0178 \cdot 625^4}{384 \cdot 20500 \cdot 605} = 2,85 < 3,47 \quad OK$$

O perfil U200x75x25x2,66 cumpre todos os critérios, podendo assim ser utilizado.

7.6 DIMENSIONAMENTO DOS TIRANTES

Os tirantes são barras colocadas entre apoios das terças, para diminuir o vão entre elas, no sentido de menor inércia, isto é, no sentido mais fraco do perfil da terça.

Segundo Bellei (2010) utiliza-se uma linha de tirante para distâncias de 5 m a 6 m, e duas para vãos maiores. No estudo de caso os vãos são de 6,25 m, o que justifica o uso de duas linhas de tirantes.

É comum utilizar tirantes de barras redondas com 16 mm de diâmetro para galpões médios e grandes, e 12,5 mm de diâmetro para galpões pequenos, para ficarem coerentes com o diâmetro dos parafusos, mesmo que não seja necessário. As forças solicitadas para essas peças são normalmente muito pequenas, porém as peças são cruciais para estabilidade e segurança das estruturas metálicas por se tratar de componentes leves e muito suscetíveis às forças do vento.

De acordo com o item 5.2.2 da NBR 8800, a força de tração resistente de um elemento deve ser o menor valor entre o escoamento da seção bruta e a ruptura da seção líquida:

- Escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

- Ruptura da seção líquida:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$$

Onde:

$$A_{be} = 0,75 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

- $N_{t,Rd}$ é a força resistente de tração;
- A_g é a área bruta da seção transversal;
- A_e é a área líquida da seção transversal;
- A_{be} é a área líquida referente à seção com rosca;
- f_y é o limite de escoamento do aço;
- f_u é o limite de ruptura do aço;
- γ_{a1} é coeficiente de ponderação de escoamento;
- γ_{a2} é coeficiente de ponderação de ruptura.
- D o diâmetro;

Para o estudo, usando o diâmetro mínimo para galpões pequenos, com aço A-36 ($f_u = 400 \text{ N/mm}^2$; $\gamma_{a2} = 1,35$), teremos:

- Para escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{\frac{\pi \cdot 12,5^2}{4} \cdot 250}{1,1} = 27,89 \text{ kN}$$

- Para ruptura da seção líquida:

$$A_{be} = 0,75 \cdot \frac{\pi \cdot 12,5^2}{4} = 92,04$$

$$N_{t,Rd} = \frac{92,04 \cdot 400}{1,35} = 27,27 \text{ kN}$$

Portanto, a resistência a tração da barra redonda é de 27,27 kN, pois é a menor entre as duas.

Analisando disposição empregada para os tirantes (figura 44), pode-se definir a área efetiva de cada elemento, isso é, a área da qual cada tirante vai suportar cargas. Lembrando que no eixo de menor inércia apenas a carga do peso próprio e carga acidental geram esforços:

$$F_{t,sd1} = (A_i) \cdot (1,25 \cdot CP + 1,5 \cdot CP) \cdot \text{sen } 3^\circ$$

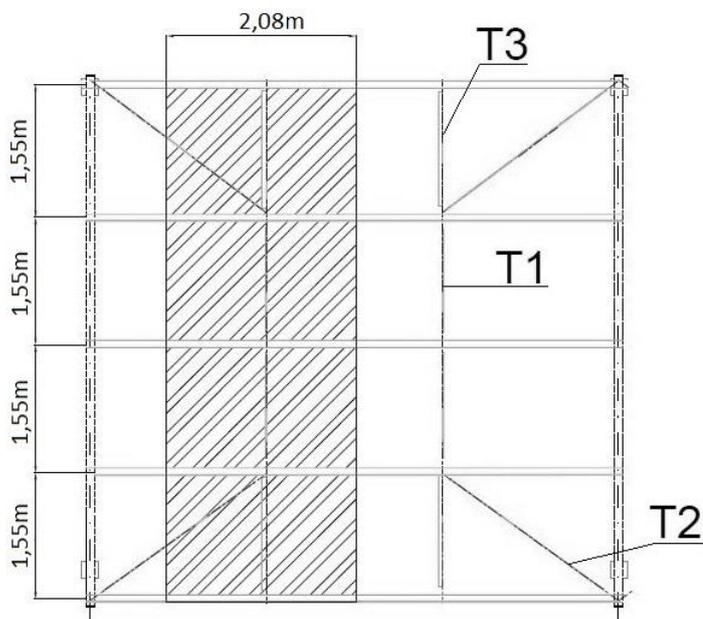
Logo:

$$F_{t,sd1} = (2,08 \cdot 1,55) \cdot [1,25 \cdot (63,42 + 50) + 1,5 \cdot 250] \cdot \text{sen}3^\circ$$

$$F_{t,sd1} = 86,98 \text{ N}$$

A Figura 44 também apresenta, que embora as duas linhas de tirantes flexíveis de barra redonda sejam suficientes para suportar os esforços solicitados, o projetista por experiência profissional acrescenta tirantes rígidos e tirantes inclinados, por questão de precaução.

Figura 44 - Disposição dos tirantes



Fonte: Elaborado pelo autor

Onde:

- T1 são os tirantes flexíveis;
- T2 são os tirantes inclinados;
- T3 são os tirantes rígidos.

7.7 DIMENSIONAMENTO DE CONTRAVENTAMENTO

Os contraventamentos, além de estabelecer a devida rigidez do conjunto, devem atuar como distribuidores das cargas do vento sobre a estrutura.

Existe uma série de maneiras de se dispor esses elementos, mas geralmente são colocados de forma que possam resistir diretamente ao vento incidente nos tapamentos frontais, dando apoio às colunas. Deste modo, as cargas atuantes no contraventamento da cobertura são reações de apoio da coluna que recebe a carga do vento.

A rigidez do plano é obtida por elementos dispostos em forma de “X”, o que gera solicitações de tração para algumas peças e compressão para outras. A simplificação e majoração de segurança que se faz é desconsiderar a existência dos elementos diagonais comprimidos para os cálculos, seguindo então o dimensionamento tradicional para peças tracionadas.

No projeto, o contraventamento está situado no plano das vigas principais, o que as torna parte do sistema, transferindo cargas para esses elementos. Este tipo de disposição livra as terças de qualquer esforço de compressão ou tração, sendo solicitadas apenas por flexão, como foram dimensionadas. Neste tópico serão apresentados os dimensionados dos elementos diagonais. Os esforços transmitidos para as vigas serão tratados no dimensionamento das mesmas.

O item 5.2.8.1 da NBR 8800 especifica que o índice de esbeltez de peças tracionadas não deve ultrapassar 300:

$$\lambda = \frac{L}{r} \leq 300$$

Onde:

- λ é o limite de esbeltez;
- L é o comprimento do vão livre;
- r é o raio de giração.

No Anexo A é apresentado o esquema das peças, os elementos serão ligados entre si no centro do “X”, o que gera um travamento no eixo x da seção transversal da peça, e assim uma diminuição no comprimento de flambagem nesse sentido, mas não interfere no comprimento de flambagem no eixo y, logo:

$$L_x = \frac{\sqrt{(625^2 + 606^2)}}{2} = 435,3 \text{ cm} \rightarrow r_x \geq \frac{435,3}{300} = 1,45$$

$$L_y = \sqrt{(625^2 + 606^2)} = 870,6 \text{ cm} \rightarrow r_y \geq \frac{870,6}{300} = 2,9$$

O projeto estabelece que sejam usados pares de cantoneiras de abas iguais para o contraventamento. Existem tabelas que fornecem características pré-calculadas sobre esse conjunto:

Tabela 12 - Características do conjunto de cantoneiras

Abas mm (pol)	Espes. t mm	Massa M Kg/m	Área A cm ²	Eixo X-X			Raio de giração em cm (Eixo Y-Y)			
				Ix cm ⁴	Wx cm ³	rx cm	Afastamento das cantoneiras S em			
							0	6.3	9.5	12.5
44 x 44 (1 ¾" x 1 ¾")	3,2	4,28	5,42	16,7	1,34	1,76	1,94	2,33	-	-
	4,8	6,30	8,00	23,6	2,30	1,72	2,04	2,43	2,70	-
	6,4	8,24	10,44	30	3,13	1,70	2,09	2,49	2,75	-
	7,9	10,08	12,90	35	3,77	1,66	2,16	2,55	2,83	-
51 x 51 (2" x 2")	4,8	7,26	9,13	36	3,13	1,99	2,29	2,68	2,94	-
	6,4	9,48	12,12	46	4,10	1,95	2,34	2,73	3,00	-
	7,9	11,66	14,84	55	4,91	1,93	2,41	2,80	3,06	-
	9,5	14,00	17,52	62	5,73	1,89	2,51	2,90	3,17	3,37
64 x 64 (2 ½" x 2 ½")	4,8	9,14	11,60	72	4,90	2,50	2,77	3,15	3,43	-
	6,4	12,20	15,34	92	6,40	2,46	2,97	3,36	3,52	-
	7,9	14,88	18,96	111	7,90	2,43	2,93	3,32	3,59	-
	9,5	17,66	22,32	129	9,30	2,41	2,99	3,38	3,65	3,85

Fonte: BELLEI, 2010.

Para que os raios de giração do eixo x e do eixo y sejam superiores ao necessário, podemos escolher cantoneiras de 51x51x4,8 mm com espaçamento de 9,5 mm, ou cantoneiras de 51x51x9,5 mm com espaçamento de 6,3 mm, ou até cantoneiras de 64x64x6,4 mm sem espaçamento. No dimensionamento utilizou-se o último caso por questões de se tratar de um perfil mais robusto e que o conjunto ficará mais resistente independente do espaçamento que for utilizado.

Da mesma forma que calculado para o dimensionamento dos tirantes, para a força de tração resistente teremos:

- escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

- Ruptura da seção líquida:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$$

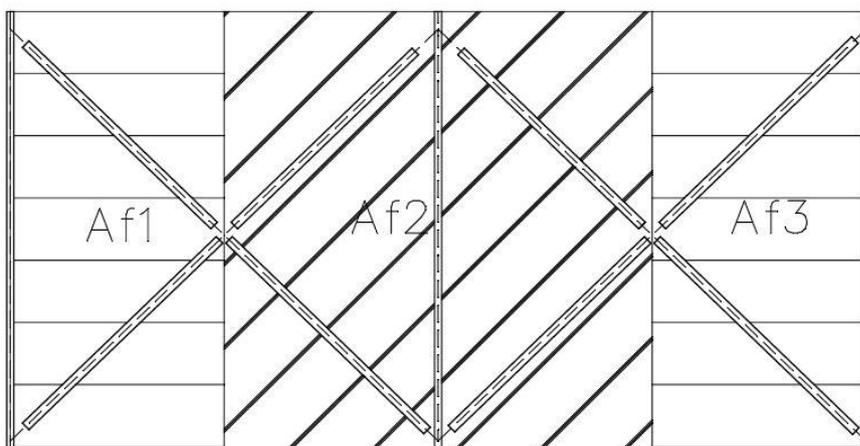
Onde:

- $N_{t,Rd}$ é a força resistente de tração;
- A_g é a área bruta da seção transversal;
- A_e é a área líquida da seção transversal;
- f_y é o limite de escoamento do aço;
- f_u é o limite de ruptura do aço;
- γ_{a1} é coeficiente de ponderação de escoamento;
- γ_{a2} é coeficiente de ponderação de ruptura.

Como mencionado, o projeto em estudo não apresenta nenhuma especificação sobre o tipo de ligações que será utilizado, logo, os cálculos serão realizados com a área bruta do perfil. Assim, a força resistente para escoamento da seção bruta será:

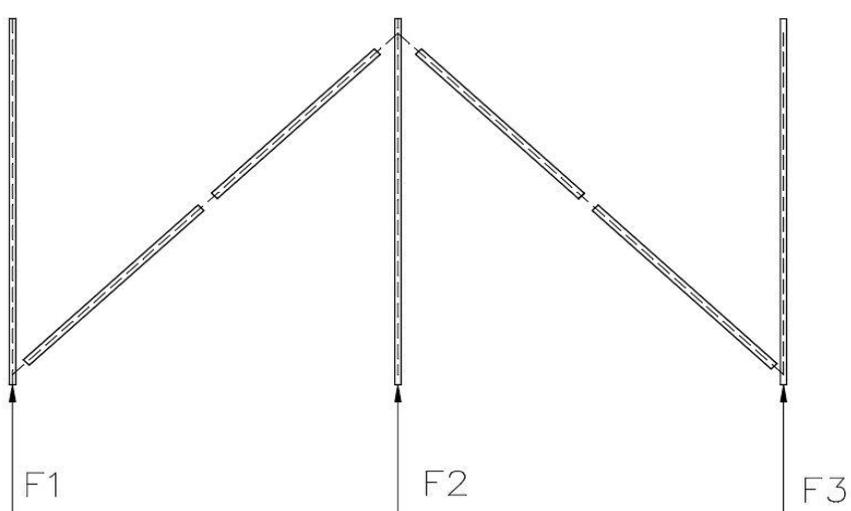
$$N_{t,Rd} = \frac{15,34 \cdot 25}{1,1} = 348,64 \text{ kN}$$

O vento atuará sobre toda a face do galpão em que incide. A carga gerada será transmitida para as colunas de acordo com as relativas áreas de influência. A coluna por sua vez transmitirá metade desse esforço para a fundação, e metade para os contraventamentos.

Figura 45 - Área de influência respectiva para cada coluna

Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

No valor referente à altura acrescentou-se aos 5 m do galpão mais 1,1 m de fechamento lateral passante desse valor, que também receberá a carga do vento e transmitirá para as colunas. Multiplicando a carga de vento ao seu fator ponderação tem-se os seguintes esforços em cada coluna:

Figura 46 - Elementos de contraventamento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

- Beirais: $F_1 = F_3 = 1,4 \cdot CV_3 \cdot A_{i1} = 1,4 \cdot (-587,84) \cdot (3,125 \cdot 6,1) = 15687,98 \text{ N}$;
- Central: $F_2 = 1,4 \cdot CV_2 \cdot A_{i2} = 1,4 \cdot (-587,84) \cdot (6,25 \cdot 6,1) = 31375,96 \text{ N}$.

Resolvendo pelo método de Cremona, a força de tração solicitante na diagonal tracionada é $N_{t,Sd} = 22583,73 \text{ N}$ ($22,6 \text{ kN}$) $< N_{t,Rd}$, logo, o par de cantoneiras $64 \times 64 \times 6,4$ suporta os esforços.

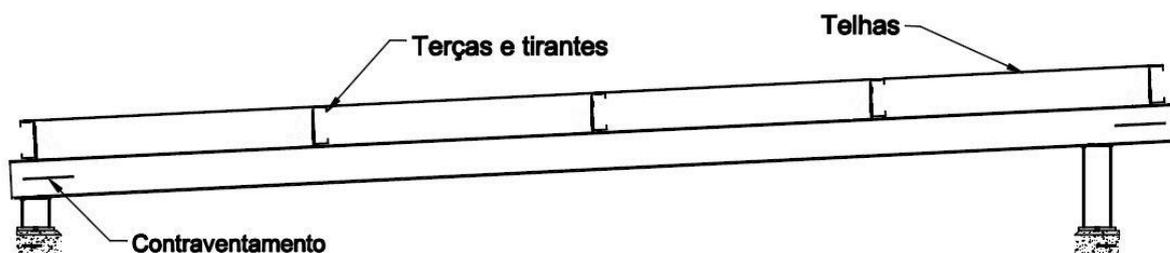
7.8 DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE COBERTURA

As vigas de cobertura têm a função de sustentar todos os elementos de cobertura, fechamento e efeitos da ação dos ventos e transmitir essas cargas às colunas. Podem ser encontradas em alma cheia ou sistemas reticulados.

O projeto utiliza vigas em perfil de alma cheia. Este tipo de vigas tem sido muito utilizado devido à variedade de perfis oferecidos no mercado, podendo ser laminados, soldados ou vazados.

Para o dimensionamento da viga é necessário levar em consideração todos os esforços solicitantes. Considera-se para os cálculos a viga central, uma vez que ela recebe o carregamento das terças e contraventamentos de ambos os lados da cobertura, sendo assim a mais carregada.

Figura 47 - Cargas permanentes atuantes na viga



Fonte: Editado pelo autor, 2015.

Os componentes da carga acidental e do vento incidente no telhado continuam os mesmos já calculados anteriormente. Vale lembrar que todos esses esforços estão sendo aplicados nas telhas, terças, tirantes, contraventamentos e então nas vigas, e estão sob uma inclinação de 3° , fazendo com que a viga principal seja solicitada com forças de flexão, cisalhantes e axial de compressão.

7.8.1 ESFORÇO FLETOR

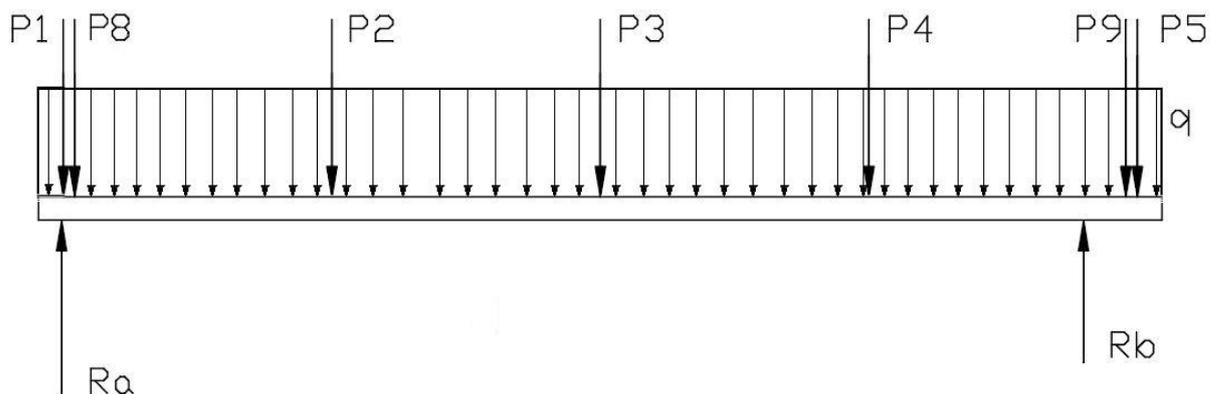
O esforço fletor solicitado na viga principal é gerado pelos componentes do eixo de maior inércia da viga. Esses componentes são o peso próprio, cargas acidentais e carga de ventos. São aplicados na viga pelas terças e contraventamento.

Compondo o peso próprio teremos:

- Telhas: 15 unidades com 6,43 m de comprimento (62,43 N/m²);
- Terças: 10 unidades com 6,77 m de comprimento (76,03 N/m);
- Tirantes flexíveis: 8 unidades com 1,62 m de comprimento (9,71 N/m);
- Tirantes inclinados: 8 unidades com 2,49 m de comprimento (9,71 N/m);
- Tirantes rígidos: 8 unidades com 1,6 m de comprimento (46,6 N/m);
- Contraventamento: 8 pares com 4,3 m de comprimento (119,7 N/m);
- Viga: peso estipulado (320 N/m).

Logo, decompondo as cargas na viga principal (Figura 48) têm-se os respectivos componentes atuando no eixo y (Figura 49):

Figura 48 - Componentes do eixo de Y da das cargas atuantes



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

Sendo:

- $P_1 = 2154,34 \text{ N}$;
- $P_2 = 3550,82 \text{ N}$;
- $P_3 = 3435,42 \text{ N}$;
- $P_4 = 3550,82 \text{ N}$;
- $P_5 = 2154,37 \text{ N}$;
- $P_8 = 649,98 \text{ N}$;
- $P_9 = 649,98 \text{ N}$;
- $q = 391,86 \text{ N/m}$.

Gerando as reações:

- $R_a = 8814,61 \text{ N}$;
- $R_b = 9815,54 \text{ N}$.

Realizando os cálculos necessários, encontram-se os valores de momento máximo e força cortante:

- $V_{\max} = 8763,67 \text{ N}$;
- $M_{\max} = 10992,47 \text{ N}$.

De acordo com a NBR 8800, para um elemento ser resistente a uma força fletora, deve ser resistente às flambagens e ao cisalhamento que essa força pode causar:

- Flambagem local da alma:

Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda = \frac{h}{t}$$

Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação:

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \sqrt{\left(\frac{E}{f_y}\right)}$$

Parâmetro de esbeltez correspondente ao escoamento:

$$\lambda_r = 5,7 \cdot \sqrt{\left(\frac{E}{f_y}\right)}$$

Segundo a norma, se:

$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$\lambda_p < \lambda < \lambda_r \rightarrow M_{rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_p - \lambda_r} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$\lambda \geq \lambda_p \rightarrow \text{Anexo H norma}$$

Sendo :

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

Onde:

- λ é o limite de esbeltez;
- λ_p é o limite de esbeltez correspondente à plastificação;
- λ_r é o limite de esbeltez correspondente ao escoamento;
- h é a altura da seção transversal;
- t é a espessura do elemento;
- E é o módulo de elasticidade;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço;
- M_{rd} é o momento fletor solicitante;
- M_{pl} é o momento fletor de plastificação;
- M_r é o momento fletor correspondente ao início do escoamento;
- Z é o módulo de resistência plástico;
- C_b é o coeficiente de equivalência de momentos na flexão.

Para o estudo:

$$\lambda = \frac{h}{t} = \frac{190}{5,8} = 32,76$$

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \sqrt{\left(\frac{E}{f_y}\right)} = 3,76 \cdot \sqrt{\left(\frac{20500}{34,5}\right)} = 91,65$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y = 190,6 \cdot 34,5 = 6575,7 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{6575,7}{1,1} = 5977,91 \text{ kN.cm}$$

- Flambagem local da mesa:

Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda = \frac{b}{t}$$

Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação:

$$\lambda_p = 0,83 \cdot \sqrt{\left(\frac{E}{f_y}\right)}$$

Parâmetro de esbeltez correspondente ao escoamento:

$$\lambda_r = 5,7 \cdot \sqrt{\left(\frac{E}{f_y - \sigma_r}\right)}$$

Seguindo a norma, se:

$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$\lambda_p < \lambda < \lambda_r \rightarrow M_{rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_p - \lambda_r} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$\lambda \geq \lambda_r \rightarrow M_{rd} = \frac{M_{cd}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

Sendo :

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

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

Onde:

- M_{cr} é o momento fletor de flambagem elástica;
- W_c é o módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção.

Aplicando:

$$\lambda = \frac{b}{t} = 7,85$$

$$\lambda_p = 0,83 \cdot \sqrt{\left(\frac{E}{f_y}\right)} = 0,83 \cdot \sqrt{\left(\frac{20500}{34,5}\right)} = 9,26$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y = 190,6 \cdot 34,5 = 6575,7 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow M_{rd} = \frac{6575,7}{1,1} = 5977,9 \text{ kN.cm}$$

- Flambagem lateral com torção

Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y}$$

Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação:

$$\lambda_p = 1,76 \cdot \sqrt{\left(\frac{E}{f_y}\right)}$$

Parâmetro de esbeltez correspondente ao escoamento:

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{27 \cdot C_w \cdot \beta^2}{I_y}\right)}}$$

De acordo com a norma, se:

$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$\lambda_p < \lambda < \lambda_r \rightarrow M_{rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_p - \lambda_r} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$\lambda \geq \lambda_p \rightarrow M_{rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

Onde :

$$M_{pl} = Z \cdot f_y$$

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

$$M_r = (0,7 \cdot f_y) \cdot W$$

$$\beta = \frac{M_r}{E \cdot J}$$

$$C_w = \frac{I_y \cdot (d - t_r)^2}{4}$$

$$C_b = \frac{12,5 \cdot M_{max}}{2,5 \cdot M_{max} + 3 \cdot M_a + 4 \cdot M_b + 3 \cdot M_c} \leq 3,0$$

- λ é o limite de esbeltez;
- λ_p é o limite de esbeltez correspondente à plastificação;
- λ_r é o limite de esbeltez correspondente ao escoamento;
- L_b é o comprimento de flambagem;
- r_y é o raio de giração em relação ao eixo principal de inércia;
- E é o módulo de elasticidade;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço;
- I_y é o momento de inercia;
- J é a constante de torção da seção transversal;
- M_{rd} é o momento fletor solicitante;
- M_{pl} é o momento fletor de plastificação;
- M_r é o momento fletor correspondente ao início do escoamento;
- Z é o modulo de resistência plástico;
- C_b é o coeficiente de equivalência de momentos na flexão.
- C_w é a constante do empenamento da seção transversal;

- M_{cr} é o momento fletor de flambagem elástica;
- W_c é o módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção.
- d é a altura total da seção transversal;
- t_f é a espessura da mesa;
- M_a é momento no primeiro quarto do comprimento;
- M_b é o momento na metade do comprimento;
- M_c é o momento no terceiro quarto do comprimento.

Aplicando:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} = \frac{151,5}{2,14} = 70,79$$

$$\lambda_p = 1,76 \cdot \sqrt{\left(\frac{E}{f_y}\right)} = 1,76 \cdot \sqrt{\left(\frac{20500}{34,5}\right)} = 42,9$$

$$\beta = \frac{(f_y - \sigma_r) \cdot W}{E \cdot J} = \frac{(0,7 \cdot 34,5) \cdot 166,1}{20500 \cdot 4,02} = 0,049$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y \cdot J \cdot \beta} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{27 \cdot C_w \cdot \beta^2}{I_y}\right)}} =$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \cdot \sqrt{116,1 \cdot 4,02}}{2,14 \cdot 4,02 \cdot 0,049} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{27 \cdot 11098 \cdot 0,0027}{116,1}\right)}} = 138,27$$

$$\lambda_p < \lambda < \lambda_r \rightarrow M_{rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$C_b = \frac{12,5 \cdot 10992,5}{2,5 \cdot 10992,5 + 3 \cdot 8252,33 + 4 \cdot 10799,07 + 3 \cdot 7810,42}$$

$$C_b = 1,156$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y = 190,6 \cdot 34,5 = 6575,7 \text{ kN.cm}$$

$$M_r = (0,7 \cdot f_y) \cdot W = 0,7 \cdot 34,5 \cdot 166,1 = 4011,32 \text{ kN.cm}$$

$$M_{rd} = \frac{1,156}{1,1} \cdot \left[6575,7 - (6575,7 - 4011,32) \cdot \frac{70,79 - 42,9}{138,27 - 42,9} \right]$$

$$M_{rd} = 6122,36 \text{ kN.cm}$$

$$\frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{6575,7}{1,1} = 5977,91 \text{ kN.cm}$$

Por se tratar do menor valor, adota-se $M_{rd} = 5977,91 \text{ kN.cm}$.

O menor valor entre flambagem local de mesa, flambagem local de alma e flambagem lateral com rotação, é utilizado para o dimensionamento:

$$M_{rd} = 5977,91 \text{ kN.cm} > M_{sd} = 1099,25 \text{ kN.cm}$$

Como o valor do momento resistente é maior que o solicitado, o perfil escolhido suporta os esforços e não sofrerá flambagens.

- Cisalhamento:

O esforço fletor também gera uma força cortante, que de acordo com a NBR 8800:

Parametro de esbeltez:

$$\lambda = \frac{h}{t_w}$$

Parametro de esbeltez correspondente à plastificação:

$$\lambda_p = 1,1 \cdot \sqrt{\left(\frac{k_v \cdot E}{f_y} \right)}$$

Parametro de esbeltez correspondente ao escoamento:

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

Se:

$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow V_{rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$\lambda_p < \lambda < \lambda_r \rightarrow V_{rd} = \left[\frac{V_{pl} \cdot \lambda_p}{\lambda \cdot \gamma_{a1}} \right]$$

$$\lambda \geq \lambda_r \rightarrow V_{rd} = 1,24 \cdot \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^2 \cdot \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

Onde:

$$A_w = t_w \cdot d$$

$$V_{pl} = 0,6 \cdot A_w \cdot f_y$$

- λ é o limite de esbeltez;
- λ_p é o limite de esbeltez correspondente à plastificação;
- λ_r é o limite de esbeltez correspondente ao escoamento;
- E é o módulo de elasticidade;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço;
- k_v é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento;
- V_{rd} é a força cortante resistente;
- V_{pl} é a força cortante à plastificação da alma por cisalhamento;
- t_w é a espessura da alma;
- d é a altura total da seção transversal;
- h é a altura efetiva da alma;
- γ_{a1} é a resistência ao escoamento do aço;
- A_w é a área da alma.

Para o estudo, onde $k_v = 5,0$ para almas sem enrijecedores transversais:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = 32,76$$

$$\lambda_p = 1,1 \cdot \sqrt{\left(\frac{k_v \cdot E}{f_y}\right)} = 1,1 \cdot \sqrt{\left(\frac{5 \cdot 20500}{34,5}\right)} = 59,96$$

$$A_w = t_w \cdot d = 20,3 \cdot 0,58 = 11,77$$

$$V_{pl} = 0,6 \cdot A_w \cdot f_y = 0,6 \cdot 11,77 \cdot 34,5 = 243,72 \text{ k}$$

$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow V_{rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{243,72}{1,1} = 221,57 \text{ kN}$$

$$V_{rd} = 221,57 \text{ kN} > V_{sd} = 8,77 \text{ kN}$$

Como o valor da força cortante resistente é maior que a solicitada, o perfil escolhido suporta os esforços e não sofrerá cisalhamento.

7.8.2 ESFORÇO DE COMPRESSÃO

As vigas principais recebem do sistema de contraventamento esforços de compressão que devem ser analisadas. De acordo com a NBR 8800:

- Verificação da esbeltez local

$$\text{alma} - \left(\frac{h_w}{t_w}\right) \leq \left(\frac{h_w}{t_w}\right)_{lim}$$

$$\left(\frac{h_w}{t_w}\right)_{lim} = 1,49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\text{mesa} - \left(\frac{b_f}{t_f}\right) \leq \left(\frac{b_f}{t_f}\right)_{lim}$$

$$\left(\frac{b_f}{t_f}\right)_{lim} = 0,56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$Q = Q_s \cdot Q_a$$

Onde:

- h representa a altura da alma;
- t_w representa espessura da alma;
- E representa o módulo de elasticidade do aço;
- f_y representa a resistência ao escoamento do aço;
- b_f representa a largura da mesa;
- t_f representa a espessura da mesa;
- Q representa o fator de redução associado a flambagem local;
- $Q_{s,a}$ representa fator de redução;

Aplicando:

$$\left(\frac{h_w}{t_w}\right) = \frac{190}{5,8} = 32,76$$

$$\left(\frac{h_w}{t_w}\right)_{lim} = 1,49 \cdot \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 36,32$$

$$\text{como } \left(\frac{h_w}{t_w}\right) \leq \left(\frac{h_w}{t_w}\right)_{lim} \rightarrow Q_s = 1$$

$$\left(\frac{b_f}{t_f}\right) = \frac{51}{6,5} = 7,85$$

$$\left(\frac{b_f}{t_f}\right)_{lim} = 0,56 \cdot \sqrt{\frac{20500}{34,5}} = 13,65$$

$$\text{como } \left(\frac{b_f}{t_f}\right) \leq \left(\frac{b_f}{t_f}\right)_{lim} \rightarrow Q_a = 1$$

$$Q = Q_s \cdot Q_a = 1$$

- Determinação carga de flambagem

Para o eixo x:

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

Para o eixo y:

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

Para o eixo z:

$$N_{cz} = \frac{1}{r_0^2} \cdot \left(\frac{\pi^2 \cdot C_w \cdot E}{(K_z \cdot L_z)^2} + G \cdot J \right)$$

Onde:

$$r_0^2 = r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2$$

Sendo:

- $N_{ex,y,z}$ as forças normais de flambagem elástica por flexão em relação aos eixo x, y e z respectivamente;
- E o módulo de elasticidade do aço;
- C_w é a constante do empenamento da seção transversal;
- K o coeficiente de flambagem de barras comprimidas;
- $L_{x,y,z}$ o comprimento de flambagem em relação aos eixos x, y e z respectivamente;

- $I_{x,y}$ os momentos de inércia do eixo em relação aos eixos x e y;
- G o módulo de elasticidade transversal;
- J a constante de torção;
- r_0 o raio de giração polar da seção em relação ao eixo de torção;
- $r_{x,y}$ os raios de giração polar da seção em relação aos eixos x e y;
- x_0 a coordenada do centro de torção na direção do eixo x;
- y_0 a coordenada do centro de torção na direção do eixo y.

Aplicando:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot I_x \cdot E}{(K_x \cdot L_x)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 1686 \cdot 20500}{(1 \cdot 634)^2} = 848,66 \text{ kN};$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot I_y \cdot E}{(K_y \cdot L_y)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 116 \cdot 20500}{(1 \cdot 151,5)^2} = 1022,55 \text{ kN};$$

$$r_0^2 = r_x^2 \cdot r_y^2 \cdot x_0^2 \cdot y_0^2 = 8,19^2 + 2,14^2 = 71,66$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \cdot \left(\frac{\pi^2 \cdot C_w \cdot E}{(K_z \cdot L_z)^2} + G \cdot J \right) = \frac{1}{71,66} \cdot \left(\frac{\pi^2 \cdot 11098 \cdot 20500}{(1 \cdot 151,5)^2} + 7800 \cdot 4,02 \right)$$

$$N_{ez} = 1802,77 \text{ kN};$$

O valor da carga é definido como o menor dos três valores, $N_e = 848,66 \text{ kN}$.

- Esforço resistente à compressão

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}}$$

Se

$$\lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{\lambda_0^2}$$

$$\lambda_0 > 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$$

$$N_{rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

Onde:

- N_{rd} é a força resistente;
- λ_0 é o índice de esbeltez reduzido;
- Q é o fator de redução associado à flambagem local;
- A_g é a área bruta da seção transversal;
- N_e é a força normal de flambagem elástica por flexão;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço;
- γ_{a1} é o coeficiente de ponderação do escoamento;
- χ é o fator de redução associado à resistência à compressão.

Aplicando:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 25,1 \cdot 34,5}{848,66}} = 1,01$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{1,01^2} = 0,652$$

$$N_{rd} = \frac{0,652 \cdot 1 \cdot 25,1 \cdot 34,5}{1,1} = 513,27 \text{ kN}$$

De acordo com os cálculos do contraventamento, a força solicitante de compressão é igual $N_{sd} = 14,42 \text{ kN}$, logo o perfil escolhido suportará as forças de compressão.

$$N_{rd} = 513,27 \text{ kN} > N_{sd} = 14,42 \text{ kN}$$

7.8.3 ESFORÇOS COMBINADOS

Segundo a NBR 8800, elementos que são submetidos a mais de um tipo de esforço devem, além de resistentes a cada tipo de esforço individualmente, resistir às ações das forças combinadas. No caso da viga principal, tem-se esforços de compressão e flexão, logo é necessário verificar a resistência:

Se:

$$\frac{N_{sd}}{N_{rd}} \geq 0,2 \rightarrow \frac{N_{sd}}{N_{rd}} + \frac{9}{8} \cdot \left[\frac{M_{x,sr}}{M_{x,rd}} + \frac{M_{y,sd}}{M_{y,rd}} \right] \leq 1,0$$

$$\frac{N_{sd}}{N_{rd}} < 0,2 \rightarrow \frac{N_{sd}}{2 \cdot N_{rd}} + \left[\frac{M_{x,sr}}{M_{x,rd}} + \frac{M_{y,sd}}{M_{y,rd}} \right] \leq 1,0$$

Onde:

- N_{sd} é a força axial de solicitante;
- N_{rd} é a força axial resistente;
- $M_{x,y sd}$ são os momentos fletores solicitantes;
- $M_{x,y rd}$ são os momentos fletores resistentes.

Aplicando:

$$\frac{N_{sd}}{N_{rd}} = \frac{14,42}{513,27} = 0,028$$

$$\frac{N_{sd}}{N_{rd}} < 0,2 \rightarrow \frac{N_{sd}}{2 \cdot N_{rd}} + \left[\frac{M_{x,sr}}{M_{x,rd}} + \frac{M_{y,sd}}{M_{y,rd}} \right]$$

$$\frac{N_{sd}}{2 \cdot N_{rd}} + \left[\frac{M_{x,sr}}{M_{x,rd}} + \frac{M_{y,sd}}{M_{y,rd}} \right] = \frac{14,42}{2 \cdot 513,27} + \left[\frac{1099,25}{5977,91} + \frac{0,0}{0,0} \right] = 0,198 < 1$$

O perfil escolhido suporta todos esforços e combinações solicitadas.

8 CONCLUSÃO

Após finalizar a análise de todos os componentes da cobertura pode-se fazer algumas observações levando em conta o dimensionamento utilizado pelos projetistas. No projeto foram utilizados cinco apoios para as telhas, e espaçamento de 1,55 m entre os apoios. Considerando o catálogo do Anexo B é possível verificar que configuração é capaz de suportar os esforços, com margem de folga, isto é, superdimensionamento. Embora a margem seja grande, é prática comum devido à experiência dos projetistas, adotar telhas trapezoidais com altura de 40 mm e 0,65 mm de espessura para coberturas, trabalhando-se com vãos de 1,5 a 2 m.

No caso dos tirantes o arranjo utilizado e tipo de perfis componentes variam bastante, pois vão depender da experiência e preferência do engenheiro ou projetista. No projeto estudado foram utilizados dois tipos de perfis, cantoneira de abas iguais, chamada de tirante rígido, e barras redondas em duas configurações, perpendicular às terças chamadas tirantes flexíveis, e diagonalmente chamadas tirantes inclinadas. A experiência é citada, pois embora as cargas solicitadas não sejam grandes em relação às resistentes, sabe-se que é importante cobrir imprevistos que podem gerar deformações e colapso da estrutura por se tratar de peças muito suscetíveis a colapso quando se trata de ações do vento. Foram usados assim valores considerados mínimos para o tipo de construção.

O perfil utilizado para as terças no galpão foi exatamente o mesmo perfil encontrado na análise realizada baseando-se no dimensionamento de perfil U enrijecido (U 200x75x25x2,66).

O sistema de contraventamento foi formado através de pares de cantoneiras (2L 64x64x6,4), com espaçamento de 8 mm, o que garante a integridade da estrutura com certo superdimensionamento ou maior fator de segurança. No cálculo do estudo de caso, por falta de informações sobre as ligações entre as cantoneiras, adotou-se o valor mais cauteloso, encontrando a mesma bitola para o perfil, porém com espaçamento zero entre as cantoneiras. Lembrando que, com o espaçamento, o conjunto torna-se mais resistente, como mostra a tabela no Anexo B.

Nas vigas, como em alguns outros componentes, o perfil escolhido é superdimensionado (W200x22,5). Pode-se perceber que existe certa folga nas resistências do perfil, dando oportunidade de diminuir a bitola, gerando economia. O perfil encontrado na análise foi W200x19,3.

Para os casos em que os perfis foram superdimensionados existe a possibilidade de os fatores de segurança utilizados pelos responsáveis da obra terem sido maiores do que os costumeiramente utilizados nos cálculos, especificados por normas. Outra possibilidade é de que os engenheiros e projetistas podem ter levado em consideração outras informações, possíveis alterações de uso futuro ou ampliações, ou outros parâmetros solicitados pelo contratante não apresentados no projeto, gerando algumas divergências em relação aos valores estipulados e utilizados nos cálculos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- PFEIL, W; PFEIL, M. **Estruturas de aço**: Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro, 2009.
- BELLEI I. H. **Edifícios Industriais em Aço**. 6. ed. São Paulo, 2010.
- DIAS, L. A. M. **Estruturas de aço**: Conceitos, técnicas e linguagem. 6. ed. São Paulo, 1998.
- CHAMBERLAIN, Z; FICANHA, R; FABEANE, R. **Projeto e Cálculo de Estruturas de Aço**: Edifício Industrial Detalhado. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças Devidas ao Vento em Edificações**. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6215: Produtos Siderúrgicos**. Rio de Janeiro, 2011.
- CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Galpões para usos gerais**. Rio de Janeiro, 2003.
- CENTRO DE FORMAÇÃO PROFISSIONAL DA INDÚSTRIA METALÚRGICA E METALMECÂNICA. **Traçagem**.
- MARCON, E. **Cálculo de ligações em estrutura metálica**: Aplicações e recomendações normativas. Apresentado em Construmetal 2012.

- JAVARONI, C. E; GONÇALVEZ, R. M. **Perfis de aço formados a frio submetidos á flexão**: Análise teórico-experimental. São Carlos, 2002.
- LIMA, L; SILVA, J; SÁ, L. **Uma ferramenta gráfica para o ensino e projeto de estruturas de aço na faculdade engenharia da UERJ**. Rio de Janeiro, 2004.

REFERÊNCIAS DE IMAGENS E TABELAS

[1] Em: <http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/Paginas/default.aspx>, (acesso em agosto 2015);

[2] Em: <http://www.carbinox.com.br/produtos.asp?categoria=1&linha=3>, (acesso em novembro 2015);

[3] Em: <http://www.gerdau.com/br/pt/produtos/barra-redonda-gerdau>, (acesso em agosto 2015);

[4] Em: <http://www.gerdau.com/br/pt/produtos/barra-quadrada-gerdau>, (acesso em agosto 2015);

[5] Em: <http://www.gerdau.com/br/pt/produtos/barra-chata-gerdau>, (acesso em agosto 2015);

[6] Em: <http://wwwo.metlica.com.br/perfl-soldado>, (acesso setembro 2015);

[7] Em: <http://www.perfitassi.com.br/produtos.php>, (acesso setembro 2015);

[8] Em: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/3646-tipos-de-tubulacoes-de-aco-inoxidavel/>, (acesso setembro 2015);

[9] Em: <http://sagondolas.com.br/>, (acesso setembro 2015);

[10] Em: <http://www.flickriver.com/photos/tags/pontemet%C3%A1lica/>, (acesso setembro 2015);

[11] Em: <http://www.sgeem.com.br/galeria-de-fotos-ptbr.asp#>, (acesso novembro 2015);

[12] Em: <http://patison.com.br/chumbadores>, (acesso outubro 2015);

[13] Em: <http://www.dourado.sp.gov.br/Noticia/Default.aspx?IDNoticia=959>, (acesso outubro 2015);

[14] Em: <http://wwwo.metlica.com.br/images/stories/ld72.jpg>, (acesso outubro 2015);

[15] Em: <http://www.serralheriajmkurten.com.br/estruturas-metalicas/>, (acesso outubro 2015);

[16] Em: <http://www.construeficiencia.com.br/uploads/2011/06/estrutura-metalica-mji.jpg>, (acesso novembro 2015);

[17] Em: http://www.multipius.com/Software/metalicas-3d/Novidades_Metalicas2012.htm, (acesso outubro 2015);

[18] Em: http://www.freirerosa.com.br/glr_fotos.php?id=3, (acesso outubro 2015);

[19] Em: <http://www.incase.com.br/servicos.php>, (acesso outubro 2015);

[20] Em: <http://diariodoaco.com.br/img/imprensa/highslide/I015415.jpg>, (acesso outubro 2015);

[21] Em: <http://www.harris-brastak.com.br/>, (acesso outubro 2015);

[22] Em: http://www.mrtbusmar.com.br/fotos/servicos_oxicorte-01.jpg, (acesso outubro 2015);

[23] Em: <http://www.tetrapartsps.com.br/servicos/corte-a-plasma>, (acesso outubro 2015);

[24] Em: <http://nottable.com.br/loja/wp-content/uploads/2013/11/banerprint-corte-plasma-metales.jpg>, (acesso outubro 2015);

[25] Em: <http://www.usinagemgotoegoto.com.br/>, (acesso outubro 2015);

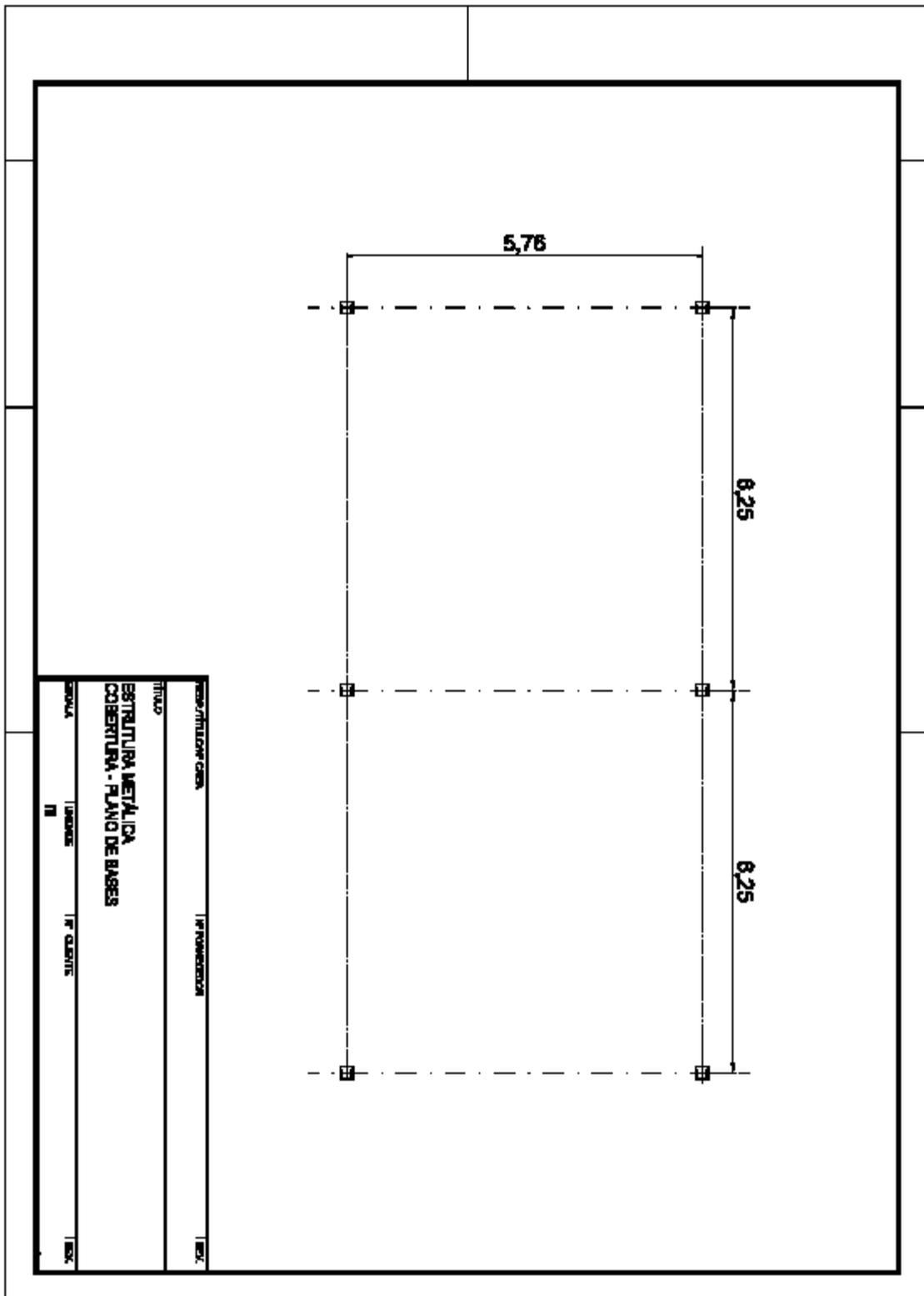
[26] Em: <http://monterini.com.br/area-de-atuacao/>, (acesso outubro 2015);

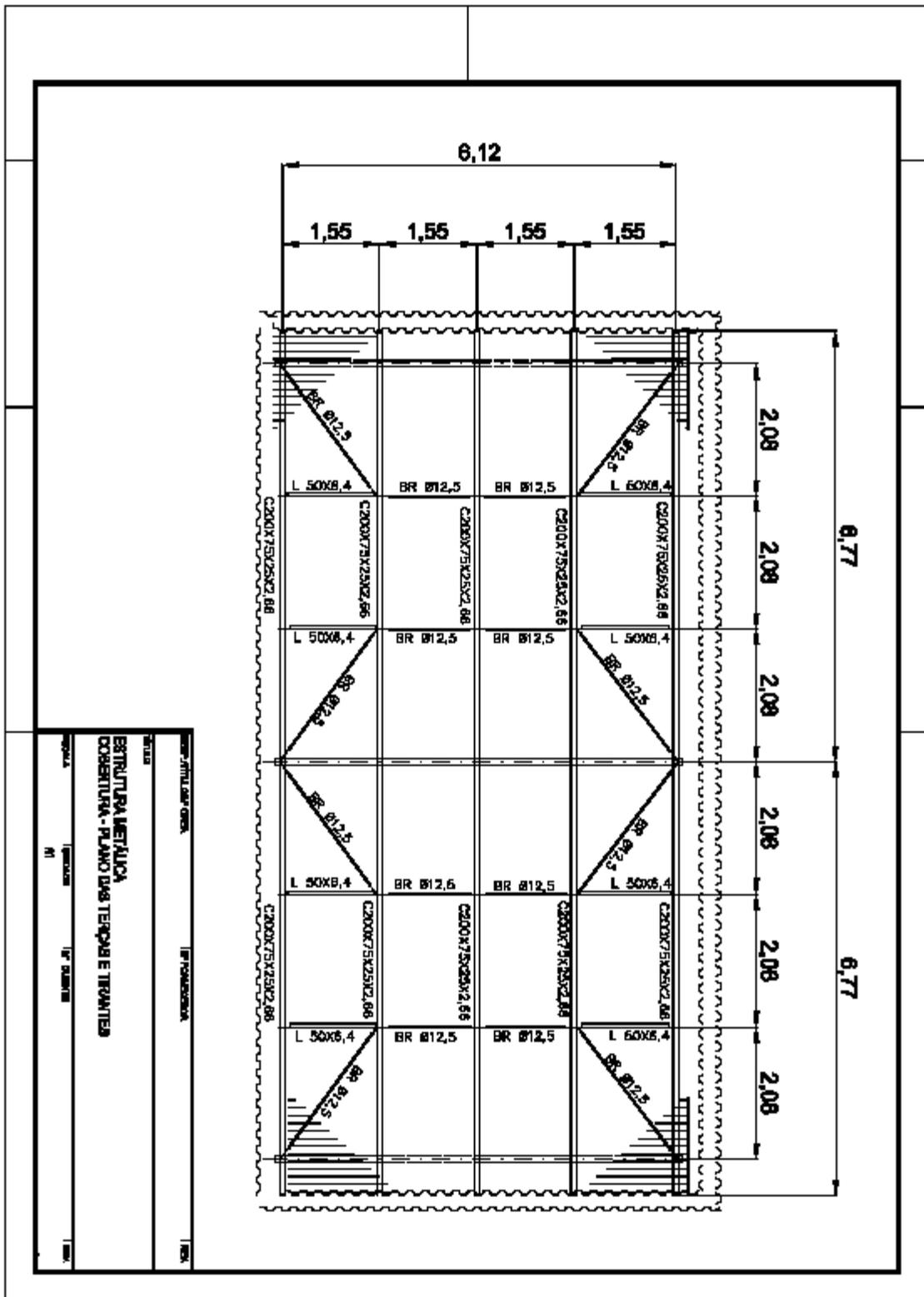
[27] Em: <http://www.aprietojato.com/e-possivel-realizar-jateamento-com-agua/>, (acesso outubro 2015);

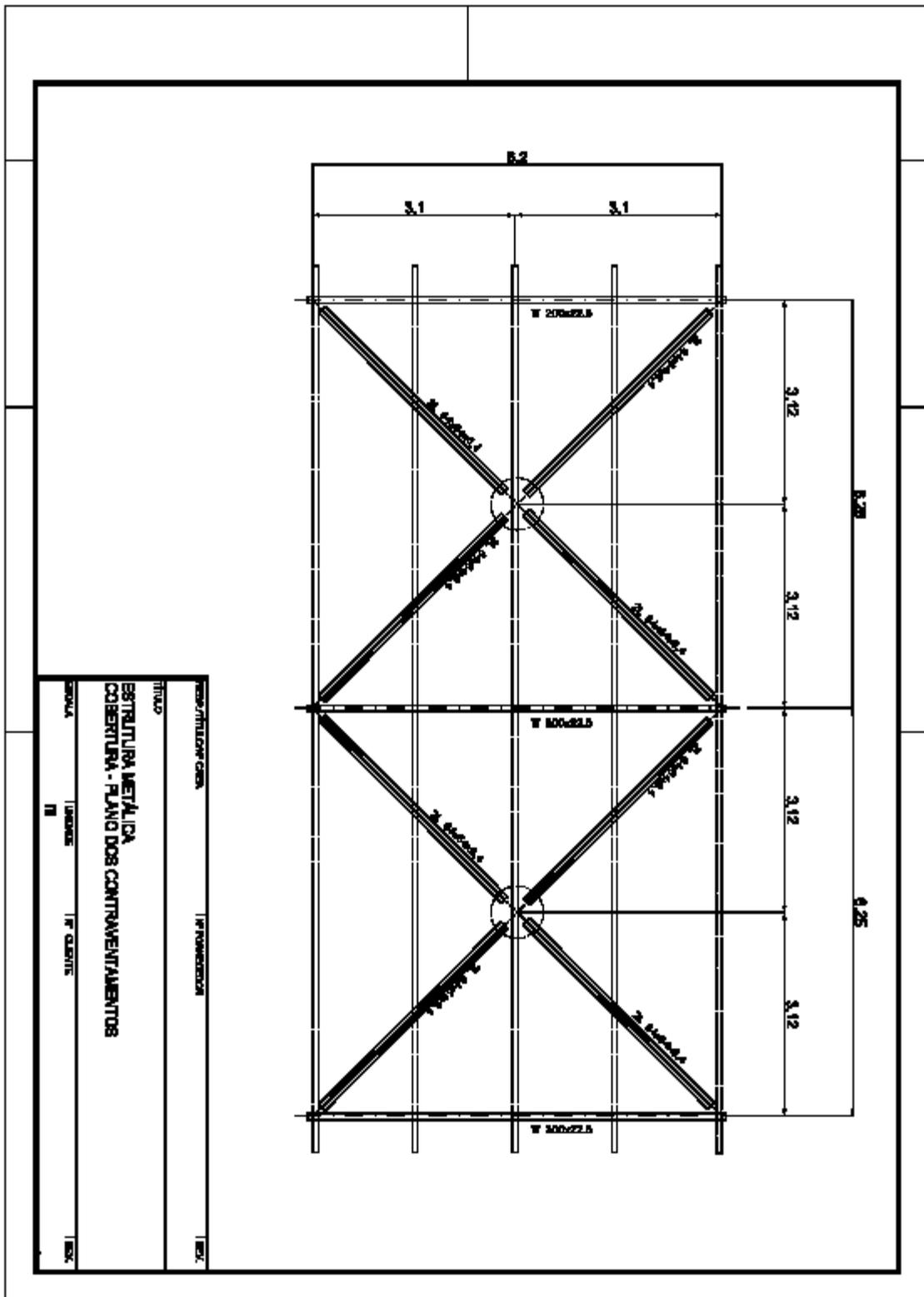
[28] Em: <http://www.momsteel.com.pt/dinamico/conteudo/trat-pil-vig-2.jpg>, (acesso outubro 2015);

[29] Em: <http://www.infoescola.com/quimica/galvanizacao/>, (acesso outubro 2015);

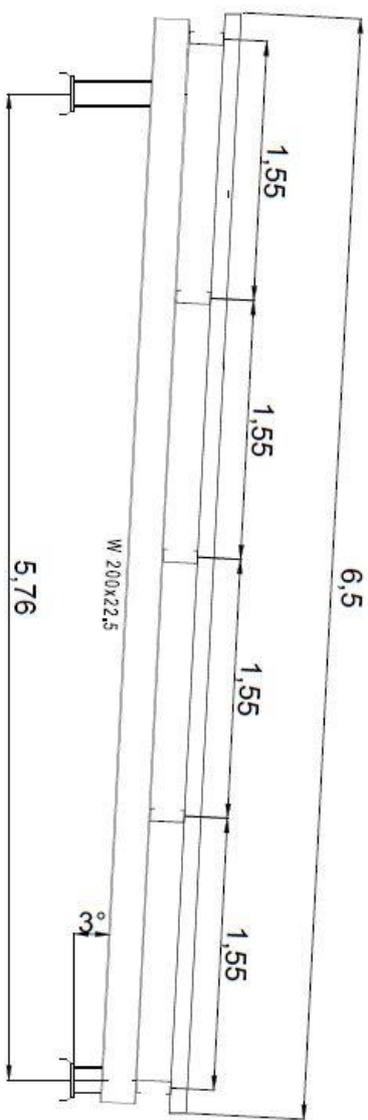
ANEXO A – PLANTAS DE COBERTURA METÁLICA







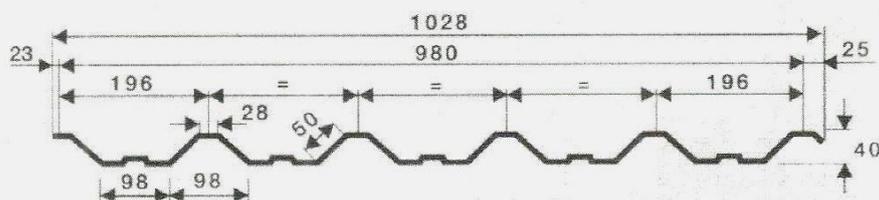
Testis Structures



RESP./TITULO/º CRETA	Nº FORNecedor	REV.
TITULO		
ESTRUTURA METALICA COBERTURA - VISTA LATERAL		
ESCALA	LINDAGE	Nº CLIENTE
M1		
		REV.

ANEXO B – CATÁLOGOS DE PERFÍS DE AÇO

Tabela C- 41 - Telha METFORM MF-40 / 980



As telhas METFORM podem ser fabricadas em quaisquer comprimentos (limitado a 12m), de acordo com as necessidades de projeto.

A tabela abaixo apresenta o peso próprio em kg/m e kg/m², de acordo com as espessuras em mm das telhas MF-40 METFORM.

Pesos	Espessuras das chapas (mm)					
	0,43	0,50	0,65	0,80	0,95	1,25
kg/m	4,13	4,80	6,24	7,68	9,12	12,00
kg/m ²	4,21	4,90	6,37	7,84	9,31	12,24

A tabela de Sobrecarga Máxima abaixo indica as sobrecargas líquidas uniformemente distribuídas (já descontado o peso próprio) que podem ser aplicadas nas telhas MF-40, em função do vão e do número de apoios existentes. Esta tabela foi elaborada de acordo com as prescrições do American Iron and Steel Institute (AISI-LRFD Cold-Formed Steel Design Manual - 1991).

Foram estipuladas duas limitações quanto a flecha máxima admissível: L/120 para telhas com inclinações maiores ou iguais a 15% e L/180 para telhas com inclinações inferiores a 15%.

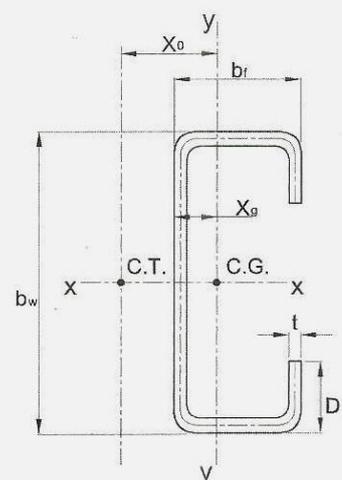
O limite de resistência das telhas considera a utilização de aço NBR-7008 (fy igual 180 MPa), condição de pressão e/ou sucção e adota o menor valor entre os seguintes estados limites: momento fletor no vão, interação momento fletor/cortante nos apoios e enrugamento de alma.

O valor da sobrecarga admissível será sempre o menor entre o limite de resistência apresentado e a carga correspondente à flecha admissível (L/120 ou L/180).

A largura mínima de apoio é 50mm para as telhas MF-40.

Dist. entre apoios	Esp. Chapa (mm)		Sobrecarga Máxima para Telha MF 40 (kg/m ²)																	
			0,43			0,50			0,65			0,80			0,95			1,25		
			2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4			
1,50 m	Flecha	L/120	402	968	761	487	1.171	920	648	1.559	1.226	808	1.942	1.527	967	2.325	1.828	1.286	3.092	2.431
		L/180	269	645	508	325	780	614	432	1.039	817	539	1.295	1.018	645	1.550	1.219	858	2.061	1.621
	Lim. Resistência		160	134	153	200	173	198	273	270	307	340	398	454	407	480	598	541	638	795
1,75 m	Flecha	L/120	253	610	479	307	737	580	408	982	772	509	1.223	962	609	1.464	1.151	810	1.947	1.531
		L/180	169	406	320	205	491	387	272	654	515	339	815	641	406	976	768	540	1.298	1.021
	Lim. Resistência		117	115	131	146	148	169	199	230	263	248	294	367	297	352	440	395	468	585
2,00 m	Flecha	L/120	170	408	321	205	494	388	273	658	517	341	819	644	408	981	771	542	1.304	1.026
		L/180	113	272	214	137	329	259	182	438	345	227	546	430	272	654	514	362	870	684
	Lim. Resistência		89	100	114	111	129	147	151	178	223	189	224	281	226	268	336	300	357	447
2,25 m	Flecha	L/120	119	287	225	144	347	273	192	462	363	239	575	452	287	689	542	381	916	720
		L/180	80	191	150	96	231	182	128	308	242	160	384	302	191	460	361	254	611	480
	Lim. Resistência		70	83	101	87	102	128	119	140	176	148	176	221	177	211	265	235	281	352
2,50 m	Flecha	L/120	87	209	164	105	253	199	140	337	265	174	419	330	209	502	395	278	668	525
		L/180	58	139	110	70	169	133	93	224	177	116	280	220	139	335	263	185	445	350
	Lim. Resistência		56	67	83	70	82	103	95	113	142	119	142	178	142	170	213	189	226	284
2,75 m	Flecha	L/120	65	157	123	79	190	149	105	253	199	131	315	248	157	377	297	209	502	395
		L/180	44	105	82	53	127	100	70	169	133	87	210	165	105	252	198	139	335	263
	Lim. Resistência		46	55	69	57	68	85	78	93	117	97	116	146	116	139	175	155	185	233
3,00 m	Flecha	L/120	50	121	95	61	146	115	81	195	153	101	243	191	121	291	229	161	386	304
		L/180	34	81	63	41	98	77	54	130	102	67	162	127	81	194	152	107	258	203
	Lim. Resistência		38	46	57	47	56	71	65	77	97	81	97	122	96	116	146	128	154	195
3,25 m	Flecha	L/120	40	95	75	48	115	90	64	153	120	79	191	150	95	229	180	126	304	239
		L/180	26	63	50	32	77	60	43	102	80	53	128	100	63	152	120	84	203	159
	Lim. Resistência		32	38	49	40	47	60	54	65	82	68	82	103	81	98	124	108	130	165
3,50 m	Flecha	L/120	32	76	60	38	92	72	51	123	96	64	153	120	76	183	144	101	243	191
		L/180	21	51	40	26	61	48	34	82	64	42	102	80	51	122	96	68	162	128
	Lim. Resistência		27	33	42	34	40	51	46	55	70	58	70	88	69	83	106	92	111	141

Tabela C-24 – continuação
 Perfil U de chapa dobrada enrijecida



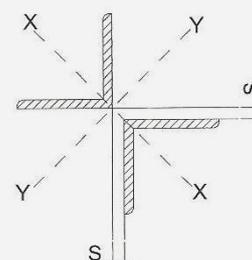
PERFIL $b_w \times b_f \times D \times t$	Eixo X-X							Eixo Y-Y					r_0 cm
	A cm ²	m kg/m	I_x cm ⁴	W_x Cm ³	r_x cm	x_g cm	x_0 cm	I_y cm ⁴	W_y cm ³	r_y cm	I_t cm ⁴	C_w cm ⁶	
200 x 75 x 20 x 2,00	7,54	5,92	467	46,74	7,88	2,20	5,42	56,3	10,62	2,73	0,100	4.615	9,94
200 x 75 x 20 x 2,25	8,44	6,63	521	52,14	7,86	2,20	5,39	62,4	11,77	2,72	0,142	5.118	9,91
200 x 75 x 25 x 2,65	9,87	7,75	605	60,57	7,83	2,20	5,34	71,7	13,54	2,70	0,231	5.890	9,86
200 x 75 x 25 x 3,00	11,11	8,72	677	67,75	7,81	2,19	5,30	79,5	15,00	2,68	0,333	6.534	9,81
200 x 75 x 25 x 3,35	12,33	9,68	747	74,74	7,79	2,19	5,26	87	16,39	2,66	0,461	7.149	9,76
200 x 75 x 25 x 3,75	13,70	10,75	825	82,50	7,76	2,19	5,21	95	17,90	2,63	0,642	7.817	9,71
200 x 75 x 25 x 4,25	15,39	12,08	918	91,86	7,73	2,19	5,15	104	19,65	2,60	0,926	8.603	9,6
200 x 75 x 25 x 4,75	17,04	13,38	1.008	100,84	7,69	2,18	5,09	113	21,26	2,58	1,280	9.334	9,6
200 x 100 x 25 x 2,65	11,46	9,00	750	75,07	8,09	3,31	7,89	157	23,51	3,70	0,268	13.447	11,9
200 x 100 x 25 x 3,00	12,91	10,13	841	84,11	8,07	3,31	7,84	175	26,18	3,68	0,387	14.970	11,8
200 x 100 x 25 x 3,35	14,34	11,25	929	92,95	8,05	3,31	7,80	192	28,76	3,66	0,536	16.438	11,8
200 x 100 x 25 x 3,75	15,95	12,52	1.028	102,81	8,03	3,30	7,75	211	31,59	3,64	0,747	18.049	11,7
200 x 100 x 25 x 4,25	17,94	14,08	1.147	114,77	8,00	3,30	7,69	234	34,95	3,61	1,079	19.966	11,7
200 x 100 x 25 x 4,75	19,89	15,62	1.263	126,33	7,97	3,29	7,63	255	38,13	3,59	1,495	21.779	11,6
250 x 85 x 25 x 2,00	9,14	7,1	871	87,72	9,77	2,43	6,09	88,9	14,67	3,12	0,122	11,4	11,93
250 x 85 x 25 x 2,25	10,24	8,1	973	97,79	9,75	2,43	6,06	98,8	16,29	3,11	0,173	12,7	11,89
250 x 85 x 25 x 2,65	11,99	9,4	1.133	113,33	9,72	2,43	6,02	114	18,80	3,08	0,280	14,7	11,84
250 x 85 x 25 x 3,00	13,51	10,6	1.270	127,07	9,70	2,43	5,97	126	20,91	3,07	0,405	16,3	11,80
250 x 85 x 25 x 3,35	15,01	11,8	1.404	140,39	9,68	2,43	5,93	139	22,92	3,05	0,561	17,9	11,75
250 x 85 x 25 x 3,75	16,70	13,1	1.554	155,37	9,65	2,43	5,89	152	25,13	3,02	0,782	19,7	11,70
250 x 85 x 25 x 4,25	18,79	14,7	1.736	173,62	9,61	2,42	5,83	168	27,73	2,99	1,130	21,8	11,63
250 x 85 x 25 x 4,75	20,84	16,3	1.912	191,20	9,58	2,42	5,77	183	30,17	2,97	1,566	23,8	11,57
250 x 100 x 25 x 2,65	12,79	10,1	1.255	125,53	9,91	2,98	7,29	169	24,11	3,64	0,299	21,6	12,83
250 x 100 x 25 x 3,00	14,41	11,3	1.408	140,81	9,89	2,98	7,25	188	26,86	3,62	0,432	24,1	12,78
250 x 100 x 25 x 3,35	16,01	12,6	1.557	155,72	9,86	2,98	7,21	207	29,52	3,60	0,598	26,4	12,73
250 x 100 x 25 x 3,75	17,83	13,9	1.725	172,51	9,84	2,98	7,16	227	32,43	3,58	0,835	29,1	12,68
250 x 100 x 25 x 4,25	20,06	15,7	1.928	192,81	9,81	2,97	7,10	252	35,90	3,55	1,207	32,2	12,61
250 x 100 x 25 x 4,75	22,27	17,4	2.126	212,61	9,77	2,97	7,04	275	39,18	3,52	1,673	35,2	12,55
300 x 85 x 25 x 2,00	10,14	7,9	1.339	133,91	11,49	2,20	5,64	93,8	14,91	3,04	0,135	17,1	13,16
300 x 85 x 25 x 2,25	11,37	8,9	1.496	149,61	11,48	2,20	5,62	104	16,57	3,03	0,192	18,9	13,13
300 x 85 x 25 x 2,65	13,32	10,4	1.744	174,41	11,45	2,20	5,57	120	19,12	3,01	0,311	21,927	13,08
300 x 85 x 25 x 3,00	15,01	11,7	1.957	195,71	11,42	2,20	5,53	133	21,26	2,99	0,450	24,422	13,04
300 x 85 x 25 x 3,35	16,68	13,1	2.165	216,51	11,39	2,20	5,49	146	23,32	2,97	0,623	26,828	12,99
300 x 85 x 25 x 3,75	18,58	14,5	2.399	239,91	11,36	2,20	5,45	161	25,57	2,94	0,870	29,473	12,94
300 x 85 x 25 x 4,25	20,91	16,4	2.683	268,31	11,33	2,20	5,39	177	28,22	2,92	1,258	32,623	12,88
300 x 85 x 25 x 4,75	23,22	18,2	2.959	295,91	11,29	2,20	5,33	193	30,71	2,89	1,744	35,606	12,82
300 x 100 x 25 x 2,65	14,11	11,0	1.920	192,01	11,67	2,72	6,79	178	24,57	3,56	0,330	32,115	13,96
300 x 100 x 25 x 3,00	15,91	12,4	2.155	215,51	11,64	2,71	6,75	199	27,37	3,54	0,477	35,827	13,91
300 x 100 x 25 x 3,35	17,69	13,8	2.387	238,71	11,62	2,71	6,71	219	30,08	3,52	0,661	39,422	13,87
300 x 100 x 25 x 3,75	19,70	15,4	2.645	264,51	11,59	2,71	6,66	241	33,06	3,50	0,923	43,389	13,82
300 x 100 x 25 x 4,25	22,19	17,4	2.962	296,21	11,55	2,71	6,60	266	36,61	3,47	1,335	48,142	13,75
300 x 100 x 25 x 4,75	24,64	19,3	3.269	326,91	11,52	2,70	6,54	291	39,96	3,44	1,851	52,671	13,69

Tabela C-10

Par de cantoneiras iguais

opostas pelo vértice

Série Americana

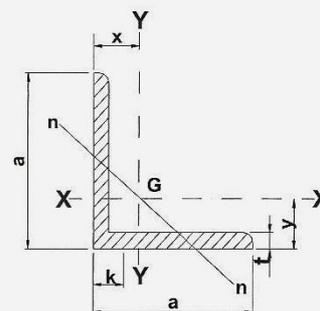


Abas mm (pol)	Espes. t mm	Massa M Kg/m	Área A cm ²	Eixo X-X			Raio de giração em cm (Eixo Y-Y)					
				I _x cm ⁴	W _x cm ³	r _x cm	Afastamento das cantoneiras S em mm					
							0	6.3	9.5	12.5	16	19
44 x 44 (1 3/4" x 1 3/4")	3,2	4,28	5,42	16,7	1,34	1,76	1,94	2,33	-	-	-	-
	4,8	6,30	8,00	23,6	2,30	1,72	2,04	2,43	2,70	-	-	-
	6,4	8,24	10,44	30	3,13	1,70	2,09	2,49	2,75	-	-	-
	7,9	10,08	12,90	35	3,77	1,66	2,16	2,55	2,83	-	-	-
51 x 51 (2" x 2")	4,8	7,26	9,13	36	3,13	1,99	2,29	2,68	2,94	-	-	-
	6,4	9,48	12,12	46	4,10	1,95	2,34	2,73	3,00	-	-	-
	7,9	11,66	14,84	55	4,91	1,93	2,41	2,80	3,06	-	-	-
	9,5	14,00	17,52	62	5,73	1,89	2,51	2,90	3,17	3,37	-	-
64 x 64 (2 1/2" x 2 1/2")	4,8	9,14	11,60	72	4,90	2,50	2,77	3,15	3,43	-	-	-
	6,4	12,20	15,34	92	6,40	2,46	2,97	3,36	3,52	-	-	-
	7,9	14,88	18,96	111	7,90	2,43	2,93	3,32	3,59	-	-	-
	9,5	17,66	22,32	129	9,30	2,41	2,99	3,38	3,65	3,85	-	-
76 x 76 (3" x 3")	4,8	11,04	14,06	127	7,20	3,01	3,30	3,68	3,94	-	-	-
	6,4	14,58	18,53	165	9,50	2,98	3,37	3,75	4,01	-	-	-
	7,9	18,18	22,98	199	11,6	2,95	3,47	3,86	4,12	-	-	-
	9,5	21,42	27,22	232	13,6	2,92	3,52	3,91	4,17	4,37	-	-
	12,7	28,00	35,48	290	18,0	2,86	3,65	4,04	4,30	4,50	4,70	-
102 x 102 (4" x 4")	6,4	19,62	25,02	400	16,4	4,00	4,40	4,78	5,04	-	-	-
	7,9	24,38	30,96	492	21,3	3,99	4,49	4,87	5,15	-	-	-
	9,5	29,20	36,80	578	24	3,96	4,56	4,95	5,21	5,40	-	-
	12,7	38,00	49,38	735	32	3,90	4,68	5,07	5,33	5,53	5,73	-
	15,9	46,80	59,46	876	39	3,84	4,83	5,22	5,48	5,68	5,88	6,65
127 x 127 (5" x 5")	9,5	36,60	46,88	1159	39	4,99	5,53	5,97	5,33	6,42	-	-
	12,7	48,20	61,28	1489	52	4,93	5,71	6,02	5,35	6,54	6,74	-
	15,9	59,60	75,60	1793	64	4,87	5,86	6,25	5,51	6,70	6,90	7,47
	19	70,20	89,52	2071	73	4,81	6,00	6,38	5,64	6,84	7,08	7,63
152 x 152 (6" x 6")	9,5	44,26	56,24	2044	57	6,03	6,83	7,01	7,33	7,46	7,65	7,59
	12,7	58,40	74,18	2643	75	5,97	6,75	7,13	7,38	7,58	7,77	-
	15,9	72,00	91,72	3203	93	5,91	6,88	7,27	7,53	7,72	7,82	8,14
	19	85,40	108,88	3713	109	5,84	7,05	7,44	7,70	7,82	8,09	8,25
	22,2	98,60	125,52	4207	124	5,79	7,18	7,57	7,83	8,02	8,22	8,47
203 x 203 (8" x 8")	12,7	78,60	129,95	4462	137	8,04	8,83	9,21	9,46	9,65	9,55	10,24
	15,9	97,40	133,95	7893	168	7,98	8,95	9,33	9,59	9,75	9,83	10,30
	19	115,80	147,58	9233	300	7,91	9,11	9,49	9,75	9,94	10,14	10,34
	22,2	134,00	176,60	10539	229	7,86	9,32	9,61	9,87	10,06	10,26	10,43
	25,4	151,80	193,50	11742	259	7,79	9,39	9,73	10,01	10,17	10,41	10,60

Tabela C-7

Cantoneira de abas iguais –

Série Americana



Designação Nominal	Aba a	Espessura t	Área A	Massa M	$I_x=I_y$ cm ⁴	$W_x=W_y$ cm ³	$r_x=r_y$ cm	x = y cm	Eixo n r mín. cm	k mm
38 x 38 (1 ½" x 1 ½")	38,1	3,2 4,8 6,4	2,32 3,42 4,45	1,83 2,68 3,48	3,33 4,58 5,83	1,15 1,64 2,13	1,17 1,17 1,15	1,07 1,12 1,20	0,76 0,74 0,74	6 8 10
44 x 44 (1 ¾" x 1 ¾")	44,45	3,2 4,8 6,4 7,9	2,71 4,00 5,22 6,45	2,14 3,15 4,12 5,04	5,41 7,50 9,57 11,2	1,64 2,30 3,13 3,77	1,40 1,37 1,35 1,32	1,22 1,30 1,35 1,40	0,89 0,89 0,86 0,86	8 10 11 13
51 x 51 (2" x 2")	50,8	4,8 6,4 7,9 9,5	4,58 6,06 7,42 8,76	3,63 4,74 5,83 6,99	11,7 14,6 17,5 20,0	3,13 4,10 4,91 5,73	1,58 1,55 1,53 1,50	1,45 1,50 1,55 1,63	1,02 0,99 0,99 0,99	10 11 13 14
64 x 64 (2 ½" x 2 ½")	63,5	4,8 6,4 7,9 9,5	5,80 7,67 9,48 11,16	4,57 6,10 7,44 8,78	23 29 35 41	4,91 6,40 7,87 9,35	1,98 1,96 1,93 1,91	1,75 1,83 1,88 1,93	1,24 1,24 1,24 1,22	11 13 14 16
76 x 76 (3" x 3")	76,20	4,8 6,4 7,9 9,5 12,7	7,0 9,3 11,5 13,6 17,7	5,5 7,3 9,1 10,7 14,0	40 50 62 75 91	7,2 9,5 11,6 13,6 18,0	2,39 2,36 2,34 2,31 2,29	2,08 2,13 2,21 2,26 2,36	1,50 1,50 1,50 1,47 1,47	13 14 16 18 21
102 x 102 (4" x 4")	101,6	6,4 7,9 9,5 12,7 15,9	12,5 15,5 18,5 24,2 29,7	9,8 12,2 14,6 19,0 23,4	125 154 183 233 279	16,4 21 25 33 39	3,18 3,15 3,12 3,10 3,05	2,77 2,84 2,90 3,00 3,12	2,01 2,00 2,00 1,98 1,96	16 18 19 22 25
127 x 127 (5" x 5")	127,0	9,5 12,7 15,9 19,0	23,3 30,6 37,8 44,8	18,3 24,1 29,8 35,1	362 470 566 653	39 52 64 74	3,94 3,91 3,86 3,81	3,53 3,63 3,76 3,86	2,51 2,49 2,46 2,46	22 25 29 32
152 x 152 (6" x 6")	152,4	9,5 12,7 15,9 19,0 22,2	28,1 37,1 45,9 54,4 62,8	22,2 29,2 36,0 42,7 49,3	641 828 1007 1173 1327	57 75 94 110 125	4,78 4,72 4,67 4,65 4,60	4,17 4,27 4,39 4,52 4,62	3,02 3,00 2,97 2,97 2,97	22 25 29 32 35
203 x 203 (8" x 8")	203,2	12,7 15,9 19,0 22,2 25,4	50,0 62,0 73,8 85,3 96,8	39,3 48,7 57,9 67,0 75,9	2022 2471 2899 3311 3702	138 169 200 230 259	6,38 6,32 6,27 6,22 6,20	5,56 5,66 5,79 5,89 6,02	4,01 4,01 3,99 3,96 3,96	29 32 35 38 38

Perfil Laminado Nacional - Açominas

Perfis Laminados	Massa/Área		Alt.	Alma		Mesas		R	Eixo X - X			Eixo Y - Y			Propriedades da torção			Esbelteza local		Fatores de flambagem lateral		Área de Pintura	Fator de Massividade		
	m	A		d	t _w	h	t _f		b _f	I _x	W _x	r _x	Z _x	I _y	W _y	r _y	Z _y	r _t	I _t	C _w	Alma			Mesas	X ₁
Açominas	kg/m	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm		cm ⁴	cm ³	cm	cm ³	cm ³	cm	cm ³	cm	cm ⁴	cm ⁶	h/tw	b _f /2t _f	kN/cm ²	1/(kN/cm ²) ²	m ² /m	m ²	
W 150 X 13	13,0	16,6	148	4,30	138	4,90	100	10,0	635	85,8	6,18	96,4	82	16,4	2,22	25,5	2,60	1,72	4181	27,49	10,20	1741	8513	0,73	442
W 150 X 18	18,4	23,4	153	5,80	139	7,10	102	10,0	939	122,8	6,34	139,4	126	25	2,32	38,5	2,69	4,34	6683	20,48	7,18	2292	2852	0,75	320
W 200 X 15	15,2	19,4	200	4,30	190	5,20	100	10,0	1305	130,5	8,20	147,9	87	17	2,12	27,3	2,55	2,05	8222	39,44	9,62	1350	25817	0,84	431
W 200 X 19,3	19,7	25,1	203	5,80	190	6,50	102	10,0	1686	166,1	8,19	190,6	116	23	2,14	35,9	2,59	4,02	11098	29,31	7,85	1891	11009	0,85	337
W 200 X 22,5	22,7	29,0	206	6,20	190	8,00	102	10,0	2029	197,0	8,37	225,5	142	28	2,22	43,9	2,63	6,18	13668	27,42	6,38	1897	6661	0,85	295
W 200 X 26,6	26,9	34,2	207	5,80	190	8,40	133	10,0	2611	252,3	8,73	282,3	330	50	3,10	76,3	3,54	7,65	32477	29,34	7,92	1792	7187	0,89	286
W 200 X 31,3	31,7	40,3	210	6,40	190	10,20	134	10,0	3168	301,7	8,86	338,6	410	61	3,19	94,0	3,60	12,59	40822	26,50	6,57	2088	3838	0,99	245
W 250 X 17,9	18,1	23,1	251	4,80	240	5,30	101	10,0	2291	182,6	9,96	211,0	91	18	1,99	28,8	2,48	2,54	13735	45,92	9,53	1173	51982	0,94	408
W 250 X 22,3	22,7	28,9	254	5,80	240	6,90	102	10,0	2939	231,4	10,09	267,7	123	24	2,06	38,4	2,54	4,77	18629	37,97	7,39	1417	23978	0,95	329
W 250 X 25,3	25,6	32,6	257	6,10	240	8,40	102	10,0	3473	270,2	10,31	311,1	149	29	2,14	46,4	2,58	7,06	22955	36,10	6,07	1570	15108	0,96	293
W 250 X 28,4	28,7	36,6	260	6,40	240	10,00	102	10,0	4046	311,2	10,51	367,3	178	35	2,20	54,9	2,62	10,34	27636	34,38	5,10	1747	9460	0,96	262
W 250 X 32,7	33,0	42,1	258	6,10	240	9,10	146	10,0	4937	382,7	10,83	428,5	473	65	3,35	99,7	3,66	10,44	73104	36,03	8,02	1530	13953	1,13	269
W 250 X 38,5	38,9	49,6	262	6,60	240	11,20	147	10,0	6057	462,4	11,05	517,8	594	81	3,46	124,1	3,93	17,63	93242	33,27	6,56	1788	7245	1,14	231
W 250 X 44,8	45,2	57,6	266	7,60	240	13,00	148	10,0	7158	538,2	11,15	606,3	704	95	3,50	146,4	3,96	27,14	112398	28,95	5,69	2053	4215	1,15	200
W 310 X 21	21,4	27,2	303	5,10	292	5,70	101	10,0	3776	249,2	11,77	291,9	98	19	1,90	31,4	2,42	3,27	21628	53,25	8,86	1058	85762	1,05	384
W 310 X 23,8	24,1	30,7	305	5,60	292	6,70	101	10,0	4346	285,0	11,89	333,2	116	23	1,94	36,9	2,45	4,65	25594	48,50	7,54	1173	55675	1,05	341
W 310 X 28,3	28,6	36,5	309	6,00	291	8,90	102	10,0	5500	356,0	12,28	412,0	158	31	2,08	49,4	2,55	8,14	35441	45,20	5,73	1353	28771	1,06	290
W 310 X 32,7	33,1	42,1	313	6,60	291	10,80	102	10,0	6670	419,8	12,49	485,3	192	38	2,13	59,8	2,58	12,91	43612	41,12	4,72	1552	16123	1,07	253
W 310 X 38,7	39,0	49,7	310	5,80	291	9,70	165	10,0	8581	553,6	13,14	615,4	727	88	3,82	134,9	4,38	13,20	163728	46,66	8,51	1293	26593	1,31	264
W 310 X 44,5	44,9	57,2	313	6,60	291	11,20	166	10,0	9997	638,8	13,22	712,8	855	103	3,87	158,0	4,41	19,90	194433	41,00	7,41	1476	15724	1,32	231
W 310 X 52	52,6	67,0	317	7,60	291	13,20	167	10,0	11909	751,4	13,33	842,5	1026	123	3,91	188,8	4,45	31,81	236422	35,51	6,33	1717	8629	1,33	199
W 360 X 32,9	33,0	42,1	349	5,80	332	8,50	127	12,0	8358	479,0	14,09	547,6	291	46	2,63	72,0	3,20	9,15	84111	53,10	7,47	1145	53136	1,25	297
W 360 X 39	39,4	50,2	353	6,50	332	10,70	128	12,0	10331	585,3	14,35	667,7	375	59	2,73	91,9	3,27	15,83	109551	47,32	5,98	1346	26791	1,26	251
W 360 X 44	45,3	57,7	352	6,90	332	9,80	171	12,0	12258	696,5	14,58	784,3	818	96	3,77	148,0	4,43	16,70	239091	44,70	8,72	1245	34121	1,43	248
W 360 X 51	50,9	64,8	355	7,20	332	11,60	171	12,0	14222	801,2	14,81	899,5	968	113	3,87	174,7	4,49	24,85	284994	42,75	7,37	1394	20870	1,43	221