



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO
CENTRO DE ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ MÁSPOLI FERREIRA PEREIRA

**DIMENSIONAMENTO DE UM MEZANINO METÁLICO
APLICADO COMO CASA DE MÁQUINAS**

MOSSORÓ/RN
2018

JOSÉ MÁSPOLI FERREIRA PEREIRA

**DIMENSIONAMENTO DE UM MEZANINO METÁLICO
APLICADO COMO CASA DE MÁQUINAS**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do
Semi-Árido – UFERSA, Centro de Engenharias para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Gutemberg Ferreira Diniz

MOSSORÓ/RN

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

P436d Pereira, José Máspoli Ferreira.

Dimensionamento de um mezanino metálico
aplicado como casa de máquinas / José Máspoli
Ferreira Pereira. - 2018.
74 f. : il.

Orientador: Gutemberg Ferreira Diniz.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2018.

1. Estrutura metálica. 2. Projeto. I. Diniz,
Gutemberg Ferreira, orient. II. Título.

JOSÉ MÁSPOLI FERREIRA PEREIRA

**DIMENSIONAMENTO DE UM MEZANINO METÁLICO
APLICADO COMO CASA DE MÁQUINAS**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do
Semi-Árido – UFERSA, Centro de Engenharias para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Gutemberg Ferreira Diniz

APROVADO EM: 18/04/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. GUTEMBERGY FERREIRA DINIZ – UFERSA
Presidente e orientador

Prof. Dr. FABRÍCIO JOSÉ NOBREGA CAVALCANTE – UFERSA
Primeiro Membro

Prof. Dr. ZOROASTRO TORRES VILAR – UFERSA
Segundo Membro

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Gutemberg Ferreira Diniz, pelo grande apoio neste trabalho.

A banca pela disponibilidade em contribuir para a melhoria do trabalho.

Ao meu amado Pai por estar em momento tão difícil e mesmo assim conseguir me apoiar, a minha Mãe por todo apoio dado e a minha companheira, Alice, pela compressão das dificuldades para realizar este trabalho.

RESUMO

As estruturas metálicas se apresentam como excelentes alternativas para a construção, pelas características como rapidez, durabilidade e custos competitivos, a indústria trabalha rotineiramente com esse tipo de construção. Este estudo se baseia em uma análise a respeito de projetos de estruturas metálicas com foco no método de estado limites, abordando os tipos de perfis comuns no mercado e quais as variáveis importantes para apreciação em projetos, seja ela oriunda das cargas de trabalho ou referentes a propriedades mecânicas e geométricas dos componentes estruturais, de forma mais específica este trabalho propõe projetar um mezanino metálico para aplicação de uma casa de máquinas utilizando o *Ftool*® como um software para análise estrutural e o *Solidworks*® como um software para modelagem da estrutura, bem como um apanhado a respeito dos tipos de ligação mais usais no mercado, uniões soldadas e parafusos. O projeto evidenciou o deslocamento vertical dos componentes carregados como um excelente maneira de se analisar o estado geral de uma estrutura de modo rápido e eficiente, já as ligações parafusos e soldados se mostram como a parte que mais necessita de atenção para o seu dimensionamento, pequenas alterações podem necessitar de novos tipos de ligação.

Palavras-Chave: Estrutura metálica; Projeto; Dimensionamento.

LISTA DE SIGLAS

F_d	Carga de projeto
$F_{gi,k}$	Representa cargas das ações permanentes
$F_{Q1,k}$	Representa a carga de ação variável principal
$F_{Qj,k}$	Ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável,
γ_q	Coeficiente de ações
ψ	Fator de redução para ações secundárias.
F_{cr}	Carga limite de deslocamento
λ	Parâmetro de esbeltez
K	Coeficiente de flambagem
L	Comprimento destravado do perfil
r	Raio de giração
$N_{c,Rd}$	Força axial de compressão resistente de cálculo
χ	Fator de redução associado à resistência a compressão
Q	Fator de redução total associado a flambagem local
A_g	Área bruta da seção transversal do perfil
F_y	Resistência ao escoamento do aço
γ_{a1}	Coeficiente de ponderação
λ_0	Índice de esbeltez reduzido
I	Momento de inércia da seção transversal
$K_z L_z$	Coeficiente de flambagem por torção
E	Módulo de elasticidade do aço
C_w	Constate de empenamento da seção transversal
J	Constate de torção da seção transversal
r_0	Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento
A_{ef}	Área efetiva da seção transversal
b	Largura dos elementos
t	Espessura dos elementos
b_{ef}	Largura efetiva dos elementos comprimidos AA
c_a	Coeficiente para elementos comprimidos
h	Altura da alma

t_w	Espessura da alma
M_{pl}	Momento fletor de plastificação
C_b	Fator de modificação
M_r	Momento fletor correspondente ao início do escoamento
Z	Módulo de resistência plástico.
V	Força cortante
R_d	Resistencia do metal de base

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama tensão deformação de um aço carbono.....	13
Figura 2 - Perfis Laminados. (a) barras; (b) chapas; (c) perfis estruturais laminados; (d) trilho; (e) quadrado; (f) tubo redondo	14
Figura 3 - Perfis dobrados, (a) perfil C; (b) perfil complexo; (c) perfil S; (d) perfil Z.....	15
Figura 4 - (a) perfil soldado; (b), (c) e (d) perfis compostos.....	15
Figura 5 - Peso específico de materiais para construção.....	17
Figura 6 - Carga mínima de projeto para casa situação.....	18
Figura 7 - Barra sujeita a compressão.....	20
Figura 8 - Relação entre esbeltez e momento resistente.....	21
Figura 9 - Tipos de chanfro em soldas por entalhe.....	36
Figura 10 - Solda de filete.....	37
Figura 11 - Solda do tipo tampão.....	37
Figura 12 - Solda de entalhe e dimensão efetiva te.....	38
Figura 13 - Filete de solda. Seção real e seção teórico. Espessura t da garganta do filete, igual à distância da raiz à face teórica da solda. O menor lado é denominado perna do filete.....	40
Figura 14 - Padronização de furação para estruturas metálicas.....	46
Figura 15 - Padrão máximo de espaçamento entre furos.....	48
Figura 16 - Esforços presentes em uniões parafusadas.....	49
Figura 17 - Modalidade de deformações em parafusos e chapas de ligação.....	49
Figura 18 - Ligação excêntrica de corte.....	51
Figura 19 - Tipos de ligação em relação a rigidez.....	52
Figura 20 - Vigas (a) engastada e (b) bi apoiada.....	53
Figura 21 - Dimensões para chapa de base.....	54
Figura 22 - Vista geral do mezanino metálico.....	56
Figura 23 - Fluxograma para dimensionamento a flexão.....	57
Figura 24 - Fluxograma para dimensionamento a compressão.....	59
Figura 25 - Ligação adotada no mezanino.....	61
Figura 26 - Nomenclatura dos perfis estruturais.....	62
Figura 27 - Esforços de projeto viga V1.....	63
Figura 28 - Esforços de projeto viga V2.....	64
Figura 29 - Esforços de projeto viga V3.....	66
Figura 30 - Esforços de projeto pilar P1.....	68

Figura 31 - Ligações V1/V2, V2/V3 e V3/P1, respectivamente.....	69
Figura 32 - Detalhe da ligação da base do pilar.....	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Coeficientes de ações permanentes.....	18
Quadro 2 - Fator de redução para ações secundárias.	19
Quadro 3- Deslocamento máximo para elementos estruturais.....	22
Quadro 4 - Coeficiente de flambagem.....	23
Quadro 5 - Coeficientes de ponderação relacionado ao escoamento, flambagem e instabilidade.	24
Quadro 6 - Valores de $(b/t)_{lim}$	26
Quadro 7 - Parâmetros referentes ao momento fletor resistente.....	30
Quadro 8 - Relação entre espessura do metal de base e espessura da garganta efetiva de solda por entalhe com penetração parcial.....	39
Quadro 9 - Relação entre espessura do metal de base e espessura da perna da solda de filete..	41
Quadro 10 - Especificações para diferentes tipos de furação.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área de seção transversal de alguns tipos de chanfro e densidade de materiais de soldagem.....	45
Tabela 2 - Eficiência de processos de soldagem.....	45
Tabela 3 - Valores resistentes para a viga V1.....	63
Tabela 4 - Valores resistentes para viga V2.....	65
Tabela 5 - Valores de resistência para viga V3.	66
Tabela 6 - Valores resistentes para o pilar P1.	68
Tabela 7 - Dimensionamento da ligação 1.....	69
Tabela 8 - Dimensionamento da ligação 2.....	70
Tabela 9: Dimensionamento da ligação 3.....	71
Tabela 10: Dimensionamento da chapa de ligação.	71
Tabela 11: Dimensionamento da soldagem da chapa de ligação.....	72
Tabela 10: Levantamento de custos básicos de materiais para construção do mezanino.....	72

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Determinação dos materiais, cargas e esforços	15
2.1.1 Propriedades mecânicas de aço e suas aplicações.....	15
2.1.2 Método de análise estrutural	18
2.1.3 Deslocamento de perfis estruturais	22
2.1.4 Esforço de compressão.....	24
2.1.5 Esforço de flexão.....	30
2.1.6 Esforço de cisalhamento.....	35
2.2 Dimensionamento de união soldada	37
2.2.1 Ligação por soldagem	37
2.2.2 Dimensionamento de solda por entalhe	40
2.2.3 Dimensionamento de solda de filete	42
2.2.4 Custo de consumíveis.....	44
2.3 Dimensionamento de união parafusada e tipos de ligações	45
2.3.1 Ligações por parafuso	45
2.3.2 Características geométricas das uniões	46
2.3.3 Esforço solicitantes nos conectores.....	48
2.3.4 Distribuição de esforços no conectores	50
2.3.5 Tipos de ligações.....	52
2.3.6 Dimensionamento da espessura para chapas de base.....	53
3. METODOLOGIA.....	55
3.1 Classificação do estudo e software utilizados	55
3.2 Considerações do mezanino	56
3.3 Dimensionamento a flexão e cisalhamento	57
3.4 Dimensionamento a compressão.....	59
3.5 Dimensionamento das uniões parafusos	60
3.6 Dimensionamento a soldagem.....	61
4. RESULTADOS	62
4.1 Esforços de projeto e esforço resistentes para vigas e pilares.....	62
4.2 Esforços de projeto e esforço resistentes para as uniões	69
4.3 Especificação da chapa ligação	71
4.4 Levantamento de custos	72

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
6. REFERÊNCIAS	74

1. INTRODUÇÃO

As estruturas metálicas são um dos modelos de construção mais utilizados na indústria, pois apresentam fatores essenciais para o mercado, baixo custo aliado a um ótimo desempenho. Sua aplicação é fomentada por sua facilidade em obter alta precisão e controle de qualidade do produto acabado, elevada resistência a vibrações e choques, rapidez construtiva, reutilização da estrutura, leveza, grandes vãos e baixo desperdício de material. Contudo as construções em aço apresentam limites de execução relacionados ao transporte do material para o local da obra, necessidade de equipamento e mão de obra especializada, cuidados contra a corrosão e o fornecimento dos perfis estruturais definidos em projeto no mercado local (PINHEIRO, 2005).

A grande versatilidade das estruturas metálicas permite a construção de telhados, edifícios, residências, pontes, viadutos, pontes rolantes, reservatórios, torres, guindastes, postes, passarelas, escadas e mezaninos, objeto de estudo deste trabalho (PINHEIRO, 2005).

De acordo com o decreto 58.819 do estado de São Paulo os mezaninos são caracterizados como um pavimento que subdivide parcialmente um andar em dois andares. Sua principal utilidade é aproveitar ao máximo a altura útil de um local, duplicando e até triplicando sua superfície, acondicionando-a como área de armazenagem, escritório, vestuário e etc.

Os mezaninos são constituídos de estruturas de peças leves, de fácil e rápida montagem que permitem uma obra livre de poeira e entulho. As normas que regem esse tipo de construção são a NBR 6120:1980 – Cargas para o cálculo de estruturas, NBR 8800:2008 – Projeto e execução de estruturas de aço em edifícios (Métodos dos Estados-Limite) (PERUCELO, 2009).

As normas estabelecem as cargas atuantes em um mezanino de acordo com a sua aplicação, que são divididas em cargas permanentes e acidentais. As cargas permanentes representam o peso próprio dos elementos presente durante toda a vida útil da estrutura, tais como os pisos, paredes fixas, a própria estrutura, forros, escadas, revestimentos e instalações. As cargas acidentais representam aquelas que atuam na estrutura em função de seu uso, como ocupação humana, objetos e produtos a serem armazenados (PFEIL e PFEIL, 2009).

Diante da importância dos projetos estruturais a construção de um mezanino deve seguir alguns procedimentos que proporcionem segurança durante e após sua construção. Assim, deve-se estabelecer plantas e cortes com indicação de todos os elementos e perfis que compõem a estrutura, detalhes das ligações, memória de cálculo e locação de pilares (PERUCELO, 2009).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

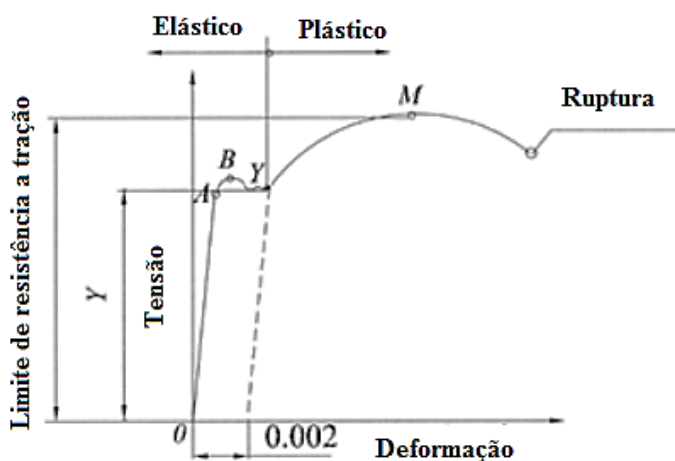
2.1 Determinação dos materiais, cargas e esforços

2.1.1 Propriedades mecânicas de aço e suas aplicações

Em diversos casos materiais em condições de serviço sofrem frequentemente ações de forças e cargas, como por exemplo a fuselagem de um avião, nessas situações é necessário realizar um projeto que selecione o material adequado para os esforços que acontecerão durante a vida útil do produto ou equipamento, para isso é essencial conhecer o comportamento mecânico do material utilizado. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios em laboratórios que replicam as condições de trabalho baseado em padrões internacionais (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

O ensaio de tração é um dos ensaios mecânicos mais difundidos, por ser relativamente simples a sua execução e fornecer um bom número de informações importantes. A figura 1 ilustra o resultado da deformação do corpo de prova feito em aço carbono para cada valor de tensão aplicada, a partir desta figura podemos coletar inicialmente o limite de deformação elástica Y , valor de tensão limite para que material não sofra mudanças permanentes na geometria e propriedades mecânicas do material (CALLISTER e RETHWISCH, 2013; HIBBELER, 2010).

Figura 1: Diagrama tensão deformação de um aço carbono.



Fonte: Callister e Rethwisch (2013)

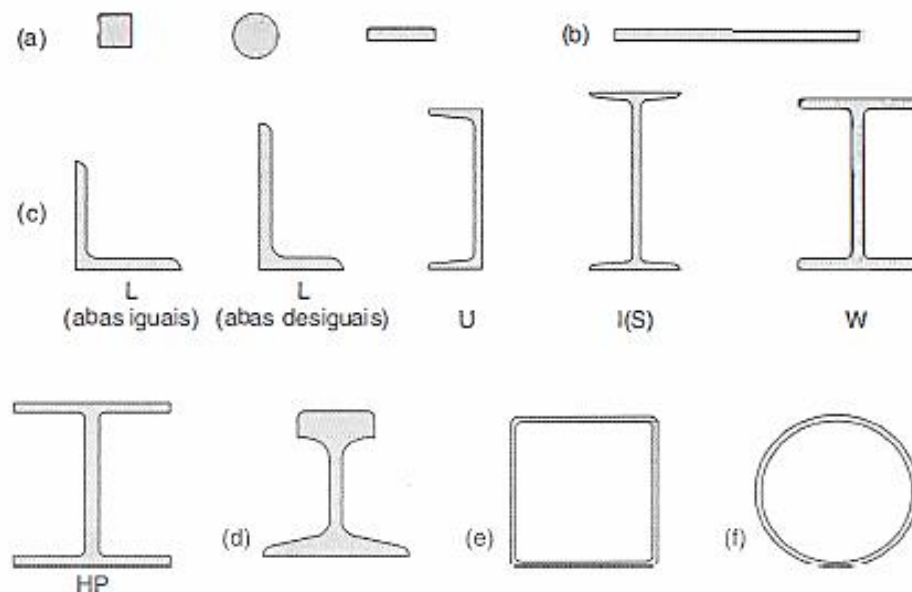
Após o limite elástico o material submetido ao ensaio irá entrar na região plástica, no qual após cessar a tensão aplicada o corpo de prova terá suas propriedades e geometria

modificadas, com a continuidade do aumento da tensão o corpo de prova chegará em seu limite máximo de resistência, ponto *M*, até reduzir sua seção transversal e romper. Grande parte das estruturas são projetadas para cargas dentro do regime elástico o que proporciona uma maior segurança e garantia das suas características originais, portanto antes da realização de um projeto é necessário compreender o comportamento do material mediante a valores distintos de tensão (CALLISTER e RETHWISCH, 2013; HIBBELER, 2010).

As estruturas se utilizam dos mais diversos tipos, dentre eles os aços estruturais, produzidos em uma grande variedade de tipos e formas que possibilitam atender diversas aplicações devido as exigências do mercado, estes são divididos em dois grandes grupos, os aços carbono e os aços baixa liga. Comparativamente os aços baixa liga possuem algumas propriedades mecânicas superiores em relação ao aço carbono e possuem valor de mercado mais elevado, esses dois tipos possuem diferentes formatos e para a construção de estruturas podemos citar os produtos laminados, dobrados, soldados e compostos (PFEIL e PFEIL, 2009).

Dentre os diversos produtos laminados confeccionados na indústria podemos citar as barras (circular, quadrada e retangular), chapas e perfis H, I, L e C, figura 2. Por conta do seu processo produtivo esses tipos de perfis são vantajosos por não apresentarem tensões residuais originárias do seu processo de fabricação (PINHEIRO, 2005; PFEIL e PFEIL, 2009).

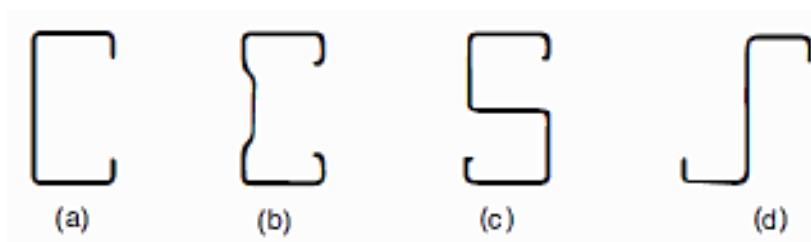
Figura 2. Perfis Laminados. (a) barras; (b) chapas; (c) perfis estruturais laminados; (d) trilho; (e) quadrado; (f) tubo redondo.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009).

Os perfis de chapa dobrada, figura 3, são desenvolvidos a partir dos produtos laminados que sofrem o processo de dobra a frio, a dobra é feita por prensas especiais que se utilizam de gabaritos responsáveis por manter os perfis dentro da tolerância. Possuem grande aplicações em estruturas que são pouco solicitadas e necessitam de leveza, como por exemplos alguns tipos de treliça (PFEIL e PFEIL, 2009).

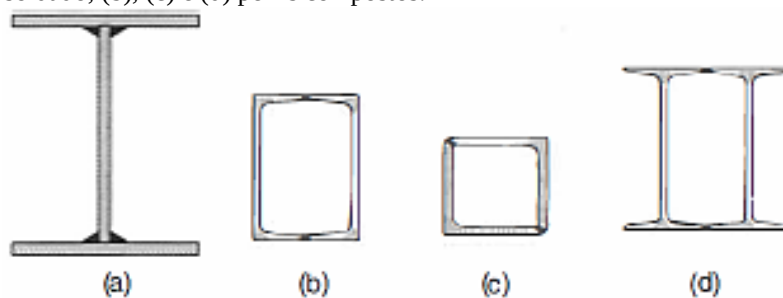
Figura 3: Perfis dobrados, (a) perfil C; (b) perfil complexo; (c) perfil S; (d) perfil Z.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

Os perfis soldados e compostos, figura 4, são fabricados a partir da união de chapas e perfis laminados por processo de soldagem, assim é possível desenvolver perfis específicos para situações distintas, uma característica importante para a escolha desses modelos é levar em consideração as tensões residuais desenvolvidas durante a soldagem, que proporcionam propriedade heterogêneas ao longo de sua área (PFEIL e PFEIL, 2009).

Figura 4: (a) perfil soldado; (b), (c) e (d) perfis compostos.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

Os componentes estruturais são aqueles que dão forma a uma estrutura e mais precisamente para este trabalho são aqueles que compõem um mezanino metálico, no qual a nível de cálculo estrutural serão utilizados os elementos viga e pilar (PFEIL e PFEIL, 2009).

Uma viga é considerada um elemento linear que a flexão é preponderante e o seu comprimento longitudinal supera em pelo menos três vezes a maior dimensão da seção transversal, responsável pela sustentação do piso, já o pilar, é um elemento de eixo reto

usualmente dispostos na vertical, em que as forças compressivas são preponderantes e suportam a carga das vigas (PFEIL e PFEIL, 2009).

2.1.2 Método de análise estrutural

Segundo a obra de Pfeil e Pfeil (2009) existem dois métodos normalmente aplicados para cálculo estrutural, o métodos das tensões admissíveis e o método dos estados limites. A norma NBR 8800:2008 baseia-se no método dos estados limites, que essencialmente é referência pela norma americana AISC-LFRD (2005), outrossim as normas canadenses e europeia também se utilizam do método de estado limites, CAN/CSA 516-01 e EUROCODE3, paralelamente existe uma norma americana em vigor baseada no método das tensões admissíveis ANSI/AISC 360-05, todas essas com objetivos que dar diretriz sobre projetos de estruturas metálicas.

O dimensionamento de estruturas utilizando o método das tensões admissíveis presente em diversas literaturas como o livro *Resistência dos Materiais* de autoria de Hibbeler considera o dimensionamento satisfatório quando a máxima tensão de serviço é inferior a tensão resistente reduzida por um único coeficiente de segurança. Os esforços solicitantes a partir dos quais se calcula as tensões admissíveis do material é obtida através do regime elástico da estrutura e o coeficiente de segurança engloba várias características em um único número, sem analisar ponderadamente as variadas situações existentes (PINHEIRO, 2005).

Erros na montagem da estrutura, variação da carga em sua utilização, uso inadequado, cargas originárias do peso próprio dos componentes estruturais, carga oriundas da ocupação, corrosão, perfis fora de simetria, dentre outros, são algumas das situações que ocorrem com frequências diferentes durante a vida útil de uma estrutura, portanto é importante realizar uma análise distinta de cada efeito (PINHEIRO, 2005; PFEIL e PFEIL, 2009).

O método de dimensionamento de estado limite, ou simplesmente o estado limite de uma estrutura ocorre quando esta deixa de cumprir os seus dois objetivos, suportar as cargas de trabalho e proporcionar conforto ao usuário. O primeiro tipo, limite último, está associado a ocorrência de cargas excessivas e portanto a falha da estrutura, como por exemplo a plastificação total de um elemento estrutural ou de uma seção, a ruptura de uma ligação ou seção, a flambagem em regime plástico e a ruptura por fadiga (PFEIL e PFEIL, 2009).

O segundo tipo também conhecido como estado limite de serviço está associado as cargas que induzem deformações e vibrações excessivas, porém que não proporcionam instabilidade estrutural. Desta maneira a garantia de segurança de uma estrutura não está

somente em resistir as cargas de trabalho, mas também em proporcionar uma ocupação que gere confiança do seu usuário (PFEIL e PFEIL, 2009).

Este método considera as incertezas de forma mais racional que o método das tensões admissíveis, contemplando as reservas de resistência após o início do regime plástico do material e indicando diferentes coeficientes de segurança para situações distintas (PFEIL e PFEIL, 2009).

As carga atuantes em estrutura são classificadas de acordo com a NBR 8800:2008, como ações de caráter permanente, variável e ambientais, como o próprio nome já diz as ações permanentes são aquelas que formam os componentes de uma estruturas, tais como vigas, colunas, escadas, piso, forro, paredes divisórias permanentes e revestimentos. Na prática mensurar essas carga na parte inicial do projeto podem apresentar erros superiores a 10% devido à dificuldade de fazer estimativas exatas (GUARNIER, 2009).

Diferente das ações permanentes as ações temporárias possuem caráter variável e imprevisível, suas modificações ocorrem ao logo do tempo e da localização. Esse tipo de ação pode ser causada por pessoas, móveis, equipamentos, arquivos, dentre outros. As condições do ambiente podem influenciar significativamente uma estrutura, tais como a velocidade do vento característica da região, altas e baixa temperaturas de trabalho e efeitos sísmicos, como um mezanino metálico é construindo dentro de um edifício, galpão ou casa os efeitos ambientais são minimizados e normalmente desconsiderados para fins de projetos (GUARNIER, 2009).

Diante da dificuldade de estabelecer alguns critérios para análise das cargas e determinação das ações, como especificar com exatidão quais seriam as ações permanentes e variáveis, as normas NBR 6120:1980 e a NBR 8800:2008 apresentam valores de carga para uma determinada ação e um coeficiente de importância dessa carga na estrutura (GUARNIER, 2009). As figuras 5 e 6 retiradas da NBR 6120:1980, apresentam os valores mínimos de peso específico de materiais e de carga vertical para diversas situações.

Figura 5: Peso específico de materiais para construção.

Materiais		Peso específico aparentes (kN/m ³)
Revestimentos e concretos	Argamassa de cal, cimento e areia	19
	Argamassa de cimento e areia	21
	Argamasse de gesso	12,5
	Concreto simples	24
	Concreto armado	25

Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (1980).

Figura 6: Carga mínima de projeto para casa situação.

Local		Carga kN/m ²
Case de máquinas	(Incluindo o pesos das máquinas) a ser determinada em cada caso, porém com o valor mínimo de	7,5
Escadas	Com acesso ao público	3
	Sem acesso ao público	2,5

Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (1980).

A NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) apresenta no quadro 1 os valores dos coeficientes de ponderações para os tipos de ações presentes em uma estrutura e assim cada ação receberá um coeficiente coerente com sua natureza e período de aplicação.

Quadro 1: Coeficientes de ações permanentes.

Combinações	Ações permanentes (γ_g) ^{a c}					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)
	Ações variáveis (γ_q) ^{a d}					
	Efeito da temperatura ^b	Ação do vento	Ações truncadas ^e	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação		
Normais	1,20	1,40	1,20	1,50		
Especiais ou de construção	1,00	1,20	1,10	1,30		
Excepcionais	1,00	1,00	1,00	1,00		

Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (2008).

O quadro 2, também retirada da NBR 8800:2008, representa o fator de redução para ações secundárias, que possam ocorrer durante a vida útil e seu valor dependerá do seu grau de repetição, logo repetições maiores implicam em uma maior fator de redução.

Quadro 2: Fator de redução para ações secundárias.

Ações		γ_Q^a		
		ψ_0	ψ_1^d	ψ_2^e
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^{b)}	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ^{c)}	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas (ver B.5.1)	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4
^a Ver alínea c) de 4.7.5.3. ^b Edificações residenciais de acesso restrito. ^c Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público. ^d Para estado-limite de fadiga (ver Anexo K), usar ψ_1 igual a 1,0. ^e Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero.				

Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (2008).

Diante dos valores fornecidos pelas figuras 5, 6, 7 e 8 que estejam dentro das especificações estabelecidas pelo projeto, devem ser substituído na equação 01, para ser obtida a carga de projeto pelo qual a estrutura estará submetida.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (01)$$

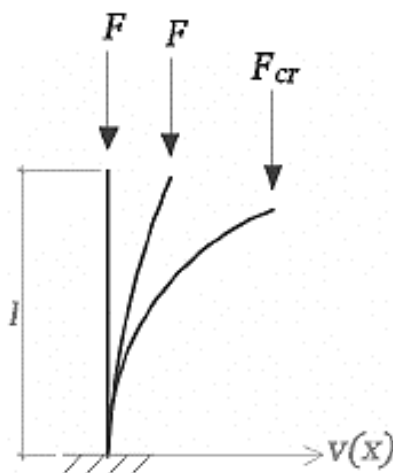
Onde $F_{gi,k}$ representa cargas das ações permanentes, $F_{Q1,k}$ representa a carga de ação variável principal, $F_{Qj,k}$ ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável, γ_q coeficiente de ações e ψ fator de redução para ações secundárias.

2.1.3 Deslocamento de perfis estruturais

Peças que compõem estruturas devem apresentar geometria adequada para resistir as ações provenientes de sua utilização, deformações máximas que não influenciem no aspecto funcional da estrutura e após o término de alguma ação a estrutura retorne ao seu estado inicial de equilíbrio, preenchendo respectivamente os requisitos de resistência, rigidez e estabilidade (MASCIA, 2001; GUIMARÃES E ÁVILA, 2006).

Uma peça sofrerá flambagem no momento que após ser submetida a uma carga compressiva ocorrerá a perda de estabilidade, as causas para esse fenômeno podem ser a carga excessiva aplicada, a falta de retilinidade do eixo da peça, existência de excentricidade na atuação da carga compressiva e a falta de homogeneidade do material. Projetos que trabalham com ações de compressão e flexão devem ter posse do valor do esforço crítico F_{cr} , que represente o limite de deslocamento aceitável da peça, no qual será descrito ao longo do trabalho. A figura 7 representa a ilustração de uma barra engastada comprimida apresentando um deslocamento lateral $v(x)$ conforme a carga F cresce até seu valor crítico F_{cr} (MASCIA, 2001; GUIMARÃES E ÁVILA, 2006).

Figura 7: Barra sujeita a compressão



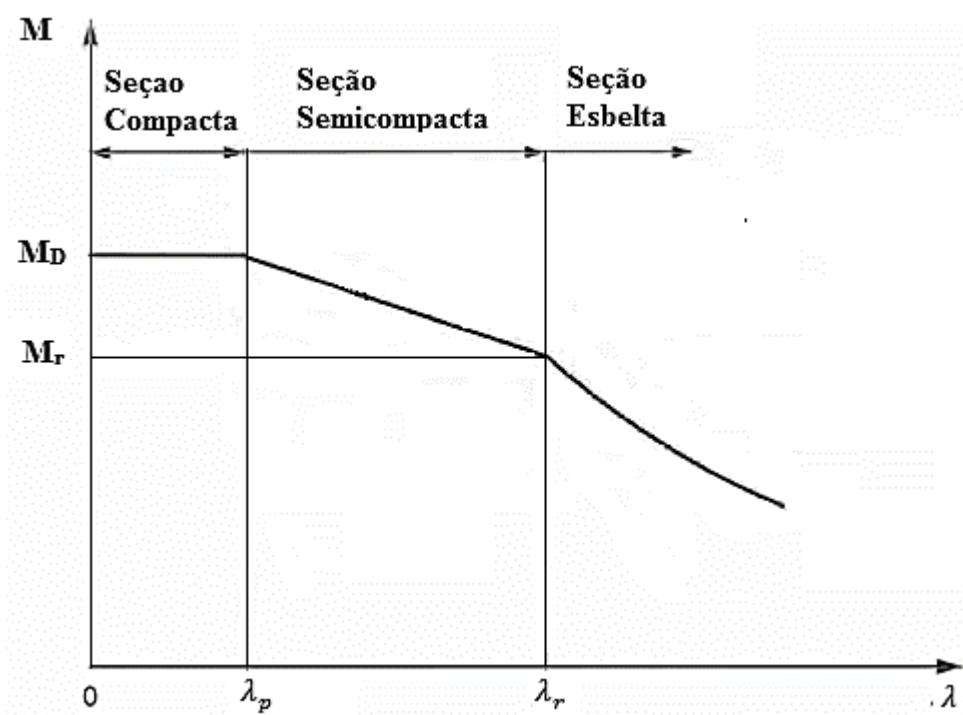
Fonte: Guimaraes de Ávila (2006)

Uma das alternativas para avaliar o comportamento de um componente estrutural é pela relação da esbeltez de uma seção, λ , definida pela NBR 8800:2008 como uma forma de classificar os perfis de acordo com as características de suas seções transversais, que seriam as seções compactas, semicompactas e esbeltas, essa classificação é feita a partir de índices de

referências para diferentes tipos de perfis e para distintos esforços submetidos, que serão apresentados mais detalhadamente no decorrer deste trabalho (PFEIL e PFEIL, 2009).

As seções compactas possuem características de atingir o momento de plastificação total e exibe suficiente capacidade de rotação inelástica, proporcionando ao perfil um maior aproveitamento das características plásticas e resistência de trabalho maiores, ocorrendo deformação plástica sem flambagem local. As seções semicompactas são as que a flexão local ocorre após ter desenvolvido uma plastificação parcial, mas sem apresentar significativa rotação e as seções esbeltas a flexão impede que seja atingido o início da plastificação. A figura 8 apresenta a diminuição do momento resistente de uma viga conforme o aumento da esbeltez de sua seção (PFEIL e PFEIL, 2009).

Figura 8: Relação entre esbeltez e momento resistente.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009).

Como uma forma de verificar a funcionalidade do perfil a NBR 8800:2008 estabelece um deslocamento máximo das vigas e dos pilares de uma estrutura de acordo com sua utilização, quadro 3, esse critério também deve ser analisado diante da aplicação da estrutura, como mezaninos que suportam paredes de alvenaria, deslocamentos excessivos podem proporcionar o aparecimento de fissuras e comprometer o projeto (GUARNIER, 2009).

Quadro 3: Deslocamento máximo para elementos estruturais.

Descrição	δ^a
- Travessas de fechamento	$L/180^b$
	$L/120^{cd}$
- Terças de cobertura ^{g)}	$L/180^e$
	$L/120^f$
- Vigas de cobertura ^{g)}	$L/250^h$
- Vigas de piso	$L/350^h$
- Vigas que suportam pilares	$L/500^h$
Vigas de rolamento: ^{j)}	
- Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 kN	$L/600^i$
- Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN, exceto pontes siderúrgicas	$L/800^i$
- Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN	$L/1000^i$
- Deslocamento horizontal, exceto para pontes rolantes siderúrgicas	$L/400$
- Deslocamento horizontal para pontes rolantes siderúrgicas	$L/600$
Galpões em geral e edifícios de um pavimento:	
- Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/300$
- Deslocamento horizontal do nível da viga de rolamento em relação à base	$H/400^{k1}$
Edifícios de dois ou mais pavimentos:	
- Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/400$
- Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos	$h/500^m$
Lajes mistas	Ver Anexo Q

Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (2008).

2.1.4 Esforço de compressão

Para o dimensionamento de estruturas sujeitas as ações de forças compressivas, deve-se considerar a acentuação das curvaturas iniciais que produzem deslocamentos laterais, processo conhecido como flambagem por flexão, que em geral, reduz a capacidade de carga do material (PINHEIRO, 2005).

O primeiro passo é escolher um perfil com índice de esbeltez ≤ 200 , equação 02. Conforme a NBR 8800:2008 a força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ é determinada pela equação 03, em que está associado os efeitos da instabilidade causada por flexão, torção ou flexotorção e flambagem local, está indica o valor máximo de carga compressiva suportada pelo perfil (PINHEIRO, 2005).

$$\frac{KL}{r} \leq 200 \quad (02)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (03)$$

A equação 2 contém o coeficiente de flambagem K , fator determinado pela figura 12, juntamente com L , altura livre do perfil e r , o raio de giração no eixo y ou x do perfil. Os coeficientes de flambagem são definidos de acordo com o tipo de ligação dos perfis, quanto menor a rigidez da ligação maior será o valor de K , em situações que se aplica o contraventamento esse valor pode ser tomado como 1 e havendo a possibilidade poderá ser adotado um valor inferior para ligações mais rígidas (PINHEIRO, 2005).

Para construções utilizando perfis laminados I, H e compostos com seção circular sujeitos a compressão, a flambagem por flexão produz cargas menores que outros tipos de flambagem, não havendo necessidade da verificação da flambagem por torção, ocorrendo que praticamente a torção não interfere nas construções metálicas usuais em relação as peças comprimidas, normalmente a torção é determinante ao se trabalhar com estruturas leves feitas de chapas finas e dobradas (PFEIL E PEFEIL, 2009).

Quadro 4: Coeficiente de flambagem.

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

Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (2008).

Para a equação 03, χ , representa o fator de redução associado à resistência a compressão, Q fator de redução total associado a flambagem local, A_g área bruta da seção transversal da

barra, F_y a resistência ao escoamento do aço e γ_{a1} o coeficiente de ponderação relacionado ao escoamento, flambagem e instabilidade, representado no quadro 5 (GUARNIER, 2009).

Quadro 5: Coeficientes de ponderação relacionado ao escoamento, flambagem e instabilidade.

Combinações	Aço estrutural ^a	
	γ_a	
	Escoamento, flambagem e instabilidade γ_{a1}	Ruptura γ_{a2}
Normais	1,10	1,35
Especiais ou de construção	1,10	1,35
Excepcionais	1,00	1,15

Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (2008).

Ainda por Guarnier (2009) Para a determinação do fator de redução associado a compressão χ é necessário inicialmente determinar o índice de esbeltez reduzido λ_0 , equação 04, diante disso se $\lambda_0 \leq 1,5$, χ é determinado pela equação 05, para os demais valores χ é determinado pela equação 06.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (04)$$

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (05)$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (06)$$

A força axial de flambagem elástica, N_e , representa a carga de compressão máxima que ainda é possível manter a configuração retilínea da estrutura, sem que aconteça o efeito da flambagem. Este termo deve ser calculado em relação aos seus principais eixos de inércia para a flambagem, equação 07, e torção, equação 08 (GUARNIER, 2009).

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (07)$$

$$N_e = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \quad (08)$$

Em que, I é o momento de inércia da seção transversal em relação a um dos eixos principais de inércia, $K_z L_z$ o coeficiente de flambagem por torção, E o módulo de elasticidade do aço, C_w a constante de empenamento da seção transversal, J a constante de torção da seção transversal e r_0 o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento, dado pela equação 09 (NBR 8800:2008).

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)} \quad (09)$$

Em que, r_x representa o raio de giração em relação ao eixo central x, r_y o raio de giração em relação ao eixo central y, x_0 a coordenada do centro de cisalhamento na direção do eixo x em relação ao centro geométrico da seção e y_0 a coordenada do centro de cisalhamento da direção do eixo y em relação ao centro geométrico da seção (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

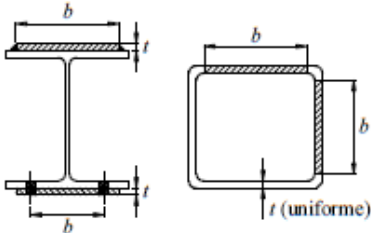
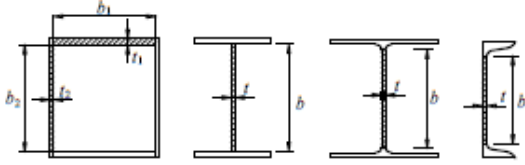
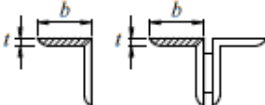
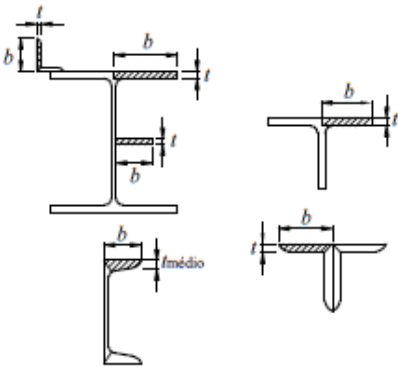
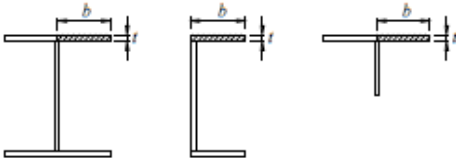
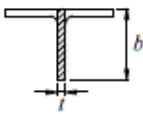
O fator de redução total associado à flambagem local Q é determinado pela norma em função do tipo de perfil e de suas propriedades geométricas. No qual os elementos componentes das seções transversais dos perfis usuais, exceto as seções tubulares circulares, são classificadas em AA, quando possuem as duas bordas longitudinais e em AL quando possuem apenas uma borda longitudinal, quadro 6 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

Caso a relação entre largura e espessura (b/t) dos elementos componentes da seção transversal for inferior à relação $(b/t)_{lim}$, presente no quadro 6, o fator de redução total associado à flambagem local será igual a 1, para valores superiores a $(b/t)_{lim}$, Q será definido de acordo com a equação 10 (GUARNIER, 2009).

$$Q = Q_s Q_a \quad (10)$$

Onde Q_s significa o fator de redução que considera a flambagem local dos elementos AL e Q_a dos elementos AA. Para uma situação que a seção possua apenas um dos dois tipos de elemento o outro será suprimido.

Quadro 6: Valores de $(b/t)_{lim}$.

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
AA	1	— Mesas ou almas de seções tubulares retangulares — Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	2	— Almas de seções I, H ou U — Mesas ou almas de seção-caixão — Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	3	— Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travessamento		$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	4	— Mesas de seções I, H, T ou U laminadas — Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas — Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	5	— Mesas de seções I, H, T ou U soldadas^a		$0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}}$
	6	— Almas de seções T		$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
^a O coeficiente k_c é dado em F.2.				

Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (2008).

Para os elementos do tipo AA que satisfazem a seguinte relação $(b/t) > (b/t)_{lim}$ o valor Q_a será calculado conforme as equações 11, 12 e 13.

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (11)$$

$$A_{ef} = A_g - (b - B_{ef})t \quad (12)$$

$$b_{ef} = 1,92t \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[1 - \frac{C_a}{b/t} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq b \quad (13)$$

Em que A_g representa a área bruta, A_{ef} a área efetiva da seção transversal, b a largura dos elementos comprimidos AA, t a espessura dos elementos comprimidos AA, b_{ef} a largura efetiva dos elementos comprimidos AA, c_a o coeficiente igual a 0,38 para mesas e almas de seções tubulares retangulares e 0,34 para os demais casos.

Para os elementos AL o cálculo do Q_s obedece a mesma regra para o cálculo do elemento AA, para sua determinação os elementos Al pertencem a 4 grupos distintos, de acordo com o quadro 6, para o grupo 3 são utilizados as equações 14 e 15.

$$Q_s = 1,34 - 0,76 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (14)$$

$$Q_s = \frac{0,53E}{f_y \left(\frac{b}{t} \right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (15)$$

Os elementos que pertencem ao grupo 4 tem seu Q_s calculado pelas equações 16 e 17.

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (16)$$

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (17)$$

Para os elementos do grupo 5 são utilizadas as equações 18 e 19. Em que h é a altura da alma, t_w a espessura da alma.

$$Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{K_c E}}, \text{ para } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y K_c}} < \frac{b}{t} \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y K_c}} \quad (18)$$

$$Q_s = \frac{0,90EK_c}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y K_c}} \quad (19)$$

$$K_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}} \quad (20)$$

O Q_s para os elementos do grupo 6 são calculados pelas equações 21 e 22.

$$Q_s = 1,908 - 1,22 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (21)$$

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (22)$$

2.1.5 Esforço de flexão

Para o dimensionamento de vigas sujeitas à flexão simples calcula-se para as seções críticas o momento e o esforço cortante resistentes de projeto para compará-los aos respectivos esforços resistentes. Essas vigas, sujeitas a flexão, podem sofrer flambagem local que é a perda de estabilidade das chapas comprimidas componentes do perfil, a qual reduz o momento

resistente de inércia. Outro tipo de flambagem é a lateral, a viga sujeita a esse esforço perde seu equilíbrio no plano principal de flexão (Geralmente vertical) e passa apresentar deslocamentos laterais e rotações de torção. As seções mais adequadas para trabalharem com flexão são aquelas com maior inércia no plano de flexão, isto é, com as áreas mais afastadas do eixo neutro (GUARNIER, 2009).

De acordo com a Associação brasileira de normas técnicas (2008) o momento resistente de cálculo deve ser determinado para o caso de flambagem lateral com torção FLT, flambagem lateral da mesa FLM e flambagem local da alma FLA, em que o valor adotado será o menor entre os casos.

O momento fletor resistente de cálculo para seções do tipo I, H, U e C com exceção da seção T, é determinado de acordo com equações 23, 24, 25, 26 e 27.

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (23)$$

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (24)$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_r \quad (25)$$

$$M_{pl} = Z f_y \quad (26)$$

$$C_b = \frac{12,5M_{max}}{2,5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \leq 3,0 \quad (27)$$

A escolha das equações 23, 24 e 25 dependerá do parâmetro de esbeltez, apresenta no quadro 7, nos quais as incógnitas iniciais importantes são:

- M_{pl} representa o momento fletor de plastificação;
- C_b o fator de modificação para o diagrama de momento fletor não uniforme, adotado como 1 para flambagem local de mesa e alma;

- M_r o momento fletor correspondente ao início do escoamento, incluindo das tensões residuais, exceto para flambagem local da mesa;
- Z módulo de resistência plástico.

O fator de modificação para o diagrama de momento fletor não uniforme, C_b , é calculado de acordo com as seguintes incógnitas:

- M_{max} valor máximo do momento fletor solicitante de cálculo no comprimento destravado;
- M_A o valor do momento fletor solicitante de cálculo situado a uma quarto do comprimento, medido a partir da extremidade esquerda;
- M_B valor do momento fletor solicitante de cálculo situado na seção central do comprimento destravado;
- M_c o valor do momento fletor solicitante de cálculo situado a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda.

O quadro 7 demonstra os valores de momento fletor de plastificação, do momento fletor correspondente ao início de escoamento, esbeltez da seção e dos parâmetros de esbeltez correspondentes à plastificação e ao início do escoamento, em que as notas apresentadas na serão demonstradas subsequentemente.

Quadro 7: Parâmetros referentes ao momento fletor resistente.

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados-límites aplicáveis	M_r	M_{cr}	λ	λ_p	λ_r
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$(f_y - \sigma_t)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 1	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 1
	FLM	$(f_y - \sigma_t)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com apenas um eixo de simetria situado no plano médio da alma, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia (ver Nota 9)	FLT	$(f_y - \sigma_t)W_c$ $\leq f_y W_t$ Ver Nota 5	Ver Nota 2	$\frac{L_b}{r_{yc}}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 2
	FLM	$(f_y - \sigma_t)W_c$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h_c}{t_w}$	$\frac{\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{pt}}{M_r} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia	FLM Ver Nota 3	$(f_y - \sigma_t)W$	Ver Nota 6	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA Ver Nota 3	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	$\frac{h}{t_w}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$f_y W$	$\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pt}} \sqrt{JA}$	$\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{JA}$
Seções-caixão e tubulares retangulares, duplamente simétricas, fletidas em relação a um dos eixos de simetria que seja paralelo a dois lados	FLT Ver Nota 7	$(f_y - \sigma_t)W$ Ver Nota 5	$\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pt}} \sqrt{JA}$	$\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{JA}$
	FLM	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	FLA	$f_y W$	-	$\frac{h}{t_w}$	Ver Nota 10	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: NBR 8800:2008.

A nota 1, quadro 7, refere-se aos perfis de seção I e H com dois eixos de simetria e seção U não sujeita a momentos de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia, no qual se utiliza das equações 28, 29, 30 e 31 para o cálculo do M_{cr} , momento fletor de flambagem elástica.

$$M_{Cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + \frac{0,039 J L_b^2}{C_w} \right)} \quad (28)$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (29)$$

$$\beta_1 = \frac{0,7 W}{E J} \quad (30)$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4} \quad (31)$$

Em que I_y o momento de inércia em relação ao eixo y, J a constante de torção da seção transversal do material, r_y o raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão, W o módulo de resistência elástico, L_b a distância entre duas seções contidas do perfil (comprimento destravado), d a altura externa da seção do perfil e t_f a espessura da mesa. Para a nota 2, utilizasse as equações 32, 33, 34, 35, 36 e 37 abaixo:

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{\beta_2 + \sqrt{\beta_2 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (32)$$

$$M_{Cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{L_b^2} \left[\beta_3 \sqrt{\beta_3^2 + \frac{C_w}{I_y} \left(1 + \frac{0,039 J L_b^2}{C_w} \right)} \right] \quad (33)$$

$$\beta_3 = \left(d - \frac{t_{fs} + t_{fi}}{2} \right) \left(\frac{\alpha_y - 1}{\alpha_y + 1} \right) \quad (34)$$

$$\alpha_y = \frac{I_{yc}}{I_{yt}}, \text{ sendo que } \frac{1}{9} \leq \alpha_y \leq 9 \quad (35)$$

$$\beta_2 = 5,2\beta_1\beta_3 + 1 \quad (36)$$

$$C_w = \frac{\left(d - \frac{t_{fs} + t_{fi}}{2}\right)^2}{12} \left(\frac{t_{fi}b_{fi}^3t_{fs}b_{fs}^3}{t_{fi}b_{fi}^3 + t_{fs}b_{fs}^3} \right) \quad (37)$$

Em que r_{yr} é o raio de giração da seção T, C_w é constante de empenamento da seção transversal, t_{fi} é a espessura da mesa inferior, t_{fs} é a espessura da mesa superior, b_{fi} é a largura da mesa inferior e b_{fs} é a largura da mesa superior.

A nota 6 determinada no quadro 7, indica o M_{cr} para perfis soldados e laminados, respectivamente, equações 38 e 39:

$$M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_c, \quad \lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{0,7f_y}} \quad (38)$$

$$M_{cr} = \frac{0,69EK_c}{\lambda^2} W_c, \quad \lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{0,7f_y/K_c}} \quad (39)$$

Em que W_c é o modulo de resistência elástico do lado comprimido da seção, e K_c é o coeficiente que varia entre 0,35 e 0,76, definido pela equação 20.

Para a situação que a razão entre o comprimento destravado de uma viga e seu raio de giração seja inferior ao parâmetro de esbeltez o perfil não perderá resistência pela flambagem lateral com torção, a equação 24 ficará sem o termo C_b . De acordo com Pfeil e Pfeil (2009), para simplificar os cálculos e obter um dimensionamento com maior precaução o termo C_b pode ser considerado 1, menor valor possível calculado, proporcionando maior rapidez e confiança na resolução do projeto.

2.1.6 Esforço de cisalhamento

A tensão de cisalhamento ocorre quando há um deslizamento das porções adjacentes do material, sendo resistido essencialmente pela área vertical de sua seção transversal. A

Associação brasileira de normas técnicas (2008) utiliza a equação 40 para o dimensionamento de um material sujeito ao cisalhamento. Em que V_{sd} é a força solicitante de cálculo e V_{Rd} a força cortante resistente de cálculo.

$$V_{sd} \leq V_{Rd} \quad (40)$$

Abordando os perfis de seção I, H, U e T fletidos em relação ao eixo perpendicular a alma, seções tubulares e caixão, exceto seções circulares, o dimensionamento em relação a tensões de cisalhamento são determinados pelas equações 41, 42, 43, 44, 45, 46 e X abaixo.

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\lambda_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (41)$$

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\lambda_{a1}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (42)$$

$$V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\lambda_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (43)$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (44)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{K_v E}{f_y}} \quad (45)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{K_v E}{f_y}} \quad (46)$$

Em que a V_{pl} representa a força cortante correspondente a plastificação da alma por cisalhamento, K_v é igual a 5 para almas sem enrijecedores transversais, para almas com enrijecedores transversais que obedecem as relações da equação 47 K_v também é considerado igual a 5, para os demais casos deve-se utilizar a equação 48. Onde a representa a distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores e h a altura da alma, tomada igual a distância entre as faces internas das mesas nos perfis soldados e igual a esse valor menos os dois raios de concordância entre mesa e alma nos perfis laminados.

$$k_v = 5; \text{ para } \frac{a}{h} > 3, \text{ ou } \frac{a}{h} > \left[\frac{260}{(h/t_w)} \right]^2 \quad (47)$$

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} \quad (48)$$

O esforço cortante referência de projeto é determinado pelas equações 49, 50 e 51, em que A_w representa a área efetiva de cisalhamento. Para seções do tipo I, H, U e T fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma utiliza-se a equação 50, para seções tubulares retangulares e caixão utiliza-se a equação 51, em que d representa a altura total da seção transversal.

$$V_{pl} = 0,60A_w f_y \quad (49)$$

$$A_w = dt_w \quad (50)$$

$$A_w = 2ht_w \quad (51)$$

2.2 Dimensionamento de união soldada

2.2.1 Ligação por soldagem

O processo de soldagem à arco elétrico é o tipo de soldagem mais utilizado na indústria de construção, nas formas mais usuais o arco voltaico se dá entre o eletrodo metálico e o aço a ser soldado, ocorrendo a deposição; do material do eletrodo. Ao aplicar esse processo na fabricação de estruturas metálicas soldadas devem ser tomadas precauções, como a retração da solda após o seu resfriamento, que pode proporcionar distorções na união, outro fator

importante são as tensões residuais internas do perfil ocasionadas pela diferença de temperatura ao longo de sua seção que podem influenciar na resistência da estrutura (MARQUES, MODENESI e BRACARENSI, 2009).

Durante a soldagem o material fundido deve ser isolado da atmosfera para evitar a formação de defeitos e impurezas, as formas mais comuns são utilizando o eletrodo manual revestido, arco submerso em material granular fusível, arco elétrico com proteção gasosa, conhecida como processo MIG/MAG e o arco elétrico com fluxo no núcleo (MARQUES, MODENESI e BRACARENSI, 2009).

Ainda por Marques, Modenesi e Bracarensi (2009) a soldagem por eletrodo revestido é a mais utilizada na indústria por apresentar grande versatilidade, sendo utilizada tanto em instalações industriais pesadas como em serviço simples de campo. Comercialmente esse tipo de eletrodo é apresentado em forma de vareta e com nomenclatura, de acordo com a ASTM, do tipo E70XY que significam:

E = Eletrodo;

70 = Resistência à ruptura em Ksi;

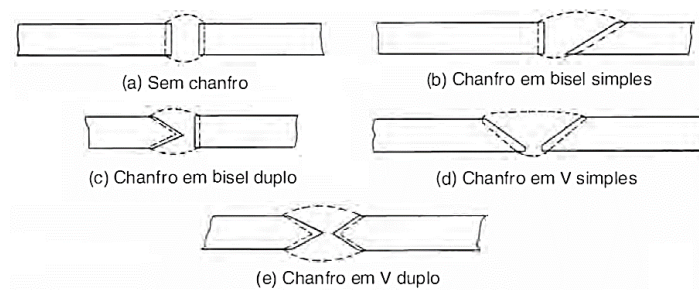
X = Referente a posição de soldagem satisfatória;

Y = Referente ao tipo de corrente de trabalho do eletrodo.

Algumas empresas adotam nomenclaturas próprias descrevendo o eletrodo, essas informações são essenciais para que o eletrodo selecionado tenha a resistência compatível com o esforços e que o procedimento adotado garanta as propriedades mecânicas desejadas, além da afinidade dos materiais soldado (MARQUES, MODENESI e BRACARENSI, 2009).

As soldas são classificadas de acordo com a posição do material de solda em relação ao material base, que seriam as soldas de entalhe, de filete, de tampão e de ranhura. O primeiro tipo ocorre quando o metal de solda é depositado entre peças metálicas, em geral dentro de chanfros de diversos tipos apresentando penetração total ou parcial, conforme apresentado na figura 9 (MARQUES, MODENESI e BRACARENSI, 2009).

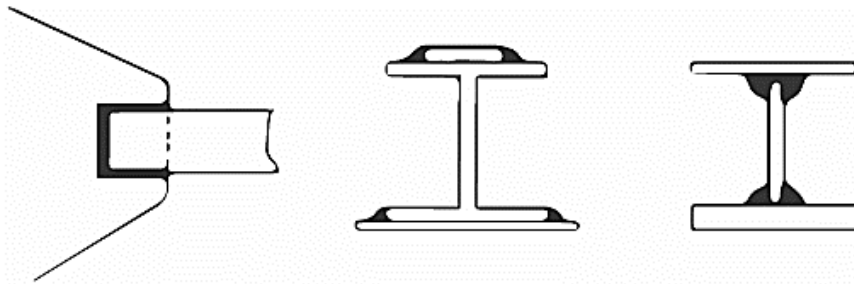
Figura 9: Tipos de chanfro em soldas por entalhe.



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarensi (2009).

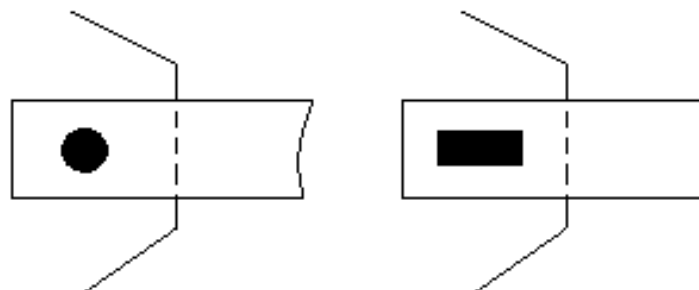
Os perfis metálicos que o material de solda é depositado em suas faces laterais, figura 10, ocorre uma solda de filete. As soldas do tipo tampão e de ranhura, figura 11, são comumente aplicadas para reparos e a reutilização de estruturas (MARQUES, MODENESI e BRACARENSI, 2009).

Figura 10: Solda de filete.



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarensi (2009).

Figura 11: Solda do tipo tampão.

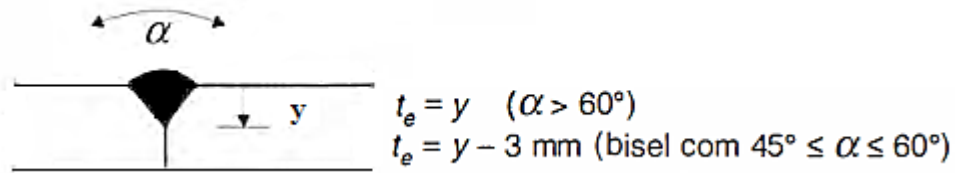


Fonte: Marques, Modenesi e Bracarensi (2009).

2.2.2 Dimensionamento de solda por entalhe

Ao se trabalhar com soldas de entalhe deve-se levar em consideração que seu dimensionamento sempre é realizando em relação ao perfil de menor espessura, além de que os perfis sujeitos a flexão devem estar unidos por penetração total. Seu dimensionamento inicia com o cálculo da dimensão efetiva t_e . Para projetos com penetração total em materiais de espessuras diferentes, admite-se que para a relação de espessura entre os dois materiais seja inferior a 1:2,5, a espessura t_e considerada é a menor entre as chapas, para relações de espessura superiores ou iguais a 1:2,5 a espessura t_e considerada é a maior entre as chapas. Para penetração parcial a relação t_e é de acordo com figura 12.

Figura 12: Solda de entalhe e dimensão efetiva t_e .



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009).

As resistências das soldas por entalhe são dadas pela área efetiva A_w , equação 52, pela área A_{MB} do metal de base (Igual ao produto do comprimento de solda pela espessura da peça mais delgada da ligação). Para a situação com penetração total com a solda sujeita a tensões de compressão ou tração ou perpendiculares ao eixo da solda, a resistência de cálculo R_d é encontrada com base nas informações do metal base, equação 53 (VASCONCELLOS, 2011).

$$A_w = t_e l \quad (52)$$

$$R_d = \frac{A_{MB} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (53)$$

Em que f_y representa o limite de escoamento do metal base e γ_{a1} é um fator de segurança indicado no quadro 5, de acordo com o material e sua combinação de ações.

Para o cálculo da resistência R_d em situações com soldagem de penetração parcial sob esforços de tração ou compressão perpendiculares ao eixo da solda, utiliza-se a equação 54, Em que f_w representa a tensão de escoamento do metal de solda e γ_w é 1,25 para combinações

normais, especiais ou de construção e 1,05 para combinações excepcionais de ações. (VASCONCELLOS, 2011).

$$R_d = 0,60 \frac{A_w f_w}{\gamma_{w1}} \quad (54)$$

As solda sujeitas a tração ou compressão paralelas ao seu eixo não se faz necessário verificar sua resistência, seja para penetração total ou parcial. Para tensões de cisalhamentos atuando em direções diferentes são combinadas vetorialmente e a resistência de projeto é determinada pelas equações 55 e 56, em que γ_{w2} é 1,35 para combinações normais, especiais ou de construção e 1,25 para combinações excepcionais de ações (VASCONCELLOS, 2011).

$$R_d = 0,60 \frac{A_{MB} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (55)$$

$$R_d = 0,60 \frac{A_w f_w}{\gamma_{w2}} \quad (56)$$

De acordo com a NBR 8800 as solda de entalhe com penetração parcial devem apresentar espessura de garganta mínima conforma o uadro 8.

Quadro 8: Relação entre espessura do metal de base e espessura da garganta efetiva de solda por entalhe com penetração parcial

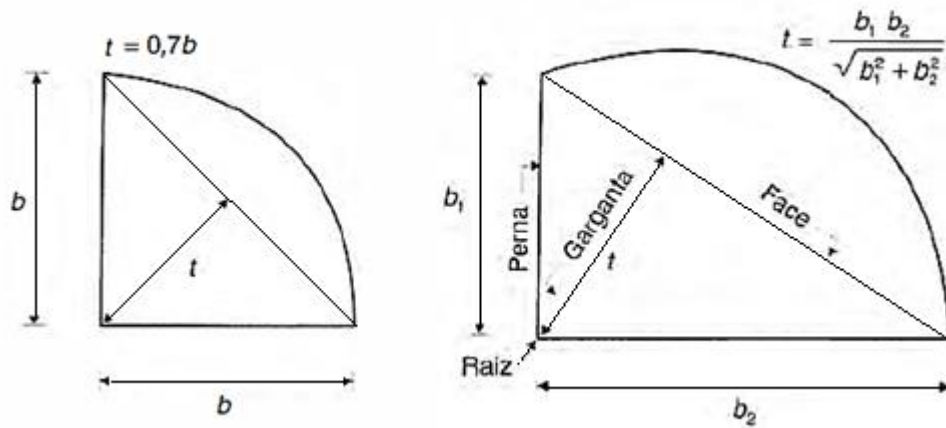
Menor espessura do metal-base na junta mm	Espessura mínima da garganta efetiva ^a mm
Abaixo de 6,35 e até 6,35	3
Acima de 6,35 até 12,5	5
Acima de 12,5 até 19	6
Acima de 19 até 37,5	8
Acima de 37,5 até 57	10
Acima de 57 até 152	13
Acima de 152	16

Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (2008).

2.2.3 Dimensionamento de solda de filete

Pela geometria característica da solda de filete o seu dimensionamento é realizado considerando a face da solda como um triângulo retângulo, com isso é possível calcular a área efetiva para o projeto de acordo com as variáveis da figura 13. Em que o cordão de solda pode apresentar duas configurações com o filete simétrico e o filete assimétrico, onde a perna é o lado de menor dimensão e a raiz é o ponto de intersecção das faces de fusão (VASCONCELLOS, 2011).

Figura 13: Filete de solda. Seção real e seção teórica. Espessura t da garganta do filete, igual à distância da raiz à face teórica da solda. O menor lado é denominado perna do filete.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

Para o cálculo da área efetiva é utilizada a equação 57 com um comprimento efetivo l , que significa o comprimento total da solda, em que t está determinado na figura 13.

$$A_w = tl \quad (57)$$

Segundo Vasconcellos (2011) os esforços de tração e compressão que atuam na direção paralela ao eixo longitudinal do cordão de solda de filete são desconsiderados no cálculo, entretanto deve ser considerada a transferência de esforços de cisalhamento através da garganta de solda, em que o estado limite de ruptura é dado pela equação 58.

$$R_d = \frac{A_w(0,60f_w)}{\gamma_{w2}} \quad (58)$$

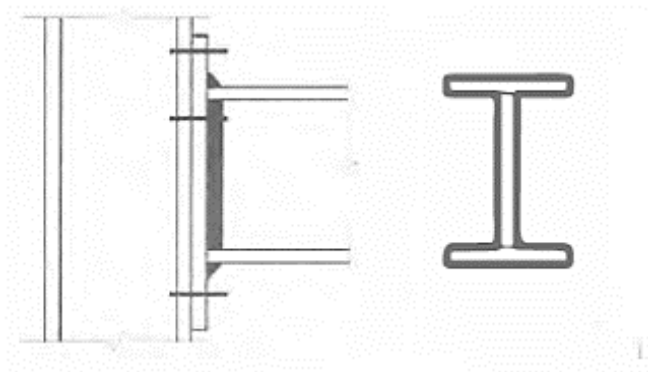
Ainda por Vasconcellos (2011) de maneira geral as soldas de filete estão sujeitas a esforços na direção vertical F_1 e horizontal F_2 , as tensões na garganta da solda são calculadas diante da soma vetorial das equação 59 e 60 e seu valor deve ser inferior a equação 58 para a validade da soldagem.

$$\tau_x = \frac{F_1}{tl} \quad (59) \quad e \quad \tau_y = \frac{F_2}{tl} \quad (60)$$

As uniões por soldagem que envolvem a seção transversal do perfil, como por exemplo a ligação entre uma viga e uma coluna, figura 22, são transmitidos um esforço cortante V e um momento M . Desta forma as tensão de cisalhamento ocasionado pelo esforço cortante, equação 61, é considerada vertical e a tensão ocasionado pelo momento, equação 62, é tratada como uma tensão cisalhante horizontal, assim o valor de tensão final utilizado para projeto é a soma vetorial dessas duas tensões (PFEIL e PFEIL, 2009).

$$\tau = \frac{V}{2th_0} \quad (61) \quad e \quad \sigma = \frac{M}{I} y \quad (62)$$

Figura 22: União entre viga e coluna por solda de filete.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

O quadro 9 retirada da NBR 8800:2008, especifica o tamanho mínimo da perna da solda de filete em função da chapa de menor espessura. Para o material espessura menor que 6,35 mm a perna máxima deve ser o valor da espessura, já o para material com espessura igual ou superior a 6,35 mm sua perna máxima não pode ultrapassar ao valor da espessura subtraída de 1,5 mm (NBR 8800:2008).

Quadro 9: Relação entre espessura do metal de base e espessura da perna da solda de filete.

Menor espessura do metal-base na junta mm	Tamanho mínimo da perna da solda de filete, d_w^a mm
Abaixo de 6,35 e até 6,35	3
Acima de 6,35 até 12,5	5
Acima de 12,5 até 19	6
Acima de 19	8
^a Executadas somente com um passe.	

Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (2008).

2.2.4 Custo de consumíveis

Marques, Modenesi e Bracarensi (2009) afirmam que custo dos consumíveis de soldagem é dado pelo somatório dos custos do metal de adição, do fluxo e do gás de proteção usados. A estimativa desse custo deve-se iniciar pela avaliação do custo do metal depositado CMD, calculado pelo produto da massa de metal depositado pelo custo da kg do eletrodo, equação 63:

$$CMD(R\$) = \text{Massa do metal depositado (kg)} \times \text{custo eletrodo} \left(\frac{R\$}{Kg} \right) \quad (63)$$

A massa do metal depositado (MMD) é calculada pelo produto da área da seção transversal da junta, do comprimento de solda e de sua densidade, conforme a equação 64:

$$MMD(Kg) = A(cm^2)L(cm)\rho \left(\frac{Kg}{cm^3} \right) \quad (64)$$

A determinação da área da seção transversal para alguns tipos chanfros e a densidade dos materiais mais comuns utilizados na soldagem podem ser determinados pela tabela 1, para solda do tipo filete essa área é considerada como 25% da área de um círculo, em que a perna da solda é avaliada como o seu raio (MARQUES, MODENESI e BRACARENSI, 2009).

Tabela 1: Área de seção transversal de alguns tipos de chanfro e densidade de materiais de soldagem.

Tipo de chanfro	Área da seção transversal	Liga	Densidade kg/cm ³
V simples	$(e-h)^2 \times \tan(\theta/2) + d \times e$	Aço carbono	0,0078
V duplo	$0,5 \times \{(e-h)^2 \times \tan(\theta/2)\} + d \times e$	Aço inoxidável	0,008
K	$0,5 \times \{(e-h)^2 \times \tan(\theta/2)\} + d \times e$	Ligas de cobre	0,0086
Y	$0,25 \times \{(e-h)^2 \times \tan(\theta/2)\} + d \times e$	Ligas de níquel	0,0086
		Ligas de alumínio	0,0028
		Ligas de titânio	0,0047

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarensi (2009).

Ainda por Marques, Modenesi e Bracarensi (2009) para um levantamento correto sobre o custo dos consumíveis é necessário contemplar parte do material que é perdida durante o processo, na forma respingos, pontas descartadas e etc. A tabela 2 apresenta valores de eficiência dos principais processo de soldagem, em que o eletrodo revestido (SMAW), por suas características técnicas, exibe baixa eficiência em relação aos outros tipos de processo.

Tabela 2: Eficiência de processos de soldagem.

Processo	Efic. %
SMAW	
Comprimento 350mm	55-65%
450mm	60-70%
SAW	95-99%
GMAW	85-97%
FCAW	80-90%

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarensi (2009).

2.3 Dimensionamento de união parafusada e tipos de ligações

2.3.1 Ligações por parafuso

As uniões parafusadas são utilizadas por suas vantagens construtivas em relação ao processo de soldagem, como a possibilidade de preparação dos perfis estruturais fora do local de instalação, baixa produção de resíduos durante o processo de montagem e a necessidade de equipamentos simples e de pequeno porte para a união dos perfis. Para isso é necessário um

procedimento que garantam a estabilidade da estrutura assim como a união por soldagem. (VASCONCELLOS, 2011. e PFEIL e PFEIL, 2009)

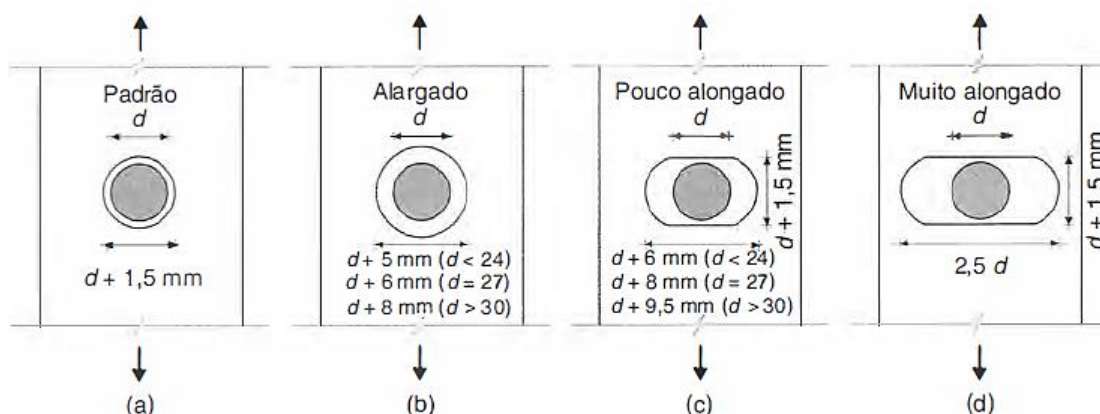
Os parafusos comuns utilizados em estruturas metálicas são fabricados a partir de aços de baixo teor de carbono, em geral o aço ASTM A307, apresentando geometricamente cabeça sextava ou quadrada e rosca tipo padrão americano e métrico. Para aplicações sujeitas a maiores cargas são utilizados os parafusos de alta resistência, fabricados com aços tratados termicamente e normalmente especificados com aço ASTM A325 (VASCONCELLOS, 2011. PFEIL e PFEIL, 2009).

Os parafusos de alta resistência além de suportarem mais cargas em relação aos parafusos comuns existe a possibilidade de realizar uma ligação por atrito da união mediante um aperto padronizado, sendo ideal para o dimensionamento de estruturas que não permitam pequenos deslocamentos de seus perfis, caso não seja necessário a ligação por atrito o aperto máximo dado por um funcionário é o suficiente para garantir a união (PINHEIRO, 2005).

2.3.2 Características geométricas das uniões

A furação utilizada para as ligações parafusadas devem ser projetadas de acordo com as formas representadas na figura 14, em que o tipo de furo normalmente utilizado é o “a”, com tolerância suficiente para permitir a montagem da estrutura, os tipos “b”, “c” e “d” são utilizados em situações com alguma restrição no encaixe dos perfis, assim esses tipos de esforços de corte entre as chapas e o parafuso deve ser reforçado pela utilização de chapas de ligação mais robustas ou pela união por meio do atrito (PFEIL e PFEIL, 2009).

Figura 14: Padronização de furação para estruturas metálicas.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009).

Os projetos que determinam a utilização de furação não padrão devem considerar o sentido da solicitação dos parafuso, assim é possível ver se é necessário ou não a utilização da ligação por atrito e qual o sentido que o furo deve ter para situações específicas, de acordo com o quadro 10 (NBR 8800:2008).

Quadro 10: Especificações para diferentes tipos de furação.

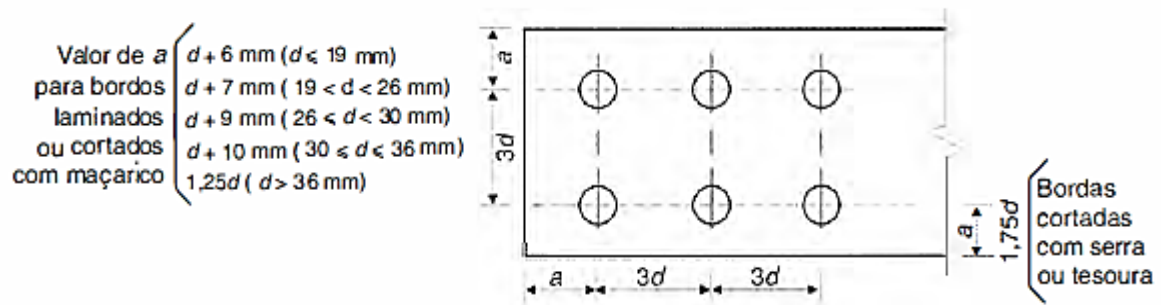
Tipo de furo	Tipo de ligação permitido	Limitações	
		Posição do furo	Arruelas ^a
Alargado	Por atrito	Em qualquer uma ou em todas as chapas da ligação	Endurecidas, sobre furos alargados em chapas externas da ligação
Pouco alongado	Por atrito	Em qualquer uma ou em todas as chapas de ligação. Qualquer posição, independentemente da direção da solicitação	Sobre furos pouco alongados em chapas externas da ligação devem ser usadas arruelas, que devem ser endurecidas quando os parafusos forem de alta resistência
	Por contato	Em qualquer uma ou em todas as chapas da ligação. Maior dimensão normal à direção da solicitação	
Muito alongado	Por atrito	Em somente uma das partes da ligação, para a mesma superfície de contato. Qualquer posição, independentemente da direção da solicitação	Arruelas de chapa ou barras chatas contínuas, de aço estrutural, com espessura mínima de 8 mm e com furos-padrão, devem ser usadas sobre furos muito alongados em chapas externas. Tais arruelas ou barras devem ter dimensões suficientes para cobrir totalmente os furos alongados após a instalação dos parafusos. Quando for necessário usar arruelas endurecidas (ver 6.7.4.2 e ^a), estas serão colocadas sobre aquelas arruelas de chapas ou barras contínuas
	Por contato	Em somente uma das partes da ligação, para a mesma superfície de contato. Maior dimensão normal à direção da solicitação	

Fonte: NBR 8800:2008

Para os furos padrões o seu espaçamento deve ser de acordo com a figura 15, levando em consideração a resistência dos perfis pela redução da área bruta e o espaçamento entre as bordas dos perfis e dos furos, a determinação dessa padrão proporciona rapidez na produção de perfis em larga escala, além do espaçamento mínimo deve ser respeitado um espaçamento máximo entre os furos para que não haja o acúmulo excessivo de sujeira e umidade entre os conectores, determinados pela espessura t da chapa mais (NBR 8800:2008)

A distância entre furos máxima especificada para os elementos pintados ou não sujeitos a corrosão deve ser $24t < 300\text{mm}$. Para os elementos sujeitos a corrosão e construídos com aço resistente a corrosão sem pintura, a relação deve ser $14t < 180\text{mm}$. A distância máxima entre o furo e a borda é $12t > 150\text{mm}$, para ambos os casos (NBR 8800:2008).

Figura 15: Padrão máximo de espaçamento entre furos.

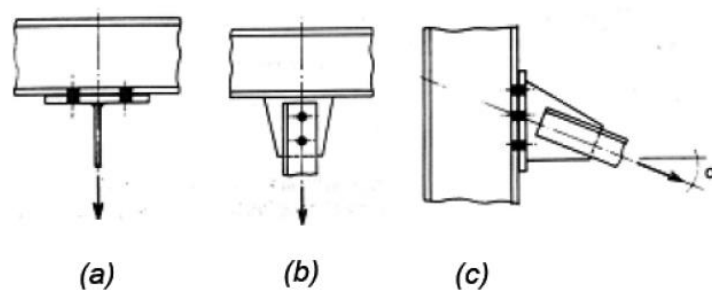


Fonte: Pfeil e Pfeil (2009).

2.3.3 Esforço solicitantes nos conectores

Os esforço solicitante nos conectores dos perfis metálicos podem ser divididos em esforços de tração, corte e a combinação entre corte e tração, a figura 16 apresenta esses tipos, respectivamente a, b e c, o entendimento de qual esforço estará presente em uma dada união é a parte inicial para estabelecer os parâmetros de resistência dos elementos conectivos (VASCONCELLOS, 2011).

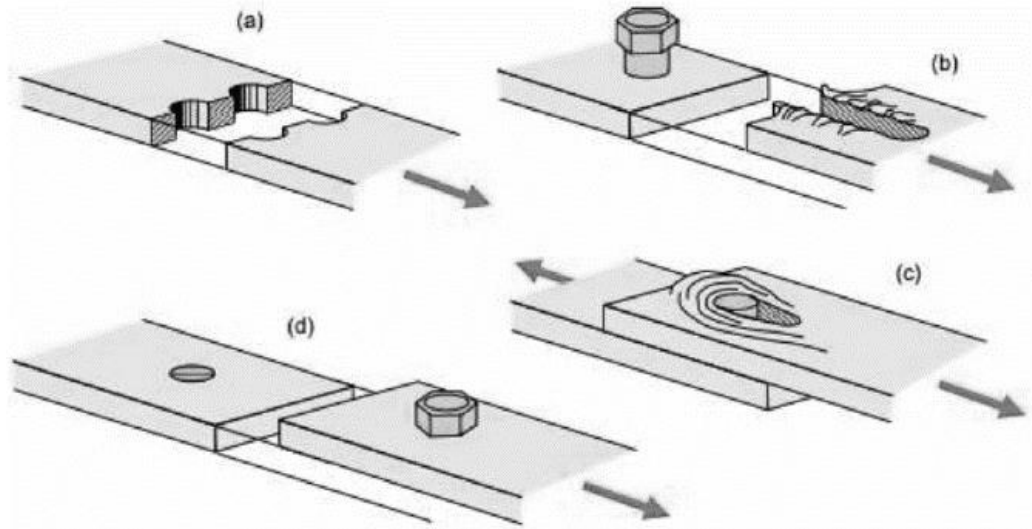
Figura 16: Esforços presentes em uniões parafusadas.



Fonte: Vasconcellos (2011).

De acordo com os esforços existentes na estrutura, estes são transferidos para os parafusos e os elementos de ligação entre os perfis, proporcionando modos de ruptura apresentados na figura 17, em que os parafusos estão sujeito ao cisalhamento e tração e os elementos de ligação podem falhar pela ruptura da seção líquida transversal, ruptura pelo rasgamento da chapa na área de contato com o parafuso e a deformação plástica do furo, ovalizando sua geometria. Cada modalidade dessas devem ser analisadas para um dimensionamento confiável da ligação (VASCONCELLOS, 2011).

Figura 17: Modalidade de deformações em parafusos e chapas de ligação.



Fonte: Vasconcellos (2011).

A resistente ao corte para os parafusos comuns e de alta resistência são encontradas de acordo com as equações 65 e 66, respectivamente.

$$R_{nv} = \frac{0,4A_gF_u}{\gamma_{a1}} \quad (65)$$

$$R_{nv} = \frac{0,5A_gF_u}{\gamma_{a1}} \quad (66)$$

- R_{nv} : Resistência ao corte do parafuso;
- A_g : Área da seção do parafuso sujeita ao esforço;
- F_u : Limite de resistência a tração do parafuso;
- γ_{a1} : Coeficiente de segurança, quadro 5.

O dimensionamento a tração dos parafusos é semelhante ao dimensionamento ao corte, em que sua resistência R_{nt} , está de acordo com a equação 67.

$$R_{nt} = \frac{0,75A_gF_u}{\gamma_{a1}} \quad (67)$$

As solicitações que proporcionam o rasgamento da chapa de ligação e a deformação plástica no furo são de mesma natureza e o dimensionamento utilizado em projeto para as duas situações deve ser o menor entre eles, o rasgamento determinado pela equação 68 e a deformação plástica pela equação 69.

$$R_n = \frac{1,2dtF_u}{\gamma_{a1}} \quad (68)$$

$$R_n = \frac{2,4adtF_u}{\gamma_{a1}} \quad (69)$$

- d : Diâmetro nominal do parafuso;
- t : Espessura da chapa de ligação;
- a (Furo externo): Dimensão entre a borda do furo e a extremidade da chapa medida na força solicitante;
- a (Entre furos): Dimensão entre a borda do furo e a borda do furo consecutivo, medida na direção da força solicitante.

Para a combinação de esforços de cisalhamento e tração nos conectores a resistência é verificada pela equação elíptica 70, validando o projeto pelo respeito a relação.

$$\left(\frac{V_d}{R_{nv}/\gamma_{a2}}\right)^2 + \left(\frac{T_d}{R_{nt}/\gamma_{a2}}\right)^2 \leq 1 \quad (70)$$

Onde, V_d é o esforço cortante de projeto e T_d o esforço de tração de corte.

2.3.4 Distribuição de esforços no conectores

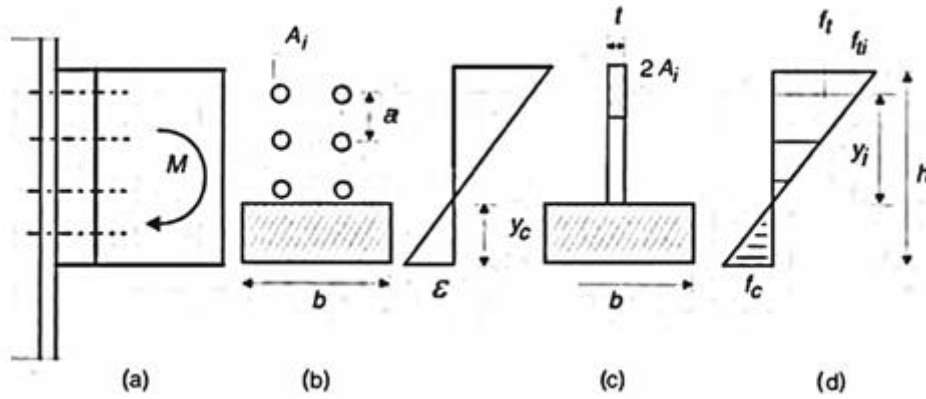
Em uma ligação excêntrica por corte, de acordo com a figura 18, admite-se que a carga submetida ao perfil é distribuída aproximadamente de maneira uniforme entre o conectores, porém para o dimensionamento neste tipo de ligação é considerado o parafuso superior para fins de cálculo por apresentar maiores solicitações do que os demais, o esforço no conector é

dado pela equação 71, no qual M é o momento fletor do perfil e r a distância do centro de rotação da chapa ligação (PFEIL e PFEIL, 2009).

$$R = \frac{M}{\sum r^2} r \quad (71)$$

Os conectores sujeitos a corte e tração, conforme a figura 18, a carga proporciona que os parafusos superiores sofram esforços de tração e na parte inferior a compressão entre as chapas, apresentando assim o diagrama de força e a linha neutra de transição para o esforço trativo e compressivo (PFEIL e PFEIL, 2009).

Figura 18: Ligação excêntrica de corte.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009).

O esforço de tração no parafuso mais solicitado é determinado pelas equação 72, em que o momento inercia I é dado de acordo com a figura 18 (c) e a equação 73 e Y_t é a distância da linha neutra até a borda tracionada (PFEIL e PFEIL, 2009).

$$f_{ti} = \frac{M}{I} y_t \quad (72)$$

$$I = \frac{by_c^3}{3} + \frac{t}{3}(h - y_c)^3 \quad (73)$$

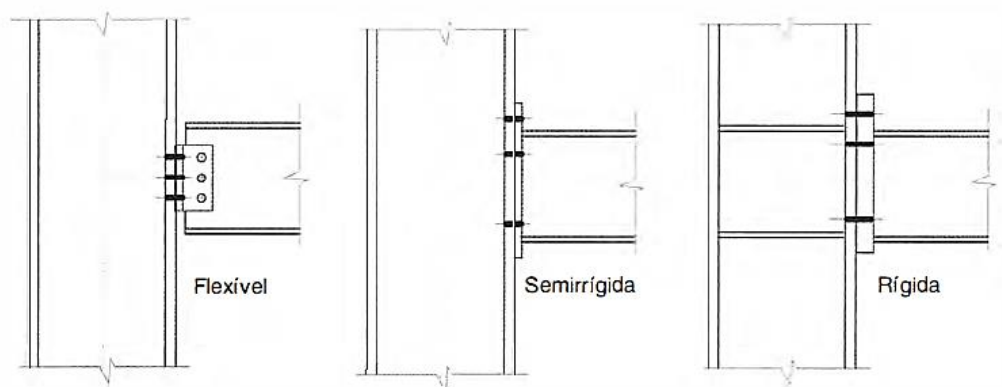
Para obter o valor de Y_c , distância da linha neutra até a borda comprimida, utiliza-se a equação 74, no qual F_t e F_c significam as forças de tração e compressão respectivamente.

$$f_t = \frac{f_c}{y_c}(h - y_c) \quad (74)$$

2.3.5 Tipos de ligações

Uma das formas de classificar as ligações entre elementos estruturais, sejam unidos por soldagem, parafusos ou rebites é em relação a rigidez da estrutura, que representa a capacidade de impedir rotação relativa entre os perfis, a figura 19 demonstra os três tipos de ligação em relação a rigidez, rígida, semirrígida e flexível, no qual a seleção da união do projeto deve estabelecer formas de ligação que de fato representem a teoria e assim encontrar os esforços de projeto mais próximos possíveis da realidade (VASCONCELLOS, 2011).

Figura 19: Tipos de ligação em relação a rigidez.

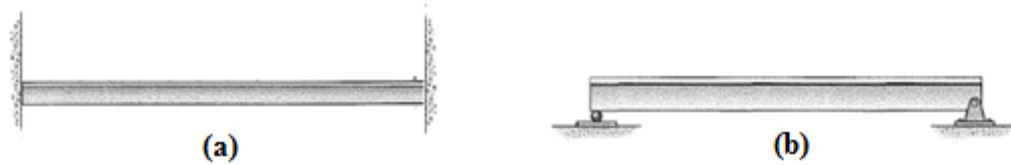


Fonte: Vasconcellos (2011).

A ligação do tipo rígida é caracterizada pelo ângulo formado entre os elementos que se interceptam, permanecendo o mesmo durante o carregamento da estrutura, na prática esse tipo de ligação são difíceis de se obter, em geral acontece um mínimo de rotação relativa para esse tipo de ligação. A união flexível permite uma rotação entre as peças e características semelhantes a uma rotula, transmitindo um pequeno momento fletor. A ligação semirrígida, possui comportamento intermediário entre a união rígida e flexível, nesta situação é necessário estabelecer qual a rotação entre as peças, proporcionando dificuldade para o dimensionamento e normalmente é considerando para fins de cálculos ligações do tipo rígida ou flexível (VASCONCELLOS, 2011).

Ainda de acordo com Vasconcellos (2011), considerando os apoios das uniões engastada e bi apoiada da figura 20, respectivamente estes tipos de ligação são consideradas como rígidas e flexivas e seus momentos máximos são determinados pelas equações 75 e 76.

Figura 20: Vigas (a) engastada e (b) bi apoiada



Fonte: Hibbeler (2010).

$$M = \frac{WL^2}{12} \quad (75)$$

$$M = \frac{WL^2}{8} \quad (76)$$

2.3.6 Dimensionamento da espessura para chapas de base

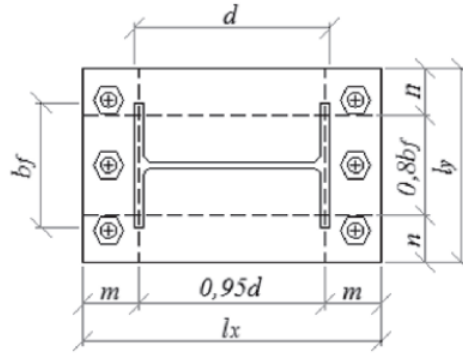
A NBR 8800:2008 não indica diretrizes para o dimensionamento de base de sustentação para os pilares de perfis do tipo I e H, umas das maneiras de se estimar este cálculo é através da resistência a compressão de um bloco de concreto em regime uniforme, equação 77. A NBR 8800:2008 estabelece o seu valor mínimo de resistência F_{ck} deverá ser de 20 Mpa. (PINHEIRO, 2005).

$$R_c = 0,85 \frac{f_{ck}}{1,4} \quad (77)$$

A figura 21 demonstra as dimensões de um chapa de aço para base de coluna, no qual maior medida medida de n ou m indicará o maior momento que a chapa será submetida, este momento M_{rd} é a referência para especificar qual espessura da chapa o suportará, a parti da equação 78, que relaciona o modulo plástico de um chapa Z , sua resistência ao escoamento f_y , e coeficiente para ações normais para aço, quadro 5.

$$M_{rd} = \frac{Z f_y}{\gamma_{a1}} \quad (78)$$

Figura 21: Dimensões para chapa de base



Fonte: Pinheiro (2005)

O modulo plástico para uma chapa ou barra é determinado pela equação 79, onde b é a largura e h a altura da seção.

$$Z = \frac{bh^2}{2} \quad (79)$$

3. METODOLOGIA

3.1 Classificação do estudo e software utilizados

Este estudo tem como propósito específico calcular e dimensionar um mezanino metálico de acordo com a NBR 8800:2008 e consequentemente utilizando o método dos estados limites, demonstrando as variáveis relevantes em um projeto de estrutura metálica, apresentado os principais detalhes construtivos, cotas dos componentes estruturais, detalhes dos perfis de ligação, especificação dos conectores e soldagem, assim como uma análise quantitativa e financeira dos materiais envolvidos.

O *Ftool*® é um programa para análise estrutural de abordagem simples e eficiente, inicialmente desenvolvido com foco educacional atualmente é bastante utilizado para projetos profissionais de estruturas, o software analisa um modelo estrutural fornecendo diagramas de esforço internos, bem com as deformações apresentadas. Em sua biblioteca existem os principais perfis estruturais utilizados na indústria, seções do tipo T, L, U e I com todas as suas informações geométricas.

Para este trabalho o *Ftool*® desenvolve um papel importante na determinação dos esforços de compressão, cisalhamento e flexão, de acordo com o tipo de ligação utilizada, além de apresentar o deslocamento vertical máximo para as vigas de projeto fornecendo as informações iniciais para a comparação com os valores resistentes. Uma limitação do software é não possuir habilitação para informar as resistências do perfis em relação ao método de estado limite.

O software *Solidworks*® é um programa de modelagem CAD (Computer Aided Desing) com interfaces 2D e 3D que permitem o usuário migrar para uma das opções, bastante utilizado para desenvolvimento de produtos o software possui habilitação mecânica com análise estática e dinâmica. Com os recursos focados para peças metálicas é possível desenvolver produtos utilizados em caldeiraria e estruturas metálicas respeitando o processo de fabricação prático, utilizando por exemplo chapas dobradas, uniões soldadas e por parafusos, além do possuir ótima intercambiabilidade em fornece projetos em 2D e 3D.

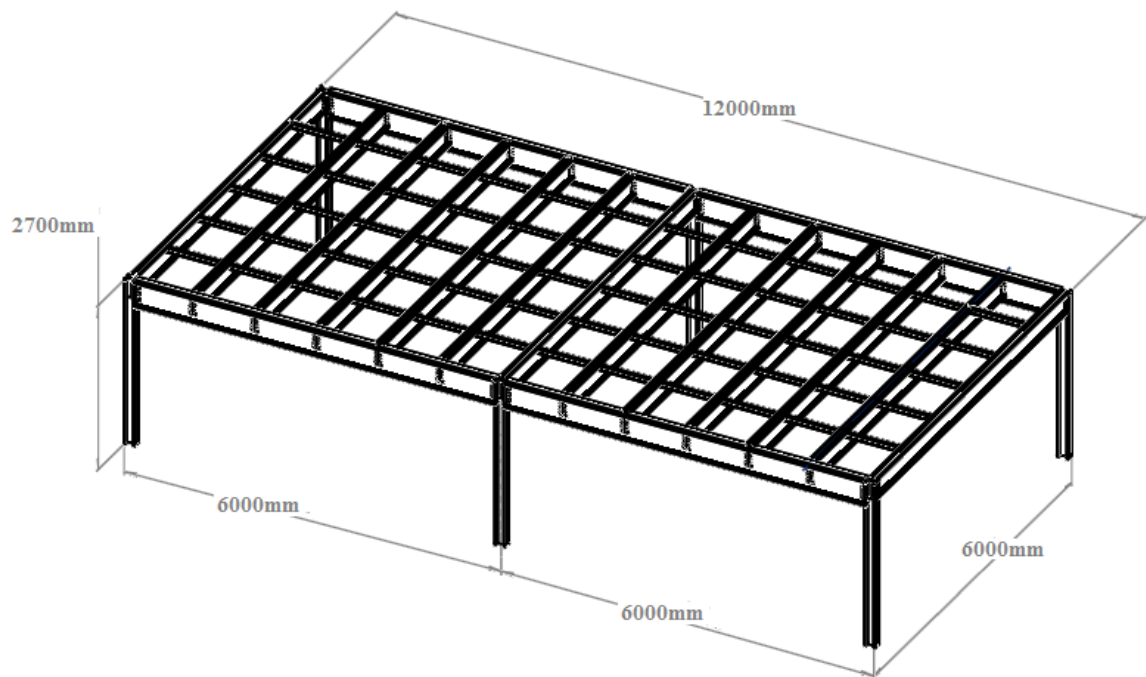
O emprego do *Solidworks*® tem o objetivo principal de realizar a representação do projeto com detalhes de perfis utilizados e uniões, fornecendo peso da estrutura e evitando erros de dimensionamento, além de dados suficientes para a execução do projeto. A parte de análise estrutural foi deixado de lado por ser apresentada de forma global, apenas o valor final das

tensões e deslocamentos, sem identificar todos os pontos importantes durante o dimensionamento que é estabelecido por norma, saindo assim do objetivo deste trabalho.

3.2 Considerações do mezanino

O desenvolvimento do mezanino, figura 22, foi baseado em sua utilização de forma genérica para a indústria, que pode ser aplicado para abrigar peneiras, misturadores, trocadores de calor, transportadores fluidizados, exaustores e etc. Assim foi estabelecido uma área de 72 m², com dimensões de 6 metros de largura e 12 metros de comprimento, para ocupação com 2,7 metros de altura, com a preocupação de utilizar dimensões de perfis padronizadas que facilitassem a aquisição no comércio e evitasse o desperdício de material.

Figura 22: Vista geral do mezanino metálico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A ligações adotados no projeto foram do tipo flexível e portanto bi apoiada, critério chave para determinar os esforços e realizar a simulação no *Ftool*®. Os perfis selecionados são do tipo laminados, por apresentarem maior resistência, ausência de tensões residuais, unidos por parafusos pela facilidade na montagem e uma possível modificação ou realocação da estrutura.

As cargas adotadas pelos projetos são baseadas no peso próprio da estrutura que são os perfis e chapas de piso, os valores mínimos estabelecidos pela NBR 6120:1980 para a aplicação de uma edificação utilizada como casa de máquinas, que inclui os fatores permanentes e variáveis. Valores estes adicionados na equação 03, individualmente para cada perfil, que são constituídos aço ASTM A36, parafusos de aço ASTM A307 e eletrodo E6010 com 3,25 de diâmetro com 5 mm de garganta.

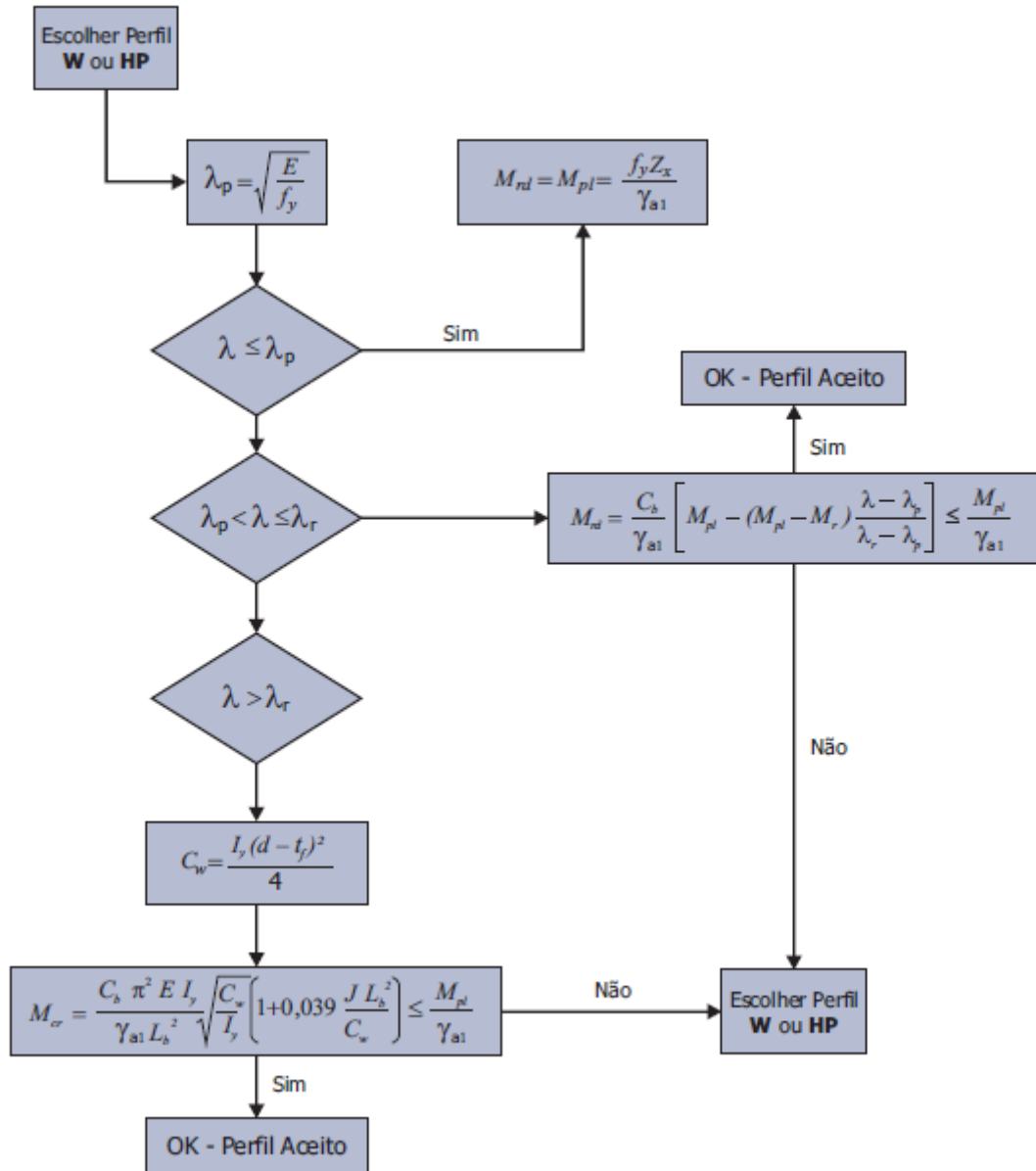
3.3 Dimensionamento a flexão e cisalhamento

A determinação da resistência a flexão das vigas foi realizada comparativamente com os esforços encontrados a partir das cargas simuladas pelo *Ftool*®, com a ligação do tipo bi apoiada, como descrito anteriormente. Os limites resistentes analisados e determinados pelo método estado limite último foram para a flexão na alma, na mesa e a ocorrência de torção. Cada perfil foi verificado inicialmente pela equação 01 a ocorrência de perda de resistência pelo fenômeno de torção. O parâmetro de esbeltez é o principal valor para determinação o sistema de equações utilizados para cada perfil, em relação a mesa, alma e torção, sendo o menor valor utilizado como a referência para o dimensionamento.

Diante do quadro 7 que representa os parâmetros referentes aos momentos existentes, foi utilizada a linha que representa os perfis do tipo I, H e U fletidos em relação ao eixo de maior momento de inércia. A relação da equação 23, foi utilizada para verificar se os perfis apresentariam uma redução da sua resistência pela torção, fator importante, pois além de proporcionar menor resistência envolve mais variáveis para seu cálculo.

As vigas dimensionais possuem aplicações para suportar piso, se enquadrando de acordo com o quadro 3, na razão do comprimento do vão livre por 350, esta relação foi abordada como o primeiro quesito para a especificação do componente estrutural. A figura 23, traz consigo um fluxograma para dimensionamento de perfis do tipo W e H, em que fica discriminável o parâmetro de esbeltez como fator inicial para o dimensionamento.

Figura 23: Fluxograma para dimensionamento a flexão.



Fonte: Alambert e Lippi (2012).

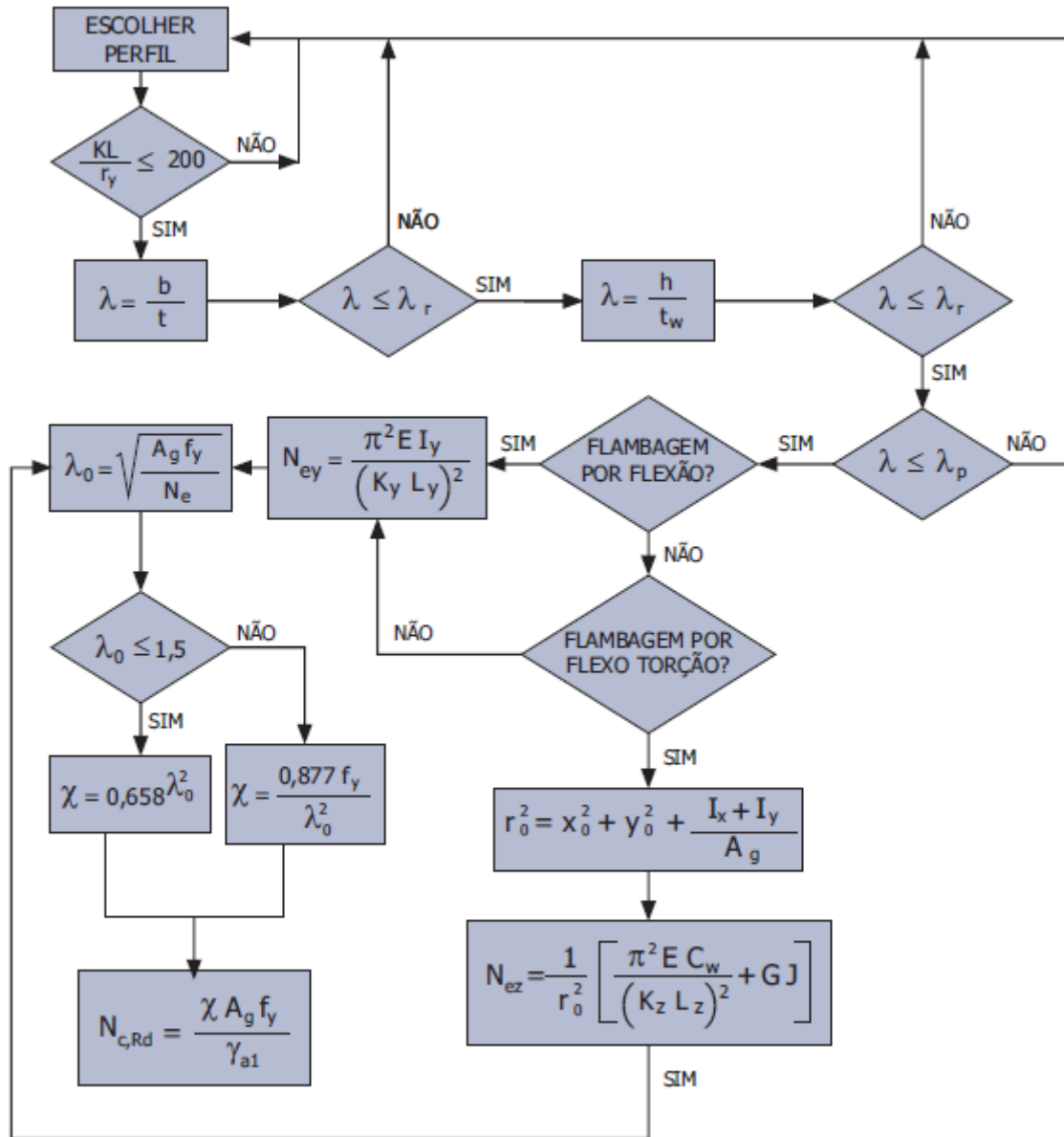
Os esforços de cisalhamento suportados pelas vigas se apresentam de forma mais simples do que os de flexão, outrossim ocorrem apenas na alma do perfil. Sua principal variável é a utilização de enrijecedores transversais que otimizam a resistência dos componentes estruturais, para este trabalho foi avaliado a não necessidade dos enrijecedores.

3.4 Dimensionamento a compressão

Os componentes estruturais sujeitos a cargas compressivas, foram dimensionando considerando o perfil engastado em sua parte inferior e na parte superior, pelas condições das uniões adotadas, com rotação impedida e translação livre, pela Quadro 4 essa condição possui parâmetro de flambagem igual a 1,2 para os valores recomendados. Os perfis comprimidos são analisados inicialmente pela parâmetros de esbeltez, idem os perfis flexionados, porém o parâmetro é determinado pelo quadro 6 para especificar o fator de redução total Q , equação 10. Para a aplicação deste trabalho foram utilizadas os elementos AA grupo 1 e AA grupo 2.

O efeito da torção mediante a compressão do perfil foi desconsiderada para este trabalho referenciando em Pfeil e Pfeil (2009), este afirma que o fenômeno de torção é comum em estruturas que adotam chapas finas dobradas, não sendo o caso desse projeto. A figura 24 abaixo transparece a sequência do dimensionamento a compressão simplificado, considerando os valores do fator de redução total igual a 1, para situação que a razão entre a largura e espessura do perfil sejam superiores ao $(b/t)_{lim}$, quadro 6. Como os pilares apoiam as vigas nas duas direções, X e Y, é indispensável analisar estruturalmente nos dois sentidos e escolher o menor como referência de projeto.

Figura 24: Fluxograma para dimensionamento a compressão.



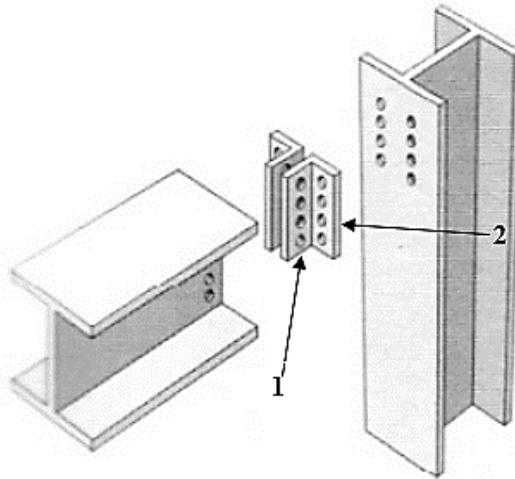
Fonte: Alambert e Lippi (2012)

3.5 Dimensionamento das uniões parafusos

O projeto deste trabalho estabelece que os componentes estruturais sejam unidos por cantoneira de ligação com parafusos sextavados comuns A307 com rosca parcial, a figura 25 exhibe os dois tipos de posicionamento distintos para a união adotada. O posicionamento 1 exige o dimensionamento ao corte dos conectores e da resistência da chapa de ligação, já o posicionamento 2 exige solicitações de cisalhamento, tração e resistência das chapas de ligação.

O momento fletor da ligação provocar a tração dos parafusos superiores e a compressão da chapa na parte inferior.

Figura 25: Ligação adotada no mezanino



Fonte: Vasconcellos (2011).

3.6 Dimensionamento a soldagem

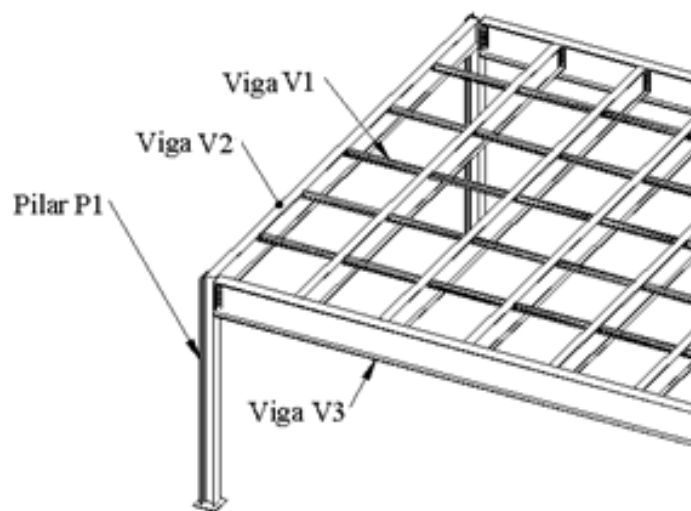
A placa da base do mezanino foi unida pelo processo de soldagem deste projeto resumiu a ligação da parte inferior dos pilares com a base de alvenaria, em que o tipo de solda projetada foi do tipo filete utilizando o processo por eletrodo revestido. Os esforço presentes na união formaram o momento e o cisalhamento na região soldada, semelhante ao posicionamento 2 da união parafusada, figura 25, levando em consideração a chapa mais fina para a especificação exata da soldagem.

4. RESULTADOS

4.1 Esforços de projeto e esforço resistentes para vigas e pilares

O mezanino representando na figura 26, foi dimensionando utilizando os perfis do tipo U 3x6,10, W310X32,5 e W410x46,1, vigas V1, V2 e V3 respectivamente, o perfil selecionando para os pilares, P1, foi do tipo W150x22,5, com seus dados disponíveis no anexo 1. O perfil V1 foi o inicial para a determinação dos esforços, considerando a utilização como casa de máquinas $7,5\text{KN/m}^2$, massa do perfil 6,10 Kg/m e massa da chapa para piso de espessura 3/16" com $37,29\text{Kg/m}^2$, com os seguintes coeficiente de ações retirando do quadro 1, 1,5, 1,25 e 1,25. Resultando em um carga linear 11,8 KN/m, em que esta proporciona as reações nas vigas V2 e V3.

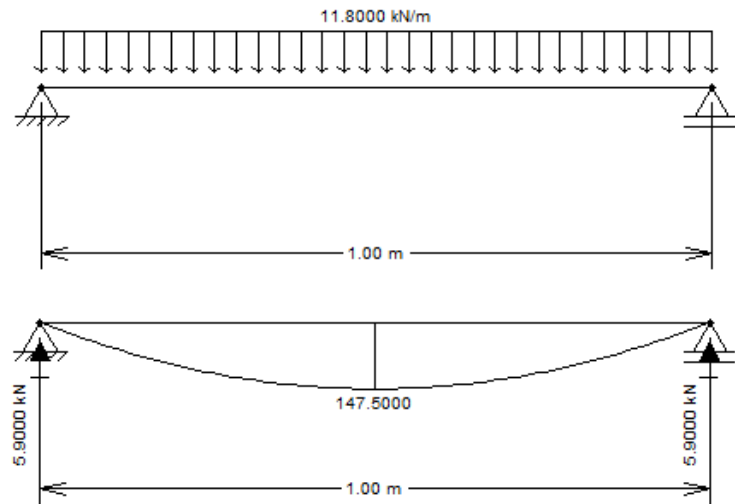
Figura 26: Nomenclatura dos perfis estruturais.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A figura 27, Viga V1, representa os esforços de momento e cisalhamento do projeto e a tabela 3 os esforços de momento e cisalhamento resistentes, no qual este perfil V1 se apresenta no mercado como o menos robusto para a sua forma geométrica, otimizando o dimensionamento. O esforço de flexotorção foi considerado para este perfil por apresentar comprimento destravado superior ao limite de 51,3 cm, induzindo em uma pequena redução do seu momento resistente.

Figura 27: Esforços de projeto viga V1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

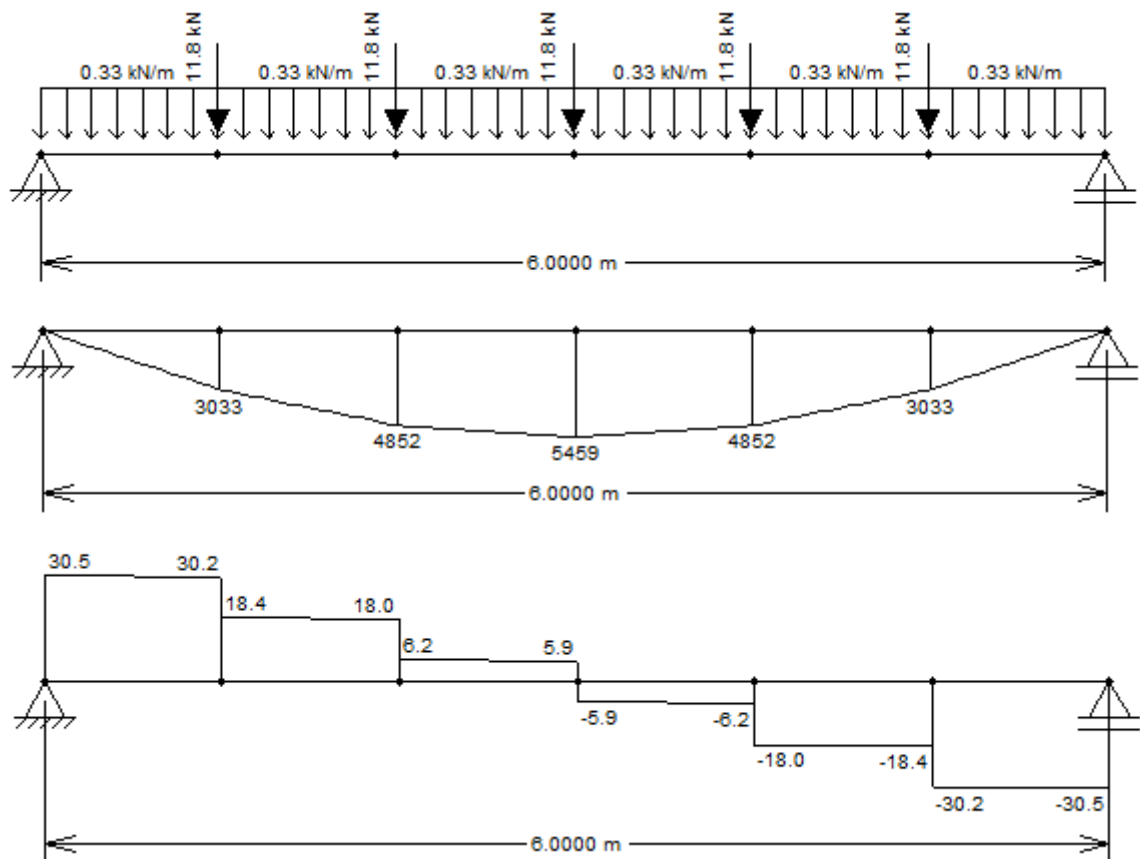
Tabela 3: Valores resistentes para a viga V1.

INFORMAÇÕES	FONTE	VALORES
Deslocamento vertical máximo	Quadro 3	2,86 mm
Deslocamento vertical apresentado	<i>FTOOL</i> ®	1,09 mm
Flambagem lateral com torção FTL	Equação 24	435,52 kNcm
Parâmetro de esbeltez (FLT)	λ	Quadro 7
	λ_p	Quadro 7
	λ_r	Quadro 7
Momento resistente (FLM)	Equação 23	486,36 kNcm
Parâmetro de esbeltes (FLM)	λ	Quadro 7
	λ_p	Quadro 7
	λ_r	Quadro 7
Momento resistente (FLA)	Equação 23	445,83 kNcm
Parâmetro de esbeltes (FLA)	λ	Quadro 7
	λ_p	Quadro 7
	λ_r	Quadro 7
Momento de referência	-	435,52 kNcm
Cisalhamento resistente	Equação 41	44,89 kN
Parâmetro de esbeltez (FC)	λ	Equação 44
	λ_p	Equação 45
	λ_r	Equação 46

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A viga V2, W310X32,5, apresenta travamentos a cada 1 metro, pela ligação com a viga v1, impedindo a redução do momento resistente pela torção do perfil. Os esforços de projeto, figura 28, se exibiram bem superiores aos que o perfil pode suportar, tabela 4, entretanto o deslocamento vertical ficou bem próximo ao máximo, sendo o fator limitante de projeto. As vigas do tipo V2 que estão localizadas nas extremidades do mezanino recebem apenas a metade da carga das demais, por possuir ligação com as vigas V1 apenas em um de seus lados, mas para a padronização da estrutura foi mantido o mesmo perfil.

Figura 28: Esforços de projeto viga V2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

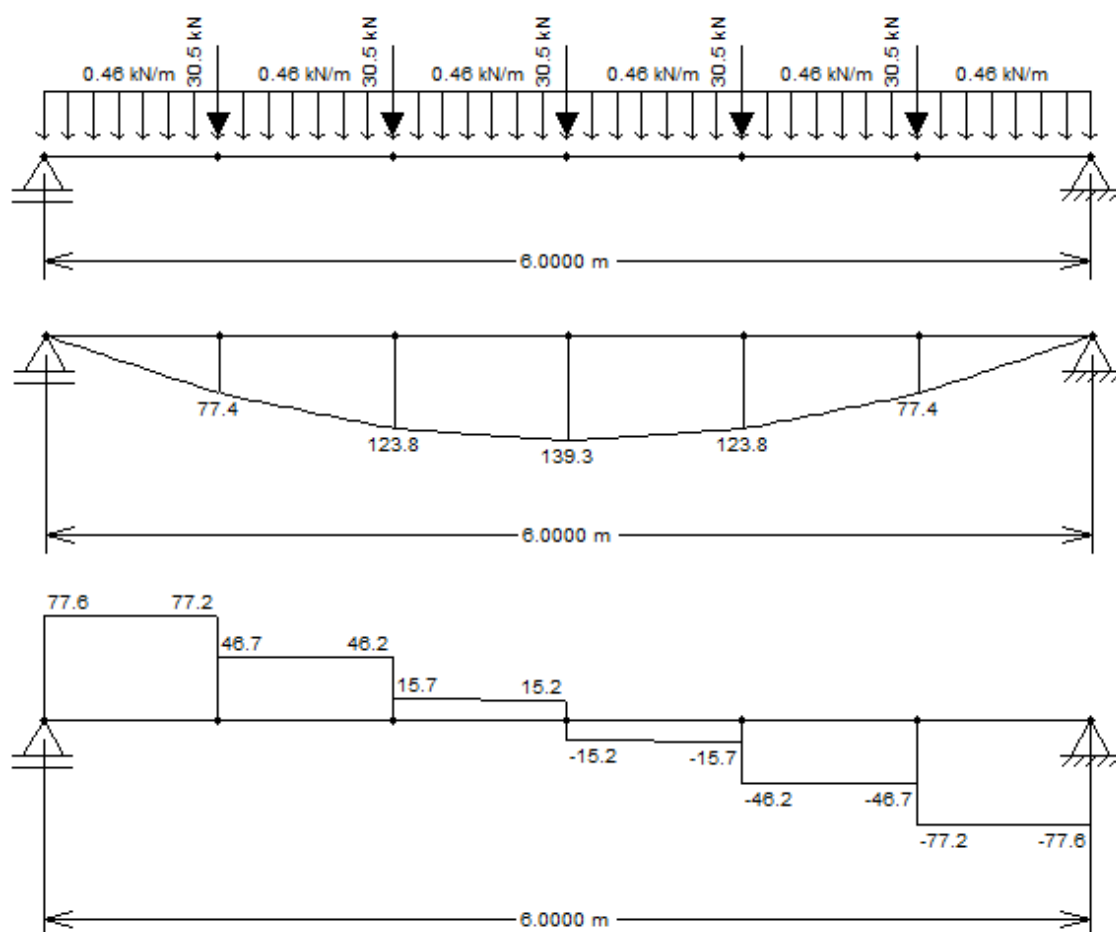
Tabela 4: Valores resistentes para viga V2.

INFORMAÇÕES	FONTE	VALORES
Deslocamento vertical máximo	Quadro 3	17,14 mm
Deslocamento vertical apresentado	<i>FTOOL</i> ®	15,24 mm
Flambagem lateral com torção FTL	Equação 23	Equação 24
Parâmetro de esbeltez (FLT)	λ	16,31
	λ_p	49,78
	λ_r	5180,27
Momento resistente (FLM)	Equação 23	Equação 23
Parâmetro de esbeltes (FLM)	λ	9,44
	λ_p	10,75
	λ_r	28,06
Momento resistente (FLA)	Equação 23	Equação 23
Parâmetro de esbeltes (FLA)	λ	47,42
	λ_p	106,35
	λ_r	161,22
Momento de referência	-	11029,54 kNcm
Cisalhamento resistente	Equação 41	Equação 41
Parâmetro de esbeltez (FC)	λ	47,43
	λ_p	69,57
	λ_r	86,65

Fonte: elaborado pelo autor (2018).

O componente estrutural V3, viga de maior solicitação do projeto, figura 29, também é a via mais resistente do mezanino, tabela 5, assim como na viga V2 o travamento a cada 1 metro impede a redução de sua resistência pela torção do perfil. Sua especificação foi baseada na aprovação do perfil mais leve que atenda a todos os quesitos.

Figura 29: Esforços de projeto viga V3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

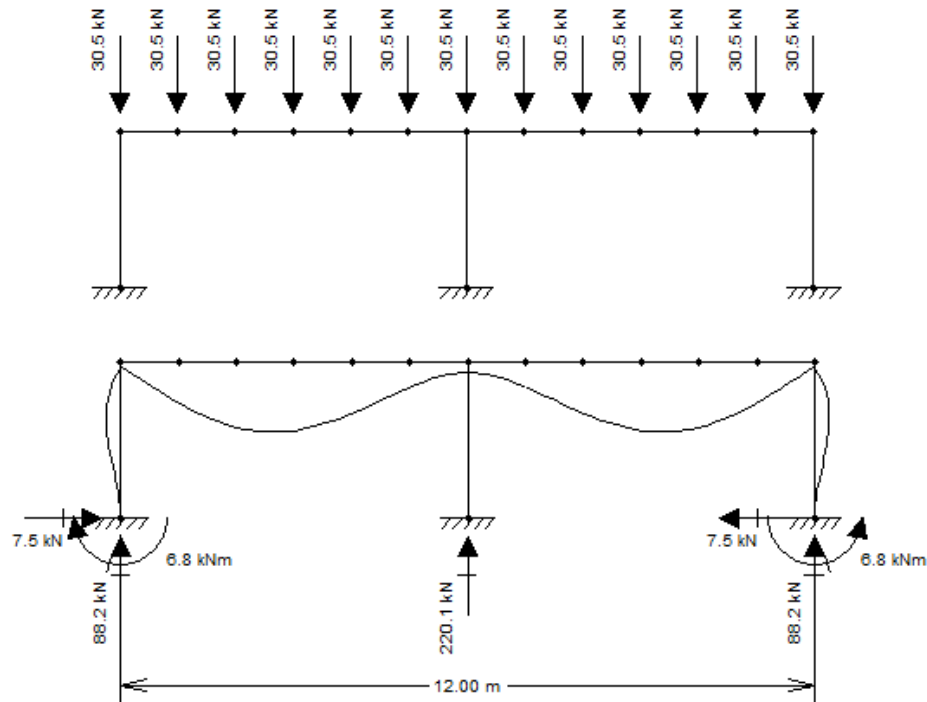
Tabela 5: Valores de resistência para viga V3.

INFORMAÇÕES	FONTE	VALORES
Deslocamento vertical máximo	Quadro 3	17,14 mm
Deslocamento vertical apresentado	<i>FTOOL®</i>	15,89 mm
Flambagem lateral com torção FTL	Equação 23	435,52 kNcm
Parâmetro de esbeltez (FLT)	λ	Quadro 7
	λ_p	Quadro 7
	λ_r	Quadro 7
Momento resistente (FLM)	Equação 24	486,36 kNcm
Parâmetro de esbeltez (FLM)	λ	Quadro 7
	λ_p	Quadro 7
	λ_r	Quadro 7
Momento resistente (FLA)	Equação 23	445,83 kNcm
Parâmetro de esbeltez (FLA)	λ	Quadro 7
	λ_p	Quadro 7
	λ_r	Quadro 7
Momento de referência	-	18207,96 kNcm
Cisalhamento resistente	Equação 41	44,89 kN
Parâmetro de esbeltez (FC)	λ	Equação 44
	λ_p	Equação 45
	λ_r	Equação 46

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A seleção do pilar foi fundamentada nos perfis do tipo “H”, cuja as dimensões da mesa e da alma são bem próximas, permitindo maiores momentos de giração no sentido X e Y dos que os perfis apenas do tipo I. Comparando os perfis já especificados, as vigas selecionadas possuem um formato mais retangular, enquanto o pilar um formato mais quadrado. A união entre P1 e V3 foi dada no sentido do maior raio giração de P1, por ser a ligação com maior solicitação de carga. A figura 30 demonstra as solicitações de projeto e a tabela 6 as resistências para o perfil W(150x22,5) H.

Figura 30: Esforços de projeto pilar P1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 6: Valores resistentes para o pilar P1.

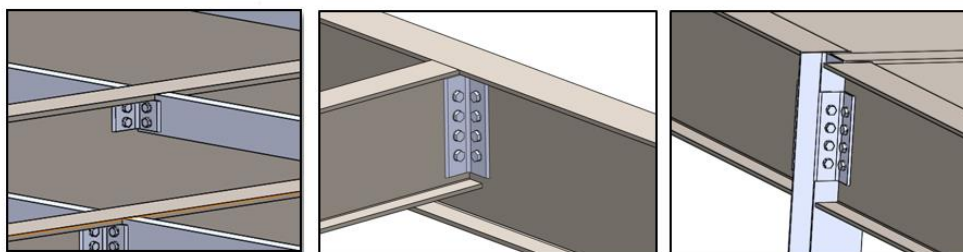
INFORMAÇÕES	FONTE	VALORES
Índice de esbeltez em X	Equação 02	52,43
Índice de esbeltez em Y	Equação 02	88,77
Fator de redução total	Quadro 6	1
b/t para alma	Quadro 6	23,96
b/t para a mesa	Quadro 6	11,51
(b/t)lim alma	Quadro 6	39,6
(b/t)lim mesa	Quadro 6	15,84
Índice de esbeltez reduzido em X	Equação 04	0,56
Índice de esbeltez reduzido em Y	Equação 04	1
Fator de redução associado a compressão X	Equação 05	0,88
Fator de redução associado a compressão Y	Equação 05	0,66
Força axial de flambagem elástica em X	Equação 07	2310,96
Força axial de flambagem elástica em Y	Equação 07	722,7
Resistência a compressão em X	Equação 03	529,82 kN
Resistência a compressão em Y	Equação 03	398,16 kN

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.2 Esforços de projeto e esforço resistentes para as uniões

As ligações entre as vigas e pilares foram dimensionadas para a utilização de cantoneiras exibindo 3 tipos ligações, 1, 2 e 3, figura 31, que respectivamente são as uniões entre V1/V2, V2/V3 e V3/P1, além da ligação V2/P1 que foi considerada semelhante a V2/V3. Utilizando parafusos A307 com limite de resistência 415 Mpa, padrão americano, com cabeça sextavada. Um detalhe importante na consideração do projeto é o fato da ligação 1 compartilhar os parafusos instalados perpendicularmente aos perfis de apoio, duplicando a necessidade do esforço resistente para este parafuso.

Figura 31: Ligações V1/V2, V2/V3 e V3/P1, respectivamente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A ligação 1 utilizou cantoneira em aço ASTM A36 de abas iguais 2" x 3/16" x 50mm e parafusos com diâmetro nominal de 5/16", com os seguintes esforços mostrados na tabela 7, e um total 6 parafusos. Para facilitar união entre perfis e a instalação do piso foi necessário especificar um corte na seção da alma das vigas.

Tabela 7: Dimensionamento da ligação 1.

INFORMAÇÕES	FONTE	VALORES
Resistência ao corte duplo (Parafuso mais solicitado)	Figura 27	6180,79 N
Esforço resultante de corte	Equação 65	5566,05 N
Resistência de apoio e rasgamento	Equação 68	13539,56 N
Resistência ao corte (Interação corte e tração)	Equação 65	12,3 kN/cm ²
Esforço de corte (Interação corte e tração)	Cortante/Ag	1,96 kN/cm ²
Resistência a tração (Interação corte e tração)	Equação 70	23,06 kN/cm ²
Esforço de tração (Interação corte e tração)	Equação 72	2,92 kN/cm ²
Interação de corte e tração	Equação 70	0,04

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O componente estrutural V2 tem a sua ligação especificada com cantoneira em aço ASTM A36 de abas iguais 3” x 1/4” x 250 mm com 12 parafusos de 1/2” com a particularidade de sua solicitação de acordo com a tabela 8.

Tabela 8: Dimensionamento da ligação 2

INFORMAÇÕES	FONTE	VALORES
Resistência ao corte duplo (Parafuso mais solicitado)	Figura 28	15576,56 N
Esforço resultante de corte	Equação 65	8552,46 N
Resistência de apoio e rasgamento	Equação 68	28889,56 N
Resistência ao corte (Interação corte e tração)	Equação 65	12,3 kN/cm ²
Esforço de corte (Interação corte e tração)	Cortante/Ag	3 kN/cm ²
Resistência a tração (Interação corte e tração)	Equação 70	23,06 kN/cm ²
Esforço de tração (Interação corte e tração)	Equação 72	4,46 kN/cm ²
Interação de corte e tração	Equação 70	0,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A viga V3 se une ao pilar através de cantoneira em aço ASTM A36 de abas iguais 3” x 1/4” x 250 mm com 12 parafuso de 3/4, com as especificações de projeto especificados na tabela 9.

Tabela 9: Dimensionamento da ligação 3.

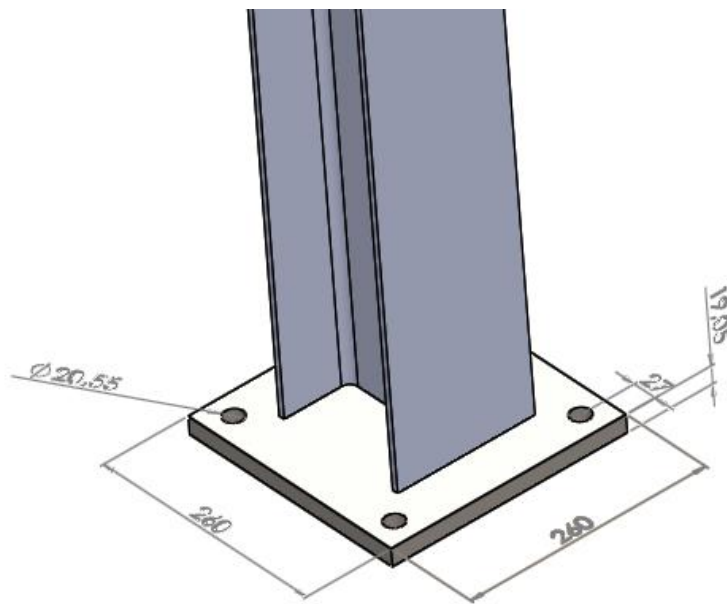
INFORMAÇÕES	FONTE	VALORES
Resistência ao corte duplo (Parafuso mais solicitado)	Figura 29	34863,53 N
Esforço resultante de corte	Equação 65	22624,09 N
Resistência de apoio e rasgamento	Equação 68	43235,56
Resistência ao corte (Interação corte e tração)	Equação 65	12,3 kN/cm ²
Esforço de corte (Interação corte e tração)	Cortante/Ag	3,42 kN/cm ²
Resistência a tração (Interação corte e tração)	Equação 70	23,06 kN/cm ²
Esforço de tração (Interação corte e tração)	Equação 72	16,77 kN/cm ²
Interação de corte e tração	Equação 70	0,6

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.3 Especificação da chapa ligação

A ligação 4 realiza a união do mezanino com o local de instalação, figura 32, a partir de um chapa metálica com espessura de 19.05 mm ou 1/4 polegada, utilizando 4 chumbadores de 3/4” de diâmetro. A chapa está unida ao pilar por solda de filete por meio do eletrodo 6010 com garganta padrão de 5mm ao longo de todo o contorno do perfil. As tabelas 08 e 09 exibem as especificações dos esforços resistentes para a chapa, os chumbadores e o filete de solda.

Figura 32: Detalhe da ligação da base do pilar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 10: Dimensionamento da chapa de ligação.

INFORMAÇÕES	FONTE	VALORES
Espessura da chapa	Equação 77	3/4”
Força de tração nos parafusos	Força/Ag	0,52 kNcm ²
Resistência a tração nos parafusos	Equação 72	23 kN/cm ²
Cisalhamento nos parafusos	Figura 29	7,5 kN
Resistência ao cisalhamentos dos parafusos	Equação 65	12,3 kNcm ²
Interação entre tração e corte	Equação 70	0,97

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 11: Dimensionamento da soldagem da chapa de ligação.

INFORMAÇÕES	FONTE	VALORES
Momento de inércia da área soldada	Equação 62	1265,55 cm ⁴
Tensão de flexão	Equação 62	0,041 kN/cm ²
Tensão de cisalhamento	Equação 61	0,77 kN/cm ²
Tensão resultante	Result. Eq. 61 e 62	0,78 kN/cm ²
Tensão resistente da solda	Equação 58	18,4 kN/cm ²

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.4 Levantamento de custos

Tabela 12: Levantamento de custos básicos de materiais para construção do mezanino.

Item	Produto	Unid.	Quant.	Valor unit.	Valor total
1	Perfil U(3x6,1)	M	60	R\$ 23,76	R\$ 1.425,60
2	Perfil W(310x32,7)	M	78	R\$ 206,45	R\$ 16.103,10
3	Perfil W(410x46,1)	M	24	R\$ 291,55	R\$ 6.997,20
4	Perfil W(150x22,5)H	M	18	R\$ 114,39	R\$ 2.059,02
5	Cantoneira A.I. 2"x3/16"	M	12	R\$ 12,10	R\$ 145,20
6	Cantoneira A.I. 3 "x1/4"	M	24	R\$ 29,31	R\$ 703,44
7	Parafuso sextavado A307 5/16"x1.1/2"	PÇ	880	R\$ 1,19	R\$ 1.047,20
8	Porca sextava 5/16"	PÇ	880	R\$ 1,10	R\$ 968,00
9	Arruela 5/16"	PÇ	1760	R\$ 0,98	R\$ 1.724,80
10	Parafuso sextavado A307 1/2"x1.1/2"	PÇ	208	R\$ 1,66	R\$ 345,28
11	Porca sextava 1/2"	PÇ	208	R\$ 1,17	R\$ 243,36
12	Arruela 1/2"	PÇ	416	R\$ 1,08	R\$ 449,28
13	Parafuso sextavdo A307 3/4"x2"	PÇ	64	R\$ 5,05	R\$ 323,20
14	Porca sextava 3/4"	PÇ	64	R\$ 2,75	R\$ 176,00
15	Arruela 3/4"	PÇ	128	R\$ 1,45	R\$ 185,60
16	Eletrodo revestido 6010x3,25mm	KG	5	R\$ 15,50	R\$ 77,50
17	Chapa para piso 3/16"	PÇ	36	R\$ 279,50	R\$ 10.062,00
Total:					R\$ 43.035,78

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os conceitos baseados no método dos estados limites foi possível elaborar um projeto da parte estrutural principal de um mezanino metálico com o auxílio dos softwares *Ftool*® e *Soliworks*®, ficando evidente todas as variáveis importante. O grande número de análises a serem feitas torna o método mais atrativo utilizando software específicos, porém é necessário saber a sequência correta do dimensionamento estrutural para analisar os dados de forma coerente, além de saber quais critérios podem ser dispensados da análise.

O limite imposto para o deslocamento vertical se mostrou um ótimo parâmetro para análises estruturais rápidas, pois os perfis testados para o dimensionamento que foram aprovados com deslocamento máximo aceitável, também foram aprovados nos demais quesitos de resistência. A especificação das ligações demonstraram-se mais importantes e sensíveis a mudanças do que a especificação dos perfis, assim o dimensionamento das uniões, sejam soldadas ou parafusos, se apresentam como um gargalo para um projeto de estrutura metálica.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: **Cargas para cálculo de estruturas**. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

CALLISTER, W. D; RETHWISCH, D. G. - **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais** - 9ª Ed., 2013.

GUANABARA, Matheus Kerkhoff. **Dimensionamento de estruturas metálicas: rotina computacional para seleção de perfis metálicos**. 2010. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

GUARNIER, Christiane Roberta Fernandes. **Metodologias de detalhamento de estruturas metálicas**. 2009. 396 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências da Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

MARQUES, Paulo Vilani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora Ufmg, 2009.

PERUCELO, Célio de Oliviera. **MEZANINOS ESTRUTURADOS EM AÇO**. São Paulo: Gerdau, 2005. 4 p.

PFEIL, W.; PFEIL, M. Estruturas de aço: **Dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008**. Ed. **ático de acordo com a NBR 8800:2008**. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PINHEIRO, Antonio Carlos da Fonseca Bragança. Estruturas metálicas: cálculos, detalhes, exercícios e projetos. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

R. C. HIBBELER, **Resistência dos Materiais**, 7ª Edição, Pearson, 2010

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 56.819, de 10 de março de 2011. **Regulamento de Segurança Contra Incêndio das Edificações e áreas de Risco no Estado de São Paulo e Das Providências Correlatas**. São Paulo, SP, 10 mar. 2011. p. 9-10.

VASCONCELLOS, A. L. **Ligações em estruturas metálicas volume 1**. Instituto aco brasil, Rio de Janeiro, 2011.