

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA MECÂNICA
EDUARDO HENRIQUE EVANGELISTA ALMEIDA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE UMA LIGAÇÃO DE UM NÓ DE TRELIÇA EM
CHAPA GUSSET PARAFUSADA E SOLDADA**

Varginha
2018

EDUARDO HENRIQUE EVANGELISTA ALMEIDA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE UMA LIGAÇÃO DE UM NÓ DE TRELIÇA EM
CHAPA GUSSET PARAFUSADA E SOLDADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas Gerais – UNIS como pré-requisito para obtenção de grau de bacharel, sob orientação do Prof. Esp. Matheus Henrique Pereira.

**Varginha
2018**

EDUARDO HENRIQUE EVANGELISTA ALMEIDA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE UMA LIGAÇÃO DE UM NÓ DE TRELIÇA EM
CHAPA GUSSET PARAFUSADA E SOLDADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS como pré-requisito para obtenção de grau de Engenheiro Mecânico pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: / /

Prof.

Prof.

Prof.

OBS.:

Dedico este trabalho aos meus pais, Izilda e Antônio, e a todos os demais que contribuíram para sua realização.

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente Deus por ter me dado forças para lutar e a minha família, por acreditar no meu potencial. Agradeço aos meus professores pelo conhecimento passado, principalmente ao meu orientador, Matheus Henrique Pereira e aos meus amigos Islei Henrique de Moura e Jadson Veloso Fernandes, que através dos seus conhecimentos e práticas puderam me ajudar diretamente no protótipo analisado.

“Não importa quanto à vida possa ser ruim, sempre existe algo que você pode fazer, e triunfar. Enquanto há vida, há esperança.”

Stephen Hawking

RESUMO

O trabalho mostra uma análise comparativa da eficiência da ligação de um nó de treliça em chapa gusset parafusada e soldada através de ensaios mecânicos, que determinarão a eficácia das duas tecnologias em relação a esforço mecânico e tempo de execução. Tal abordagem se justifica devido a pouca pesquisa comparativa existente entre os meios de ligação relacionados ao trabalho. Entende-se que, individualmente, os dois meios de ligação são amplamente estudados, mas sem o estabelecimento de critérios claros que tornem a escolha efetiva. Assim, a pesquisa tem como objetivo detalhar conceitos relacionados à eficiência de cada meio de ligação, comparando o desempenho destes em relação aos critérios força e tempo de execução.

Palavras-chave: Ligação. Parafusada. Soldada. Chapas Gusset.

ABSTRACT

This work makes a comparative analysis of the efficiency of the connection of a lattice knuckle to bolted and welded gusset sheet through mechanical tests, which will determine the effectiveness of the two technologies in relation to mechanical stress and execution time. Such an approach is justified by the lack of comparative research between work-related linkages. It is understood that, individually, the two means of attachment are extensively studied, but without the establishment of clear criteria that make the choice effective. Thus, the research aims to detail concepts related to the efficiency of each connection medium, comparing the performance of these in relation to the criteria force and execution time.

Keywords: *Link. Screwed. Soldier. Gusset sheets.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Demonstração de estrutura.....	15
Figura 2: Ponte de Coalbrookdale, sobre o rio Severn na Inglaterra.....	16
Figura 3: Esquema representativo de funcionamento do alto forno.....	18
Figura 4: Representação de lingotamento contínuo.	19
Figura 5: Esquema de laminação a quente.	20
Figura 6: Esquema de laminação a frio.	20
Figura 7: Tipos de barras.	24
Figura 8: Chapas de aço estrutural.	25
Figura 9: Perfil I laminado.	25
Figura 10: Perfil I soldado.	26
Figura 11: Ligação em treliças.	27
Figura 12: Representação de uma ligação rígida em um perfil qualquer.	28
Figura 13: Representação de uma ligação flexível em um perfil qualquer.	28
Figura 14: Representação de uma ligação semirrígida em um perfil qualquer.	29
Figura 15: Modelo de chapa gusset empregado por Whitmore.....	30
Figura 16: Dispersão das tensões normais para obtenção da seção efetiva.....	31
Figura 17: Representação de um rebite sendo aplicado como meio de ligação.	35
Figura 18: Representação de um parafuso com porca sextavada e arruelas.....	36
Figura 19: Esquema de ligação por atrito.....	37
Figura 20: Esquema do torque aplicado na porca.....	37
Figura 21: Esquema de ligação por corte nos conectores.....	38
Figura 22: Esquema de ligação por tração nos conectores.....	39
Figura 23: Esquema de ligação à corte e tração dos conectores.....	39
Figura 24: Ligações com conectores: corte simples, corte duplo e corte múltiplo respectivamente.	40
Figura 25: Representação de furos.	41
Figura 26: Esquema de modalidades de ruptura de uma ligação com os conectores.....	43
Figura 27: Solda elétrica com eletrodo.....	46
Figura 28: Especificações do eletrodo.....	47
Figura 29: Solda com eletrodo revestido.....	47
Figura 30: Representação de defeitos de solda.....	53
Figura 31: Parafuso ASTM A307.....	58

Figura 32: Eletrodo E6013	60
Figura 33: Furo padrão adotado na chapa de aço.	63
Figura 34: Solda de filete aplicada no protótipo.	64
Figura 35: Chapa parafusada.	65
Figura 36: Ligação parafusada.	65
Figura 37: Ligação soldada.....	66
Figura 38: Equipamento usado para tracionar os corpos de prova.....	67
Figura 39: Ligação parafusa sofrendo esforço de tração, onde os conectores sofrem cisalhamento.	68
Figura 40: Carga máxima aplicada nos protótipos.	69
Figura 41: Chapa soldada sofrendo esforço de tração.	69
Figura 42: Ovalização da chapa na ligação parafusada.	70
Figura 43: Parafuso depois do teste aplicado.	71
Figura 44: Solda após o esforço aplicado.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades Mecânicas de Aços-carbono	22
Tabela 2: Chapas grossas e chapas finas.	24
Tabela 3: Propriedades mecânicas dos aços para conectores.	42
Tabela 4: Força resistente de cálculo de soldas.	51
Tabela 5: Dimensões parafusos comuns tipo ASTM A307.	59
Tabela 6: Custos do protótipo.....	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 ESTRUTURAS DE AÇO	15
2.1 Conceito de estrutura	15
2.2 Histórico das estruturas metálicas	15
3 PERFIS	18
3.1 Processos de fabricação.....	18
3.2 Tipos de aços estruturais.....	21
3.2.1 Aços-carbono.....	21
3.2.2 Aços de Baixa Liga.....	22
3.2.3 Aços tratados termicamente.....	22
3.3 Produtos estruturais	23
3.3.1 Perfis laminados	23
3.3.2 Perfis soldados.....	25
4 TIPOS DE LIGAÇÕES EMPREGADAS NAS ESTRUTURAS DE AÇO.....	27
4.1 Comportamento das ligações.....	27
4.2 Classificação das ligações.....	28
5 CHAPAS GUSSET	30
5.1 Ligações Excêntricas	32
5.2 Elementos Tracionados	33
5.3 Elementos submetidos a cisalhamento.....	34
6 LIGAÇÕES PARAFUSADAS	35
6.1 Parafusos comuns	35
6.2 Parafusos de alta resistência.....	36
6.3 Classificação das ligações de acordo com o esforço solicitante nos conectores.....	38
6.4 Furação das chapas	40
6.5 Espaçamentos entre conectores	41
6.5.1 Espaçamento mínimo entre furos	41
6.5.2 Espaçamento máximo entre parafusos	41
6.6 Resistência dos aços utilizados nos conectores.....	42
6.6.1 Tipos de rupturas em ligações com conectores	42
6.6.2 Resistência das chapas e elementos de ligação	44
7 LIGAÇÕES SOLDADAS	45
7.1 Eletrodos.....	46
7.2 Solda em aços estruturais	48
7.2.1 Soldas de filete	48
7.2.2 Soldas de entalhe	48
7.3 Resistência das soldas.....	48
7.3.1 Soldas de entalhe	49
7.3.2 Soldas de filete	49
7.4 Especificações de dimensionamento para soldas	50
7.5 Defeitos na solda	52

7.5.1 Controle e inspeção da solda	53
8 METODOLOGIA	54
8.1 Técnicas de pesquisa.....	54
8.2 Método de cálculo	54
8.2.1 Área líquida efetiva e área bruta.....	54
8.2.2 Elementos tracionados.....	56
8.2.3 Parafusos.....	58
8.2.4 Comprimento da solda.....	59
8.3 Protótipo	62
9 RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
10 CONCLUSÃO.....	74
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

As ligações devem ser utilizadas de forma a transmitir as cargas atuantes às peças estruturais e também restringir seus movimentos. São empregados nas ligações estruturais dois tipos de conexões, as desmontáveis e as permanentes. As conexões desmontáveis são utilizadas parafusos e pinos já as conexões permanentes é utilizado à solda. As mais utilizadas são as ligações soldadas e parafusadas, pois os pinos são restritos a casos especiais.

O seguinte trabalho tem como foco analisar chapas de ligação em nós metálicos denominadas chapas gusset, com um comparativo entre chapas soldadas e parafusadas, que serão retirados nos ensaios a serem aplicados. Os dados serão coletados através de pesquisas bibliográficas em livros e artigos científicos, a partir dos quais serão buscados assuntos relacionados ao tema desse trabalho.

A pesquisa tem como objetivo trazer conceitos já conhecidos de uma forma mais detalhada para o entendimento. Explicando a real importância de cada análise feita, a grande diferença entre ligações parafusadas e soldadas e trazendo testes realizados que comprovarão a eficácia de cada ligação. O trabalho em si tem também uma grande importância de agregar conhecimento ao autor como no meio acadêmico e no meio profissional.

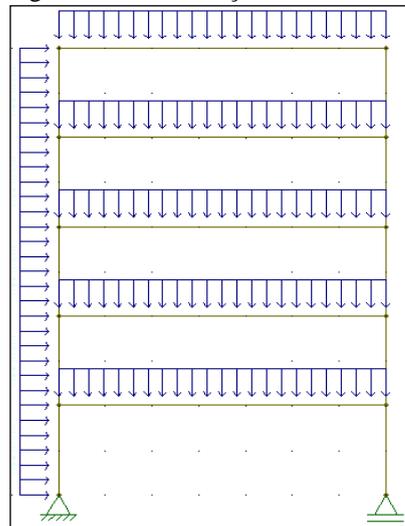
Serão analisadas as cargas máximas recebidas na chapa gusset soldada e parafusada, através dessa análise será verificado o número correto de parafusos necessários para a carga aplicada, a solda também será analisada de acordo com o esforço aplicado, definindo o melhor eletrodo e o comprimento da solda. Todos esses procedimentos serão feitos de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 8800 (2008) e American Welding Society D1.1 (2010). Após essas análises será feita uma comparação de custos de mão de obra, tempo de execução, manutenção e para validação da teoria e dos cálculos, será feito ensaios de cisalhamento com chapas de aço ASTM A36 que comprovarão a real eficiência de cada ligação.

2 ESTRUTURAS DE AÇO

2.1 Conceito de estrutura

Segundo Dias (1997) estrutura é um conjunto de partes que tem o objetivo de resistir cargas. Cada parte da construção denominada elemento estrutural tem o objetivo de resistir os esforços solicitados, transmitindo-os através de vínculos que os unem, com a finalidade de transmiti-los para o solo.

Figura 1: Demonstração de estrutura



Fonte: O autor.

2.2 Histórico das estruturas metálicas

O ferro fundido foi o primeiro material siderúrgico utilizado na construção das estruturas de aço, entre os anos de 1780 e 1820 foram construídas pontes em arco ou treliçadas, com os elementos em ferro fundido sofrendo esforços de compressão. Em 1779 na Inglaterra foi construída a primeira ponte de ferro fundido que se tenha notícia, construída em Coalbrookdale a ponte se trata de um arco com vão de 30 metros (DIAS, 1997).

Figura 2: Ponte de Coalbrookdale, sobre o rio Severn na Inglaterra.



Fonte: Ironbrigde Gorge Museums (2018).

O ferro forjado já era utilizado no fim do século XVIII em correntes de barras, sendo utilizados em portantes das pontes suspensas. Em 1819 a 1826 foi construída em Menai, no País de Gales, uma ponte com barras de ferro forjado que ultrapassava um vão de 175 metros (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

No século XIX o Brasil ainda não possuía siderurgia, sendo assim importando vários componentes de ferrovias da Inglaterra. Entre as duas guerras mundiais, com a paralisação das importações, foi pensado na criação de empresas que hoje formam o parque siderúrgico nacional (CHAMBERLAIN; FICANHA e FABEANE, 2013).

Em 1957 foi inaugurada a ponte sobre o rio Paraíba do Sul, no Rio de Janeiro, que é vencido um vão de 30 metros, utilizando arcos atirantados de ferro fundido com tirante feito em ferro forjado. No século XIX o uso do ferro fundido sofreu um declínio em relação ao ferro forjado, que garantia mais resistência e segurança na época. Durante os anos de 1850 a 1880 foram construídas pontes ferroviárias em treliças de ferro forjado, porém com o grande número de acidentes foi necessário um estudo mais aprofundado sobre materiais de melhores características (DIAS, 1997).

Apesar de o aço ser conhecido desde a antiguidade, na época ele não foi tão utilizado como o ferro fundido e o forjado por isso não estava sempre disponível a preços competitivos, porém, em 1856 Henry Bessemer inventou um forno que permitia a produção de aço em grande escala. Já em 1864 foi construído um forno com uma maior capacidade de produção

de aço pelos irmãos Martin. Rapidamente o aço ultrapassou o ferro fundido e o forjado na indústria da construção. (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

As principais aplicações de aço hoje são em pontes, ferrovias, edifícios industriais, comerciais e residenciais, galpões, hangares, coberturas com grande vão, torres de transmissão, antenas, plataformas off-Shore, construção naval, tanques e tubulações etc. (CHAMBERLAIN; FICANHA e FABEANE, 2013).

3 PERFIS

Os perfis estruturais consistem naqueles perfis ou vigas de aço que possuem aplicações na indústria e na construção civil e, também, como parte das estruturas metálicas. Com diversas usabilidades, eles podem ser usados como cantoneiras, revestimentos, entre outros usos (CHAMBERLAIN; FICANHA e FABEANE, 2013).

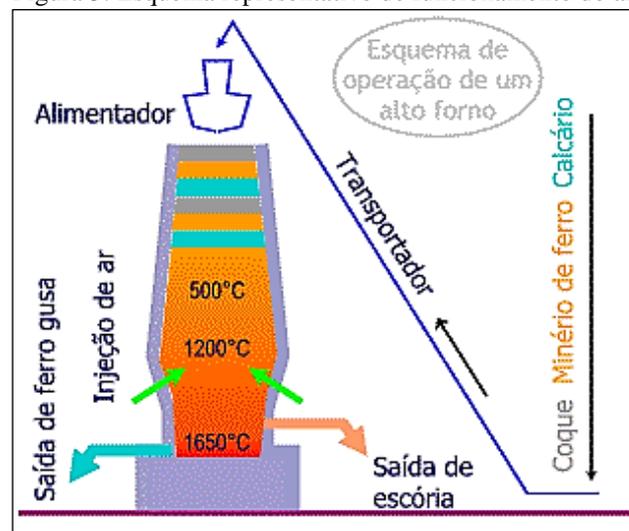
3.1 Processos de fabricação

O processo de fabricação do aço consiste na produção de ferro fundido no alto forno e logo depois refinado em aço no conversor de oxigênio. Existe outro processo que consiste na fundição de sucata em um forno elétrico, esse método consome mais energia que o processo anterior. (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

Segundo Dias (1997), “O aço pode ser definido como uma liga metálica composta principalmente de ferro e pequenas quantidades de carbono, que vai de 0.002% até 2,00%, com propriedades específicas”. Para a produção do aço é preciso seguir certos processos, que estarão em destaque abaixo:

a) Alto forno: Pela parte superior do forno é carregado minério, calcário e coque e pela parte inferior é injetado oxigênio, com isso o coque é queimado, produzindo calor e reduzindo o óxido de ferro a ferro liquefeito, com excesso de carbono. Na parte inferior do forno é drenada a escoria e o ferro fundido. (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009);

Figura 3: Esquema representativo de funcionamento do alto forno



Fonte: Metalurgia (2010).

b) Conversor de oxigênio: O aço é produzido através do refinamento do ferro fundido, que consiste em remover o excesso de carbono e as impurezas a limites pré-definidos. O conversor baseia-se na injeção de oxigênio direto no ferro fundido, desse modo o ar queima o carbono na forma de monóxido de carbono e dióxido de carbono (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

Logo após o ferro fundido ser transformado em aço, ele vai para a panela onde é tratado que consiste no processo de refino e homogeneização que confere ao aço características químicas adequadas. Com o processo a composição o aço chega ao seu final, reduzindo impurezas e acalmando o aço, que consiste em diminuir o conteúdo de oxigênio livre por meio de desoxidantes (DIAS, 1997).

O lingotamento é o próximo passo para preparação de placas com seção retangular ou tarugos, que consiste no descarregamento do aço que vem direto da panela nas lingoteiras, que são formas metálicas especiais, que permitem a confecção de blocos chamados lingotes. (DIAS, 1997).

Figura 4: Representação de lingotamento contínuo.



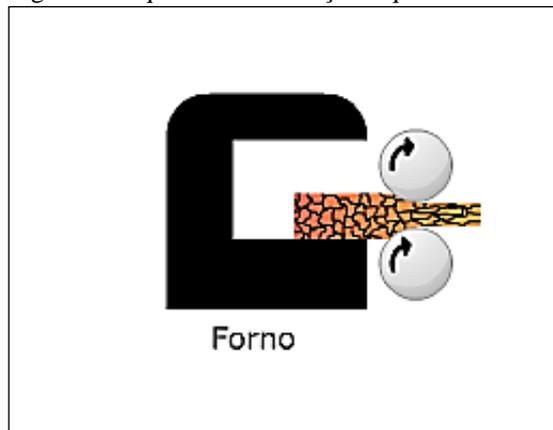
Fonte: Mecânica Industrial (2018).

A fase seguinte do processo é a laminação que pode ser realizada a quente ou a frio, que consiste na redução da área da seção transversal das placas ou tarugos que

consequentemente são alongados. Segundo Pfeil M. e Pfeil W. (2009), “A laminação é o processo pelo qual o aço é transformado nos principais produtos siderúrgicos”.

A laminação a quente do aço compreende em um pré-aquecimento do aço em uma temperatura entre 1000°C a 1200°C, onde o material fica mais fácil de ser trabalhado. O material passa sob pressão entre laminadores, o material é comprimido, dessa forma a seção transversal do aço é deformada, reduzindo a espessura e aumentando o seu comprimento (DIAS, 1997).

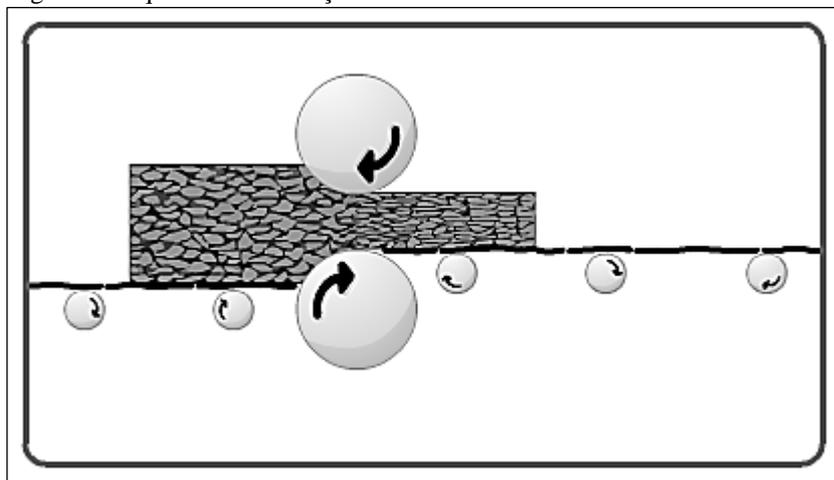
Figura 5: Esquema de laminação a quente.



Fonte: Adaptado Mecânica Industrial (2018).

A diferença da laminação a frio pra quente é que o material não é aquecido ao passar pelos cilindros, ou seja, a deformação do aço ocorre com o material à temperatura ambiente (DIAS, 1997).

Figura 6: Esquema de laminação a frio.



Fonte: Adaptado Mecânica Industrial (2018).

Dias (1997), aborda que alguns aços necessitam ou não de tratamento térmico, isso vai variar de acordo com sua finalidade, ou seja, quando é preciso alterar algumas propriedades dos aços, os tratamentos se dividem em dois grupos:

- a) Tratamentos térmicos para alívio de tensões internas provocadas pela laminação. (Normalização, recozimento);
- b) Tratamentos térmicos destinados a modificar a micro estrutura do material, com a alteração da resistência e de outras propriedades. (Têmpera e revenimento).

Também é possível obter perfis soldados de chapas planas, permitindo grande variedade de formas e dimensões de seções, desde que respeitem as relações largura/espessura de acordo com as normas (DIAS. 1997).

3.2 Tipos de aços estruturais

Existe uma classificação para os aços estruturais segundo a composição química e que se dividem em dois grupos: aços-carbono e aços de baixa liga. Esses dois tipos podem receber tratamento térmico que altera suas propriedades mecânicas (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

3.2.1 Aços-carbono

Os aços-carbono são os tipos mais usados em estruturas, e dentro dessa classificação existem três categorias:

Quadro 1: Classificação dos aços-carbono

Baixo carbono	$C < 0,29\%$
Médio carbono	$C < 0,59\%$
Alto carbono	$C < 2,00\%$

Fonte: Adaptado Pfeil, M; Pfeil, W. (2009).

De acordo com o teor de carbono a resistência do aço aumenta, porém sua ductilidade, ou seja, sua capacidade de se deformar diminui que podem trazer problemas na soldagem. Em estruturas de aço são utilizados os aços de baixo teor de carbono para facilitar a soldagem sem preocupações especiais (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

Segundo padrões da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), os aços-carbono mais utilizados são apresentados na tabela 1. O aço ASTM A36 é o mais utilizado até o momento, devido ser um aço com baixo teor de carbono, que propicia uma boa soldagem e tem uma boa ductilidade. Os aços ASTM A307 e A325 são utilizados em parafusos comuns e de alta resistência, respectivamente.

Tabela 1: Propriedades Mecânicas de Aços-carbono

Especificações	Teor de carbono %	Limite de escoamento f_y (Mpa)	Resistência a ruptura f_u (Mpa)
ABNT MR250	Baixo	250	400
ASTM A7	-	240	370-500
ASTM A36	0,25-0,29	250	400-500
ASTM A307 (parafuso)	Baixo	-	415
ASTM A325 (parafuso)	Médio	635 (min)	825 (min)
EM S235	Baixo	235	360

Fonte: Adaptado Pfeil, M; Pfeil, W. (2009).

3.2.2 Aços de Baixa Liga

De acordo com Pfeil M. e Pfeil W. (2009), os aços de baixa liga são aços-carbono acrescidos de elementos de liga (cromo colúmbio, cobre, manganês, molibdênio, níquel, fósforo, vanádio, zircônio), os quais melhoram algumas propriedades mecânicas. Alguns elementos de liga produzem aumento da resistência do aço através da modificação da microestrutura. Com isso pode se ter um aumento da resistência pelo fato de aumentar o teor de carbono de ordem 0,20%, que é possível utilizar a solda sem maiores problemas.

3.2.3 Aços tratados termicamente

Os tratamentos térmicos são realizados para aumentar a resistência do aço e podem ser aplicado nos aços-carbono como nos aços de baixa liga. A solda dos aços tratados é mais difícil, com isso o seu uso é menos aproveitado em estruturas. Os parafusos de alta resistência

que são utilizados como conectores também passam por tratamentos térmicos (especificação ASTM A325) (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), os aços aprovados para uso de perfis, chapas e barras são aqueles que possuem resistência de escoamento máxima a 450 MPa e relação entre as resistências à ruptura (f_u) e escoamento (f_y) superior a 1.18, assegurados pela Norma Brasileira ou especificações de normas estrangeiras.

3.3 Produtos estruturais

Nas usinas siderúrgicas é produzido aço para utilização industrial, sob diversas formas: barras, chapas, fios trefilados, cordoalhas, cabos e perfis laminados. Os fios trefilados são obtidos puxando uma barra de aço repetidamente através de fieiras com diâmetros diferentes, esse processo é efetuado a frio com o uso de lubrificantes para evitar um superaquecimento nos fios e nas fieiras (DIAS, 1997).

Chapas, barras e perfis laminados são fabricados em laminadores em sucessivos passes para dar ao aço a forma necessária. Perfis estruturais podem também ser fabricados por dobramento de chapas (perfis de chapa dobrada) e por associação de chapas através da solda (perfis soldados) (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

3.3.1 Perfis laminados

Em geral os produtos laminados se classificam em barras, chapas e perfis.

a) Barras: São produtos laminados nos quais duas dimensões são pequenas em relação à terceira, ou seja, a seção transversal é menor em relação ao comprimento. As barras podem ser laminadas em diversas seções como: circular, quadrada ou retangular alongada (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009);

Figura 7: Tipos de barras.



Fonte: FERRAÇO Indústria e comércio Ltda. (2018).

b) Chapas: Produzidos também pela laminação, as chapas possui uma dimensão menor (espessura) que as outras duas (largura e comprimento). Elas podem ser divididas em chapas finas e chapas grossas, na tabela abaixo é mostrado o esquema de fabricação e espessuras dessas chapas (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009);

Tabela 2: Chapas grossas e chapas finas.

Chapas	Fabricação	Espessura	Utilização
Grossas	A quente	>5,0 mm	Estruturas de aço em geral
Finas	A quente	1,2-5,0 mm	Perfis e chapas dobradas
	A frio	0,3-2,65 mm	Acessórios de construção calhas, rufos, etc.

Fonte: Adaptado Pfeil, M; Pfeil, W. (2009).

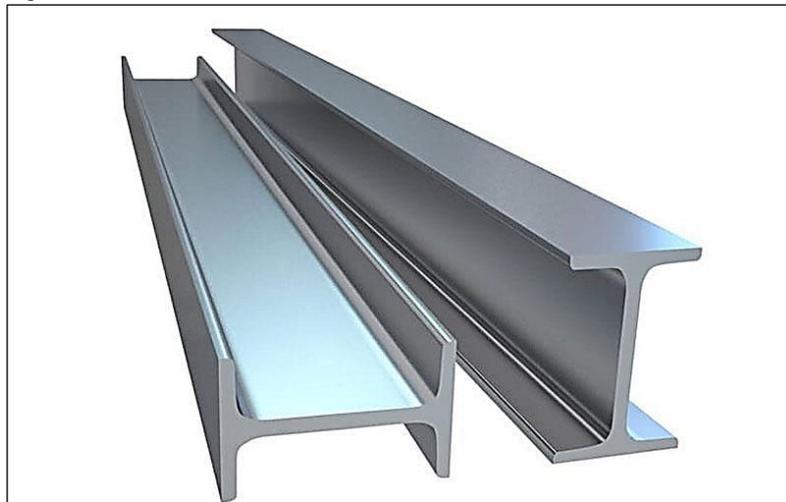
Figura 8: Chapas de aço estrutural.



Fonte: Soluções Industriais (2018).

c) Perfis Laminados: Os laminadores produzem perfis de grande eficiência estrutural, em forma de H, I, C e L. Um perfil laminado pode ser designado pelas dimensões externas (altura, ou altura x largura), seguida da massa do perfil em kg/m. Um exemplo é o perfil W250 x 17,9, onde a altura é de 250 mm e massa 17,9 kg (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

Figura 9: Perfil I laminado.



Fonte: New Aço (2018).

3.3.2 Perfis soldados

São formados pela união de chapas ou de perfis laminados simples, sendo ligados em geral pela solda. A Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 8800 (2008) padronizou três tipos de perfis soldados, são eles:

- a) Perfis CS: utilizados em colunas soldadas;
- b) Perfis VS: utilizados em vigas soldadas;
- c) Perfis CVS: usados e colunas e vigas soldadas.

Figura 10: Perfil I soldado.

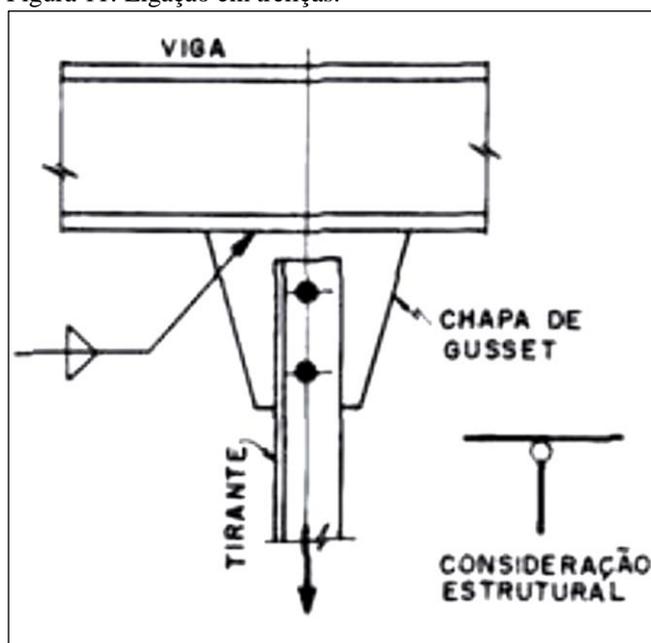


Fonte: Cedisa (2018).

4 TIPOS DE LIGAÇÕES EMPREGADAS NAS ESTRUTURAS DE AÇO

Denomina-se ligação metálica a união de duas ou mais peças formando uma estrutura em si. Geralmente o tipo de ligação empregado no projeto leva em conta o tipo de montagem que será aplicado, pois a dificuldade de ajustes pode gerar atrasos e provocar acidentes. As principais maneiras de ligação e mais seguras, é o uso de solda e parafusos e, segundo o item 6.1.9.1 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), parafusos não podem ser considerados trabalhando em conjunto com soldas, exceto em ligações onde ocorre cisalhamento, nas quais, os parafusos instalados em furos-padrão ou furos pouco alongados com a maior dimensão transversal à direção da força podem ser considerados trabalhando conjuntamente a filetes longitudinais de solda, desde que considerada menos de 50% da força. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

Figura 11: Ligação em treliças.



Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL (2017).

4.1 Comportamento das ligações

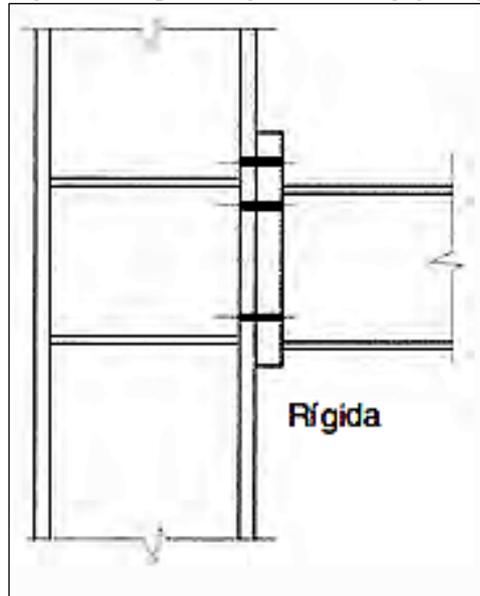
Ao dimensionar uma ligação de aço, vários fatores precisam ser considerados. O comportamento destas ligações é complexo, pois, as ligações não apresentam um comportamento linear ou multilinear. Segundo o Instituto Aço Brasil (2017) apresenta o comportamento de dois tipos de ligações viga-pilar, onde se pode observar como estas se comportam com o carregamento.

4.2 Classificação das ligações

Segundo Pfeil M. e Pfeil W. (2009) “As ligações podem ser classificadas em três tipos: Ligação rígida, ligação flexível e ligação semirrígida”.

a) Ligação rígida: Possui uma rigidez suficiente para manter constante o ângulo entre as peças para qualquer nível de carga, até atingir o momento resistente da ligação.

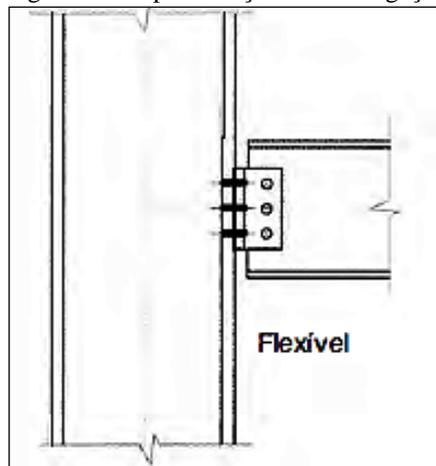
Figura 12: Representação de uma ligação rígida em um perfil qualquer.



Fonte: Pfeil, M; Pfeil, W. (2009).

b) Ligação flexível: Permite a rotação relativa entre as peças com um comportamento próximo ao de uma rótula, e transmitindo um pequeno momento fletor.

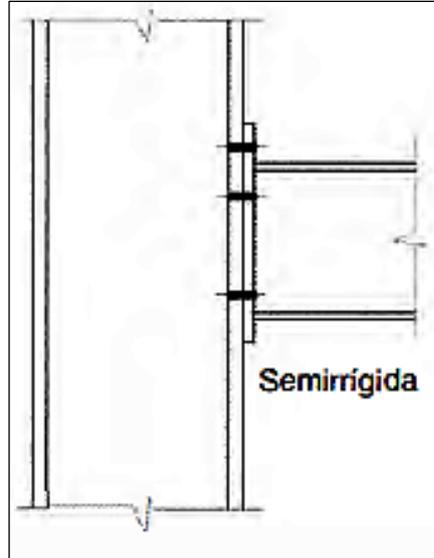
Figura 13: Representação de uma ligação flexível em um perfil qualquer.



Fonte: Pfeil, M; Pfeil, W. (2009).

c) Ligação semirrígida: Possui comportamento intermediário entre os casos (a) e (b).

Figura 14: Representação de uma ligação semirrígida em um perfil qualquer.

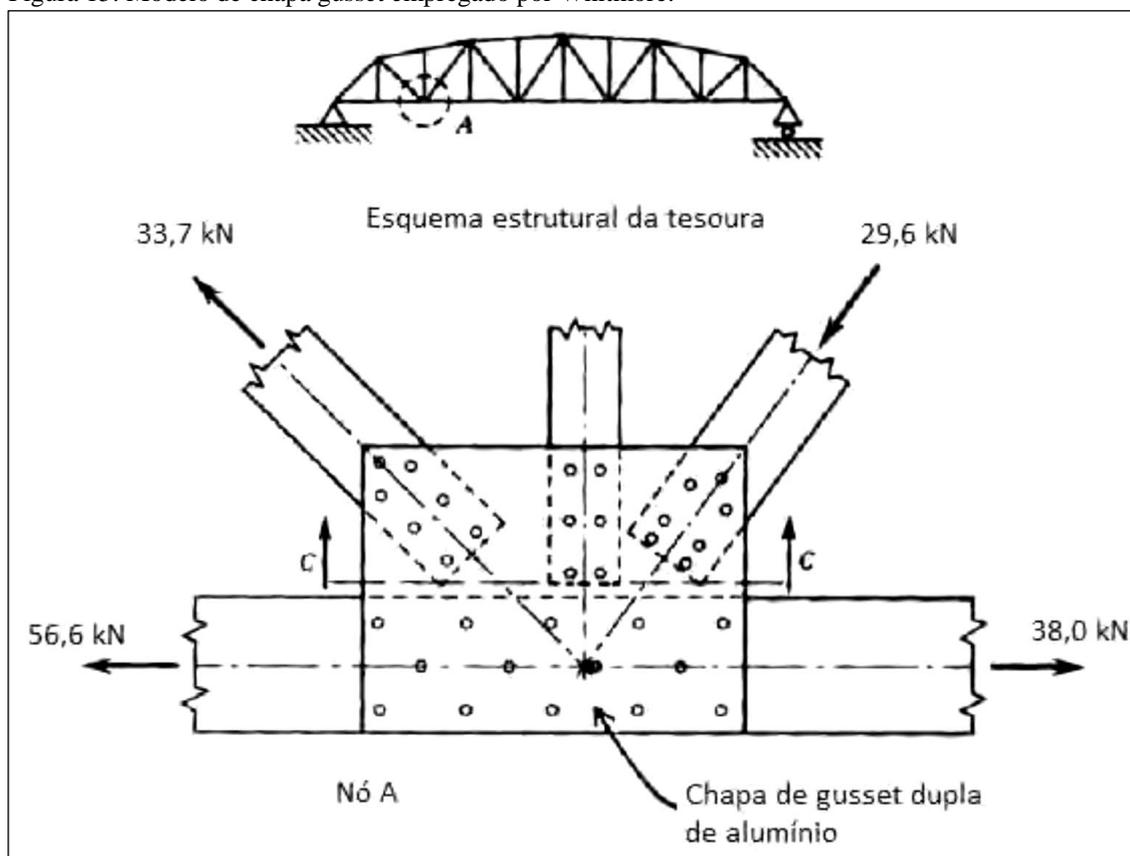


Fonte: Pfeil, M; Pfeil, W. (2009).

5 CHAPAS GUSSET

O seguinte trabalho tem como foco uma análise comparativa entre ligações parafusadas e soldadas em chapas gusset. Quando duas ou mais barras precisam ser unidas e o eixo de cada uma não é colinear com os demais, normalmente não é possível parafusar ou soldar um elemento diretamente ao outro. Nesses casos, chapas de ligação, denominadas de “*gusset*” são empregadas para transferências de esforços entre estes elementos. (VERGÍLIO, 2011).

Figura 15: Modelo de chapa gusset empregado por Whitmore.



Fonte: Kulak, Fisher e Struik (2001).

As chapas *gusset* estão presentes tanto nas ligações parafusadas quanto nas soldadas e seu estudo é feito de forma semelhante em ambos os casos. Embora seja usual considerar que em uma treliça a união das barras cujos eixos se encontram num ponto que transmita apenas forças nominais, a transferência destas forças provocarão esforços normais, de flexão e de cisalhamento em uma seção arbitrária na chapa gusset (VERGÍLIO, 2011).

Flexões fora do plano em chapas de gusset geralmente são insignificantes segundo Kulak, Fisher e Struik (2001). Em muitos casos as forças aplicadas simetricamente em relação

ao plano da chapa ou sua geometria, evita ou minimiza tensões secundárias de flexão fora do plano. Através desses fatores, a análise destas chapas geralmente é tratada como problema de estado bidimensional de tensões e efeitos secundários.

O procedimento comumente empregado para determinar as tensões em chapas de gusset é identificar os esforços transmitidos pelos componentes da ligação e, em seções críticas, calcular as forças nominais cortantes e momentos fletores. Logo após, as tensões são calculadas empregando as fórmulas elementares para vigas. (VERGÍLIO 2011).

Um dos estudos pioneiros foi o de Whitmore (1952). Para examinar a validade do uso de fórmulas de vigas para esse problema, Whitmore investigou a distribuição de tensões em uma chapa de alumínio. Constatou-se que a posição dos valores máximos de tensões de tração e compressão situou próximo das diagonais tracionadas e comprimidas, respectivamente. A suposição de que as tensões na chapa gusset se distribuem de acordo com a hipótese de viga, mostrou-se imprecisa. (WHITMORE 1954).

Whitmore concluiu que a tensão máxima que ocorre na chapa gusset na região próxima à extremidade da diagonal pode ser estimada adequadamente, assumindo que a força atuante na mesma é distribuída uniformemente sobre uma área efetiva do material da chapa. Essa área é obtida multiplicando a espessura da chapa por uma largura efetiva, assim, pode ser estimada construindo linhas com inclinação de 30° em relação ao eixo do componente a partir da primeira linha de parafusos interceptando com uma linha perpendicular como citado eixo, passando pela última linha de parafusos, como nos mostra a imagem abaixo (WHITMORE 1954).

Figura 16: Dispersão das tensões normais para obtenção da seção efetiva.



Fonte: Kulak, Fisher e Struik (2001).

Posteriormente Vasarhelyi (1971) realizou estudos através do método de elementos finitos, foram analisados tanto o comportamento em regime elástico como no inelástico. As análises elásticas confirmaram as conclusões de Whitmore. Significativas diferenças entre as tensões obtidas pela análise através do método dos elementos finitos e a teoria da viga, foram encontrados. Porém, as diferenças não são necessariamente contra a segurança, nenhum valor de tensão avaliado pelo citado método excedeu os valores máximos previstos pela teoria da viga, a localização e distribuição dos valores máximos é que mostraram diferenças substanciais.

Através de suas investigações, Vasarhelyi (1971) concluiu que “as tensões máximas em uma chapa gusset encontradas por vários métodos simplificados são apenas ligeiramente diferentes; os maiores desvios estão na localização destes pontos máximos”. Dessa maneira, a verificação das tensões em seções críticas da chapa deve ser mantida.

Segundo Kulak, Fisher e Struik (2001) concluíram que, devido à complexidade de situações possíveis em ligações com chapas gusset e a variedade de componentes fixadores e geometria da chapa, muitas pesquisas ainda se fazem necessárias. Dessa maneira, algumas considerações precisam ser verificadas como:

- a) Ruptura pelo método da seção efetiva;
- b) Rasgamento da parte conectada;
- c) Possibilidade de esmagamento da região dos furos;
- d) Rasgamento entre furos e furo-borda;
- e) Tensões devido a esforços normais e de flexão e tensões de cisalhamento em seções críticas da chapa;
- f) Estabilidade da chapa sob ação de forma normal de compressão.

A Associação Brasileira de Norma Técnicas (2008), não trata em específico o dimensionamento deste tipo de ligação estrutural, porém no item 6.5 é dito: “Elementos de ligação”; trata de maneira geral do dimensionamento de elementos de ligação.

5.1 Ligações Excêntricas

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), os eixos que passam pelos centros geométricos das seções transversais de barras axialmente solicitadas que formam um nó devem, de preferência, se interceptar em um ponto comum. Caso contrário, deve ser levada em conta a excentricidade na ligação.

5.2 Elementos Tracionados

A força de tração resistente de cálculo de elementos de ligação tracionados deve ser menor que o valor obtido conforme segue abaixo:

a) Para o estado-limite último de escoamento:(item 6.5.3 NBR 8800 de 2008)

$$F_{RD} = \frac{f_y A_g}{\gamma_{a1}} \quad (1)$$

Onde:

f_y : A resistência de escoamento do aço;

A_g : Área bruta da seção transversal;

γ : Coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,35 para combinações normais, especiais ou de construção e 1,15 para combinações excepcionais.

b) Para o estado-limite último de ruptura: Item 6.5.3 NBR 8800 de 2008

$$F_{RD} = \frac{f_u A_e}{\gamma_{a2}} \quad (2)$$

Onde:

f_u = Resistência à ruptura do aço a tração;

A_e = Área líquida da seção transversal;

γ_{a2} = Coeficiente de ponderação.

Onde A_e é a área líquida efetiva definida no item 5.2.3 da norma NBR 8800, sendo que para chapas de emendas parafusadas:

$$A_e = A_n \leq 0,85A_g \quad (3)$$

Onde:

A_e = Área efetiva líquida;

A_n = Área líquida;

A_g = Área bruta.

5.3 Elementos submetidos a cisalhamento

A força cortante resistente de cálculo de elementos de ligação que são submetidos ao cisalhamento deve ser o menor valor obtido conforme segue as formulas retirada da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

a) Para o estado-limite último de escoamento. (Item 6.5.5 NBR 8800 de 2008)

$$F_{RD} = \frac{0,6f_y A_g}{\gamma_{a1}} \quad (4)$$

Onde:

f_y = A resistência de escoamento do aço;

A_g = Área bruta da seção transversal;

γ_{a1} = Coeficiente de ponderação.

b) Para o estado-limite último de ruptura

$$F_{RD} = \frac{0,6f_u A_n}{\gamma_{a2}} \quad (5)$$

Onde:

f_u = A resistência de ruptura do aço;

A_n = Área bruta da seção transversal;

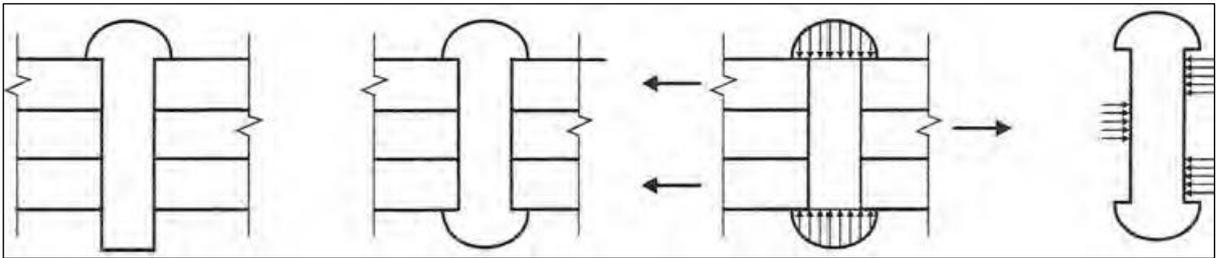
γ_{a2} = Coeficiente de ponderação;

A_n = Área líquida sujeita a cisalhamento.

6 LIGAÇÕES PARAFUSADAS

A princípio uma conexão parafusada pode ser denominada como uma conexão desmontável. Os parafusos são bastante utilizados em ligações de aço estrutural, porém antes do seu uso, eram utilizados os rebites, que foram substituídos a partir de 1950. Os rebites eram instalados a quente e pelo resfriamento do rebite as chapas se apertam entre si e esse esforço de aperto é muito variável, não garantindo uma boa segurança da ligação (ALMEIDA 2014).

Figura 17: Representação de um rebite sendo aplicado como meio de ligação.

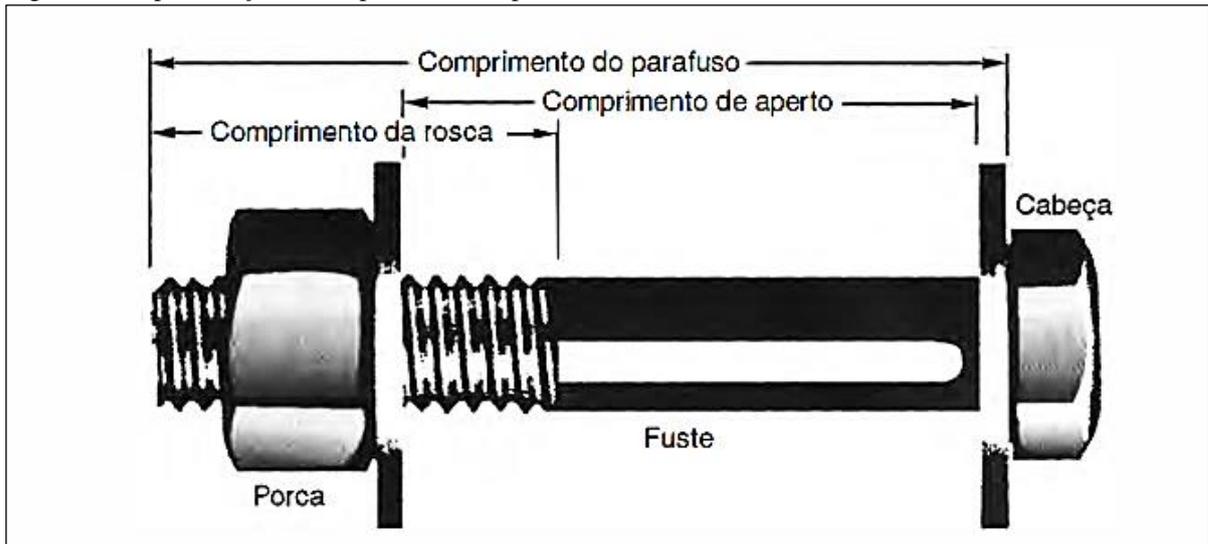


Fonte: Pfeil, M; Pfeil, W. (2009).

6.1 Parafusos comuns

Como foi representado na tabela 1 desse trabalho, os parafusos comuns são forjados com aço-carbono e possuem um baixo teor de carbono, seguindo a especificação ASTM A307. Eles são instalados com aperto, que mobilizam atrito entre os elementos a serem ligados, segundo Pfeil (2009) “o aperto nas chapas é muito variável, não se podendo garantir um valor mínimo a se considerar nos cálculos”.

Figura 18: Representação de um parafuso com porca sextavada e arruelas.



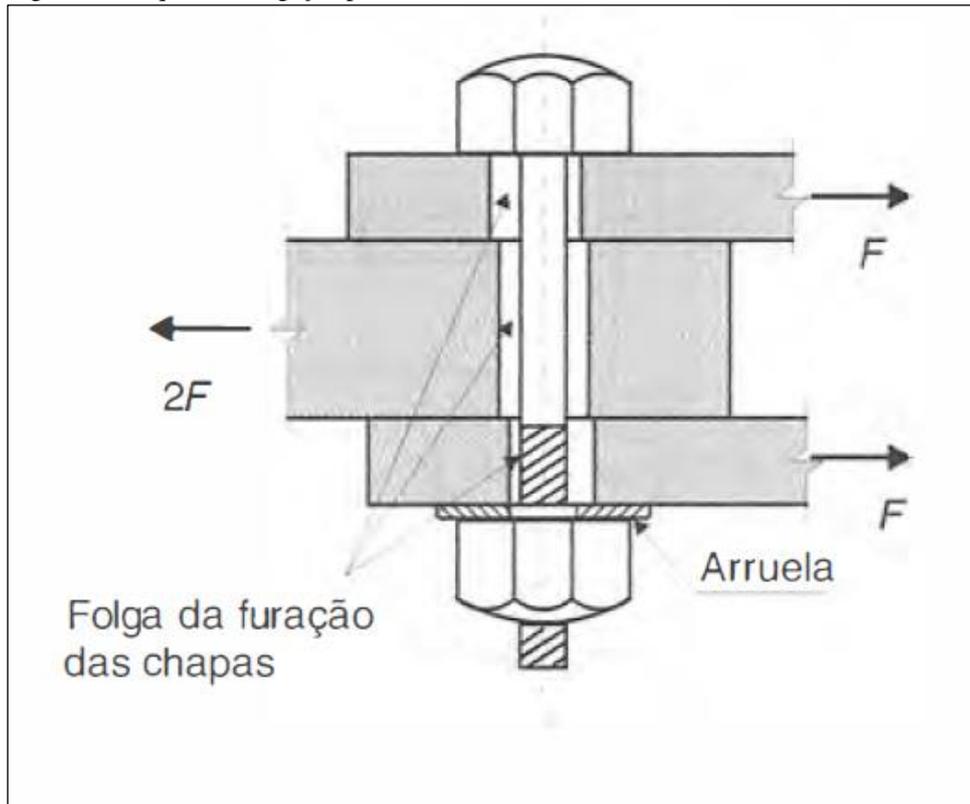
Fonte: Pfeil, M; Pfeil, W. (2009).

6.2 Parafusos de alta resistência

A alta resistência desses tipos de parafusos se dá pelo tratamento térmico que o mesmo é submetido. O mais utilizado é o ASTM A325 de aço carbono temperado, que podem ser instalados com esforços de tração mínimos garantidos, nos quais são levados em conta dos cálculos. Em alguns casos onde se deseja impedir o movimento entre as chapas de ligação, o dimensionamento dos parafusos é feito com um coeficiente de segurança contra o deslizamento, assim, obtendo-se uma ligação por atrito. Embora em algumas ligações, pequenos deslizamentos podem ser tolerados, sendo assim os parafusos de alta resistência A325 podem ser usados em uma ligação do tipo apoio (ver item 6.3.1 NBR 8800 de 2008), assim os parafusos são instalados com aperto normal, sem controle da proteção inicial. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

Na figura 23 é representado o funcionamento de uma ligação de tipo atrito, observa-se que a força F é transmitida entre as chapas por atrito, com o parafuso sujeito a tração de instalação.

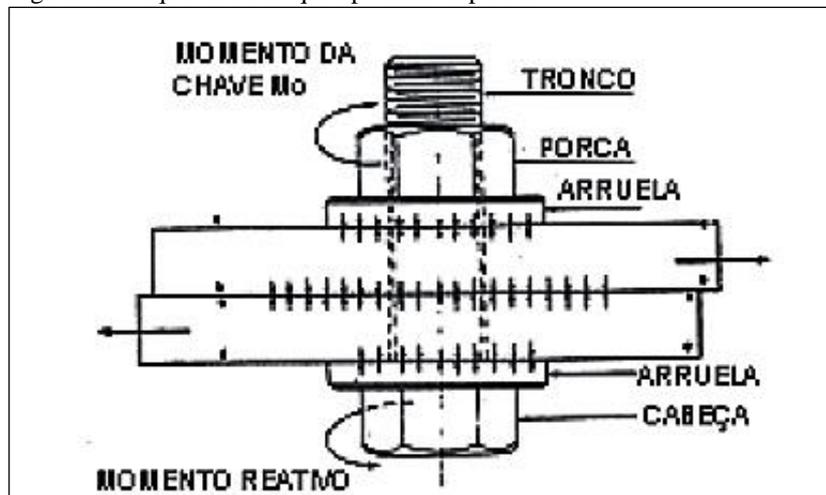
Figura 19: Esquema de ligação por atrito.



Fonte: Pfeil, M; Pfeil, W. (2009).

A utilização deste tipo de parafuso evita o deslizamento entre as partes conectadas, já que as superfícies estão em contatos e as chapas ficam firmemente pressionadas umas contra as outras. Assim, quanto maior o torque aplicado no parafuso, maior será a pressão entre os elementos conectados, maior força de atrito mobilizadas e consequentemente, maior resistência ao deslizamento (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

Figura 20: Esquema do torque aplicado na porca.



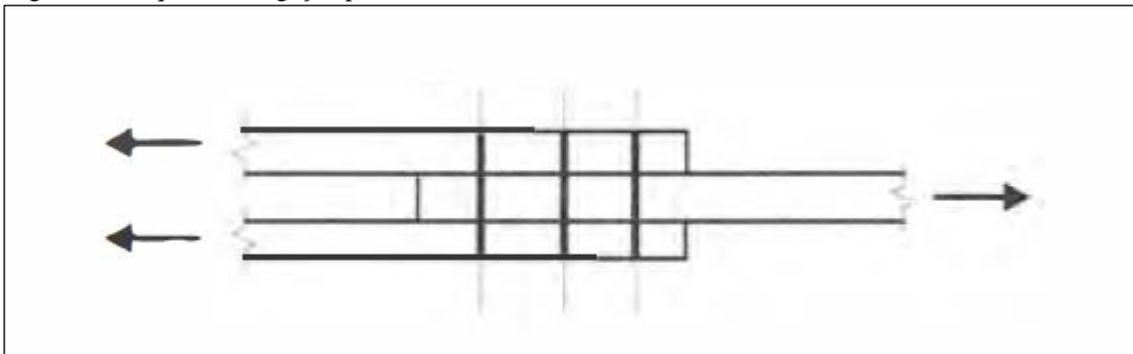
Fonte: Instituto aço Brasil (2017).

Os esforços de cisalhamento nas ligações parafusadas são transmitidos ou por atrito, ou por contato do corpo do parafuso com as paredes do furo, com cisalhamento do corpo do parafuso, conhecidas como ligações por contato. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), as duas formas de transmissão de esforços não podem ser superpostas, sendo a resistência última do parafuso independente do atrito entre as partes. É necessário levar com conta no projeto, se o deslizamento é um estado-limite de serviço ou um estado-limite último.

6.3 Classificação das ligações de acordo com o esforço solicitante nos conectores

Além da classificação de acordo com a rigidez mostrada no item 4.2, uma ligação também pode ser identificada pelo tipo de solicitação que impõe aos conectores. Ligações onde os elementos são tracionados e que funciona por apoio das chapas no fuste do conector, o mesmo está sujeito a pressões de contato que se formam em um carregamento auto equilibrado, gerando esforços de flexão (esforço cortante e momento fletor) no conector. Em geral, os conectores possuem um comprimento pequeno, assim, o esforço cortante é determinado na resistência, denominando-se a ligação como ligação por corte (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

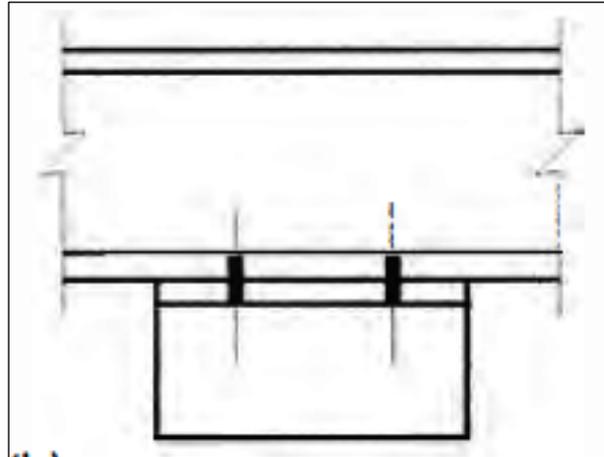
Figura 21: Esquema de ligação por corte nos conectores.



Fonte: Pfeil, M; Pfeil, W. (2009).

Como mostra a figura 22, os conectores estão sujeitos à tração axial.

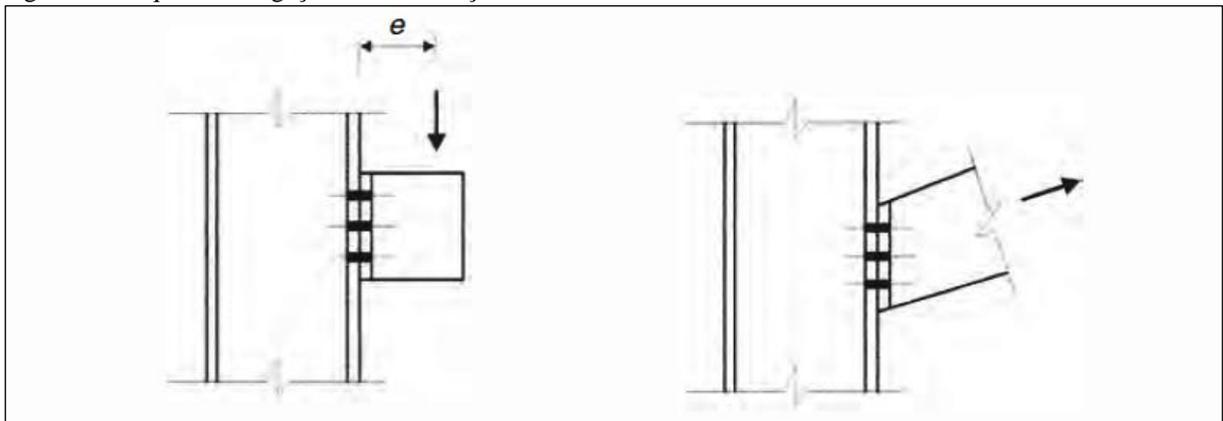
Figura 22: Esquema de ligação por tração nos conectores.



Fonte: Pfeil, M; Pfeil, W. (2009).

Na figura 23, os conectores sofrem esforços de tração e corte.

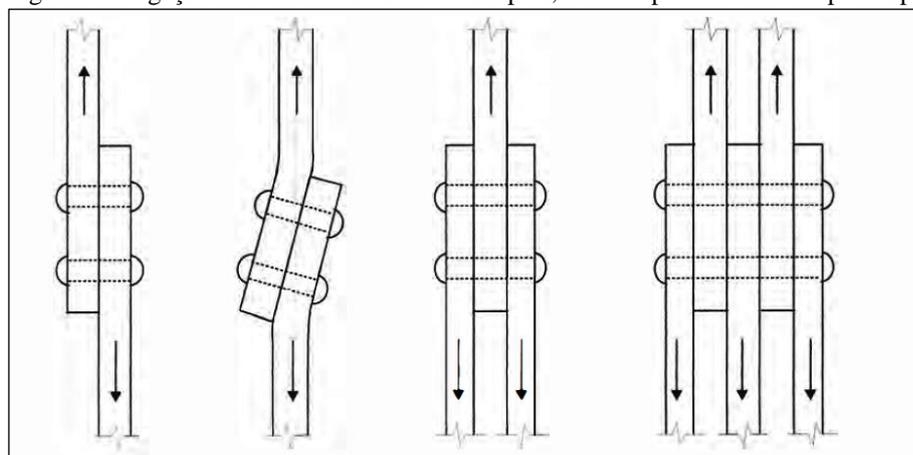
Figura 23: Esquema de ligação à corte e tração dos conectores.



Fonte: Pfeil, M; Pfeil, W. (2009).

. Como as disposições relativas das chapas a serem ligadas, o número de seções do conector podem variar, assim trabalhando em corte, como mostra a figura abaixo observamos esquemas de ligações com conectores trabalhando em corte simples, em corte duplo e em corte múltiplo (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

Figura 24: Ligações com conectores: corte simples, corte duplo e corte múltiplo respectivamente.



Fonte: Pfeil, M; Pfeil, W (2009).

6.4 Furação das chapas

Com furos feitos nas chapas são instalados os conectores, a execução desses furos é onerosa, desse modo tornando necessária a padronização de dimensões e espaçamentos, a fim de permitir furações múltiplas nas fabricas. Para parafusos comuns o furo padrão deve ter uma folga de 1,5 mm em relação ao diâmetro nominal do parafuso, isso é necessário para permitir a montagem das peças. O processo mais usual e econômico de furar uma chapa é o puncionamento no diâmetro definitivo, o que pode ser feito para espessura t da chapa até o diâmetro nominal do conector, mais 3 mm (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

Em casos de chapas mais grossas, os furos devem ser abertos com broca ou punção inicialmente, com diâmetro 3 mm inferior ao definitivo e logo depois, serem alargados com a broca. Quando é feito um furo por punção, parte da chapa é danificada, considera-se para efeito de cálculo da seção líquida da chapa furada, um diâmetro fictício igual ao diâmetro do furo (d'), acrescido de 2mm, ou seja (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

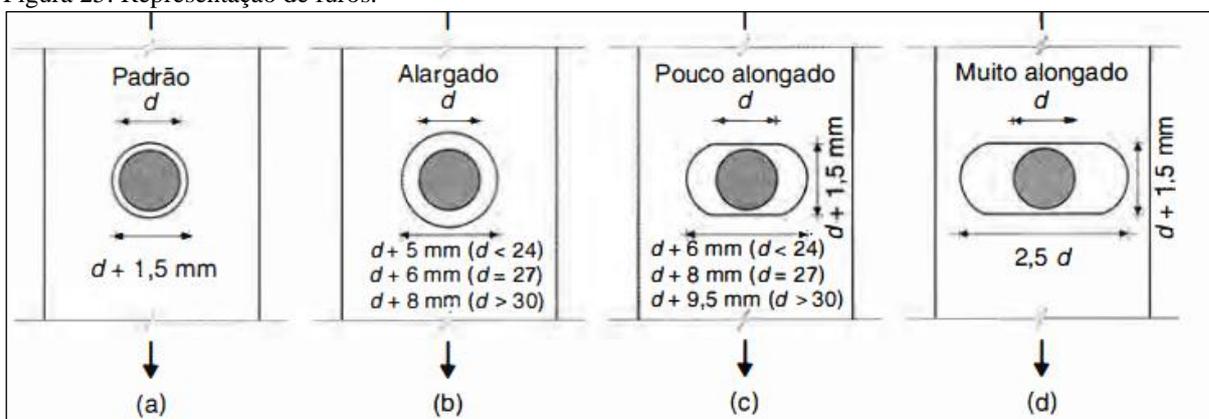
$$\text{Diâmetro fictício} = d' + 2 \text{ mm} = d + 3,5 \text{ mm} \quad (6)$$

Onde:

d = Diâmetro do parafuso.

Segundo Pfeil M. e Pfeil W. (2009), “Além do furo-padrão, as ligações podem ser feitas com furos alargados ou alongados”. Seguindo essa afirmação o emprego dos furos alargados e alongados na direção da força se restringe a ligações tipo atrito, enquanto os furos alongados com a maior dimensão do furo normal a direção da força podem ser usados em ligações do tipo apoio. Os furos alargados e alongados só devem ser usados em situações especiais, para atender as dificuldades de montagem, necessitando de aprovação do responsável pelo projeto.

Figura 25: Representação de furos.



Fonte: Pfeil, M; Pfeil, W. (2009). Legenda: (a) furo-padrão; (b) furo alargado; (c) furo pouco alongado; (d) furo muito alongado.

6.5 Espaçamentos entre conectores

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), estabelece alguns critérios para os espaçamentos dos conectores.

6.5.1 Espaçamento mínimo entre furos

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), a distância entre centros de furos-padrão, alargados ou alongados, não pode ser inferior a $2,7 db$, de preferencia $3 db$, sendo db o diâmetro do parafuso ou barra redonda rosqueada. Além desse requisito, a distancia livre entre as bordas de dois furos consecutivos não pode ser inferior à db .

6.5.2 Espaçamento máximo entre parafusos

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008) o espaçamento máximo entre parafusos que ligam uma chapa a um perfil ou a outra chapa, em contato contínuo, deve ser determinado como:

- a) Em elementos pintados ou não sujeito a corrosão, o espaçamento não pode exercer 24 vezes a espessura da parte ligada menos espessa, nem 300mm;
- b) Em elementos sujeitos a corrosão atmosférica, executados com aços resistentes a corrosão, não pintados, o espaçamento não pode exceder 14 vezes a espessura da parte ligada menos espessa, nem 180 mm.

6.6 Resistência dos aços utilizados nos conectores

Como citado anteriormente neste trabalho, os conectores são de aço carbono de baixo e médio teor de carbono (ver tabela 1). Abaixo a tabela nos mostra as propriedades mecânicas e diâmetros dos aços para conectores.

Tabela 3: Propriedades mecânicas dos aços para conectores.

Tipo do conector	Diâmetro	f_v (Mpa)	f_u (Mpa)
Parafusos comuns ASTM A307	$d \leq 102 \text{ mm (4")}$	-	415
Parafusos de alta resistência ASTM A325	$12,7 \text{ mm (1/2")} \leq d \leq 25,4 \text{ mm (1")}$	635	825
	$25,4 \text{ mm} \leq d \leq 38,1 \text{ mm}$	560	725
Parafusos de alta resistência ASTM A490	$12,7 \text{ mm (1/2")} \leq d \leq 38,1 \text{ mm (1 1/2")}$	895	1035

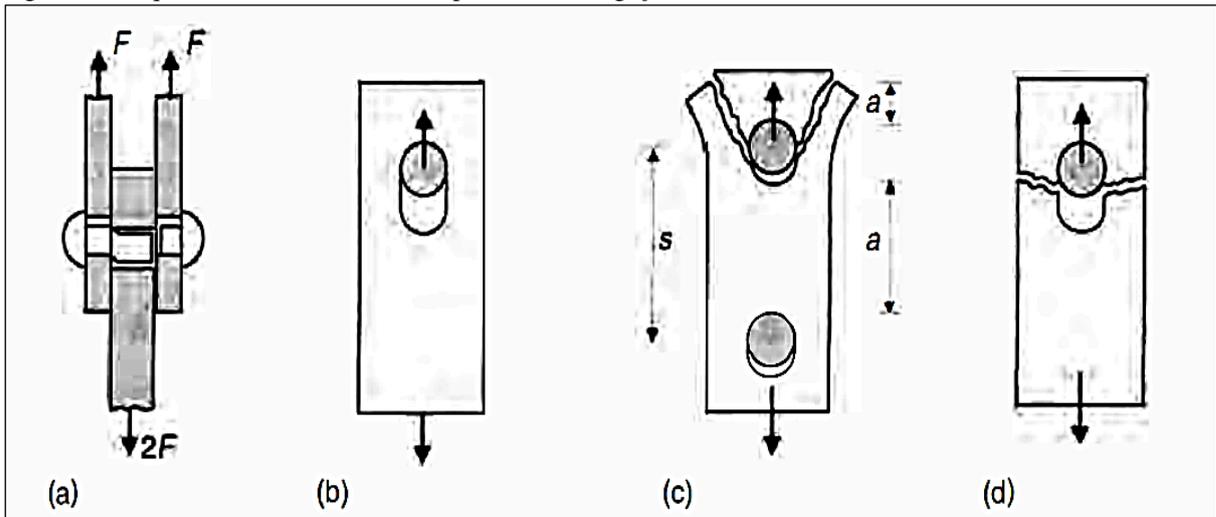
Fonte: Adaptado Pfeil, M; Pfeil, W (2009).

6.6.1 Tipos de rupturas em ligações com conectores

Segundo Pfeil M. e Pfeil W. (2009) “O dimensionamento dos conectores no estado limite ultimo é feito com base nas modalidades de rupturas da ligação:”

- a) Colapso do conector;
- b) Colapso por rasgamento da chapa ou ovalização do furo;
- c) Colapso por tração da chapa.

Figura 26: Esquema de modalidades de ruptura de uma ligação com os conectores.



Fonte: Pfeil, M; Pfeil, W (2009). Legenda: a) ruptura por corte do fuste do conector; (b) ruptura por ovalização do furo por plastificação local da chapa na superfície de apoio do fuste do conector; (c) ruptura por rasgamento da chapa entre o furo e a borda ou entre dois furos consecutivos; (d) ruptura por tração da chapa na seção transversal líquida.

A resistência de projeto de conectores a corte é dada pela formula:

$$\frac{R_{nv}}{\gamma_{a2}} \quad (7)$$

Onde:

R_{nv} = Resistência nominal para um plano a corte.

$\gamma_{a2} = 1,35$ para solicitações originadas de combinações normais de ações

Segundo Pfeil M. e Pfeil W. (2009), “a resistência ao corte é calculada com a tensão de ruptura do aço sob cisalhamento, aproximadamente igual a $0,6f_u$ onde f_u é a tensão de ruptura a tração do aço do conector”.

Para parafusos em geral e barras rosqueadas é admitido à situação mais desfavorável de plano de corte passando pela rosca, considera-se a área da seção efetiva da rosca igual a 0,7 da área da seção do fuste, seguindo essa afirmação temos a seguinte formula:(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

$$R_m = (0,7A_g)(0,6f_u) \cong 0,40A_gf_u \quad (8)$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção transversal;

f_u = Resistência a ruptura do aço.

Para parafusos de alta resistência (A325, A490), quando não se tiver certeza do posicionamento da rosca em relação ao plano de corte, deve-se calcular a resistência pelo caso mais desfavorável de plano de corte passando pela rosca. (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

No caso de parafusos de alta resistência, em ligações por atrito, é necessário verificar adicionalmente a resistência ao deslizamento da ligação. Em caso de conectores longos, há perda de eficiência devido à flexão do conector, por conveniência, o cálculo é feito com tensões reduzidas empiricamente, sem considerar a flexão do fuste do conector. Denomina-se *pega* do conector o comprimento de seu fuste, entre as faces internas das cabeças. Para conectores em ligações por apoio com pega superior a cinco vezes seu diâmetro, adota-se uma redução na resistência de 1% para 1,5mm de excesso de pega (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

6.6.2 Resistência das chapas e elementos de ligação

As chapas de ligação (chapas de emenda e *chapas gusset*), sujeitas a tração, são verificadas pelas equações 1 e 2 deste trabalho. Para elementos de ligação sujeitos a compressão e de pequena esbelteza, determina-se a resistência associada ao estado limite de escoamento (PFEIL, M; PFEIL, W, 2009).

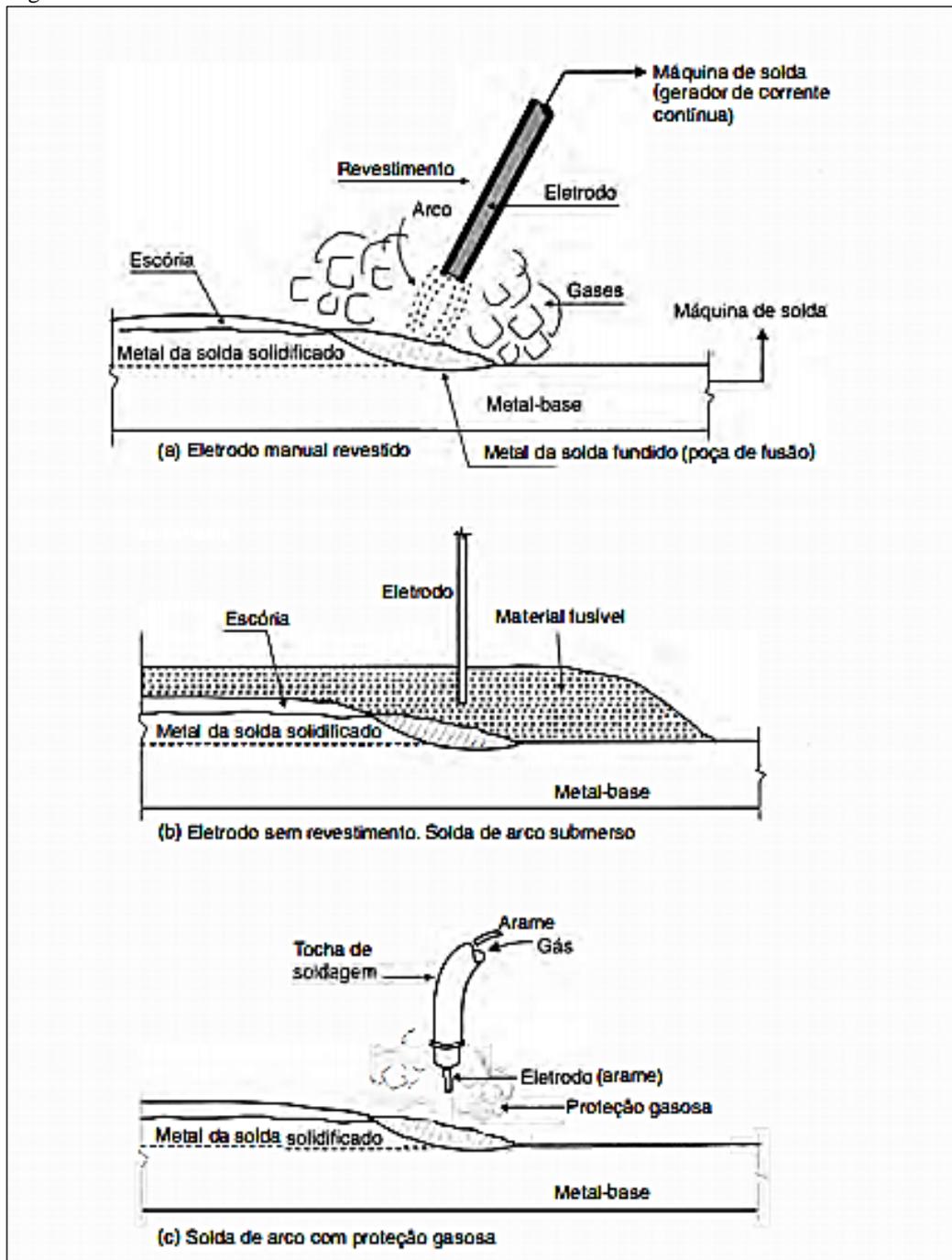
7 LIGAÇÕES SOLDADAS

Segundo a American Welding Society (2010), “A solda é um tipo de união por coalescência do material, obtida por fusão das partes adjacentes”. Para que seja possível a fusão, é necessário utilizar alguns tipos de energia como: elétrica, química, óptica ou mecânica. Sendo que as soldas mais empregadas na indústria de construção são as de energia elétrica, a fusão do aço é provocada pelo calor produzido por um arco voltaico. Nos equipamentos mais usuais o arco voltaico é da entre um eletrodo metálico e o aço de soldar, havendo deposição do material do eletrodo (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2010).

Pfeil M. e Pfeil W. (2009), aborda que o material fundido deve ser isolado da atmosfera para evitar a contaminação na solda, sendo que o isolamento pode ser feito de diversas maneiras, que são indicadas na figura 27.

- a) Eletrodo manual revestido: O revestimento é consumido juntamente com o eletrodo transformando-se parte em gases inertes, parte em escória;
- b) Arco submerso: O eletrodo é um fio metálico sem revestimento, porém o arco voltaico e o metal fundido ficam isolados pelo material granular;
- c) Arco elétrico com proteção gasosa: A famosa MIG/MAG (Metal Inert Gás / Metal Active Gás). O eletrodo é um arame sem revestimento, e a proteção da poça de fusão é feita pelo fluxo de um gás lançado pela tocha de soldagem;
- d) Arco elétrico em fluxo no núcleo. O eletrodo é um tubo fino preenchido com o material que protege a poça de fusão.

Figura 27: Solda elétrica com eletrodo.

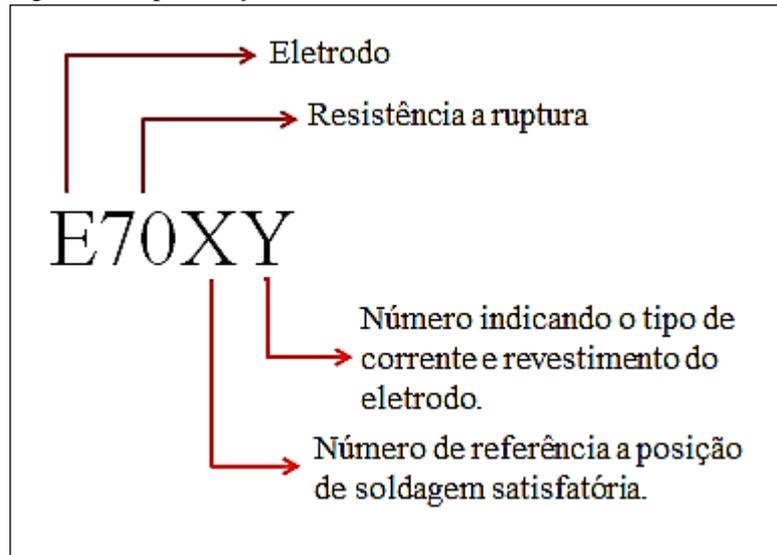


Fonte: Pfeil, M; Pfeil, W. (2009).

7.1 Eletrodos

Nas soldas por arco voltaico são utilizados eletrodos, que são varas de aço carbono ou aço de baixa liga. Os eletrodos com revestimento são designados, segundo a ASTM, da seguinte forma E70XY (CHAMBERLAIN; FICANHA e FABEANE, 2013).

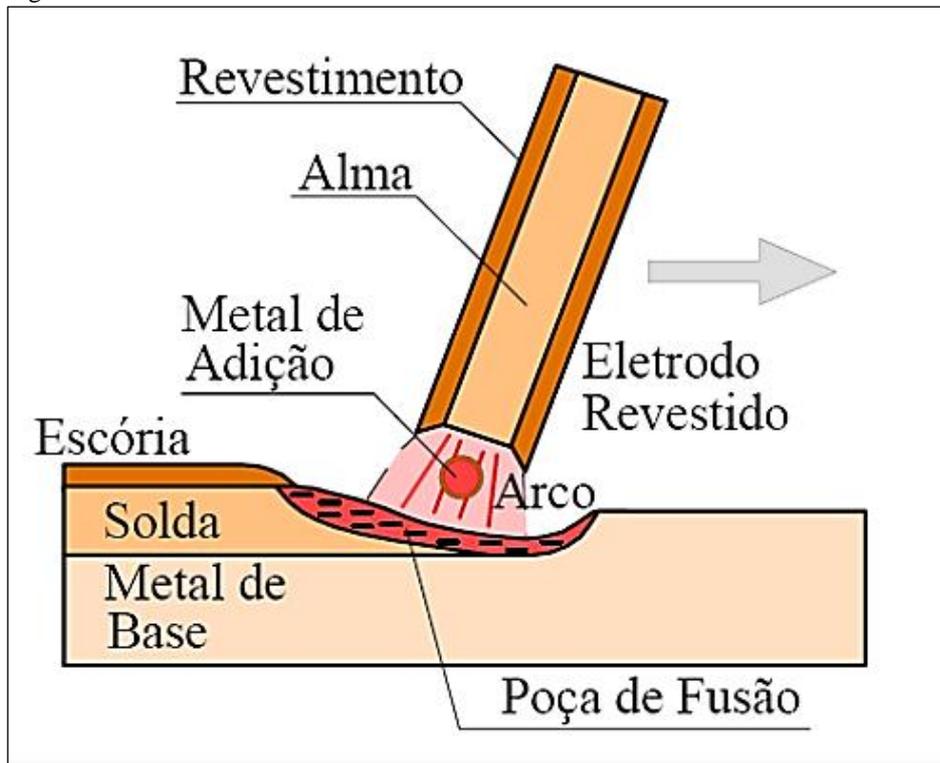
Figura 28: Especificações do eletrodo.



Fonte: O autor.

Segundo Pfeil M. e Pfeil W. (2009), os eletrodos E60 e E70, são os mais utilizados na indústria. Os eletrodos sem revestimento, utilizados nas soldas com arco submerso, recebem também denominações numéricas convencionais indicativas de resistência e outras propriedades, indicadas pela letra F.

Figura 29: Solda com eletrodo revestido.



Fonte: Adaptado Chamberlain, Ficanha e Fabeane (2013).

7.2 Solda em aços estruturais

Chamberlain, Ficanha e Fabeane (2013), abordam que a soldagem é amplamente usada para uniões de fabrica em estruturas de aço. As soldas podem ser de filete, entalhe e penetração parcial ou total, ranhura e tampão. No entanto, as mais utilizadas em ligações são as soldas de filete e entalhe de penetração parcial ou total.

7.2.1 Soldas de filete

Geralmente são utilizadas para cargas de pouca intensidade, sendo mais econômicas por causa da reduzida necessidade de preparação do material. Nesse método de solda, o material é depositado nas faces laterais dos elementos ligados. Para as soldas de filete leva-se em consideração a face de fusão e a raiz da solda (região de contato entre o material de adição e o material base) (CHAMBERLAIN; FICANHA e FABEANE, 2013).

7.2.2 Soldas de entalhe

Para ligações onde as cargas exigirão maior intensidade, são aplicadas soldas de entalhe de penetração parcial ou total, são as mais aconselháveis por apresentarem resistências elevadas, com menor volume de solda que as de filete, desde que o metal da solda seja compatível. Nas soldas de entalhe, o metal de solda é colocado diretamente entre as partes metálicas a serem ligadas, geralmente dentro de chanfros. Os chanfros podem ser de diversas formas, depende das características do projeto. O objetivo de se executar a soldagem dentro do entalhe é obter uma união na qual o elemento em que há penetração total tenha continuidade total até a superfície do outro elemento, sem descontinuidades no corpo do elemento, ou em uniões, o fluxo de tensões é alterado (CHAMBERLAIN; FICANHA e FABEANE, 2013).

O Instituto Aço Brasil. (2009), aborda que uma solda de entalhe deve ser executada com toda a extensão disponível do elemento soldado, devendo ser usados prolongadores para garantir a qualidade da solda em suas extremidades.

7.3 Resistência das soldas

A determinação da resistência da solda é definida pela área efetiva, que é a área da garganta efetiva do filete, resistência esta calculada pela multiplicação do comprimento e da área, considerando as ponderações para cada situação (CHAMBERLAIN; FICANHA e FABEANE, 2013).

7.3.1 Soldas de entalhe

As resistências de cálculo das soldas são dadas em função de uma área efetiva de solda.

$$A_{MB} = t_e l \quad (9)$$

Onde:

t_e = espessura efetiva

l = comprimento efetivo

Pela área A_{MB} do metal-base, igual ao produto do comprimento da solda pela espessura da peça mais delgada da ligação. Para soldas de entalhe de penetração total sujeitas a tensões de compressão ou tração ou perpendiculares ao eixo da solda, as resistências de cálculo são obtidas com base no escoamento do metal-base (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2010).

$$R_d = A_{MB} \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \quad (10)$$

7.3.2 Soldas de filete

As resistências das soldas de filete são dadas em função da área.

$$A_n = \text{área da solda} = tl \quad (11)$$

Onde t é a espessura e l é o comprimento do cordão de solda

Pfeil M. e Pfeil W. (2009), dizem que para efeito de cálculo do filete não é preciso ser considerados esforços solicitantes de tração ou compressão atuando na direção paralela ao eixo longitudinal da solda. Estas solicitações ocorrem em soldas de filete que ligam as chapas componentes de perfis soldados submetidos a momento fletor. Entretanto deve ser considerada a transferência de esforços de uma chapa a outra por cisalhamento através da garganta de solda. Os esforços solicitantes em qualquer direção no plano perpendicular ao eixo longitudinal da solda são considerados para efeito de cálculo, como esforços cisalhantes.

$$R_d = A_w(0,60f_w)/\gamma_{a2} \quad (12)$$

7.4 Especificações de dimensionamento para soldas

Chamberlain, Ficanha e Fabiane (2013), afirmam que se em uma mesma união forem usados dois ou mais tipos de solda (penetração, filete, tampão em furos ou rasgos), a resistência de cálculo de cada um desses tipos de ser determinada separadamente e referenciando o eixo do grupo, a fim de se determinar a resistência de cálculo da combinação, Tendo esse método de compor resistências individuais de soldas não é aplicável a soldas de filete superpostas a soldas de penetração parcial, situação na qual se deve pesquisar a seção crítica da solda e do metal-base.

A força resistente de cálculo, $F_{W,RD}$, está indicada na tabela 4 na qual A_w é a área efetiva da solda, A_{MB} é a área do metal-base, f_y é a menor resistência ao escoamento entre os metais-base da junta e f_w a resistência mínima a tração do metal da solda. Em nenhuma das situações a resistência da solda poderá ser maior que a resistência do metal-base na união. Nas soldas de filete ou de entalhe, a solicitação considerada pode ser tomada como o cisalhamento na seção efetiva, provocado pela resultante vetorial de todas as forças na junta que produzam tensões normais ou de cisalhamento na superfície de contato das partes ligadas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

Tabela 4: Força resistente de cálculo de soldas.

Tipo de solda	Tipo de solicitação e orientação	Força resistente de cálculo $F_{w, RD}$
Penetração total	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Não precisa ser considerado
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	Metal-base: $A_{MB} f_y / \gamma_{a1}$
	Cisalhamento (soma vetorial) na seção efetiva	Metal-base: $0,60 A_{MB} f_y / \gamma_{a1}$
Penetração parcial	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Não precisa ser considerado
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	O menor dos dois valores: a) Metal-base : $A_{MB} f_y / \gamma_{a1}$ b) Metal da solda: $0,60 A_{w} f_w / \gamma_{w1}$
	Cisalhamento paralelo ao eixo da solda, na seção efetiva	Metal base deve atender aos estados limites do material Metal de solda: $0,60 A_{w} f_w / \gamma_{w1}$
Filete	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Não precisa ser considerado
	Cisalhamento na seção efetiva (a solicitação de cálculo é igual à resultante vetorial de todas as forças de cálculo na junta que produzam tensões normais ou de cisalhamento na superfície de contato das partes ligadas)	Metal-base deve atender aos estados limites do material Metal de solda: $0,60 A_{w} f_w / \gamma_{w2}$
Tampão em furos ou rasgos	Cisalhamento paralelo às superfícies em contato, na seção efetiva	Metal base deve atender aos estados limites do material Metal de solda: $0,60 A_{w} f_w / \gamma_{w1}$

Fonte: Adaptado Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

Além da verificação dos estados limites últimos a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008) estabelece algumas disposições construtivas relativas à solda, tais como:

As espessuras mínimas de gargantas efetivas de soldas de penetração parcial estão indicadas no quadro 2. A dimensão da solda deve ser estabelecida em função da parte mais espessa soldada, exceto que tal dimensão não necessita ultrapassar a espessura da parte menos espessa, desde que seja obtida a força resistente de cálculo necessária. Para essa exceção e para que se obtenha uma solda de boa qualidade, devem ser tomados cuidados especiais usando-se preaquecimento. Não podem ser usadas soldas de penetração parcial em emendas de peças fletidas. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 73.)

Quadro 2: Espessura mínima da garganta efetiva de uma solda de penetração parcial

Menor espessura do metal-base na junta (mm)	Espessura mínima da garganta efetiva (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: Adaptado Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

7.5 Defeitos na solda

Segundo o Instituto Aço Brasil. (2017), as soldas podem apresentar grande variedade de defeitos, dentre eles estão:

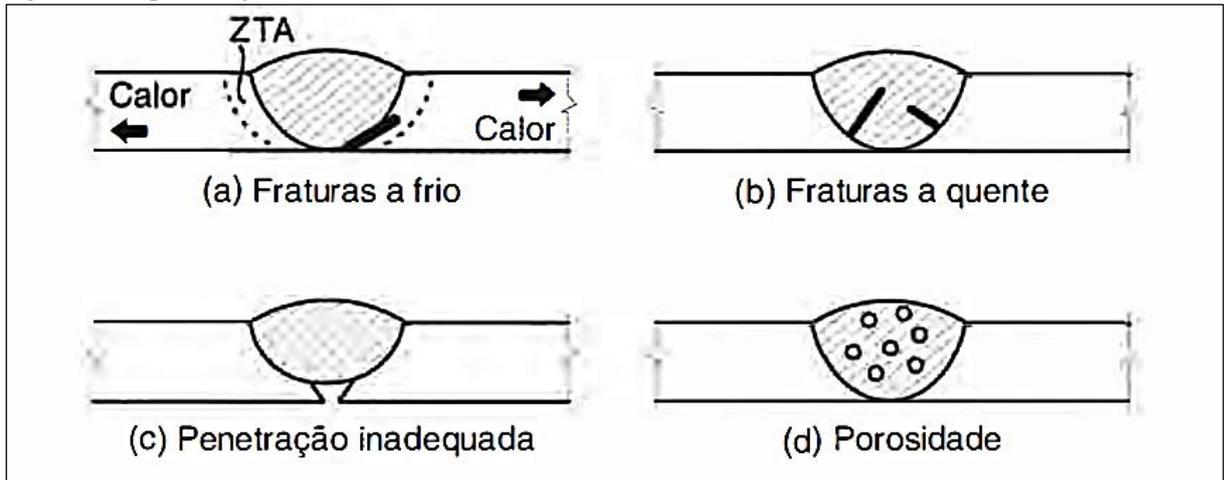
a) Fraturas a frio. O calor interno imposto pelo processo de solda afeta a microestrutura tanto do metal da solda quanto do metal-base adjacente à poça de fusão na região conhecida como zona termicamente afetada (ZTA). Esta zona atinge temperaturas de fusão e, após o resfriamento, sua microestrutura fica diferente do restante do material base. Com o resfriamento rápido, devido à absorção de calor pelo metal adjacente a solda há tendência à formação de microestrutura mais frágeis do que as do aço original, e, portanto mais suscetíveis à ocorrência de fraturas sob ação mecânica.

A origem dessas fraturas está relacionada também a absorção de hidrogênio presente em geral, no revestimento dos eletrodos. As fraturas a frio podem ser evitadas controlando a velocidade de resfriamento, por exemplo, com preaquecimento do metal-base e com a utilização de eletrodos com revestimento de carbonato de sódio (CHAMBERLAIN; FICANHA e FABEANE, 2013).

b) Fraturas a quente. Estas fraturas ocorrem no material da solda durante a solidificação e são devidas a presença de impurezas, em geral enxofre e fósforo, solidificando-se a temperaturas mais baixas que a do aço;

- c) Fusão incompleta penetração inadequada. Decorrem em geral de insuficiência de corrente;
- d) Porosidade. Retenção de pequenas bolhas de gás durante o resfriamento, frequentemente causada por excesso de corrente ou distancia excessiva entre o eletrodo e a chapa;
- e) Inclusão de escória. Usual em soldas feitas em várias camadas, quando não se remove totalmente a escória em cada passe.

Figura 30: Representação de defeitos de solda.



Fonte: Pfeil, M; Pfeil, W (2009).

7.5.1 Controle e inspeção da solda

Segundo a American Welding Society _D1.1 (2010), em face da grande sensibilidade a defeitos a solda deve ter sempre feita em condições controladas, e na norma contém as especificações para execução de solda estrutural, incluindo técnicas, qualificações dos soldadores e procedimentos de inspeção. Nas estruturas comuns utiliza-se a inspeção visual por inspetor treinado, nessa inspeção verificam-se as dimensões de solda e observa-se a ocorrência de defeitos, como penetração inadequada e trincas superficiais. Nas indústrias de perfis soldados e nas estruturas de grande responsabilidade utilizam-se ensaios não destrutivos, como ultrassom, raios X ou líquido penetrante.

8 MEDOLOGIA

O seguinte trabalho foi realizado em Varginha-MG, onde se fez necessário realizar pesquisas em artigos, normas técnicas, obras literárias e orientações com o professor Matheus Henrique Pereira das quais foram extraídos conceitos fundamentais para o estudo desse trabalho.

8.1 Técnicas de pesquisa

O referencial teórico compreende um breve histórico de estruturas metálicas, conceito, perfis, fabricação de perfis, tipos de ligações, chapas *gusset*, ligações soldadas e ligações parafusadas. De modo que auxilia a concepção de dimensionamento de ligações e a compreensão do assunto. A pesquisa realizada em campo somente foi possível com ajuda de professores e profissionais da área, trazendo conhecimentos necessários para a aplicação da teoria na prática, na qual o objetivo é testar dois meios de ligações, uma soldada e outra parafusada.

Para validação da teoria foram dimensionadas duas chapas de aço A36 com 120 mm de largura, com 200 mm comprimento e com uma espessura de 6,3 mm, de modo a resistir à carga máxima do equipamento de tração que aplica uma força máxima de 10 toneladas, ou aproximadamente 100KN.

8.2 Método de cálculo

Com base no conhecimento adquirido na leitura de artigos, livros e no próprio referencial teórico, é apresentado os cálculos para o protótipo abaixo.

8.2.1 Área líquida efetiva e área bruta

A área líquida efetiva de uma barra é calculada através A_n sendo a área líquida da barra e de um coeficiente C_t de 1,00 que conforme o item 5.2.5 da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 8800 (2008), “quando a força de tração for transmitida diretamente para cada um dos elementos da seção transversal da barra, por soldas ou parafusos”, seguindo essa afirmação é adotado 1,00 nos cálculos para verificação da área líquida.

$$A_e = C_t \cdot A_n \quad (13)$$

Sendo:

A_e = Área líquida efetiva [mm²];

C_t = Coeficiente de redução da área líquida (1,00);

A_n = Área líquida de barras com furos, dada pela equação abaixo:

$$A_n = [b - \sum (d + 3,5 \text{ mm}) + \sum s^2/4g] \quad (14)$$

Onde:

b = Largura da chapa de aço [mm];

d = Diâmetro do parafuso [mm];

s = Espaçamento longitudinal entre furos de filas diferentes [mm];

g = Espaçamento transversal entre duas filhas de furos [mm].

Sendo que as variáveis s e g são usadas apenas quando os furos na chapa são enviesados, assim, considerando os valores como 0 (zero), pelo fato do protótipo não possuir furos enviesados e possuir apenas 2 furos. Desse modo tem-se o seguinte cálculo.

$$A_n = [120 - 1 \cdot (12,7 + 3,5)] \cdot 6,3$$

$$A_n = 653,94 \text{ mm}^2$$

A área bruta da seção dá-se por toda região da chapa sem considerar os furos, e denomina-se como:

$$A_g = b \cdot t \quad (15)$$

Onde:

A_g = Área bruta da seção [mm²];

b = Largura da chapa de aço [mm];

t = Espessura da chapa de aço [mm].

Agora é necessário verificar a área bruta da chapa, na qual a área líquida deve ser menor que a área bruta da seção da chapa. Para a análise segue o seguinte cálculo.

$$A_g = 120 \cdot 6,3$$

$$A_g = 756 \text{ mm}^2$$

Com os cálculos realizados verifica-se que a área líquida é menor que a área bruta da seção da chapa, com isso pode-se dar seguimento aos demais cálculos.

8.2.2 Elementos tracionados

Para fins de cálculos e testes, foi adotado a carga máxima do equipamento 100KN para efeito de cisalhamento dos conectores, dessa forma admitindo uma carga normal de utilização γ_{a2} no valor de 1,35, seguindo da solicitação de cálculo.

$$N_{sd} = \gamma_{a2} \cdot N \quad (16)$$

Sendo:

N_d = Carga solicitante de cálculo [N];

γ_{a2} = Coeficiente de ponderação da resistência à ruptura;

N = Carga atuante [N].

Com isso temos a carga solicitante de cálculo:

$$N_{t,sd} = 1,35 \cdot 100$$

$$N_{t,sd} = 135 \text{ KN}$$

Então temos uma carga aplicável de 135KN, desse modo precisamos verificar a resistência de cálculo de elementos de ligação tracionados, onde deve ser considerado o menor valor obtido.

a) Para escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = f_y \cdot A_g / \gamma_{a1} \quad (17)$$

Sendo:

$N_{t,Rd}$ = Força resistente de cálculo [KN];

f_y = Limite de escoamento do aço [MPa]. (Ver tabela 1);

A_g = Área bruta da chapa de aço [mm²]. (Calculada na seção 8.2.1);

γ_{a1} = Coeficiente de ponderação [1,10].

O cálculo segue da seguinte forma:

$$N_{t,Rd} = 250 \cdot 756 / 1,10$$

$$N_{t,Rd} = 171,82 \text{ KN}$$

b) Para ruptura da seção líquida.

$$N_{t,Rd} = f_u \cdot A_e / \gamma_{a2} \quad (18)$$

Onde:

$N_{t,Rd}$ = Força resistente de cálculo [KN];

f_u = Limite de ruptura do aço [MPa]. (Ver tabela 1);

A_e = Área líquida da chapa de aço [mm²]. (Calculada na seção 8.2.1);

γ_{a2} = Coeficiente de ponderação [1,35].

Seguindo a fórmula o resultado se apresenta:

$$N_{t,Rd} = 400 \cdot 653,94 / 1,35$$

$$N_{t,Rd} = 193,76 \text{ KN}$$

Após verificar força axial resistente de cálculo da chapa de aço A36, deve ser atendida a condição:

$$N_{t,sd} \leq N_{t,Rd}$$

$$135 \text{ KN} \leq 171,82 \text{ KN}$$

Concluimos que as dimensões adotadas a chapa de aço resistem e com folga a carga aplicada.

8.2.3 Parafusos

Para fins de projeto foram adotados 2 parafusos de ½” ou 12,7 mm de diâmetro, tendo ¾” de seção livre (parte sem rosca), com base nisso a foi montado uma tabela retirando alguns dados da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 8800 (2008), onde a tabela traz dimensões e resistências para parafusos comuns tipo ASTM seguindo a seguinte fórmula:

$$F_{v,RD} = (0,5 \cdot A_b \cdot f_{ub}) / \gamma_{a2} \quad (19)$$

Onde:

$F_{v,RD}$ = Força de cisalhamento resistente de cálculo [KN];

f_{ub} = Limite de escoamento do parafuso [KN/cm²]. (Ver tabela 5);

A_b = Área bruta do parafuso [cm²]. (Sendo $0,25\pi \cdot d_b^2$);

γ_{a2} = Coeficiente de ponderação [1,35].

Figura 31: Parafuso ASTM A307.



Fonte: O autor.

Tabela 5: Dimensões parafusos comuns tipo ASTM A307.

Diâmetro (pol)	Diâmetro (mm)	Área bruta (mm ²)	Esforço Resistente a corte (Mpa)	Esforço Resistente a tração (KN)
1/4	6,35	32	9,76	7,3
3/8	9,5	71	14,60	16,43
1/2	12,7	127	19,52	29,21
5/8	15,9	198	24,44	45,63
3/4	19,1	285	29,36	65,71

Fonte: O autor.

Seguindo os dados da tabela o parafuso escolhido está selecionado, atendendo todos os aspectos exigidos para o projeto. Como são 4 planos de corte, multiplicamos o esforço resistente de cálculo do parafuso por 4, sendo assim:

$$19,52 \cdot 4$$

$$78,08KN$$

Seguindo a equação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), os parafusos resistem aproximadamente a 7.8 toneladas, considerando o fator de ponderação da resistência do aço em 1,35.

8.2.4 Comprimento da solda

Foi adotada a solda de filete para aplicação no protótipo devido à facilidade de manuseio e um ótimo resultado, o eletrodo escolhido foi E6013. Dessa forma admitiu-se para o filete de solda o lado mínimo segundo a seção 6.2.6.2.1 da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 8800 (2008) tabela 10, onde chapas de até 6,35 mm de espessura o tamanho mínimo da perna da solda de filete é 3 mm.

Figura 32: Eletrodo E6013.



Fonte: O autor.

Com isso temos o cálculo da área efetiva da solda, dada por:

$$A_w = 0,7 b \cdot l \quad (20)$$

Onde

A_w = Área efetiva da solda [cm²];

b = Tamanho mínimo da perna da solda de filete [cm];

l = Comprimento da solda [cm].

Seguindo a fórmula temos o seguinte resultado. Como são 8 partes a serem soldadas multiplica-se esse valor a equação.

$$A_w = 8 \cdot 0,7 \cdot 0,3 \cdot l$$

$$A_w = 1,68l$$

Com esse valor obtemos o esforço solicitante de cálculo através da seguinte fórmula:

$$S_d = A_w \cdot N \quad (21)$$

Onde:

S_d = Esforço solicitante de cálculo [KN];

A_w = Área efetiva da solda [cm²];

N = Carga aplicada [KN].

Foi adotado um esforço qualquer apenas para efeito de cálculo. Assim o resultado dá-se:

$$S_d = 1,68l \cdot 50$$

$$S_d = 84 \text{ KN}$$

Dessa forma é calculada a força resistente de cálculo, através da seguinte fórmula:

$$R_d = A_w \cdot (0,60 \cdot f_w) / \gamma_{a2} \quad (22)$$

Onde:

R_d = Força resistente de cálculo;

A_w = Área efetiva da solda [cm²];

f_w = Resistência à tração do metal de solda [Mpa];

γ_{a2} = Coeficiente de ponderação [1,35].

Com a fórmula conseguimos calcular a força resistente de cálculo em função do comprimento, a resistência à tração do metal de solda se encontra na tabela A.4 no anexo A da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 8800 (2008). Como o eletrodo escolhido é da classe E60 o valor de f_w é igual a 415 Mpa.

$$R_d = 1,68l \cdot (0,60 \cdot 41,5) / 1,35$$

$$R_d = 30,99l$$

Com o valor da força resistente de cálculo igualamos ao esforço solicitante de cálculo para encontrar o comprimento do filete de solda.

$$30,99l = 84 \quad (23)$$

$$l = 84/30,99$$

$$l = 2,71 \text{ cm}$$

Agora retornaremos o comprimento da solda na equação para encontrar o esforço resistente de cálculo da solda, seguindo a equação 22.

$$R_d = 1,68 \cdot 2,71 \cdot (0,60 \cdot 41,5) / 1,35$$

$$R_d = 83,97 \text{ KN}$$

O cálculo anterior nos mostra que a chapa resistira aproximadamente a 8,4 toneladas.

8.3 Protótipo

Como já foi citado acima no trabalho, o aço escolhido foi ASTM A36, por ser um aço padrão usado em estruturas metálicas e possuir um baixo teor de carbono, dessa forma tendo uma boa ductilidade e uma facilidade maior de aplicação de solda. O eletrodo escolhido foi o E6013 por possuir características adequadas para aplicação no protótipo, para que o mesmo não ficasse superdimensionado.

O parafuso adotado para o projeto foi o ASTM A307, devido ser um parafuso comum e com boa resistência (Ver tabela 5). A furação da chapa foi feita seguindo os padrões adotados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, sendo assim feito um furo padrão (Ver figura 33).

Figura 33: Furo padrão adotado na chapa de aço.



Fonte: O autor.

O comprimento da solda adotado foi de 27,1 mm como mostrado nos cálculos na metodologia, tendo uma espessura de 3 mm, conforme a norma estabelece para espessura de chapas finas (Ver quadro 2). Foi feito dois corpos de prova para testes de cisalhamento nas ligações.

Figura 34: Solda de filete aplicada no protótipo.



Fonte: O autor.

O resultado final da ligação parafusada segue abaixo:

Figura 35: Chapa parafusada.



Fonte: O autor.

Figura 36: Ligação parafusada.



Fonte: O autor.

Abaixo a ligação soldada.

Figura 37: Ligação soldada.



Fonte: O autor.

9 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com todo conhecimento adquirido no processo de pesquisa, foi possível realizar os cálculos de dimensionamento da chapa aplicada no protótipo, também foi denominado o melhor parafuso para o projeto, também foi escolhido à solda adequada para aplicação no protótipo, pela sua facilidade de execução e resistência, considerando que os dois meios de ligação receberam a carga máxima da máquina de teste. Todo esse procedimento foi realizado pelo autor e juntamente com Prof. Fabiano Farias de Oliveira.

Figura 38: Equipamento usado para tracionar os corpos de prova.



Fonte: O autor.

Como o foco é analisar qual ligação é mais eficiente em relação aos esforços aplicados de tração e cisalhamento, as duas chapas resistiram à carga máxima do equipamento, resistindo a 10 toneladas.

Figura 39: Ligação parafusa sofrendo esforço de tração, onde os conectores sofrem cisalhamento.



Fonte: O autor.

Sendo assim foi comprovado que a chapa está dimensionada corretamente para o esforço aplicado, resistindo à capacidade máxima do equipamento.

Figura 40: Carga máxima aplicada nos protótipos.



Fonte: O autor.

A ligação soldada teve o mesmo esforço aplicado, resistindo sem nenhuma ruptura ou falha visível.

Figura 41: Chapa soldada sofrendo esforço de tração.



Fonte: O autor.

Na teoria, a real eficácia de cada meio de ligação era verificar qual chapa haveria uma ruptura primeiro, porém a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), traz o fator de ponderação, que reduz em 35% o esforço resistente de cálculo das chapas. Sendo assim nas equações 19 e 22, nos mostra que a ligação soldada suportaria aproximadamente 8,4 toneladas, já a ligação parafusada suportaria 7,8 toneladas. Onde a chapa parafusada teve apenas uma ruptura por ovalização do furo por plastificação local da chapa na superfície de apoio do fuste do conector, já o conector não teve se quer algum defeito.

Figura 42: Ovalização do furo na ligação parafusada.



Fonte: O autor.

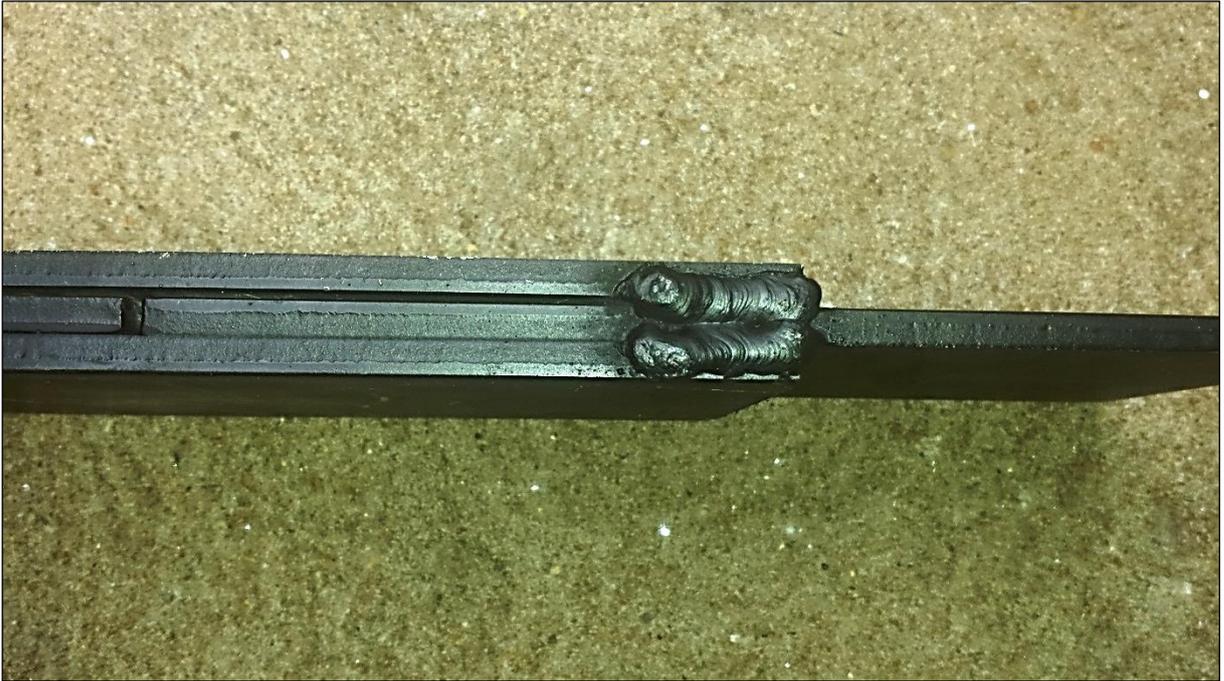
Figura 43: Parafuso depois do teste aplicado.



Fonte: O autor.

A ligação soldada não apresentou nenhum defeito no corpo de prova e nem nos filetes de solda.

Figura 44: Solda após o esforço aplicado.



Fonte: O autor.

O fator de ponderação da Associação Brasileira de Normas Técnicas é usado para combinações normais, onde o mesmo traz um fator de segurança para que os cálculos apresentem com uma margem de segurança para o projeto. Sendo assim a real carga para romper os conectores se dá pela equação 21, onde desconsideraremos o fator de ponderação γ_{a2} (1,35), abaixo temos o esforço necessário para romper as ligações:

a) Ligação soldada:

$$R_d = 1,68 \cdot 2,71 \cdot (0,60 \cdot 41,5) \quad (24)$$

$$R_d = 113,36 \text{KN}$$

Aproximadamente 11,33 toneladas.

b) Ligação parafusada:

$$78,08 \cdot 1,35 \quad (25)$$

$$105,41 \text{KN}$$

Aproximadamente 10,54 toneladas.

Os custos gerados com cada ligação se encontram na tabela 6.

Tabela 6: Custos do protótipo.		
	Ligação Parafusada	Ligação soldada
Custo do material (chapa)	R\$60,00	R\$60,00
Custo de mão de Obra	R\$10,00	R\$15,00
Custo parafuso / Custo eletrodo	R\$2,60	R\$0,57
Custo da furação	R\$10,00	-
Tempo de execução (min)	20	15
Custo total de cada ligação	R\$82,60	R\$75,57

Fonte: O autor.

10 CONCLUSÃO

Este trabalho possibilitou analisar através de testes em laboratório e material teórico, a eficácia de cada meio de ligação em chapas gusset através de custos, tempo de execução e esforço aplicado em cada ligação.

Os resultados obtidos pelos testes foram satisfatórios, mostrando que os dois meios de ligação sofreram um grande esforço de tração sem ocorrer nenhum tipo de rompimento dos conectores. Para concluir qual ligação seria mais eficaz em relação ao esforço, seria necessário que uma das chapas sofresse alguma ruptura, onde, nas equações de verificação da força resistente de cálculo da cada ligação, comprovou que a ligação parafusada sofreria uma ruptura a 78,08KN (aproximadamente 7,8 toneladas), já a ligação soldada sofreria uma ruptura a 83,7KN (aproximadamente 8,37 toneladas).

Porém nos testes realizados, a força máxima aplicada de 100KN (aproximadamente 10,1 toneladas, ver imagem 39), na qual, teoricamente as chapas deveriam se romper com a força aplicada, mas, nenhuma ligação sofreu ruptura. Mas a ligação parafusada mostrou a presença de uma pequena ovalização nos furos (ver imagem 41), conclui-se que o parafuso ficou superdimensionado para chapa, devido seu diâmetro ser maior que a chapa. Já a ligação soldada não sofreu nenhum dano.

Isso se justifica pelo fator de ponderação que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008) aplicado na equação de verificação de resistência, onde o mesmo reduz em 35% os esforços aplicados, tendo em vista a segurança do cálculo e considerando possíveis falhas no material. Retirando o valor de ponderação da equação verificamos que os esforços resistentes de cálculo nos dois meios ligação ficaram acima de 100KN (ver equações 24 e 25), impossibilitando a ruptura dos corpos de prova, já que a força máxima de tração da máquina de teste é de 100KN ou aproximadamente 10 toneladas.

Podemos concluir que a ligação soldada ficou um pouco mais barata que a ligação parafusada (ver tabela 6), conclui-se que a mesma é mais eficiente nos critérios exigidos no trabalho, devido ao esforço aplicado na ligação soldada não ter surtido efeito algum, diferente de como foi mostrado na figura 42, onde a chapa parafusada sofreu uma ovalização dos furos pelos conectores. Levando em conta que em um projeto de estruturas metálicas onde se faz o uso dessas ligações, mais esforços deverão ser analisados, mão de obra, número de ligações a serem executadas (podendo aumentar o valor da ligação soldada) e local para execução, já que em ligações onde se tem uma altura considerável, ligações com parafusos ficam com uma facilidade maior de serem executadas, apesar de ambas as ligações terem atendido a carga

máxima do equipamento de teste, fica claro que em ligações parafusadas quando o uso e aplicação de carga, poderão ocorrer nos furos maiores folgas dependendo do esforço aplicado e o número de parafusos para o projeto, e através de todo conhecimento adquirido podemos dizer que a ligação parafusada trabalha como um nó rotulado já a ligação soldada trabalha como um nó engastado.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Pedro. **Estudo e verificação de ligações metálicas parafusadas e soldadas**. Uniceub: Faculdade de tecnologia e ciências sociais aplicadas. Brasília, 2014.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1-82**: Structural Welding Code, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- CEDISA. Disponível em: <<http://www.cedisa.com.br/produtos/perfis/perfil-soldado-personalizado/>>. Acesso em 12 abr. 2018.
- CHAMBERLAIN, Zacarias; FICANHA, Ricardo; FABEANE, Ricardo. **Projetos e cálculos de estruturas de aço**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- DIAS, Luis Andrade de Mattos. **Estruturas de aço**: conceitos, técnicas e linguagem. 10. ed. São Paulo: Ziguarte Editora, 1997.
- FERRAÇO: **Indústria e comércio Ltda**. Disponível em. <www.ferracocomercial.com.br/barra-aco> Acesso em 12 abr. 2018.
- INSTITUTO AÇO BRASIL /CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Ligações em estruturas metálicas**. Rio de Janeiro, 2017.
- IRONBRIDGE GERGE MUSEUMS: **The Iron Bridge**. Disponível em: <<https://www.ironbridge.org.uk/explore/the-iron-bridge-tollhouse/>>. Acesso em: 16 mar. 2018.
- KULAK, G. L.; FISHER, J. W.; STRUIK, J. H. A. **Guide to design criteria for bolted and riveted joints**. 2. ed. Chicago: AISC, 2001.
- MECÂNICA INDUSTRIAL. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/282-lingotamento-continuo-na-industria/>>. Acesso em 26 mar. 2018.
- MECÂNICA INDUSTRIAL. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/282-laminacao-a-quente/>>. Acesso em 26 mar. 2018.
- MECÂNICA INDUSTRIAL. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/282-laminacao-a-frio/>>. Acesso em 26 mar. 2018.
- METALURGIA. Disponível em: <<http://metalurgiaop.blogspot.com.br/2010/11/o-que-e-um-alto-forno.html>>. Acesso em 21 mar. 2018.
- NEW AÇO. Disponível em: <<http://www.newaco.com.br/perfil-laminado-i>>. Acesso em 12 abr. 2018.
- PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. Disponível em: <www.solucoesindustriais.com.br/empresa/siderurgia/acos-riverarepresentaca/produtos/siderurgico/chapa-de-aco-estrutural-a36>. Acesso em 12 abr. 2018.

VASARHELYI, D. D. **Tests of gusset plate models**. Journal of the Structural Division, Reston, v. 97, n. ST2, p. 665-678. 1971.

VERGÍLIO, Sérgio Aparecido Lessa. **Ligações em estruturas metálicas com ênfase em perfis formados a frio**. Unesp: Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira – SP, 2011.

WHITMORE, R. E. **Experimental investigation of stresses in gusset plates**. University of Tennessee, Knoxville, 1950.