

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ANÁPOLIS-UniEVANGÉLICA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM ESTRUTURAS DE AÇO

ABRAHÃO ANTÔNIO SACCHQ NETO

Anápolis-GO, Dezembro de 2013

ABRAHÃO ANTÔNIO SACCHQ NETO

LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM ESTRUTURAS DE AÇO

Trabalho de conclusão de curso apresentado a banca examinadora do Centro Universitário UniEvangélica, como requisito obrigatório para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Msc. Rogério Cardoso

Anápolis-GO, Dezembro de 2013

SACCHQ NETO, Abrahão Antonio
Ligações parafusadas em estruturas de aço / Abrahão Antonio Sacchq Neto,
2013

xv, 38P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2013).

TCC - Unievangélica
Orientador: Prof. Msc. Rogério Cardoso
Curso de Engenharia Civil.

1. Parafusos
3. Resistência
I. ENC/UNI

2. Ligações
4. Dimensões
II. Ligações parafusadas

CDU 69

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAIÃO FILHO, Oswaldo Teixeira. SILVA, Antonio Carlos Viana. *Ligações Para Estruturas de Aço* - Guia Prático para Estruturas com Perfis Laminados. 2. Ed, São Paulo, SP, 2005. 276p.

BUIFFONI, SALETE SOUZA DE OLIVEIRA. Resistência dos materiais, ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA – UFF, <http://www.professores.uff.br/salete/res1/aula3.pdf>, acessado 02 dez 2013, às 14:00hs.

COSTA E SILVA, André Luiz V. da. MEI, Paulo Roberto. *Aços e Ligas Especiais*. 3ª edição revista. 2010.

IME - INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA-BRASIL – MAJ. MONIZ DE NBR 8800/2008 – Normas Brasileiras de Referência - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. (válida a partir de 25.09.2008).

PFEIL, Walter. *Estruturas De Aço* – Dimensionamento prático/ Walter Pfeil, Michele Pfeil, 8.ed. – Rio de Janeiro; LTC, 2012.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Abrahão Antonio Sacchq Neto

Ligações parafusadas em estruturas de aço

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2013

É concedida à Unievangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Abrahão Antonio Sacchq Neto
R. JM-14 Qd-20 Lt-04 Setor Jamil Miguel
CEP: 75124-180 - Anápolis/GO - Brasil

CENTRO UNIVERSITÁRIO UniEVANGÉLICA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ABRAHÃO ANTÔNIO SACCHQ NETO

LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM ESTRUTURAS DE AÇO

Trabalho de conclusão de curso aprovado em ____/____/____ para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Msc. Rogério Cardoso dos Santos

Examinador: Prof. Dr. Benjamim Jorge Rodrigues dos Santos

Examinador: Prof. Msc. Christian Moreira

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter concedido graça para chegar até aqui, pois em nada me foi pesado, por ser amor, me sustentou e amparou. A minha esposa Sirlene, filhos Bruno César e Anna Paula, com tantas vezes que suportaram noites de luz acesa, por acreditarem em um sonho.

A todos os meus familiares, por saberem que a persistência toma conta daquele que não se entrega ao fado.

Ao prof. Msc. Rogério Cardoso que me orientou, incansavelmente dedicado.

Em especial à UniEvangélica, ter podido dar sequência ao meu ideal, hoje Engenheiro.

DEDICATORIA

Este trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil – UniEvangélica é dedicado à minha mãe Oraldia Oliveira Sacch, pelo incentivo dado; o sorriso fluindo de sua face ao ver-me estudando; as orações elevadas ao céu como oferta digna de louvor ao criador por ter concedido mais uma oportunidade profissional ao seu filho.

RESUMO

Esta pesquisa consiste numa análise sobre ligações parafusadas em estruturas de aço, utilizando cálculos normatizados que garantem aplicação adequada à estrutura a ser montada, com base em estudo de caso e referências bibliográficas. As ligações estudadas foram projetadas de modo que resistam aos esforços solicitantes e que atuam na barra de forma a evitar o colapso, rasgamento ou a concentração de tensão. Todo o estudo se baseia em aspectos importantes sobre o comportamento estrutural de parafusos norteados pela norma brasileira NBR 8800/2008.

Palavras – Chaves: Aço, Parafuso, Ligações.

ABSTRACT

This research is an analysis of bolted connections in steel structures using standardized calculations that ensure the proper structure to be applied, based on a case study and bibliographic references. The connections that were studied were designed to resist the load acting on the crossbar, in the purpose to avoid collapse or tension concentration. The whole study is based on important aspects of the structural behavior of screws building guided by the Brazilian norm NBR8800/2008.

Keywords: Steel, Screw, Connections.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1- Modelo de parafusos.....	6
Fig. 3.1 - Descrição geral dos parafusos.....	10
Fig. 3.2 - Ligações Parafusadas – Resistência dos Parafusos.....	11
Fig. 3.3 - Ligações Parafusadas - Classificação quanto à solicitação.....	13
Fig.3.4 - Ligações por contato.....	13
Fig. 3.5 - Resistência de Cálculo devido ao corte do parafuso.....	14
Fig.3.6 - Ligações onde há cisalhamento.....	15
Fig. 3.7 - Forças atuantes nas ligações.....	15
Fig. 3.8 - Falha de um parafuso em cisalhamento simples.....	16
Fig. 3.9 - Dimensões “e” e “s” numa chapa.....	16
Fig. 3.10 - Interação de Tração com Cisalhamento.....	17
Fig. 3.11 - Ligações por atrito.....	18
Fig. 3.12 - Ligações por atrito.....	18
Fig. 3.13 - Torquímetro para ligações parafusadas por atrito.....	20
Fig. 3.14 - Aperto do parafuso.....	20
Fig. 3.15 - (DTI) Indicador direto de tensão (frente e verso).....	21
Fig. 3.16 - (DTI) indicador direto de Tensão – antes e depois do aperto.....	21
Fig. 3.17 - Ligações parafusadas.....	22
Fig. 3.18 - Colapso por tração e efeito alavanca.....	23
Fig. 3.19 - Rasgamento da chapa.....	23
Fig. 3.20 - Colapso por tração, com efeito, alavanca nos parafusos.....	23
Fig. 3.21 - Efeito alavanca em parafusos.....	24
Fig. 3.22 - Exemplo de verificações ligação rígida pilar-viga.....	25
Fig. 3.23 - Deformações em chapas de cantoneira parafusadas.....	27

Fig. 3.24- Ligações parafusadas.....28

Fig. 4.1 - Montagem de estrutura.....33

Fig. 4.2 - Montagem de estrutura.....34

Fig. 4.3 - Montagem de estrutura.....34

Fig. 4.4 - Montagem de estrutura.....34

Fig. 4.5 - Montagem da estrutura.....35

Fig. 4.6 - Montagem da estrutura.....35

Fig. 4.7 - Montagem da estrutura.....35

Fig. 4.8 -Montagem da estrutura.....36

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Cálculo do parafuso – Resistências de cálculo – NBR 8800/2008.....12

Tabela 3.2 - Tabela para tração e cortante combinadas.....17

Tabela 3.3 - Ligações parafusadas - Espaçamento mínimo furo-borda.....28

Tabela 3.4 - Resistência de cálculo à tração de parafusos ASTM A 325, (kN).....31

Tabela 3.5 - Resistência de cálculo ao cisalhamento simples de um parafuso ASTM A 325, (kN).....31

Tabela 3.6 - Resistência de cálculo ao esmagamento com rasgamento entre furos padrão, (kN).....32

Tabela 3.7 - Resistência de cálculo ao esmagamento com rasgamento entre furos padrão, (kN).....32

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Histórico dos parafusos de alta resistência.....4

Quadro 3.1 – Força de protensão mínima em parafusos ASTM.....19

Quadro 3.2 - Furação para parafusos.....25

Quadro 3.3 - Limitações relativas ao emprego de furos alargados ou alongados.....26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

E: módulo de elasticidade.

ELU: estados-limites últimos.

ELS: estados-limites de serviço.

F: força.

G: módulo de elasticidade transversal.

K: coeficiente de flambagem.

L: comprimento.

MPa: Mega Pascal.

Q: fator de redução associado à flambagem local.

d: diâmetro.

λ : índice de esbeltez.

λ_0 : índice de esbeltez reduzido.

γ : coeficiente de ponderação das ações.

ψ : fator de redução das ações.

ν : coeficiente de Poisson.

β : coeficiente de dilatação térmica.

ρ : massa específica.

Rd: resistência de cálculo.

Ru: resistência última.

Sd: solicitação de cálculo.

Ag: área bruta.

An: área líquida.

Ae: área líquida efetiva.

A_p : área efetiva para pressão de contato.

C_t : coeficiente de redução área líquida.

f_d : resistência de cálculo ou projeto.

f_k : resistência característica.

f_y : resistência ao escoamento do aço.

f_u : resistência à ruptura do aço à tração.

N_e : força axial da flambagem elástica.

h : altura da alma.

t_w : espessura da alma.

b : largura.

b_f : largura da mesa.

t : espessura.

t_f : espessura da mesa.

t_w : espessura da alma.

σ : tensão normal.

Σ : Somatório.

Y_m : Coeficiente de ponderação.

X : Fator de redução associado à resistência à compressão.

F_{tb} : força mínima de protensão

η_1 : Furo padrão = 0,5

η_2 : Furo padrão = 0

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO 1

1.1 Tema 1

1.1.1 Delimitações do tema 1

1.2 Objetivos..... 2

1.2.1 Objetivo geral.....2

1.2.2 Objetivo específico 2

1.3 Justificativa..... 2

1.4 Metodologia.....3

2- HISTÓRICO.....4

2.1 História do aço.....4

2.2 Histórico dos parafusos de alta resistência.....4

3- TEORIA SOBRE LIGAÇÕES DE AÇO.....7

3.1 O aço e suas propriedades.....9

3.2 Vantagens e desvantagens das ligações em aço parafusadas.....10

3.3 Parafusos ASTM A-325.....10

3.4 Dimensões dos parafusos estruturais.....11

3.5 Cálculo do parafuso – Resistências de cálculo.....11

3.6 Ligações parafusadas – Classificação quanto à solicitação.....12

3.7 Ligações parafusadas – Quanto ao tipo.....13

3.7.1 Tipo contato – (bearing-type).....13

3.7.1.1 Tração.....14

3.7.1.2 Força cortante.....14

3.7.1.3 Resistência à pressão de contato em furos.....16

3.7.1.4 Tração e cortante combinadas.....17

3.7.2 Tipo atrito – (friction-type).....17

3.7.2.1 Aperto do parafuso.....19

3.7.2.1.1 Torquímetro - Chave calibrada.....	19
3.7.2.1.2 Rotação da porca.....	20
3.7.2.1.3 Arruela com indicador de carga (DTI).....	21
3.8 Colapso por tração ou rasgamento.....	22
3.8.1 Efeito alavanca (“pryingaction”).....	24
3.8.2 Identificação dos tipos de colapso.....	24
3.8.3 Furação para parafusos.....	25
3.8.4 Limitações relativas ao emprego de furos alargados ou alongados.....	26
3.8.4.1 Verificação na chapa devido à presença de furos.....	27
3.8.4.2 Espaçamento mínimo furo-borda.....	27
3.8.4.3 Espaçamento máximo furo-borda.....	28
3.9 Compatibilidades de materiais.....	29
3.10 Disposições construtivas.....	29
3.10.1 Parafusos.....	30
3.10.2 Furos padrão para parafuso.....	30
3.10.3 Espaçamento entre furos, distância do furo à borda e gabarito de furação para cantoneiras.....	30
3.11 Tabelas de resistência de cálculo de parafusos.....	31
4- OBRA EXECUTADA EM ANÁPOLIS – GOIÁS.....	33
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

1-INTRODUÇÃO

1.1Tema

Ligações parafusadas em estruturas de aço.

1.1.1 Delimitações do tema

Entender que as ligações parafusadas devem ser utilizadas de forma a transmitir as cargas atuantes às peças e restringir as deformações na estrutura a limites admissíveis e que podem ser classificadas em ligações permanentes ou desmontáveis, cujo foco é o uso do parafuso de alta resistência.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho consiste em estudar dentro da revisão bibliográfica de trabalhos relacionados às ligações parafusadas em estrutura de aço.

1.2.2 Objetivo específico

- a) Analisar a influência dos elementos de liga nos aços;
- b) Analisar o sistema de ligações parafusadas;
- c) Conhecer as teorias sobre ligações parafusadas em estruturas de aço.

1.3 Justificativa

As ligações parafusadas em estruturas de aço são definidas por junções dos elementos estruturais e estão intrinsecamente atribuídas aos projetos de estruturas de aço.

Suas características remontam o processo construtivo levando em consideração sua resistência, segurança e qualidade do material apresentado. Toda estrutura bem projetada e elaborada certamente trará ligações que proporcionaram o custo x benefício do projeto implantado. Convém ressaltar que as escolhas corretas das ligações pelo projetista trarão aparência e estética ao conjunto no que diz respeito ao projeto com estruturas aparentes. RODRIGUES (1981).

O dispositivo utilizado nessa estrutura, como parafusos, é o tema que abarca o projeto e juntamente os aspectos relacionados ao mesmo e seus componentes. Levando em consideração as classificações, especificações, propriedades mecânicas, métodos de instalação e suas implicações.

Sabe-se que o assunto apresentado contém um conjunto mínimo de informações necessárias para que o leitor tenha condições de calcular e detalhar as ligações com parafusos

que ocorrem nas estruturas correntes. Pois é certo que de maneira alguma esta publicação tenha esgotado o assunto, pois vasta é a bibliografia sobre o tema, mas visa melhor entendimento e direcionar o projetista á melhor escolha na execução de se projeto.

1.4 Metodologia

Perante o publicado, o tema é de grande valor, pois ligações parafusadas em estruturas de aço é um assunto necessário para ser discutido entre engenheiros e acadêmicos de engenharia.

No que se refere à metodologia, o trabalho foi realizado por meio de estudo de caso em obra executada pela empresa PONTES Construtivos Metálicos nesta cidade e pesquisas bibliográficas específicas do assunto.

2-HISTÓRICO

2.1 História do aço

Evidências indicam que a primeira obtenção do ferro aconteceu aproximadamente há 6 mil anos a.C, em algumas civilizações como as do Egito, Babilônia e Índia. Devido a sua raridade, o ferro era considerado um material nobre, tendo sua utilização limitada a fins militares e adornos em construções. CHIAVERINI (2008).

Apenas em meados do século XIX a utilização do ferro passou a ser em escala industrial, devido aos processos de industrialização nos países mais desenvolvidos pela revolução industrial, como Inglaterra, França e Alemanha.

Desenvolveram-se paralelamente progressos na elaboração e conformação do metal onde em 1830 se laminavam pranchas de ferro na Inglaterra, em 1848 trilhos para estradas de ferro primeiramente na França, os perfis de seção I de ferro forjável, peça fundamental da construção em aço. CHIAVERINI (2008).

No Brasil, foi na década de 20 que o país começou realmente a desenvolver sua incipiente indústria siderúrgica, com a criação da Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, que se somando com a produção de outras pequenas fundições, a produção chegou a 35mil toneladas, e no final do decênio 96 toneladas. CHIAVERINI (2008).

2.2 Histórico dos parafusos de alta resistência

Quadro 2.1 - Histórico dos parafusos de alta resistência. Fonte: Queiroz (1989).

Data	História
1934	Os primeiros experimentos indicando a possibilidade do uso de parafusos de alta resistência em construção de estruturas de aço foram relatados por C. Batho e E. H. Bateman no Steel Structures Committee of Scientific and Industrial Research na Grã Bretanha; Foi concluído também que parafusos com um limite de escoamento mínimo de aproximadamente 370 MPa poderiam ser apertados suficientemente para fornecer uma adequada

	margem de segurança contra o deslizamento das partes conectadas.
1938	Ensaio realizado na Universidade de Illinois, Wilson e Thomas relataram que a resistência à fadiga de parafusos de alta resistência, devidamente apertados, instalados em furos alargados, era compatível com a resistência dos já consagrados rebites.
1947	O Research Council on Riveted and Bolted Structural Joints (RCRBSJ) apresentou informações com base em extrapolação de estudos desenvolvidos em ligações rebitadas. O Conselho patrocinou também estudos sobre parafusos de alta resistência e rebites, e o uso destes em conexões estruturais.
1949	American Society for Testing and Materials (ASTM) em conjunto com o RCRBSJ preparou uma especificação para os materiais dos parafusos de alta resistência. Com isso, o conceito de parafusos de alta resistência e um sumário de pesquisas e procedimentos, foi apresentado para engenheiros e para a indústria de estruturas de aço.
1951	RCRBSJ preparou e emitiu sua primeira especificação para ligações estruturais usando parafusos de alta resistência, e os parafusos de alta resistência foram então adotados para construção de estruturas de edifícios e pontes, tanto para ações estáticas quanto para ações dinâmicas. Essa especificação também permitiu a substituição dos rebites, que nesta época eram largamente utilizados, por parafusos, na base de um para um. Foi assumida a transferência de forças por atrito em todas as ligações sob condições de serviço e o fator de segurança contra deslizamento foi estabelecido em um nível elevado, de tal maneira que o comportamento à fadiga foi similar ou superior àquele mostrado nas ligações rebitadas.
1954	Revisão foi feita nas especificações para incluir o uso de arruelas planas em superfícies inclinadas em 1:20 e para permitir o uso de chaves de impacto para a instalação de parafusos de alta resistência. Esta revisão permitiu que as superfícies em contato fossem pintadas, quando fossem especificadas conexões por contato.

1956	As experiências obtidas em laboratório e em construção de pontes capacitaram o German Committee for Structural Steel work (GCSS) a emitir um código preliminar de aplicação. Já na Grã-Bretanha, a evolução das aplicações e das especificações foi similar à que ocorreu nos Estados Unidos.
1959	Na Grã, a evolução das aplicações e das especificações foi similar à que ocorreu nos Estados Unidos. O British Standards Institution emitiu uma British Standard (BS) 3139 relacionando o material dos parafusos.
1960	ABS 3294 foi emitida estabelecendo o procedimento de projeto e a prática de campo (execução). O método da rotação da porca foi introduzido como uma alternativa para o método da chave calibrada previamente requerido.
1962	O uso obrigatório de arruelas foi eliminado, exceto em situações especiais.
1964	Os parafusos A490, mais resistentes, foram introduzidos.
1976	Significativas mudanças foram feitas neste período quando resistências mais elevadas de parafusos foram reconhecidas, e outras resistências foram admitidas para parafusos usados em outros tipos de furos, diferentes do furo padrão.

Esses parafusos não somente tornaram-se rapidamente o principal dispositivo de execução de conexões em campo, como também passaram a ser amplamente utilizados na fábrica. Na figura 2.1 mostra os dois modelos mais utilizados.

Parafuso Sextavado rosca parcial Porca



Parafuso Sextavado rosca inteira

Arruela

Fig. 2.1–Modelo de parafuso

Fonte: IME-2010.

3-TEORIA SOBRE LIGAÇÕES DE AÇO

Nas estruturas de aço, as ligações entre pilar e viga são usualmente classificadas de acordo com a relação entre o momento fletor atuante e a rotação relativa entre estes elementos, após a aplicação do carregamento CUNHA (1985).

De acordo com Tschemmerneegg e Humer, as ligações podem ser classificadas em três grupos distintos. Se a rotação relativa varia muito pouco, mesmo quando o momento fletor na viga (M) atinge 80% de seu momento de plastificação ($M_p l$), a ligação é classificada como rígida. Se a rotação relativa varia consideravelmente para um momento atuante na viga de apenas 20% do momento de plastificação, a ligação é classificada como flexível. As demais ligações, com comportamento situado entre as rígidas e as flexíveis, são classificadas como semi-rígidas PFIEL (2012).

Na prática, são quase sempre utilizadas ligações classificadas como rígidas ou flexíveis. No primeiro caso, considera-se simplificada, na análise estrutural, que o ângulo original entre a viga e o pilar mantém-se inalterado para qualquer intensidade de carregamento e no segundo caso, que a rotação relativa entre estes componentes estruturais não possui nenhuma restrição. Muitas vezes, inclusive, ligações que deveriam ser classificadas como semi-rígidas são tratadas inadequadamente como flexíveis ou rígidas CUNHA (1985).

Devido a essas simplificações, nas estruturas com ligações classificadas como rígidas são ignorados a redução do momento fletor imposto aos elementos de apoio (pilares), o aumento do momento positivo na região central das vigas, a redução da capacidade de resistência dos pilares à flambagem e o aumento dos deslocamentos. Nas estruturas com ligações classificadas como flexíveis, são desprezados os momentos fletores impostos aos elementos de apoio, a redução do momento positivo na região central das vigas, o aumento da resistência dos pilares à flambagem e a redução dos deslocamentos. Nas estruturas em que as ligações são de fato semi-rígidas, os resultados podem fugir bastante à realidade RODRIGUES (1981).

No entanto, tem sido crescente a tendência de se tratar todas as ligações como semi-rígidas, ou seja, de levar-se em conta a rigidez real das ligações, de modo que a análise possa exprimir com maior fidelidade o comportamento da estrutura, especialmente no que se refere

aos valores dos esforços solicitantes, deslocamentos e comprimentos de flambagem dos pilares.

Progressos significativos neste sentido têm sido alcançados nos últimos anos, apoiados na difusão e evolução dos computadores, no grande número de bons programas de análise estrutural disponíveis no mercado e nas instituições de pesquisa, e na crescente disponibilidade e confiabilidade de dados experimentais relacionados à rigidez real de diversos tipos de ligação CUNHA (1985).

As generalidades, onde uma conexão deve ser dimensionada de forma que a resistência de cálculo seja igual ou superior à: solicitação de cálculo e porcentagem especificada da resistência de cálculo da barra.

As ligações de barras tradicionais ou comprimidas sujeitas à solicitação de cálculo inferior a 40 kN, excetuando-se diagonais de travejamento de barras compostas, tirantes constituídos de barras redondas e elementos secundários em geral, devem ser dimensionadas para uma solicitação de cálculo igual a 40kN CUNHA (1985).

Ligações de barras tracionadas ou comprimidas, além de resistirem às forças normais de cálculo na barra, devem ser dimensionadas também para forças de cálculo iguais a 50% das resistências de cálculo da barra aos tipos de força normal (tração ou compressão) que nela atuam PFEIL (2012).

As conexões parafusadas podem ser de dois tipos: **Contato** (bearing-type) e **Atrito** (friction-type), onde o contato é utilizado em parafusos comuns ou de alta resistência, já que estes são instalados sem aperto controlado (protensão). E o de atrito apenas em parafusos de alta resistência, uma vez que a resistência ao deslizamento está diretamente ligada à protensão aplicada aos parafusos.

Nas ligações rígidas Nessas ligações, supõe-se que o momento fletor da extremidade da viga (M) e a força normal (N) são resistidos através de esforços concentrados de tração (T) e compressão (C) nas linhas de centro das mesas superior e inferior da viga, enquanto a força cortante (V) é resistida pela alma da viga. Pfeil (2012)

Nas ligações parafusadas, serão sempre usados quatro parafusos simetricamente dispostos em volta da mesa tracionada da viga. Junto à mesa comprimida podem ser usados apenas dois parafusos.

3.1 O aço e suas propriedades

Em relação a sua elasticidade, apresenta uma propriedade do material a retornar à forma original, uma vez removida a força externa atuante. A sua plasticidade possui uma propriedade inversa à da elasticidade, do material não voltar à sua forma original.

A Ductilidade do aço apresenta uma capacidade do material de deformar antes que ocorra a ruptura do mesmo; e a sua fragilidade é o oposto a ductilidade, característica do material de romper bruscamente.

A sua resiliência mostra uma capacidade do material de absorver a energia mecânica em regime elástico, e a sua tenacidade é a energia total, plástica ou elástica, que o material pode absorver até a ruptura.

O aço na sua fluência mostra ajustes plásticos que podem ocorrer em pontos de tensão, ao longo dos contornos dos grãos do material. A sua fadiga é a ruptura do material sob esforços repetitivos ou cíclicos. O aço na sua dureza revela a resistência ao risco de abrasão. PFEIL (2012).

Atualmente são vários os perfis disponíveis para o uso em estruturas metálicas, podendo os mesmos ser laminados, ou seja, obtidos no mercado com formato específico como perfil U, ou H, soldados, ou ainda de chapa dobrada, onde com chapa na espessura desejada, molda-se o perfil através do processo de conformação a frio, por meio de maquinário específico.

As ligações em estruturas metálicas são constituídas por dois tipos de componentes: os elementos de ligação e os dispositivos de ligação. As ligações em estruturas metálicas são constituídas por dois tipos de componentes: os elementos de ligação e os dispositivos de ligação.

Os dispositivos de ligação são os componentes que proporcionam a união entre os elementos de ligação e as partes da estrutura que se deseja conectar, entre estes componentes têm-se as soldas e os conectores. Esses conectores, de uma maneira geral, são divididos em parafusos comuns e de alta resistência, rebites e barras rosqueadas.

3.2 Vantagens e desvantagens das ligações em aço parafusadas

As ligações parafusadas permitem montagens mais rápidas e versáteis sendo de fácil inspeção e padronização. Permitem desmontagens para alteração e reparo, gerando uma economia de energia e sua execução não necessita de mão de obra tão qualificada.

As desvantagens são distribuição de tensão não uniforme nas peças ligadas; concentração violenta de tensão, principalmente nas roscas dos parafusos; necessidade de pré-montagem e dificuldade para modificações.

3.3 Parafusos ASTM A-325

ASTM A325 (American Society for Testing and Materials) é uma norma Internacional padrão para parafusos pesados, parafusos sextavados estruturais, intitulado Especificação padrão para parafusos estruturais de aço conforme fig.3.1. Específico para a montagem de estruturas, suas principais características que o diferenciam dos parafusos de aplicação geral são o tamanho da cabeça e o comprimento do corpo, tornando possível deslocar a rosca para fora de todos os planos de cisalhamento, exceto no caso de peças finas externas adjacentes à porca. A inclusão de parte da saída de rosca no plano de cisalhamento é permissível, desde que seja evitado que a porca atinja a saída de rosca, caso isso aconteça, torna-se necessário o uso de arruelas lisas.

O parafuso sextavado é diferenciado dos outros (parafusos de cabeça abaulada, fenda, estrela, etc) onde o seu topo apresenta forma hexagonal, permitindo que durante a sua utilização seja possível exercer uma grande pressão nas ligações, garantindo a integridade de estruturas mais exigentes em relação aos esforços a que podem ser submetidas.

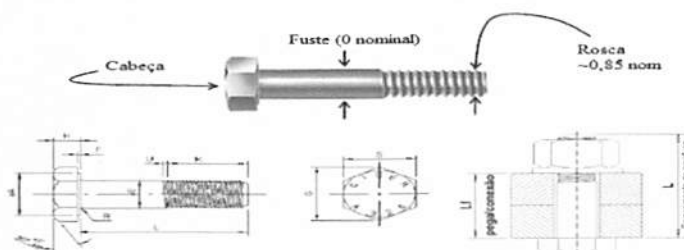


Fig. 3.1 - Descrição geral dos parafusos. Fonte: IME-2010.

3.4 Dimensões dos parafusos estruturais

A figura 3.2 apresenta dados sobre as dimensões dos parafusos para ligações estruturais, para aço ASTM A325, ASTM 490, conforme o Instituto Militar de Engenharia.

NOMINAL		1/2	5/8	3/4	7/8	1"	1.1/8	1.1/4	1.3/8	1.1/2
Fios/Polegadas		13	11	10	9	8	7	7	6	6
d	min.	12,24	15,37	18,52	21,64	24,79	27,89	31,06	34,16	37,34
	max.	13,08	16,30	19,51	22,73	25,96	29,18	32,43	35,66	38,89
S	min.	21,6	26,2	30,8	35,4	40,0	44,6	49,3	53,8	58,4
	max.	22,2	27,0	31,7	36,5	41,3	46,0	50,8	55,6	60,3
H	min.	7,7	9,6	11,6	13,5	15,0	16,7	19,1	20,6	22,9
	max.	8,2	10,2	12,3	14,3	15,9	18,2	20,6	22,3	24,7
C	min.	24,6	29,8	35,1	40,4	45,6	50,9	56,1	61,4	66,6
	max.	25,6	31,2	36,6	42,2	47,6	53,2	58,6	64,2	69,6
D	min.	20,0	24,4	28,5	32,9	37,1	41,4	45,8	50,0	54,2
	max.	21,1	25,7	30,1	34,7	39,2	43,7	48,3	52,8	57,3
R	min.	0,3	0,6	0,6	0,8	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
	max.	0,8	1,6	1,6	1,6	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
b	básico	25,4	31,7	35,0	38,1	44,5	50,8	50,8	57,2	57,2
E	max.	4,8	5,6	6,3	7,1	7,9	8,6	9,6	11,2	11,2
tolerância	menor 6"	+ 0 / - 3		+ 0 / - 4,7			+ 0 / - 6,3			
para L	maior 6"	+ 0 - 4,7				+ 0 / - 6,6				

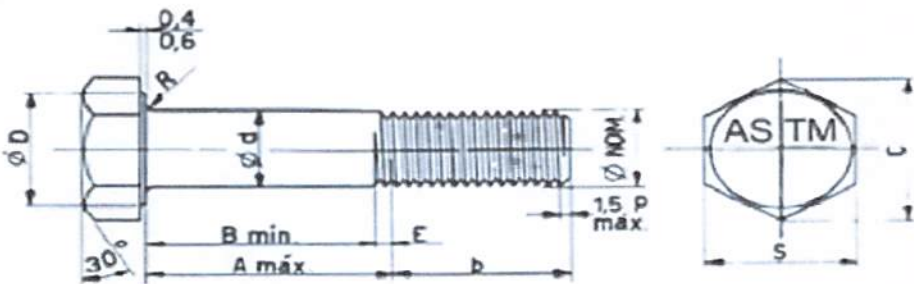


Fig. 3.2 - Ligações Parafusadas – Resistência dos Parafusos. Fonte: IME-2010.

3.5 Cálculo do Parafuso – Resistências de Cálculo

A norma NBR 8800/2008 apresenta a tabela abaixo – Tabela 2.1, como parâmetro para resistência de cálculo dos parafusos estruturais, tendo em vista suas resistências quanto à ruptura (f_{ub}) e escoamento do aço (f_y) em relação ao fuste do parafuso.

Tabela 3.1 - Cálculo do parafuso – Resistência de cálculo – NBR 8800/2008. Fonte:IME-2010

Especificação	f_{yb}	f_{ub}	Diâmetro d_b	
	MPa	MPa	mm	pol
ASTM A307	-	415	-	$1/2 \leq d_b \leq 4$
ISO 898-1 Classe 4.6	235	400	$12 \leq d_b \leq 36$	-
ASTM A325 ^a	635	825	$16 \leq d_b \leq 24$	$1/2 \leq d_b \leq 1$
	560	725	$24 < d_b \leq 36$	$1 < d_b \leq 1 \frac{1}{2}$
ISO 4016 Classe 8.8	640	800	$12 \leq d_b \leq 36$	-
ASTM A490	895	1035	$16 \leq d_b \leq 36$	$1/2 \leq d_b \leq 1 \frac{1}{2}$
ISO 4016 Classe 10.9	900	1000	$12 \leq d_b \leq 36$	-

Segundo IME (2010) onde se lê ^(a) entende-se que os disponíveis também com resistência à corrosão comparável à dos aços AR 350 COR ou à dos aços ASTM A588.

3.6 Ligações Parafusadas - Classificação quanto à solicitação

Os valores dos coeficientes de ponderação das resistências (γ_m) do aço estrutural são dados na fig. 2.5, onde o calculista usa a resistência característica do projeto, avaliando os coeficientes e através destes, encontra a resistência de cálculo para ser estabelecida em seus cálculos.

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m}$$

f_d - resistência de cálculo ou projeto

f_k - resistência característica

γ_m - coeficiente de ponderação

Combinações	Aço estrutural, pinos e parafusos	
	Escoamento e Instabilidade	Ruptura
Normais	1,10	1,35
Especiais ou de construção	1,10	1,35
Excepcionais	1,00	1,15

Fig. 3.3 - Ligações Parafusadas - Classificação quanto à solicitação.
Fonte: IME-2010.

3.7 Ligações Parafusadas – Quanto ao tipo

3.7.1 Tipo contato – (bearing-type)

Onde são utilizados parafusos de alta resistência mesmo sem aperto que seja controlado (protensão). Conforme ilustra figura 3.4.

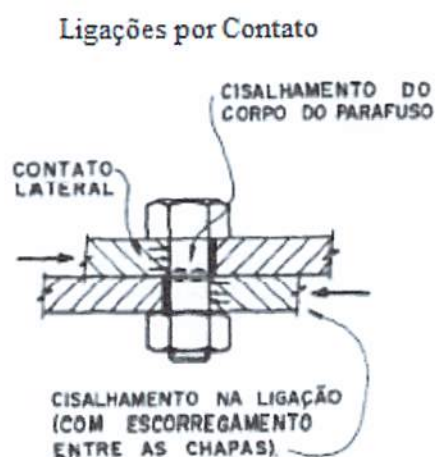


Fig.3.4 - Ligações por contato. Fonte: IME-2010

3.7.1.1 Tração

Adotando parafusos de alta resistência (ASTM A325 e A490) o cálculo para tração é dado pela fórmula:

Para diâmetro nominais inferiores a 25mm

$$T = 0,75 A_g f_u$$

Para diâmetro nominais superiores a 25mm:

$$T = 0,95 A_e f_u$$

3.7.1.2 Força cortante

Resistência ao Cisalhamento - O cisalhamento é a forma mais comum de solicitação de um parafuso e pode ser resistida por parafusos de alta resistência tanto por atrito quanto por corte.

Para o cálculo da resistência à força cortante devem-se considerar dois estados limites últimos:

- Cisalhamento do corpo do parafuso.

Parafusos A325 e A490 – quando o plano de corte passa pela rosca.

$$R_d = \begin{cases} 0,4 \frac{A_b f_{ut}}{\gamma_{a2}} & \text{Parafusos A307, parafusos A325N (corte na rosca)} \\ 0,5 \frac{A_b f_{ut}}{\gamma_{a2}} & \text{Parafusos A325X (corte no fuste)} \end{cases}$$

Fig. 3.5 - Resistência de Cálculo devido ao corte do parafuso. Fonte: IME-2010.

Na ilustração abaixo fig. 3.6, demonstra o cisalhamento no parafuso quando tracionado as peças que recebem a força (F).

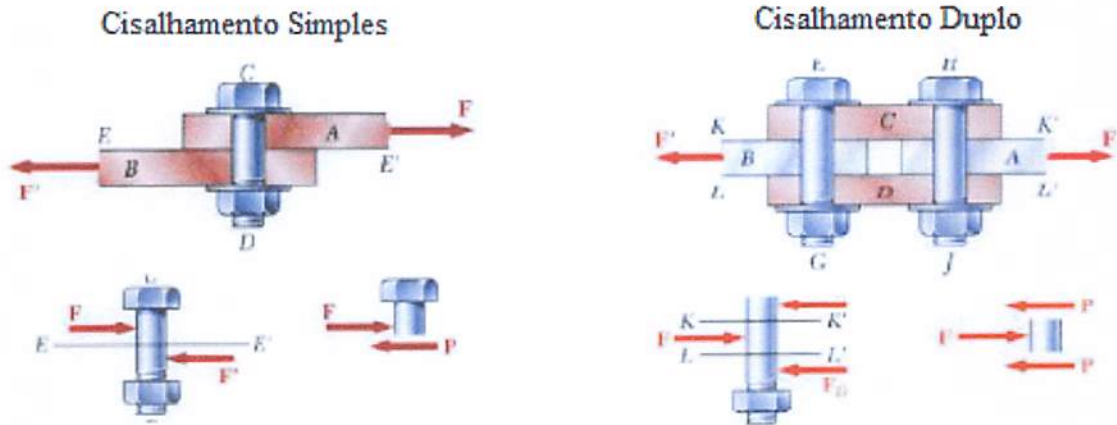
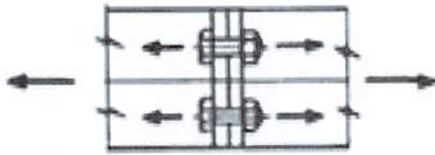


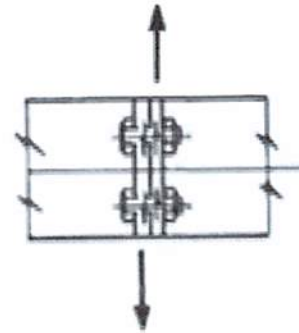
Fig.3.6 - Ligações onde há cisalhamento Fonte: IME-2010.

Na figura 3.7 demonstra a solicitação atuante nos parafusos:

Classificação quanto à solicitação:



(a) Tração nos parafusos



(b) Cisalhamento nos parafusos

Fig. 3.7 – Forças atuantes nas ligações Fonte: IME-2010.

O parafuso rompe devido à presença de uma tensão de cisalhamento superior à resistência de cálculo, demonstrado na figura 3.8.

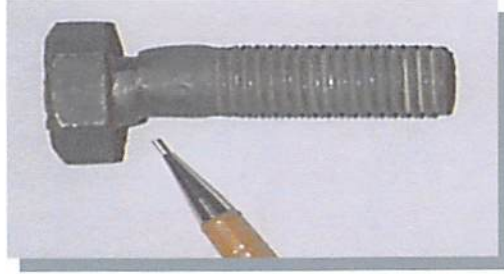


Fig.3.8 – Falha de um parafuso em cisalhamento simples Fonte: UFF - 2010

3.7.1.3 Resistência à pressão de contato em furos

A força resistente de cálculo à pressão de contato na parede de um furo, já levando em conta o rasgamento entre dois furos consecutivos ou entre um furo externo e a borda, é dada por:

A resistência de cálculo é dada por:

$$R_d = 0,75 A_p f_u$$

Sendo:

$\alpha = 3,0$ - para esmagamento (sem possibilidade de rasgamento).

$\alpha = (e/d) - n_2 \leq 3,0$ - para rasgamento entre furo e a borda.

$\alpha = (s/d) - n_1 \leq 3,0$ - para rasgamento entre dois furos consecutivamente.

$A_p = d \cdot t$

d = diâmetro nominal do fuste do parafuso (EESC-USP/2000)

t = espessura da chapa

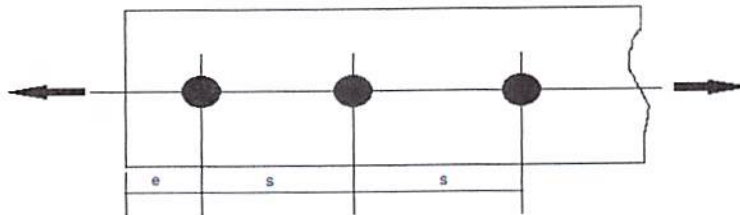


Fig. 3.9 – Dimensões “e” e “s” numa chapa. Fonte: UFF - 2010

3.7.1.4 Tração e cortante combinadas

Quando um parafuso estiver sujeito a uma ação simultânea de força cortante e tração, além das verificações de tração e força cortante apresentados anteriormente para os esforços isolados, há necessidade de verificar a exigência conforme a tabela 3.2 abaixo:

Tabela 3.2 - Tabela para tração e cortante combinadas
Fonte: Escola de Engenharia de São Carlos – USP

Tipo de parafuso	Limitação da resistência à tração	Nota
ASTM A325/A490	$T \leq A_p f_u - 1,93 V_d$	1
ASTM A325/A490	$T \leq A_p f_u - 1,50 V_d$	2

Nota 1: Plano de corte passando pela rosca.
Nota 2: Plano de corte passando pelo fuste.
 V_d = Força cortante de cálculo no plano de corte considerado.

Onde se observa a seguinte expressão comparativa:

$$\left(\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1,0$$



Fig. 3.10 - Interação de Tração com Cisalhamento Fonte: IME-2010.

3.7.2 Tipo atrito – (friction-type)

Exclusivamente utilizados os parafusos de alta resistência, isso implica que a resistência ao deslizamento está ligada diretamente à protensão aplicada nos parafusos.

A condição básica prescrita para uma conexão atuar por atrito é a de que não ocorra deslizamento entre os seus componentes. O deslizamento entre os componentes da ligação é

admitido como sendo um estado limite de utilização, devendo ser verificado como tal, isso parta ações nominais. As ligações por atrito são utilizadas apenas quando se usa parafusos de alta resistência, sendo necessário aplicar um torque elevado no mesmo. Como demonstra a figura abaixo fig. 3.11.

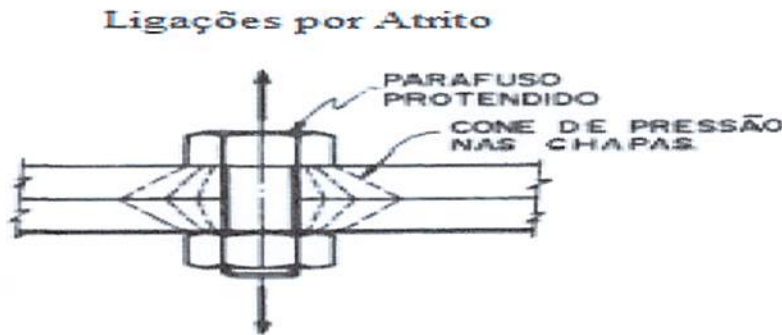


Fig. 3.11 - Ligações por atrito Fonte: IME-2010.

A resistência ao deslizamento de uma ligação com parafusos de alta resistência sujeitos á força cortante, combinada ou não com tração é dada pela fórmula.

$$R_{nv} = \mu \varepsilon (T_b - T)$$

$$T_b = 0,7 A_e f_u$$

T = força de tração no parafuso, calculada tomando por base as ações nominais e ações permanentes multiplicadas por 0,75 considerando um caso desfavorável.

μ = coeficiente de atrito – mais usado 0,28. (adimensional)

ε = fator de redução devido ao tipo de furo. Sendo adotado furo padrão $\varepsilon = 1,0$

A figura 3.12, faz a demonstração das transferências de cargas e a resistência por atrito nas chapas tracionadas, fazendo menção das furações com a respectiva folga normatizada pela norma NBR 8800/2008.

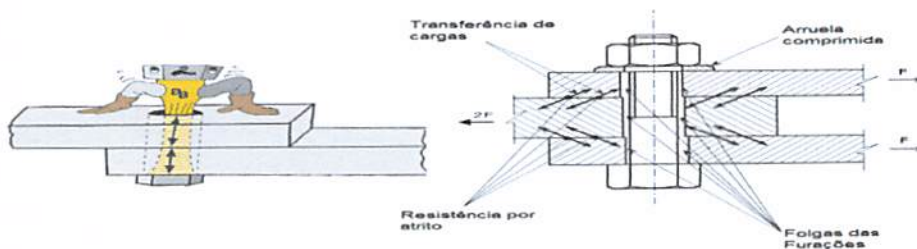


Fig. 3.12 - Ligações por atrito Fonte: IME-2010.

3.7.2.1Aperto do parafuso

3.7.2.1.1 Torquímetro – Chave calibrada

Conforme IME (2010) a chave de torque calibrada (torquímetro-estalo/sinal/relógio) mostrada nas figuras 3.12 e 3.13. As chaves devem ser calibradas pelo menos uma vez por dia de trabalho para cada diâmetro de parafuso a instalar. Segundo a NBR 8800/2008 os parafusos de alta resistência devem ser apertados de forma a obter uma força mínima de protensão (F_{Tb}) adequada a cada diâmetro e tipo de parafuso usado essa força de protensão é detalhada conforme a tabela 4 para os parafusos ASTM e equivale a aproximadamente 70% da força de tração resistente nominal do parafuso. A aplicação das forças deve ser pelo método da força de rotação na porca, na chave calibrada ou do indicador direto de tração.

Quadro 3.1 – Força de protensão mínima em parafusos ASTM. Fonte: NBR 8800/2008

Diâmetro d_b		F_{Tb} kN	
pol	mm	ASTM A325	ASTM A490
1/2		53	66
5/8		85	106
	16	91	114
3/4		125	156
	20	142	179
	22	176	221
7/8		173	216
	24	205	257
1		227	283
	27	267	334
1 1/8		250	357
	30	326	408
1 1/4		317	453
	36	475	595
1 1/2		460	659



Fig. 3.13 – Torquímetro para ligações parafusadas por atrito Fonte: IME-2010.

3.7.2.1.2 Rotação da porca

Quando for usado o método de aperto pela rotação da porca para aplicar a força de protensão mínima especificada, deve haver número suficiente de parafusos na condição de pré-torque, de forma a garantir que as partes estejam em pleno contato. A condição de pré-torque é definida como o aperto obtido após poucos impactos aplicados por uma chave de impacto, ou pelo esforço máximo aplicado por um operário usando uma chave normal. Após esta operação inicial, devem ser colocados parafusos nos furos restantes e tais parafusos também levados à condição de pré-torque. Todos os parafusos da ligação, devem então receber um aperto adicional, através da rotação aplicável da porca, como indicado. Devendo essa operação começar na parte mais rígida da ligação e prosseguir em direção às bordas livres. Durante essa operação, a parte oposta àquela em que se aplica a rotação não pode girar. Exemplificado na figura 3.14. IME (2010).

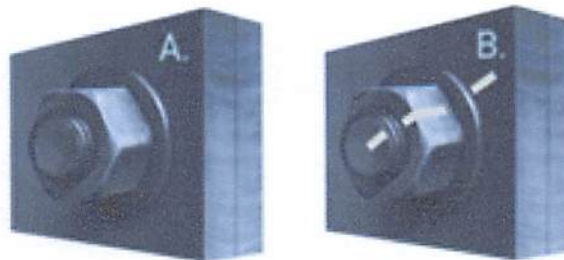


Fig. 3.14 - aperto do parafuso Fonte: IME-2010.

3.7.2.1.3 Arruela com indicador de carga (DTI)

O **Indicador Direto de Tensão (DTI)** fig. 3.15 - é um dispositivo de aço na forma de arruela, com protuberâncias numa das faces e depressões na face oposta. São utilizados como método para garantir a obtenção da tensão mínima especificada nos parafusos de alta resistência, principalmente em estruturas metálicas, mas também tem sido adotado nas indústrias petroquímicas e de automação.



Figura 3.15 (DTI) – indicador direto de Tensão (frente e verso) Fonte: UFF – 2010

A figura 3.16 demonstra o uso do DTI, de forma que a situação primeira o parafuso não está ainda na no torque pretendido e a segunda apresenta já a deformação da arruela e diminuição do vão.

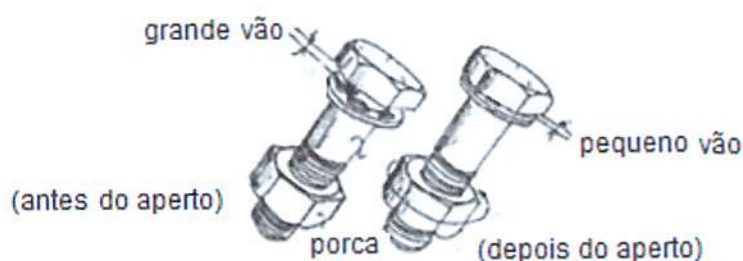


Figura 3.16 (DTI) – indicador direto de Tensão – antes e depois do aperto Fonte: UFF - 2010

“O IME (2010) relata que para parafusos não revestidos e quando o DTI está instalado sob a cabeça do parafuso, a porca é girada para apertar devendo certificar que o gabarito de 0,015”mm não vai entrar pelo menos em metade da arruela, fig. 3.17. Isso significa que a

diferença DTI residual é menor que uma folga de 0,015”mm, atendendo as exigências da norma NBR 8800/2008, conforme tabela 2.3.

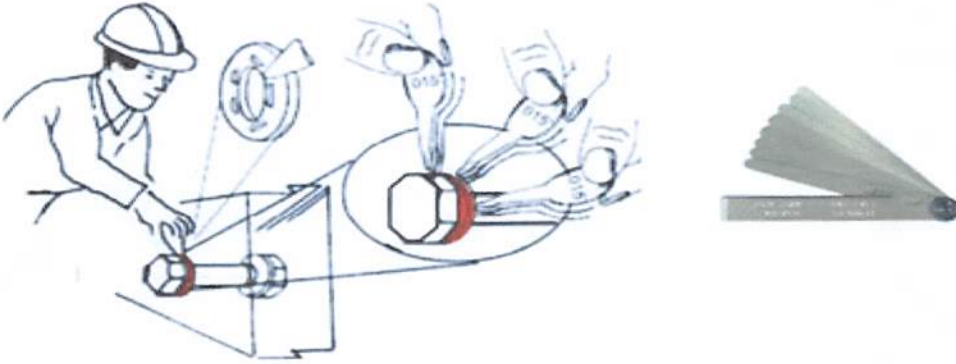


Fig. 3.17 - ligações parafusadas Fonte: IME-2010

3.8 Colapso por tração ou rasgamento

As possibilidades de colapso por rasgamento nas cantoneiras e na chapa de gusse (chapa de junção), para o estado limite de colapso por rasgamento, a força resistente é determinada pela soma das forças resistentes ao cisalhamento de uma ou mais linhas de falha e à tração em um segmento perpendicular conforme fig. 3.18. A força resistente de cálculo ao colapso por rasgamento é dada por:

$$F_{r,Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 f_u A_{nv} + C_{ts} f_u A_{nt}) \leq \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 f_y A_{gv} + C_{ts} f_u A_{nt})$$

Onde:

A_{gv} = área bruta sujeita a cisalhamento;

A_{nv} = área líquida sujeita a cisalhamento;

A_{nt} = área líquida sujeita à tração;

$C_{ts} = 1,0$ quando a tensão de tração na área líquida for uniforme e igual a 0,5 quando não for uniforme.

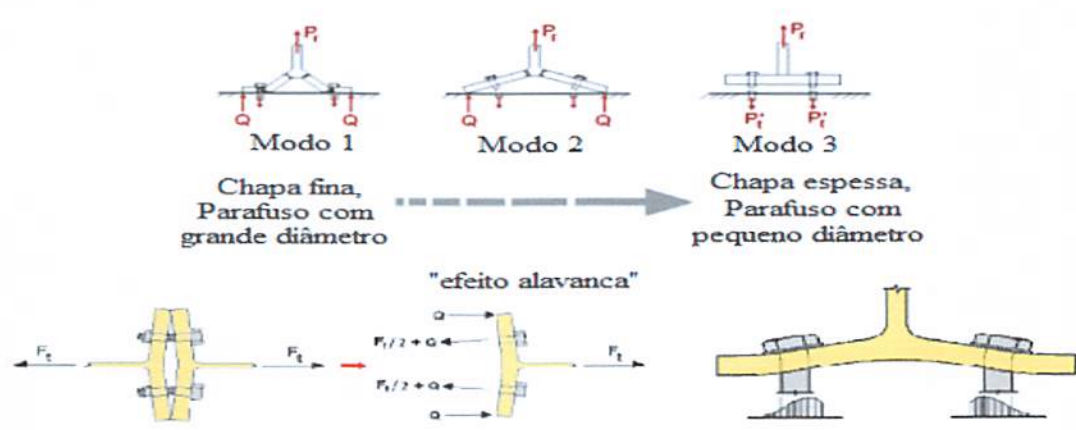


Fig. 3.18- Colapso por tração e efeito alavanca Fonte: IME-2010.

A figura 3.19, apresenta um rasgamento da chapa, onde o parafuso fora calculado com fuste maior e a tração sofrida pela chapa foi superior à que a mesma suportaria.

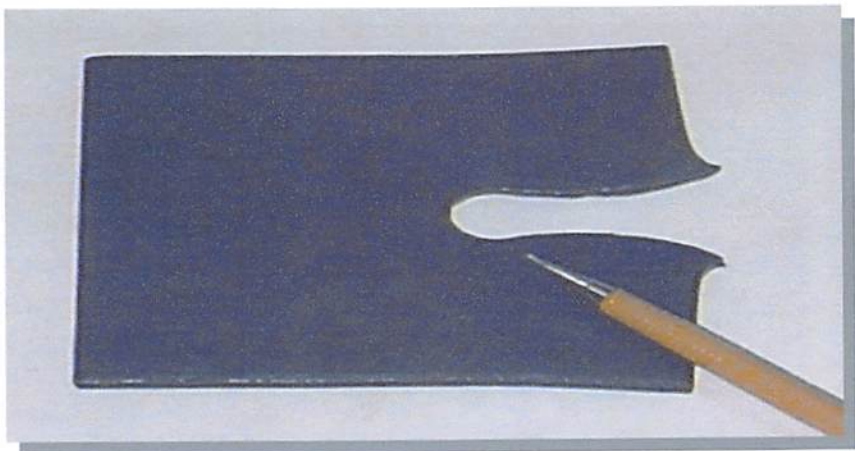


Fig. 3.19 – Rasgamento da chapa Fonte: UFF - 2010

Na fig. 3.20 é apresentado a esforço que o parafuso sofre levando-o a colapso. Na primeira imagem a chapa fina e o parafuso de fuste maior, a chapa traciona-se. Na segunda imagem a chapa com maior espessura suporta o efeito alavanca e a tração fadiga o parafuso levando-o ao rompimento.



Fig. 3.20 - Colapso por tração, com efeito, alavanca nos parafusos. Fonte: IME-2010.

3.8.1 Efeito alavanca (“pryingaction”)

O efeito alavanca se dá devido à excentricidade entre a força externa aplicada e a linha de ação do parafuso, surgindo um acréscimo na força de tração exercida no parafuso. Convém ressaltar que a intensidade deste efeito está relacionada com o suporte de rigidez à flexão entre as partes envolvidas, chapas e parafusos. Sendo assim, quanto menor a rigidez à flexão dos elementos conectados, mais significativo será o efeito alavanca na estrutura. A fig. 3.21 apresenta as características deste efeito conforme a NBR 8800/2008.

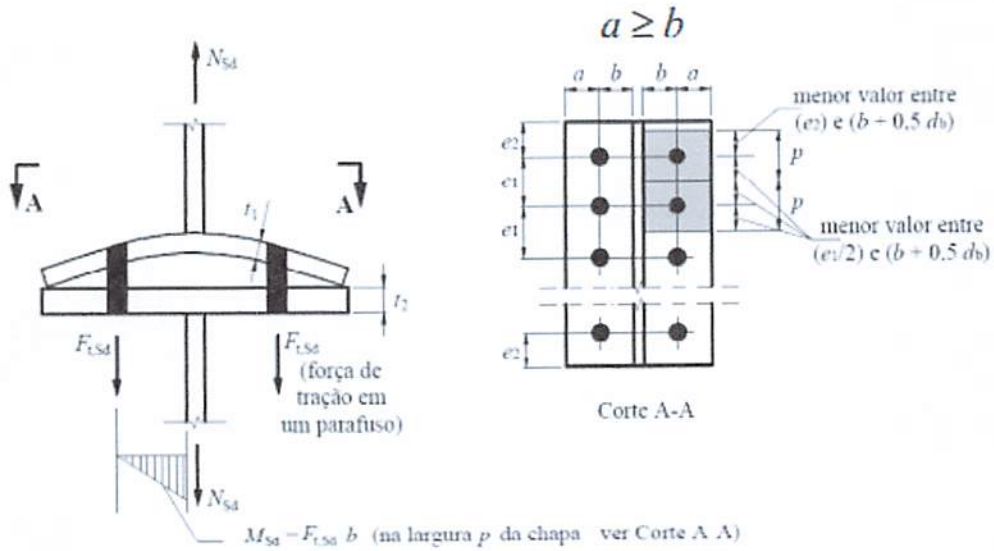
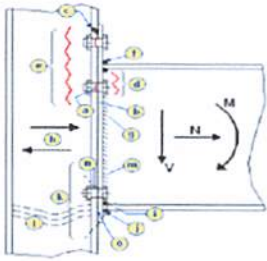


Fig. 3.21 - Efeito alavanca em parafusos Fonte: NBR 8800/2008

3.8.2 Identificação dos tipos de colapso

A fig. 3.22 demonstra os exemplos de verificações ligação rígida pilar-viga (zonas para análise) em uma ligação com chapa de topo estendida.



Região	Ref. fig	Verificação
Tracionada	a	Tração nos parafusos
	b	Flexão da chapa de topo
	c	Flexão da mesa do pilar
	d	Tração na alma da viga
	e	Tração na alma do pilar
	f	Solda mesa/chapa de topo
	g	Solda alma/chapa de topo
Cisalhamento Horizontal	h	Cisalhamento no painel de alma do pilar
Comprimida	i	Mesa da viga
	j	Solda mesa/chapa de topo
	k	Enrugamento da alma do pilar
	l	Flambagem da alma do pilar
Cisalhamento Vertical	m	Solda alma/chapa de topo
	n	Cisalhamento nos parafusos
	o	Pressão de contato (mesa ou chapa)

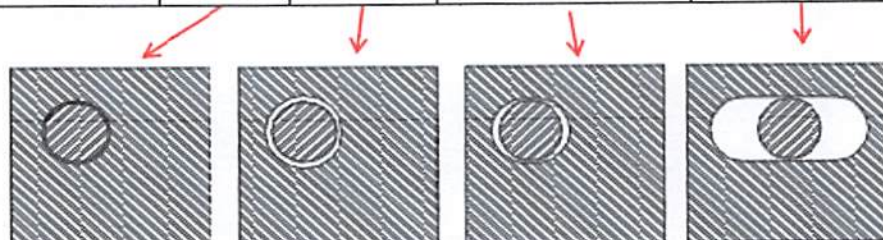
Fig. 3.22 - Exemplo de verificações ligação rígida pilar-viga Fonte: IME-2010.

3.8.3 Furação para parafusos

Atendendo a NBR 8800/2008 estabeleceu-se o seguinte critério de furação em chapas ou perfis que pode ser visto através do quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Furação para parafusos. Fonte: IME-2010.

	Diâmetro do parafuso ou barra redonda rosqueada d_b	Diâmetro do furo padrão	Diâmetro do furo alargado	Dimensões de um furo pouco alongado	Dimensões de um furo muito alongado
Dimensões em milímetro	≤ 24	$d_b + 1,5$	$d_b + 5$	$(d_b + 1,5) \times (d_b + 6)$	$(d_b + 1,5) \times 2,5 d_b$
	27	28,5	33	$28,5 \times 35$	$28,5 \times 67,5$
	≥ 30	$d_b + 1,5$	$d_b + 8$	$(d_b + 1,5) \times (d_b + 9,5)$	$(d_b + 1,5) \times 2,5 d_b$
Dimensões em polegada	$\leq 7/8$	$d_b + 1/16$	$d_b + 3/16$	$(d_b + 1/16) \times (d_b + 1/4)$	$(d_b + 1/16) \times 2,5 d_b$
	1	$1 \ 1/16$	$1 \ 1/4$	$1 \ 1/16 \times 1 \ 5/16$	$1 \ 1/16 \times 2 \ 1/2$
	$\geq 1 \ 1/8$	$d_b + 1/16$	$d_b + 5/16$	$(d_b + 1/16) \times (d_b + 3/8)$	$(d_b + 1/16) \times 2,5 d_b$



3.8.4 Limitações relativas ao emprego de furos alargados ou alongados

A norma NBR 8800/2008 traz o quadro 3.3, onde se limita o emprego de furos alargados ou alongados, tipo oblongo, Fazendo uma análise minuciosa o projetista poderá usufruir desta limitação para proceder ao bem executar do seu projeto, aprimorando o menor erro para as situações parafusadas. Em análise as estruturas apresentam o emprego destas furações para ajustar a estrutura sem ocorrer no erro de refazer as peças que a compõe.

Quadro 3.3 - Limitações relativas ao emprego de furos alargados ou alongados
Fonte: NBR 8800/2008.

Tipo de furo	Tipo de ligação permitido	Limitações	
		Posição do furo	Aruelas
Alargado	Por atrito	Em qualquer uma ou em todas as chapas de 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 aruelas; tais aruelas devem ser endurecidas quando os parafusos forem de alta resistência
	Por contato	Em qualquer uma ou em todas as chapas de 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	Aruelas de chapa ou barras chatas contínuas, de aço estrutural, com espessura mínima de 8mm e co furos padrão, devem ser usadas sobre furos muito alongados em chapas externas. Tais aruelas ou barras devem ter dimensões suficientes para cobrir totalmente os furos alongados após a instalação dos parafusos. Quando for necessário usar aruelas endurecidas, estas serão colocadas sobre aquelas aruelas 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	

3.8.4.1 Verificação na chapa devido à presença de furos

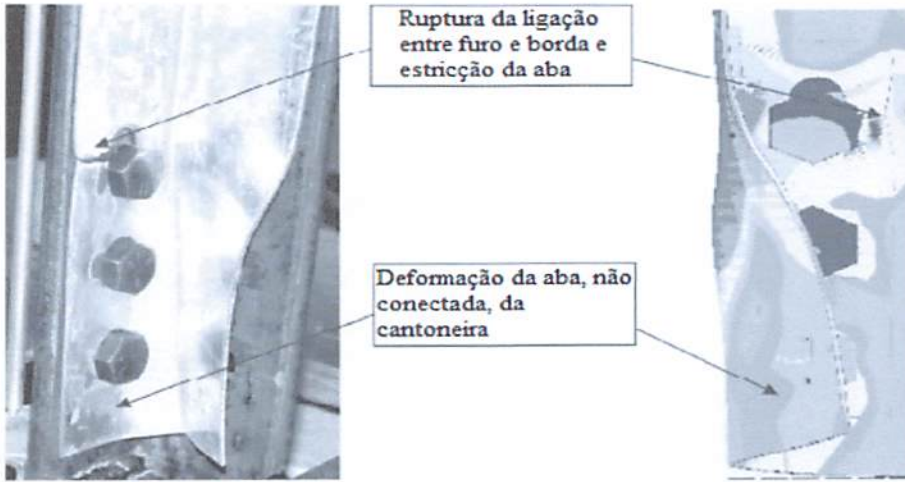


Fig. 3.23 – Deformações em chapas de cantoneira parafusadas
Fonte: Baião Filho, 2005

A figura 3.23 apresenta as deformações sofridas nas chapas onde houve rompimento da ligação furo e borda, trazendo o empenamento da chapa em cantoneira.

3.8.4.2 Espaçamento mínimo furo-borda

Segundo IME (2010) onde se lê ^(a) são permitidas distâncias inferiores às desta tabela 3.3 (abaixo), e desde que a equação aplicável de 6.3.3.3 (da norma técnica) seja satisfeita. Onde se lê ^(b) as distâncias podem ser reduzidas de 3 mm, quando o furo está em um ponto onde a força solicitante de cálculo não exceda 25% da força resistente de cálculo. ^(c) nas extremidades de cantoneiras de ligação de vigas e de chapas de extremidade para ligações flexíveis, esta distância pode ser igual a 32 mm.

Tabela 3.3 - Ligações parafusadas- Espaçamento mínimo furo-borda
Fonte: IME-2010

Diâmetro d_b		Borda cortada com serra ou tesoura (mm)	Borda laminada ou cortada a maçarico _b (mm)
Pol	Mm		
1/2		22	19
5/8	16	29	22
3/4		32	26
	20	35	27
7/8	22	38 ^c	29
	24	42 ^c	31
1		44	32
1 1/8	27	50	38
	30	53	39
1 1/4		57	42
	36	64	46
> 1 1/4	> 36	1,75 d_b	1,25 d_b

3.8.4.3 Espaçamento máximo furo-borda

A norma NBR 8800/2008 estabelece que para qualquer borda de uma parte ligada, a distância do centro do parafuso mais próximo até essa borda não pode exceder a 12 vezes a espessura da parte ligada considerada, nem 150 mm, conforme figura 3.24.

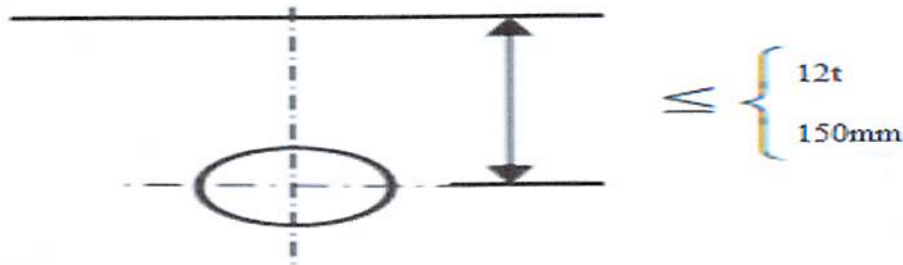


Fig. 3.24- Ligações parafusadas Fonte: IME-2010.

3.9 Compatibilidades de materiais

Algumas precauções devem ser tomadas com relação ao uso de diferentes tipos de aço em relação a uma mesma ligação. Por exemplo, evita-se a utilização de elementos com diferentes composições químicas (aços patináveis com aços carbono), sob o risco de que, em certas condições ambientais, ocorra corrosão galvânica. Esse tipo de ataque intensificará a degradação do material menos nobre, que nesse caso é o aço carbono (seja ele ASTM A 36 ou ASTM A 572).

A utilização de aços de baixa liga e alta resistência, tais como o ASTM A 572 Grau 50, implica no emprego de parafusos ASTM A 325N Tipo 1, enquanto que, para os aços patináveis, devemos utilizar obrigatoriamente parafusos ASTM A 325 Tipo 3 Grau A. PFEIL (2012).

3.10 Disposições construtivas

São utilizados os seguintes diâmetros de parafusos de alta resistência ASTM A 325N: 16 mm (5/8"), 19 mm (3/4"), 22 mm (7/8") e 25 mm (1"). São utilizados os seguintes diâmetros de furos para parafusos:

- Furo com diâmetro 18 mm para parafusos $\varnothing$ 5/8"
- Furo com diâmetro 21 mm para parafusos $\varnothing$ 3/4"
- Furo com diâmetro 24 mm para parafusos $\varnothing$ 7/8"
- Furo com diâmetro 27 mm para parafusos $\varnothing$ 1"

Adota-se preferencialmente o espaçamento padrão de 60 mm entre furos para parafusos $\varnothing$ 5/8" e de 75 mm para os demais.

Adota-se preferencialmente, a distância de 30 mm do furo à borda para parafusos $\varnothing$ 5/8" e de 40 mm para os demais.

Adota-se o gabarito de 45 mm para as cantoneiras L 76 x 76 x 6,4 e de 65 mm para as cantoneiras L 102 x 102 x 8,0.

A utilização de aços de baixa liga e alta resistência, tais como o ASTM A 572 Grau 50, implica no emprego de parafusos ASTM A 325N Tipo 1, enquanto que, para os aços

patináveis, devemos utilizar obrigatoriamente parafusos ASTM A 325 Tipo 3 Grau A.PFEIL (2012).

3.10.1 Parafusos

São utilizados os seguintes diâmetros de parafusos de alta resistência ASTM A 325N: 16 mm (5/8"), 19 mm (3/4"), 22 mm (7/8") e 25 mm (1").

3.10.2 Furos padrão para parafuso

São utilizados os seguintes diâmetros de furos para parafusos:

- Furo com diâmetro 18 mm para parafusos $\varnothing$ 5/8"
- Furo com diâmetro 21 mm para parafusos $\varnothing$ 3/4"
- Furo com diâmetro 24 mm para parafusos $\varnothing$ 7/8"
- Furo com diâmetro 27 mm para parafusos $\varnothing$ 1"

3.10.3 Espaçamento entre furos, distância do furo à borda e gabarito de furação para cantoneiras

Adota-se preferencialmente o espaçamento padrão de 60 mm entre furos para parafusos $\varnothing$ 5/8" e de 75 mm para os demais.

Adota-se preferencialmente, a distância de 30 mm do furo à borda para parafusos $\varnothing$ 5/8" e de 40 mm para os demais.

Adota-se o gabarito de 45 mm para as cantoneiras L 76 x 76 x 6,4 e de 65 mm para as cantoneiras L 102 x 102 x 8,0.

3.11 Tabelas de resistências de cálculo de parafusos

Resistência de cálculo à tração de parafusos ASTM A 325, (kN). Limite de resistência à tração do aço do parafuso: $f_u \geq 82,5 \text{ kn/cm}^2$.

Tabela 3.4 - Resistência de cálculo à tração de parafusos ASTM A 325, (kN). Fonte: Perfis Gerdau Açominas (2005)

Diâmetro nominal do parafuso, “d”, pol.	5/8”	3/4”	7/8”	1”
Área nominal do parafuso, cm ²	1,98	2,85	3,88	5,07
Resistência de cálculo, “φR”, KN	91,9	132,3	180,1	235,3

A tabela abaixo – tab. 3.5 demonstra a resistência de cálculo ao cisalhamento simples de um parafuso ASTM A 325, (kN). Com limite de resistência à tração do aço do parafuso: $f_u \geq 82,5 \text{ kn/cm}^2$.

No caso de existir cisalhamento duplo (quando um parafuso tem duas seções de corte) a resistência de cada parafuso será o dobro do valor obtido da tabela.

Tabela 3.5 - Resistência de cálculo ao cisalhamento simples de um parafuso ASTM A 325, (kN). Fonte: Perfis Gerdau Açominas (2005)

Diâmetro nominal do parafuso, “d”, pol.	5/8”	3/4”	7/8”	1”
Área nominal do parafuso, cm ²	1,98	2,85	3,88	5,07
Resistência de cálculo, “φR”, KN	44,6	64,2	87,4	114,2

A tabela 3.6 apresenta a resistência de cálculo ao esmagamento com rasgamento entre os furos padrão, (kN), considerando a espessura da chapa igual a 1 cm e a distância entre parafusos, “s”, igual a 3,0 vezes o diâmetro “d” do parafuso. Para espessuras diferentes de 1 cm, a resistência de cálculo será o produto do valor da tabela 2.8 pela espessura (em cm) da chapa.

Tabela 3.6 - Resistência de cálculo ao esmagamento com rasgamento entre furos padrão, (kN). Fonte: Perfis Gerdau Açominas (2005)

Diâmetro nominal do parafuso, “d”, pol.	5/8”	3/4”	7/8”	1”
Aço ASTM A 36	114,3	137,2	160,0	182,9
Aço ASTM A 572 – Grau 50	128,6	154,4	180,0	205,8

A tabela 3.7 apresenta a resistência de cálculo ao esmagamento com rasgamento entre os furos padrão e borda, (kN), considerando a espessura da chapa igual a 1 cm e a distância entre furos e borda, “e”, igual a 1,5 vezes o diâmetro “d” do parafuso. Para espessuras diferentes de 1 cm, a resistência de cálculo será o produto do valor da tabela 2.9 pela espessura (em cm) da chapa.

Tabela 3.7 - Resistência de cálculo ao esmagamento com rasgamento entre furos padrão, (kN). Fonte: Perfis Gerdau Açominas (2005)

Diâmetro nominal do parafuso, “d”, pol.	5/8”	3/4”	7/8”	1”
Aço ASTM A 36	71,4	85,7	100,0	114,3
Aço ASTM A 572 – Grau 50	80,3	96,4	11,5	128,6

4 - OBRA EXECUTADA EM ANÁPOLIS – GOIÁS

A PONTES Construtivos Metálicos está situada na região Centro-Oeste, mais precisamente em Anápolis, Goiás. Iniciou seus trabalhos no início dos anos 90 sendo chamada, inicialmente, de A Estrutural, com seu foco voltado para obras de infra-estrutura metálica.

Com a crescente demanda do mercado nacional por obras que agregassem agilidade, pontualidade, qualidade, estética e viabilidade econômica, surgiu a necessidade de diversificação da linha de produtos acabados, sendo dada ênfase às estruturas metálicas de cobertura de grande porte.

Atualmente a PONTES apresenta índices de produtividade que atendem às expectativas dos clientes, que com o passar do tempo, mostram-se fiéis e altamente satisfeitos. A empresa fornece produtos que primam pela qualidade resultante do uso de matéria prima certificada e mão-de-obra especializada

A atuação da empresa está voltada às novas tendências do mercado ligadas às novidades tecnológicas que permitem soluções inteligentes, inovadoras e economicamente viáveis.

Segue abaixo imagens de algumas obras, obedecendo à norma NBR 8800/2008, executada pela empresa supracitada.



Fig. 4.1– Montagem de estrutura
Fonte: Pontes Construtivos metálicos



Fig. 4.2 – Montagem de estrutura Fonte: Pontes Construtivas metálicos



Fig. 4.3 – montagem de estrutura
Fonte: Pontes Construtivas metálicos



Fig. 4.4 – Montagem de estrutura
Fonte: Pontes Construtivas metálicos



Fig. 4.5 – Montagem da estrutura Fonte: Pontes Construtivas metálicos



Fig.4.6 – Montagem da estrutura Fonte: Pontes Construtivas metálicos



Fig. 4.7 – Montagem da estrutura
Fonte: Pontes Construtivas metálicos



Fig.4.8 – montagem da estrutura
Fonte: Pontes Construtivas metálicos

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ligação de barras tradicionais ou comprimidas estabelece uma condição de compatibilidade entre resistência da barra e da ligação, independentemente do valor da solicitação. A conexão deve pelo menos apresentar uma resistência de cálculo igual à metade da resistência do cálculo da barra CUNHA (1985).

Do ponto de vista econômico, as juntas soldadas normalmente são mais interessantes que as parafusadas, pois conduzem a detalhes mais simples e envolvem uma menor quantidade de elementos (chapas de topo, cobre juntas, entre outros). Entretanto, requer mão-de-obra mais qualificada e particulares condições de execução, o que as tornam muitas vezes inadequadas para o trabalho de campo (obra).

Nas publicações mais antigas, é comum encontrar a seguinte observação: as ligações soldadas são mais interessantes para a execução em fábrica e as ligações parafusadas para execução na obra.

Mas, diante deste estudo, com a norma que o norteia, percebe-se que com o avanço e a automatização dos processos de soldagem, assim como dos meios de inspeção e controle de qualidade, a tendência é de que as ligações soldadas passem a ser cada vez mais interessantes nas ligações de obra.

Em grande maioria das estruturas metálicas é inevitável a execução de emendas em barras, perfis e outras, pois o seu comprimento está entre 6 e 12 m disponível no mercado. Há também a dificuldade de transporte e montagem dos elementos com dimensões altas. Desta forma se faz valer as ligações parafusadas, pois atendem bem essa demanda, projetadas para resistirem aos esforços solicitantes atuantes nas barras, evitando o colapso ou concentração de tensão. Além de facilitar a execução na obra.

Com isso o construtor deve perceber que de nada adianta projetar adequadamente as barras de uma estrutura se suas ligações são utilizadas de maneira inadequada. As ligações parafusadas em aço sempre implicaram em necessidades de cálculos precisos atendendo a um bom dimensionamento em relação à estrutura a ser montada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAIÃO FILHO, Oswaldo Teixeira. SILVA, Antonio Carlos Viana. *Ligações Para Estruturas de Aço* - Guia Prático para Estruturas com Perfis Laminados. 2. Ed, São Paulo, SP, 2005. 276p.

BUIFFONI, SALETE SOUZA DE OLIVEIRA, Resistência dos materiais, ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA – UFF, <http://www.professores.uff.br/salete/res1/aula3.pdf>, acessado 02 dez 2013, às 14:00hs.

CHIAVERINI, Vicente. *Aços e Ferros Fundidos*. 7ª ed. São Paulo. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2008.

COSTA E SILVA, André Luiz V. da. MEI, Paulo Roberto. *Aços e Ligas Especiais*. 3ª edição revista. 2010.

CUNHA, L.J.G. *Solda: como, quando e por quê*. Porto Alegre, Sagra Editora, 1ª Ed. 1985.

IME - INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA-BRASIL – MAJ. MONIZ DE ARAGÃO- **ESTRUTURAS METÁLICAS** **SLIGAÇÕES PARA** **FUSADAS** (NBR 8800/2008). 2010.

NBR 8800/2008 – Normas Brasileiras de Referência - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. (válida a partir de 25.09.2008).

PFEIL, Walter. *Estruturas De Aço*– Dimensionamento prático/ Walter Pfeil, Michele Pfiel, 8.ed. – Rio de Janeiro; LTC, 2012.

QUEIROZ, G. (1989). *Elementos das estruturas de aço*. 2.ed. Belo Horizonte, publicado pelo autor.

RODRIGUES, I. L. *Estruturas Metálicas: apostilas*. Instituto de Engenharia, São Paulo, 1981.

TSCHEMMERNEGG, F.; HUMER, C. - “*The Design of Structural Steel Frames under Consideration of Nonlinear Behavior of Joints*”-Journal of Constructional Steel Research, Volume 11, pp. 73-103, 1988.