

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JÚLIA MAZURIK

**VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM CHAPAS
METÁLICAS SEGUNDO A NBR 8800:2008**

Alegrete

2017

JÚLIA MAZURIK

**VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM CHAPAS
METÁLICAS SEGUNDO A NBR 8800:2008**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Telmo Egmar Camilo Deifeld

Alegrete

2017

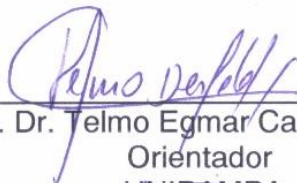
JÚLIA MAZURIK

VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM CHAPAS
METÁLICAS SEGUNDO A NBR 8800:2008

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 01 de dezembro de
2017

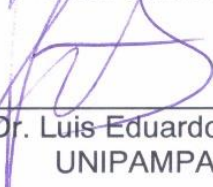
Banca examinadora:



Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Me. Alisson Simonetti Milani
UNIPAMPA



Prof. Dr. Luis Eduardo Kosteski
UNIPAMPA

Dedico este trabalho a meus pais, Danilo Mazurik e Kátia Ribeiro, por todo amor e apoio prestados ao longo da vida, e por serem minha maior fonte de inspiração.

AGRADECIMENTO

Agradeço, primeiramente a meus pais, Danilo e Kátia, peças-chave por trás de toda essa conquista. Agradeço por nunca deixarem de acreditar em mim, por sempre desempenharem todo o esforço possível para que eu pudesse realizar meus sonhos e por dedicarem a mim amor, carinho, apoio e confiança.

À minha irmã Fernanda por sempre estar disposta a me ajudar com o que fosse preciso. Por todas as palavras de incentivo, todas as conversas motivadoras e por ser um exemplo de mulher, mãe, irmã e profissional.

À minha irmã Daniela por ser, desde que me conheço por gente, minha melhor amiga, companheira para todas as horas. Por todas as vezes que me trouxe alegria em momentos difíceis e por sempre acreditar e torcer por mim.

À minha irmã Eduarda, por se mostrar sempre companheira e leal. Pelas longas conversas via video-chamada, mesmo contrariada, só para me fazer companhia e por todos os dias me mandar memes, tornando os meus dias sempre um pouco mais divertidos durante a faculdade.

Ao cunhado Felipe Rota pela parceria forte, por estar sempre presente na família, pelas longas e boas conversas, além dos passeios descontraídos.

À Clarissa (macatoinha), por me receber e me tratar como uma filha durante todo o período da faculdade, por toda preocupação, atenção, carinho e cuidado prestados. Por ser sempre uma boa companhia para o mate no fim da tarde, pelo coração enorme que tem, por ser uma das pessoas mais fortes que conheço e por me ensinar a enxergar as coisas com tranquilidade e otimismo.

À Larissa (Lerigou) e à Camila (Camis), por se mostrarem verdadeiras irmãs, ainda que emprestadas. Por sempre estarem dispostas a me ouvir, me ajudar, me dar opiniões sinceras, compartilhar conversas sobre os mais diversos assuntos, por serem companhias sensacionais e à Larissa pela ajuda com o estágio.

Ao Lucas, por todo carinho e apoio prestados ao longo do tempo, sobretudo nos primeiros anos da faculdade.

À toda família Fontoura, pela oportunidade de conviver com pessoas incríveis durante toda a minha estada em Alegrete.

Às maravilhosas tias Eliane, Léslie e Maísa por tudo o que fizeram por mim.

Às dindas Giane, Lia e Márcia.

Ao professor Telmo Deifeld por ser professor, orientador e amigo, além de todo o apoio desde o início do curso.

A todos os professores pelas lições e experiências compartilhadas, por serem grandes amigos, por sempre estarem dispostos a ajudar e por serem os grandes responsáveis pela transformação de estudantes em profissionais.

A todos os colegas de curso, em especial ao Matthews e ao Francisco pela boa e sincera amizade.

“Não confunda derrotas com fracasso nem vitórias com sucesso. Na vida de um campeão sempre haverá algumas derrotas, assim como na vida de um perdedor sempre haverá vitórias. A diferença é que, enquanto os campeões crescem nas derrotas, os perdedores se acomodam nas vitórias.”

Roberto Shinyashiki

RESUMO

É importante conhecer as peculiaridades das ligações em estruturas metálicas pois estas podem pôr em risco a durabilidade e a segurança estrutural em caso de falha no dimensionamento. Desta forma, este trabalho visa verificar a segurança de ligações parafusadas em chapas metálicas submetidas a esforços de tração, que será feita considerando os seguintes efeitos: a) cisalhamento dos parafusos; b) tração na chapa; c) Pressão de apoio e rasgamento da chapa; d) Cisalhamento de bloco.

Através das prescrições da NBR 8800 foram dimensionados cinco tipos diferentes de ligação, para a posterior realização do ensaio de tração de modo a determinar a carga máxima que, de fato, cada ligação pode suportar e compará-la com o resultado esperado. O dimensionamento inicial das ligações considerando a espessura das chapas, diâmetro, quantidade e espaçamento dos parafusos foi realizado para chapas de aço ASTM A36 e parafusos ASTM A325. Devido à aquisição de material com especificação diferente do que foi solicitado e confirmado pelo fornecedor, foram obtidos resultados apenas para 40% dos ensaios previstos. Dessa forma, foram realizados dois dimensionamentos diferentes, um para o aço ASTM A572 gr50 e outro para o aço ASTM A36. Considerando todos os ensaios em que se obteve ruptura (para os dois tipos de aço) aproximadamente 60% dos ensaios realizados apresentaram o tipo de ruptura desejado, com variações na carga de ruptura em relação à carga prevista.

Palavras-Chave: Ligações Parafusadas, Segurança Estrutural, Tração Simples.

ABSTRACT

It is important to know how the peculiarities of the connections in metallic structures to these can be at risk of durability and structural safety in case of failure in the design. In this way, this work aims to check compliance safety screwed on metal sheets subjected to tensile stress in order to continue with the effects: a) shearing of the screws; b) traction in the plate; c) Pressure of support and tear of the plate; d) Block shearing.

Through the requirements of the NBR 8800 were rated five different types of connection, for the subsequent realization of tensile testing in order to determine the maximum load, in fact, each link can support and compare the expected result. The initial sizing of the connections take into account the thickness of the plates, the diameter, quantity and spacing of the bolts made for ASTM A36 steel plates and ASTM A325 bolts. Due to the acquisition of material with a specification different from what was requested and confirmed by the supplier, results were obtained only for 40% of the predicted tests. In this way, two different designs were made, one for ASTM A572 gr50 steel and another for ASTM A36 steel. All the tests in which rupture is obtained (for both types of steel) approximately 60% of the tests performed showed the type of rupture desired, with variations in the load of rupture with respect to the predicted load.

Keywords: Bolted Connections, Structural Safety, Single Draw

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Tensões normais de tração axial em regime elástico (a) e após o escoamento de toda a seção (b) em uma peça tracionada com furo..... | 22 |
| Figura 2 – Representação dos tipos de ligações parafusadas..... | 23 |
| Figura 3 - Classificação das ligações quanto ao seu comportamento momento x rotação relativa..... | 23 |
| Figura 4 - Esquema representativo de parafusos ASTM..... | 25 |
| Figura 5 - Ligação do tipo apoio: (a) esquema da ligação; (b) diagrama de força nas chapas do parafuso..... | 26 |
| Figura 6 - Ligação por atrito: (a) esquema da ligação; (b) diagrama de força nas peças. | 27 |
| Figura 7 – Dimensões dos furos de acordo com sua classificação | 28 |
| Figura 8 – Disposições construtivas para ligações parafusadas | 30 |
| Figura 9 – Ruptura por cisalhamento do conector..... | 31 |
| Figura 10 – Métodos de falha: a) Ruptura por pressão de apoio; b) rasgamento da chapa | 32 |
| Figura 11 – Parâmetros de cálculo relacionados ao espaçamento entre furos. | 34 |
| Figura 12 – Seção líquida de peça com furos: (a) em zigue-zague; (b) em linha reta. | 35 |
| Figura 13 – Representação do cisalhamento de bloco: a) duas linhas de cisalhamento; b) uma linha de cisalhamento..... | 36 |
| Figura 14 – Ligação do ensaio 1 | 39 |
| Figura 15 – Ligação do ensaio 2 | 40 |
| Figura 16 – Ligação do ensaio 3 | 40 |
| Figura 17 – Ligação do ensaio 4 | 40 |
| Figura 18 – Ligação do ensaio 5 | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 19 – Preparação das chapas de ligação: (a) Corte das chapas; (b) Acabamento das arestas; (c) Chapas de ligação | 44 |
| Figura 20 – Corte das chapas intermediárias: (a) Processo de corte das chapas; (b) chapas após o corte. | 44 |
| Figura 21 – Adaptação com vergalhão soldado à chapa intermediária..... | 45 |
| Figura 22 – Parafuso Ciser 8.8..... | 46 |
| Figura 23 – Marcação das chapas para a furação: (a) Execução das marcas de punção; (b) Chapa após a marca de punção. | 46 |
| Figura 24 – Furação das chapas: (a) União de todas as chapas de 3 tipos de ensaio; (b) Processo de furação das chapas unidas | 47 |
| Figura 25 – Esquema do ensaio-de-tração | 47 |
| Figura 26 - Tensão x Deformação dos ensaios na chapa de 3mm | 48 |
| Figura 27 - Tensão x Deformação (Ensaio 1)..... | 50 |
| Figura 28 – Corpos-de-prova do ensaio 1 após a ruptura: (a) Ensaio 1-A; (b) Ensaio 1-B; (c) Ensaio 1-C; (d) Ensaio 1-D..... | 50 |
| Figura 29 - Tensão x Deformação (Ensaio 2)..... | 51 |
| Figura 30 - Tensão x Deformação (Ensaio 3)..... | 51 |
| Figura 31 - Gráfico tensão x deformação - (Ensaio 4)..... | 53 |
| Figura 32 – Corpos-de-prova após ensaio: (a) Ensaio 4-A; (b) Ensaio 4-C; (c) Ensaio 4-D | 53 |
| Figura 33 - Parafusos danificados (ligação do ensaio 5)..... | 54 |
| Figura 34 – Gráfico tensão x deformação (Ensaio 5) | 55 |
| Figura 35 – Corpos-de-prova após a ruptura (ensaio de substituição 2): a) ensaio 2-A; b) ensaio 2-B; c) ensaio 2-C..... | 56 |
| Figura 36 – Gráfico tensão x deformação (Ensaio 2 – substituição) | 57 |
| Figura 37 – Corpos-de-prova após a ruptura (ensaio de substituição 3): a) ensaio 3-A; b) ensaio 3-B; c) ensaio 3-C..... | 58 |
| Figura 38 – Gráfico tensão x deformação (Ensaio 3 – substituição) | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 39 - Corpos-de-prova após a ruptura (ensaio de substituição 5): a) ensaio 5-A; b) ensaio 5-B; c) ensaio 5-C..... | 59 |
| Figura 40 - Tensão x Deformação (Ensaio 5 – substituição)..... | 60 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Constantes físicas do aço | 19 |
| Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos aços-carbono..... | 20 |
| Tabela 3 – Propriedades mecânicas de aços de baixa liga. | 21 |
| Tabela 4 - Classes de resistência para parafusos ASTM..... | 24 |
| Tabela 5 – Dimensões básicas de parafusos comuns. | 25 |
| Tabela 6 – Dimensões básicas de parafusos de alta resistência. | 26 |
| Tabela 7 - Especificações de chapas finas laminadas a quente | 27 |
| Tabela 8 - Resumo dos espaçamentos máximos entre parafusos, segundo a NBR8800:2008..... | 29 |
| Tabela 9 – Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda..... | 30 |
| Tabela 10 - Parâmetros de resistência dos materiais | 38 |
| Tabela 11 – Dimensões das chapas | 38 |
| Tabela 12 – Cálculo das resistências dos parafusos ao cisalhamento | 41 |
| Tabela 13 – Cálculo das resistências das chapas à ruptura por tração | 42 |
| Tabela 14 – Resistência das ligações à pressão de apoio e rasgamento da chapa . | 42 |
| Tabela 15 – Resistência das chapas ao cisalhamento de bloco | 42 |
| Tabela 16 – Resumo das resistências para cada tipo de falha | 43 |
| Tabela 17 - Média das resistências obtidas com o ensaio e propriedades dos parafusos..... | 49 |
| Tabela 18 – Resumo das resistências para cada tipo de falha (aço ASTM A572 gr 50) | 49 |
| Tabela 19 - Média das resistências dos parafusos ao cisalhamento obtidas no ensaio 1 | 50 |
| Tabela 20 - Resumo das resistências para cada tipo de falha (aço ASTM A572 gr 50) – considerando o erro de projeto..... | 53 |
| Tabela 21 - Média das resistências ao cisalhamento dos parafusos do ensaio 4..... | 53 |

| | |
|--|----|
| Tabela 22 - Parâmetros dos materiais utilizados no dimensionamento dos ensaios de substituição. | 55 |
| Tabela 23 – Resumo das resistências para cada tipo de falha das chapas de 1,5mm de espessura e aço ASTM A36..... | 56 |
| Tabela 24 - Média das resistências das chapas à tração obtidas no ensaio 2 de substituição | 57 |
| Tabela 25 - Média das resistências das chapas à tração obtidas no ensaio 3 de substituição | 58 |
| Tabela 26 - Resistência da ligação do ensaio 5 (substituição)..... | 59 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_g – Área bruta da seção transversal.

A_n – Área líquida da seção transversal.

$A_{n,ef}$ – Área líquida efetiva da seção transversal.

C_t – Coeficiente de redução da área líquida efetiva.

e_c – Excentricidade.

\emptyset – Diâmetro do fuste do parafuso.

F_u – Resistência à ruptura do aço à tração.

F_y – Resistência à ruptura do aço ao escoamento.

γ_{a1} – Coeficiente de ponderação ao escoamento.

γ_{a2} – Coeficiente de ponderação à ruptura.

$N_{R,d}$ – Esforço normal resistente de cálculo.

$N_{S,d}$ – Esforço normal solicitante de cálculo.

R_d – Resistência de cálculo.

$R_{d,v}$ – Resistência de cálculo ao cisalhamento.

$R_{d,t}$ – Resistência de cálculo à tração.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 Objetivos | 18 |
| 1.2 Justificativa | 18 |
| 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA | 19 |
| 2.1 Aços estruturais..... | 19 |
| 2.2 Ligações parafusadas em estruturas metálicas | 21 |
| 3 METODOLOGIA | 37 |
| 3.1 Introdução | 37 |
| 3.2 Materiais e equipamentos | 37 |
| 3.3 Dimensionamento dos corpos-de-prova..... | 37 |
| 3.4 Montagem dos corpos-de-prova..... | 43 |
| 3.5 Execução do ensaio de tração | 47 |
| 4 RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 48 |
| REFERÊNCIAS | 63 |

1 INTRODUÇÃO

A utilização de estruturas metálicas se mostra muito vantajosa no que se refere a produtividade, rapidez e limpeza de uma obra. Ademais, as estruturas fabricadas em aço possuem grande precisão e elevado controle de qualidade, além de boa resistência.

Como em qualquer outro tipo de estrutura, nas estruturas metálicas também há a necessidade de união entre elementos estruturais, que ocorre através de ligações. As ligações são compostas por elementos de ligação e dispositivos de ligação. Segundo Souza (2017, p. 130) “Os elementos de ligação são os responsáveis pela transmissão dos esforços entre as partes conectadas (...). Já os dispositivos de ligação são os responsáveis pela união entre os diversos elementos de ligação”. A união entre elementos de ligação pode ser feita por meio de conectores (rebites ou parafusos) ou através de solda, sendo as ligações parafusadas soluções bastante utilizadas quando se refere à facilidade de execução a campo, ainda que possa apresentar custos elevados em relação ao processo de furação das chapas.

Na prática, as estruturas metálicas podem ser submetidas a esforços simples de tração, compressão e flexão, ou esforços combinados de flexotração ou flexocompressão. O esforço de tração tende a forçar a separação de dois elementos ligados entre si, podendo causar diferentes efeitos nas ligações, de acordo com a sua intensidade. Ao submeter elementos estruturais ligados por parafusos à tração, é importante conhecer a capacidade resistente dos dispositivos e dos elementos de ligação, para isso, podem ser utilizados os métodos de cálculo do esforço máximo resistente fornecidos pela NBR 8800:2008.

Os elementos de aço submetidos à tração podem ser encontrados em estruturas sob a forma de tirantes, pendurais, contraventamentos, barras tracionadas de treliças, etc.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em determinar as resistências de ligações metálicas parafusadas, do tipo apoio, com furo-padrão, submetidas a esforços de tração através dos cálculos propostos pela NBR 8800/2008 e compará-las com a máxima carga obtida através de ensaios de tração.

Como objetivos específicos tem-se:

- I. O dimensionamento de ligações metálicas de chapas metálicas parafusadas, alterando as características da ligação de modo a obter falhas considerando todos os seguintes efeitos:
 - Cisalhamento dos parafusos
 - Pressão de apoio e rasgamento da chapa
 - Tração na chapa
 - Cisalhamento de bloco
- II. Calcular as resistências das ligações do item I, segundo critérios da NBR 8800:2008;
- III. Ensaiar as chapas dimensionadas no item I;
- IV. Comparar os valores obtidos nos itens II e III.

1.2 Justificativa

Além de indispensáveis, as ligações são, normalmente, pontos fracos das estruturas, dessa forma, tanto os elementos de ligação quanto os dispositivos, exigem grande cuidado no dimensionamento para resistirem aos esforços quando a estrutura for solicitada. Por conta disso, as ligações são classificadas como parte importante da estrutura quanto ao dimensionamento.

Assim, entende-se justificada a necessidade de verificar a segurança dos critérios propostos pela NBR 8800:2008.

A escolha de verificar as ligações submetidas à tração foi em função de serem estas as ligações mais simples de executar os ensaios em laboratório. Por ser este o primeiro ensaio de ligações metálicas nos laboratórios do Campus Alegrete, a escolha de ligações tracionadas é justificada.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aços estruturais

Para a utilização do aço como material estrutural, espera-se que o mesmo apresente elevada tensão de escoamento, boa tenacidade, boa ductilidade, boa formabilidade e baixo custo.

De acordo com Souza (2017, p.13) “Uma das vantagens do uso do aço em estruturas é o fato de ser um material homogêneo com características mecânicas bem-definidas e de simples caracterização. ” Na Tabela 1 estão dispostas as propriedades físicas do aço que são constantes.

Tabela 1 - Constantes físicas do aço

| | |
|------------------------------------|---|
| Módulo de Elasticidade | $E = 20000 \text{ kN/cm}^2$ |
| Módulo de elasticidade transversal | $G = 7700 \text{ kN/cm}^2$ |
| Coeficiente de Poisson | $\nu = 0,3$ |
| Coeficiente de dilatação térmica | $\beta_a = 1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ |
| Massa específica | $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ |

Fonte: NBR8800 (2008, p.13)

As características do aço variam de acordo com sua composição química, dessa forma tem-se como principais tipos de aços estruturais os aços-carbono, os aços de baixa liga e os aços liga tratados termicamente.

Em todos os casos, é importante conhecer a tensão de escoamento e a tensão de ruptura do aço.

O aço-carbono é o tipo de mais utilizado nas construções e é composto basicamente por ferro e carbono, podendo ser adicionado outros elementos à liga com a finalidade de alterar suas propriedades mecânicas. O carbono, no entanto, é considerado o elemento mais importante, pois seu acréscimo implica no aumento da resistência do aço. É importante ressaltar que o aumento do teor de carbono resulta, também, na redução da ductilidade do aço, propriedade importante para elementos ligados por solda. O Quadro 2 indica a classificação dos aços de acordo com seu teor de carbono.

Quadro 1 – Classificação do aço em função do teor de carbono

| | |
|---------------|-------------------|
| Baixo carbono | $< 0,29$ |
| Médio carbono | $0,30 < C < 0,59$ |
| Alto carbono | $0,6 < C < 2,0$ |

Fonte: Pfeil (2009, p.9)

A tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas dos principais tipos de aço-carbono.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos aços-carbono

| Especificação | Teor de carbono (%) | Limite de escoamento - F_y (MPa) | Resistência à ruptura - F_u (MPa) |
|-------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| MR250 | Baixo | 250 | 400 |
| ASTM A36 | Baixo | 250 | 400-500 |
| ASTM A307 (Parafuso) | Baixo | - | 415 |
| ASTM A325 (Parafuso) | Médio | 635 (mín.) | 825 (mín.) |
| EN S235 | Baixo | 235 | 360 |

Fonte: Pfeil (2009, p.10)

Já a respeito dos aços de baixa liga, Pfeil (2009) explica que se trata de aços-carbono acrescidos de elementos de liga como cromo colúmbio, cobre, manganês, molibdênio, níquel, fósforo, vanádio e zircônio, com a finalidade de melhorar algumas propriedades mecânicas do aço.

A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas dos principais aços de baixa liga utilizados em estruturas.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas de aços de baixa liga.

| Especificação | Principais elementos de liga | Limite de escoamento - F_y (MPa) | Resistência à ruptura - F_u (MPa) |
|-------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| ASTM 572 GR.50 | C < 0,23% Mn < 1,35% | 345 | 450 |
| ASTM A588 | C < 0,17% Mn < 1,2% Cu < 0,50% | 345 | 480 |
| ASTM A992 | C < 0,23% Mn < 1,5% | 345 | 450 |

Fonte: Pfeil (2009, p.10)

Tanto os aços carbono, quanto os aços de baixa liga podem, ainda, receber tratamento térmico a fim de melhorar algumas propriedades, porém, este tipo de aço é pouco utilizado em estruturas, pois apesar de o tratamento aumentar a sua resistência, prejudica a soldagem do material.

Segundo Souza (2017, p.13), “os aços empregados na construção civil são os aços laminados a quente e que apresentam teor de carbono da ordem de 0,18% a 0,25%”. Quanto à classificação, o tipo de aço mais usual em aços estruturais é o aço ASTM – A36.

2.2 Ligações parafusadas em estruturas metálicas

As estruturas devem ser projetadas para resistir a todas as ações atuantes durante a sua vida útil, com segurança, desempenho, e durabilidade adequados à sua utilização, com custos de construção e manutenção compatíveis. Neste sentido, as ligações têm fundamental importância no que se refere ao comportamento estrutural e aos aspectos construtivos de fabricação e montagem. (SOUZA, 2017, p. 129).

As ligações estruturais são compostas por elementos de ligação e dispositivos de ligação. Entre os elementos de ligação estão as chapas de ligação, placas de base, enrijecedores e cantoneiras de apoio, enquanto os dispositivos de ligação compreendem rebites, parafusos e soldas.

Ligações parafusadas em estruturas metálicas costumam ser uma ótima solução em relação às ligações por solda, especialmente, no que se refere à facilidade

de execução em campo, embora possa ter altos custos em relação ao processo de furação das chapas.

Principais exemplos práticos da utilização de ligações parafusadas em estruturas metálicas:

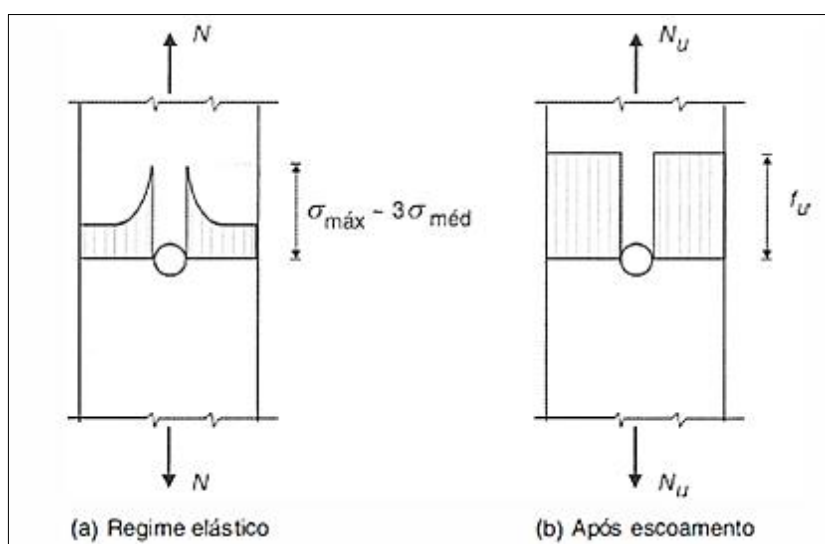
- Ligações viga-pilar
- Ligações viga-viga
- Ligações em placa de base de pilares
- Treliças de coberturas

2.2.1 Distribuição das tensões em peça metálica com furo

As tensões normais em uma peça com furos submetida à tração, são maiores nas proximidades do furo, até o aço atingir o limite de escoamento, a partir daí as tensões passam a atuar de maneira uniforme ao longo da seção.

A Figura 1 apresenta a distribuição das tensões em uma peça com furo nos regimes elástico e plástico, respectivamente.

Figura 1 - Tensões normais de tração axial em regime elástico (a) e após o escoamento de toda a seção (b) em uma peça tracionada com furo.



Fonte: Pfeil (2009, p. 49)

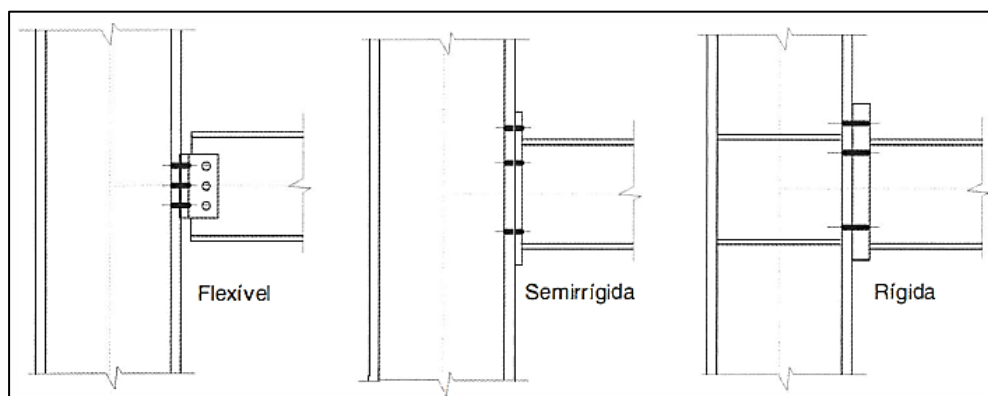
2.2.2 Tipos de ligações parafusadas

As ligações parafusadas podem ser classificadas quanto a sua rigidez ao giro. De acordo com Pfeil (2009) as ligações parafusadas classificam-se como:

- a) Ligação rígida – Rotação relativa quase nula, desde que o carregamento não atinja o momento resistente de cálculo.
- b) Ligação Flexível – Permite a rotação relativa entre as peças, transmitindo um pequeno momento fletor.
- c) Ligação semirrígida – Possui um comportamento intermediário entre os outros dois casos.

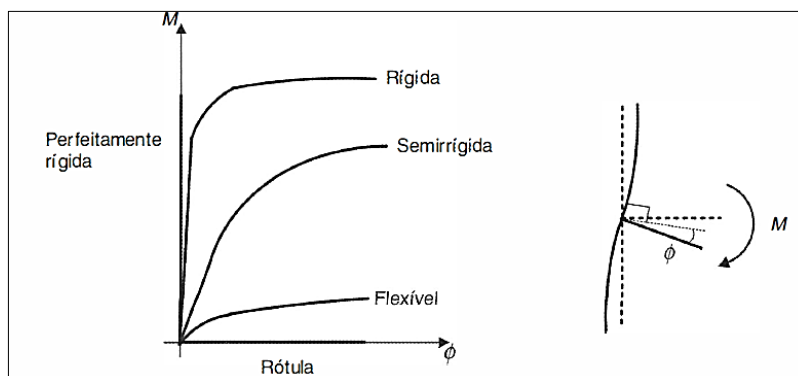
A Figura 2 apresenta o detalhamento de cada tipo de ligação, para um esquema representativo de uma ligação viga-pilar, enquanto na Figura 3 observa-se o diagrama momento *versus* rotação para cada caso.

Figura 2 – Representação dos tipos de ligações parafusadas.



Fonte: Pfeil (2009, p. 242)

Figura 3 - Classificação das ligações quanto ao seu comportamento momento x rotação relativa



Fonte: Pfeil (2009, p. 242)

2.2.3 Parafusos

Souza (2017) afirma que os parafusos usados como dispositivo de ligação podem ser parafusos sem qualificação estrutural, parafusos comuns ou de alta resistência. No entanto, no Brasil os parafusos mais utilizados são os comuns ASTM A307 e os de alta resistência ASTM A325 e ASTM A490.

A diferença entre as duas principais classes de parafusos utilizadas no Brasil está principalmente no método de fabricação do aço utilizado e, por consequência, nas suas resistências ao escoamento e à ruptura. Enquanto os parafusos comuns ASTM A307 são forjados em aço-carbono de baixo a médio teor de carbono, os parafusos de alta resistência ASTM A325 e ASTM A490 são fabricados a partir de aço tratado termicamente, aço-carbono temperado. A tabela 4 apresenta as classes de resistência dos parafusos ASTM.

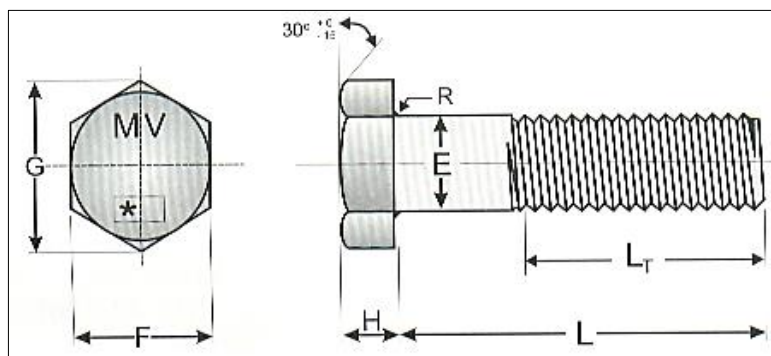
Tabela 4 - Classes de resistência para parafusos ASTM

| Especificação | Diâmetro | Resistencia mínima ao escoamento - F_y (MPa) | Resistência mínima à ruptura - F_u (MPa) |
|---------------|-----------------------|--|--|
| ASTM A307 | $12,5 \leq d \leq 38$ | 240 | 415 |
| ASTM A325 | $12,5 \leq d \leq 25$ | 635 | 825 |
| ASTM A325 | $25 \leq d \leq 38$ | 560 | 725 |
| ASTM A490 | $12,5 \leq d \leq 38$ | 895 | 1035 |

Fonte: Souza (2017, p.132)

Na Figura 4 está representado o esquema de um parafuso genérico contendo as dimensões indicadas e na Tabela 5 são apresentas as dimensões básicas dos parafusos comuns do tipo ASTM A307, enquanto na Tabela 6 são apresentas as dimensões básicas dos parafusos de alta resistência ASTM A325 e ASTM A490.

Figura 4 - Esquema representativo de parafusos ASTM



Fonte: Metalúrgica Vera

Tabela 5 – Dimensões básicas de parafusos comuns.

| Diâmetro nominal | | E | | F | | | G | | H | | R | | LT básico |
|------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Pol. | mm | máx. | mín. | máx. | mín. | máx. | mín. | máx. | mín. | máx. | mín. | | |
| 1/2" | 12,5 | 13,08 | 18,41 | 19,05 | 20,98 | 21,99 | 20,98 | 9,24 | 7,67 | 0,762 | 0,254 | 38,10 | |
| 5/8" | 16,0 | 16,30 | 23,01 | 23,81 | 26,23 | 27,50 | 26,23 | 11,27 | 9,60 | 1,524 | 0,508 | 44,45 | |
| 3/4" | 19,0 | 19,50 | 27,63 | 28,57 | 31,49 | 32,99 | 31,49 | 13,30 | 11,55 | 1,524 | 0,508 | 50,80 | |
| 7/8" | 22,0 | 22,73 | 32,23 | 33,32 | 36,75 | 38,50 | 36,75 | 15,34 | 13,48 | 1,524 | 0,508 | 57,15 | |
| 1" | 25,0 | 25,95 | 36,83 | 38,10 | 41,98 | 43,99 | 41,98 | 17,78 | 15,01 | 2,280 | 0,762 | 63,50 | |

Fonte: Metalúrgica Vera

Tabela 6 – Dimensões básicas de parafusos de alta resistência.

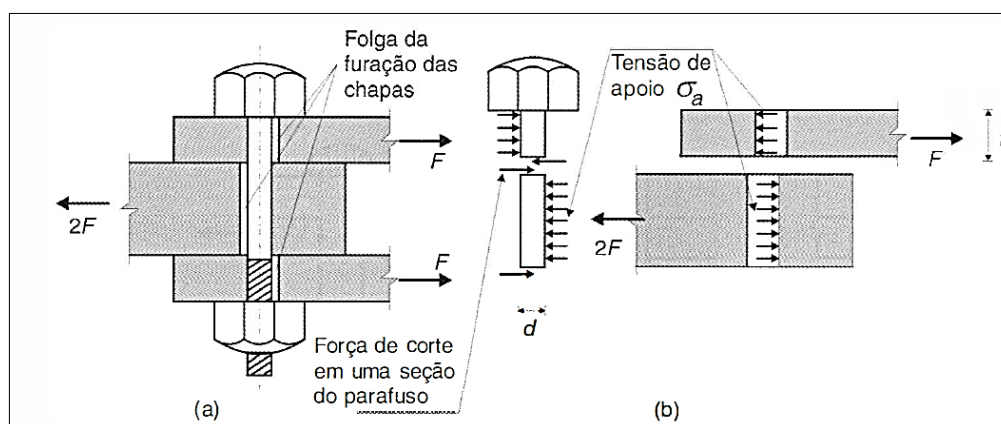
| Diâmetro nominal | | E | | F | | G | | H | | R | | LT bás. |
|------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Pol. | mm | máx. | mín. | máx. | mín. | máx. | mín. | máx. | mín. | máx. | mín. | |
| 1/2" | 12,5 | 13,08 | 12,24 | 22,22 | 21,59 | 25,65 | 24,61 | 8,20 | 7,67 | 0,787 | 0,228 | 25,40 |
| 5/8" | 16,0 | 16,30 | 15,36 | 26,97 | 26,18 | 31,16 | 29,84 | 10,23 | 9,60 | 1,574 | 0,533 | 31,75 |
| 3/4" | 19,0 | 19,50 | 18,51 | 31,75 | 30,78 | 36,65 | 35,12 | 12,26 | 11,55 | 1,574 | 0,533 | 35,05 |
| 7/8" | 22,0 | 22,73 | 21,64 | 36,52 | 35,40 | 42,16 | 40,36 | 14,30 | 13,48 | 1,574 | 0,787 | 38,10 |
| 1" | 25,0 | 25,95 | 24,79 | 41,27 | 40,00 | 47,65 | 45,61 | 15,92 | 15,01 | 2,362 | 1,574 | 44,45 |
| 1.1/4" | 32,0 | 32,43 | 31,06 | 50,80 | 49,22 | 58,64 | 56,10 | 20,65 | 19,02 | 2,362 | 1,574 | 50,80 |

Fonte: Metalúrgica Vera

Nas ligações parafusadas os esforços podem ser transferidos através de duas formas de ligações: do tipo apoio ou do tipo atrito. Pfeil (2009) explica que nas ligações do tipo apoio, a transmissão ocorre pelo contato das chapas com o fuste do parafuso e pelo esforço de corte da seção transversal. Também afirma que as ligações por atrito são utilizadas quando se deseja impedir qualquer movimento entre as chapas de conexão e, por isso, são utilizados parafusos de alta resistência que são dimensionados com um coeficiente de segurança contra o deslizamento.

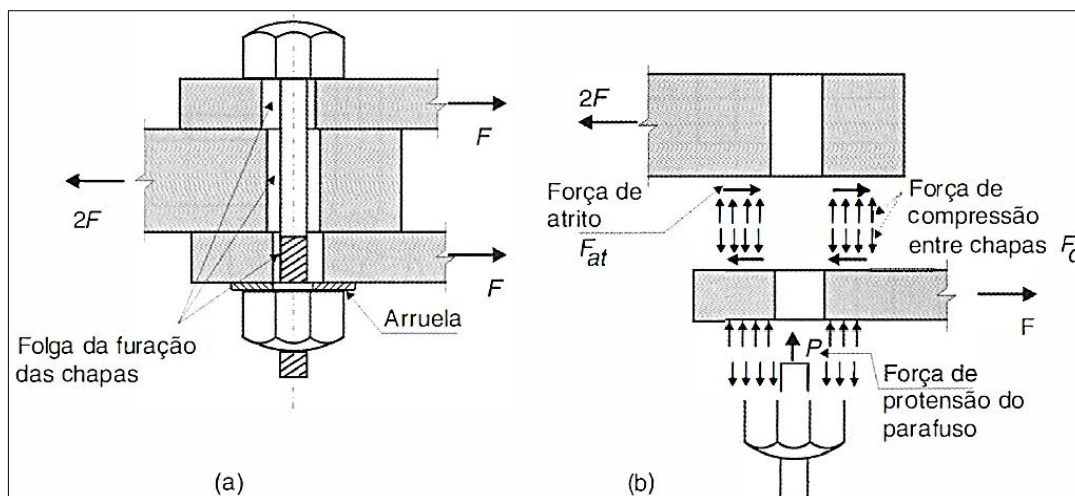
As figuras 5 e 6 apresentam o esquema das ligações por apoio e por atrito e seus respectivos diagramas de forças.

Figura 5 - Ligação do tipo apoio: (a) esquema da ligação; (b) diagrama de força nas chapas do parafuso



Fonte: Pfeil (2009, p. 64)

Figura 6 - Ligação por atrito: (a) esquema da ligação; (b) diagrama de força nas peças.



Fonte: Pfeil (2009, p. 65)

2.2.4 Chapas metálicas

Existem diferentes tipos de chapas metálicas disponíveis, sendo as mais utilizadas chapas finas laminadas a frio ou a quente, chapas grossas e chapas zincadas. Como na construção civil, é mais comum a utilização de aço laminado a quente, a Tabela 7 apresenta as especificações de chapas finas laminadas a quente, segundo o fabricante.

Tabela 7 - Especificações de chapas finas laminadas a quente

| Chapas e bobinas finas a quente | | |
|---------------------------------|-----------------|---|
| Bitola MSG | Espessura mm | Peso aproximado kg/m ² |
| 18 | 1,20 | 9,60 |
| 16 | 1,50 | 12,00 |
| 15 | 1,80 | 14,40 |
| 14 | 2,00 | 16,00 |
| 13 | 2,25 | 18,00 |
| 11 | 3,00 | 24,00 |

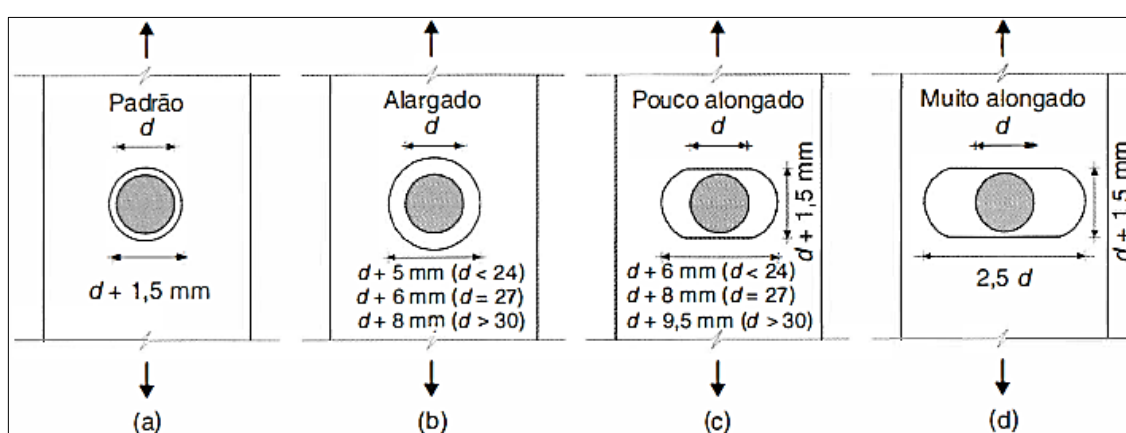
| Chapas e bobinas finas a quente | | |
|---------------------------------|-----------------|---|
| Bitola MSG | Espessura mm | Peso aproximado kg/m ² |
| 10 | 3,35 | 26,30 |
| 9 | 3,75 | 30,00 |
| 8 | 4,25 | 34,00 |
| 7 | 4,50 | 36,00 |
| 3/16" | 4,75 | 38,00 |
| - | 5,00 | 40,00 |

Fonte: Gerdau

2.2.5 Furos

Para as ligações metálicas parafusadas, os furos podem ser de quatro tipos: furo padrão, alargado, pouco alongado ou muito alongado. A NBR 8800:2008 prevê que deve haver uma folga de montagem do furo em função do diâmetro nominal do parafuso utilizado. A Figura 7 apresenta as dimensões necessárias para cada furo, onde d expressa o diâmetro do fuste do parafuso.

Figura 7 – Dimensões dos furos de acordo com sua classificação



Fonte: Pfeil (2009, p. 67)

Existem diversas maneiras de efetuar furos em uma chapa metálica, sendo o mais comum realizado por punção. Nesse caso, o furo é puncionado com uma folga de um milímetro e meio (1,5mm) em relação ao diâmetro nominal do conector.

Como o processo de punção danifica a chapa junto ao furo, nos cálculos há a redução de dois milímetros ao longo do diâmetro, a fim de compensar os danos.

2.2.6 Disposições construtivas

a) Espaçamento mínimo entre furos:

A NBR 8800:2008 recomenda que seja respeitado o espaçamento mínimo entre furos de $2,7 \phi$ - sendo ϕ o diâmetro do parafuso - porém é preferível utilizar um

espaçamento mínimo de 3ϕ . Além disso, é preciso garantir que a distância entre as bordas de dois furos consecutivos não seja inferior a ϕ .

b) Espaçamento máximo entre parafusos:

O espaçamento máximo entre parafusos que atuam em uma ligação do tipo apoio deve seguir as seguintes recomendações (NBR 8800:2008, p.84):

- Em elementos pintados ou não sujeitos à corrosão, o espaçamento não pode exceder 24 vezes a espessura da parte ligada menos espessa nem ser maior do que 180 milímetros.
- Em elementos sujeitos à corrosão atmosférica, executados com aços resistentes à corrosão, não pintados, o espaçamento não pode exceder 14 vezes a espessura da parte ligada menos espessa nem ser maior do que 180 milímetros.

A tabela 8 representa um resumo do espaçamento máximo de acordo com a espessura da parte ligada menos espessa e com o tipo de exposição.

Tabela 8 - Resumo dos espaçamentos máximos entre parafusos, segundo a NBR8800:2008.

| Elementos não sujeitos à corrosão | | Elementos sujeitos à corrosão | |
|---|--------------------|---|--------------------|
| Espessura da parte ligada menos espessa | Espaçamento máximo | Espessura da parte ligada menos espessa | Espaçamento máximo |
| $\leq 7,5 \text{ mm}$ | $24 \times t$ | $\leq 12,85 \text{ mm}$ | $14 \times t$ |
| $> 7,5 \text{ mm}$ | 180 mm | $> 12,85 \text{ mm}$ | 180 mm |

Fonte: elaboração própria

c) Distância mínima de um furo às bordas:

A distância mínima que o furo deve ter em relação às bordas da chapa depende do tipo de furo utilizado. Como serão utilizados furos do tipo padrão para este trabalho, a NBR 8800 recomenda que a distância mínima entre o centro dos furos deste tipo e qualquer borda respeite, de modo geral, os limites indicados na Tabela 9.

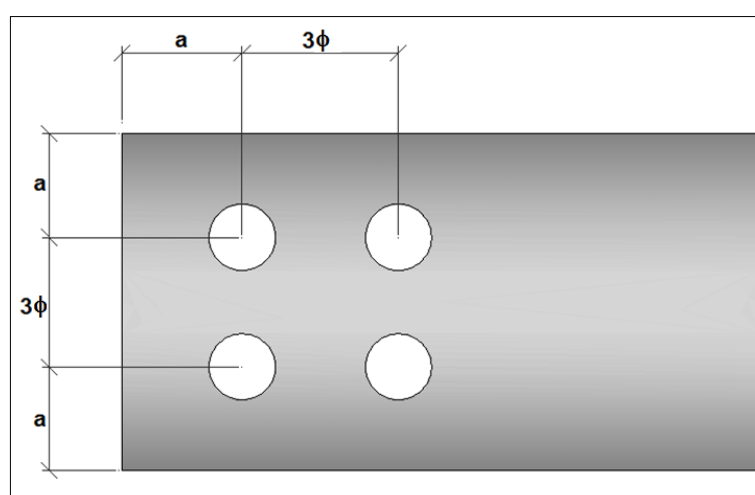
Tabela 9 – Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda

| Diâmetro ϕ | | Borda cortada com serra ou tesoura (mm) | Borda laminada ou cortada a maçarico (mm) |
|-----------------|-----|---|---|
| Pol | mm | | |
| 1/2 | | 22 | 19 |
| 5/8 | 16 | 29 | 22 |
| 3/4 | | 32 | 26 |
| | 20 | 35 | 27 |
| 7/8 | 22 | 38 | 29 |
| | 24 | 42 | 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 ϕ | 1,25 ϕ |

Fonte: NBR 8800 (2008, p.85)

A Figura 8 representa um esquema de acordo com as disposições construtivas para os furos em uma chapa metálica de acordo com a NBR 8800.

Figura 8 – Disposições construtivas para ligações parafusadas



Fonte: Elaboração própria

2.2.7 Dimensionamento à tração

Segundo a NBR 8800, para atender aos critérios de segurança, é preciso que uma estrutura metálica seja dimensionada de modo que os esforços solicitantes sejam menores ou iguais aos esforços resistentes.

$$N_{Sd} \leq N_{Rd}$$

Para realizar o dimensionamento à tração de uma ligação parafusada, é importante conhecer os coeficientes de ponderação ao escoamento e à ruptura. Para um dimensionamento realizado a partir de combinações normais de ações temos os seguintes coeficientes de ponderação:

$$\gamma_{a1} = 1,1$$

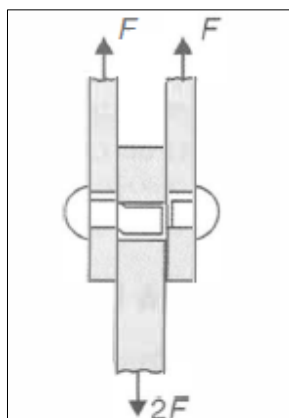
$$\gamma_{a2} = 1,35$$

Segundo a NBR 8800:2008, em ligações axiais por corte quando há mais de um parafuso na seção, considera-se que o esforço transmitido é distribuído de forma igualitária entre os conectores para ligações de comprimento menor ou igual a 1270 mm.

a) Ruptura por cisalhamento do parafuso:

A Figura 9 apresenta um esquema de como ocorre a ruptura por cisalhamento do parafuso.

Figura 9 – Ruptura por cisalhamento do conector



Fonte: Adaptado de Pfeil (2009, p. 69)

O cálculo da resistência ao cisalhamento de parafusos em geral é realizado a partir da área bruta e da resistência ao corte dos mesmos, conforme equação 1.

$$R_{dv} = \frac{0,4A_g F_u}{\gamma_{a2}} \quad \dots(1)$$

Sendo:

A_g : Área bruta da seção do fuste do conector

F_u : Resistência a ruptura do aço à tração

γ_{a2} : Coeficiente de ponderação à ruptura

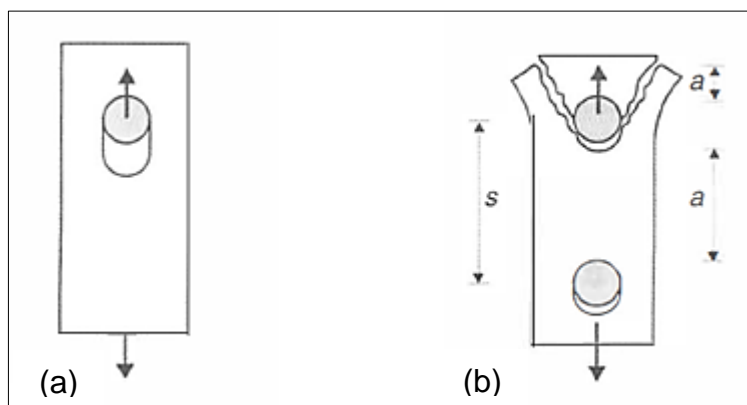
b) Ruptura por pressão de apoio e rasgamento da chapa:

A falha por pressão de apoio ou rasgamento da chapa ocorrem devido à pressão de contato entre o fuste do conector e a parede da chapa. A ocorrência de uma falha ou outra depende da disposição dos parafusos na chapa e, conseqüentemente, do espaçamento entre eles.

O rasgamento da chapa pode ocorrer entre os furos dos parafusos ou entre o furo e a borda da chapa.

A Figura 10 apresenta dois casos, em que um ocorre ruptura por pressão de apoio e no outro ruptura por rasgamento da chapa.

Figura 10 – Métodos de falha: a) Ruptura por pressão de apoio; b) rasgamento da chapa



Fonte: Pfeil (2009, p. 69)

A resistência nominal de cálculo, para os casos de ruptura por pressão de apoio e devido ao rasgamento da chapa são obtidas, respectivamente, através das equações 2 e 3.

$$R_n = 2,4\phi tF_u \quad \dots(2)$$

$$R_n = 1,2atF_u \quad \dots(3)$$

Sendo:

ϕ : Diâmetro do fuste do conector

t: Espessura da chapa

a: Distância entre borda e parafuso ou entre parafusos consecutivos

F_u : Resistência a ruptura do aço à tração

c) Ruptura por tração na chapa

Para o estudo da ruptura por tração na chapa é necessário conhecer a área líquida e a área líquida efetiva da seção transversal da chapa.

A área líquida da seção transversal é determinada conforme equação 4.

$$A_n = \left[b - \sum (\phi + 3,5mm) + \sum \frac{S^2}{4g} \right] t \quad \dots(4)$$

Sendo:

b: Largura da chapa de ligação

ϕ : Diâmetro do fuste do conector

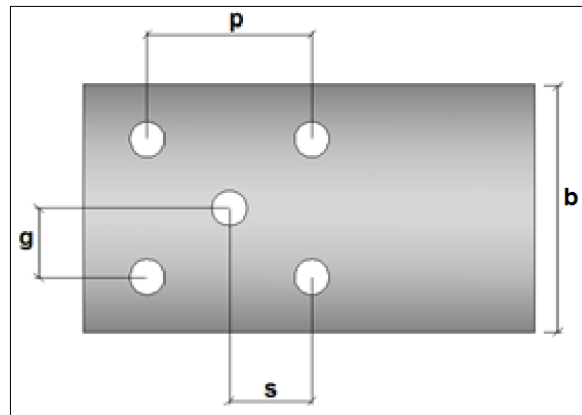
s: Espaçamento longitudinal entre furos de filas diferentes

g: Espaçamento longitudinal entre duas filas de furos

t: Espessura da chapa de ligação

A figura 11 apresenta os parâmetros das chapas utilizados para o cálculo da área líquida da seção transversal.

Figura 11 – Parâmetros de cálculo relacionados ao espaçamento entre furos.



Fonte: Elaboração própria

A área líquida efetiva da seção transversal está relacionada com a área líquida e um coeficiente de redução desta área (C_t), conforme equação 5.

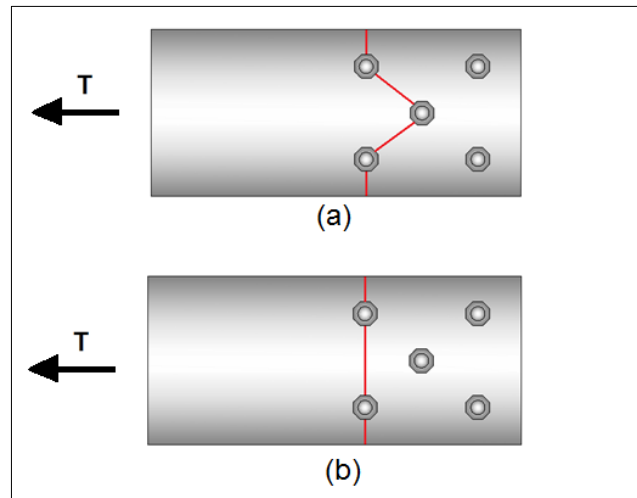
$$A_{n,ef} = A_n C_t \quad \dots(5)$$

O coeficiente de redução da área líquida (C_t) varia de acordo com a excentricidade (e_c) e o comprimento da ligação (l), sendo obtido através da equação 6.

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{l} \geq 0,60 \quad \dots(6)$$

O modo como ocorre a falha por tração na chapa depende da quantidade e da disposição dos parafusos. Dessa forma, quando a ligação for composta por diversos conectores, deve-se determinar a seção crítica, ou seja, os furos que farão parte da trajetória de ruptura, de modo a obter o menor valor para a seção líquida da peça. A Figura 12 apresenta duas diferentes possibilidades de seção líquida.

Figura 12 – Seção líquida de peça com furos: (a) em zigue-zague; (b) em linha reta.



Fonte: Elaboração própria

A falha da ligação por tração na chapa pode ocorrer de duas maneiras:

- I. Ruptura da seção líquida: Considera a trajetória de ruptura da seção crítica, cuja resistência é determinada através da equação 7.

$$R_d = \frac{A_{n,ef} F_u}{\gamma_{a2}} \quad \dots(7)$$

Sendo:

$A_{n,ef}$: Área líquida efetiva da seção transversal

- II. Escoamento da seção bruta: Caracterizada pelo alongamento da peça tracionada em uma região afastada da ligação. A partir da equação 8 é possível determinar a resistência da chapa ao escoamento.

$$R_{dt} = \frac{A_g F_y}{\gamma_{a1}} \quad \dots(8)$$

Sendo:

A_g : Área bruta da seção do fuste do conector

F_y : Resistência a ruptura do aço ao escoamento

d) Cisalhamento de bloco

O cisalhamento de bloco consiste na tendência ao arrancamento da área da chapa delimitada pelos parafusos quando submetida à tração, conforme representado na Figura 13.

A resistência da chapa metálica a este arrancamento, é obtida através da equação 9.

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60F_u A_{nv} + c_{ts} F_u A_{nt}) \leq \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60F_y A_{gv} + c_{ts} F_u A_{nt}) \quad \dots(9)$$

Sendo:

A_{nv} : Área Líquida cisalhada

A_{gv} : Área bruta cisalhada

A_{nt} : Área líquida tracionada

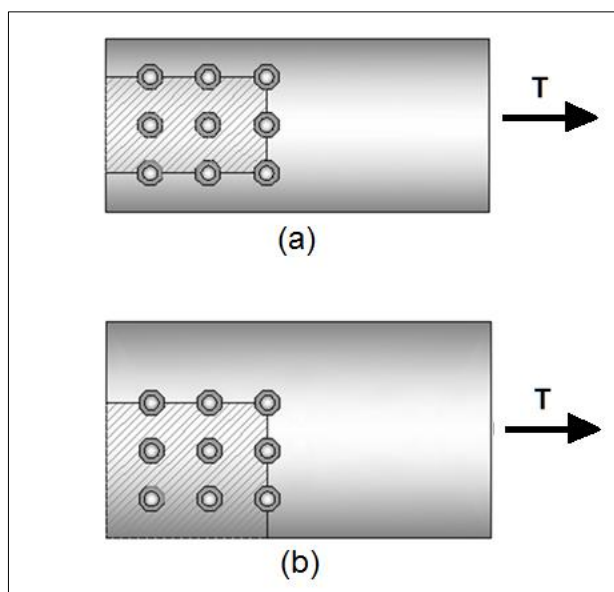
c_{ts} : Coeficiente de redução da área líquida

F_u – Resistência à ruptura do aço à tração.

F_y – Resistência à ruptura do aço ao escoamento.

γ_{a2} – Coeficiente de ponderação à ruptura.

Figura 13 – Representação do cisalhamento de bloco: a) duas linhas de cisalhamento; b) uma linha de cisalhamento



Fonte: Elaboração própria

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Para cada tipo de ruptura à tração, serão ensaiados 4 corpos-de-prova. Os diferentes tipos de ruptura são classificados como “*Ensaio*”, e por isso, as tabelas apresentam ensaios numerados de 1 a 5, visando obter 4 tipos diferentes de ruptura, sendo dimensionadas duas ligações para ruptura por tração da chapa.

3.2 Materiais e equipamentos

- Chapa de aço ASTM A572 Gr 50 – Chapas de ligação (Espessura 1/8”);
- Chapa de aço ASTM A36 – Chapas de ligação (Espessura 1/16”);
- Barra chata de Aço ASTM A36 – Chapas a serem ligadas (Espessura 3/8”);
- Parafusos Ciser 8.8 (equivalente a ASTM A325) - 3/16” e 5/16” – Conectores;
- Barra de aço nervurada, aço CA-50 (ϕ 1”)
- Máquina para ensaios mecânicos de tração - modelo EMIC 23-200, marca INSTRON/EMIC, capacidade de carga de 200kN.

3.3 Dimensionamento dos corpos-de-prova

Para determinar a quantidade, o diâmetro dos parafusos e as disposições dos mesmos nas chapas, foi realizado um dimensionamento com o intuito de obter em cada ensaio um dos tipos de falha à tração (conforme item 2.2.7).

O dimensionamento dos corpos-de-prova foi realizado considerando que as chapas de ligação eram de aço ASTM A36 conforme informação do fornecedor. Dessa forma, todas as resistências utilizadas nos cálculos foram para este material.

Além disso, foi considerado previamente, que seriam utilizados parafusos comuns ASTM A307 em todos os ensaios, visto que caso fossem utilizados parafusos de maior resistência não mudaria o tipo de ruptura, apenas a carga máxima suportada pelos mesmos.

Para os cálculos do dimensionamento não foram considerados os coeficientes de ponderação, ou seja, utilizou-se o valor de 1 para todos os coeficientes de ponderação, visto que o objetivo é comparar o resultado dos cálculos com a carga máxima real que pode ser aplicada aos corpos-de-prova.

A Tabela 10 apresenta os parâmetros de resistência das chapas e dos parafusos utilizados, enquanto a Tabela 11 apresenta as dimensões das chapas utilizadas no estudo.

Tabela 10 - Parâmetros de resistência dos materiais

| Chapas ASTM A36 | |
|----------------------------|------|
| Fu (kN/cm ²) | 40 |
| Fy (kN/cm ²) | 25 |
| Parafusos ASTM A307 | |
| Fu (kN/cm ²) | 41,5 |
| Fy (kN/cm ²) | - |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 11 – Dimensões das chapas

| | Comp. (cm) | Largura (cm) | Espessura (cm) |
|------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|
| Chapas intermediárias | 20 | 10 | 0,95 |
| Chapas de ligação | 15 | 10 | 0,3 |

Fonte: Elaboração própria

A seguir estão descritos os ensaios realizados e são apresentadas as figuras representativas de cada ensaio. Posteriormente, apresentam-se as tabelas de cálculo usadas nos dimensionamentos. Apresenta-se ainda, uma tabela que resume as formas de ruptura de cada ensaio.

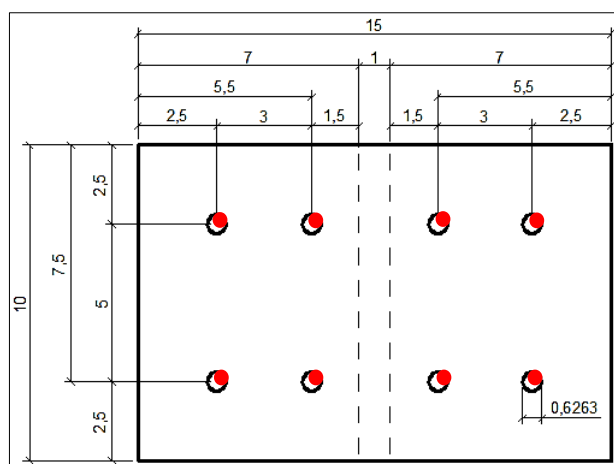
3.3.1 Ruptura por cisalhamento dos parafusos – (Ensaio 1):

O ensaio 1 foi dimensionado de modo a ocorrer a falha por cisalhamento dos parafusos. Desse modo, foram utilizados parafusos de diâmetro pequeno, além de

pouca quantidade de parafusos compondo a ligação, conforme Figura 14. O cálculo das forças máximas resistentes ao cisalhamento dos parafusos é feito através da equação 1.

Os resultados obtidos para todos os ensaios estão apresentados na tabela 12.

Figura 14 – Ligação do ensaio 1



Fonte: Elaboração própria

3.3.2 Ruptura por tração na chapa - (Ensaio 2 e Ensaio 3):

Como a falha de uma ligação por tração na chapa pode ocorrer seguindo linhas de ruptura diferentes, o ensaio 2 (Figura 15) foi dimensionado para a ruptura ocorrer em linha reta ao longo da seção, e o ensaio 3 (Figura 16) dimensionado para a ruptura ocorrer em ziguezague.

Em ambos os casos, para ocorrer a ruptura por tração na chapa, os conectores foram dispostos de maneira bem distribuída ao longo da largura da chapa. Além disso, utilizou-se parafusos com diâmetro maior do que os que foram utilizados no ensaio 1.

A resistência das ligações à tração na chapa foi considerada utilizando o menor dos valores obtidos através das equações 7 e 8.

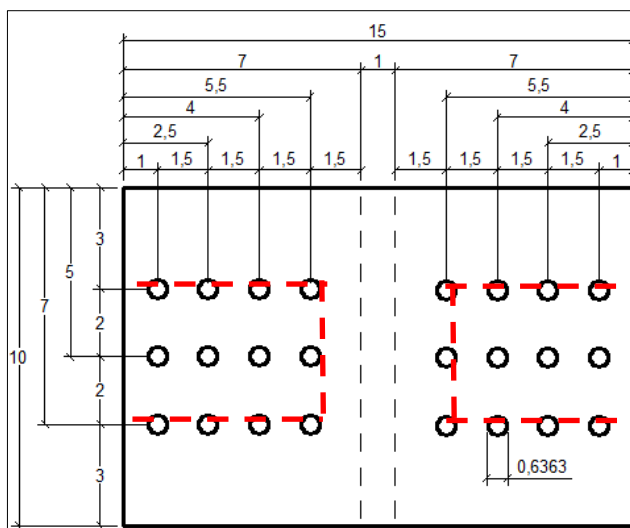
Os resultados obtidos para todos os ensaios estão dispostos na Tabela 13.

3.3.3 Ruptura por cisalhamento de bloco – (Ensaio 5):

Para que houvesse a falha da ligação por cisalhamento de bloco, foram dispostos parafusos de diâmetro pequeno, com pouco espaçamento entre si ao longo da largura e do comprimento. Para não ocorrer o cisalhamento dos parafusos, foi necessário um número significativo de parafusos. A Figura 18 apresenta a disposição dos parafusos na chapa de ligação do ensaio 5.

O cálculo da resistência das chapas ao cisalhamento de bloco foi realizado de acordo com a equação 9 e as resistências de cada ensaio a este tipo de ruptura, são apresentadas na Tabela 15.

Figura 18 – Ligação do ensaio 5



Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 – Cálculo das resistências dos parafusos ao cisalhamento

| CISALHAMENTO DO PARAFUSO | | | | | |
|--------------------------|-------------|--------------|---------------------|-----------------------|---------|
| Amostra | ϕ (cm) | Nº Parafusos | Nº Faces cisalhadas | Ag (cm ²) | Rn (kN) |
| Ensaio 1 | 0,4763 | 4 | 8 | 0,178 | 25,66 |
| Ensaio 2 | 0,7938 | 6 | 12 | 0,495 | 106,90 |
| Ensaio 3 | 0,7938 | 6 | 12 | 0,495 | 106,90 |
| Ensaio 4 | 0,7938 | 4 | 8 | 0,495 | 71,26 |
| Ensaio 5 | 0,4763 | 12 | 24 | 0,178 | 76,97 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 13 – Cálculo das resistências das chapas à ruptura por tração

| TRAÇÃO NA CHAPA | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------|--------------------|----------------|-----------|-----------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|---------------------|
| Amostr a | Largur a (cm) | Espessur a (cm) | ϕ (cm) | S (cm) | G (cm) | Rup. Seção Líquida | | Escoam. Seção bruta | | Rn adot. (kN) |
| | | | | | | An (cm ²) | Rn (kN) | Ag (cm ²) | Rn (kN) | |
| Ensaio 1 | 10 | 0,3 | 0,476 | 0 | 5 | 2,50 | 105,2 | 3 | 105 | 105 |
| Ensaio 2 | 10 | 0,3 | 0,793 | 0 | 2,5 | 1,97 | 82,76 | 3 | 105 | 82,76 |
| Ensaio 3 | 10 | 0,3 | 0,793 | 1,2 | 2,7 | 1,89 | 79,40 | 3 | 105 | 79,40 |
| Ensaio 4 | 10 | 0,3 | 0,793 | 0 | 1 | 2,31 | 97,18 | 3 | 105 | 97,18 |
| Ensaio 5 | 10 | 0,3 | 0,476 | 0 | 1 | 2,26 | 94,77 | 3 | 105 | 94,77 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 14 – Resistência das ligações à pressão de apoio e rasgamento da chapa

| PRESSÃO DE APOIO E RASGAMENTO DA CHAPA | | | | | | | | | | |
|--|-------------|------------------|-------------|-----------------|-------------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|---------------------|
| Amostra | ϕ (cm) | Borda e parafuso | | | Parafuso-parafuso | | | B-P (kN) | P-P (kN) | Rn adot. (kN) |
| | | a (cm) | P.A (kN) | Rasgam. (kN) | a (cm) | P.A (kN) | Rasgam. (kN) | | | |
| Ensaio 1 | 0,4763 | 2,5 | 14,40 | 33,07 | 3,0 | 14,40 | 35,89 | 14,40 | 14,40 | 57,61 |
| Ensaio 2 | 0,7938 | 2,2 | 24,00 | 26,13 | 3,0 | 24,00 | 31,09 | 24,00 | 24,00 | 144,03 |
| Ensaio 3 | 0,7938 | 1,6 | 24,00 | 17,06 | 2,4 | 24,00 | 22,02 | 17,06 | 22,02 | 107,30 |
| Ensaio 4 | 0,7938 | 1,4 | 24,00 | 14,03 | 2,0 | 24,00 | 15,97 | 14,03 | 15,97 | 60,01 |
| Ensaio 5 | 0,4763 | 1,0 | 14,40 | 10,39 | 1,5 | 14,40 | 13,21 | 10,39 | 13,21 | 133,10 |

Fonte: Elaboração própria

Sendo:

P.A: Pressão de apoio

B-P: Resistência obtida considerando a falha entre borda e parafuso

P-P: Resistência obtida considerando a falha entre os parafusos

Tabela 15 – Resistência das chapas ao cisalhamento de bloco

| CISALHAMENTO DE BLOCO | | | | | | | |
|-----------------------|-------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|------------|
| Amostr a | ϕ (cm) | Área cisalhada | | | Área tracionada | | Rd (kN) |
| | | Compriment o (cm) | Anv (cm ²) | Agv (cm ²) | Comprimento (cm) | Ant (cm ²) | |
| Ensaio 1 | 0,4763 | 4,5 | 1,96 | 2,70 | 5,0 | 1,25 | 101,89 |
| Ensaio 2 | 0,7938 | 5,2 | 2,09 | 3,12 | 7,5 | 1,56 | 118,36 |
| Ensaio 3 | 0,7938 | 5,8 | 2,45 | 3,48 | 5,4 | 0,93 | 100,97 |
| Ensaio 4 | 0,7938 | 4,5 | 1,67 | 2,70 | 8,0 | 2,06 | 128,49 |
| Ensaio 5 | 0,4763 | 5,5 | 1,56 | 3,30 | 4,0 | 0,70 | 69,01 |

Fonte: Elaboração própria

Por fim, a Tabela 16 apresenta o resumo das cargas necessárias, segundo o dimensionamento, para se obter todos os tipos de ruptura. A partir deste dimensionamento foram preparados os corpos-de-prova.

Tabela 16 – Resumo das resistências para cada tipo de falha

| AMOSTR A | PARAFUSOS | | RESISTÊNCIA NOMINAL DE CÁLCULO | | | |
|-------------|----------------------|--------|--------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| | Quantida de total | Ø (cm) | Cisalhamento (kN) | Tração na chapa (kN) | Pressão apoio e rasgam. (kN) | Cisalhamento de bloco (kN) |
| Ensaio 1 | 4 | 0,4763 | 25,66 | 105,00 | 57,61 | 101,89 |
| Ensaio 2 | 6 | 0,7938 | 106,90 | 82,76 | 144,03 | 118,36 |
| Ensaio 3 | 6 | 0,7938 | 106,90 | 79,40 | 107,30 | 100,97 |
| Ensaio 4 | 4 | 0,7938 | 71,26 | 97,18 | 60,01 | 128,49 |
| Ensaio 5 | 12 | 0,4763 | 76,97 | 94,77 | 133,10 | 69,01 |

Fonte: Elaboração própria

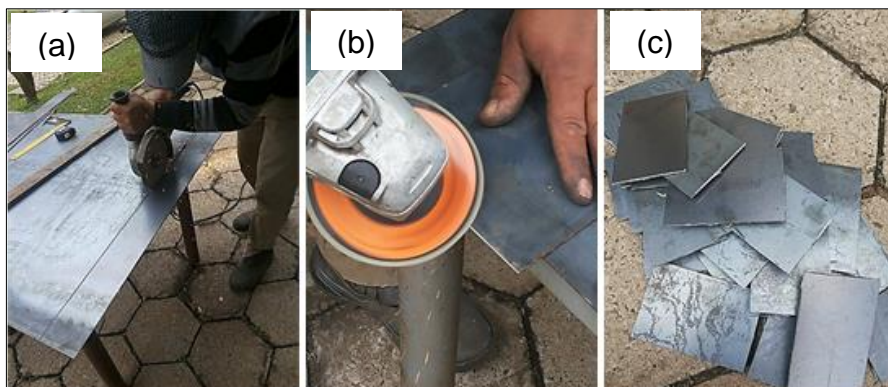
3.4 Montagem dos corpos-de-prova

Com o intuito de obter a ruptura nas chapas de ligação, as mesmas apresentam espessura de 3mm (1/8”), enquanto as chapas a serem ligadas apresentam espessura de 9,5mm (3/8”).

3.4.1 Chapas de ligação:

As chapas de ligação apresentam dimensões (10cm x 15cm), e foram obtidas a partir do corte de uma chapa inteira de dimensões (2,0m x 1,0m). O corte das chapas foi feito manualmente com máquina de corte a disco. Posteriormente ao corte, foi realizado o acabamento das arestas utilizando uma lixadeira. Na Figura 19 estão mostrados os procedimentos descritos

Figura 19 – Preparação das chapas de ligação: (a) Corte das chapas; (b) Acabamento das arestas; (c) Chapas de ligação



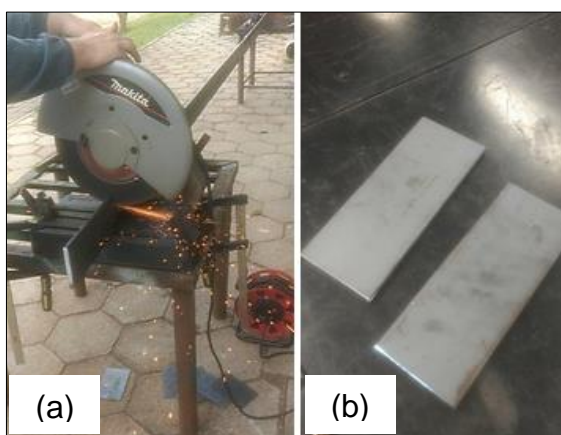
Fonte: Elaboração própria

Conforme descrito no item 3.1, para cada um dos 5 tipos de ruptura dimensionados, serão ensaiados 4 corpos-de-prova. Dessa forma, para cada tipo de ruptura foram necessárias 8 chapas de ligação, totalizando 40 chapas.

3.4.2 Chapas intermediárias:

As chapas a serem ligadas apresentam dimensões (10cm x 25cm), e foram obtidas a partir do corte de uma barra chata de dimensões (0,1m x 6m). O corte foi realizado utilizando-se uma serra poli corte, conforme Figura 20.

Figura 20 – Corte das chapas intermediárias: (a) Processo de corte das chapas; (b) chapas após o corte.



Fonte: Elaboração própria

As chapas a serem ligadas (intermediárias), por possuírem maior espessura do que a soma das espessuras de duas chapas de ligação e resistência suficiente, foram reaproveitadas em todos os corpos-de-prova devido à necessidade de uma adaptação para a realização do ensaio, que consistiu na soldagem de vergalhões de aço junto às chapas, formando as matrizes de cada ensaio (Figura 21). A adaptação foi realizada devido à máquina utilizada para os ensaios de tração não possibilitar o encaixe de chapas, apenas barras.

Sendo assim, para cada tipo de ruptura, foram utilizadas duas matrizes.

Figura 21 – Adaptação com vergalhão soldado à chapa intermediária



Fonte: Elaboração própria

3.4.3 Parafusos:

Foram utilizados parafusos da marca Ciser, identificados pela numeração 8.8 (Figura 22), com classe de resistências segundo a ISO 898-1 (resistências equivalentes a ASTM A36), com cabeça sextavada e de diâmetros 3/16" e 5/16", acompanhados das porcas correspondentes. Todos os parafusos tinham 30 mm de comprimento. A escolha do diâmetro, bem como a quantidade e a disposição dos parafusos foram determinados no dimensionamento dos corpos-de-prova (item 3.3).

Figura 22 – Parafuso Ciser 8.8

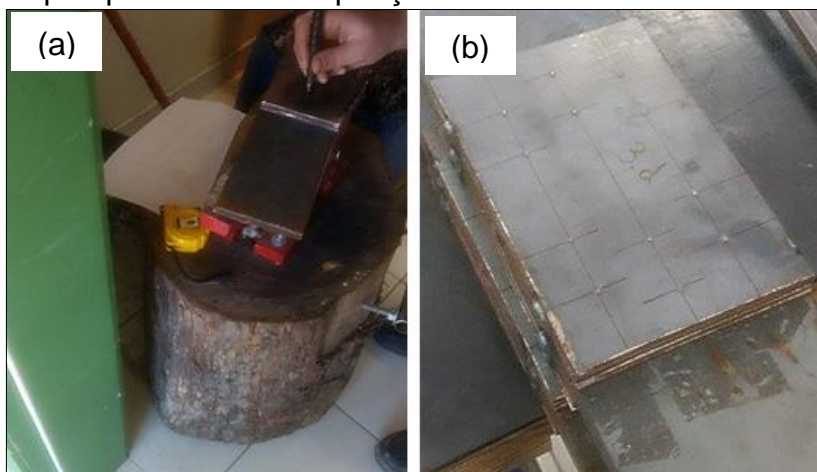


Fonte: Catálogo Ciser

3.4.4 Furação das chapas:

A posição dos furos foi medida e previamente marcada com caneta permanente, sendo posteriormente reforçada com uma marca de punção, conforme Figura 23.

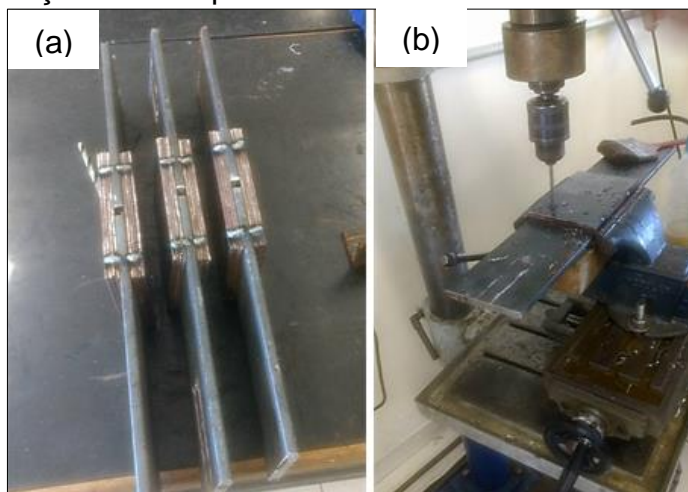
Figura 23 – Marcação das chapas para a furação: (a) Execução das marcas de punção; (b) Chapa após a marca de punção.



Fonte: Elaboração própria

Para que a distância entre os furos mantivesse um padrão em todos os ensaios de cada tipo de ruptura, foi realizado um ponto de solda para unir todas as chapas de cada ensaio para que, dessa forma, todas as chapas fossem furadas ao mesmo tempo, usando uma furadeira de bancada, conforme Figura 24.

Figura 24 – Furação das chapas: (a) União de todas as chapas de 3 tipos de ensaio; (b) Processo de furação das chapas unidas

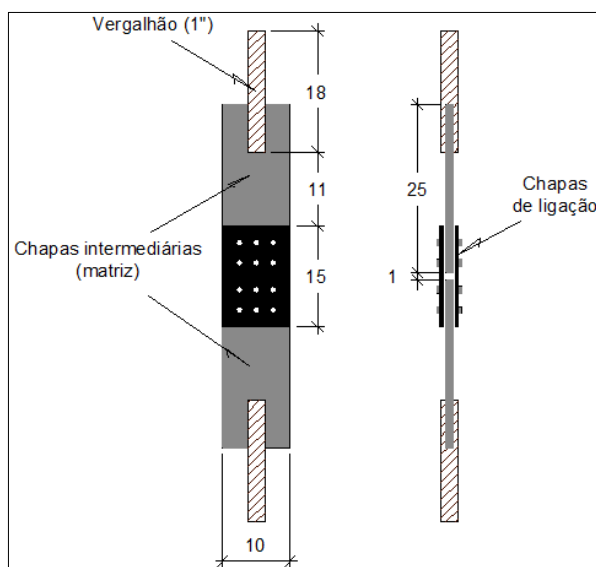


Fonte: Elaboração própria

3.5 Execução do ensaio de tração

O ensaio foi realizado fixando os vergalhões à máquina de tração, e aplicando carregamento progressivo para determinar a resistência das chapas utilizadas para unir as duas matrizes. O esquema do ensaio realizado, bem como a representação dos corpos-de-prova são mostrados na Figura 25.

Figura 25 – Esquema do ensaio-de-tração



Fonte: Elaboração Própria

4 RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Ao realizar os ensaios de tração com os corpos-de-prova dimensionados, nas situações em que deveria ocorrer a ruptura na chapa foi observada uma diferença nas propriedades do material tendo em mente os valores de ruptura calculados, resultando em uma carga de ruptura maior do que a carga determinada no dimensionamento, e excedendo a capacidade máxima de carga da máquina utilizada (180 kN).

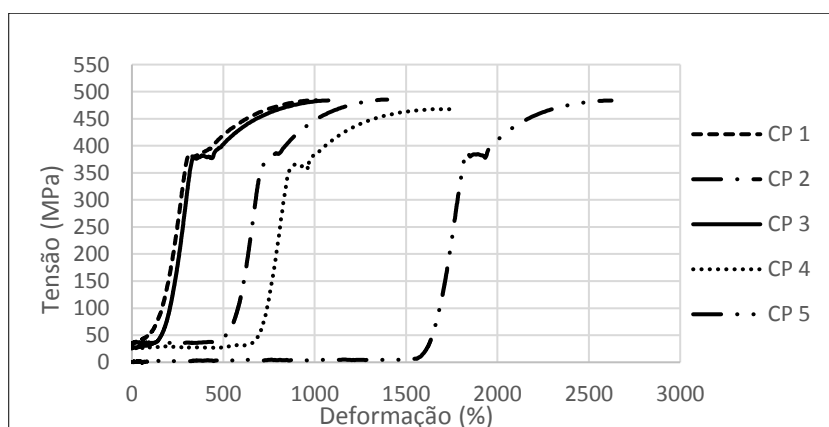
Dessa forma, foram realizados ensaios de tração em corpos de prova com seção de aproximadamente 42 mm² e traçado o gráfico Tensão x Deformação do ensaio para a determinação das propriedades do aço usado nos ensaios, conforme figura 26. A variação elevada entre as deformações iniciais mostradas no gráfico, pode ser resultado da acomodação dos corpos-de-prova na máquina durante o ensaio de tração. Embora tenha ocorrido estas variações, as tensões de ruptura e escoamento apresentaram valores bem próximos entre todos os corpos-de-prova.

As médias obtidas para as resistências, bem como as propriedades dos parafusos utilizados são apresentados na Tabela 17.

A partir das resistências determinadas, conclui-se que o aço utilizado na confecção da ensaiada tem características mecânicas equivalentes ao aço ASTM A572 Gr 50.

A Tabela 18 apresenta os valores reais das forças máximas resistentes para cada ensaio, considerando as resistências obtidas para as chapas. Os valores indicam a resistência de apenas uma chapa.

Figura 26 - Tensão x Deformação dos ensaios na chapa de 3mm



Fonte: Elaboração Própria

Tabela 17 - Média das resistências obtidas com o ensaio e propriedades dos parafusos

| Chapas ASTM A572 GR 50 | |
|-------------------------------|------|
| Fu (kN/cm ²) | 48,1 |
| Fy (kN/cm ²) | 37,6 |
| Parafusos ASTM A325 | |
| Fu (kN/cm ²) | 82,5 |
| Fy (kN/cm ²) | 63,5 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 18 – Resumo das resistências para cada tipo de falha (aço ASTM A572 gr 50)

| AMOSTR A | PARAFUSOS | | RESISTÊNCIA NOMINAL DE CÁLCULO | | | |
|---------------------|------------------|--------|---------------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------------|
| | Quantidade total | ∅ (cm) | Cisalhamento dos parafusos (kN) | Tração na chapa (kN) | Pressão de apoio e rasgam. (kN) | Cisalhamento de bloco (kN) |
| Ensaio 1 | 4 | 0,4763 | 47,04 | 112,80 | 65,98 | 116,69 |
| Ensaio 2 | 6 | 0,7938 | 195,98 | 94,78 | 164,95 | 135,55 |
| Ensaio 3 | 6 | 0,7938 | 195,98 | 90,94 | 122,89 | 115,64 |
| Ensaio 4 | 4 | 0,7938 | 130,65 | 111,29 | 68,72 | 147,15 |
| Ensaio 5 | 12 | 0,4763 | 141,12 | 108,53 | 152,43 | 79,03 |

Fonte: Elaboração Própria

Apesar de os cálculos indicarem a ruptura do ensaio 5 por cisalhamento dos parafusos com uma carga dentro do limite, só foi obtida a ruptura nos ensaios 1 e 4, cujos resultados são apresentados abaixo.

Nos demais ensaios (2, 3 e 5) não foi ultrapassado o regime elástico do material, como mostrado a seguir.

4.1 Ensaio 1

Na Tabela 19 são apresentados os resultados obtidos com os ensaios, considerando que a área é a área total entre as faces cisalhadas de todos os parafusos da ligação. No gráfico da Figura 27 são mostradas as curvas Tensão x Deformação obtidas com o ensaio 1.

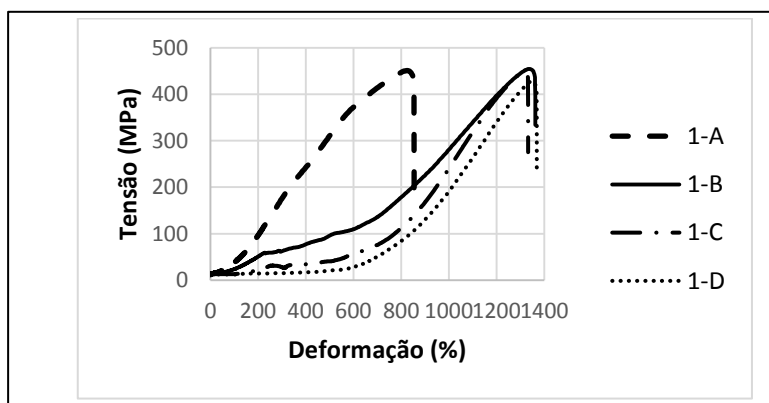
Na figura 28 estão apresentados os quatro corpos-de-prova do ensaio 1 após a ruptura.

Tabela 19 - Média das resistências dos parafusos ao cisalhamento obtidas no ensaio 1

| Área total cisalhada (mm ²) | Força média de ruptura (kN) | Tensão de ruptura (MPa) |
|---|-----------------------------|-------------------------|
| 142,541 | 63,56 | 445,88 |

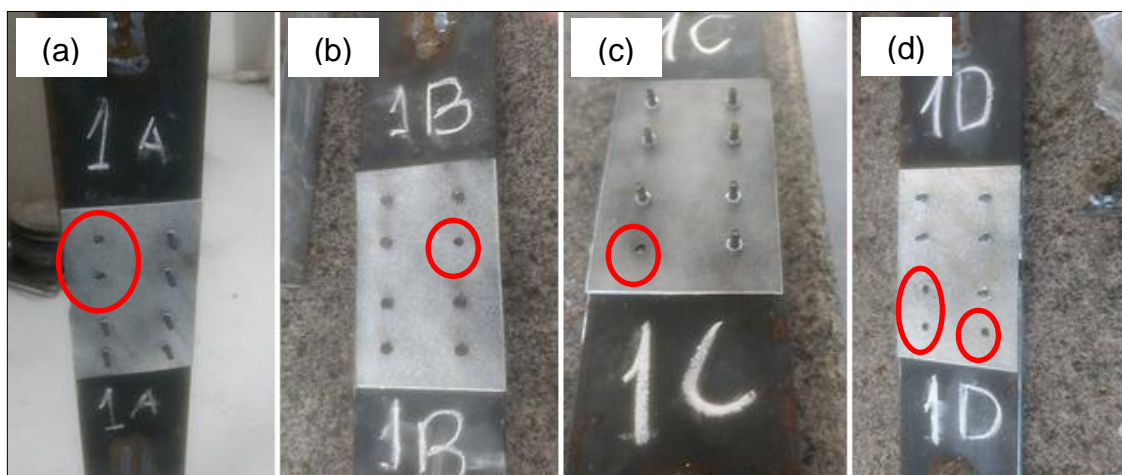
Fonte: Elaboração própria

Figura 27 - Tensão x Deformação (Ensaio 1)



Fonte: Elaboração própria

Figura 28 – Corpos-de-prova do ensaio 1 após a ruptura: (a) Ensaio 1-A; (b) Ensaio 1-B; (c) Ensaio 1-C; (d) Ensaio 1-D.



Fonte: Elaboração Própria

Apesar do cálculo inicial indicar capacidade máxima de 47,04 kN, os parafusos romperam com uma média de 63,56 kN, valor aproximadamente 25% maior do que o previsto.

A diferença ser explicada pela reserva técnica dos materiais, que têm sempre indicada a resistência mínima, e pelo fato de a fórmula da NBR 8800:2008 levar em

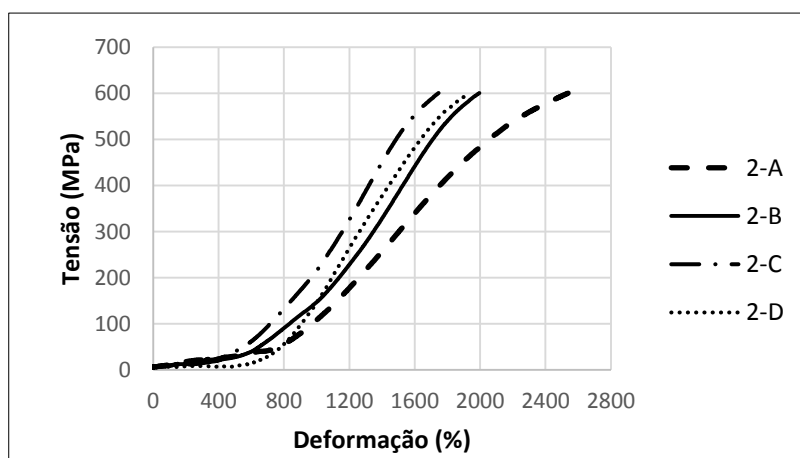
conta apenas parafusos de diâmetros maiores, lembrando que, pela probabilidade de falhas, as resistências médias dos elementos diminuem com o aumento de suas dimensões. No caso dos parafusos ensaiados, era de se esperar maiores resistências para menores diâmetros.

4.2 Ensaio 2 e 3

Os ensaios 2 e 3 foram submetidos à carga de 180kN, porém não houve ruptura nem danos significativos nas chapas, apenas danos leves nos parafusos. Os gráficos das curvas tensão x deformação dos ensaios 2 e 3 são mostrados nas figuras 29 e 30, respectivamente.

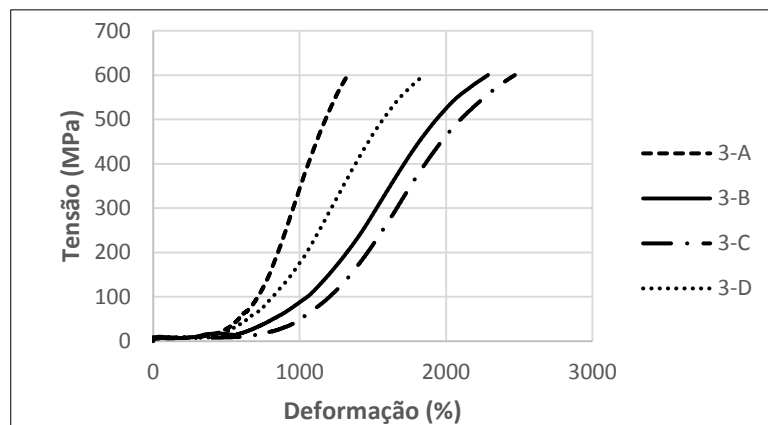
O gráfico do ensaio 2 indica valores bem próximos do módulo de elasticidade dos corpos-de-prova, enquanto que para o ensaio 3, é possível visualizar no gráfico maior discrepância entre os módulos de elasticidade.

Figura 29 - Tensão x Deformação (Ensaio 2)



Fonte: Elaboração Própria

Figura 30 - Tensão x Deformação (Ensaio 3)



Fonte: Elaboração própria

Como mencionado anteriormente, este resultado se deve à utilização de um material mais resistente do que o considerado nos cálculos, o que levou a resistência das ligações ultrapassarem a capacidade máxima de carga da máquina utilizada nos ensaios. Com os dados obtidos, não foi possível determinar o tipo de ruptura dos ensaios 2 e 3, nem a tendência a um tipo de falha.

4.3 Ensaio 4

Embora tenha sido dimensionado para ocorrer à falha por rasgamento ou pressão de apoio, ocorreu o cisalhamento dos parafusos no ensaio 4. Isto se justifica pelo fato de a ligação ter sido dimensionada para ser composta por quatro parafusos de 8 mm de diâmetro, mas devido a um erro de projeto, foram realizados furos de 5 mm e utilizados parafusos correspondentes.

Considerando a falha de projeto, a configuração do ensaio 4 ficou praticamente igual à configuração do ensaio 1, diferindo apenas nos espaçamentos. Sendo assim, as forças máximas calculadas são iguais, conforme apresentado na Tabela 20. Dessa forma, o valor da tensão de ruptura também levou em conta a área total de faces cisalhadas dos parafusos.

Na Tabela 21 estão mostradas as médias da resistência da ligação do ensaio 4 ao cisalhamento dos parafusos.

A curva tensão x deformação é mostrada no gráfico da Figura 31, em que é possível observar comportamento semelhante entre os corpos-de-prova A e C, enquanto os demais apresentaram resistência inferior aos demais.

Na Figura 32 são mostrados três corpos-de-prova do ensaio 4 após a ruptura (Não foi feito registro fotográfico do ensaio 4B).

Tabela 20 - Resumo das resistências para cada tipo de falha (aço ASTM A572 gr 50) – considerando o erro de projeto

| AMOSTRA | PARAFUSOS | | RESISTÊNCIA NOMINAL DE CÁLCULO | | | |
|----------|----------------|--------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------------|
| | Quantid. total | \varnothing (cm) | Cisalhamento (kN) | Tração na chapa (kN) | Pressão de apoio e rasgam. (kN) | Cisalhamento de bloco (kN) |
| Ensaio 1 | 4 | 0,4763 | 47,04 | 105,00 | 57,61 | 101,89 |
| Ensaio 2 | 6 | 0,7938 | 195,98 | 82,76 | 144,03 | 118,36 |
| Ensaio 3 | 6 | 0,7938 | 195,98 | 79,40 | 107,30 | 100,97 |
| Ensaio 4 | 4 | 0,4763 | 47,04 | 105,00 | 57,61 | 139,69 |
| Ensaio 5 | 12 | 0,4763 | 141,12 | 94,77 | 133,10 | 69,01 |

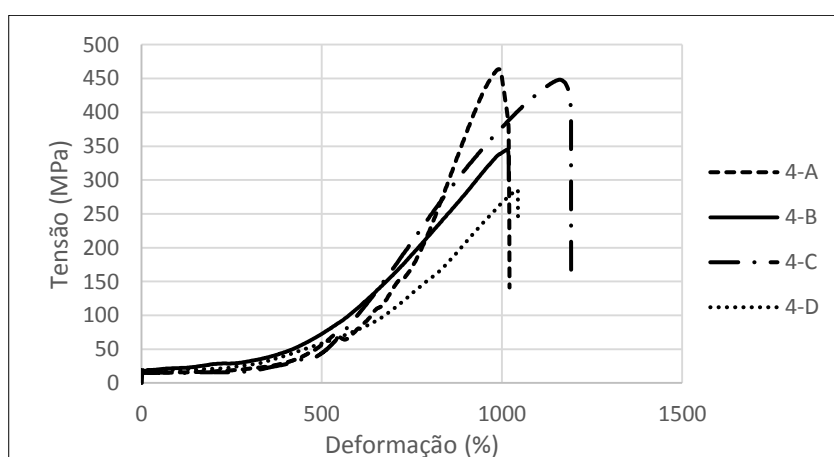
Fonte: Elaboração própria

Tabela 21 - Média das resistências ao cisalhamento dos parafusos do ensaio 4

| Área total cisalhada (mm ²) | Força média de ruptura (kN) | Tensão de ruptura (MPa) |
|---|-----------------------------|-------------------------|
| 142,541 | 54,98 | 385,72 |

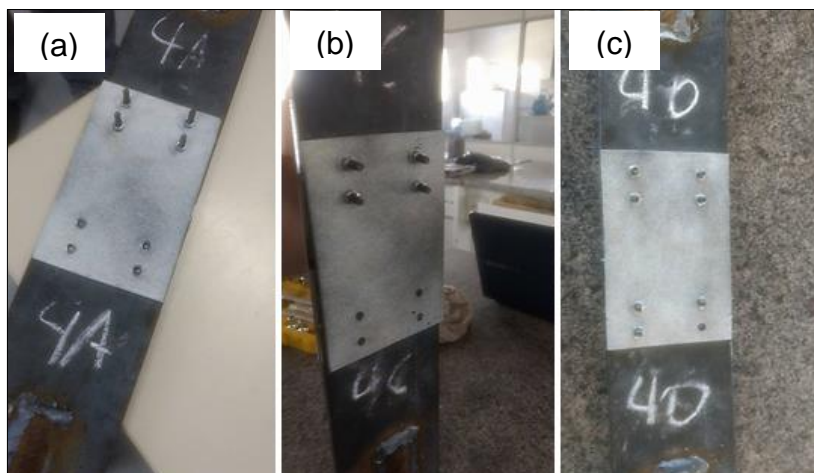
Fonte: Elaboração própria

Figura 31 - Gráfico tensão x deformação - (Ensaio 4)



Fonte: Elaboração própria

Figura 32 – Corpos-de-prova após ensaio: (a) Ensaio 4-A; (b) Ensaio 4-C; (c) Ensaio 4-D



Fonte: Elaboração própria

4.4 Ensaio 5

O ensaio 5, que foi dimensionado para romper por cisalhamento de bloco também foi submetido à carga máxima de 180 kN e não apresentou danos significativo nas chapas. Entretanto, os parafusos utilizados nesta ligação apresentaram, em todos os casos, danos consideráveis, como mostra a Figura 33. Este fato, indica que se fosse aplicada uma carga maior, a ruptura da ligação ocorreria devido ao cisalhamento dos parafusos, ainda que não tenha sido a intenção.

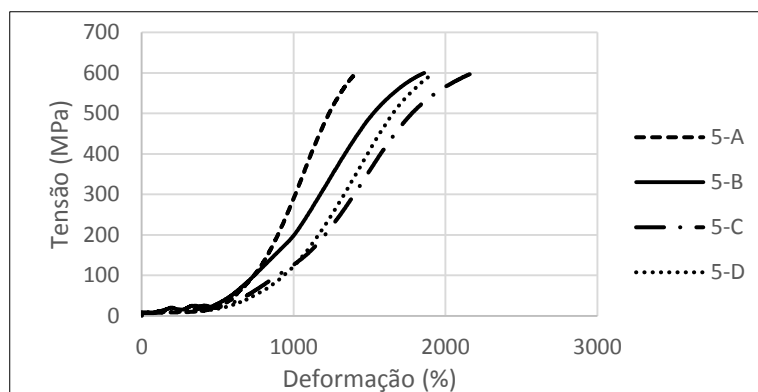
O gráfico da Figura 34 apresenta a curva tensão x deformação obtida através do ensaio, em que é possível observar uma variação significativa entre os módulos de elasticidade dos ensaios A e C.

Figura 33 - Parafusos danificados (ligação do ensaio 5)



Fonte: Elaboração Própria

Figura 34 – Gráfico tensão x deformação (Ensaio 5)



Fonte: Elaboração Própria

Devido as diferenças entre as propriedades mecânicas usadas no dimensionamento e as do material utilizado nos ensaios, não foi possível tirar conclusões significativas a respeito dos ensaios 2, 3 e 5. Dessa forma, para que fosse possível obter algum resultado para as ligações que não atingiram nem o patamar de escoamento, foram preparadas novas chapas de ligação para substituírem os ensaios que não apresentaram resultados. Para isso, foi utilizada uma chapa de aço disponível no laboratório, com espessura inferior, correspondente a um milímetro e meio (1,5mm) cujas propriedades mecânicas são equivalentes às consideradas no primeiro dimensionamento (ASTM A36, correspondente ao SAE1020). A preparação dos corpos-de-prova com as novas chapas de ligação seguiu o mesmo procedimento descrito anteriormente.

Para cada ensaio, foram feitos 3 corpos-de-prova diferentes. Os parâmetros dos materiais utilizados são mostrados na Tabela 22 e o dimensionamento de cada ensaio é apresentado na Tabela 23.

Tabela 22 - Parâmetros dos materiais utilizados no dimensionamento dos ensaios de substituição.

| Chapas ASTM A36 | |
|----------------------------|------|
| Fu (kN/cm ²) | 42 |
| Fy (kN/cm ²) | 35 |
| Parafusos ASTM A325 | |
| Fu (kN/cm ²) | 82,5 |
| Fy (kN/cm ²) | 63,5 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 23 – Resumo das resistências para cada tipo de falha das chapas de 1,5mm de espessura e aço ASTM A36

| AMOSTRA | PARAFUSOS | | RESISTÊNCIA NOMINAL DE CÁLCULO | | | |
|----------|-------------------|--------|--------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| | Quantida de total | Ø (cm) | Cisalhamento (kN) | Tração na chapa (kN) | Pressão apoio e rasgam. (kN) | Cisalhamento de bloco (kN) |
| Ensaio 1 | - | - | - | - | - | - |
| Ensaio 2 | 6 | 0,7938 | 195,98 | 41,38 | 72,01 | 59,18 |
| Ensaio 3 | 6 | 0,7938 | 195,98 | 39,70 | 53,65 | 50,49 |
| Ensaio 4 | - | - | - | - | - | - |
| Ensaio 5 | 12 | 0,4763 | 141,12 | 47,38 | 66,55 | 34,50 |

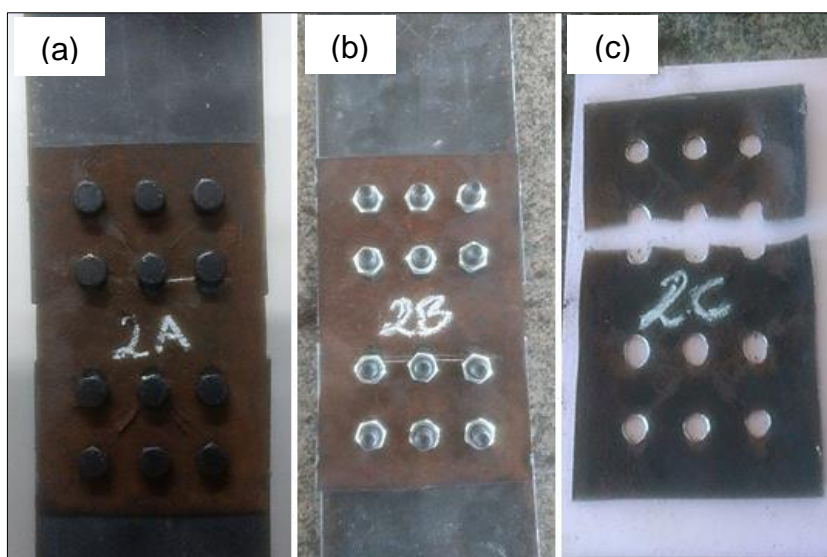
Fonte: Elaboração própria

4.5 Ensaio 2 (Substituição):

Na Figura 35 são apresentadas as ligações do ensaio 2 após a ruptura. No gráfico da Figura 36 é possível visualizar as curvas de tensão x deformação, cujas resistências à ruptura dos três corpos-de-prova do ensaio atingiram valores próximos.

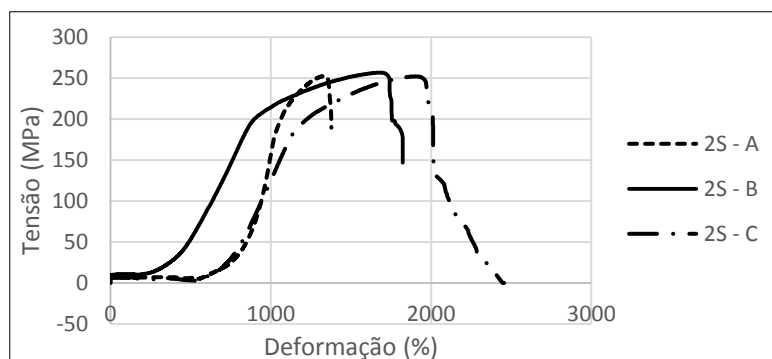
A tabela 24 apresenta a força e a tensão máximas suportadas pela ligação.

Figura 35 – Corpos-de-prova após a ruptura (ensaio de substituição 2): a) ensaio 2-A; b) ensaio 2-B; c) ensaio 2-C



Fonte: Elaboração própria

Figura 36 – Gráfico tensão x deformação (Ensaio 2 – substituição)



Fonte: Elaboração própria

Tabela 24 - Média das resistências das chapas à tração obtidas no ensaio 2 de substituição

| Área total tracionada (mm ²) | Média da força de ruptura (kN) | Tensão de ruptura (MPa) |
|--|--------------------------------|-------------------------|
| 300 | 76,08 | 253,59 |

Fonte: Elaboração própria

Segundo o dimensionamento apresentado na Tabela 23, a ligação deveria suportar no mínimo uma carga de 41,38 kN em cada chapa, totalizando 82,76 kN e romper por tração na chapa, apresentando uma linha reta de ruptura. A ruptura ocorreu com carga de 76,08 kN, com carregamento aproximadamente 8% menor do que o calculado.

4.6 Ensaio 3 (Substituição):

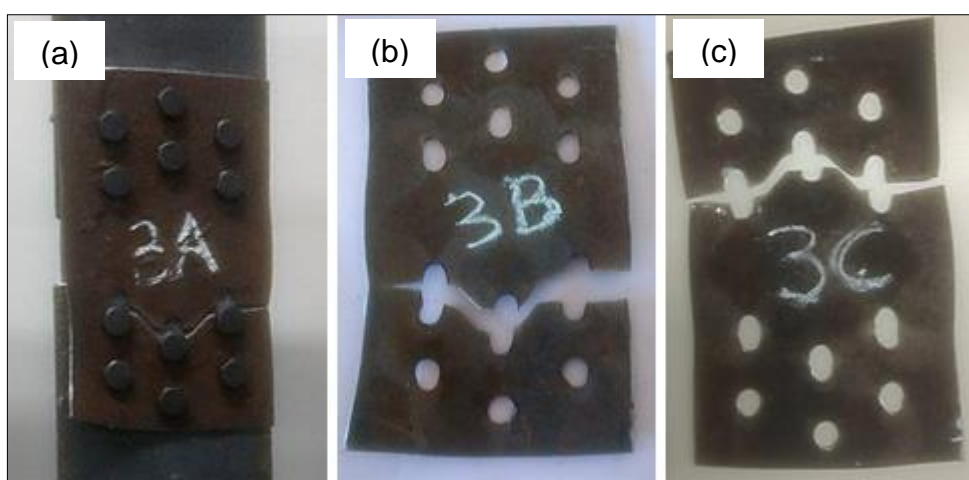
Na Tabela 25 são mostradas as resistências obtidas para a ligação do ensaio 3 de substituição. A Figura 37 apresenta os corpos-de-prova do ensaio após a ruptura e no gráfico da Figura 38 estão dispostas as curvas tensão x deformação obtidas com o ensaio, o que garante a proximidade das resistências à ruptura obtidas.

Tabela 25 - Média das resistências das chapas à tração obtidas no ensaio 3 de substituição

| Área total tracionada (mm ²) | Força média de ruptura (kN) | Tensão de ruptura (MPa) |
|--|-----------------------------|-------------------------|
| 300 | 80,88 | 269,60 |

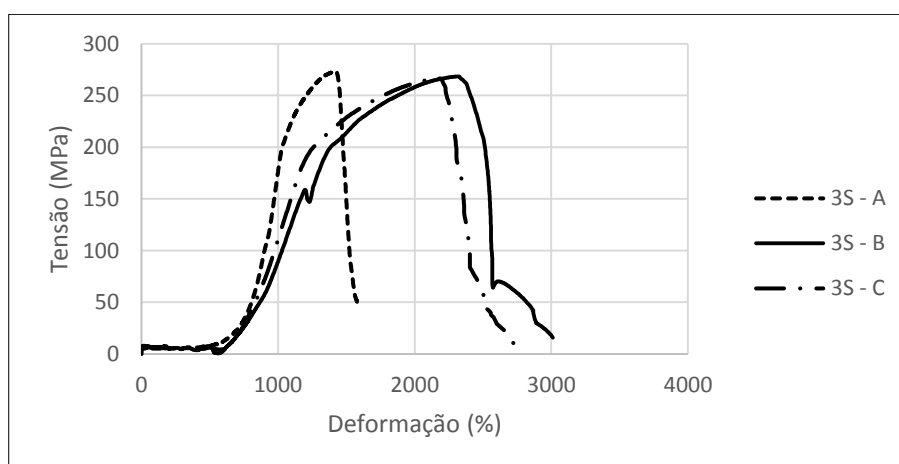
Fonte: Elaboração própria

Figura 37 – Corpos-de-prova após a ruptura (ensaio de substituição 3): a) ensaio 3-A; b) ensaio 3-B; c) ensaio 3-C



Fonte: Elaboração Própria

Figura 38 – Gráfico tensão x deformação (Ensaio 3 – substituição)



Fonte: Elaboração Própria

Conforme dimensionamento apresentado na Tabela 23, a ligação deveria suportar no mínimo uma carga de 39,70 kN por chapa, totalizando 79,40 kN e romper

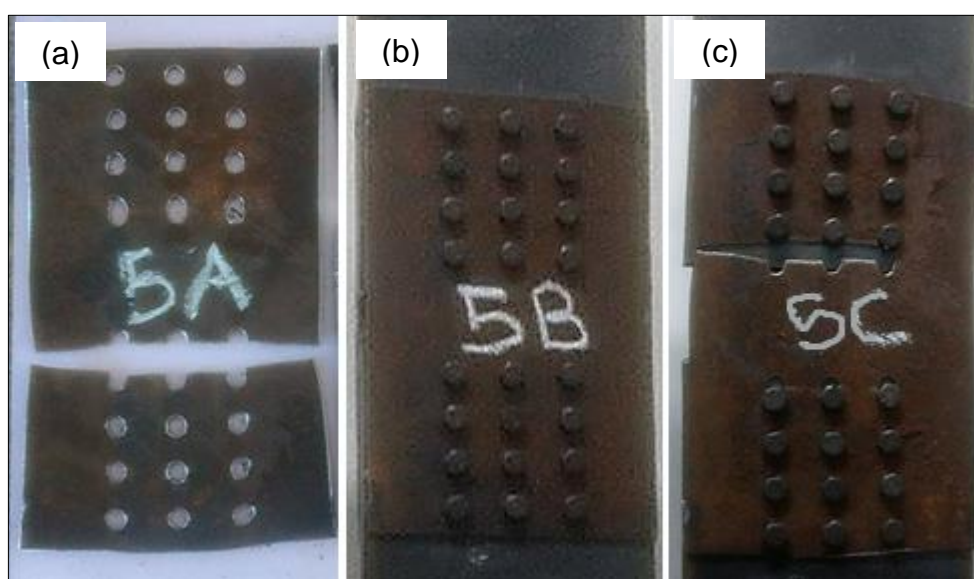
por tração na chapa, apresentando uma linha de ruptura em forma de ziguezague. A ruptura ocorreu com carga de 80,88 kN.

Obteve-se ruptura na forma esperada, com carregamento aproximadamente 2% maior do que o calculado.

4.6 Ensaio 5 (Substituição):

A Figura 39 apresenta as ligações do ensaio 5 após a ruptura. A Tabela 26 e o gráfico da figura 40 apresentam, respectivamente, a resistência da ligação e as curvas Tensão x deformação obtidas com o ensaio.

Figura 39 - Corpos-de-prova após a ruptura (ensaio de substituição 5): a) ensaio 5-A; b) ensaio 5-B; c) ensaio 5-C



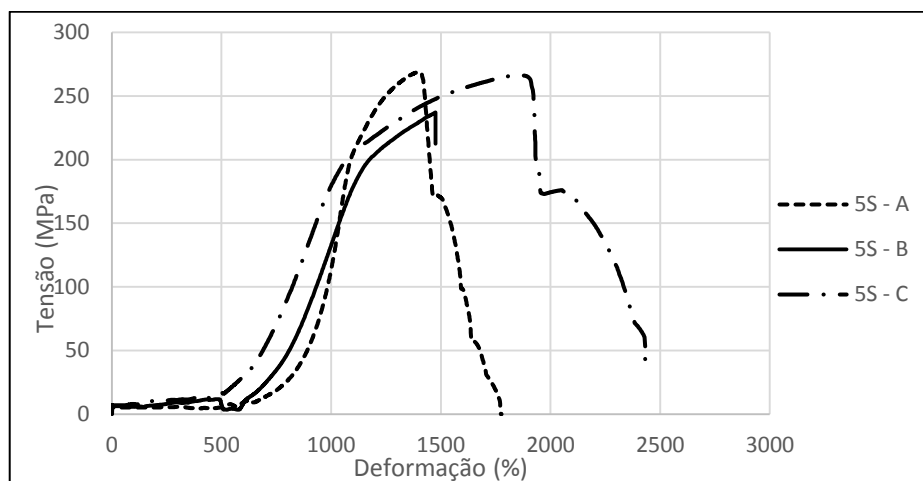
Fonte: Elaboração Própria

Tabela 26 - Resistência da ligação do ensaio 5 (substituição)

| Área total tracionada (mm ²) | Força média de ruptura (kN) | Tensão de ruptura (MPa) |
|--|-----------------------------|-------------------------|
| 300 | 77,23 | 257,44 |

Fonte: Elaboração Própria

Figura 40 - Tensão x Deformação (Ensaio 5 – substituição)



Fonte: Elaboração Própria

Os corpos-de-prova do ensaio 5 apresentaram ruptura por tração na chapa, exceto o ensaio 5B, que apesar de o ensaio indicar ruptura com carga de 71,13 kN, não apresentou danos visíveis nem na chapa, nem nos parafusos.

De modo geral, a média dos resultados indicou ruptura por tração na chapa com carga de 77,23kN, sendo que o dimensionamento (Tabela 16) indicava que ocorreria a ruptura por cisalhamento de bloco com uma carga de 69 kN.

A ruptura ocorreu com carregamento aproximadamente 12% maior do que o valor calculado, apresentando uma forma de ruptura diversa da esperada.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho consistiu em verificar a segurança de ligações parafusadas em chapas metálicas submetidas a esforços de tração, tendo como parâmetros os critérios da NBR 8800:2008. Para tanto foram considerados os seguintes efeitos: cisalhamento dos parafusos; tração na chapa; pressão de apoio e rasgamento da chapa; e cisalhamento de bloco.

Nos ensaios que avaliaram o cisalhamento dos parafusos obteve-se resultados satisfatórios, com carga de ruptura 25% acima dos valores previstos.

No que tange ao efeito de tração na chapa, não foi possível aplicar força capaz de romper a placa ensaiada inicialmente. Utilizou-se, então, uma chapa de menor espessura e com outras propriedades mecânicas. Com isso obteve-se resultados parcialmente satisfatórios. No caso de seção reta de ruptura, obteve-se a falha na forma esperada, no entanto, com carga 8% menor do que o previsto. Quanto ao caso de seção de ruptura em forma de ziguezague, o resultado foi satisfatório tanto na forma quanto nos valores, visto que a carga média resistente da ligação foi 2% maior do que a prevista.

Os resultados quanto à ruptura por pressão de apoio e rasgamento ficaram comprometidos por um erro no projeto da ligação. No entanto o ensaio realizado confirmou os resultados relativos ao efeito de cisalhamento nos parafusos, cuja carga de ruptura foi aproximadamente 14% maior do que a prevista.

No caso em que era esperado o cisalhamento de bloco, houve ruptura da seção em linha reta utilizando-se, também, chapa de menor espessura pelo mesmo motivo apontado ao considerar a ruptura à tração. O valor da carga de ruptura por tração foi aproximadamente 12% maior do que o valor previsto para ruptura por cisalhamento de bloco. No entanto a ruptura ocorreu com um valor aproximadamente 19% menor do valor calculado para ruptura por tração em seção reta. O fato de não ocorrer ruptura por cisalhamento de bloco pode ter explicação no conservadorismo da equação de cisalhamento de bloco, que leva em conta apenas o menor de dois valores calculados. Quanto à ruptura por tração, em seção reta, com valores abaixo do valor calculado com os critérios da Norma já foi percebido no caso de ruptura por tração em seção reta, apontando para a necessidade de mais ensaios que confirmem ou não este comportamento.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se:

- Ao realizar estudos que dependam das propriedades do material, efetuar logo após a aquisição dos mesmos os ensaios de caracterização;
- Realizar os ensaios utilizando uma máquina de tração com maior capacidade de carga, para que haja mais possibilidades em relação às dimensões e dimensionamento das ligações;

REFERÊNCIAS

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.

PFEIL, W., PFEIL M. **Estruturas de Aço – Dimensionamento Prático de acordo com a NBR 8800**. 8^o ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SOUZA, A.S.C. **Dimensionamento de elementos e ligações em estruturas de aço**. São Carlos: Edufscar, 2017.

SANTOS, J.J, ET AL. **Avaliação da resistência à tração de ligações aparafusadas em aço inoxidável**. Rio de Janeiro, 2008