

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE
CAMPUS CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

RESISTÊNCIA DAS CHAPAS LATERAIS DE SILOS METÁLICOS UTILIZANDO
NOVO MODELO DE PARAFUSO

DANIELE CRISTINA FICANHA

Cascavel - Paraná - Brasil

2020

DANIELE CRISTINA FICANHA

**RESISTÊNCIA DAS CHAPAS LATERAIS DE SILOS METÁLICOS UTILIZANDO
NOVO MODELO DE PARAFUSO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Sistemas Biológicos e Agroindustriais.

Orientador: Prof. Dr. Divair Christ

Coorientador: Prof. Dr. Carlito Calil Júnior

Cascavel - Paraná - Brasil

2020

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Ficanha, Daniele Cristina

Resistência das chapas laterais de silos metálicos utilizando novo modelo de parafuso / Daniele Cristina Ficanha; orientador(a), Divair Christ; coorientador(a), Carlito Calil Júnior, 2020.

100 f.

Tese (doutorado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2020.

1. Ligação Parafusada. 2. Coeficiente de Redução de Área Líquida. 3. Cisalhamento do Parafuso. 4. Costura Tripla. I. Christ, Divair . II. Calil Júnior, Carlito . III. Título.

DANIELE CRISTINA FICANHA

RESISTÊNCIA DAS CHAPAS LATERAIS DE SILOS METÁLICOS UTILIZANDO NOVO MODELO DE PARAFUSO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, área de concentração Sistemas Biológicos e Agroindustriais, linha de pesquisa Tecnologias de Produção Vegetal e Pós-colheita, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Divair Christ

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



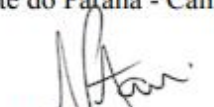
Carlito Calil Júnior -

Universidade de São Paulo (USP)



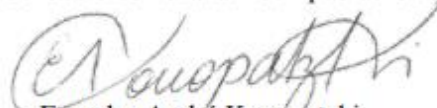
Silvia Renata Machado Coelho

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Alfredo Petrauski

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Evandro André Konopatzki

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Cascavel, 11 de dezembro de 2020.

BIOGRAFIA

Daniele Cristina Ficanha, natural de Concórdia, SC, nascida no dia 11 de março de 1986;
Técnica em Mecatrônica pela Fundação Adolpho Bósio de Educação no Transporte – FABET em junho de 2012;

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade do Oeste de Santa Catarina – UNOESC, *Campus* de Joaçaba, em fevereiro de 2013;

Especialista em Engenharia de Estruturas Metálicas pela Universidade do Oeste de Santa Catarina – UNOESC, *Campus* de Joaçaba, em novembro de 2014;

Professora da disciplina de Resistência dos Materiais no curso de Engenharia Civil na Faculdade Assis Gurgacz no ano letivo de 2015;

Mestre em Engenharia Agrícola pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, *Campus* de Cascavel, em março de 2017, orientada pelo Prof. Dr. Divair Christ e pelo coorientador Prof. Dr. Carlito Calil Júnior pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP;

Especialista em Engenharia de Produto Utilizando o Método dos Elementos Finitos pela Faculdade Unyleya em dezembro de 2020;

Membro da Comissão de Estudos ABNT/CE-203:020.001 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, no campo de Máquinas e Equipamentos para Sistemas de Armazenagem e Beneficiamento;

Atua como Engenheira Calculista de Estruturas Metálicas na empresa Comil Silos e Secadores Ltda. desde fevereiro de 2013.

DEDICATÓRIA

Dedico, primeiramente, a Deus, pela chance da nova vida, por estar sempre no meu caminho, iluminando e guiando às escolhas certas;

Ao meu filho, Lorenzo, iniciando essa jornada de pesquisa ainda em meu ventre, minha luz, meu passarinho, meu renascer;

À minha família de sangue, meus pais Anselmo, Zenir e irmão Johnny, a base de tudo para mim, apoiando-me nos momentos difíceis com força, confiança e amor, ensinando-me a persistir nos meus objetivos e ajudando a alcançá-los;

À minha nova família, meu marido Jaison Kostuchenko, agradeço a compreensão, o amor, a paciência e a recepção calorosa de todos os dias.

AGRADECIMENTOS

À empresa Comil Silos e Secadores Ltda., pela oportunidade e fidúcia em me repassar tamanha responsabilidade e confiar a mim tal função, de Engenheira Calculista;

Agradeço ao gerente da Comil Silos e Secadores Ltda., o Eng. André Windmoller, por permitir e incentivar este trabalho;

Agradeço ao Eng. Jeferson Sarreta, meu primeiro professor profissional, pelas aulas, por nossas discussões intermináveis e pelo incentivo;

Aos colegas de trabalho de todos os dias, Eduardo e Juma, agradeço a ajuda, os ensinamentos, a prestatividade e a descontração;

À Industrial Rex Ltda. pelo fornecimento da matéria prima e pela tentativa na confecção das amostras, em especial ao Gerente Nort Shaade, pela constante atenção ao projeto, e ao Eng. Nelson Luiz, pelas ideias propostas;

Ao Laboratório Spectroscan, em nome da Eng. Ângela Nardelli, pelo apoio nos ensaios Laboratoriais;

À Usina Hidrelétrica de Itaipu, em especial ao Eng. Fabio Willrich, do Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu, pelo apoio, pela prontidão e ajuda na realização dos ensaios;

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – PGEAGRI;

À Escola de Engenharia de São Carlos – USP pelo apoio e interesse na pesquisa, em especial ao Laboratório de Madeira e Estruturas – Lámen;

Ao Prof. Dr. Divair Christ, meu orientador, pelas experiências positivas de aprendizagem, por sua interminável paciência, por sua atenção, confiança e calma nas orientações;

Ao Prof. Dr. Carlito Calil Junior, meu coorientador, pelas muitas bibliografias na área de armazenamento, pelos direcionamentos, incentivo, ensinamentos e pelo interesse na pesquisa.

RESISTÊNCIA DAS CHAPAS LATERAIS DE SILOS METÁLICOS UTILIZANDO NOVO MODELO DE PARAFUSO

RESUMO

Os silos metálicos são utilizados para armazenar e preservar a qualidade dos grãos. Para isso, é de suma importância o dimensionamento adequado, a fim de garantir a eficiência e a segurança do equipamento. A possibilidade de implantação de um silo metálico baseia-se principalmente no custo e no peso da matéria prima: o aço. As chapas do costado representam a maior parte da matéria prima utilizada. A viabilização do parafuso alternativo, responsável pelas ligações dos elementos do corpo do silo, aumentam a resistência da chapa lateral. Atentando-se a isto, a possibilidade de meios para aumentar a resistência destas chapas juntamente com a ligação parafusada torna-se atrativa e econômica. Através do parafuso alternativo, capaz de suprir as solicitações de projeto, acarreta-se um novo conceito de dimensionamento estrutural e sistema de montagem das chapas laterais. A análise teórica iniciou-se pela otimização da ligação parafusada com o parafuso alternativo e replicou-se para o parafuso tradicional, analisando os possíveis modelos de acordo com as recomendações da Norma Brasileira 14762. A resistência do conjunto de chapa fina de aço parafusada com o parafuso alternativo foi superior em todas as espessuras compreendidas entre 0,80 e 6,70 mm, quando comparado ao parafuso tradicional. Ligações com costura simples e dupla tornam-se inviáveis para utilização em silos metálicos devido à perda de resistência nas ligações. Tendo em vista os quatro modelos de ruptura, a costura tripla é a ideal. A costura quádrupla eleva a resistência do conjunto, porém ocorrem outras rupturas anteriores ao cisalhamento dos parafusos. Para ensaios experimentais dos conjuntos 0,92 e 3,00 mm, a média da variável aleatória erro de modelo indicou um comportamento experimental seguro e conservador. A confiabilidade dos resultados elevou entre 28 e 34% o dimensionamento teórico, utilizando as normativas vigentes, mesmo desconsiderando os coeficientes de ponderação das ações. Os valores do Coeficiente de redução da área líquida obtidos normativamente também se mantiveram conservadores. As rupturas das amostras 0,92 mm por esmagamento não foram condizentes com o modelo normativo de ruptura da seção líquida na região da ligação. Para as amostras 3,00 mm, confirmou-se o fenômeno teórico com a ruptura da seção líquida na região da ligação. Para explicar os resultados experimentais obtidos nessa tese, se propõe expressões matemáticas para os modelos de ruptura da seção líquida na região da ligação e ruptura por esmagamento. O parafuso alternativo se torna uma provável solução nas ligações parafusadas das chapas metálicas utilizadas no costado dos silos.

Palavras-chave: ligação parafusada, coeficiente de redução de área líquida, cisalhamento do parafuso, costura tripla, conformação a frio.

RESISTANCE OF SIDEWALL SHEETS OF METAL SILOS USING NEW BOLT MODEL

ABSTRACT

Metal silos are used to store and preserve grain quality. Thus, proper sizing is of utmost importance, in order to guarantee the efficiency and safety of the equipment. The possibility of implanting a metallic silo is based mainly on the cost and weight of the raw material: steel. The side plates represent most of the raw material used. The possibility of the alternative screw by Ficanha (2016), responsible for the connections of the elements of the silo body, increases the resistance of the side plate. Considering such, the possibility of ways to increase the strength of these plates together with the screw connection becomes attractive and economical. Through the alternative screw, capable of supplying the project requests, a new concept of structural design and assembly system for the side plates is brought about. The theoretical analysis started by optimizing the screw connection with the alternative screw and replicated for the traditional screw, analyzing the possible models according to the recommendations of NBR 14762 (ABNT, 2010). The strength of the thin steel plate set screwed with the alternative screw was higher in all thicknesses between 0.80 and 6.70 mm, when compared to the traditional screw. Connections with single and double seam are not possible for use in metallic silos due to the loss of resistance in the connections. In view of the four rupture models, triple stitching is the ideal one. The quadruple seam increases the strength of the set, but other breaks occur before the shear of the screws. For experimental tests of the 0.92 and 3.00 mm sets, the mean of the model error random variable indicated a safe and conservative experimental behavior. The reliability of the results raised the theoretical dimension between 28 and 34%, using the current regulations, even disregarding the weighting coefficients of the actions. The C_t values obtained normatively also remained conservative. The ruptures of the 0.92 mm samples by crushing were not consistent with the normative model of rupture of the liquid section in the connection region. For the 3.00 mm samples, the theoretical phenomenon was confirmed with the rupture of the liquid section in the connection region. In order to explain the experimental results obtained in this research, mathematical expressions are proposed for the rupture models of the liquid section in the connection region and rupture by crushing. The alternative screw becomes a possible solution in the screw connections of the metal plates used in the side of the silos.

Key words: bolted connection, net area reduction coefficient, bolted shear, cold-forming, triple stitching.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivo geral.....	3
2.2	Objetivos específicos	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	Estruturas para armazenagens de grãos	4
3.1.1	Silos metálicos	4
3.2	Componentes estruturais do costado - Chapas laterais	6
3.3	Componentes estruturais do costado – Colunas verticais	8
3.4	Ligações parafusadas do costado.....	9
3.5	Conjunto de elementos de fixação	10
3.5.1	Parafusos de qualificação estrutural	11
3.6	Dimensionamento de silos metálicos	13
3.6.1	Ações permanentes.....	13
3.6.2	Ações variáveis	14
3.6.3	Ações excepcionais.....	14
3.6.4	Teoria de pressões.....	14
3.7	Normas brasileiras recomendadas no dimensionamento de chapas metálicas submetidas a esforços de tração	17
3.7.1	Recomendações gerais: NBR 14762 (ABNT, 2010)	17
3.8	Dimensionamento da resistência à tração das chapas metálicas com ligações parafusadas - NBR 14762 (ABNT, 2010).....	18
3.8.1	Ruptura da seção líquida na região de ligação	23
3.8.2	Sugestão para distinguir a ruptura da seção líquida na região da ligação e esmagamento da parede do furo	24
3.9	Determinação da resistência de parafusos estruturais	26
3.9.1	Estado limite das ligações parafusadas.....	26
3.10	Força de cisalhamento experimental do parafuso alternativo	33

3.11	Ligações parafusadas em perfis de aço formados a frio.....	35
4	MATERIAL E MÉTODOS	36
4.1	Estudo teórico e otimização do dimensionamento da resistência à tração das ligações parafusadas - NBR 14762 (ABNT, 2010).....	36
4.1.1	Estudo para determinação de An e posicionamento do parafuso alternativo	37
4.1.2	Estudo para determinação de Ct e definição do tipo de costura	38
4.1.3	Determinação da dimensão dos furos	40
4.1.4	Verificação dos espaçamentos máximos e mínimos entre os parafusos	40
4.1.5	Verificação do rasgamento, esmagamento e força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso.....	42
4.2	Definição da resistência de cálculo das chapas otimizadas utilizando o parafuso alternativo	42
4.3	Definição da resistência final de cálculo das chapas utilizando o parafuso tradicional ..	46
4.4	Visualização gráfica da resistência da chapa otimizada utilizando o parafuso alternativo x parafuso tradicional	47
4.5	Estudo experimental a partir do modelo otimizado da resistência à tração das ligações parafusadas - NBR 14762 (ABNT, 2010).....	50
4.6	Caracterização das propriedades mecânicas das chapas finas de aço.....	51
4.7	Dados teóricos e experimentais para a definição da resistência ao cisalhamento do parafuso alternativo e tradicional	53
4.8	Resultados teóricos dos corpos de prova a partir da caracterização dos materiais.....	53
4.9	Ensaio dos conjuntos das ligações parafusadas no sentido longitudinal	55
4.10	Análise dos resultados	57
4.10.1	Erro de modelo ou coeficiente profissional	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1	Resultados experimentais e análise estatística para os conjuntos de chapas finas de aço com espessura 0,92 mm.....	59
5.1.1	Análise estatística de amostras de chapas finas de aço com espessura 0,92 mm ...	60
5.1.2	Comparações de média experimental e teórica dos conjuntos de chapa 0,92 mm – Teste t de Student	63
5.1.3	Análise comparativa teórica e experimental do conjunto de chapas finas de aço 0,92 mm.....	63

5.2 Resultados experimentais e análise estatística para os conjuntos de chapas finas de aço com espessura 3,00 mm.....	65
5.2.1 Análise estatística das amostras de chapas finas de aço com espessura 3,00 mm .	66
5.2.2 Comparações de média experimental e teórica dos conjuntos de chapa 3,00 mm – Teste t de Student	68
5.2.3 Análise comparativa teórica e experimental do conjunto de chapas finas de aço 3,00 mm.....	69
5.3 Erro modelo do conjunto das chapas finas de aço parafusadas.....	71
5.4 Discussão geral	71
6 CONCLUSÕES.....	75
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
8 REFERÊNCIAS	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Resistência à ruptura na tração de parafusos de aço com qualificação estrutural de acordo com a NBR 14762 (ABNT, 2010).....	12
Tabela 2 Tipos de aços utilizados em silos	19
Tabela 3 Especificações de aços utilizados em silos	19
Tabela 4 Dimensões máximas dos furos em mm	27
Tabela 5 Dimensões máximas dos furos em mm.....	27
Tabela 6 Limitações relativas ao emprego de furos alargados ou alongados	27
Tabela 7 Tensão de tração e cisalhamento em parafusos.....	32
Tabela 8 Valores de Ct – Parafuso alternativo posicionado na horizontal e vertical.....	37
Tabela 9 Valores de Ct – Parafuso alternativo na horizontal	39
Tabela 10 Valores de Ct – Parafuso tradicional	40
Tabela 11 Dimensões dos furos - NBR 14762 e NBR 8800	40
Tabela 12 Espaçamentos entre furos e furo e borda – Parafuso alternativo e tradicional ...	41
Tabela 13 Resistência do conjunto - Parafuso alternativo costura simples e dupla.....	43
Tabela 14 Resistência do conjunto – Parafuso alternativo costura tripla e quádrupla.....	44
Tabela 15 Resistência do conjunto – Parafuso tradicional costura tripla e quádrupla.....	46
Tabela 16 Resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração das amostras.	53
Tabela 17 Resultados teóricos e experimentais da carga de cisalhamento do parafuso alternativo e tradicional.....	53
Tabela 18 Resistência do conjunto de corpo de provas ensaiados	54
Tabela 19 Resistência do conjunto de corpo de provas otimizando Ct.....	55
Tabela 20 Análise exploratória da carga de ruptura (kN) do conjunto de chapas finas de aço com espessura 0,92 mm	60
Tabela 21 Aplicação dos testes de normalidade para as amostras dos conjuntos de chapas finas de aço com espessura 0,92 mm	62
Tabela 22 Análise exploratória da carga de ruptura (kN) do conjunto de chapas finas de aço com espessura 3,00 mm	67
Tabela 23 Aplicação dos testes de normalidade para as amostras dos conjuntos de chapas finas de aço com espessura 3,00 mm	68
Tabela 24 Determinação da média da variável erro de modelo de cada conjunto de chapas finas de aço – $M_{e \text{ mean}}$	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Componentes estruturais de silos metálicos. a) Silo de Fundo Plano; b) Silo de fundo cônico com tremonha metálica.	6
Figura 2 Perfiladora de chapa corrugada.	7
Figura 3 Colunas verticais conformadas a frio. a) Coluna vertical 4 dobras; b) Coluna vertical 6 dobras.	8
Figura 4 Modelo de ligação parafusada entre chapas metálicas.	9
Figura 5 Vedação com fita EVA no perímetro das chapas simples do corpo.	9
Figura 6 Modelo de ligação de chapas duplas com dupla vedação de fita EVA.	10
Figura 7 Conjunto de fixação completo utilizado em silos.	11
Figura 8 Pressões atuantes em silos.	16
Figura 9 Prováveis linhas de ruptura da seção líquida da chapa metálica.	21
Figura 10 Caracterização da ruptura da seção líquida na região da ligação.	23
Figura 11 Coeficiente C_t em função da relação d/g	24
Figura 12 Esmagamento com flexão da borda.	25
Figura 13 Caracterização dos furos conforme NBR 8800 (ABNT, 2008). a) Furo padrão; b) Furo alargado; c) Furo pouco alongado; d) Furo muito alongado.	27
Figura 14 Espaçamentos mínimos nas ligações parafusadas.	28
Figura 15 Rasgamento entre furos ou entre furo e borda nas ligações parafusadas.	29
Figura 16 Esmagamento nas ligações parafusadas.	30
Figura 17 Resistências ao rasgamento e esmagamento em relação ao parâmetro e/d	30
Figura 18 Ruptura do parafuso nas ligações parafusadas.	32
Figura 19 Parafusos para silo tradicional e parafuso alternativo.	34
Figura 20 Costuras do parafuso alternativo posicionado na horizontal. a) Um parafuso ou todos os parafusos da ligação contidos em uma única seção transversal; b) Dois parafusos na direção da solicitação; c) Três parafusos na direção da solicitação; d) Quatro ou mais parafusos na direção da solicitação.	38
Figura 21 Costuras do parafuso alternativo posicionado na vertical. a) Um parafuso ou todos os parafusos da ligação contidos em uma única seção transversal; b) Dois parafusos na direção da solicitação; c) Três parafusos na direção da solicitação; d) Quatro ou mais parafusos na direção da solicitação.	38
Figura 22 Tipos de costuras 10, 13, 17 e 19 linhas de parafuso em chapas de 1000 mm de altura.	39
Figura 23 Espaçamentos das ligações parafusadas e linhas de ruptura para C_t	40

Figura 24 Espaçamentos nas ligações parafusadas. a) Costura quádrupla do parafuso alternativo; b) Costura tripla do parafuso alternativo; c) Costura quádrupla do parafuso tradicional; d) Costura tripla do parafuso tradicional.	41
Figura 25 Resistência dos conjuntos para parafuso alternativo x parafuso tradicional com costura tripla – CT.	48
Figura 26 Resistência dos conjuntos para parafuso alternativo x parafuso tradicional com costura quádrupla – CQ.....	48
Figura 27 Modelos de ligações parafusadas. a) Verificação para compatibilidade de montagem; b) Costura tripla com 53 parafusos; c) Costura tripla com 39 parafusos; d) Costura quádrupla com 70 parafusos; e) Costura tripla com 35 parafusos.	50
Figura 28 Esquema esttico do ensaio. a) Amostras 0,92 mm; b) Amostras 1,95 e 3,00 mm.	51
Figura 29 Corpo de prova para ensaio  trao.	52
Figura 30 Parâmetros dos corpos de prova de aços G500 (AS 1397, 2011). a) Amostra 0,92 mm; b) Amostra 1,95 mm; c) Amostra 3,00 mm.	52
Figura 31 Características geométricas do corpo de prova ensaiado.	54
Figura 32 Esquema da garra para ensaio das ligações parafusadas submetidas a esforços longitudinais.....	55
Figura 33 Modelos de corpos de prova montados. a) Corpo de prova 0,92 mm; b) Corpo de prova 1,95 mm; c) Corpo de prova 3,00 mm.	56
Figura 34 Montagem e ensaio do corpo de prova. a) Aplicação de torque nas ligações parafusadas; b) Posicionamento e fixação nas garras da máquina de traço.....	57
Figura 35 Ensaio dos corpos de prova 0,92 mm. a) Modelo de ruptura na seção líquida da amostra A; b) Modelo de ruptura por esmagamento e rasgamento da amostra B; c) Modelo de ruptura por esmagamento e rasgamento da amostra C.....	60
Figura 36 Papel de probabilidade do conjunto de chapas finas de aço com espessura 0,92 mm.....	62
Figura 37 Box plot da comparação da carga de ruptura do modelo teórico e experimental.	63
Figura 38 Modelos teóricos e experimentais para os conjuntos de chapas finas de aço com 0,92 mm.....	64
Figura 39 Ensaio dos corpos de prova 3,00 mm. a) Modelo de ruptura na seção líquida da amostra A; b) Modelo de ruptura na seção líquida da amostra B; c) Modelo de ruptura por cisalhamento dos parafusos da Amostra C.	66
Figura 40 Papel de probabilidade do conjunto de chapas finas de aço com espessura 3,00 mm.....	68
Figura 41 Box plot da comparação da carga de ruptura do modelo teórico e experimental.	69
Figura 42 Modelos teóricos e experimentais para os conjuntos de chapas finas de aço com 3,00 mm.....	70

Figura 43 Ensaio dos corpos de prova 1,95 mm descartados por rompimento na solda de apoio. a) Ruptura na região da solda da Amostra A; b) Ruptura na região da solda da Amostra B. c) Ruptura na região da solda da Amostra C.	74
Figura 44 Resultados experimentais, teóricos, F correto e proposta de Dall Acqua (2018) em chapas finas de aço com espessura 0,92 mm.	80
Figura 45 Resultados experimentais, teóricos, F correto e proposta de Dall Acqua (2018) em chapas finas de aço com espessura 3,00 mm.....	80

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	–	Área
Ab	–	Área bruta
A _{be}	–	Área efetiva
ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A _n	–	Área líquida da seção transversal na região da ligação
A _{no}	–	Área líquida da seção transversal da barra fora da região de ligação
AISI	–	Instituto Americano de ferro e Aço
AS	–	Standard Australian
As	–	Área transversal ao plano de corte do parafuso
ASME	–	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	–	American Society for Testing and Materials
BS EN	–	British Standard
CONAB	–	Companhia Nacional de Abastecimento
CD	–	Costura Dupla
CQ	–	Costura Quádrupla
CS	–	Costura Simples
CT	–	Costura Tripla
C _t	–	Coeficiente de redução da área líquida
D	–	Diâmetro
d	–	Diâmetro nominal do parafuso
db	–	Diâmetro do parafuso
d _f	–	Dimensão do furo na direção perpendicular à solicitação
e	–	Distância
F _{rd}	–	Força resistente de cálculo
<i>f_u</i>	–	Limite de ruptura à tração
<i>f_{ub}</i>	–	Limite de ruptura à tração do parafuso
F _{vrd}	–	Força de cisalhamento resistente de cálculo
<i>f_y</i>	–	Limite de escoamento à tração
g	–	Espaçamento dos furos na direção perpendicular à solicitação
H	–	Altura
ISO	–	International Organization for Standardization
K	–	Quilo
m	–	Metro
m ³	–	Metro Cúbico

mm	–	Milímetro
MPa	–	Mega Pascal
M10	–	Parafuso tradicional de diâmetro 10 mm
N	–	Newton
NBR	–	Norma Brasileira
$N_{t,Rd}$	–	Força normal de tração resistente de cálculo
n_f	–	Quantidade de furos contidos na linha de ruptura
p_w	–	Pressão de atrito
p_v	–	Pressão vertical
p_h	–	Pressão horizontal
RP	–	Rosca Parcial
R1	–	Ruptura da seção líquida na região da ligação
R2	–	Escoamento da seção bruta
R3	–	Rasgamento ou esmagamento da chapa
R4	–	Ruptura ao cisalhamento do parafuso
s	–	Espaçamento dos furos na direção da solicitação
SAE	–	Sociedade dos Engenheiros Automotivos
t	–	Espessura
τ	–	Tensão de cisalhamento
τ_b	–	Tensão cisalhante nominal na falha do parafuso
γ	–	Coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral

1 INTRODUÇÃO

A agricultura tem sido reconhecida como um vetor decisivo no desenvolvimento econômico e garantia de superávit comercial brasileiro. Este setor vem aumentando a área plantada e alcançando recordes de produção. Contudo, para este aumento de produção, existe a necessidade da ampliação da capacidade de armazenagem.

De acordo com o 2º Levantamento da safra de grãos 2020/21, da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, o Brasil deverá produzir 268,90 milhões de toneladas de alimentos, com acréscimo de 4,30% em relação à temporada de 2019/2020, equivalente a 11,10 milhões de toneladas. Com este impulso, a produção agrícola brasileira sofrerá ainda mais com a falta de espaços para armazenar a colheita. Ainda segundo a CONAB, a capacidade de armazenagem estática é de 169,82 milhões de toneladas, elevando o déficit a aproximadamente 37% da produção de grãos.

Em todas as safras, o começo da colheita de grãos traz à tona os gargalos logísticos que se arrastam por décadas. Para tentar minimizar, o governo estimula o agricultor a ter seu próprio armazém, buscando espelhar-se nas culturas norte americanas. As vantagens são imensas, principalmente na certeza do bom tratamento do produto e na estratégia de comercialização.

Pode-se explicar a necessidade por silos através da necessidade de armazenar grandes quantidades de produtos, em espaços reduzidos e durante um longo período. Além disso, para as cooperativas, produtores e indústrias, a estocagem torna-se importante no quesito econômico, na medida em que permite o controle do escoamento da safra e do abastecimento, reduzindo, inclusive, a necessidade de importação e especulações de mercado.

O armazenamento de produtos em silos é considerado uma solução de grande viabilidade, devido à economia de espaço físico, mão de obra e custo de transporte, assim como a possibilidade de maior conservação do produto armazenado.

A construção e utilização de silos é predominantemente de perfis metálicos em chapa galvanizada. O investimento do equipamento depende exclusivamente do projeto e do custo do aço, a principal matéria-prima para a sua construção.

O custo total de implantação de um silo metálico de grande capacidade de estocagem é aproximadamente 7% do valor do produto armazenado em uma única safra. É de fundamental importância o correto dimensionamento da estrutura a partir das pressões que o produto ensilado solicita, para que as unidades de armazenamento sejam seguras, eficientes e de fácil aquisição econômica.

O item mais oneroso na elaboração do projeto estrutural é o corpo do silo, sendo o responsável pela absorção de grande parte das solicitações. Alternativas para diminuir o peso da estrutura podem ser alcançadas através do estudo da resistência das chapas laterais e das ligações parafusadas. O desenvolvimento de um novo método e um novo elemento de fixação promovem a mudança na concepção atual de montagem e no dimensionamento do corpo do silo.

Mundialmente existem cerca de 8.000 padrões para fixadores estabelecidos por uma grande variedade de sistemas, como ASTM, SAE, ANSI, ISO, entre outros, assim como o emprego de diversos materiais, tratamentos, formas de fixação e revestimentos superficiais. Essa diversidade de normas e processos de fabricação permitem uma grande variedade de elementos de fixação roscados, com diferentes combinações entre as dimensões, formatos, tolerâncias, materiais, tratamentos térmicos ou revestimentos.

A montagem de elementos roscados é um dos processos na construção de um silo, sendo de suma importância para se evitar uma eventual falha deste componente e operações de desmontagem e remontagem, inclusive danos estruturais ao conjunto. Estes elementos, compostos por parafuso, porca e arruela, representam uma etapa significativa, absorvendo uma considerável parcela de tempo e energia.

Os resultados obtidos na dissertação de mestrado “Ligações em Silos Metálicos de Chapas Corrugadas: Proposta de um Parafuso Alternativo” (FICANHA, 2016) demonstraram que o aumento da área no plano de corte do parafuso alternativo apresentou diferenças significativas em relação ao modelo tradicional, elevando a resistência ao cisalhamento de 46,86 kN para 107,13 kN. Este acréscimo de 64% de área no plano de corte do parafuso alternativo significou um ganho de 128% na resistência ao cisalhamento deste.

Em primeira instância, pode-se reduzir a quantidade de parafusos alternativos na ligação das chapas laterais e redefinir o coeficiente de redução de área líquida (C_t) dado pela NBR 14762 (ABNT, 2010), principal parâmetro na determinação da resistência da chapa lateral. Com aumento de C_t é possível aumentar a resistência da chapa lateral e consequentemente baixar as espessuras no corpo do silo. Com esta otimização no dimensionamento de silos têm-se vantagens para todos: empresa, produtor e consumidor.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de um novo modelo de parafuso para detalhamento das ligações parafusadas das chapas laterais de silos metálicos para armazenagem de grãos, visando a maior resistência do conjunto e a redução do peso na estrutura do silo.

2.2 Objetivos específicos

Para que fosse alcançado o objetivo geral deste estudo, definiram-se objetivos específicos, sendo eles:

- a) Verificar o efeito da redução do número de parafusos na ligação na resistência característica do parafuso alternativo e a relação dos efeitos da relação da tensão de ruptura pela tensão de escoamento da chapa fina de aço;
- b) Avaliar as chapas laterais com alternadas distâncias entre furos, a fim de obter o C_t mais próximo a 1,0;
- c) Aferir a resistência teórica das ligações parafusadas do modelo atual e do modelo alternativo, de acordo com as recomendações da NBR 14762 (ABNT, 2010);
- d) Ensaiar amostras de cada conjunto de chapas parafusadas de espessuras 0,95, 1,95 e 3,00 mm, utilizando o parafuso alternativo para obter o limite último de ruptura do conjunto;
- e) Estimar o coeficiente de erro do modelo e comparar com o recomendado pela NBR 14762 (ABNT, 2010).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Estruturas para armazenagens de grãos

Estruturas de armazenagem usadas para a estocagem de grãos são de grande importância para o desempenho econômico. Sendo o Brasil um país com características agrícolas, um dos pontos críticos na economia, segundo Calil e Cheung (2007), são o armazenamento e o beneficiamento dos produtos agrícolas.

Segundo Freitas (2001), o armazenamento constitui uma prática de suma importância quando alojados próximos às regiões de colheita, minimizando as perdas em quantidade e qualidade a que estão sujeitos os produtos colhidos. Os silos são estruturas que desempenham função específica e possuem uma importância econômica relevante (DALL ACQUA, 2018).

Silo é a denominação dada para todos os tipos de construção capaz de armazenar produtos granulares ou pulverulentos, munido com dispositivos de carga e descarga, capaz de esvaziar por gravidade ou através de meios mecânicos ou pneumáticos (FREITAS, 2001).

A grande viabilidade na utilização de silos para o armazenamento de produtos sólidos a granel, destacam Calil e Cheung (2007), se justifica pela economia de espaço físico, mão de obra, custo de transporte, assim como a possibilidade de conservação do produto ensilado.

Os materiais de construção de silos podem ser de concreto armado, concreto protendido, madeira, alvenaria, fibras, plásticos e chapas metálicas.

3.1.1 Silos metálicos

De acordo com Dall Acqua (2018), a geometria de um silo é definida especialmente por seus requisitos de funcionalidades, tais como volume de armazenamento, vazão de descarga e tipo de produto armazenado.

Atualmente no Brasil, os silos metálicos são as unidades mais utilizadas para o armazenamento de produtos granulares, possuindo geometria cilíndrica, constituídos de chapas metálicas lisas ou corrugadas e cobertura cônica (ANDRADE JR.; CALIL, 2007).

- a) A geometria é uma das premissas na classificação dos silos. De acordo com BS EN 1991-4 (EN, 2006), denominam-se:
 - b) Silos esbeltos: atendem a função altura/diâmetro $(H/D) \geq 2,0$;
 - c) Silos mediantemente esbeltos: aqueles que atendam a relação $1,0 < H/D < 2,0$;
 - d) Silos baixos: que atendam a relação $0,4 \leq H/D \leq 1,0$.

De acordo com Ravenet (1977), os silos de chapas corrugadas galvanizadas são comumente unicelulares e possuem os elementos ligados por parafusos. A utilização de

chapas corrugadas adiciona rigidez transversal ao sistema. Porém, a resistência à compressão é diminuída, sendo suprido com o enrijecimento vertical pelo uso de perfis longitudinais (CALIL; CHEUNG, 2007).

Para não tornar seus produtos sem competitividade no mercado e com o receio de colapso da estrutura, segundo Esteves (1989), os fabricantes de silos acabam sendo cautelosos na utilização de modelos matemáticos mais ousados.

Dada a carência de uma norma brasileira para regulamentar o projeto e a construção dessas estruturas, utiliza-se como referência a Norma Eurocode 1 – Ações nas estruturas – Parte 4: Silos e tanques (BS EN, 2006).

3.1.1.1 Componentes estruturais de silos metálicos

Os silos são desmembrados em três partes: telhado, costado e tremonha.

O telhado, formado por uma cobertura cônica, é composto em painéis de chapas galvanizadas, autoportantes e, dependendo do diâmetro do silo, são apoiadas na estrutura do telhado (FICANHA, 2016).

O costado, segundo Dall Acqua (2018), também conhecido como corpo, é engastado na base de concreto armado, sendo composto por chapas metálicas corrugadas, de alta resistência e galvanizadas. Dependendo das dimensões do silo, é reforçado com colunas verticais dispostas no perímetro de forma homogênea. Opcionalmente, possui anéis metálicos tubulares ao longo da altura para minimizar as ações do vento (Figura 1a).

De acordo com Lobato (2013), o tipo de fundo é outro parâmetro geométrico que diferencia os silos, apresentando a forma plana, cônica em concreto armado ou cônica em tremonha metálica. Quando são utilizadas tremonhas metálicas, comercialmente denominam-se como silos elevados (Figura 1b).

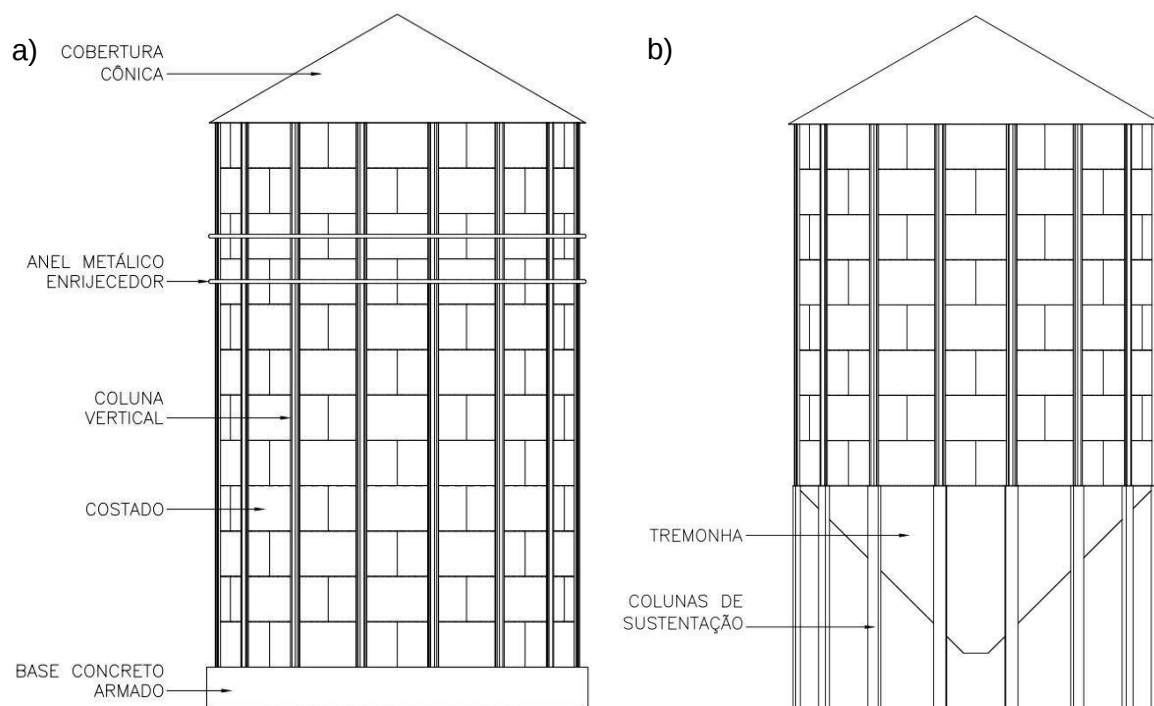


Figura 1 Componentes estruturais de silos metálicos. a) Silo de Fundo Plano; b) Silo de fundo cônico com tremonha metálica.

Os silos têm dimensões comerciais que variam de 1,80 a 36 m de diâmetro, alturas que variam de 3 a 38 m, e volumes de 20 até 26.000 m³. Todo este conjunto apoia-se diretamente sobre uma base, com o costado fixo por parafusos a um anel rígido de concreto armado, e independente da base (ANDRADE JR.; CALIL, 2007).

3.2 Componentes estruturais do costado - Chapas laterais

Os esforços de tração devido à pressão horizontal oriunda do carregamento dos grãos são absorvidos pelas chapas laterais do costado (SCALABRIN, 2008).

Estas chapas laterais são consideradas um dos elementos mais importantes no silo e, além de suportar os esforços do carregamento, têm como funções:

- Permitir a transmissão dos esforços oriundos do atrito dos grãos para as colunas verticais;
- Auxiliar na diminuição da flambagem do silo vazio, sujeito ao esforço advindo do vento;
- Auxiliar na estanqueidade de contato com o produto armazenado (SCALABRIN, 2008).

Devido à geometria circular dos silos metálicos, se faz necessário calandrar as chapas laterais para formar o ângulo necessário, a fim de compor o diâmetro do silo, e perfurá-las para fazer a ligação entre as chapas. De acordo com Esteves (1989), os fabricantes de silos utilizam o processo contínuo de conformação a partir de bobinas de chapas galvanizadas, permitindo maior flexibilidade na linha de produtos, maior produtividade e menor custo.

De acordo com Ficanha (2016), geometricamente, são perfiladas com diferentes ondulações, sendo nacionalmente as mais comuns aquelas com comprimento de onda de 101,60 mm e altura de 12 mm, formando anéis cuja espessura da chapa varia conforme a solicitação da carga em projeto.

Conforme Dall Acqua (2018), a chapa é submetida ao trabalho a frio, passando por um processo contínuo de perfilação através de deslocamento longitudinal, posicionada sobre roletes que conformam gradativamente a geometria definitiva da chapa (Figura 2).

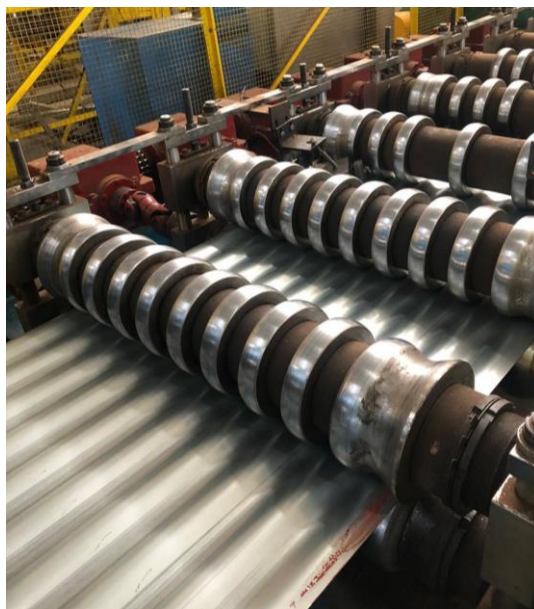


Figura 2 Perfiladora de chapa corrugada.

A conformação à frio da chapa provoca o envelhecimento e estrição do aço na região da dobra. Estas variações dimensionais, segundo Dall Acqua (2018), decorrentes da estrição são desconsideradas para efeitos de cálculo. Já o envelhecimento ocasiona o aumento da resistência ao escoamento e à ruptura do aço devidos às ações de carregamento e descarregamento, e em consequência há redução de ductilidade. De forma resumida, o diagrama tensão-deformação apresenta uma elevação na direção das resistências limites, mas seguido de um estreitamento no patamar de escoamento.

As maiores empresas brasileiras possuem o mesmo comprimento útil da chapa para a utilização em todos os modelos de silos, adotando o padrão americano para o comprimento útil das chapas de 2,87 m (9,42"). O diâmetro do silo é definido a partir da quantidade de

chapas laterais padrão que são utilizadas para formar uma volta do anel do corpo do silo (SCALABRIN, 2008).

De acordo com Esteves (1989), o peso do costado não influencia no dimensionamento das chapas laterais do corpo e das colunas, devido às cargas expressivas do material armazenado. Contudo, o costado, juntamente com o telhado, influenciam na verificação da estabilidade do silo quando vazio e submetido às ações de vento.

3.3 Componentes estruturais do costado – Colunas verticais

As colunas verticais são dimensionadas para suportar os esforços verticais de compressão advindos do peso da cobertura e do atrito do produto armazenado. As chapas corrugadas transmitem para as colunas verticais as cargas de atrito por intermédio da ligação parafusada, assim como das colunas verticais para as fundações do silo. Esse processo se dá através de um sistema de ancoragem por meio de placas de base soldadas nas colunas verticais e fixadas no concreto com o uso de chumbadores (ESTEVES, 1989).

O perfil das colunas é conformado a frio, sendo fabricado ou perfilado de forma contínua (TRICHES, 2011). Possui geometria análoga a um perfil do tipo cartola, no entanto, para colunas com 4 dobras (Figura 3a) os ângulos de dobra diferem-se por ser 70° na primeira dobra e 110° na segunda dobra. Quando possui 6 dobras, forma-se mais um ângulo de 110° na terceira dobra (Figura 3b).

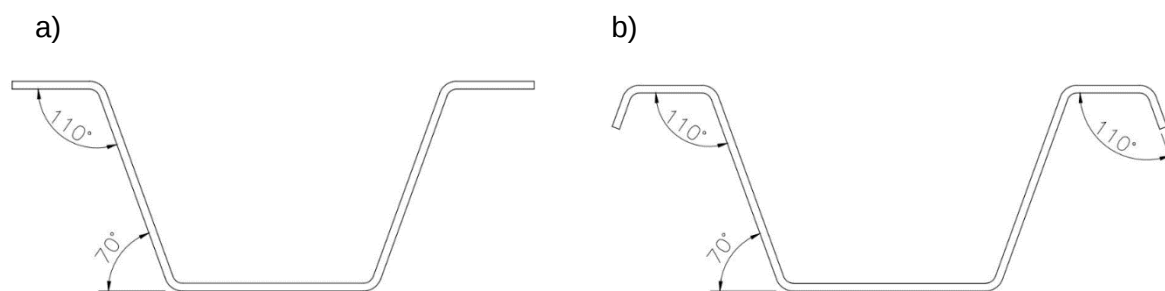


Figura 3 Colunas verticais conformadas a frio. a) Coluna vertical 4 dobras; b) Coluna vertical 6 dobras.

Silos de menor volume e pequena altura podem ser fabricados sem colunas verticais, desde que as cargas de atrito do grão sejam suportadas pelas chapas laterais. De acordo com Scalabrin (2008), recomenda-se instalar a mesma quantidade de colunas por chapa lateral, sendo que o mais comum são duas colunas.

3.4 Ligações parafusadas do costado

As chapas laterais do costado de um silo são unidas por parafusos com qualificação estrutural e acabamento superficial através do processo de zincagem ou bicromatização (Figura 4) (FICANHA, 2016).

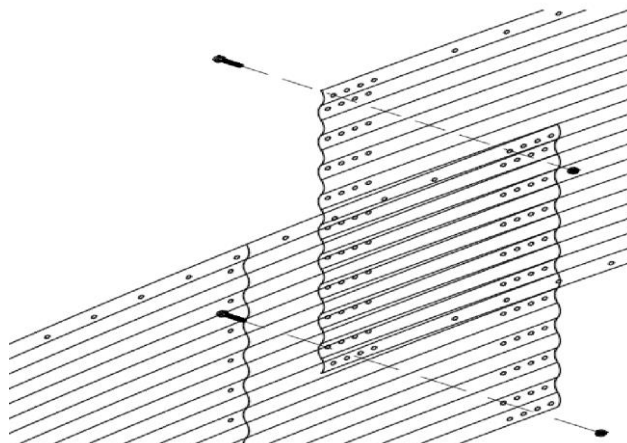


Figura 4 Modelo de ligação parafusada entre chapas metálicas.

Para Bolandim (2011), as ligações são estimadas como o elemento mais importante de uma estrutura reticulada, sendo responsáveis pela solidarização e pela transferência de esforços entre os seus elementos.

Para garantir a estanqueidade contra a ação de contaminantes externos (chuva, poeira e umidade), no Brasil, os fabricantes oferecem parafusos de alta resistência específicos para silos, sendo o mais habitual de cabeça sextavada flangeada e arruela de neoprene alojada. Este tipo de arruela se danifica quando há o aperto da porca em caso de a cabeça do parafuso girar, atritando a arruela contra a chapa, rompendo-a (FICANHA, 2016).

Ainda, para auxiliar na estanqueidade contra os agentes externos, utilizam-se fitas de vedação de etileno acetato de vinila moldada (EVA) em todo o perímetro de ligação das chapas (Figura 5).

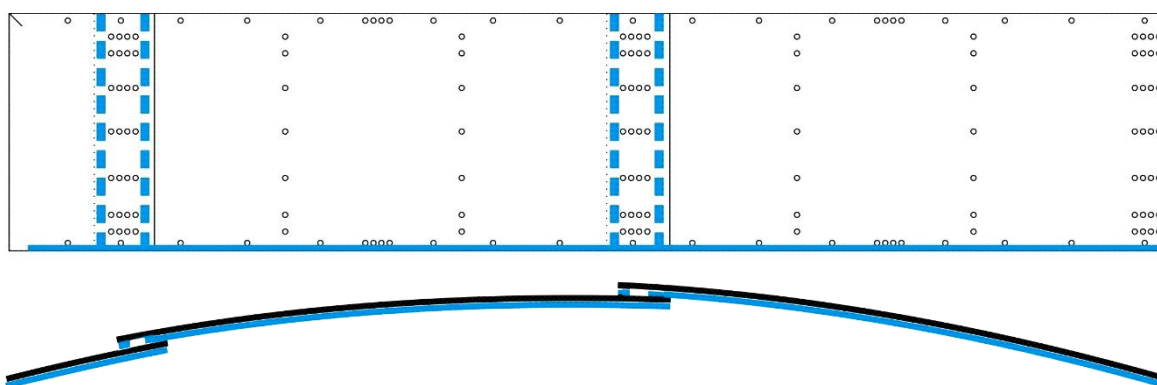


Figura 5 Vedação com fita EVA no perímetro das chapas simples do corpo.

Em silos de grandes volumes e elevadas cargas faz-se necessária a utilização de aços com espessuras compatíveis. Conforme Ficanha (2016), devido às limitações fabris das usinas nacionais de produzir aços de alta resistência em espessuras superiores a 3,00 mm e galvanizadas por imersão a quente, tem-se como alternativa fabril a utilização de chapas duplas na montagem para formar o anel do costado do silo (Figura 6).

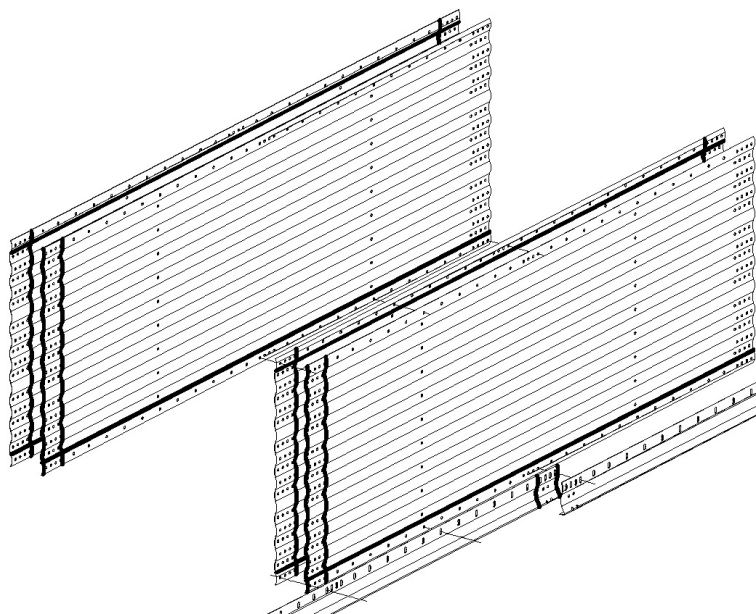


Figura 6 Modelo de ligação de chapas duplas com dupla vedação de fita EVA.

3.5 Conjunto de elementos de fixação

O conjunto de elementos de fixação é formado por parafuso, porca e arruela (Figura 7). Existem duas classes de parafusos no mercado: parafusos comuns e parafusos de alta resistência (CALIL; CHEUNG, 2007).

Para Ficanha (2016), a porca tem a função de unir as partes ligadas, travando por meio do parafuso. A arruela de neoprene se faz necessária para garantir a estanqueidade no interior do silo, evitando a percolação de contaminantes externos. A arruela metálica é utilizada para minimizar o esmagamento da porca pelas partes ligadas, no momento do aperto do parafuso.

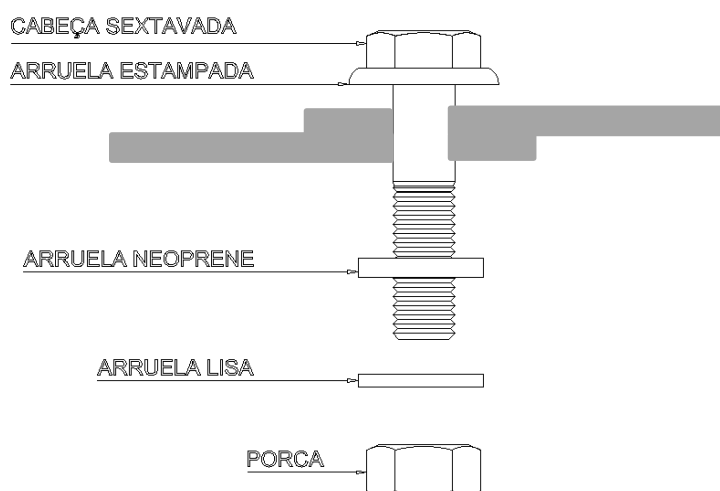


Figura 7 Conjunto de fixação completo utilizado em silos.
Fonte: Adaptado de Esteves (1989).

Conforme recomenda a NBR 8800 (ABNT, 2008), não é permitido separar as partes parafusadas por quaisquer materiais que não sejam os elementos de aço estrutural.

Todas as superfícies de ligação, incluindo as adjacentes às cabeças do parafuso, porca e arruela, após a montagem, devem ser isentas de escamas de laminação e permanecer totalmente em contato, como dita a NBR 8800 (ABNT, 2008).

A ausência de arruela em ligações de chapas finas de aço, segundo Chong e Matlock (1975) e Gilchrist e Chong (1979) apud Maiola (2004), acarretam uma redução de 5 a 37% na capacidade de resistência da ligação.

3.5.1 Parafusos de qualificação estrutural

A resistência a tração de parafusos estruturais pode ser várias vezes superior em relação aos parafusos comuns. Estes parafusos são fabricados com aço a médio carbono, com aço-liga ou tratamento térmico (CALIL; CHEUNG, 2007).

O aperto normal é recomendado pela NBR 8800 (ABNT, 2008), exceto quando os parafusos, regidos pela ASTM A490, estão submetidos a tração ou a tração e cisalhamento, e parafusos ASTM A325 sujeitos a tração ou tração e cisalhamento com consideração de fadiga e afrouxamento devido às vibrações nas partes ligadas.

Parafusos da categoria ASTM A325 e ASTM A490 são apertados contra as partes até adquirirem uma alta tensão de tração. Assim, as partes unidas são impedidas de se deslocarem quando solicitadas por tração devido à alta pressão de atrito desenvolvida pelo aperto (FICANHA, 2016).

Normalmente utilizam-se nos silos os parafusos com qualificação estrutural devido às grandes solicitações. As características de resistência a tração, de acordo com a NBR 14762 (ABNT, 2010), são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 Resistência à ruptura na tração de parafusos de aço com qualificação estrutural de acordo com a NBR 14762 (ABNT, 2010)

Especificação	Classe	Diâmetro nominal (<i>d</i>)		Resistência à ruptura a tração <i>N_{no}</i> parafuso (<i>f_{ub}</i>) – MPa
		Milímetros	Polegadas	
ASTM A307 -07b	Comum	-	$\frac{1}{4} \leq d < \frac{1}{2}$	370
		-	$\frac{1}{2} \leq d \leq 4$	415
ASTM A325M	Alta resistência	$16 \leq d \leq 24$	$\frac{1}{2} \leq d \leq 1$	825
		$24 < d \leq 36$	$1 < d \leq 1 \frac{1}{2}$	725
ASTM A354 (grau BD)	Alta resistência	-	$\frac{1}{4} \leq d < \frac{1}{2}$	930
ASTM A394 (tipo 0)	Comum	-	$\frac{1}{2} \leq d \leq 1$	510
ASTM A394 (tipo 1, 2 e 3)	Alta resistência	-	$\frac{1}{2} \leq d \leq 1$	825
ASTM A449	Alta resistência	-	$\frac{1}{4} \leq d < \frac{1}{2}$	745
ASTM A490	Alta resistência	$16 \leq d \leq 36$	$1 < d \leq 1 \frac{1}{2}$	1035
ISO 898-1 – Classe 4.6	Comum	$16 \leq d \leq 36$	-	400
ISO 4016 – Classe 8.8	Alta resistência	$16 \leq d \leq 36$	-	800
ISO 4016 – Classe 10.9	Alta resistência	$16 \leq d \leq 36$	-	1000

Fonte: NBR 14762 (ABNT, 2010).

Quando utilizados parafusos ASTM A325 e ASTM A490, os projetos de ligações devem seguir as recomendações da NBR 8800 (ABNT, 2008). Parafusos de aço de baixo teor de carbono atendem à ASTM A307 ou à ISO 898-1 classe 4.6. Os parafusos de alta resistência consideram a ASTM A325 ou a ISO 4016 classe 8.8. Finalmente, parafusos de aço-liga temperados e revenidos estão inseridos na ASTM A490 ou a ISO 4016 classe 10.9, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008).

O procedimento de cálculo em ligações considera que a transferência de força paralela à superfície de contato das partes ligadas pode ser por atrito ou contato. Em ligações sujeitas a forças repetitivas com reversão de sinal e locais onde o deslizamento seja prejudicial, a ligação deve ser por atrito, conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008).

Desde 1984, Gaylord e Gaylord descrevem o uso do parafuso de alta resistência ASTM A490 e ASTM A325 como sendo os parafusos utilizados em silos.

De acordo com o mercado brasileiro, o parafuso mais empregado em silos metálicos é o que adota a especificação da norma da Organização Internacional para Padronização: ISO 898-1:2013 – Propriedades mecânicas de fixadores de aço carbono e ligas de aço – Parte 1: Parafusos e pregos com classes específicas de propriedade – Fio grosso e fino para passo de rosca, classes 8.8 and 10.9, e diâmetros 8, 10 e 12 mm.

As propriedades mecânicas de acordo com o tipo da solicitação, coincidindo com os valores da especificação ISO 4016 (2000) e ISO 898-1 (2013), descritas na Tabela 1, são recomendadas pela norma brasileira EB-168 – Propriedades mecânicas de elementos de fixação – Parafusos e prisioneiros (ABNT, 1991), também denominada NBR 8855.

3.6 Dimensionamento de silos metálicos

A condição essencial para o desenvolvimento do projeto estrutural de um silo metálico é a ciência das forças que agem sobre a sua estrutura. Cada elemento que compõe o silo está subordinado a um conjunto de ações que precisarão ser combinadas para a obtenção dos esforços que agirão em cada segmento (SCALABRIN, 2008).

De acordo com Calil (1989), devido à baixa ocorrência, as cargas originadas pela neve e abalo sísmico devem ser consideradas apenas em casos específicos, definindo as principais ações como: peso próprio, equipamentos e acessórios, pressões devidas ao material armazenado, ações do vento e ações térmicas.

Para Hezel (2007), independente do material utilizado ou da complexidade do silo, deve-se estabelecer que o projeto estrutural cumpra as funções para as quais foi concebido com eficiência, economia, segurança e durabilidade estrutural.

Desde o período construtivo até o final da sua vida útil, uma estrutura é considerada segura quando for capaz de resistir ilesa a todas as ações que lhe forem solicitadas. Assim, é indispensável a correta determinação das ações para se determinar os esforços atuantes no dimensionamento, estabilidade e segurança estrutural (STAMATO; CALIL, 1997, apud HEZEL, 2007).

Nos casos do dimensionamento de silos com tremonhas metálicas, Lobato (2013) cita que devem ser levadas em consideração as propriedades de fluxo dos produtos armazenados.

3.6.1 Ações permanentes

Nas combinações das ações, o peso próprio do silo é considerado uma ação permanente (SCALABRIN, 2008).

Devido aos sistemas de carregamento, qualidade do produto e acesso, a maioria dos silos são equipados com plataformas, passarelas e equipamentos mecânicos instalados na cobertura do silo, termometria fixada ao telhado, estruturas e tremonhas, nos casos dos silos elevados (CALIL; CHEUNG, 2007).

3.6.2 Ações variáveis

Para estas ações, pondera-se um mínimo de três naturezas dessemelhantes:

- a) Pressões devido às partículas sólidas armazenadas: atribuídas de longa duração e divididas em três tipos (estáticas de carregamento, dinâmicas de descarregamento e insuflação de ar) (BS EN, 2006);
- b) Ações térmicas: consideradas de média duração e influenciadas pelas variações climáticas e pelos efeitos do aquecimento dos produtos armazenados (CALIL; CHEUNG, 2007);
- c) Ações do vento: utiliza-se o seu valor característico, considerando-o uma carga de longa duração (NBR 6123, ABNT, 1988).

3.6.3 Ações excepcionais

As ações excepcionais estabelecem carregamentos com probabilidade eventual de acontecer. No dimensionamento de silos, consideram-se pelo menos duas ações deste gênero:

- a) Cargas oriundas da explosão de pó: silos podem armazenar produtos que eventualmente causem explosões. Devem ser previstos dispositivos para ventilação de ar e garantir a resistência a sobrepressão de explosões na estrutura (BS EN, 2006);
- b) Impacto de veículos: quando não antevista a proteção apropriada na estrutura do silo contra possíveis colisões (CALIL; CHEUNG, 2007).

3.6.4 Teoria de pressões

Algumas formulações foram consagradas por pesquisadores que estudaram as pressões em silos, como: Jannsen (1895), Reimbert et al. (1943), Jenike e Johanson (1968), Walker (1969), Walter (1973), Jenike et al. (1973), Airy (1987), Carson e Jenkyn (1993), ao definirem que as pressões em um silo ocorrem devido aos processos operacionais de carregamento, armazenamento e descarregamento.

Pesquisadores de todo o mundo, por um longo período, desenvolveram estudos teóricos e experimentais para a determinação das pressões em silos, permitindo fundar alguns consensos em tópicos; porém, não um modelo decisivo estabelecendo com precisão as pressões em silos (ESTEVES, 1989).

Segundo Hezel (2007), no estudo das pressões, há três fatores de interesse que se destacam. O econômico, em que o projeto de dimensionamento de um silo depende exclusivamente das pressões ocorridas em seu interior e, quando calculadas precisamente,

melhoram a relação custo-benefício do investimento financeiro na estrutura com o produto armazenado. O científico é o segundo fator: os silos constituem estruturas complexas, onde mesmo com tantas pesquisas, combinando comportamentos estruturais de diferentes materiais e variabilidades nos produtos armazenados, tem-se uma variação muito ampla. O terceiro é o ponto social, uma vez que vários problemas são acautelados devido ao conhecimento estrutural das estruturas de armazenamento.

No projeto de silos, as ações dominantes no dimensionamento estrutural são as advindas do produto armazenado exercendo pressões nas paredes laterais e no fundo do silo. Muitas normas internacionais utilizam a teoria de Janssen (1895) na determinação das pressões exercidas pelos grãos em silos quando originadas de condições estáticas. Quando ocorrem efeitos dinâmicos, surgem forças maiores do que as propostas por Janssen, de acordo com Hezel (2007).

Para efeitos de esclarecimentos, denominam-se pressões estáticas a intensidade das pressões horizontais e verticais no carregamento do silo, e pressões dinâmicas a situação de descarga (CALIL, 1990).

Conforme Palma (2005) e de maneira resumida, as pressões horizontais (p_h) são descritas como as pressões nas paredes verticais atuantes perpendicularmente na parede do silo. As pressões originárias do atrito do produto com a parede (p_w) causam esforço de compressão na parede e podem ser adicionadas verticalmente no cálculo da força de compressão resultante sobre a parede do silo. Ressalta-se que a pressão vertical aumenta monotonicamente com o aumento da altura. No fundo do silo, atuam pressões denominadas pressões verticais (p_v), conforme descritas pela Figura 8.

Diferentemente de como ocorre em pressões hidrostáticas, o equilíbrio de parte do peso do produto é distribuído nas paredes do silo através da pressão de atrito, por esforços de compressão nas paredes. A existência deste atrito faz com que o produto exerça nas paredes uma pressão horizontal e com isso não aumente com a altura indefinidamente, e sim que ocorra um crescimento de característica exponencial tendendo a um valor máximo (RAVENET, 1992).

No entendimento das estimativas das curvas de pressões nas paredes dos silos, é de suma importância a compreensão do campo de tensões nos diferentes estágios do armazenamento. As tensões iniciais, que atuam na condição do silo vazio e com a boca de descarga fechada, são completamente dessemelhantes do campo de tensões dinâmicas no momento da descarga do produto.

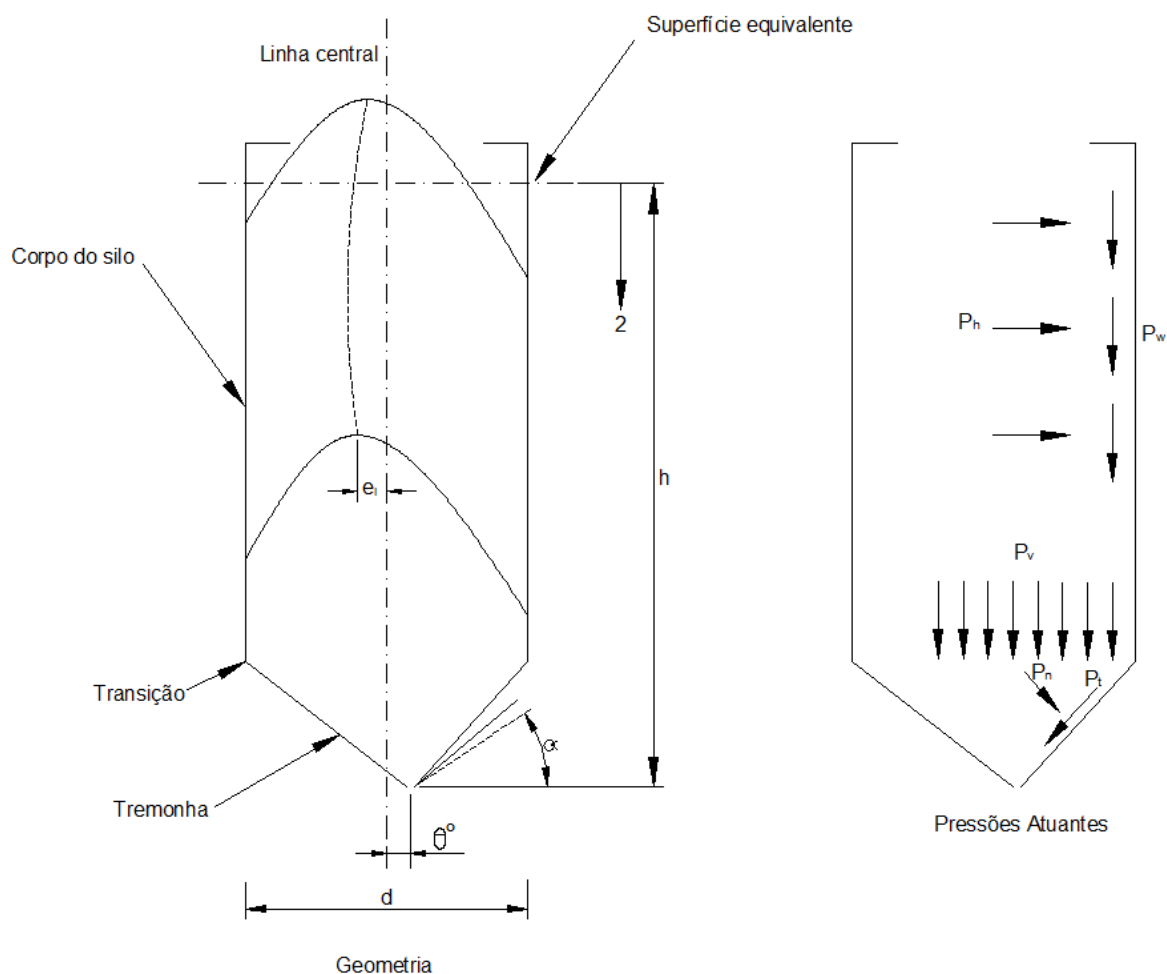


Figura 8 Pressões atuantes em silos.
Fonte: Adaptado de Esteves (1989).

As teorias definem as pressões dos produtos armazenados. Rankine iniciou o princípio básico, possibilitando a determinação da pressão vertical (maior), a pressão horizontal (menor), os coeficientes de pressões ativos e passivos e o ângulo de atrito interno. Posteriormente, verificou-se que a teoria de Rankine não relacionava a função do atrito com a parede. Assim, surgiram novas teorias considerando o atrito nas paredes, as condições de carregamento e descarregamento do silo e a constatação de que as pressões horizontais sobrepõem as verticais (GAYLORD; GAYLORD, 1984).

De acordo com Esteves (1989), durante o procedimento de descarga, dependendo do tipo de fluxo e das interferências ao escoamento do material armazenado, há de se antever sobrepressões localizadas. Conforme Calil (1990), na descarga do produto tem-se um acréscimo das pressões horizontais. Contudo o aumento em relação ao carregamento ainda é alvo de pesquisas. Sabe-se, entretanto, que este tipo de ação induz ao aparecimento de pressões horizontais, verticais e de atrito.

As normas estrangeiras e internacionais basicamente apoiam-se em duas teorias no quesito determinação das pressões em silos: a teoria de Janssen, para as cargas iniciais ou

estáticas, e a teoria de Rankine, na qual a deformação produz uma condição de pressões ativas durante o carregamento e passivas durante o descarregamento (HEZEL, 2007).

Devido às divergências e diversidades de normas para a determinação das pressões no interior de silos, verifica-se a necessidade de estabelecer uma norma brasileira que atenda às variabilidades e aos tipos de produtos que são armazenados no Brasil (FICANHA, 2016).

3.7 Normas brasileiras recomendadas no dimensionamento de chapas metálicas submetidas a esforços de tração

As sinopses referem-se à compilação das normativas brasileiras propostas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, constituindo:

- a) NBR 14762 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento (ABNT, 2010);
- b) NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios (ABNT, 2008).

Segundo Fakury (2007), a revisão da NBR 8800 (ABNT, 2006) é um documento contemporâneo, para contribuir no avanço da construção metálica, uma vez que agrupa o que há de mais moderno no mundo sobre o dimensionamento dessas estruturas. As normas usadas como principais referências, sendo as europeias BS EN 1993:1–1:2005 e BS EN 1994–1–1:2004, a americana ANSI/AISC 360–05, são muito recentes. A adequação à realidade brasileira foi arranjada com cuidado, tratando de situações comuns em nosso país, que não têm paralelo em outros lugares, procurando fornecer procedimentos simplificados para circunstâncias complexas, com o objetivo de tornar o cálculo estrutural acessível ao maior número possível de profissionais (FAKURY, 2007).

3.7.1 Recomendações gerais: NBR 14762 (ABNT, 2010)

O emprego de normas estrangeiras para o desenvolvimento de projetos estruturais em perfis de aço formados a frio tem acarretado algumas incompatibilidades com outras normas brasileiras de caráter mais geral, por exemplo, a NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento (ABNT, 1984).

Esta norma elenca as ações e combinações pelo método dos estados limites e estabelece os princípios para o “dimensionamento de perfis estruturais de aço formados a frio, constituídos por chapas ou tiras de aço-carbono ou aço de baixa liga, com espessura máxima igual a 8 mm, conectados por parafusos ou soldas” (ABNT, 2010).

A sua recomendação se dá pelo uso de aços com ou sem qualificação estrutural e que possuam propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio. Para uso de

elementos de fixação, o parafuso é qualificado conforme seu uso, sendo: estrutural, comum ou de alta resistência (FICANHA, 2016).

Aços com qualificação estrutural necessitam respeitar a relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento “ f_u/f_y maior ou igual a 1,08 e alongamento após ruptura não deve ser menor que 10% para base de medida igual a 50 mm ou 7% para base de medida igual a 200 mm, tomando-se como referência os ensaios de tração conforme ASTM A370” (ABNT, 2010). Aços sem qualificação estrutural não possuem “valores superiores a 180 MPa e 300 MPa para a resistência ao escoamento (F_y) e a resistência à ruptura (F_u), respectivamente” (ABNT, 2010).

A resistência das ligações parafusadas é interferida pela ductibilidade do aço utilizado nas chapas laterais. De acordo com esta norma (ABNT, 2010), um aço é considerado dúctil quando a relação entre a resistência à ruptura e ao escoamento (F_u/F_y) for superior ou igual a 1,08.

Nos itens referentes à análise desta tese de doutorado, quando não há considerações pertinentes ao caso na NBR 14762 (ABNT, 2010), seguir-se-ão as recomendações da normativa NBR 8800 (ABNT, 2008).

3.8 Dimensionamento da resistência à tração das chapas metálicas com ligações parafusadas - NBR 14762 (ABNT, 2010)

No campo da siderurgia, o desenvolvimento tecnológico do Brasil possibilitou a produção e a comercialização de aços com alta resistência. Através do aumento da resistência e da qualidade dos aços, tem-se a possibilidade de elaboração de projetos que, juntamente com o controle de qualidade e o desenvolvimento de fabricação dos silos, conduzem em uma redução substancial de custos (ESTEVES, 1989).

A definição do tipo de aço dependerá das propriedades mecânicas solicitadas, do tipo de aplicação e da norma a ser utilizada (CALIL; CHEUNG, 2007). As normas NBR 14762 (ABNT, 2010) e NBR 8800 (ABNT, 2008) regulamentam quanto à espessura e a resistência dos tipos de aços. Os principais tipos de aços utilizados em silos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Tipos de aços utilizados em silos

Tipos	Propriedades mecânicas		Aplicações	Produto
	Fy (MPa)	Fu (MPa)		
SAE 1008	172	309	Colunas, stiffeners	Chapas e bobinas a quente ou a frio
SAE 1010	183	330	Colunas ou stiffeners	Chapas e bobinas a quente ou a frio
ASTM A36	250	400 a 550	Construção soldada ou parafusada; Estruturas em geral	Chapas, barras e perfis
ASTM A570 – Grau C	232	366	Perfis formados a frio; Construção soldada ou parafusada	Chapas ou bobinas a quente
ABNT CF-24	240	370	Chapas finas para uso estrutural	Bobinas a quente ou a frio
ABNT CF-26	260	420	Chapas finas para uso estrutural	Bobinas a quente ou a frio
ZAR 345	345	430	Corpo e tremonhas	Chapas ou bobinas
SAC-50	≥ 343	≥ 461	Corpo de silos e estrutural	Chapas ou bobinas a quente
NBR LNE – 38	≥ 375	≥ 440	Corpo e tremonhas	Chapas ou bobinas a quente

Fonte: Adaptado de Calil e Cheung (2007).

Os aços de alta resistência ligados (ZAR 345) utilizados para as chapas laterais, denominados pela classe G350, são designados pela norma australiana AS1397 (AS, 2011). Conforme Ficanha (2016), abrange nesta normativa a classe G450, recentemente utilizada nos silos de maior capacidade.

Em 2017, a USIMINAS (2017) apresentou o aço ZAR 500, porém não consta na NBR 7008-3 Chapas e Bobinas de Aço Revestidas com Zinco ou Liga Zinco-Ferro Pelo Processo Contínuo de Imersão a Quente, Parte 3: Aços Estruturais (ABNT, 2012). Na Tabela 3 encontram-se as especificações de aços utilizados em silos regidos pela AS1397 (AS, 2011).

Tabela 3 Especificações de aços utilizados em silos

Norma:	AS1397:2011	AS1397:2011	AS1397:2011
Designação da grade:	G350	G450	G500
Limite de escoamento mínimo:	350 MPa	450 MPa	500 MPa
Limite de ruptura mínimo:	420 MPa	480 MPa	520 MPa
Alongamento mínimo:	15%	10%	8%
Relação Fu/Fy:	1,20%	1,07%	1,04%
Galvanização:	Z350	Z350	Z350

Fonte: AS1397 (AS, 2011).

Para conjuntos com ligações parafusadas, analisam-se as possíveis linhas de ruptura das partes ligadas, adotando como parâmetro a situação mais crítica (CALIL; CHEUNG, 2007).

A verificação da força axial de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, das chapas metálicas parafusadas são obtidas adotando o menor valor, entre: o estado limite último de escoamento da seção bruta, ruptura da seção líquida fora da região de ligação e ruptura da seção líquida

na região da ligação (NBR 14762, 2010). No entanto, para definir a resistência do conjunto no costado, além da $N_{t,Rd}$, se faz necessário definir e adotar o menor valor obtido entre: o rasgamento entre furos e furo e borda, esmagamento por pressão de contato e força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso.

No dimensionamento da $N_{t,Rd}$, atende-se a condição de que a força axial de tração solicitante de cálculo resulte em um valor inferior ou igual à força axial de tração resistente de cálculo. Sendo $N_{t,Rd}$ obtida pelas expressões indicadas:

a) Escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A * f_y}{1,10} \quad \text{Eq. (1)}$$

b) Ruptura da seção líquida fora da região de ligação:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_{no} * f_u}{1,35} \quad \text{Eq. (2)}$$

c) Ruptura da seção líquida na região de ligação:

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t * A_n * f_u}{1,65} \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

A - é a área bruta da seção transversal;

A_{no} - é a área líquida da seção transversal da barra fora da região de ligação;

A_n - é a área líquida da seção transversal na região da ligação, sendo A_n .

$$A_n = 0,9 * \frac{A - n_f * d_f * t + \epsilon t * s^2}{4 * g} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

d_f - é a dimensão do furo na direção perpendicular à solicitação;

n_f - é a quantidade de furos contidos na linha de ruptura analisada;

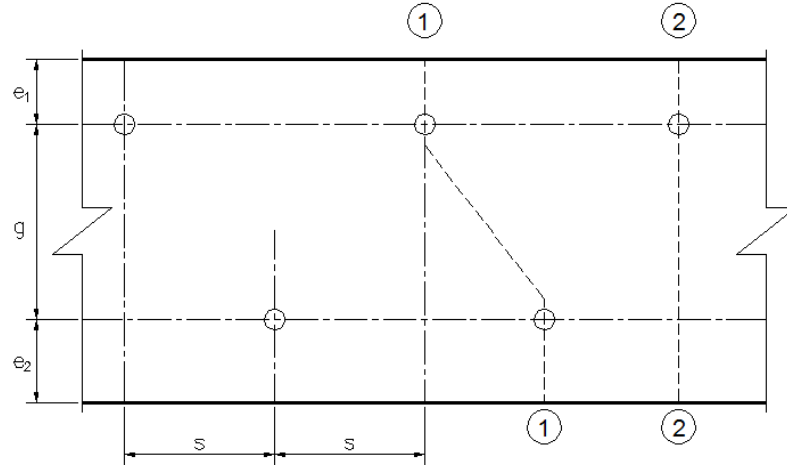
t - é a espessura da parte conectada;

g - é o espaçamento dos furos na direção perpendicular à solicitação (Figura 9). Em caso de espaçamentos diferentes, utiliza-se o maior valor para o cálculo de C_t ;

s - é o espaçamento dos furos na direção da solicitação, conforme Figura 9;

f_y - limite de escoamento à tração;

f_u - limite de ruptura à tração.



1-1: Linha de ruptura com segmento inclinado

2-2: Linha de ruptura com segmento à solicitação

Figura 9 Prováveis linhas de ruptura da seção líquida da chapa metálica.

Fonte: NBR 14762 (ABNT, 2010).

C_t - é o coeficiente da área líquida e em ligações parafusadas. A determinação se dá conforme a quantidade de parafusos utilizados, sendo:

- a) Todos os parafusos contidos em uma única seção transversal:

$$C_t = 2,5 \left(\frac{d}{g} \right) \leq 1,0 \quad \text{Eq. (5)}$$

- b) Dois parafusos contidos na direção da solicitação, alinhados ou em ziguezague:

$$C_t = 0,5 + 1,25 * \left(\frac{d}{g} \right) \leq 1,0 \quad \text{Eq. (6)}$$

- c) Três parafusos contidos na direção da solicitação, alinhados ou em ziguezague:

$$C_t = 0,67 + 0,83 * \left(\frac{d}{g} \right) \leq 1,0 \quad \text{Eq. (7)}$$

- d) Quatro ou mais parafusos contidos na direção da solicitação, alinhados ou em ziguezague:

$$C_t = 0,75 + 0,625 * \left(\frac{d}{g} \right) \leq 1,0 \quad \text{Eq. (8)}$$

Devido às dificuldades de verificação do estado limite último de ruptura da seção líquida na região da ligação para quando utilizadas ligações parafusadas em chapas finas de aço e perfis conformados a frio, a NBR 14762 (ABNT, 2010) adotou o C_t , para auxiliar na avaliação da força normal de tração resistente. Este coeficiente se dá devido à suscetibilidade de ocorrência de efeitos localizados e concentração de tensão junto aos furos (DALL ACQUA, 2018).

É necessário ater-se no caso de divergências das condições anteriormente colocadas. Conforme a NBR 14762 (ABNT, 2010), quando o espaçamento g for inferior à soma das distâncias entre os centros dos furos de extremidades e as respectivas bordas, considerando a direção perpendicular à solicitação de projeto, deve-se substituir o valor de g pelo somatório de $e_1 + e_2$, nos cálculos de C_t .

Para furos com direção em ziguezague, com g inferior à distância $3d$, o valor de g é obtido tomando-se o maior valor entre $3d$ e a soma de $e_1 + e_2$ (NBR 14762, 2010).

Bolandim (2011) afirma que o modo de falha por ruptura da seção líquida efetiva não ocorre de maneira isolada, pois nos casos em que houve tal modo de ruína observou-se também um avançado esmagamento na parede dos furos, em tão alto grau, quanto menor a quantidade de seções de parafusos perpendiculares à força aplicada. Os valores médios experimentais apresentados de C_t , foram superiores aos valores teóricos, mostrando indícios de caráter conservador da norma brasileira com a revisão de 2001.

No entanto, na revisão ABNT de 2010, as considerações desse modelo de ruptura mantiveram-se semelhantes, alterando apenas o coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, anteriormente 1,35 e vigente em 1,65.

Bolandim (2011) também concluiu que, de maneira geral, os modelos de cálculos para a verificação do esmagamento nas normas brasileira, americana e australiana e nas análises por ele realizadas, precisam ser revisados no âmbito de oferecer maior confiabilidade e segurança estrutural.

Holcomb et al. apud Bolandim (2011) enfatizaram o estudo das ligações calculadas para falhar no esmagamento ou por ruptura da seção líquida na região da ligação. Realizaram ensaios em chapas finas de aço, utilizando corpos de prova com cinco furos em zig-zag, submetidas apenas a tração simples. Observaram que, quando a relação F_u/F_y resultou inferior a 1,35, a resistência ao esmagamento do elemento na tração é menor do que para o caso da relação quando maior que 1,35 (evidenciado pelo efeito da ductilidade do aço).

Espessuras inferiores a um milímetro foram analisadas por Rogers e Hancock (2000), quando estudaram o comportamento dos modelos de ruptura, empregando aços de alta resistência e conformados por meio de um processo a frio. A atenção deste estudo foi para os modos de ruptura por esmagamento, incluindo o enrugamento da chapa em frente aos parafusos, e a ruptura da seção líquida na região da ligação. Os pesquisadores confirmaram

que algumas expressões utilizadas para determinar a redução da capacidade resistente da seção líquida não forneciam bons resultados. Assim, concluíram que os modelos de ruptura que exibiram rasgamento da chapa de aço, caberiam ao modo de falha por esmagamento. Salientaram também que os tipos de falha rasgamento/esmagamento sejam tratados separadamente, recomendando a necessidade de um coeficiente gradual para a resistência ao esmagamento, que esteja relacionado com o diâmetro do parafuso, a espessura da chapa, e a resistência à ruptura do aço.

3.8.1 Ruptura da seção líquida na região de ligação

A insuficiência de área efetiva na seção crítica da ligação para suportar a força solicitante de tração é a responsável pela falha por ruptura da chapa na seção líquida. Neste modelo de ruptura, os efeitos locais de rasgamento e esmagamento na chapa não são acentuados. A característica principal deste modelo de ruptura é a ruptura da chapa na borda de um furo da seção crítica, coincidente com a linha de furação original da chapa, propagando-se na direção perpendicular à solicitação até a borda dos demais furos ou da chapa (DALL ACQUA, 2018).

Em chapas finas, a presença de furos e o contato da chapa com o parafuso, ocasionam uma concentração de tensões. Porém, a utilização de múltiplos parafusos na direção paralela à solicitação acaba aliviando este efeito, devido à divisão desta força entre todos os parafusos. A Figura 10 apresenta este modelo de ruptura.

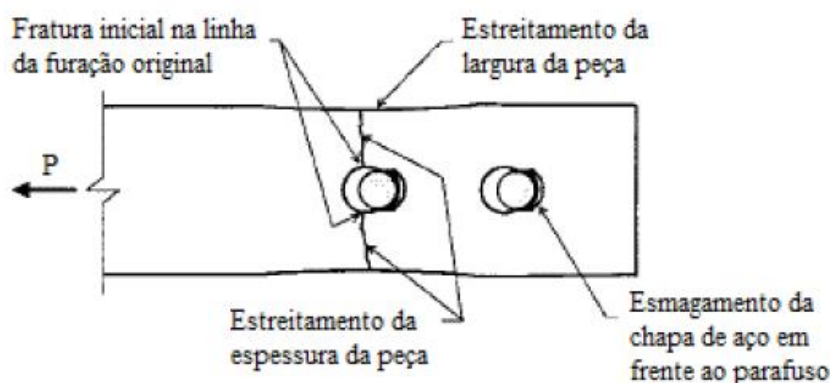


Figura 10 Caracterização da ruptura da seção líquida na região da ligação.

Fonte: Rogers e Hancock (2000).

Na NBR 8800 (ABNT, 1986) para o dimensionamento de barras axialmente tracionadas, o coeficiente C_t , utilizavam-se valores fixos de 0,90, 0,85 ou 0,75. Na revisão de 2006, igualou-se a expressão dada na ANSI/AISC 360-05, que leva em conta o efeito favorável do comprimento da ligação e o efeito desfavorável da excentricidade da ligação (FAKURY, 2007).

A relação geométrica (d/g) e o comprimento da ligação, tendo em vista a ruptura da seção líquida na região da ligação, segundo Bolandim (2011), demonstrou que os coeficientes de redução da área líquida, tanto nos modelos brasileiro e americano, como na resistência à ruptura do aço (F_u), não intervêm na segurança das ligações parafusadas.

Entretanto, Maiola (2004) cita que a relação d/g é a função capaz de avaliar a intensidade da concentração de tensão. Ligações com a mesma quantidade de parafusos, porém mais espaçados, apresentam uma relação menor de d/g , resultando um valor inferior para C_t , devido à maior concentração na borda dos furos quando submetidos a tração.

Conforme a Figura 11, para valores de relação d/g acima de 0,4 adota-se para o coeficiente C_t um valor unitário, permanecendo a área líquida efetiva igual a área líquida da seção transversal (BOLANDIM, 2004).

Tendo como estabelecidos e respeitados os espaçamentos mínimos e máximos entre extremidade de furos e extremidade de furo à borda, tem-se como relação d/g máxima de 0,333 ($1/3$), valor abaixo do patamar unitário de C_t (Figura 11).

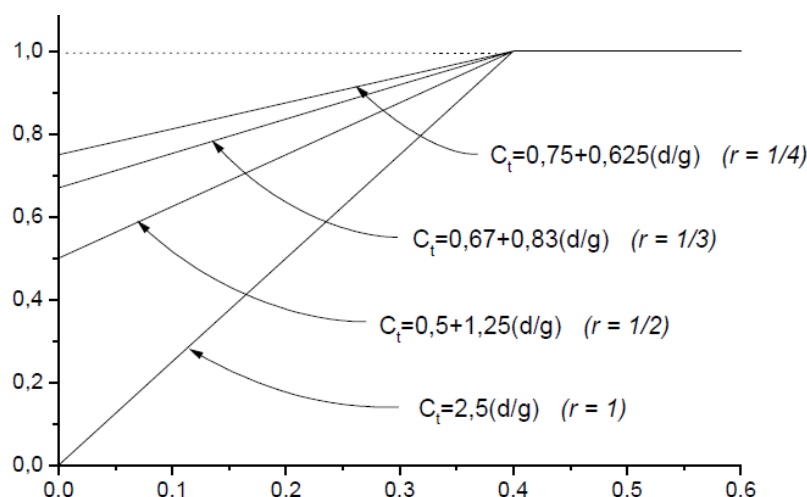


Figura 11 Coeficiente C_t em função da relação d/g .
Fonte: NBR14762 (ABNT, 2010) adaptado de Maiola (2004).

3.8.2 Sugestão para distinguir a ruptura da seção líquida na região da ligação e esmagamento da parede do furo

Não se descarta a hipótese de que em alguns casos podem ter ocorrido erros na identificação do modelo de ruptura dos corpos de prova ensaiados, submetidos, por exemplo, à falha por esmagamento.

Rogers e Hancock (2000) incitaram que supostamente este tipo de erro na identificação em rupturas por esmagamento ocorre quando a extremidade da peça ensaiada não é contida às ondulações que podem ocorrer fora do plano da ligação, aparecendo rasgos

próximos da direção perpendicular à força aplicada e se estendendo a partir da borda da chapa de aço (Figura 12).

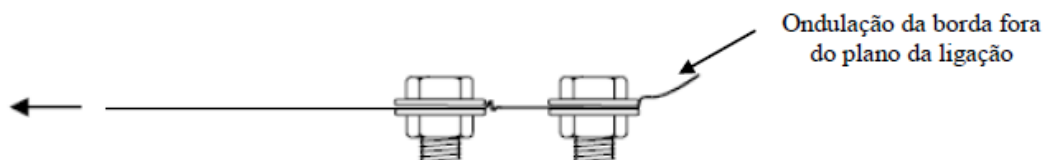


Figura 12 Esmagamento com flexão da borda.

Fonte: Rogers e Hancock (2000).

Esses rasgos, visualizados próximos à borda enrugada em frente ao parafuso, podem induzir o pesquisador a um erro na identificação do modelo de ruptura obtido. Assim, não convergindo com a previsão teórica, fazendo com que um ensaio bem administrado seja descartável (ROGERS; HANCOCK, 1998).

Dell Acqua (2018) cita algumas características que auxiliam na identificação deste modelo de ruptura da seção líquida na região, a fim de distinguir do modelo de ruptura por esmagamento:

- a) Estreitamento na largura e espessura da chapa;
- b) Linha de ruptura coincidente com a da furação original;
- c) Ausência de deslocamento fora do plano;
- d) Deformação dos furos reduzida.

A tendência para formação de rasgos no corpo de prova é reduzida quando o modelo de ruptura for por esmagamento, ondulando fora do plano do corpo de prova a extremidade da ligação (Figura 12). Portanto, a visualização de enrugamento da chapa em frente ao parafuso é bem proferida. Rogers e Hancock (2000) determinaram as seguintes características para este modelo de ruptura:

- a) Presença significativa de ondulação e deformação fora do plano da borda da chapa;
- b) Estreitamento na largura e espessura da chapa;
- c) Os rasgos originam-se em frente ao parafuso ou arruela e não no centro do furo do parafuso;
- d) Finalmente, os rasgos comumente se propagam na direção diagonal à borda da chapa.

De forma resumida, o modelo de ruptura é facilmente verificado se o ensaio não for prolongado após a carga última ter sido alcançada, sendo fazendo necessário o uso de uma máquina de ensaio com controle de deslocamentos. O rasgamento acompanhado ao

esmagamento é usualmente encontrado numa faixa de força após a força última ter sido alcançada, não influenciando a capacidade de transferência de esforços da ligação. Porém, a presença de significativos rasgos que estão próximos da direção perpendicular à força aplicada pode ter grande influência no modo de ruína encontrado, causando possíveis erros na identificação do modelo de ruptura (ROGERS; HANCOCK, 1998).

3.9 Determinação da resistência de parafusos estruturais

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) é possível utilizar outros tipos de parafusos com qualificação estrutural, além dos descritos pelas ASTM A325 e ASTM A490, desde que satisfaçam as prescrições relativas:

- a) Ao material utilizado;
- b) Ao processo de fabricação;
- c) À composição química; e
- d) Às propriedades mecânicas.

As medidas do diâmetro do fuste e as áreas de contato sob a cabeça e porca, ou suas equivalentes, não admitem ser inferiores às especificações da norma ASME B18.2.6 para parafuso e porca de mesmas dimensões nominais (ABNT, 2008). Para as comprovações das propriedades mecânicas realizaram-se ensaios em escala natural.

3.9.1 Estado limite das ligações parafusadas

As generalidades que se aplicam à NBR 14762 (ABNT, 2010) se referem às ligações parafusadas com a espessura da parte mais fina, menor que 4,75 mm. Caso contrário, devem ser seguidas as recomendações da NBR 8800 (ABNT, 2008).

Atualmente, em modelos comerciais de forma geral, podem atender o volume de até 14.735 m³, mantendo espessuras das chapas laterais inferiores a 4,75 mm.

3.9.1.1 Dimensão dos furos

Quando forçados ao cisalhamento, nas ligações cuja solicitação seja normal ao eixo dos parafusos, os furos alongados ou muito alongados devem ter a dimensão alongada do furo no sentido normal à solicitação (FICANHA, 2016). Inclusive, os furos não devem exceder as especificações da Tabela 4 e características da Figura 13.

Tabela 4 Dimensões máximas dos furos em mm

Diâmetro nominal do parafuso – d	Diâmetro do furo padrão	Diâmetro do furo alargado	Dimensões do furo pouco alongado	Dimensões do furo muito alongado
< 12,5	d+0,8	d+1,5	(d+0,8) x (d+6)	(d+0,8) x (2,5d)
≥ 12,5	d+1,5	d+5	(d+1,5) x (d+6)	(d+0,8) x (2,5d)

Fonte: NBR 14762 (ABNT, 2010).

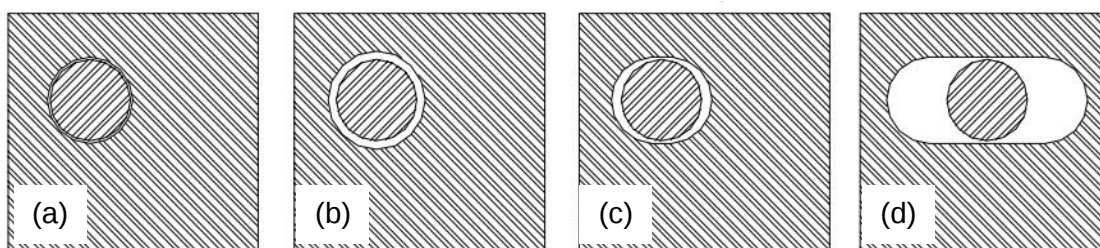


Figura 13 Caracterização dos furos conforme NBR 8800 (ABNT, 2008). a) Furo padrão; b) Furo alargado; c) Furo pouco alongado; d) Furo muito alongado.

Quando a espessura das partes ligadas for superior a 4,75 mm recomendam-se os parâmetros da NBR 8800 (ABNT, 2008), conforme Tabela 5.

Tabela 5 Dimensões máximas dos furos em mm

Diâmetro nominal do parafuso – d	Diâmetro do furo padrão	Diâmetro do furo alargado	Dimensões do furo pouco alongado	Dimensões do furo muito alongado
<24	$d_b+1,5$	d_b+5	$(d_b+1,5) \times (d_b+6)$	$(d_b+1,5) \times (2,5d_b)$
27	28,5	33	28,5 x 35	28,5 x 67,5
≥ 30	$d_b+1,5$	d_b+8	$(d_b+1,5) \times (d_b+9,5)$	$(d_b+0,8) \times (2,5d_b)$

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

A execução dos furos das partes ligadas, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), podem ser por punção, sub punção, alargado ou broqueado. No entanto, existem limitações quanto ao uso de furos alargados ou alongados que necessitam ser atendidas, como descreve a Tabela 6.

Tabela 6 Limitações relativas ao emprego de furos alargados ou alongados

Tipo de furo	Tipo de ligação permitido	Limitações	
		Posição do furo	Arruelas
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, independente da direção da solicitação.	Sobre furos pouco alongados em chapas externas da ligação devem ser utilizadas arruelas, que necessitam ser endurecidas quando o parafuso for de alta resistência.
	Por contato	Em qualquer uma ou em todas as chapas de ligação. Maior dimensão normal à direção da solicitação.	

Tipo de furo	Tipo de ligação permitido	Limitações	
		Posição do furo	Arruelas
Muito alongado	Por atrito	Em somente uma das partes da ligação, para a mesma superfície de contato. Qualquer posição, independente da direção da solicitação.	Arruelas de chapas ou barras chatas contínuas, de espessura 8 mm, aço estrutural, devem ser usadas sobre furos muito alongados em chapas externas.
	Por contato	Em somente uma das partes da ligação, para a mesma superfície de contato. Maior dimensão normal à direção da solicitação.	Tais arruelas devem possuir dimensões suficientes para cobrir totalmente os furos alongados após a instalação do parafuso.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

3.9.1.2 Espaçamentos mínimos

Definidos d e d_b sendo o diâmetro nominal do parafuso. A distância livre entre as bordas e os dois furos adjacentes não deve ser inferior a $2d$, tal que a distância da borda de um furo à extremidade do elemento conectado não seja inferior a d , conforme demonstra a Figura 14 (NBR 14762, ABNT, 2010).

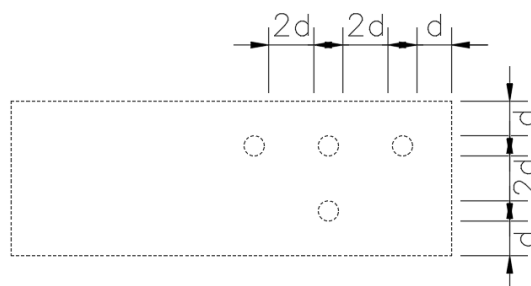


Figura 14 Espaçamentos mínimos nas ligações parafusadas.

Fonte: NBR 14762 (ABNT, 2010).

3.9.1.3 Espaçamentos máximos

Quando solicitadas a compressão, a distância entre os centros de dois parafusos adjacentes ou entre o centro do parafuso à borda da cobrejunta, na direção da solicitação deve ser inferior a $1,37t(E/f_y)^{0,5}$, onde t é a espessura da cobre junta, E módulo de elasticidade e f_y é a resistência ao escoamento do aço da cobrejunta (NBR 14762, ABNT, 2010).

3.9.1.4 Rasgamento entre furos ou entre furo e borda

Em ligações cuja ruptura da ligação seja por rasgamento da chapa de aço, primeiramente ocorre o enrugamento da chapa em frente ao parafuso, seguido por duas linhas de rasgamento da chapa, aproximadamente paralelas e longitudinais, estendendo-se da região do enrugamento da chapa até a extremidade ou o próximo furo adjacente (MAIOLA, 2004).

A verificação da força resistente ao rasgamento entre furos (Figura 15) ou entre furo e borda são calculadas de acordo com a NBR 14762 (ABNT, 2010):

$$F_{Rd} = \frac{t * e * f_u}{\gamma} \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde:

F_{Rd} - Força resistente de cálculo ao rasgamento;

t - é a espessura do elemento conectado;

γ - 1,35;

e - é a distância, no sentido da força, do centro do furo até a borda mais próxima do furo adjacente ou a extremidade do elemento conectado.

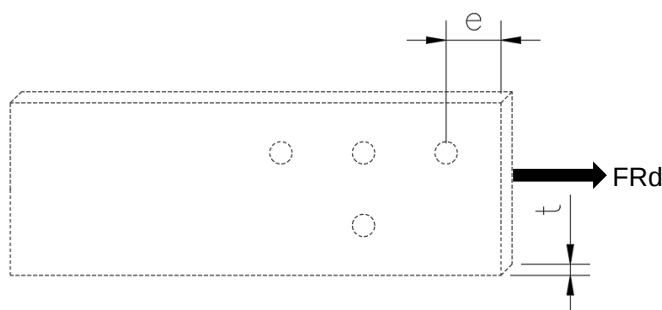


Figura 15 Rasgamento entre furos ou entre furo e borda nas ligações parafusadas.
Fonte: NBR 14762 (ABNT, 2010).

3.9.1.5 Pressão de contato – esmagamento

Quando ocorre o enrugamento da chapa de aço em frente ao parafuso, ocasionando uma deformação excessiva na chapa próximo à região do furo, segundo Maiola (2004), tem-se a ruptura por esmagamento.

A verificação da força resistente de cálculo ao esmagamento (Figura 16) é verificada pela NBR 14762 (ABNT, 2010) e definida através da Equação 11:

$$F_{Rd} = \frac{\alpha e * d * t * f_u}{\gamma} \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde:

F_{Rd} - Força resistente de cálculo ao esmagamento;

t - é a espessura do elemento conectado;

γ - 1,35;

d - é o diâmetro nominal do parafuso;

f_u - é a resistência à ruptura do metal base;

αe - é um fator definido por $(0,183t+1,53)$. Utilizar-se-á como pior condição a espessura limite de 4,75 mm, portanto, resultando em 2,40.

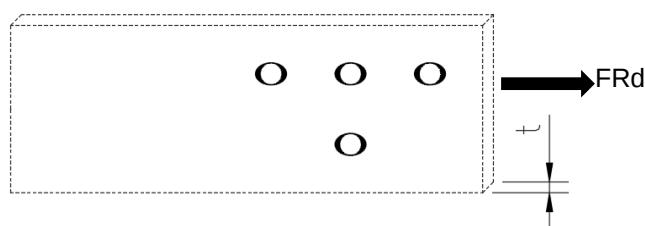


Figura 16 Esmagamento nas ligações parafusadas.
Fonte: NBR 14762 (ABNT, 2010).

Através da Figura 17, Maiola (2004) constatou que os valores recomendados pela Norma Brasileira edição 2001 são intermediários em relação ao exposto pela AISI:1996 e inferiores ao descrito no EUROCODE 3 part 1.3:1996.

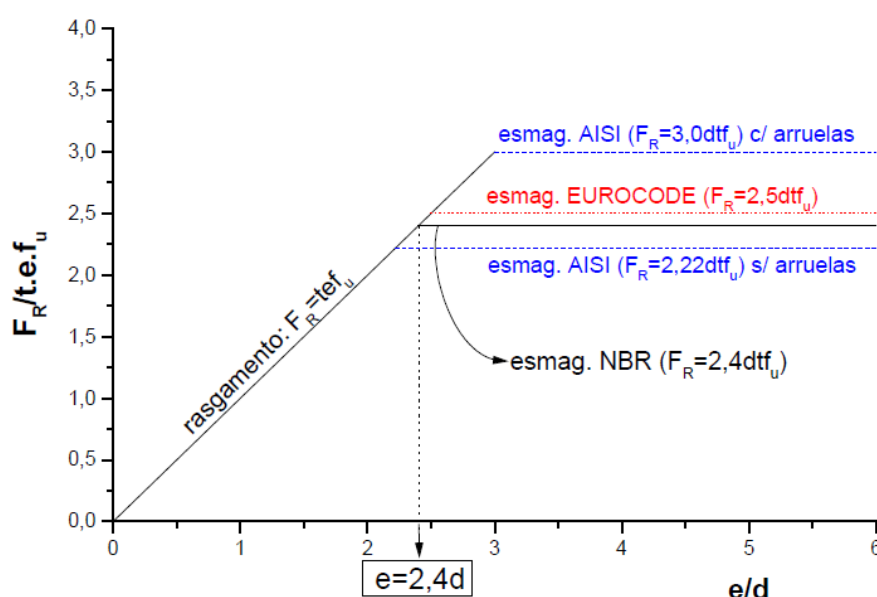


Figura 17 Resistências ao rasgamento e esmagamento em relação ao parâmetro e/d .
Fonte: Maiola (2004).

3.9.1.6 Força de cisalhamento teórico do parafuso

Winter (1956) determinou quatro modos de ruína que podem ocorrer nas ligações. Dentre eles, constatou o cisalhamento do parafuso. Os resultados obtidos de experimentos revelaram que a resistência das ligações que falharam no parafuso se correlacionaram melhor com a resistência à ruptura do aço do parafuso do que com a resistência ao escoamento do aço, permitindo que alguns diagramas relacionando a razão da tensão cisalhante nominal na falha do parafuso (τ_b) e a resistência à ruptura do parafuso (f_{ub}) com o diâmetro do parafuso (d) fossem construídos.

Conforme Ficanha (2016), a partir dos diagramas obtidos, foi possível notar que a relação $\frac{\tau_b}{f_{ub}}$ é razoavelmente independente do diâmetro do parafuso e também que os valores dos ensaios estão agrupados em torno de $\frac{\tau_b}{f_{ub}} = 0,62$ para os corpos de prova submetidos ao corte duplo e em média de $\frac{\tau_b}{f_{ub}} = 0,72$ para aqueles submetidos ao corte simples. Devido à falha por cisalhamento do parafuso ter sido mais súbita do que aquelas na chapa, acreditava-se que valores conservativos para o menor dos resultados obtidos nos ensaios poderiam ser selecionados como um fator para a previsão do projeto. Por essa razão, sugeriu-se uma representação matemática aplicável a corte simples e corte duplo, dada pela Equação 12:

$$\tau_b = 0,60 * f_{ub} \quad \text{Eq. (12)}$$

3.9.1.6.1 Pela NBR 14762 (ABNT, 2010) e NBR 8800 (ABNT, 2008)

Para o critério de resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso pelas normas NBR 14762 (ABNT, 2010) e NBR 8800 (ABNT, 2008), o dimensionamento da ligação parafusada no plano de corte é regida pelas expressões:

a) Quando plano de corte passar pela rosca:

$$F_{vRd} = \frac{0,4 * A_b * f_{ub}}{\gamma} \quad \text{Eq. (13)}$$

b) Quando plano de corte não passar pela rosca:

$$F_{vRd} = \frac{0,5 * A_b * f_{ub}}{\gamma} \quad \text{Eq. (14)}$$

Onde:

γ - 1,35;

f_{ub} - resistência a ruptura do parafuso à tração, verificada na Tabela 1 e ilustrada na Figura 15;

A_b - para a NBR 14762 (ABNT, 2010) é a área bruta da seção transversal do parafuso. Para a NBR 8800 (ABNT, 2008), é definido por:

$$A_b = 0,25 * \pi * d_b^2 \quad \text{Eq. (15)}$$

Onde:

A_b - área bruta;

A_{be} - área efetiva de um parafuso;

d_b - diâmetro do parafuso.

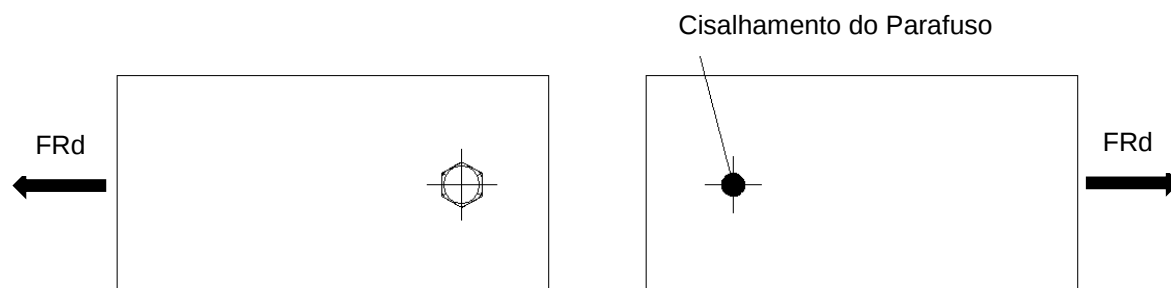


Figura 18 Ruptura do parafuso nas ligações parafusadas.
Fonte: Adaptado de Esteves (1989).

3.9.1.6.2 Pela ANSI AISI S100:2007-S FRd

De acordo com a AISI S100 (ANSI, 2007), a força resistente nominal do parafuso (P_n) resultante do cisalhamento ou tração deve ser calculada de acordo com a Equação 16. Os fatores de segurança e de resistência são fornecidos na Tabela 7.

$$P_n = A_b * f_n \quad \text{Eq. (16)}$$

Onde:

A_b - é a área bruta da seção transversal do parafuso;

f_n - é a resistência à ruptura nominal em MPa. Quando sujeitos ao cisalhamento ou à tração, f_n é dado por f_{nv} ou f_{nt} , indicados na Tabela 7.

Tabela 7 Tensão de tração e cisalhamento em parafusos

	Resistência a Tração			Resistência ao Cisalhamento		
	Fator de Segurança Ω (ASD)	Fator de Resistência Φ (LRFD)	Tensão Nominal F_{nt} , ksi (MPa)	Fator de Segurança Ω (ASD)	Fator de Resistência Φ (LRFD)	Tensão Nominal F_{nv} , ksi (MPa)
Parafuso A307 Grade A $6,40\text{mm} \leq d < 12,70\text{mm}$	2,25		40,5 (279)			24,0 (165)
Parafuso A307 Grade A $d \geq 12,70\text{mm}$	2,25		45,0 (310)			27,0 (186)
Parafuso A325, quando o cisalhamento não passa pela rosca			90,0 (621)			54,0 (372)
Parafuso A325, quando o cisalhamento passa pela rosca			90,0 (621)			72,0 (496)
Parafuso A354 Grade BD $6,40\text{mm} \leq d < 12,70\text{mm}$ quando o cisalhamento não passa pela rosca	2,0	0,75	101,0 (696)	2,4	0,65	59,0 (407)
Parafuso A354 Grade BD $6,40\text{mm} \leq d < 12,70\text{mm}$ quando o cisalhamento passa pela rosca			101,0 (696)			90,0 (621)
Parafuso A449 $6,40\text{mm} \leq d < 12,70\text{mm}$ quando o cisalhamento não passa pela rosca			81,0 (558)			47,0 (324)

Parafuso A449 6,40mm ≤ d < 12,70mm quando o cisalhamento passa pela rosca	81,0 (558)	72,0 (496)
Parafuso A490 quando o cisalhamento não passa pela rosca	112,5 (776)	67,5 (465)
Parafuso A490 quando o cisalhamento passa pela rosca	112,5 (776)	90,0 (621)

Fonte: Tabela E3.4-1 extraído da AISI S100 (2007).

Quando o parafuso sofrer a combinação de tração e cisalhamento, Ω e Φ , os fatores de segurança e resistência utilizados devem estar de acordo com a Tabela 7 e devem ser calculados de acordo com as equações E3.4-2 e E3.4-3 da respectiva norma.

3.9.1.6.3 Pelo EUROCODE 3 – Parte 1.3:2006

O Eurocode 3 – Design of Steel Structures, Part 1-3: Supplementary rules for cold formed members and sheeting (EN, 2010) determina a força resistente ao cisalhamento (F_{vRd}) do parafuso pelas Equações 17 e 18:

- a) Quando o plano de corte passar pela rosca:

$$F_{vRd} = \frac{0,5 * A_s * f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad \text{Eq. (17)}$$

- b) Quando o plano de corte não passar pela rosca:

$$F_{vRd} = \frac{0,6 * A_s * f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad \text{Eq. (18)}$$

Onde:

γ_{M2} - 1,25;

f_{ub} - resistência última à tração do parafuso;

A_s - área transversal ao plano de corte do parafuso.

3.10 Força de cisalhamento experimental do parafuso alternativo

Ficanha (2016) apresentou o comparativo de um modelo de parafuso tradicional, de classe de resistência 8.8 regido pela ISO 4016 (2000) utilizado nas ligações das chapas do corpo de silos metálicos e um parafuso alternativo de mesmas propriedades mecânicas (Figura 19).



Figura 19 Parafusos para silo tradicional e parafuso alternativo.
Fonte: Ficanha (2016).

O parafuso tradicional possui rosca inteira (Figura 19a) e rosca parcial (Figura 19b). Nota-se que o formato da cabeça pode variar, desde que dentro das especificações normativas. Ficanha (2016) comparou o parafuso alternativo, Figura 19c, com o parafuso tradicional de rosca parcial. O conjunto de porca e arruela apresentam-se na Figura 19d.

O dimensionamento teórico de ambos os modelos se baseou nas recomendações de quatro normativas (NBR 14762 (2010), NBR 8800 (2008), ANSI AISI S100 (2007) e EUROCODE 3 Parte 1.3 (2010). Por se tratar de um comparativo entre resultados experimentais adquiridos em laboratório por meio de ensaios e resultados teóricos, obtidos com base em modelos matemáticos segundo previsões normativas, adotaram-se como unitários os coeficientes de ponderação das forças e a redução da área de cisalhamento no plano de corte.

A viabilidade econômica do parafuso alternativo foi mantida devido à conservação da mesma massa de aço do parafuso tradicional e as mesmas recomendações normativas para o enquadramento da norma ISO e classe de resistência (FICANHA, 2016).

Ainda, de acordo com Ficanha (2016), para as amostras ensaiadas, o aumento de 64% de área na parte oblonga do parafuso alternativo produziu efeitos positivos na resistência do parafuso tradicional, superando em 128% o aumento da resistência do mesmo, elevando a resistência ao cisalhamento de 46,86 kN para 107,13 kN.

A determinação da média da variável aleatória erro de modelo do parafuso alternativo indicou um comportamento experimental seguro e conservador. Analisou-se a presença do erro de modelo (Me) através da análise de confiabilidade do modelo, demonstrando um aumento significativo de 39% na resistência do parafuso tradicional em relação ao modelo matemático avaliado.

Como intuito da dissertação de mestrado de Ficanha (2016), testou-se a influência do tipo do parafuso no modo de ruptura das chapas metálica de silos. O aumento da área na região de corte do parafuso alternativo e o formato do furo na chapa de apoio produziram aumentos significativos na resistência ao cisalhamento em relação ao parafuso tradicional, elevando de 54,87 kN para 78,58 kN. Não ocorreu o cisalhamento do parafuso alternativo utilizando a chapa de apoio. A força máxima experimentada referiu-se ao esmagamento e rasgamento da chapa e à deformação plástica do parafuso alternativo.

3.11 Ligações parafusadas em perfis de aço formados a frio

As ligações parafusadas em perfis de aço formados a frio (PFF) têm sido amplamente utilizadas pelas indústrias metalúrgicas devido ao seu custo competitivo.

Segundo Bolandim (2011), ligações parafusadas em chapas finas de aço na grande maioria não possuem todos os elementos da seção conectados, caracterizando assim a grande diferença em relação a PFF. Esta ocorrência se dá na efetividade total da seção transversal, conhecido como “shear lag”, sendo um fenômeno caracterizado pelo fato desse mecanismo de transferência de força mobilizar tensões de cisalhamento na peça.

A NBR 14762 (ABNT, 2010) leva em consideração esse efeito por meio do coeficiente de redução da área líquida C_t , utilizado e aprimorado desde a edição de 2001.

Winter (1956) realizou ensaios experimentais constatando que a não utilização de “arruelas em ligações parafusadas em chapas finas de aço, até então muitas vezes omitidas na prática, sem qualquer embasamento teórico, levava a uma redução de 45% da capacidade resistente da ligação, sendo o caso mais crítico quando da utilização de apenas um único parafuso na ligação, pois essa configuração é propícia à flexão da borda das chapas na extremidade ligada ao final do ensaio.”

4 MATERIAL E MÉTODOS

Visando o atendimento dos objetivos propostos, teoricamente, comparou-se a diferença na resistência do conjunto das chapas de aço parafusadas, utilizando dois elementos de fixação: parafuso silo tradicional e parafuso silo alternativo (FICANHA, 2016).

O fluxograma experimental desta tese consistiu-se no ensaio de ligações parafusadas em corpo de prova formadas por chapas finas de aço com espessuras 0,92, 1,95 e 3,00 mm e o modelo do parafuso alternativo, submetendo-as ao cisalhamento simples, através da aplicação de uma carga normal de tração até a ruptura do conjunto. A definição dos protótipos e a metodologia dos ensaios reproduziram na prática a situação das chapas do costado de silos metálicos.

O conjunto das amostras das chapas parafusadas foram confeccionadas na empresa Comil Silos e Secadores Ltda. Os parafusos foram fabricados pela empresa Industrial Rex Ltda. Os ensaios foram realizados em dois locais devido às limitações de carga da máquina universal de tração: Laboratório Spectroscan Tecnologia de Materiais Ltda. e Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu. O número de amostras ensaiadas atendeu ao mínimo recomendado de três amostras pela NBR 14762 (ABNT, 2010) de três protótipos idênticos para cada situação.

A interpretação dos dados coletados se deu pelos quatro possíveis tipos de ruptura descritos pela norma NBR 14762 (ABNT, 2010) e a definição do erro de modelo através da comparação teórica e experimental.

4.1 Estudo teórico e otimização do dimensionamento da resistência à tração das ligações parafusadas - NBR 14762 (ABNT, 2010)

A verificação da força axial de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, das chapas metálicas parafusadas foi obtida considerando o menor valor: do estado limite último de escoamento da seção bruta, ruptura da seção líquida fora da região de ligação e ruptura da seção líquida na região da ligação, o menor valor obtido entre o rasgamento entre furos e furo e borda, esmagamento por pressão de contato e força de cisalhamento resistente de cálculo de ambos os modelos de parafuso tradicional e alternativo, de acordo com a NBR 14762 (ABNT, 2010).

Para a definição do modelo otimizado das chapas laterais, utilizaram-se as Equações 1, 2 e 3. Para a definição da carga de ruptura do conjunto predominou a ruptura da seção líquida na região da ligação (Eq. 3), onde focou-se nos principais parâmetros proporcionais da resistência: área líquida da seção transversal na região da ligação (A_n) e coeficiente de redução da área líquida e em ligações parafusadas (C_t).

4.1.1 Estudo para determinação de A_n e posicionamento do parafuso alternativo

Por ser A_n (Equação 4) a área líquida da seção transversal na região da ligação, e o parafuso alternativo possuir duas dimensões distintas (10x15 mm), o seu posicionamento, vertical e horizontal, influenciou na determinação de A_n . A Tabela 8 demonstra a redução de A_n quando o parafuso alternativo é posicionado na vertical. Não há distinção no posicionamento do parafuso tradicional de diâmetro circular 10 mm.

Entre os parâmetros para definir A_n , a quantidade de furos contidos na linha de ruptura analisada, n_f , interfere na determinação posterior do C_t , sendo (n_f), portanto, definido iterativamente com o C_t .

No parâmetro s , espaçamento dos furos na direção da solicitação, verifica-se que quanto maior a distância, maior o resultado de A_n . No entanto, não se utilizou deste artifício, tendo em vista a redução da área efetiva da chapa lateral, diminuindo o diâmetro efetivo do silo.

O espaçamento dos furos na direção perpendicular à solicitação, denominado g , matematicamente é inversamente proporcional à definição de C_t , conforme demonstra a Equação 3. Determinou-se a distância vertical máxima fabril de 54,00 mm entre furos (equivalente a 50,80 mm (2")). Testaram-se distâncias verticais de 108,00 mm (equivalente a 101,60 mm (4")), porém em caso de espaçamentos diferentes, a recomendação normativa é a utilização do maior valor para o cálculo de C_t , também inversamente proporcional nas Equações 5, 6, 7 e 8 (Tabela 8).

Tabela 8 Valores de C_t – Parafuso alternativo posicionado na horizontal e vertical

Ct - Coeficiente da área líquida	Posicionado Horizontal (Figura 20)	Posicionado Vertical (Figura 21)
Um parafuso ou todos os parafusos da ligação contidos em uma única seção transversal - $C_t = 2,5 \cdot (d/g) \leq 1,0$:	0,69	0,46
Dois parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zigue zague - $C_t = 0,50 + 1,25 \cdot (d/g) \leq 1,0$:	0,85	0,73
Três parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zigue zague - $C_t = 0,67 + 0,83 \cdot (d/g) \leq 1,0$:	0,90	0,82
Quatro ou mais parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zigue zague - $C_t = 0,75 + 0,625 \cdot (d/g) \leq 1,0$:	0,92	0,87

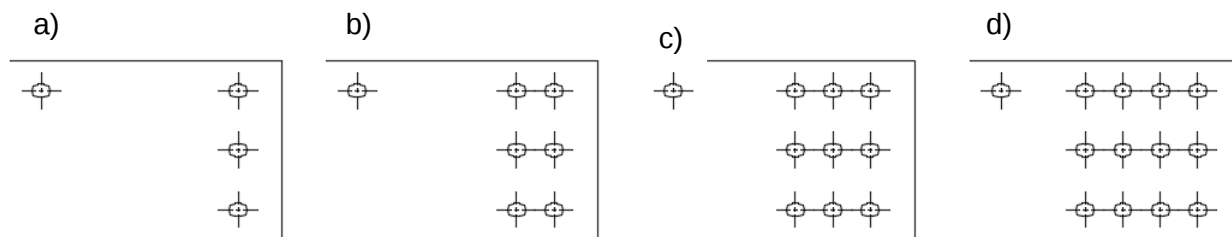


Figura 20 Costuras do parafuso alternativo posicionado na horizontal. a) Um parafuso ou todos os parafusos da ligação contidos em uma única seção transversal; b) Dois parafusos na direção da solicitação; c) Três parafusos na direção da solicitação; d) Quatro ou mais parafusos na direção da solicitação.

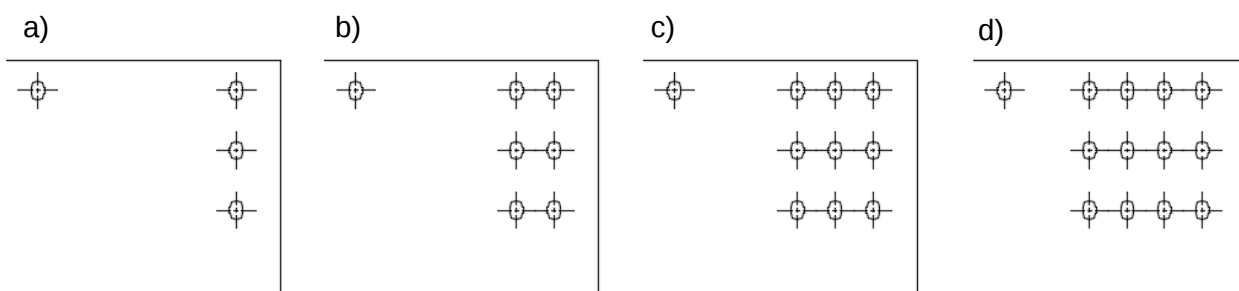


Figura 21 Costuras do parafuso alternativo posicionado na vertical. a) Um parafuso ou todos os parafusos da ligação contidos em uma única seção transversal; b) Dois parafusos na direção da solicitação; c) Três parafusos na direção da solicitação; d) Quatro ou mais parafusos na direção da solicitação.

4.1.2 Estudo para determinação de C_t e definição do tipo de costura

Conforme objetivo proposto, a determinação da quantidade de furos e espaçamentos otimizados é um dos fatores mais importantes a se trabalhar para o aumento da resistência do conjunto de chapas laterais parafusadas. Quanto mais próximo o C_t estiver de 1,0, menor será o valor da redução da resistência da chapa, nos casos de ruptura da seção líquida na região da ligação.

Testaram-se os modelos de costuras das Equações 5, 6, 7 e 8. Para os modelos denominados Costura 10 e Costura 17/19 (Figura 22), utilizaram-se g de 54,00 mm, e para a Costura 13, o valor de 108,00 mm, Tabelas 11, 12, 13 e 14.

Conforme a Tabela 9, os coeficientes de C_t foram superiores ao parafuso tradicional em distâncias máximas de 54,00 mm entre furos e diâmetro nominal do parafuso alternativo de 15 mm (d) no sentido horizontal.

Tabela 9 Valores de Ct – Parafuso alternativo na horizontal

Ct - Coeficiente da área líquida	Costura 10	Costura 13	Costura 17/19
Um parafuso ou todos os parafusos da ligação contidos em uma única seção transversal - Equação 5:	0,69	0,35	0,69
Dois parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zigue zague - Equação 6:	0,85	0,67	0,85
Três parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zigue zague - Equação 7:	0,90	0,79	0,90
Quatro ou mais parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zigue zague - $Ct = 0,75 + 0,625*(d/g) \leq 1,0$:	0,92	0,84	0,92

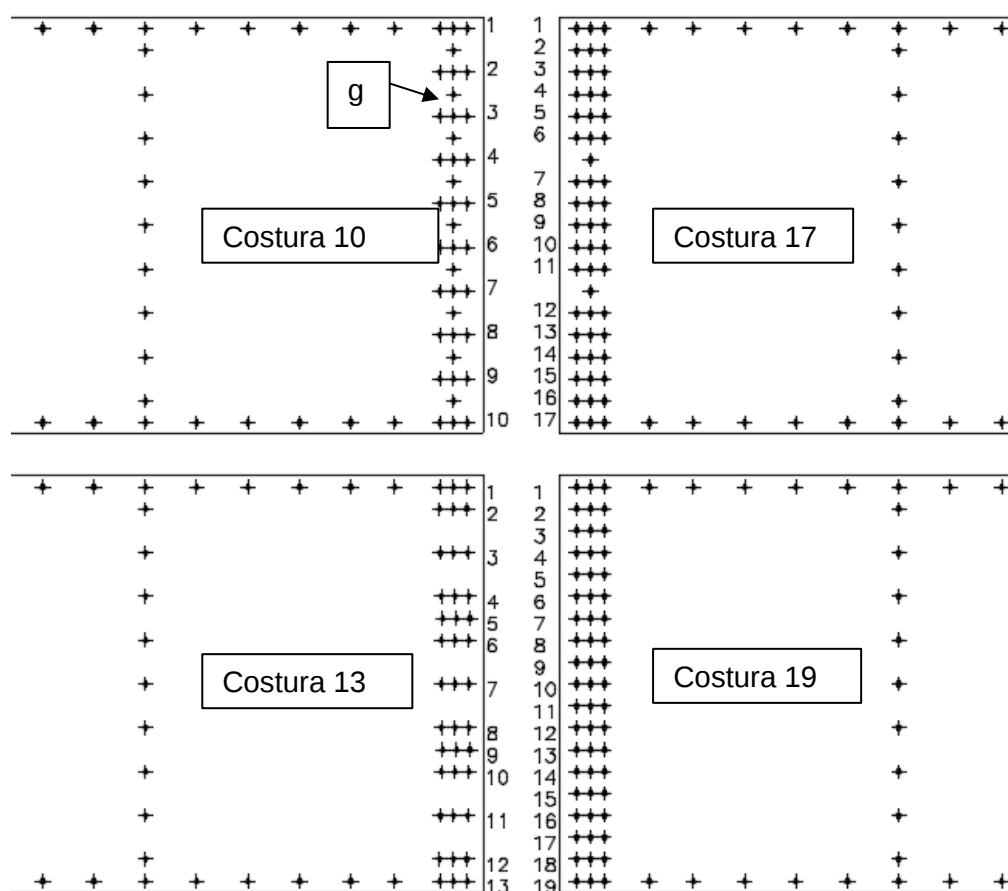


Figura 22 Tipos de costuras 10, 13, 17 e 19 linhas de parafuso em chapas de 1000 mm de altura.

A definição do Ct para o parafuso tradicional manteve as mesmas distâncias que as utilizadas com o parafuso alternativo. Conforme a Tabela 10, os valores de Ct para o parafuso tradicional foram inferiores comparando os dois modelos de parafusos.

Tabela 10 Valores de Ct – Parafuso tradicional

Ct - Coeficiente da área líquida	Costura 10	Costura 13	Costura 17/19
Um parafuso ou todos os parafusos da ligação contidos em uma única seção transversal - Equação 5:	0,46	0,25	0,46
Dois parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zigue-zague - Equação 6:	0,73	0,62	0,73
Três parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zigue-zague - Equação 7:	0,82	0,75	0,82
Quatro ou mais parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zigue-zague - $Ct = 0,75 + 0,625 \cdot (d/g) \leq 1,0$:	0,87	0,81	0,87

4.1.3 Determinação da dimensão dos furos

Para ambos os modelos de parafusos, a dimensão dos furos atendeu às recomendações normativas da NBR 14762 (ABNT, 2010) e NBR 8800 (ABNT, 2008), descritas nas Tabelas 4 e 5 e demonstrado na Tabela 11.

Tabela 11 Dimensões dos furos - NBR 14762 e NBR 8800

Parafuso	Diâmetro do furo padrão - mm
Alternativo (10x15 mm)	11,50x16,50
Tradicional (10 mm)	11,50

4.1.4 Verificação dos espaçamentos máximos e mínimos entre os parafusos

Atendeu-se de forma parcial as recomendações normativas para os espaçamentos mínimos, conforme Figura 14, e máximos. Nas Tabelas 14, 15, 16 e 17, em conjunto com a Figura 23, se apresentam as distâncias adotadas para ambos os modelos de parafusos.

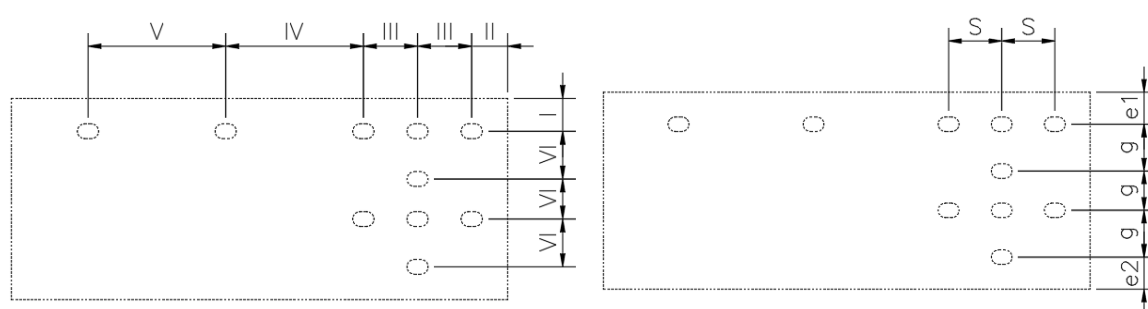


Figura 23 Espaçamentos das ligações parafusadas e linhas de ruptura para Ct.

Denomina-se costura tripla, ênfase desta tese, quando houver três parafusos na ligação, posicionados perpendicularmente à solicitação da força de tração. A costura tripla para o parafuso alternativo atendeu todas as recomendações de espaçamentos mínimos e máximos recomendados pela NBR 14762 (ABNT, 2010), conforme representa a Tabela 12:

Tabela 12 Espaços entre furos e furo e borda – Parafuso alternativo e tradicional

Tipo da costura	i (e1=e2)	ii	iii	iv	v	vi (g)	(e1+e2)
Costura 10	27,00	27,92	42,08	95,88	119,10	54,00	54,00
Costura 13	27,00	27,92	42,08	95,88	119,10	108,00	54,00
Costura 17/19	27,00	27,92	42,08	95,88	119,10	54,00	54,00

Os espaçamentos do parafuso tradicional também atenderam a todas as recomendações normativas, conforme Tabela 12, o que se deve ao fato de utilizar o diâmetro 10 mm em vez de 15 mm.

O detalhamento das propostas de cada ligação parafusada é apresentado na Figura 24:

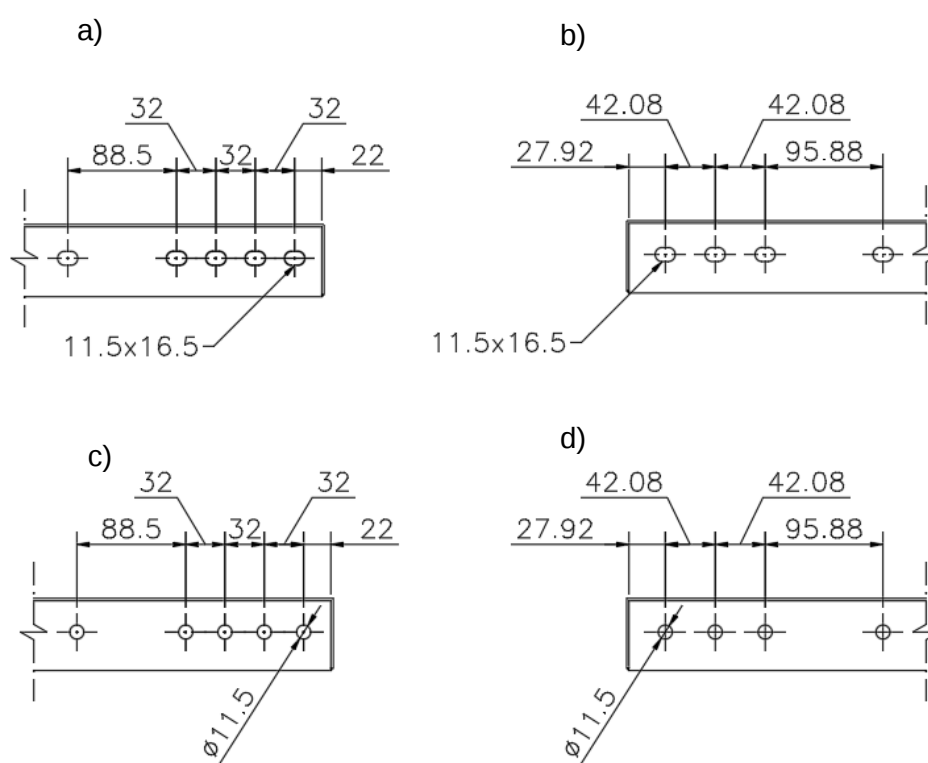


Figura 24 Espaços nas ligações parafusadas. a) Costura quádrupla do parafuso alternativo; b) Costura tripla do parafuso alternativo; c) Costura quádrupla do parafuso tradicional; d) Costura tripla do parafuso tradicional.

Para a distância entre centros de furos (iii), o mínimo recomendado é de 45,00 mm, adotando-se 32,00 mm para costura quádrupla e 42,08 mm para a costura tripla. Caso o enfoque fosse para a costura quádrupla, por questões fabris e para manter o mesmo diâmetro útil do silo, a distância entre furo e borda seria 22,00 mm (ii) (Figura 24a), estando em desacordo com a distância mínima preconizada na NBR 14762 (ABNT, 2010), de 23,25 mm.

4.1.5 Verificação do rasgamento, esmagamento e força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso

Os parâmetros para as verificações da força resistente ao rasgamento entre furos (Figura 15) e da força resistente de cálculo ao esmagamento (Figura 16) atenderam a todas as recomendações expostas nas Equações 10 e 11.

A resistência ao cisalhamento de cálculo dos parafusos fora calculada utilizando a Equação 14, quando o plano de corte não acontece na rosca.

Os valores teóricos e experimentais de carga de cisalhamento direto dos modelos de parafusos foram extraídos de Ficanha (2016).

4.2 Definição da resistência de cálculo das chapas otimizadas utilizando o parafuso alternativo

A partir da definição do posicionamento do parafuso alternativo, da compatibilidade fabril para determinar as distâncias entre furos e bordas e do tipo de costura (tripla ou quádrupla), verificou-se teoricamente qual o modelo de ruptura ocorreria dentre as verificações dadas para o dimensionamento da resistência à tração das chapas metálicas de tamanho real (altura 1000 mm) e a resistência ao cisalhamento dos parafusos.

Para as simulações teóricas utilizaram-se as espessuras das chapas finas de aço e propriedades mecânicas descritas na Tabela 8. Para o parafuso alternativo e o tradicional, os dados teóricos concluídos por Ficanha (2016) e citados na Tabela 17 desta tese.

Ao analisar teoricamente o modelo do parafuso tradicional, por questões de padronização e comparação, mantiveram-se as configurações do modelo utilizado com o parafuso alternativo.

Para simplificar os termos dos modelos de rupturas, utilizaram-se as denominações R1, R2, R3 e R4, conforme:

- a) R1: ruptura da seção líquida na região da ligação (kN);
- b) R2: escoamento da seção bruta (kN);
- c) R3: rasgamento ou esmagamento da chapa (kN);
- d) R4: ruptura ao cisalhamento dos parafusos (kN).

A Tabela 13 apresenta a resistência do conjunto do parafuso alternativo com costura simples (CS) e costura dupla (CD), respectivamente, com 10, 13 e 17 parafusos na costura vertical. Estes dois modelos de ligação foram descartados devido às resistências apresentarem valores inferiores aos das costuras tripla e quádrupla. Nota-se que a resistência para as costuras simples, nas espessuras mais finas (0,80 a 3,90 mm) tendeu a romper pelo

R3, esmagamento da chapa. Para os modelos com costura dupla, houve variação nos modelos de ruptura.

Tabela 13 Resistência do conjunto – Parafuso alternativo costura simples e dupla

RESISTÊNCIAS Ri: CHAPAS, PARAFUSOS E LIGAÇÃO - COSTURA SIMPLES (CS) E DUPLA (CD)								
Espessura - mm:	R1 - kN:	R2 - kN:	R3 - kN:	R4 - kN:	R1 - kN:	R2 - kN:	R3 - kN:	R4 - kN:
	CS - 10				CD - 10			
0,80	146,40	363,64	114,73	723,41	178,60	363,64	134,98	1104,15
0,95	159,21	431,82	138,47	723,41	194,23	431,82	162,91	1104,15
1,25	228,75	568,18	188,07	723,41	279,07	568,18	221,26	1104,15
1,55	283,64	704,55	240,49	723,41	346,05	704,55	282,93	1104,15
1,70	311,09	772,73	267,76	723,41	379,54	772,73	315,01	1104,15
1,95	347,69	886,36	314,76	723,41	424,19	886,36	370,31	1104,15
2,30	420,89	1045,45	383,86	723,41	513,49	1045,45	451,60	1104,15
2,50	457,49	1136,36	425,07	723,41	558,14	1136,36	500,08	1104,15
2,70	494,09	1227,27	459,58	723,41	602,79	1227,27	540,69	1104,15
3,00	539,84	1363,64	510,65	723,41	658,61	1363,64	600,76	1104,15
3,35	613,04	1522,73	570,22	723,41	747,91	1522,73	670,85	1104,15
3,90	713,69	1772,73	663,84	723,41	870,70	1772,73	780,99	1104,15
4,60	841,79	2090,91	782,99	723,41	1026,98	2090,91	921,17	1104,15
5,00	914,98	2272,73	851,08	723,41	1116,28	2272,73	1001,27	1104,15
5,40	988,18	2454,55	919,16	723,41	1205,58	2454,55	1081,37	1104,15
6,00	1097,98	2727,27	1021,29	723,41	1339,54	2727,27	1201,52	1104,15
6,70	1226,08	3045,45	1140,45	723,41	1495,82	3045,45	1341,70	1104,15
CS - 13				CD - 13				
0,80	70,88	363,64	87,74	647,26	137,52	363,64	175,47	1142,22
0,95	77,09	431,82	105,89	647,26	149,55	431,82	211,78	1142,22
1,25	110,76	568,18	143,82	647,26	214,87	568,18	287,64	1142,22
1,55	137,34	704,55	183,90	647,26	266,44	704,55	367,81	1142,22
1,70	150,63	772,73	204,75	647,26	292,22	772,73	409,51	1142,22
1,95	168,35	886,36	240,70	647,26	326,60	886,36	481,40	1142,22
2,30	203,79	1045,45	293,54	647,26	395,36	1045,45	587,08	1142,22
2,50	221,51	1136,36	325,05	647,26	429,74	1136,36	650,10	1142,22
2,70	239,23	1227,27	351,45	647,26	464,12	1227,27	702,89	1142,22
3,00	269,92	1363,64	390,49	647,26	507,09	1363,64	780,99	1142,22
3,35	296,83	1522,73	436,05	647,26	575,85	1522,73	872,11	1142,22
3,90	345,56	1772,73	507,64	647,26	670,39	1772,73	1015,29	1142,22
4,60	407,59	2090,91	598,76	647,26	790,72	2090,91	1197,52	1142,22
5,00	443,03	2272,73	650,82	647,26	859,47	2272,73	1301,65	1142,22
5,40	478,47	2454,55	702,89	647,26	928,23	2454,55	1405,78	1142,22
6,00	531,63	2727,27	780,99	647,26	1031,37	2727,27	1561,98	1142,22
6,70	593,66	3045,45	872,11	647,26	1151,69	3045,45	1744,21	1142,22
CS - 17				CD - 17				
0,80	146,40	363,64	114,73	723,41	178,60	363,64	229,46	1294,52
0,95	159,21	431,82	138,47	723,41	194,23	431,82	276,95	1294,52

RESISTÊNCIAS Ri: CHAPAS, PARAFUSOS E LIGAÇÃO - COSTURA SIMPLES (CS) E DUPLA (CD)								
Espessura - mm:	R1 - kN:	R2 - kN:	R3 - kN:	R4 - kN:	R1 - kN:	R2 - kN:	R3 - kN:	R4 - kN:
	CS - 17				CD - 17			
1,25	159,21	568,18	188,07	723,41	279,07	568,18	376,15	1294,52
1,55	228,75	704,55	240,49	723,41	346,05	704,55	480,98	1294,52
1,70	283,64	772,73	267,76	723,41	379,54	772,73	535,51	1294,52
1,95	347,69	886,36	314,76	723,41	424,19	886,36	629,53	1294,52
2,30	420,89	1045,45	383,86	723,41	513,49	1045,45	767,72	1294,52
2,50	457,49	1136,36	425,07	723,41	558,14	1136,36	850,14	1294,52
2,70	494,09	1227,27	459,58	723,41	602,79	1227,27	935,06	1294,52
3,00	539,84	1363,64	510,65	723,41	658,61	1363,64	1067,13	1294,52
3,35	613,04	1522,73	570,22	723,41	747,91	1522,73	1228,34	1294,52
3,90	713,69	1772,73	663,84	723,41	870,70	1772,73	1497,17	1294,52
4,60	841,79	2090,91	782,99	723,41	1026,98	2090,91	1866,71	1294,52
5,00	914,98	2272,73	851,08	723,41	1116,28	2272,73	2091,66	1294,52
5,40	988,18	2454,55	919,16	723,41	1205,58	2454,55	2326,62	1294,52
6,00	1097,98	2727,27	1021,29	723,41	1339,54	2727,27	2697,85	1294,52
6,70	1226,08	3045,45	1140,45	723,41	1495,82	3045,45	3159,45	1294,52

A Tabela 14 apresenta a resistência do conjunto do parafuso alternativo com costura tripla (CT) e costura quádrupla (CQ), respectivamente, com 10, 13 e 17 parafusos na linha vertical.

Os valores grifados na Tabela 14 referem-se ao modelo de ruptura e resistência característica do conjunto. Nota-se para a costura tripla, entre as espessuras 0,80 a 6,00 mm a ocorrência da ruptura na seção líquida (R1), por isso a devida importância de tentar elevar o coeficiente C_t para mais próximo de 1,00. Para a espessura 6,70 mm a ruptura ocorrerá primeiramente no cisalhamento dos parafusos (R4). Para a costura quádrupla, todas as faixas de espessuras apresentaram ruptura em R1. No entanto, a NBR 14762 (ABNT, 2010) refere-se a espessuras de até 4,75 mm, devido à demanda de silos de maior capacidade de armazenagem e conseqüentemente maiores espessuras. Para esta tese, considerou-se até 6,70 mm devido às condições de conformação a frio da chapa metálica, previstos pelos coeficientes de ponderações das ações desta normativa.

Tabela 14 Resistência do conjunto – Parafuso alternativo costura tripla e quádrupla

RESISTÊNCIAS Ri: CHAPAS, PARAFUSOS E LIGAÇÃO - COSTURA TRIPLA (CT) E QUÁDRUPLA (CQ)								
Espessura - mm:	R1 - kN:	R2 - kN:	R3 - kN:	R4 - kN:	R1 - kN:	R2 - kN:	R3 - kN:	R4 - kN:
	CT - 10				CQ - 10			
0,80	189,85	363,64	384,69	1484,89	194,71	363,64	269,95	1865,63
0,95	206,46	431,82	464,29	1484,89	211,75	431,82	325,82	1865,63
1,25	296,64	568,18	630,60	1484,89	304,23	568,18	442,52	1865,63
1,55	367,83	704,55	806,35	1484,89	377,25	704,55	565,86	1865,63
1,70	403,43	772,73	897,77	1484,89	413,76	772,73	630,01	1865,63
1,95	450,89	886,36	1055,38	1484,89	462,43	886,36	740,62	1865,63
2,30	545,81	1045,45	1287,07	1484,89	559,79	1045,45	903,20	1865,63
2,50	593,28	1136,36	1425,23	1484,89	608,46	1136,36	1000,16	1865,63
2,70	640,74	1227,27	1540,95	1484,89	657,14	1227,27	1081,37	1865,63
3,00	700,07	1363,64	1712,17	1484,89	717,99	1363,64	1201,52	1865,63
3,35	794,99	1522,73	1911,92	1484,89	815,34	1522,73	1341,70	1865,63
3,90	925,51	1772,73	2225,82	1484,89	949,20	1772,73	1561,98	1865,63
4,60	1091,63	2090,91	2625,33	1484,89	1119,57	2090,91	1842,33	1865,63
5,00	1186,55	2272,73	2853,62	1484,89	1216,93	2272,73	2002,54	1865,63
5,40	1281,48	2454,55	3081,91	1484,89	1314,28	2454,55	2162,74	1865,63
6,00	1423,86	2727,27	3424,34	1484,89	1460,31	2727,27	2403,05	1865,63
6,70	1589,98	3045,45	3823,85	1484,89	1630,68	3045,45	2683,4	1865,63
CT - 13					CQ - 13			
0,80	160,31	363,64	263,21	1637,19	170,83	363,64	350,94	2132,15
0,95	174,34	431,82	317,67	1637,19	185,78	431,82	423,57	2132,15
1,25	250,49	568,18	431,46	1637,19	266,92	568,18	575,28	2132,15
1,55	310,60	704,55	551,71	1637,19	330,99	704,55	735,62	2132,15
1,70	340,66	772,73	614,26	1637,19	363,02	772,73	819,02	2132,15
1,95	380,74	886,36	722,1	1637,19	405,72	886,36	962,8	2132,15
2,30	460,9	1045,45	880,62	1637,19	491,14	1045,45	1174,16	2132,15
2,50	500,98	1136,36	975,16	1637,19	533,85	1136,36	1300,21	2132,15
2,70	541,05	1227,27	1054,34	1637,19	576,56	1227,27	1405,78	2132,15
3,00	591,15	1363,64	1171,48	1637,19	629,94	1363,64	1561,98	2132,15
3,35	671,31	1522,73	1308,16	1637,19	715,36	1522,73	1744,21	2132,15
3,90	781,52	1772,73	1522,93	1637,19	832,80	1772,73	2030,57	2132,15
4,60	921,80	2090,91	1796,28	1637,19	982,28	2090,91	2395,04	2132,15
5,00	1001,95	2272,73	1952,47	1637,19	1067,7	2272,73	2603,30	2132,15
5,40	1082,11	2454,55	2108,67	1637,19	1153,11	2454,55	2811,56	2132,15
6,00	1202,34	2727,27	2342,97	1637,19	1281,24	2727,27	3123,96	2132,15
6,70	1342,61	3045,45	2616,32	1637,19	1430,71	3045,45	3488,42	2132,15
CT - 17					CQ - 17			
0,80	189,85	363,64	344,19	2017,93	194,71	363,64	458,92	2665,19
0,95	206,46	431,82	415,42	2017,93	211,75	431,82	553,89	2665,19
1,25	296,64	568,18	564,22	2017,93	304,23	568,18	752,29	2665,19
1,55	367,83	704,55	721,47	2017,93	377,25	704,55	961,96	2665,19
1,70	403,43	772,73	803,27	2017,93	413,76	772,73	1071,02	2665,19
1,95	450,89	886,36	944,29	2017,93	462,43	886,36	1259,05	2665,19

RESISTÊNCIAS Ri: CHAPAS, PARAFUSOS E LIGAÇÃO - COSTURA TRIPLA (CT) E QUÁDRUPLA (CQ)								
Espessura - mm:	R1 - kN:	R2 - kN:	R3 - kN:	R4 - kN:	R1 - kN:	R2 - kN:	R3 - kN:	R4 - kN:
	CT - 17				CQ - 17			
2,30	545,81	1045,45	1151,58	2017,93	559,79	1045,45	1535,45	2665,19
2,50	593,28	1136,36	1275,21	2017,93	608,46	1136,36	1700,27	2665,19
2,70	640,74	1227,27	1378,75	2017,93	657,14	1227,27	1838,33	2665,19
3,00	700,07	1363,64	1531,94	2017,93	717,99	1363,64	2042,59	2665,19
3,35	794,99	1522,73	1710,67	2017,93	815,34	1522,73	2280,89	2665,19
3,90	925,51	1772,73	1991,52	2017,93	949,20	1772,73	2655,37	2665,19
4,60	1091,63	2090,91	2348,98	2017,93	1119,57	2090,91	3131,97	2665,19
5,00	1186,55	2272,73	2553,24	2017,93	1216,93	2272,73	3404,31	2665,19
5,40	1281,48	2454,55	2757,49	2017,93	1314,28	2454,55	3676,66	2665,19
6,00	1423,86	2727,27	3063,88	2017,93	1460,31	2727,27	4085,18	2665,19
6,70	1589,98	3045,45	3421,34	2017,93	1630,68	3045,45	4561,78	2665,19

A partir da análise teórica, apresentada na Tabela 14, definem-se o tipo de costura e as quantidades de parafusos para a utilização do parafuso alternativo:

Espessuras 0,80 a 6,00 mm: costura tripla com 10 parafusos - CT10;

Espessura 6,70 mm: costura tripla ou quádrupla com 10 parafusos, modelos definidos conforme a solicitação das pressões do silo – CT/CQ10.

Estes dois modelos de ligação (CT e CQ) foram escolhidos para dar sequência à tese devido às resistências apresentarem valores superiores aos das costuras simples e dupla.

4.3 Definição da resistência final de cálculo das chapas utilizando o parafuso tradicional

Na sequência, a Tabela 15 contém as resistências do conjunto para o parafuso tradicional a partir das escolhas definidas no parafuso alternativo. Ou seja, o estudo para o parafuso tradicional não contempla a melhor otimização do conjunto, uma vez que segue as mesmas definições que as adotadas no parafuso alternativo a fim de possibilitar as comparações teóricas.

As células destacadas revelam a resistência de ruptura do conjunto para cada espessura e costura, e a otimização adotada quando utilizado no modelo do parafuso alternativo.

Tabela 15 Resistência do conjunto – Parafuso tradicional costura tripla e quádrupla

RESISTÊNCIAS Ri: CHAPAS, PARAFUSOS E LIGAÇÃO - COSTURA TRIPLA (CT) E QUÁDRUPLA (CQ)								
Epessura - mm:	R1 - kN:	R2 - kN:	R3 - kN:	R4 - kN:	R1 - kN:	R2 - kN:	R3 - kN:	R4 - kN:
CT - 10					CQ - 10			
0,80	173,65	363,64	256,46	907,11	182,51	363,64	179,97	1139,70
0,95	188,84	431,82	309,53	907,11	198,48	431,82	217,21	1139,70
1,25	271,32	568,18	420,40	907,11	285,17	568,18	295,02	1139,70
1,55	336,44	704,55	537,57	907,11	353,61	704,55	377,24	1139,70
1,70	369,00	772,73	598,51	907,11	387,83	772,73	420,01	1139,70
1,95	412,41	886,36	703,59	907,11	433,46	886,36	493,75	1139,70
2,30	499,23	1045,45	858,04	907,11	524,71	1045,45	602,14	1139,70
2,50	542,65	1136,36	950,15	907,11	570,34	1136,36	666,77	1139,70
2,70	586,06	1227,27	1045,06	907,11	615,97	1227,27	733,38	1139,70
3,00	640,32	1363,64	1192,68	907,11	673,00	1363,64	836,97	1139,70
3,35	727,15	1522,73	1372,85	907,11	764,26	1522,73	963,40	1139,70
3,90	846,53	1772,73	1673,31	907,11	889,73	1772,73	1174,25	1139,70
4,60	998,47	2090,91	2086,33	907,11	1049,43	2090,91	1464,09	1139,70
5,00	1085,29	2272,73	2337,74	907,11	1140,68	2272,73	1640,52	1139,70
5,40	1172,12	2454,55	2600,34	907,11	1231,93	2454,55	1824,80	1139,70
6,00	1302,35	2727,27	3015,25	907,11	1368,82	2727,27	2115,96	1139,70
6,70	1454,29	3045,45	3531,15	907,11	1528,51	3045,45	2478,00	1139,70

4.4 Visualização gráfica da resistência da chapa otimizada utilizando o parafuso alternativo x parafuso tradicional

Após a tabulação dos dados, elaboraram-se gráficos para expor as resistências comparativas do parafuso alternativo com o parafuso tradicional para costura tripla (Figura 25) e para costura quádrupla (Figura 26).

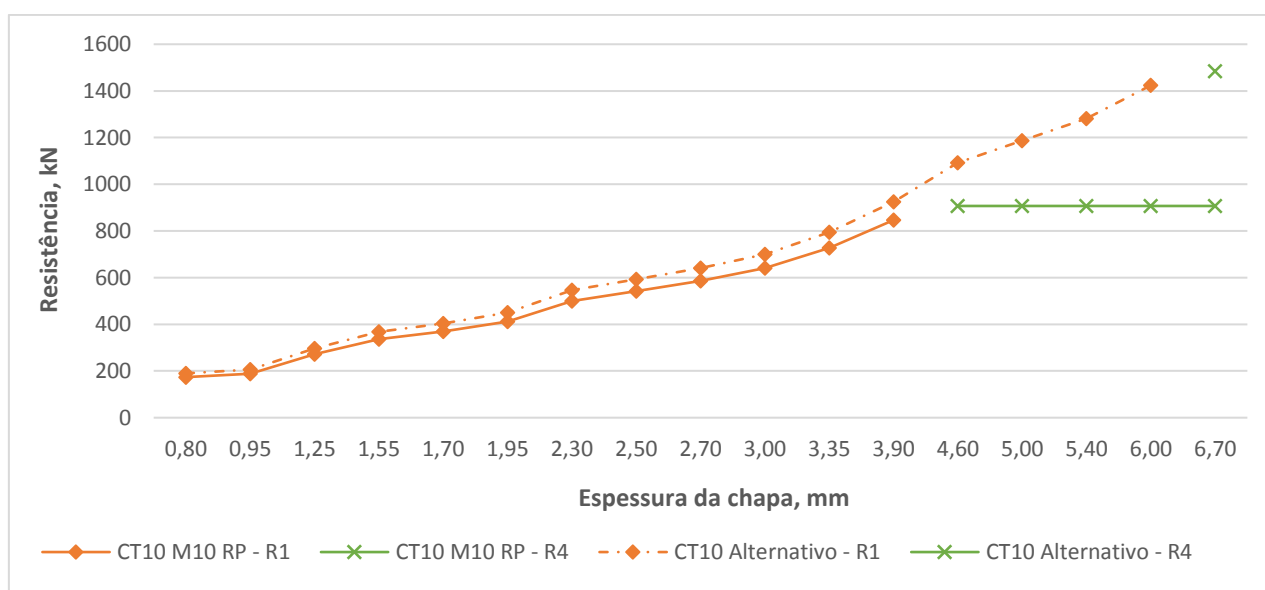


Figura 25 Resistência dos conjuntos para parafuso alternativo x parafuso tradicional com costura tripla – CT.

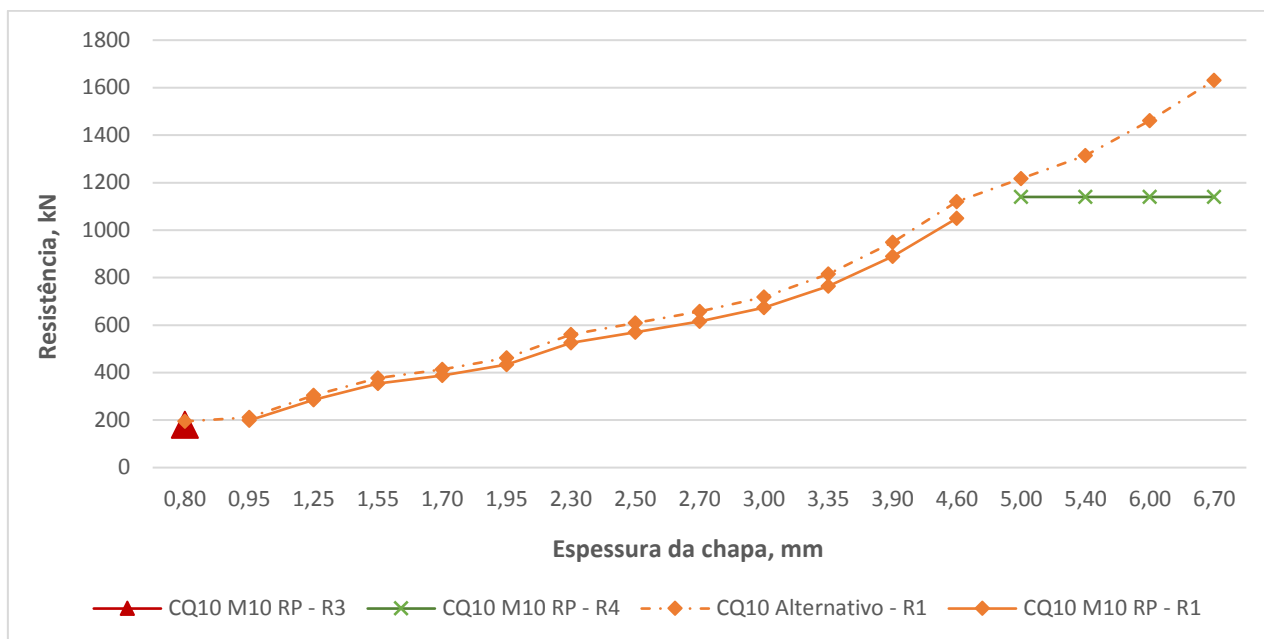


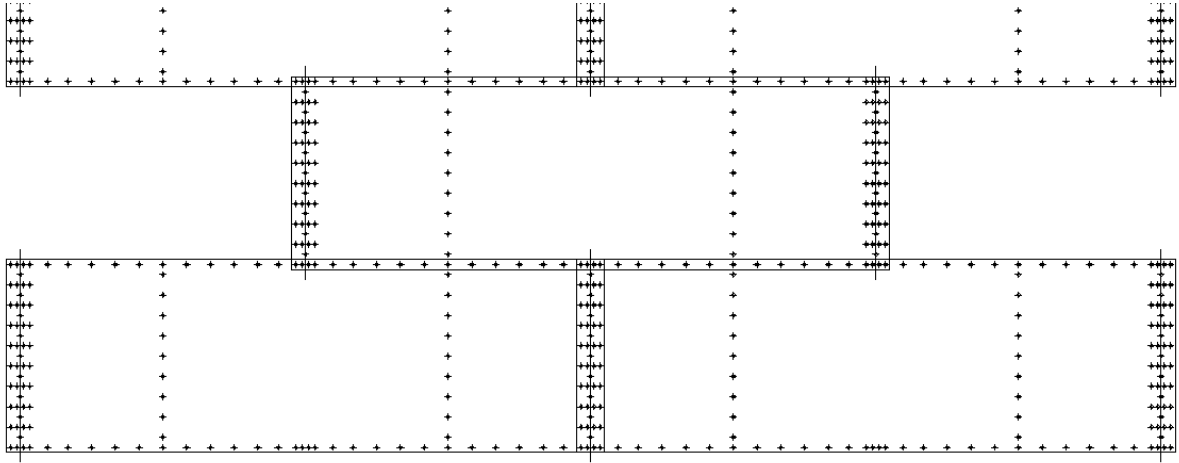
Figura 26 Resistência dos conjuntos para parafuso alternativo x parafuso tradicional com costura quádrupla – CQ.

Nota-se que para a costura tripla (Figura 25) o parafuso alternativo apresentou em todas as espessuras analisadas a resistência superior quando comparado ao parafuso tradicional.

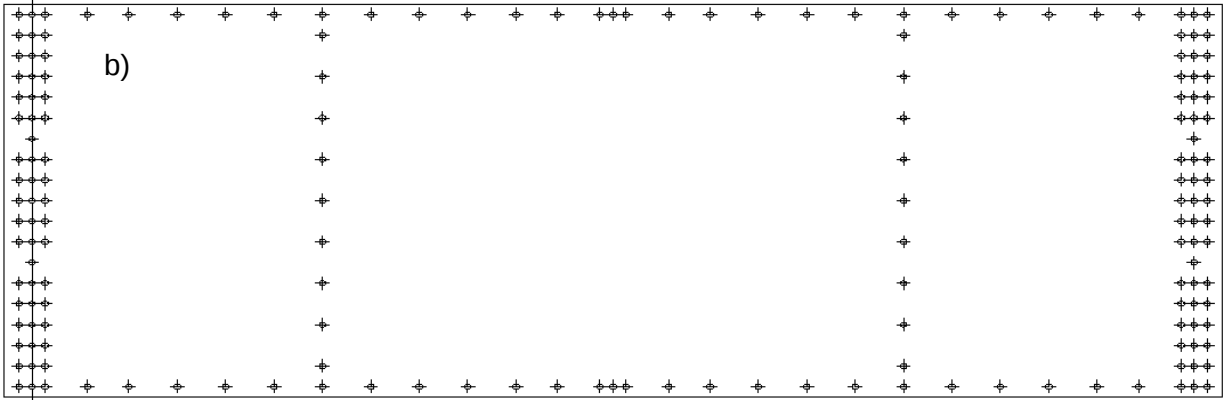
No parafuso alternativo, em comparação aos dois tipos de costura, a costura tripla apresentou resultados mais significativos, inclusive a redução do número de parafusos na ligação, tornando-a economicamente mais viável que a costura quádrupla do mesmo modelo de parafuso.

Até a otimização da costura da chapa lateral foram verificados diversos modelos, conforme a Figura 27, classificando os de maior resistência, possibilidade fabril e compatibilidade de montagem (Figura 27a). Contudo, apenas as dimensões dos furos irão diferir-se das chapas que utilizarão o parafuso tradicional, permanecendo ambas com a mesma quantidade de parafusos e espaçamentos. Os resultados apresentados graficamente referem-se aos modelos da Figura 27c e da Figura 27d.

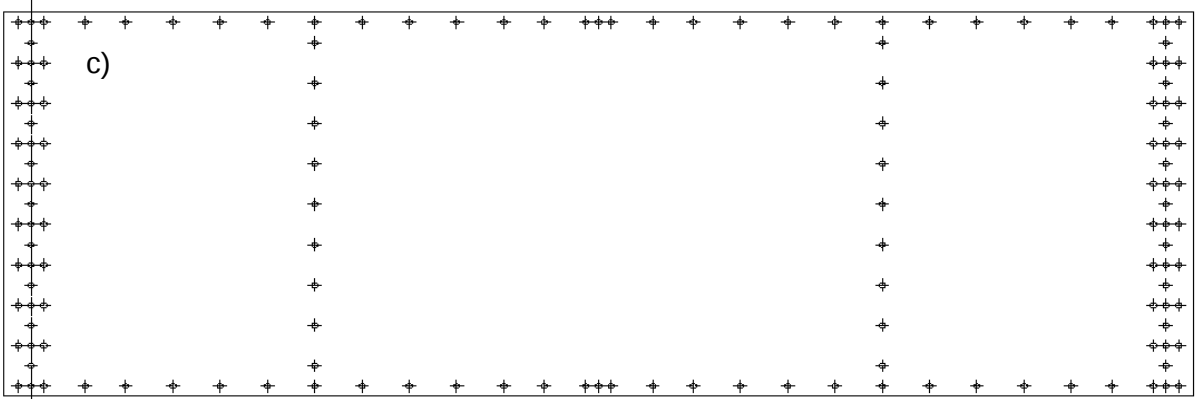
a)



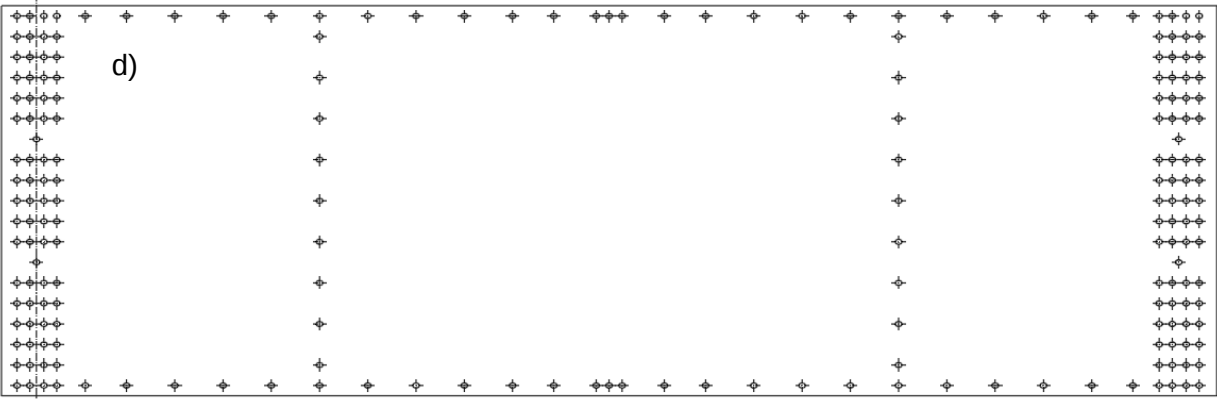
b)



c)



d)



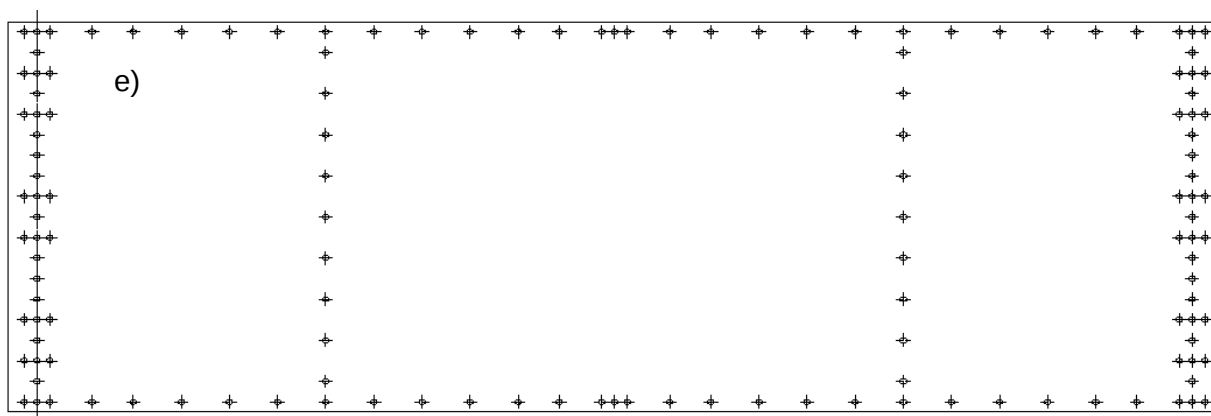


Figura 27 Modelos de ligações parafusadas. a) Verificação para compatibilidade de montagem; b) Costura tripla com 53 parafusos; c) Costura tripla com 39 parafusos; d) Costura quádrupla com 70 parafusos; e) Costura tripla com 35 parafusos.

4.5 Estudo experimental a partir do modelo otimizado da resistência à tração das ligações parafusadas - NBR 14762 (ABNT, 2010)

A partir da definição dos modelos otimizados de chapa metálica utilizando o parafuso alternativo, se elaboraram os modelos para as análises experimentais, consistindo no ensaio das ligações parafusadas em chapas finas de aço e conformadas a frio, submetidos ao ensaio de cisalhamento simples, através da aplicação de esforço normal de tração no conjunto (Figura 28).

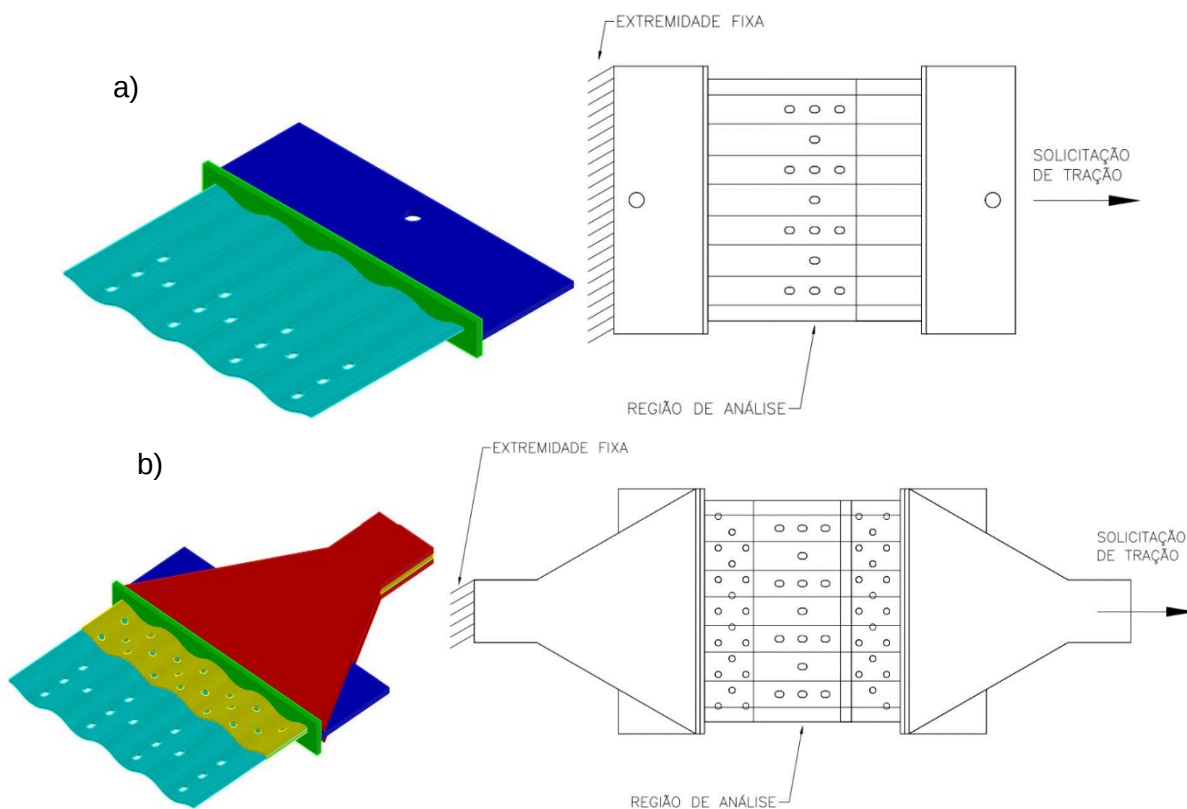


Figura 28 Esquema estático do ensaio. a) Amostras 0,92 mm; b) Amostras 1,95 e 3,00 mm.

4.6 Caracterização das propriedades mecânicas das chapas finas de aço

Para a fabricação dos corpos de prova dos conjuntos parafusados a fim de obter a aproximação real dos resultados teóricos e experimentais, realizaram-se ensaios de tração para as 3 espessuras utilizadas nesta tese.

A fim de determinar as propriedades mecânicas do material, utilizaram-se os procedimentos descritos na NBR 6892 – Materiais e Métodos – Ensaio de tração, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente (ABNT, 2013), para os ensaios mecânicos à tração à temperatura ambiente.

Para as chapas finas de aço se retiraram uma amostra de cada chapa, nas espessuras 0,92, 1,95 e 3,00mm. De classe estrutural G500, regidos pela AS 1397 (AS, 2011). Moldaram-se 3 corpos de prova, para cada espessura, conforme as recomendações da NBR 6892 (ABNT, 2013), e as características conforme a Figura 29.



Figura 29 Corpo de prova para ensaio à tração.

Fonte: NBR 6892 (ABNT, 2013).

Os ensaios foram realizados com o auxílio de uma prensa hidráulica com capacidade de 25 toneladas, calibrada pelo INMETRO. Disponível no Laboratório Spectroscan Tecnologia de Materiais Ltda. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente, entre 10 e 35 °C. Nas amostras ensaiadas, Figura 30, visualizam-se os parâmetros para extração dos corpos de prova e respectivas espessuras reais.

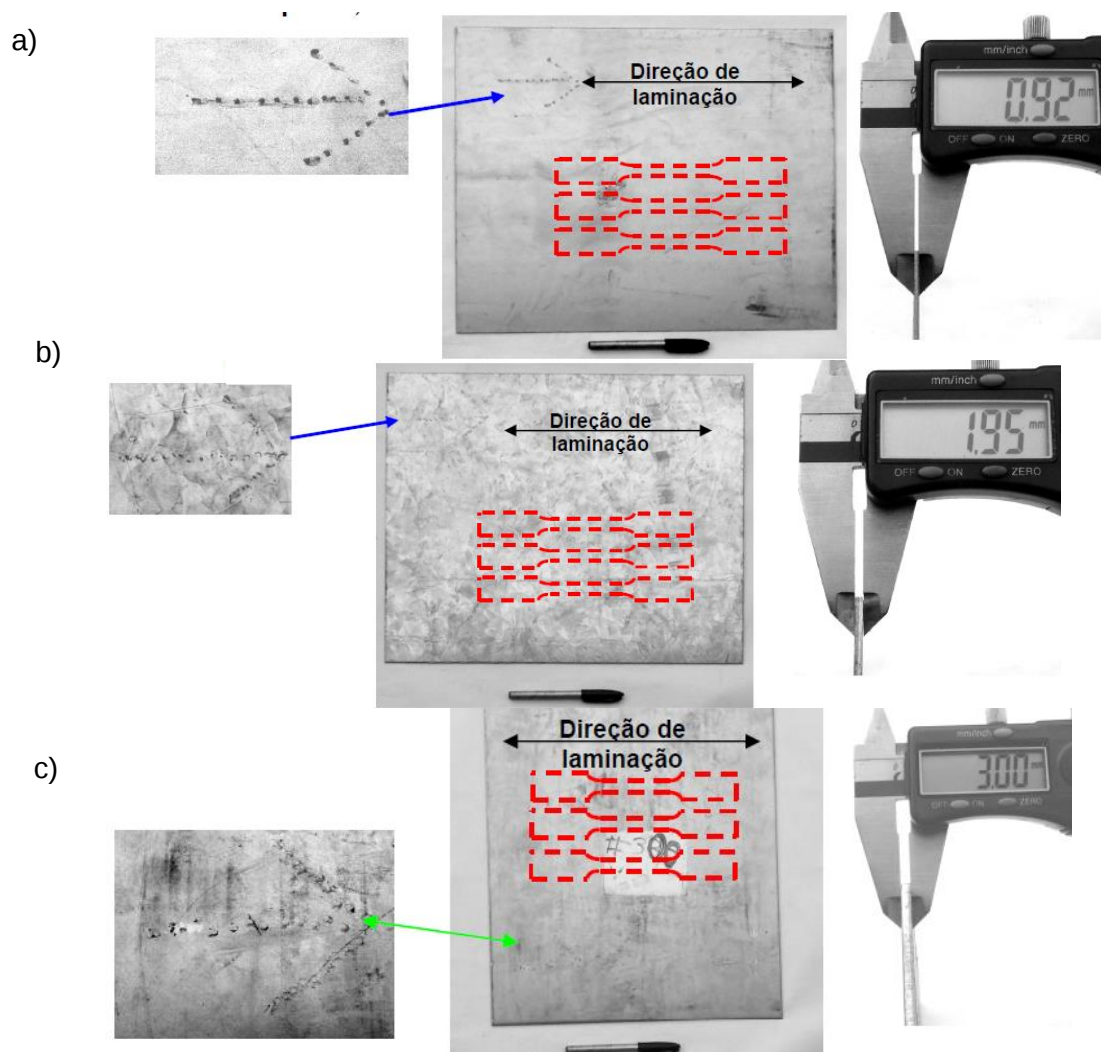


Figura 30 Parâmetros dos corpos de prova de aço G500 (AS 1397, 2011). a) Amostra 0,92 mm; b) Amostra 1,95 mm; c) Amostra 3,00 mm.

As chapas finas de aço utilizadas possuem, de usina, revestimento de zinco 350 g/m^2 , que corresponde a uma espessura de $0,049 \text{ mm}$ considerando ambas as faces, e cujo valor não é descontado na espessura nominal da chapa. Para efeitos de cálculo, a espessura de zinco foi descontada da espessura nominal ($0,92$, $1,95$ e $3,00 \text{ mm}$).

Obtiveram-se uma tensão média de ruptura de $679,40 \text{ MPa}$ para $0,87 \text{ mm}$, $716,60 \text{ MPa}$ para $1,90 \text{ mm}$ e $663,76 \text{ MPa}$ para espessura $2,95 \text{ mm}$ (Tabela 16). Aproximadamente 32% superior ao indicado na Tabela 3, conforme a norma AS 1397 (AS, 2011).

Tabela 16 Resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração das amostras

Espessura (mm)	Amostra	Resistência à tração (MPa)	Média (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Média (MPa)	Relação F_u/F_y (%)
0,87	1	678,50	679,40	605,40	16,00	605,07	1,12
	2	680,30		603,50	16,60		
	3	679,40		606,30	16,20		
1,90	1	717,10	716,60	687,20	16,10	687,10	1,04
	2	716,60		685,90	15,60		
	3	716,10		688,20	15,20		
2,95	1	663,06	663,76	568,35	17,80	568,34	1,17
	2	664,11		568,34	18,60		
	3	664,11		568,34	18,20		

Fonte: Laboratório Spectroscan Tecnologia de Materiais Ltda.

4.7 Dados teóricos e experimentais para a definição da resistência ao cisalhamento do parafuso alternativo e tradicional

Para efeitos de comparação do parafuso alternativo e do tradicional, utilizou-se dos resultados da dissertação de Ficanha (2016). Inclusive, para esta tese aproveitou-se o mesmo lote de parafusos alternativos que os utilizados na referida dissertação (Tabela 17).

Tabela 17 Resultados teóricos e experimentais da carga de cisalhamento do parafuso alternativo e tradicional

Modelo	Área (mm ²)	Resistência teórica ao cisalhamento (kN)	Resistência experimental ao cisalhamento (kN)
Alternativo	128,5	38,07	107,13
Tradicional	78,54	23,27	46,86

Fonte: Adaptado de Ficanha (2016).

O adicional de 64% de área no plano de corte do parafuso alternativo resultou em um proveito de 128% na capacidade de resistência ao cisalhamento direto. De acordo com Ficanha (2016), o parafuso alternativo possui viabilidade econômica por manter o peso do parafuso tradicional, tornando-o uma solução promissora nas ligações parafusadas.

4.8 Resultados teóricos dos corpos de prova a partir da caracterização dos materiais

Diante das limitações de abertura da máquina de tração para encaixe do conjunto de chapas metálicas parafusadas, recalcularam-se os resultados teóricos (Tabela 18) com as dimensões fabricadas (Figura 31) e caracterização mecânica das chapas de aço e do parafuso alternativo.

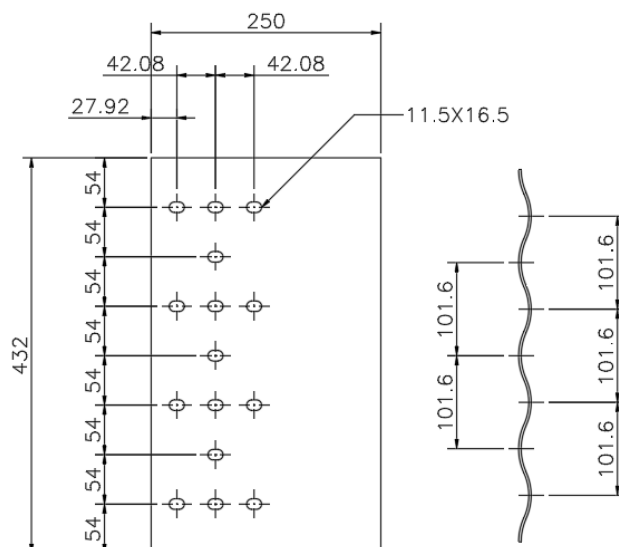


Figura 31 Características geométricas do corpo de prova ensaiado.

Tabela 18 Resistência do conjunto de corpo de provas ensaiados

RESISTÊNCIAS Ri: CHAPAS, PARAFUSOS E LIGAÇÃO - COSTURA TRIPLA - CT						
	i	ii	iii	iv	v	vi (g) (e1+e2)
Dimensões - mm:	54	27,92	42,08	95,88	119,1	54 108
$Ct = 0,67 + 0,83*(d/g) \leq 1,0$:	0,79					

	Espessuras - mm:			Espessuras - mm e $\gamma=1,0$:		
CT - 10	0,87	1,90	2,95	0,87	1,90	2,95
R1 - kN:	95,22	219,34	315,44	157,11	361,90	520,47
R2 - kN:	206,74	512,70	658,45	227,41	563,97	724,29
R3 - kN:	144,94	371,11	565,55	224,65	570,21	820,05
R4 - kN:	1607,12	1607,12	1607,12	2169,61	2169,61	2169,61

Tendo em vista a redução de Ct nos modelos ensaiados, averiguou-se a influência das distâncias entre furo e borda da chapa: quanto menores os valores das distâncias g e e1+e2, maior o valor de Ct e, conseqüentemente, da resistência a ruptura da área líquida na região da ligação, conforme Tabela 19.

Tabela 19 Resistência do conjunto de corpo de provas otimizando Ct

RESISTÊNCIAS Ri: CHAPAS, PARAFUSOS E LIGAÇÃO - COSTURA TRIPLA - CT						
	i	ii	iii	iv	v	vi (g) (e1+e2)
Dimensões - mm:	54	27,92	42,08	95,88	119,1	54 54
$Ct = 0,67 + 0,83*(d/g) \leq 1,0$:	0,90					

	Espessuras - mm:			Espessuras - mm e $\gamma=1,0$:		
CT - 10	0,87	1,90	2,95	0,87	1,90	2,95
R1 - kN:	116,34	267,98	385,40	191,96	442,17	635,90
R2 - kN:	206,74	512,70	658,45	227,41	563,97	724,29
R3 - kN:	144,94	371,11	565,55	224,65	570,21	820,05
R4 - kN:	1607,12	1607,12	1607,12	2169,61	2169,61	2169,61

4.9 Ensaios dos conjuntos das ligações parafusadas no sentido longitudinal

Para a execução dos ensaios utilizou-se o método proposto por Esteves (1989), o qual consiste na confecção de garras especiais para a transmissão uniforme aos parafusos da Tabeconexão, conforme indica a Figura 32, cujo corpo de prova é fixado nas garras, sendo tracionado até a ruptura.

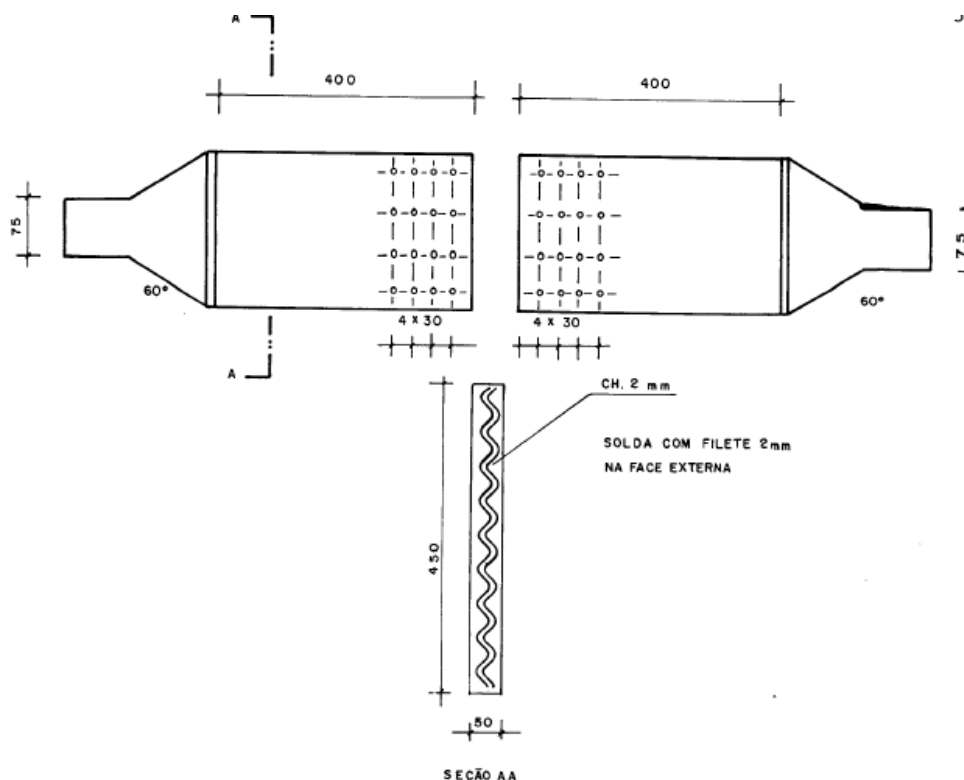


Figura 32 Esquema da garra para ensaio das ligações parafusadas submetidas a esforços longitudinais.

Fonte: Esteves (1989).

Os corpos de prova foram fabricados em triplicata para cada modelo de espessura, totalizando 9 conjuntos, devidamente identificados por espessura (Figura 33). Os modelos A, B e C de espessura 0,92 mm foram ensaiados no Laboratório Spectroscan Tecnologia de Materiais Ltda. (Figura 33a). Os modelos A, B e C de espessura 1,95 e 3,00 mm foram ensaiados no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu (Figura 33b e 33c).

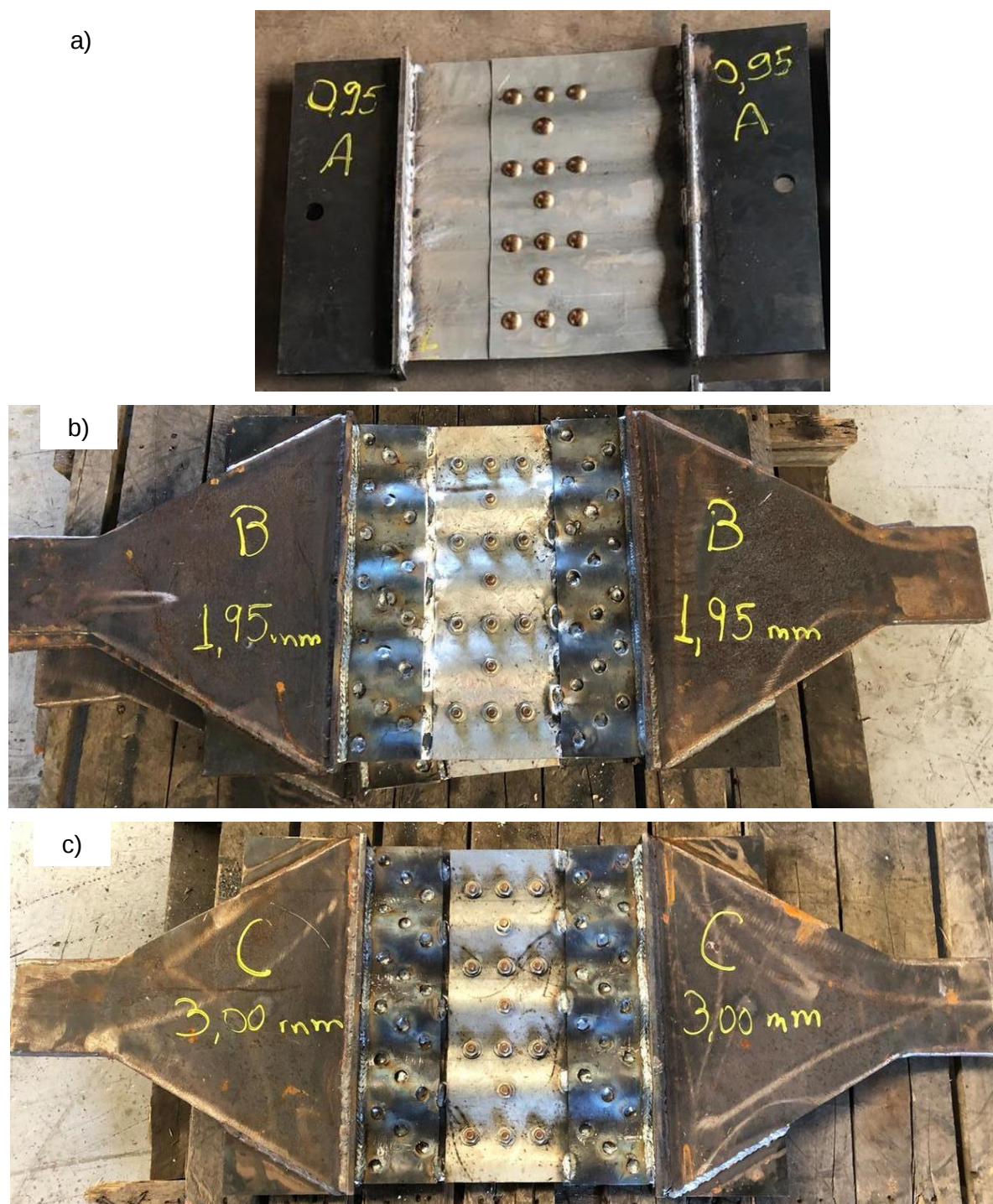


Figura 33 Modelos de corpos de prova montados. a) Corpo de prova 0,92 mm; b) Corpo de prova 1,95 mm; c) Corpo de prova 3,00 mm.

A montagem de cada corpo de prova nas garras do equipamento de ensaios, se deram:

- Uniram-se dois conjuntos de mesma espessura e se transpassaram os parafusos;
- Torquearam-se todos os parafusos (54 N.m) (Figura 34a);
- Os conjuntos montados foram fixados em ambas as extremidades da garra (Figura 34b);

- d) O ensaio consistiu na aplicação lenta da carga em cada conjunto, até o estado limite de ruptura da resistência da ligação.

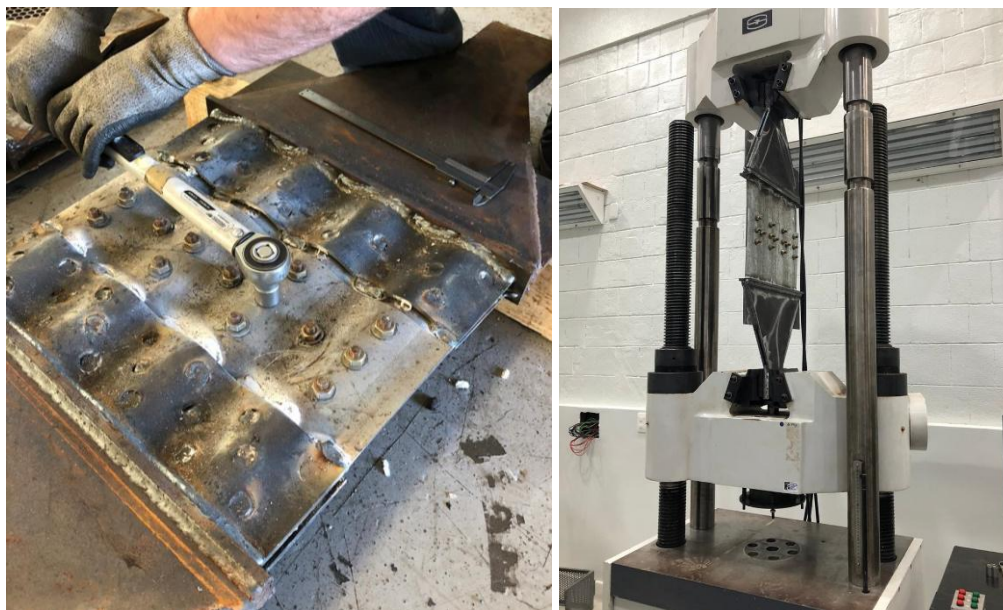


Figura 34 Montagem e ensaio do corpo de prova. a) Aplicação de torque nas ligações parafusadas; b) Posicionamento e fixação nas garras da máquina de tração.

4.10 Análise dos resultados

Esteves (1989) verificou que a resistência das ligações é influenciada pelo tipo de ruptura, sendo estabelecido um procedimento matemático para cada um dos quatro modelos. Basicamente os mesmos modelos descritos pela NBR 14762 (ABNT, 2010), porém, com diferentes coeficientes.

A definição do estado limite último de resistência de cálculo do conjunto refere-se às recomendações da NBR 14762 (ABNT, 2010), comparando-o com os resultados experimentais, a fim de verificar a compatibilidade dos parâmetros propostos teoricamente.

Para verificar a resistência da ligação parafusada utilizando o modelo de parafuso alternativo para cada conjunto de amostras de espessuras, foi elaborada uma análise exploratória a fim de avaliar o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Foram validadas as suposições do modelo e, então, se realizou o teste t de Student. Este teste permitiu que as médias obtidas dos grupos experimentais pudessem ser comparadas. Por ser um material experimental confeccionado do mesmo lote de fabricação, mesmo processo de conformação a frio, e ensaio de cisalhamento, tem-se a homogeneidade das condições experimentais, permitindo uma comparação de médias pelo Teste t de Student.

4.10.1 Erro de modelo ou coeficiente profissional

Tendo em vista tratar-se de um comparativo entre resultados experimentais (F_{exp}), adquiridos em laboratório por meio de ensaios, e resultados teóricos (F_{teo}), obtidos com base em modelos matemáticos segundo recomendações normativas, obteve-se a variável aleatória erro de modelo (M_e) considerando os valores do limite último de resistência de cálculo:

$$M_e = \frac{F_{exp}}{F_{teo}} \quad \text{Eq. (19)}$$

Sendo:

F_{exp} - a força resistente do conjunto obtida experimentalmente;

F_{teo} - a força resistente do conjunto obtida teoricamente.

Esta expressão consistiu na análise dos resultados da resistência do conjunto, obtidos nos ensaios previstos por determinado modelo analítico, para possibilitar a correta avaliação da variável erro de modelo.

Através do cálculo da variável aleatória M_e , construíram-se testes de aderência e ajustes para definir a melhor distribuição de probabilidades para adequação da variável, de modo que toda a informação estatística obtida fosse posteriormente processada (BOLANDIM, 2011).

Calculou-se a média da variável erro de modelo ($M_{e\ mean}$) a fim de indicar o caráter de tendenciosidade do modelo, seja ele conservador ou inseguro. Para resultados unitários, através da $M_{e\ mean}$, foi possível explicar exatamente o fenômeno mecânico estudado, revelando o quão conservador ou inseguro se encontrava o modelo, permitindo que possíveis correções fossem realizadas.

Logo, a correção do modelo matemático, fazendo-se uso do $M_{e\ mean}$ e proporcionando um modelo corrigido, resulta na carga resistente de ruptura correta.

$$F_{correto} = M_{mean} * F_{teo} \quad \text{Eq. (20)}$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

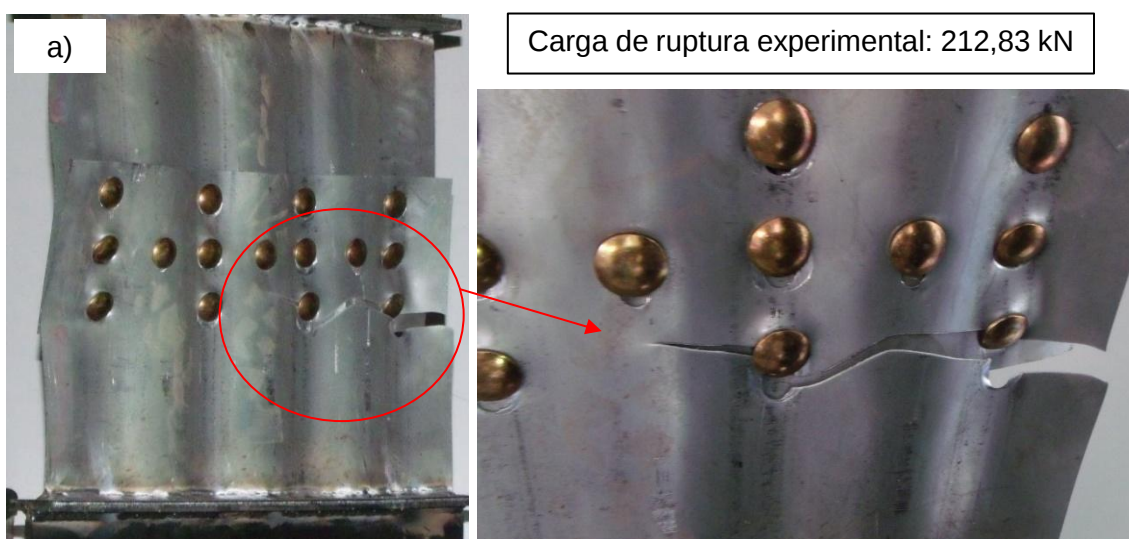
Compararam-se os resultados da análise experimental realizada com os valores teóricos obtidos pela norma brasileira de dimensionamento de perfis formados a frio, NBR 14762 (ABNT, 2010), sendo que o valor médio obtido em ensaio foi adotado como o valor nominal do esforço resistente. Para as configurações de corpos de prova ensaiados foi observada a ocorrência de dois modelos de ruptura distintos, o esmagamento e rasgamento da parede do furo até a borda e a ruptura da chapa na seção líquida.

Admitiu-se que todos os parafusos são solicitados com a mesma magnitude. Segundo Dall Acqua (2018), no estágio inicial de carregamento esta presunção pode não ser precisa, devido à excentricidade de montagem dos corpos de prova. No entanto, ao ocorrer a plastificação do aço, há uma redistribuição de esforços tendendo a uniformizar o carregamento para cada parafuso.

Para os ensaios experimentais, presumiu-se a distribuição constante da tensão normal solicitante na seção transversal da chapa.

5.1 Resultados experimentais e análise estatística para os conjuntos de chapas finas de aço com espessura 0,92 mm

O modelo de ruptura para o conjunto de chapas finas de aço com espessura 0,92 mm apresentaram valores de ruptura semelhantes (Figura 35a, 35b e 35c), no entanto, foram discrepantes no modelo de ruptura, fato evidenciado pelas características geométricas e de ruptura após os ensaios experimentais das 3 amostras (Figura 35).



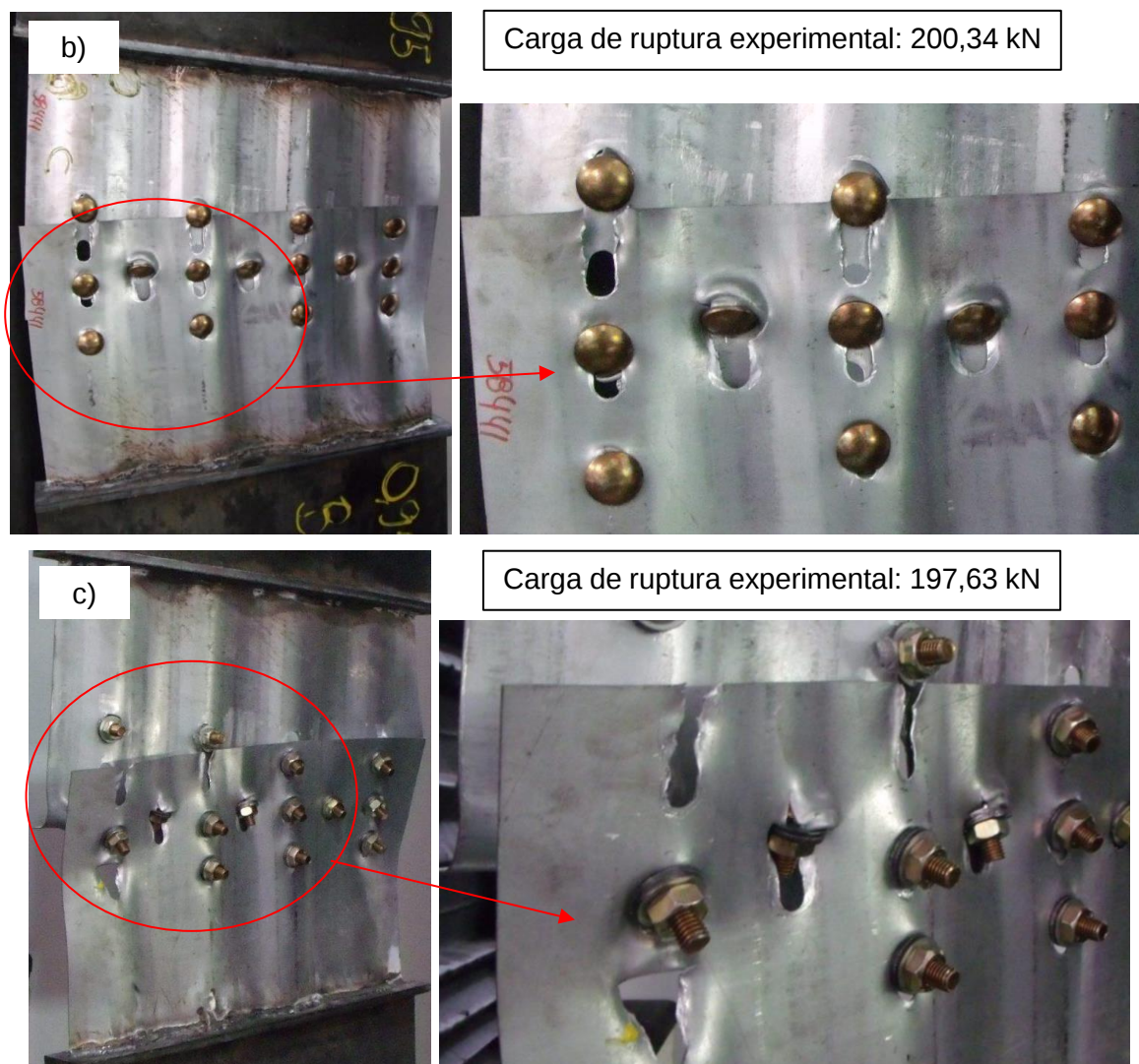


Figura 35 Ensaios dos corpos de prova 0,92 mm. a) Modelo de ruptura na seção líquida da amostra A; b) Modelo de ruptura por esmagamento e rasgamento da amostra B; c) Modelo de ruptura por esmagamento e rasgamento da amostra C.

5.1.1 Análise estatística de amostras de chapas finas de aço com espessura 0,92 mm

A análise exploratória teve como objetivo organizar, conhecer e apresentar algumas características do conjunto de dados observados. A Tabela 20 apresenta o valor médio experimental da resistência de 203,60 kN para as 3 amostras do conjunto de chapas finas de aço com espessura 0,92 mm ensaiadas pelo método da tração normal.

Tabela 20 Análise exploratória da carga de ruptura (kN) do conjunto de chapas finas de aço com espessura 0,92 mm

Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Variância	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação %
197,63	200,34	203,60	212,83	65,75	8,11	3,98

Esta média sobrepõe aproximadamente 214% em relação à resistência de ruptura do conjunto obtido através da NBR 14762 (ABNT, 2010) e descrito na Tabela 18 desta tese.

Contudo, os valores apresentados pelas normativas utilizam os coeficientes parciais de segurança que ponderam essas forças.

Quando os coeficientes parciais de segurança que ponderam essas forças foram tomados como unitários, proporcionando, dessa forma, valores nominais da carga resistente quando a marcha de cálculo presente nessas prescrições normativas é seguida, o modelo de ruptura ainda persistiu na ruptura da seção líquida com carga de ruptura teórica 22,83% inferior à média obtida experimentalmente (Tabela 18).

Segundo Bolandim (2006), estes resultados podem não simular uma informação estatística coerente, pois não foram validados os testes de aderência e ajustes para encontrar uma distribuição de probabilidades que melhor se adapte à variável. Por se tratar de uma comparação entre resultados experimentais, obtidos por ensaios laboratoriais, e resultados teóricos, advindos de modelos matemáticos segundo recomendações normativas, obteve-se a variável erro do modelo excluindo os coeficientes de ponderação das ações.

A variância é uma medida de dispersão estatística e indica o quanto afora em geral seus valores se encontram desviados do valor esperado, conforme a Tabela 20. Quanto maior for a variância, mais distantes da média estarão os valores; contudo, é uma medida de dispersão grandemente influenciada por valores que estão muito distantes da média. Para conservarmos as unidades do desvio e dos dados, calculou-se o desvio padrão no qual não se evidenciou variação ou dispersão existentes em relação à média. O experimento possui alta precisão, com um coeficiente de variação de 3,98%, pois, segundo Gomes (2000), quando inferior a 10% é considerado baixa dispersão. Por se tratar de uma população pequena, a dispersão estatística na análise da variância e do desvio padrão torna-se irrelevante.

5.1.1.1 Suposições do modelo

Consideraram-se para as suposições de normalidade e aleatoriedade do modelo do conjunto de chapas finas de aço com espessura 0,92 mm que há um nível de significância de 5%.

Na análise de independência se faz necessário o cruzamento dos dados, verificando se há independência entre as variáveis linha e coluna. Uma vez que a distribuição da estatística de teste é apenas aproximada, para amostras pequenas o valor do p-valor poderá conter um erro apreciável.

5.1.1.1.1 Análise de normalidade

Utilizaram-se testes de normalidade de Shapiro-Wilk e Anderson-Darling, representados pela Tabela 21. Para os testes utilizaram-se duas hipóteses:

H0: a carga de ruptura do conjunto seguiu a distribuição normal;

H1: a carga de ruptura do conjunto não seguiu a distribuição normal.

Tabela 21 Aplicação dos testes de normalidade para as amostras dos conjuntos de chapas finas de aço com espessura 0,92 mm

Testes de normalidade	Ruptura – P-valor	Nível de significância $\alpha=5\%$	Distribuição Normal
Shapiro-Wilk	0,321	> 0,05	Sim
Anderson-Darling	0,217	> 0,05	Sim

Para o p-valor obtido, temos que $p\text{-valor} > \alpha$, portanto para os três testes realizados não se rejeitou H_0 ao nível de 5% de significância, concluindo que os dados da variável resposta seguem a distribuição normal, com nível de confiança de 95%. Através da Figura 36, evidencia-se a distribuição normal dos dados através da distribuição linear das 3 amostras.

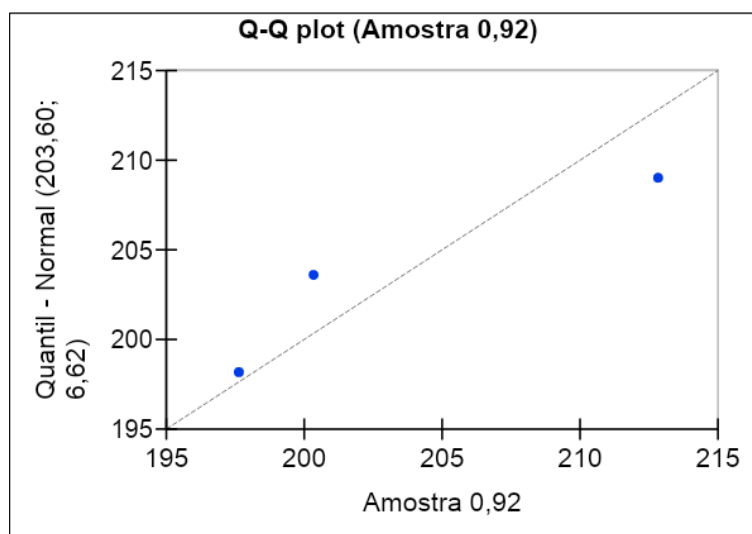


Figura 36 Papel de probabilidade do conjunto de chapas finas de aço com espessura 0,92 mm.

5.1.1.1.2 Análise da aleatoriedade

Para a análise de aleatoriedade utilizaram-se as seguintes hipóteses:

H0: se $p\text{-valor} > 0,05$, não se rejeitou H_0 a um nível de 5% de significância, ou seja, os dados foram aleatórios;

H1: se $p\text{-valor} < 0,05$, então se rejeitou H_0 a um nível de 5% de significância, ou seja, os dados não foram aleatórios.

Através do software Action Stat obteve-se p-valor de 1,00, resultando em um valor maior que 0,05, não se rejeitando a hipótese de aleatoriedade.

5.1.2 Comparações de média experimental e teórica dos conjuntos de chapa 0,92 mm – Teste t de Student

Os resultados do teste T de Student apresentaram p-valor zero. Assim ao nível de 5% de significância há evidências muito fortes de se rejeitar a hipótese H_0 , ou seja, o modelo de ruptura é significativo pois apresenta diferença entre as médias das amostras analisadas, conforme mostra a Figura 37.

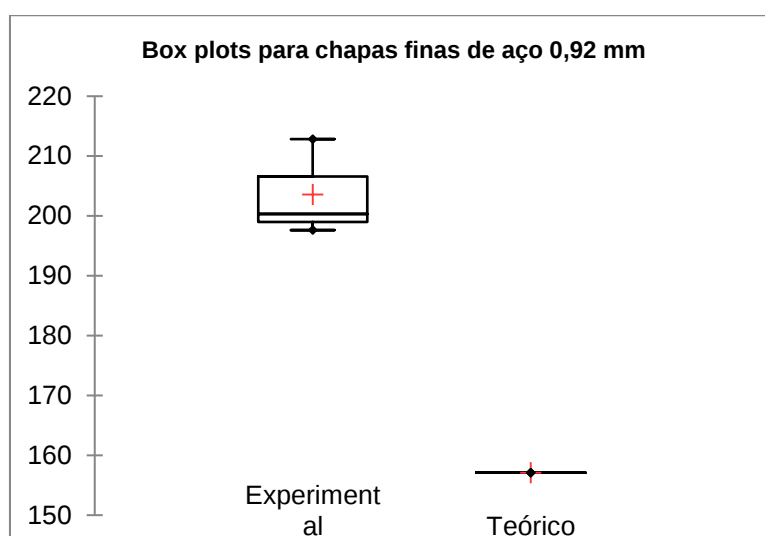


Figura 37 Box plot da comparação da carga de ruptura do modelo experimental e teórico.

A estimativa da diferença estatística dos resultados experimentais e teóricos (adotando $\gamma = 1,0$), foi de 46,79 kN, abrangendo um intervalo de confiança entre 33,49 e 59,48 kN com nível de significância de 5%. Para esta pequena amostra, os resultados experimentais produziram efeitos positivos em relação ao modelo teórico com $\gamma = 1,0$.

5.1.3 Análise comparativa teórica e experimental do conjunto de chapas finas de aço 0,92 mm

Conforme a Figura 38, para as 3 amostras ensaiadas os resultados experimentais obtiveram uma baixa variação entre eles; entretanto, apresentaram dois modelos de ruptura distintos (R1 e R3). Foram divididos por 6 os valores para ruptura do modelo R4 para escalar a área gráfica.

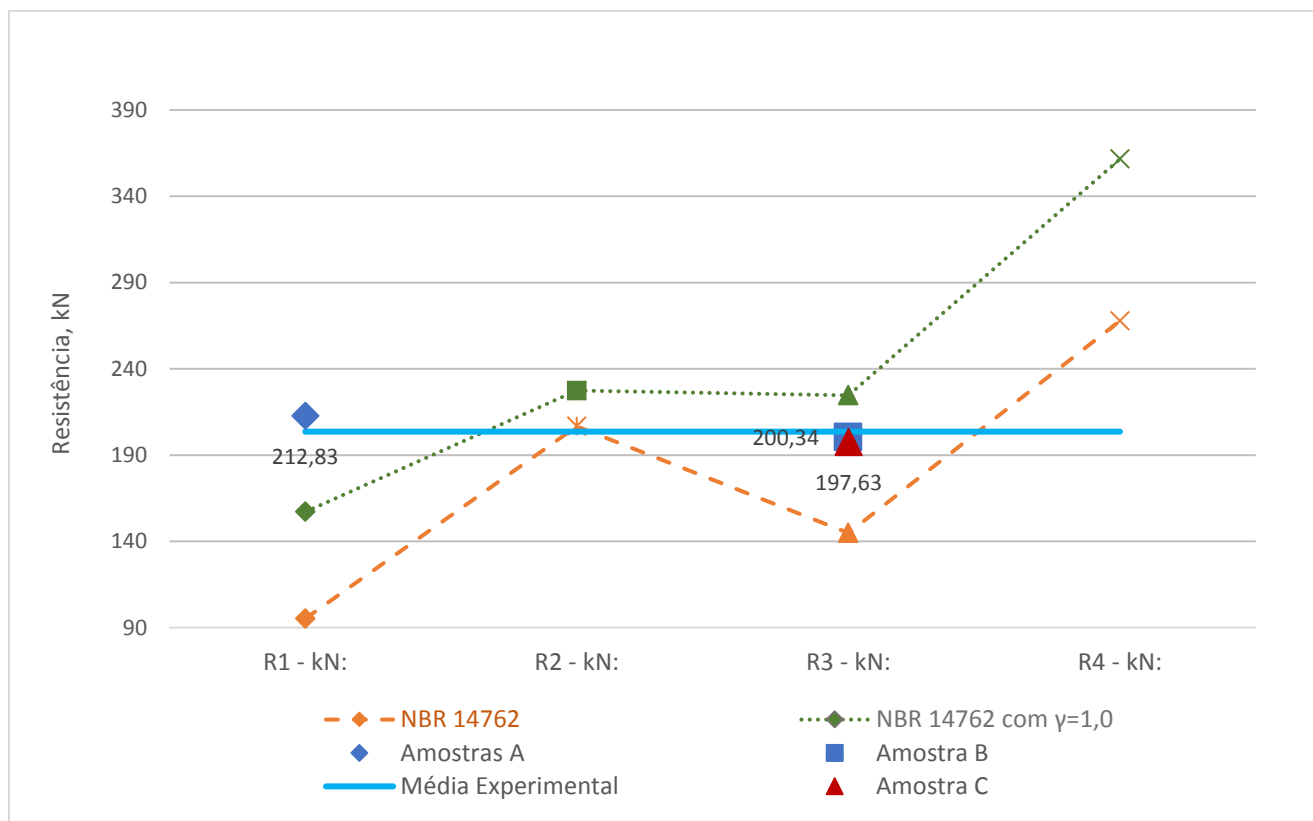


Figura 38 Modelos teóricos e experimentais para os conjuntos de chapas finas de aço com 0,92 mm.

A média experimental obtida pelo conjunto de chapas finas de aço com espessura 0,92 mm foram superiores à resistência teórica, indiferentemente do modelo de ruptura indicado. Contudo, mesmo retirando os coeficientes parciais de segurança que ponderam essas forças, os resultados experimentais se mantiveram superiores aos teóricos, indicando, conservadorismo na norma brasileira NBR 14672 (ABNT, 2010).

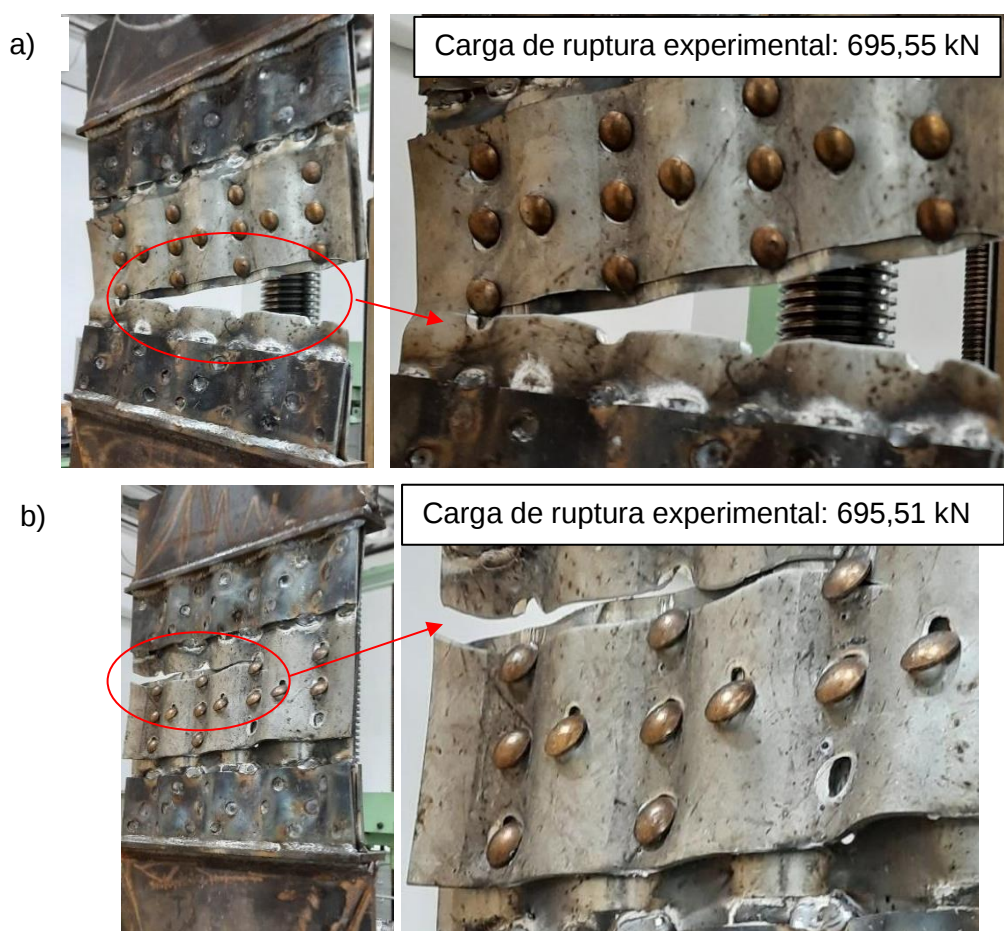
A média experimental obtida de 203,60 kN se sobressaiu à ruptura na seção líquida na região da ligação teórica de 95,22 kN e normativa (adotando $\gamma = 1,0$) de 157,11 kN, com percentual superior variando entre 213 e 130%. Porém, os resultados teóricos para o modelo de ruptura por esmagamento e rasgamento de 144,94 e 224,65 kN (com $\gamma = 1,0$), aproximaram-se em relação à média experimental, variando entre 90 e 140%.

A falha da ligação por esmagamento da parede do furo e posteriormente o seu rasgamento pode ter como causa a pressão de contato excessiva em razão de um número reduzido de parafusos na ligação. Verificaram-se consideráveis deslocamentos e elevada deformação na região dos furos, conforme Figura 35b e 35c. Neste modelo de ruptura, a concentração de tensão ocasionou a ruína localizada na região dos furos antes da estabilização da resistência total na seção transversal crítica da chapa. A partir de então, a ruptura se deu pela incapacidade da ligação em suportar acréscimos de carga e ampliação dos deslocamentos. O controle de deslocamento do pistão, durante o teste permaneceu com

força solicitante aproximadamente constante para níveis de carga próximos ao de ruptura com elevada deformação nas bordas dos furos, na seção crítica. Conforme Rogers e Hancock (2000), este fenômeno pode ter sido ocasionado pelo rasgamento localizado e descrito como pós-crítico referente ao modo de falha por esmagamento da parede do furo. Para a amostra da Figura 35a, verificou-se acentuado deslocamento e ocorrência do rasgamento da seção líquida localizado na seção líquida da ligação.

5.2 Resultados experimentais e análise estatística para os conjuntos de chapas finas de aço com espessura 3,00 mm

As 03 amostras do modelo de ruptura para o conjunto de chapas finas de aço com espessura 3,00 mm apresentaram valores semelhantes para o modelo de ruptura (Figura 39) e características geométricas condizentes ao mesmo modelo de ruptura nas Figuras 39a e 39b. A Figura 39c configurou um modelo de ruptura mais próximo ao cisalhamento do parafuso.



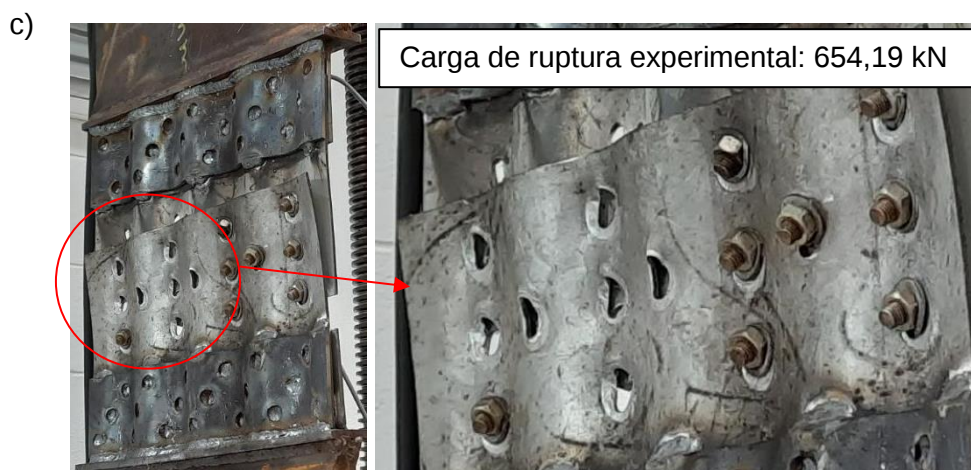


Figura 39 Ensaio dos corpos de prova 3,00 mm. a) Modelo de ruptura na seção líquida da amostra A; b) Modelo de ruptura na seção líquida da amostra B; c) Modelo de ruptura por cisalhamento dos parafusos da Amostra C.

Nas 3 amostras deste conjunto é possível verificar a inclinação do parafuso no conjunto da ligação. Em análise da Figura 39c, é perceptível a visualização da inclinação do corpo do parafuso, deixando-o de submetê-lo apenas ao cisalhamento puro e transferindo uma carga parcial de tração para os parafusos, solicitações estas não previstas no cálculo e não utilizadas em silos metálicos.

5.2.1 Análise estatística das amostras de chapas finas de aço com espessura 3,00 mm

Algumas características do grupo de dados observados são demonstradas pela análise exploratória das 3 amostras do conjunto de chapas finas de aço com espessura 3,00 mm ensaiadas pelo método da tração normal. A Tabela 22 apresenta o valor médio experimental da resistência de 681,75 kN.

Tabela 22 Análise exploratória da carga de ruptura (kN) do conjunto de chapas finas de aço com espessura 3,00 mm

Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação %
654,19	695,51	681,75	695,55	569,67	23,87	3,50

Esta média sobrepõe aproximadamente 216% em relação à resistência de ruptura do conjunto obtido através da NBR 14762 (ABNT, 2010) e descrito na Tabela 18 desta tese. Contudo, conforme descrito nas análises para os conjuntos de espessura 0,92 mm, os valores apresentados pelas normativas utilizam os coeficientes parciais de segurança.

Tomados os coeficientes parciais como unitários, o modelo de ruptura manteve-se na ruptura da seção líquida com carga de ruptura teórica 31% inferior à média obtida experimentalmente (Tabela 22).

Utilizou-se o valor do desvio devido em vez da medida da variância, por ser esta influenciada por valores que estão muito distantes da média. Não se evidenciou variação ou dispersão existentes em relação à média. Segundo Gomes (2000), o experimento possui alta precisão, com um coeficiente de variação de 3,50%. Assim como para os conjuntos de espessura 0,92 mm, por se tratar de uma população pequena, a dispersão estatística na análise da variância e desvio padrão torna-se inverossímil.

5.2.1.1 Suposições do modelo

Foram consideradas para as suposições de normalidade e aleatoriedade do modelo do conjunto de chapas finas de aço com espessura 3,00 mm, um nível de significância de 5%. Uma vez que a distribuição da estatística de teste é apenas aproximada, para amostras pequenas o valor do p-valor poderia conter um erro apreciável.

5.2.1.1.1 Análise de normalidade

Para os testes de normalidade de Shapiro Wilk e Anderson Darling, Tabela 23, utilizaram-se duas hipóteses:

H₀: a carga de ruptura do conjunto seguiu a distribuição normal;

H₁: a carga de ruptura do conjunto não seguiu a distribuição normal.

Tabela 23 Aplicação dos testes de normalidade para as amostras dos conjuntos de chapas finas de aço com espessura 3,00 mm

Testes de normalidade	Ruptura – P-valor	Nível de significância $\alpha=5\%$	Distribuição Normal
Shapiro-Wilk	0,002	> 0,05	Não
Anderson-Darling	0,057	> 0,05	Sim

Não se rejeitou H₀ ao nível de 5% de significância a partir do p-valor obtido pelo teste de Anderson Darling; portanto, para os três testes realizados, assume-se que os dados da variável resposta seguem a distribuição normal, com nível de confiança de 95%. A Figura 40 evidencia a distribuição normal dos dados através da distribuição linear das 3 amostras.

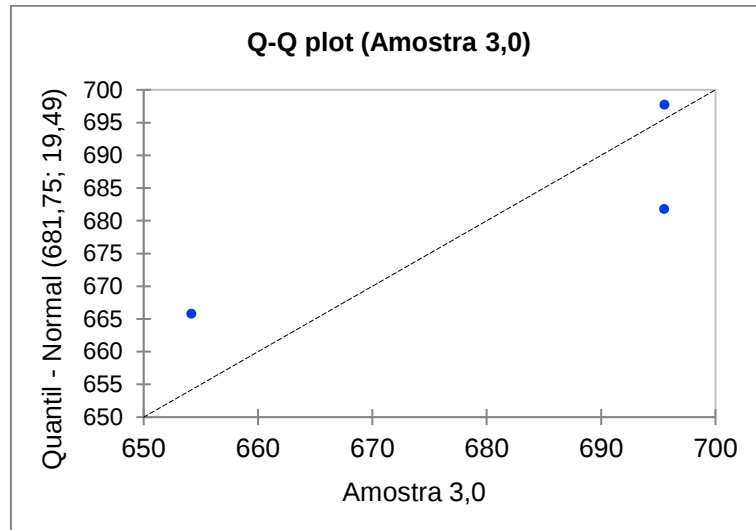


Figura 40 Papel de probabilidade do conjunto de chapas finas de aço com espessura 3,00 mm.

5.2.1.1.2 Análise da aleatoriedade

Utilizaram-se as seguintes hipóteses para a análise de aleatoriedade:

H0: se $p\text{-valor} > 0,05$, não se rejeitou H_0 a um nível de 5% de significância, ou seja, os dados foram aleatórios;

H1: se $p\text{-valor} < 0,05$, então se rejeitou H_0 a um nível de 5% de significância, ou seja, os dados não foram aleatórios.

Através do software Action Stat obteve-se $p\text{-valor}$ de 1,00, resultando em um valor maior que 0,05, não se rejeitando a hipótese de aleatoriedade.

5.2.2 Comparações de média experimental e teórica dos conjuntos de chapa 3,00 mm – Teste t de Student

Os resultados do teste T de Student apresentaram $p\text{-valor}$ zero. Assim ao nível de 5% de significância há evidências muito fortes de se rejeitar a hipótese H_0 , ou seja, o modelo de ruptura é significativo pois apresenta diferença entre as médias das amostras analisadas, conforme mostra a Figura 41.

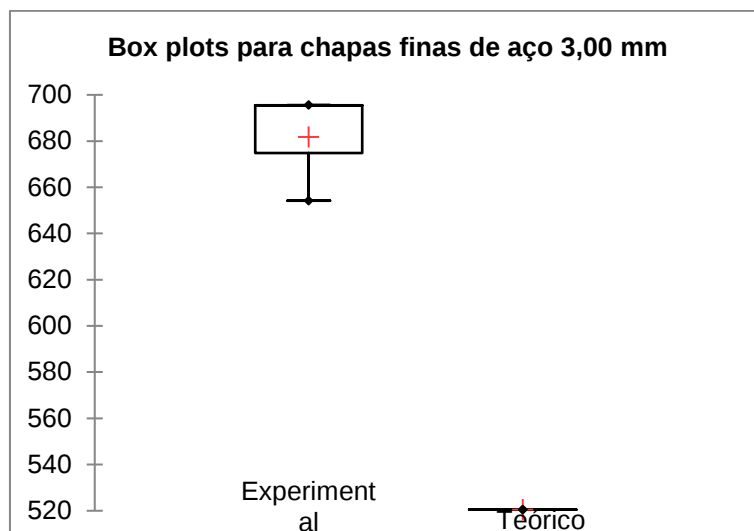


Figura 41 Box plot da comparação da carga de ruptura do modelo experimental e teórico.

A estimativa da diferença estatística dos resultados experimentais e teóricos (adotando $\gamma = 1,0$), foi de 161,28 kN, abrangendo um intervalo de confiança entre 123,02 e 199,54 kN com nível de significância de 5%. Para esta pequena amostra, os resultados experimentais produziram efeitos positivos em relação ao modelo teórico com $\gamma = 1,0$.

5.2.3 Análise comparativa teórica e experimental do conjunto de chapas finas de aço 3,00 mm

Conforme a Figura 42, para as 3 amostras ensaiadas os resultados experimentais obtiveram uma baixa variação entre eles; no entanto, assim como nos conjuntos de espessura 0,92 mm, apresentaram dois modelos de ruptura distintos (R1 e R4). Foram divididos por 2, os valores para ruptura do modelo R4 para escalar a área gráfica.

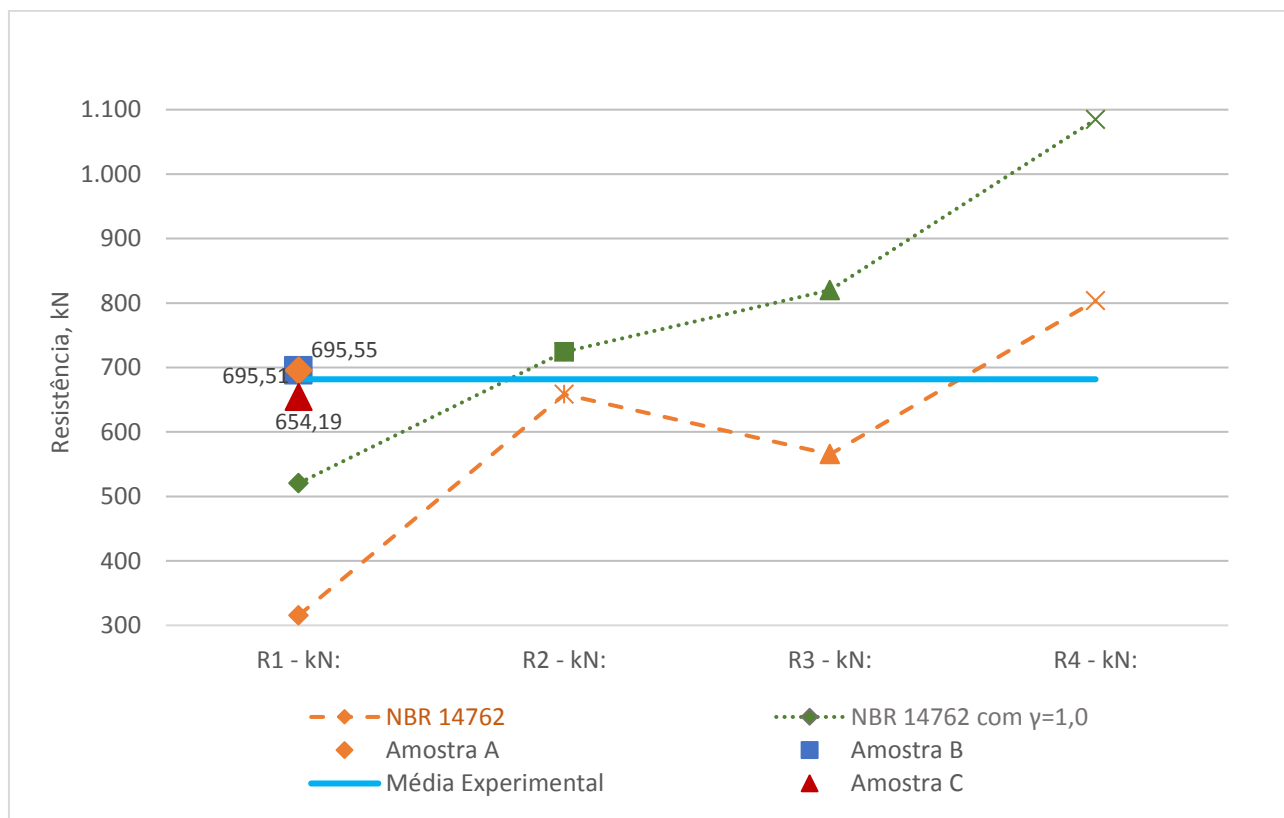


Figura 42 Modelos teóricos e experimentais para os conjuntos de chapas finas de aço com 3,00 mm.

A média experimental obtida pelo conjunto de chapas finas de aço com espessura 3,00 mm foi superior à resistência teórica para o modelo crítico de ruptura proposta pela NBR 14762 (ABNT, 2010). Contudo, mesmo retirando os coeficientes parciais de segurança que ponderam essas forças, os resultados experimentais se mantiveram superiores aos teóricos para ruptura da seção líquida, indicando o conservadorismo na norma brasileira NBR 14672 (ABNT, 2010).

A média experimental obtida de 681,75 kN se sobressaiu à ruptura na seção líquida na região da ligação teórica de 315,44 kN (inferior em 216%) e normativa (sem coeficientes de ponderação das ações) de 520,47 kN, com percentual inferior de 131%. Após a ruptura da seção líquida, tem-se a ruptura por esmagamento de 565,55 kN (inferior em 20,55%), parametrizada pela NBR 14762 (ABNT, 2010) e 724,29 kN na ruptura da seção bruta quando tomando como unitários os coeficientes de ponderação, excedendo em 6% a média da resistência experimental.

O modelo de ruptura por cisalhamento do parafuso, utilizando os dados experimentais de resistência obtidos por Ficanha (2016), sofreriam colapso com 1607,12 kN.

Verificaram-se consideráveis deslocamentos e elevada deformação na região dos furos, conforme Figura 39. Para estes conjuntos não foram realizados leituras e controle de deslocamento.

5.3 Erro modelo do conjunto das chapas finas de aço parafusadas

Determinou-se a variável aleatória erro de modelo (M_e), após as amostras terem sido verificadas de acordo com as recomendações normativas, por meio da consideração de um intervalo de confiança de 95% para os resultados experimentais e adotando os coeficientes parciais de ponderação das ações como unitários.

Calculou-se a variável M_e (Equação 19) para as 3 amostras ensaiadas de cada conjunto de chapas finas de aço, 0,92 e 3,00 mm, para então determinar a média da variável erro de modelo ($M_{e \text{ mean}}$). A Tabela 24 apresenta os resultados do erro de modelo utilizando como F_{teo} o valor definido na Tabela 18, sendo 157,11 e 520,47 kN, respectivamente.

Tabela 24 Determinação da média da variável erro de modelo de cada conjunto de chapas finas de aço – $M_{e \text{ mean}}$

Espessura – mm:	Amostra:	F_{exp} – kN:	M_e – adm:	M_{mean} – adm
0,92	01	212,83	1,35	1,28
	02	200,34	1,28	
	03	197,63	1,26	
3,00	01	695,55	1,34	1,34
	02	695,51	1,34	
	03	654,19	1,26	

Quando inserida corretamente em uma análise de confiabilidade, a variável aleatória erro de modelo é capaz de indicar um possível caráter conservador ou inseguro dos modelos analíticos. Quando utilizados os valores na íntegra das recomendações normativas da NBR 14762 (ABNT, 2010), os valores de $M_{e \text{ mean}}$ resultam em 2,10 e 2,20, respectivamente.

Como $M_{e \text{ mean}}$ não resultou em um valor unitário, verifica-se que o valor teórico definido em cálculo (Tabela 18) não se aplica exatamente ao fenômeno mecânico estudado, considerando ou não os coeficientes de ponderação das ações. Os valores de 1,28 e 1,34 indicam o percentual acima de 28% na variação dos valores ensaiados em relação aos valores obtidos teoricamente.

Logo, corrigindo o modelo matemático fazendo uso do $M_{e \text{ mean}}$, tem-se a força resistente correta do conjunto de chapas finas de aço parafusados (Equação 20), de 200,34 kN para espessura 0,92mm e 695,51 kN para espessura 3,00mm.

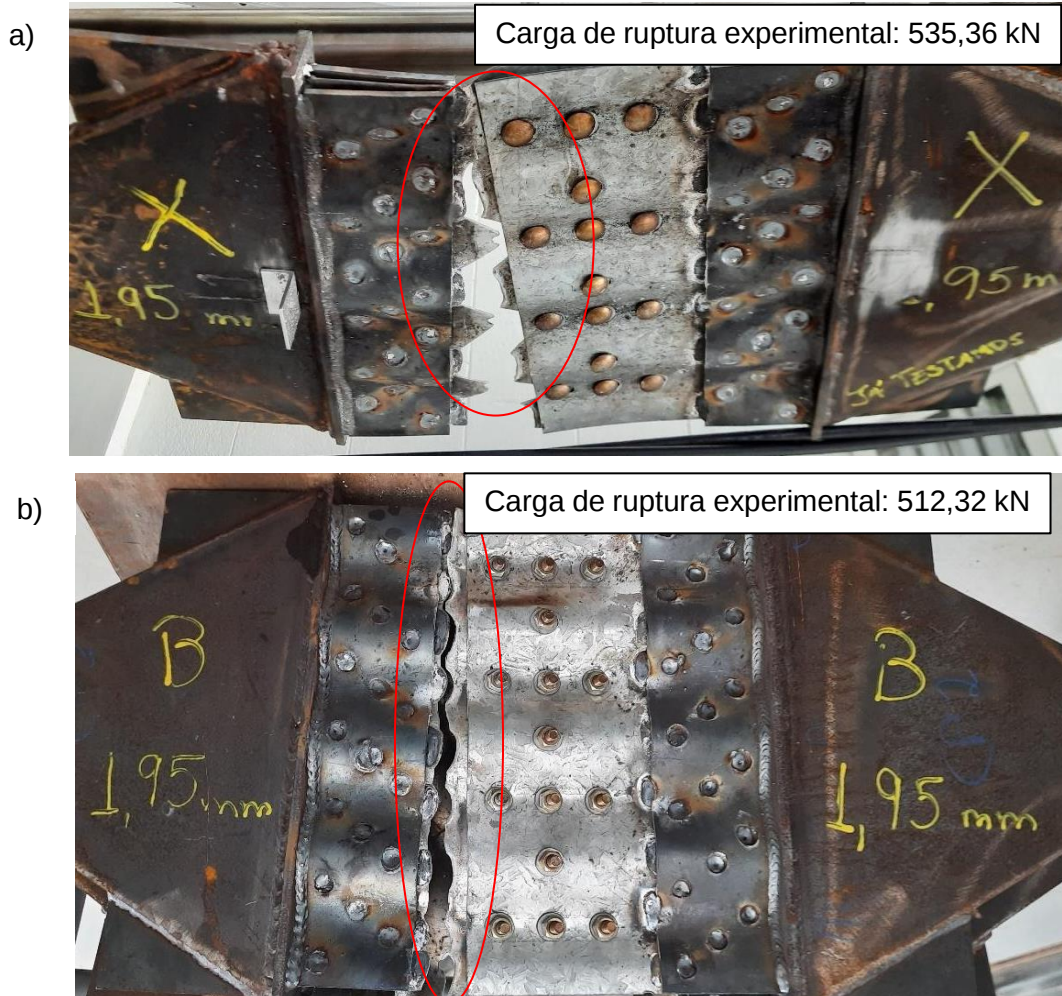
5.4 Discussão geral

Esta tese apresentou o comparativo teórico e experimental de um modelo otimizado de ligação parafusada, através do uso de um parafuso alternativo proposto por Ficanha (2016), para fins de uso em chapas laterais de silos cilíndricos metálicos. O dimensionamento teórico de ambos os modelos de parafuso (alternativo e tradicional) se basearam nas

recomendações da norma NBR 14762 (ABNT, 2010). Por se tratar de um comparativo entre resultados experimentais obtidos em laboratório por meio de ensaios e resultados teóricos, obtidos com base em modelos matemáticos segundo previsões normativas, adotaram-se como unitários os coeficientes de ponderação das forças quando analisado o modelo do parafuso alternativo. O estudo envolveu a análise de 9 conjuntos de chapas finas de aço, de espessuras 0,92, 1,95 e 3,00 mm.

A viabilidade econômica do parafuso alternativo foi conservada na dissertação de Ficanha (2016), mantendo a massa do parafuso tradicional e as mesmas recomendações normativas para o enquadramento da norma ISO e classe de resistência.

Os conjuntos de chapas finas de espessura 1,95 mm foram desconsiderados, tendo em vista que nas 3 amostras analisadas ocorreu a ruptura na região da solda com o dispositivo de suporte da garra (Figura 43). Subitamente em contíguo com as demais análises, a ruptura dos conjuntos se sobressaiu em relação aos dados teóricos e normativos, indicando certa tendência de resistência também para estes conjuntos.



c)

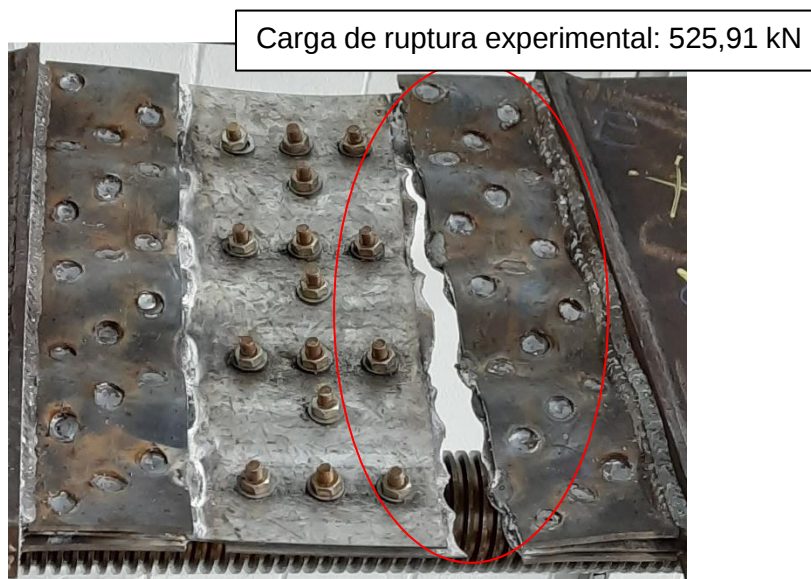


Figura 43 Ensaio dos corpos de prova 1,95 mm descartados por rompimento na solda de apoio. a) Ruptura na região da solda da Amostra A; b) Ruptura na região da solda da Amostra B; c) Ruptura na região da solda da Amostra C.

Atendidas as suposições do modelo para os conjuntos de espessura 0,92 e 3,00 mm, verificou-se, através da comparação múltipla de médias, as estimativas da diferença estatística de 46,49 e 161,28 kN respectivamente, com nível de significância de 5%.

Abordou-se uma análise de erro do modelo para a construção da variável aleatória erro de modelo (M_e) das amostras 0,92 e 3,00 mm, de modo que, ao ser inserida nas análises de confiabilidade, a incerteza de modelo fosse considerada quando da avaliação do nível de segurança do modelo matemático avaliado. A média da variável M_e não resultou um valor unitário, indicando que o resultado experimental obtido não se aplicou exatamente ao fenômeno mecânico estudado. Sendo assim, a presença do erro de modelo (M_e) na análise de confiabilidade do modelo mostrou que existe um aumento significativo entre 28 e 34% na resistência do conjunto de chapa finas de aço parafusadas em relação ao modelo matemático avaliado. Encontrou-se o F_{correto} dos conjuntos utilizando a média M_e e valor teórico, acertando-se a confiabilidade dos resultados do experimento, de 200,34 e 695,51 kN.

Para estas amostras, tanto a utilização dos coeficientes de ponderação das ações, como a metodologia para obtenção do valor de C_t , produziram efeitos significativos na resistência final dos conjuntos, mostrando-se normativamente conservadores.

A NBR 14762 (ABNT, 2010) não distingue os parâmetros devido a utilização de chapa corrugada ou plana e montagem em composição simples ou dupla. De acordo com as verificações de Dall Acqua (2018), os resultados obtidos em seus experimentos mostraram que existe diferença e que, para todos os casos, o modelo normativo é conservador.

As considerações de Dall Acqua (2018) segundo a aplicabilidade da norma NBR 14762 (ABNT, 2010) no cálculo da resistência de ligações parafusadas de paredes de silos cilíndricos

metálicos contidas na falha por ruptura da seção líquida são conservadoras. Há um efeito benéfico pequeno à resistência quando utilizados mais parafusos na direção da solicitação, propondo-se um novo modelo matemático (Equação 21), em que a adoção de um coeficiente redutor da área líquida teórico unitário se torna mais adequado.

$$F_{R, RSL} = A_n f_u \quad \text{Eq. (21)}$$

Dall Acqua (2018) também propôs um novo modelo matemático (Equação 22) quando utilizada a norma NBR 14762 (ABNT, 2010) para a aplicação no cálculo da resistência de ligações parafusadas de paredes de silos cilíndricos metálicos sujeitas a falha por esmagamento:

$$F_R = (4 - 0,1 \cdot db/t) db t f_u \leq 3,2 db t f_u \quad \text{Eq. (22)}$$

Os modelos propostos por Dall Acqua (2018) são os que melhor representam os resultados experimentais desta tese, inclusive na observância de que a falha por esmagamento ocorreu apenas nos corpos de prova de menor espessura de chapa, propondo um aumento do número de parafusos para melhorar o aproveitamento desta ligação.

6 CONCLUSÕES

Através dos parâmetros comparativos entre o parafuso tradicional e o novo modelo de parafuso alternativo, com intuito de otimizar a ligação parafusada das chapas de silos cilíndricos metálicos, foi possível ensaiar corpos de provas a fim de concluir se os parâmetros normativos da NBR 14762 (ABNT, 2010) condizem com os resultados experimentais.

Nas condições em que foi realizada esta tese, pode-se concluir que:

- I. Obteve-se resistência superior para toda a faixa de espessuras estudadas (0,80 a 6,70 mm), nos modelos teóricos analisados, com a otimização do parafuso alternativo na chapa metálica em relação à utilização do parafuso tradicional nas mesmas condições, tanto nas costuras triplas como para costuras quádruplas;
- II. Ligações com costura simples e dupla tornam-se inviáveis para utilização em silos metálicos devido à perda de resistência nas ligações, inviabilizando economicamente devido ao aumento da espessura das chapas laterais para suprir a perda de resistência;
- III. Tendo em vista os quatro modelos de ruptura, a costura tripla é a ideal. A costura quádrupla eleva a resistência do conjunto, porém ocorrem outras rupturas anteriores ao cisalhamento dos parafusos;
- IV. A resistência das chapas laterais parafusadas com costura tripla e parafuso alternativo obtiveram resistência de 8 a 42% superiores em relação ao parafuso tradicional. Para a costura quádrupla, obteve-se de 2 a 30% de incremento de resistência utilizando parafuso alternativo em comparação ao parafuso tradicional;
- V. A redução do número de parafusos em chapas finas de aço acarretou na ruptura por esmagamento, divergente da ruptura na seção líquida proposta pela NBR 14762 (ABNT, 2010);
- VI. Não se comprovaram evidências do efeito da ductibilidade do aço ao analisar a relação F_u/F_y inferior a 1,35. Valores de relação F_u/F_y na ordem de 1,12 atenderam ao mesmo propósito;
- VII. A caracterização do aço de espessura 1,95 mm apresentou relação F_u/F_y de 1,04, inferior ao recomendado, de 1,08. O que pode ter levado à quebra abrupta na

região soldada dos três corpos de prova, evidenciando que a recomendação normativa mínima de 1,08 deve ser mantida;

- VIII. A norma brasileira prevê a adoção de um valor unitário de C_t para valores de relação d/g acima de 0,40. Porém, ao atender todos os parâmetros normativos para disposição dos parafusos, furos e distância, não é possível ultrapassar a relação d/g de 0,33. Evidenciando que a NBR14762 (ABNT, 2010) não é adequada para a utilização em silos metálicos, se fazendo necessário um modelo matemático específico para este uso;
- IX. As dimensões entre centro de furo à borda, perpendicular à solicitação de tração, afetou diretamente o C_t , sendo quanto menor a distância, maior o C_t ;
- X. Verificou-se a existência da concentração de tensões em chapas finas, na presença de furos, e o contato da chapa com o parafuso, durante a caracterização da ruptura da seção líquida na região da ligação;
- XI. O dimensionamento normativo teórico se mostrou bastante conservador para o modelo de ruptura da seção líquida na região da ligação, tendo em vista a atualização do coeficiente de ponderação das ações de 1,65. O valor de 1,35, proposto na versão de 2001, foi menos discrepante da análise experimental;
- XII. A determinação da média da variável aleatória erro de modelo indicou um comportamento experimental seguro e conservador. Porém, os resultados obtidos não se aplicaram unitariamente ao fenômeno mecânico estudado. A confiabilidade dos resultados elevou entre 28 e 34% o dimensionamento teórico, utilizando as normativas vigentes, desconsiderando os coeficientes de ponderação das ações;
- XIII. Manteve-se a viabilidade econômica do parafuso alternativo, conservando-se a massa do parafuso tradicional e as mesmas recomendações normativas para o enquadramento da norma ISO e classe de resistência;
- XIV. Para estas amostras, tanto a utilização dos coeficientes de ponderação das ações, como a metodologia para obtenção do valor de C_t , produziram efeitos significativos na resistência final dos conjuntos, mostrando-se normativamente conservadores;

- XV. Recomenda-se uma nova proposta teórica para os modelos de ruptura da seção líquida na região da ligação e ruptura por esmagamento, coerentes com os resultados experimentais obtidos nesta tese, passíveis de reduzir de 1% a 5% o peso de um silo metálico.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos na pesquisa e no aporte literário nesta pesquisa, recomenda-se, na confecção de silos metálicos, como estímulo ao desenvolvimento e à inserção de novas tecnologias, a elaboração de metodologias específicas para dimensionar com maior exatidão os modelos de ruptura que podem ocorrer nas chapas metálicas parafusadas de silos cilíndricos.

Apontados até o momento o ganho significativo de resistência com a utilização do parafuso alternativo e a otimização da chapa lateral, com expectativa de viabilidade econômica, concluiu-se nesta tese que o parafuso alternativo se torna uma provável solução nas ligações parafusadas das chapas metálicas utilizadas no costado dos silos.

Visto, a priori, a divergência entre as recomendações teóricas e os resultados experimentais, assim como no modelo de ruptura divergente para a mesma espessura de amostra, sugere-se para trabalhos futuros:

- a) Avaliar se há diferença experimental significativa quando se utilizar o parafuso alternativo na posição vertical da chapa (se manterá o valor para $M_{e\ mean}$);
- b) Verificar se o caso de a costura tripla possuir um parafuso intermediário, em chapas 3,00 mm, incidirá em um modelo de ruptura diferente, devido ao fato de o rasgamento da seção líquida ter ocorrido nas bordas das amostras experimentadas;
- c) Propor um modelo matemático mais refinado e assertivo para os modelos de ruptura usuais em chapas metálicas de silos, tendo como balizador as Figuras 44 e 45, com o intuito de obter melhor distribuição e homogeneidade das cargas de ruptura.

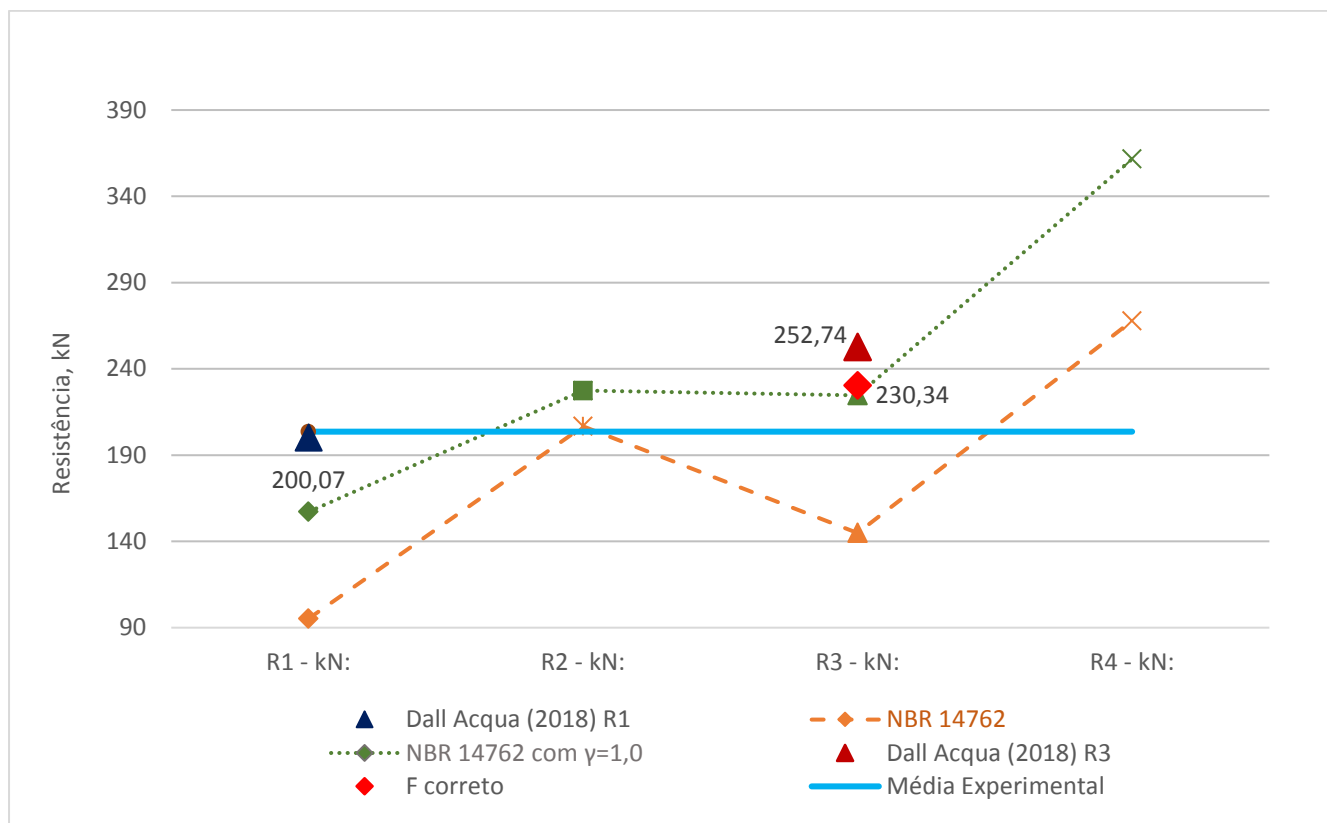


Figura 44 Resultados experimentais, teóricos, F correto e proposta de Dall Acqua (2018) em chapas finas de aço com espessura 0,92 mm.

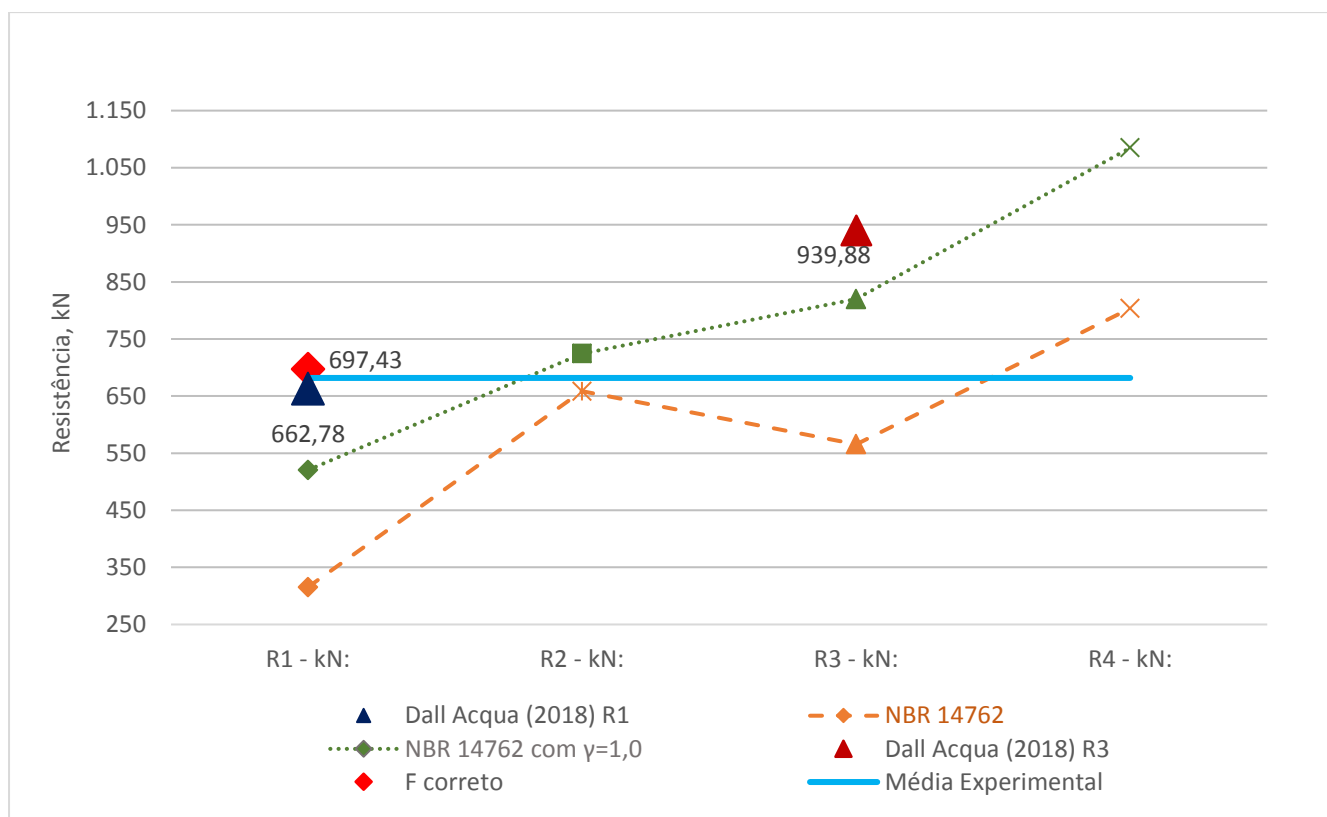


Figura 45 Resultados experimentais, teóricos, F correto e proposta de Dall Acqua (2018) em chapas finas de aço com espessura 3,00 mm.

8 REFERÊNCIAS

ANSI/AISC 360–05. **Specification for structural steel buildings**. American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **S100**: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structures Members. Washington, DC, 2007.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **ASME B18.2.6M**: Metric Fasteners for Use in Structural Applications. New York, NY, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A325**: Standard Specification for Structural Bolts, Steel, Heat Treated, 120/105 Ksi Minimum Tensile Strength. United States, 2004.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **ASTM A490**: Standard Specification for Structural Bolts, Alloy Steel, Heat Treated, 150 Ksi Minimum Tensile Strength. United States, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6123**: Força devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8855**: EB168 – Propriedades mecânicas de elementos de fixação – Parafusos e porcas – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6892**: Materiais metálicos – Ensaio de Tração. Parte 1: método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 1397 – Continuous hot-dip metallic coated steel sheet and strip – Coating of zinc and zinc alloyed with aluminum and magnesium**. Australia, 2011.

BOLANDIM, E. A. **Análise de confiabilidade em ligações parafusadas em chapas finas e perfis de aço formados a frio**. 336f. Dissertação de Mestrado: USP – São Carlos, 2011.

BRITISH STANDARD. **Eurocode 1 – Actions on Structures. Part 4: Silos and Tanks**. European Committee for Standardization: Brussels, 2006. 107 p.

CALIL JR., C.; CHEUNG, A. B. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo.** Escola de Engenharia de São Carlos – USP: 2007.239p.

CALIL JR., C.; ANDRADE, L. J. de. **A ação do vento em silos cilíndricos de baixa relação altura x diâmetro.** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 9, n. 41, p. 129-155, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **ISSN 2318-6852, Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos – Safra 2020/2021 2º Levantamento.** Brasília, n. 5. novembro, 2020. 175p.

DALL'ACQUA, T. G. **Estudo teórico e experimental de ligações parafusadas em chapas onduladas de silos cilíndricos metálicos.** Dissertação de Mestrado: USP – São Carlos: 2018. 111 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. Eurocode 3 – Design for Steel Structures: part 1.3 – **General Rules: Supplementary Rules for Cold-Formed Thin Gauge Members and Sheeting.** Brussels, 2006.

ESTEVES JR., P. **Silos Metálicos de Chapa Corrugada.** Dissertação de Mestrado: USP – São Carlos: 1989. 118 p.

FAKURY, R. H. Sobre a revisão da norma brasileira de projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto, a NBR 8800. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 2, p. 233-239, June 2007.

FICANHA, D. C. **Ligações em silos metálicos de chapas corrugadas:** proposta de um parafuso alternativo. 77f. Dissertação de Mestrado: UNIOESTE – Cascavel: 2016.

FREITAS, E. das G. A. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano.** 197f. Tese de Doutorado: USP – São Carlos, 2001.

GAYLORD JR., E. H.; GAYLORD, C. N. **Design of Steel Bins for Storage of Bulk Solids.** Prentice Hall: New Jersey, 1984. 359 p.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental.** 14 ed. Piracicaba: Degaspari, 2000. 477p.

HEZEL, C. R. **Avaliação das pressões em silos verticais conforme as diferentes normas internacionais.** 161f. Dissertação de Mestrado: UNIOESTE – Cascavel, 2007.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 4016 – Hexagon head bolts – Product grade C.** 2000.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 898-1 – Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel – Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes – Coarse thread and fine pitch thread.** 2013.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 898-2 - Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel - Part 2: Nuts with specified property classes – Coarse thread and fine pitch thread.** 2012.

LOBATO, J. C. M. **Caracterização das propriedades de fluxo da lama vermelha para fins de dimensionamento de silos – Aplicação para tremonhas cônicas**. 132f. Dissertação de Mestrado: UFPA – Belém: 2013.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro: Gen, LTC, 2009, 4a. Edição, 513 p.

MAIOLA, C. H. **Ligações parafusadas em chapas finas e perfis de aço formados a frio**. 156f. Dissertação de Mestrado: USP – São Carlos: 2004.

PALMA, G. **Pressões e Fluxo em silos esbeltos ($h/d \geq 1,50$)**. 121f. Dissertação de Mestrado: USP – São Carlos: 2005.

RAVENET, J. **Silos: teoría, investigación, construcción**. Editores Técnicos Asociados – Barcelona: 1977. 381 p.

RAVENET, J. **Silos: pressiones laterales. produtos granulares**. Editores Técnicos Asociados – Barcelona: 1992. 508 p.

ROGERS, C. A.; HANCOCK, G. J. Behaviour of This G550 Sheet Steel Bolted Connections. **Fourteenth International Speciality Conference on Cold-Formed Steel Structures**. p. 495-510, 1998.

ROGERS, C. A.; HANCOCK, G. J. Failure models of bolted-sheet-steel connections loaded in shear. **Journal of Structural Engineering**, v. 126, n. 2, p. 288-296, 2000.

SCALABRIN, L. A. **Dimensionamento de silos metálicos para armazenagem de grãos**. Dissertação de Mestrado: UFRGS, 2008.160 p.

TRICHES, F. Júnior. **Análise Estruturas das Colunas de Sustentação de um Silo Metálico**. Dissertação de Mestrado: Universidade Federal do Rio Grande do Sul: 2011. 128 p.

USIMINAS. **Usina lança aço para construção de silos**. Disponível em: https://www.diariodoaco.com.br/ler_noticia.php?id=51302&t=usiminas-anuncia-aco-para-a-construcao-de-silos. Acesso em 30 abr. 2018.

WINTER, G. **Light Gage Steel Connections with High-Strength, High-Torqued Bolts (1956)**. Publicado em IABSE Publicações, 2016. 16 p.

YASSUDA, I. dos S. **Estudo do comportamento de revestimentos superficiais em elementos roscados de fixação quando submetidos a torque**. 104f. Dissertação de Mestrado – INPE: São José dos Campos, 2008.