

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE

*Campus CASCABEL*

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

LIGAÇÕES EM SILOS METÁLICOS DE CHAPAS CORRUGADAS:

PROPOSTA DE UM PARAFUSO ALTERNATIVO

DANIELE CRISTINA FICANHA

Cascavel - Paraná - Brasil

2016

DANIELE CRISTINA FICANHA

LIGAÇÕES EM SILOS METÁLICOS DE CHAPAS CORRUGADAS:  
PROPOSTA DE UM PARAFUSO ALTERNATIVO

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

Orientador: Prof. Dr. Divair Christ

Co-Orientador: Prof. PhD. Carlito Calil Júnior

Cascavel - Paraná - Brasil

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

F465L

Ficanha, Daniele Cristina

Ligações em silos metálicos de chapas corrugadas: proposta de um parafuso alternativo./Daniele Cristina Ficanha. Cascavel, 2016.

94 f.

Orientador: Prof. Dr. Divair Christ

Coorientador: Prof. Dr. Carlito Calil Júnior

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2016

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola

1. Ligação parafusada. 2. Cisalhamento direto. 3. Oblongo. 4. Chapa de apoio. 5. Resistência. I. Christ, Divair. II. Calil Júnior, Carlito. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

CDD 21.ed. 633.20868

CIP-NBR 12899

## DANIELE CRISTINA FICANHA

Ligações em silos metálicos de chapas corrugadas: Proposta de um parafuso alternativo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre 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 Calijó Junior

Universidade de São Paulo (USP)



---

Sílvia Renata Machado Coelho

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



---

Decio Lopes Cardoso

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



---

Alfredo Petruski

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

Cascavel, 11 de julho de 2016

## 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;

Atua como Engenheira Calculista de Estruturas Metálicas na empresa Comil Silos e Secadores Ltda. desde fevereiro de 2013 até o presente momento;

Ingressou no Mestrado em Engenharia Agrícola em 2014, orientada pelo Prof. Dr. Divair Christ e pelo co-orientador Prof. Carlito Calil Júnior pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP;

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

## DEDICATÓRIA

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

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

À minha nova família, o meu noivo Jaison Kostuchenko, agradeço pela 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. Jeferson Sarreta, meu primeiro professor profissional, pelas aulas e incentivo;

Aos colegas de trabalho de todos os dias, Eduardo, Fábio e Mariane, agradeço pela ajuda, ensinamentos e descontração;

À Industrial Rex Ltda. pelo fornecimento da matéria prima e pela tentativa na confecção das amostras, em especial ao Jacson Becker pela constante atenção ao projeto e ao André Walzburger pela participação nos ensaios;

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola;

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. Divair Christ, meu orientador, pelas experiências positivas de aprendizagem, por sua atenção, confiança e orientações;

Ao Prof. Carlito Calil Jr., meu co-orientador, pelas muitas bibliografias na área de armazenamento, pelos ensinamentos e pelo interesse na pesquisa.

# LIGAÇÕES EM SILOS METÁLICOS DE CHAPAS CORRUGADAS: PROPOSTA DE UM PARAFUSO ALTERNATIVO

## RESUMO

A função dos silos metálicos consiste em 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 conjunto. A possibilidade de implantação de um silo metálico baseia-se principalmente no custo e no peso da matéria prima: o aço. As chapas laterais representam a maior parte da matéria prima utilizada. A viabilização de um novo elemento de fixação, o parafuso alternativo, responsável pelas ligações dos elementos do corpo do silo aumentam a resistência da chapa lateral, tornando-se atrativo e econômico para todas as fontes usufruintes dos silos metálicos. A elaboração do parafuso alternativo baseou-se na ISO 4016 (2000) quanto à composição química e às propriedades mecânicas. Retirou-se massa da cabeça sextavada do parafuso tradicional e adicionou-se no plano de corte do parafuso alternativo, formando um elemento oblongo de cabeça redonda. Confeccionaram-se protótipos do parafuso alternativo com a mesma matéria prima, processo de têmpera e bicromatização que a executada nos parafusos tradicionais. Ensaíram-se 23 amostras do parafuso tradicional e 16 amostras do parafuso alternativo pelo método do cisalhamento direto. Foram verificadas as suposições do modelo, no qual o aumento da área de cisalhamento no plano de corte do parafuso alternativo produziu efeitos na resistência ao cisalhamento do parafuso tradicional. A partir do resultado do parafuso alternativo foi possível determinar a média da variável aleatória erro do modelo, validando as funções teóricas de distribuição de probabilidades para a representação da informação estatística dessa variável aleatória, determinando a força correta do parafuso alternativo, de 107,40 kN. Com o intuito de utilizar o parafuso alternativo nas chapas do corpo de silos metálicos, comparou-se através do ensaio de 27 amostras do parafuso tradicional e 3 amostras do parafuso alternativo, ambos utilizando chapas laterais de silos metálicos para verificar se há influência da mesma na resistência ao cisalhamento dos parafusos. Os parâmetros utilizados na definição da resistência ao esmagamento e rasgamento foram determinados a partir do ensaio de tração das chapas de apoio, quantificação da tensão de ruptura, tal que as distâncias entre furo e borda foram determinadas para serem superiores à resistência de cálculo dos parafusos. Não foi possível a determinação da influência da chapa de apoio na resistência ao cisalhamento do parafuso alternativo, visto que a chapa de apoio esmagou e o mesmo chegou apenas ao estado de deformação plástica. A comparação entre as médias para a amostra de parafuso alternativo produziu efeitos positivos na resistência ao cisalhamento dos parafusos.

Palavras-chave: ligação parafusada, cisalhamento direto, oblongo, chapa de apoio, resistência.



## **CONNECTIONS IN METAL SILOS USING CORRUGATED SHEET: TRADITIONAL BOLT X ALTERNATIVE BOLT**

### **ABSTRACT**

The function of metal silos consists in storing and preserving the quality of the grains. For that, it is extremely important the correct dimensioning in order to guarantee efficiency and security of the set. The possibility of a metal silo implantation is based mainly in the cost and weight of the primary raw material, the steel. The side plates represent the biggest part of the raw material used. The feasibility of a new fixation element, the alternative bolt, responsible for the connections of the silo body's elements increase the resistance of the side plate, becoming attractive and economic for all users of metal silos. The elaboration of an alternative bolt was based on ISO 4016 (2000) regarding chemical composition and mechanical properties. Mass from the hexagonal head of the traditional bolt was withdrawn and added in the cut plan of the alternative bolt, making it an oblong element and round head. Prototypes of the alternative bolt were developed with the same raw material, temper process and bichromatization as the executed in the traditional bolts. Twenty-three samples of the traditional bolt and sixteen samples of the alternative bolt were produced through the method of direct shearing. The model's premises were verified, in which the increase in shearing area in the alternative bolt's cutting plan produced effects in the shearing resistance in the traditional bolt. Through the result of the alternative bolt, it was possible to determine the random error average variable of the model, validating the theoretical functions of the probability distribution for the representation of the statistic information of this random variable, determining the correct strength of the alternative bolt as 107,40 kN. In order to use the alternative bolt in metal silos, 27 samples of the traditional bolt and 3 samples of the alternative bolt were compared, both using support plates of the same material used in the silos, to verify if the plate influences the bolt's shearing resistance. The parameters used in the definition of the crushing and tearing resistance were determined by tensile tests on the support plates, quantification to the breaking point, as well as the distance between the hole and the edge were determined, to be superior to the resistance of the bolts calculations. It was not possible to determine the influence of the support plate in the resistance of the alternative bolt shear, since the support plate crushed it and it reached only deformed plastic state. The comparison between the averages for the sample of the alternative bolt may have produced positive effects in the shear bolt resistance.

Key words: screwed connection, direct shear, oblong, support plates, resistance.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
2.1	Objetivo geral.....	3
2.2	Objetivos específicos .....	3
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
3.1	Estruturas de armazenagens de grãos sólidos.....	4
3.1.1	Silos metálicos .....	4
3.1.1.1	Componentes estruturais de silos metálicos .....	5
3.2	Chapas laterais .....	5
3.2.1	Ligações parafusadas das chapas metálicas .....	5
3.3	Conjunto de elementos de fixação .....	6
3.3.1	Parafusos sem qualificação estrutural.....	7
3.3.2	Parafusos com qualificação estrutural.....	7
3.3.2.1	Dimensões do parafuso .....	9
3.3.2.2	Proteção contra corrosão e tratamento térmico.....	10
3.3.3	Porca e arruela .....	10
3.4	Dimensionamento de silos metálicos .....	11
3.4.1	Ações permanentes .....	11
3.4.2	Ações variáveis.....	12
3.4.3	Ações excepcionais .....	12
3.4.4	Teoria de pressões .....	12
3.5	Normas brasileiras recomendadas no dimensionamento de chapas metálicas à tração.....	15
3.5.1	Recomendações gerais: NBR 14762 (ABNT, 2010).....	15
3.5.2	Recomendações gerais: NBR 8800 (ABNT, 2008).....	16
3.6	Dimensionamento da resistência à tração das chapas metálicas – NBR 14762 (ABNT, 2010).....	16
3.7	Propriedades Metalúrgicas e Mecânicas dos Parafusos .....	20
3.7.1	Propriedades Metalúrgicas.....	20
3.7.2	Propriedades mecânicas.....	21
3.8	Determinação da resistência de parafusos estruturais .....	22
3.8.1	Análise das forças atuantes nos elementos roscados .....	22
3.8.2	Estado limite das ligações parafusadas .....	22
3.8.2.1	Dimensão dos furos .....	23
3.8.2.2	Espaçamentos mínimos.....	24
3.8.2.3	Espaçamentos máximos .....	25

3.8.2.4	Rasgamento entre furos ou entre furo e borda.....	26
3.8.2.5	Pressão de contato – esmagamento.....	26
3.8.2.6	Força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso .....	27
3.8.2.6.1	Pela NBR 14762 (ABNT, 2010) e NBR 8800 (ABNT, 2008) .....	28
3.8.2.6.2	Pela ANSI AISI S100:2007-S .....	29
3.8.2.6.3	Pelo EUROCODE 3 – Parte 1.3:2006 .....	30
3.8.2.6.4	Pelo método da resistência dos materiais .....	30
3.9	Determinação das propriedades mecânicas dos materiais metálicos.....	31
3.9.1	Determinação das propriedades mecânicas de parafusos métricos – ASTM F606 e ASTM A143M .....	31
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
4.1	Resistência ao cisalhamento de cálculo dos parafusos.....	33
4.1.1	Resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso tradicional .....	33
4.1.2	Resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso alternativo .....	34
4.2	Confecção das amostras do parafuso alternativo.....	35
4.3	Ensaio de cisalhamento direto dos parafusos tradicional e alternativo .....	37
4.4	Chapas metálicas do corpo do silo.....	38
4.5	Resistência de cálculo das chapas de ligação para simulação do efeito da chapa lateral de silo metálico.....	40
4.5.1	Determinação da tensão de ruptura das chapas de ligação – Ensaio de tração.....	40
4.5.2	Verificação do esmagamento e rasgamento das chapas de ligação .....	42
4.6	Ensaio de cisalhamento dos parafusos utilizando a chapa de ligação .....	43
4.6.1	Resistência ao cisalhamento do parafuso tradicional utilizando a chapa de ligação.....	44
4.6.2	Resistência ao cisalhamento do parafuso alternativo utilizando a chapa de ligação.....	44
4.7	Análise estatística pelo ensaio de cisalhamento direto dos parafusos.....	45
4.7.1	Erro de modelo ou coeficiente profissional .....	46
4.7.2	Carta de controle – Gráfico de valores individuais a amplitude móvel .....	47
4.8	Análise estatística para o ensaio de cisalhamento dos parafusos utilizando as chapas de apoio .....	47
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
5.1	Características físicas da ruptura na área de cisalhamento de ambos os tipos de parafusos.....	48
5.1.1	Ensaio de cisalhamento direto .....	48
5.1.2	Ensaio de cisalhamento utilizando as chapas de apoio.....	49
5.2	Análise estatística do parafuso tradicional por cisalhamento direto.....	50

5.2.1	Suposições do modelo.....	52
5.2.1.1	Análise de normalidade.....	52
5.2.1.2	Análise da aleatoriedade.....	53
5.2.1.3	Análise de independência.....	53
5.3	Análise estatística da resistência do parafuso alternativo ao cisalhamento direto.....	54
5.3.1	Suposições do modelo.....	56
5.3.1.1	Análise de normalidade.....	56
5.3.1.2	Análise da aleatoriedade.....	57
5.3.1.3	Análise de independência.....	57
5.4	Comparações de média para os parafusos por cisalhamento direto – Teste t de <i>student</i> .....	58
5.5	Análise comparativa da resistência dos parafusos por cisalhamento direto ..	59
5.6	Erro modelo do parafuso alternativo pelo método do cisalhamento direto.....	60
5.7	Carta de controle de ambos os tipos de parafusos.....	61
5.8	Análise estatística do parafuso tradicional utilizando a chapa de apoio 3,35 mm.....	63
5.8.1	Suposições do modelo.....	64
5.8.1.1	Análise de normalidade.....	64
5.8.1.2	Análise da aleatoriedade.....	65
5.8.1.3	Análise de independência.....	65
5.9	Análise estatística do parafuso alternativo com a utilização das chapas de apoio 4,00 mm.....	66
5.9.1	Suposições do modelo.....	67
5.9.1.1	Análise de normalidade.....	67
5.9.1.2	Análise da aleatoriedade.....	68
5.9.2	Comparações de média para os parafusos utilizando a chapa de apoio – Teste t de <i>student</i> .....	68
5.10	Análise comparativa da resistência de ambos os tipos de parafusos utilizando a chapa de apoio.....	69
5.11	Discussão geral.....	70
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>74</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>75</b>

## 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) .....	8
Tabela 2 Dimensões do parafuso .....	9
Tabela 3 Tipos de aços utilizados em silos .....	16
Tabela 4 Aços utilizados em silos .....	17
Tabela 5 Propriedades metalúrgicas de parafuso – Classe 8.8 com $d \leq 12,7$ mm .....	21
Tabela 6 Propriedades mecânicas de parafuso com qualificação estrutural – Classe 8.8.....	22
Tabela 7 Dimensões máximas dos furos em mm.....	23
Tabela 8 Dimensões máximas dos furos em mm.....	23
Tabela 9 Limitações relativas ao emprego de furos alargados ou alongados .....	24
Tabela 10 Tensão de tração e cisalhamento em parafusos .....	29
Tabela 11 Resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso tradicional diâmetro 10 mm .....	34
Tabela 12 Resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso alternativo seção 15x10 mm .....	35
Tabela 13 Resistência ao cisalhamento direto do parafuso tradicional .....	37
Tabela 14 Resistência de cisalhamento direto do parafuso alternativo .....	38
Tabela 15 Resistência ao esmagamento e rasgamento das chapas de apoio .....	42
Tabela 16 Resistência ao cisalhamento do parafuso tradicional utilizando chapas de apoio 3,35 mm.....	44
Tabela 17 Resistência de cisalhamento do parafuso alternativo utilizando chapas de apoio 4,00 mm.....	45
Tabela 18 Análise exploratória da carga de ruptura (kN) do parafuso tradicional por cisalhamento direto.....	50
Tabela 19 Aplicação dos testes de normalidade para as amostras de parafuso tradicional por cisalhamento direto.....	52
Tabela 20 Análise exploratória da carga de ruptura (kN) do parafuso alternativo por cisalhamento direto.....	55
Tabela 21 Aplicação dos testes de normalidade para as amostras de parafuso alternativo por cisalhamento direto.....	56
Tabela 22 Determinação da média da variável erro de modelo do parafuso alternativo – $M_{mean}$ .....	60
Tabela 23 Análise exploratória da carga de ruptura (kN) do parafuso tradicional utilizando a chapa de apoio .....	63

Tabela 24 Aplicação dos testes de normalidade para as amostras de parafuso tradicional com chapa de apoio .....	64
Tabela 25 Análise exploratória da carga de ruptura (kN) do parafuso alternativo utilizando a chapa de apoio .....	67
Tabela 26 Aplicação dos testes de normalidade para as amostras de parafuso alternativo com chapa de apoio .....	68

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Modelo de ligação parafusada entre chapas metálicas.....	6
Figura 2 Conjunto de fixação completo utilizado em silos.....	7
Figura 3 Partes constituintes do parafuso conforme ISO 4016 (2000). ....	9
Figura 4 Pressões atuantes em silos. ....	14
Figura 5 Prováveis linhas de ruptura da seção líquida da chapa metálica. ....	19
Figura 6 Caracterização dos furos conforme NBR 8800 (ABNT, 2008). a) Furo padrão. b) Furo alargado. c) Furo pouco alongado. d) Furo muito alongado.....	23
Figura 7 Espaçamentos mínimos nas ligações parafusadas.....	24
Figura 8 Espaçamentos mínimos nas ligações parafusadas de furos oblongos.....	25
Figura 9 Espaçamento máximo nas ligações parafusadas. ....	25
Figura 10 Rasgamento entre furos ou entre furo e borda nas ligações parafusadas.....	26
Figura 11 Esmagamento nas ligações parafusadas.....	27
Figura 12 Ruptura do parafuso nas ligações parafusadas.....	28
Figura 13 Parafusos para silo tradicional e parafuso alternativo. ....	33
Figura 14 Representação 3D do parafuso alternativo. ....	34
Figura 15 Amostras de parafusos até a obtenção do parafuso alternativo ideal. a) Amostras em plástico ABS. b) Amostras em aço e plástico ABS. ....	35
Figura 16 Vistas do parafuso alternativo, arruela de vedação e cabeça hexolobular. ....	36
Figura 17 a) Amostra do parafuso alternativo usinado. b) Amostras após têmpera e bicromatização.....	37
Figura 18 Ensaio de cisalhamento direto dos parafusos. a) Máquina universal de ensaios. b) Dispositivo para ensaio de cisalhamento direto do parafuso tradicional. c) Forma de inserção do parafuso no dispositivo. d) Dispositivo confeccionado para o ensaio de cisalhamento direto do parafuso alternativo. ....	38
Figura 19 Geometria das chapas onduladas.....	39
Figura 20 Modelo de chapa metálica. ....	39
Figura 21 Corpo de prova para ensaio a tração com espessura superior a 3 mm.....	41
Figura 22 Ensaio de tração do aço utilizado nas chapas de apoio 3,35 mm. ....	41
Figura 23 Ensaio de tração do aço utilizado nas chapas de apoio 4,00 mm. ....	42
Figura 24 Modelos de chapa apoio para ensaio de cisalhamento dos parafusos. A) Chapa de apoio para o parafuso tradicional. B) Chapa de apoio para o parafuso alternativo.....	43
Figura 25 a) Conjunto do parafuso tradicional para ensaio de cisalhamento. b) Conjunto do parafuso alternativo para ensaio de cisalhamento. ....	43
Figura 26 Conjunto do parafuso alternativo após o ensaio de cisalhamento.....	44

Figura 27 Corpos de prova do parafuso tradicional após ruptura por ensaio de cisalhamento direto. ....	48
Figura 28 Corpos de prova do parafuso alternativo após ruptura por ensaio de cisalhamento direto. ....	49
Figura 29 Corpos de prova do parafuso tradicional após ruptura por ensaio de cisalhamento com chapas de apoio. ....	49
Figura 30 a) Rasgamento das chapas de apoio 4,00 mm. b) Deformação plástica no parafuso alternativo. ....	50
Figura 31 Histograma das amostras de parafuso tradicional por cisalhamento direto. ....	51
Figura 32 Papel de probabilidade das amostras de parafuso tradicional por cisalhamento direto. ....	53
Figura 33 Análise de independência do parafuso tradicional utilizando a chapa de apoio. ..	54
Figura 34 Autocorrelação do parafuso tradicional por cisalhamento direto. ....	54
Figura 35 Histograma das amostras de parafuso alternativo por cisalhamento direto. ....	55
Figura 36 Papel de probabilidade das amostras de parafuso alternativo por cisalhamento direto. ....	57
Figura 37 Análise de independência do parafuso alternativo por cisalhamento direto. ....	58
Figura 38 Autocorrelação do parafuso alternativo por cisalhamento direto. ....	58
Figura 39 Box plot da comparação da carga de ruptura de ambos os tipos de parafusos por cisalhamento direto. ....	59
Figura 40 Carta de controle do parafuso tradicional por cisalhamento direto. ....	62
Figura 41 Carta de controle do parafuso alternativo por cisalhamento direto. ....	63
Figura 42 Histograma das amostras de parafuso tradicional utilizando a chapa de apoio. ....	64
Figura 43 Papel de probabilidade do parafuso tradicional utilizando a chapa de apoio. ....	65
Figura 44 Análise de independência do parafuso tradicional utilizando a chapa de apoio. ..	66
Figura 45 Autocorrelação do parafuso tradicional utilizando a chapa de apoio. ....	66
Figura 46 Papel de probabilidade do parafuso alternativo utilizando a chapa de apoio. ....	68
Figura 47 Box plot da comparação da carga de ruptura de ambos os tipos de parafusos utilizando a chapa de apoio. ....	69



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- A – Área
- Ab – Área bruta
- A<sub>be</sub> – Área efetiva
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- A<sub>n</sub> – Área líquida da seção transversal na região da ligação
- A<sub>no</sub> – Área líquida da seção transversal da barra fora da região de ligação
- AISI – Instituto Americano de ferro e Aço
- AS – Standard Australian
- ASME – American Society of Mechanical Engineers
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- BS EN – British Standard
- Conab – Companhia Nacional de Abastecimento
- ° C – Graus Celsius
- CQ – Costura Quíntupla
- CS – Costura Sêxtupla
- C<sub>p</sub> – Fator de correção
- C<sub>t</sub> – Coeficiente de redução da área líquida
- db – Diâmetro do parafuso
- d<sub>f</sub> – Dimensão do furo na direção perpendicular à solicitação
- e – Distância
- F<sub>rd</sub> – Força resistente de cálculo
- f<sub>u</sub>* – Limite de ruptura à tração
- f<sub>ub</sub>* – Limite de ruptura à tração do parafuso
- F<sub>vrđ</sub> – Força de cisalhamento resistente de cálculo
- f<sub>y</sub>* – Limite de escoamento à tração
- g – Espaçamento dos furos na direção perpendicular à solicitação
- HV – Dureza Vickers
- HB – Dureza Brinell
- HR – Dureza Rockwell
- ISO – International Organization for Standardization
- m – Metro
- mm – Milímetro
- MPa – Mega Pascal
- N – Newton
- NBR – Norma Brasileira

- NM – Norma Mercosul
- $N_{t,Rd}$  – 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
- $s$  – Espaçamento dos furos na direção da solicitação
- SAE – Sociedade dos Engenheiros Automotivos
- $t$  – Espessura
- $\tau$  – Tensão de cisalhamento
- $\tau_b$  – Tensão cisalhante nominal na falha do parafuso
- $\gamma$  – Coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral

## 1 INTRODUÇÃO

A agricultura tem sido o fator de garantia de superávit comercial brasileiro e a grande preocupação está no potencial produtivo que não equaliza com a capacidade dos armazéns e na distribuição inadequada pelo território nacional.

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, o Brasil colheu 210,50 milhões de toneladas de grãos na safra 2015/2016. Este volume representa 1,40% a mais do que a safra anterior, com aumento de 2,80 milhões de toneladas. No entanto, a produção agrícola brasileira sofre com a falta de espaços para guardar a colheita. Ainda segundo a CONAB, o déficit de capacidade de armazenagem chega a aproximadamente 26% para grãos.

O país enfrenta grandes problemas logísticos com o escoamento das safras e, para tentar melhorar esta situação, o governo estimula o agricultor a ter seu próprio armazém. As vantagens são imensas, principalmente na certeza do bom tratamento do produto. Produtos destinados à indústria de alimentos devem possuir garantia de qualidade, que é fundamental na definição do preço.

Vale ressaltar que a agricultura brasileira vem aumentando a área plantada, batendo recordes de produção. No entanto, para cada aumento de produção existe a necessidade do aumento da capacidade de armazenagem.

A demanda por silos é explicada pela necessidade de armazenar grandes quantidades de produtos durante longo período e em espaços reduzidos. 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.

Os silos são construídos com diversos materiais, mas a predominância é a utilização de silos 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.

Para que novas unidades de armazenamento sejam projetadas com segurança, eficiência e economia, é fundamental o correto dimensionamento da estrutura a partir das pressões que o produto ensilado solicita.

O corpo do silo é responsável pela absorção de grande parte das solicitações e o item mais oneroso na elaboração do projeto estrutural. Alternativas que possam diminuir o peso da estrutura podem ser alcançadas através do estudo da resistência das chapas laterais e das ligações parafusadas entre as mesmas. Portanto, o desenvolvimento de um novo método

e um novo elemento de fixação acarretam a mudança da concepção atual de montagem e dimensionamento do corpo do silo.

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

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

A elaboração do parafuso alternativo para a junção das chapas laterais visa melhorar e agilizar o sistema de montagem, garantir a estanqueidade e tem como propósito principal reduzir o peso das chapas laterais, assim minimizando custos de fabricação e, conseqüentemente, de venda ao produtor. No entanto, a proposta valida-se através da comparação do comportamento mecânico entre o parafuso tradicional e o parafuso alternativo.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Comparar o limite último de ruptura por cisalhamento do parafuso silo tradicional de diâmetro 10 mm, classe de resistência 8.8, com o parafuso alternativo para a utilização em silos metálicos para armazenagem de grãos.

### 2.2 Objetivos específicos

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

- a) Propor um parafuso alternativo, visando aumentar a resistência da ligação com a chapa lateral de silos metálicos, de acordo com as recomendações da NBR 14762 (ABNT, 2010) com mesmo peso do parafuso tradicional;
- b) Dimensionar o parafuso alternativo de classe 8.8 de acordo com as definições e recomendações dadas na ISO 4016 (2000);
- c) Ensaiar amostras do parafuso tradicional para obter o limite último de ruptura por cisalhamento direto;
- d) Confeccionar e ensaiar amostras do parafuso alternativo para obter o limite último de ruptura por cisalhamento direto;
- e) Comparar o estado limite último de resistência no cisalhamento direto do parafuso tradicional x parafuso alternativo;
- f) Determinar a força correta do parafuso alternativo;
- g) Ensaiar amostras do parafuso tradicional, utilizando uma chapa de apoio, para simulação da ligação com a chapa lateral do silo;
- h) Ensaiar amostras do parafuso alternativo, utilizando uma chapa de apoio, para simulação da ligação com a chapa lateral do silo;
- i) Verificar a influência da chapa de apoio no cisalhamento de ambos os tipos de parafusos.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Estruturas de armazenagens de grãos sólidos**

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. Assim, as estruturas de armazenagem usadas para a estocagem destes produtos são de grande importância para o desempenho econômico.

O armazenamento constitui uma prática de suma importância quando instalados próximos às regiões de colheita, minimizando as perdas em quantidade e qualidade a que estão sujeitos os produtos colhidos (FREITAS, 2001).

Silo é a designação dada para todos os tipos de construção para armazenamento de produtos granulares ou pulverulentos, equipado com dispositivos de carga e descarga, capaz de ser esvaziado por gravidade ou através de meios mecânicos ou pneumáticos (FREITAS, 2001).

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

Os silos são construídos com diversos materiais, como concreto armado, concreto protendido, madeira, alvenaria, fibras, plásticos e chapas metálicas.

##### **3.1.1 Silos metálicos**

Os silos metálicos possuem geometria cilíndrica e são constituídos de chapas metálicas lisas ou corrugadas e cobertura cônica. Atualmente são as unidades mais utilizadas no Brasil para o armazenamento de produtos granulares, devido a sua eficiência e seu baixo custo (ANDRADE Jr.; CALIL, 2007).

Silos de chapas corrugadas galvanizadas são normalmente unicelulares e possuem os elementos ligados por parafusos (RAVENET, 1977). A pré-fabricação de chapas corrugadas introduz rigidez transversal ao sistema. Porém, a resistência à compressão é diminuída, o que é compensado com o enrijecimento longitudinal pelo uso de perfis longitudinais (CALIL; CHEUNG, 2007).

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 (EN, 2006).

A geometria é um dos fatores na classificação dos silos, de acordo com BS EN 1991-4 (EN, 2006), denominam-se:

- a) Silos esbeltos: atendem a função altura/diâmetro  $(H/D) \geq 2,0$ ;
- b) Silos mediamente esbeltos: aqueles que atendam a relação  $1,0 < H/D < 2,0$ ;
- c) Silos baixos: que atendam a relação  $0,4 \leq H/D \leq 1,0$ .

### **3.1.1.1 Componentes estruturais de silos metálicos**

Os silos são divididos em duas partes: telhado e corpo.

A cobertura cônica, ou telhado, é composto por telhas galvanizadas que podem ser autoportantes ou apoiadas na estrutura do telhado.

O corpo, ou costado, é composto por chapas metálicas corrugadas e galvanizadas e reforçado com colunas metálicas dispostas no perímetro e, opcionalmente, com anéis metálicos tubulares ao longo da altura para minimizar as ações do vento.

Os silos têm dimensões comerciais que variam de 3 a 32 m de diâmetro por 3 a 32 m de altura, com volumes de 20 até 26.000 m<sup>3</sup>. Todo este conjunto encontra-se diretamente apoiado sobre uma base, com o costado fixo por parafusos a um anel rígido de concreto, que é independente da base (ANDRADE Jr.; CALIL, 2007).

## **3.2 Chapas laterais**

As chapas laterais estão entre as partes constituintes do silo responsáveis por receber os esforços de tração devido à pressão horizontal oriunda do carregamento dos grãos (SCALABRIN, 2008).

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

- a) Transmitir os esforços oriundos do atrito dos grãos para os montantes;
- b) Auxiliar na flambagem do silo sujeito ao esforço advindo do vento (quando vazio);
- c) Garantir a estanqueidade (SCALABRIN, 2008).

### **3.2.1 Ligações parafusadas das chapas metálicas**

As paredes dos silos metálicos geralmente são constituídas de chapas onduladas, calandradas para formar o ângulo necessário para compor o diâmetro do silo e perfuradas. Alguns 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 (ESTEVES, 1989).

As chapas laterais que compõem o corpo de um silo são unidas por parafusos com qualificação estrutural e acabamento superficial através do processo de zincagem ou bicromatização (Figura 1).

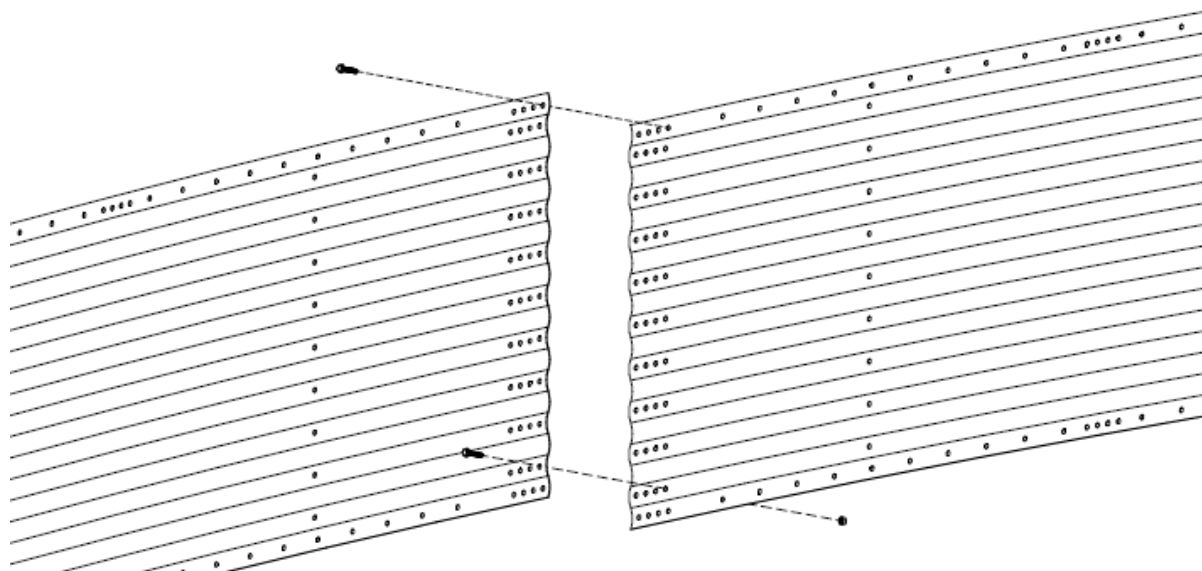


Figura 1 Modelo de ligação parafusada entre chapas metálicas.

As ligações são consideradas como a parte mais importante de uma estrutura reticulada, pois são responsáveis pela solidarização e pela transferência de esforços entre os elementos da mesma (BOLANDIM, 2011).

No Brasil, os fabricantes oferecem parafusos de alta resistência específicos para silos. O mais usual é com cabeça sextavada flangeada e arruela de neoprene alojada para garantir a estanqueidade contra a ação de contaminantes externos (chuva, poeira e umidade). Este tipo de arruela avaria quando há o aperto da porca em caso de a cabeça girar, atritando a arruela contra a chapa, rompendo-a.

### 3.3 Conjunto de elementos de fixação

O conjunto de fixação é formado essencialmente por parafuso, porca e arruela (Figura 2). Existem basicamente duas classes de parafusos no mercado: parafusos comuns e parafusos de alta resistência (CALIL; CHEUNG, 2007). A porca tem a função de unir as partes ligadas e travar por meio do parafuso. A arruela de neoprene, no caso de silos metálicos, se faz necessária para garantir a estanqueidade no interior do silo, devido aos contaminantes externos. A arruela metálica é utilizada para minimizar o esmagamento da porca pelas partes ligadas.



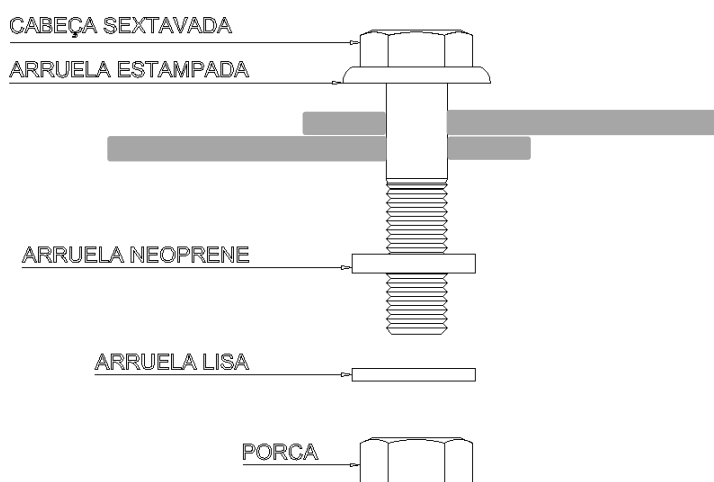


Figura 2 Conjunto de fixação completo utilizado em silos.  
Fonte: Adaptado de Esteves (1989).

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

As partes parafusadas não podem ser separadas por quaisquer materiais que não sejam os elementos de aço estrutural, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008).

### 3.3.1 Parafusos sem qualificação estrutural

Parafusos sem qualificação estrutural, também denominados parafusos comuns, são fabricados com aço a baixo carbono. A limitação de utilização destes parafusos é recomendada pela NBR 14762 (ABNT, 2010), ressaltando que não seja adotado no projeto valor superior a 300 MPa para a resistência à ruptura do parafuso na tração ( $f_u$ ).

Em casos de baixas solicitações, comuns em silos de pequena capacidade, o uso de parafusos comuns é economicamente viável, visto a recomendação da NBR 14762 (ABNT, 2010).

### 3.3.2 Parafusos com qualificação estrutural

Parafusos estruturais são fabricados com aço a médio carbono, com aço-liga ou tratamento térmico. Com isso, a sua resistência à tração pode ser várias vezes maior do que a dos parafusos comuns (CALIL; CHEUNG, 2007).

O aperto normal é permitido pela NBR 8800 (ABNT, 2008), exceto quando os parafusos, regidos pela ASTM A490, estão submetidos à tração ou a tração e cisalhamento,

e parafusos ASTM A325 sujeitos à 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 deslocar quando solicitadas por tração devido à alta pressão de atrito desenvolvida pelo aperto.

Devido às grandes solicitações, normalmente utilizam-se nos silos os parafusos com qualificação estrutural, com as características de resistência à tração dadas pela Tabela 1 da NBR 14762 (ABNT, 2010).

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 $N_{no}$ parafuso ( <i>fub</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).

Os projetos de ligações com parafusos ASTM A325 e ASTM A490 devem seguir as recomendações da NBR 8800 (ABNT, 2008), sendo que os 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 contemplam a ASTM A325 ou a ISO 4016 classe 8.8. Parafusos de aço-liga temperados e revenidos consideram a 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.

O parafuso mais utilizado em silos metálicos de acordo com o mercado brasileiro é o que segue 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.

A norma brasileira EB-168 – Propriedades mecânicas de elementos de fixação – Parafusos e prisioneiros (ABNT, 1991) também denominada NBR 8855, apresenta 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.

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

### 3.3.2.1 Dimensões do parafuso

Os fatores que intervêm na determinação das dimensões dos elementos que compõem o parafuso são: esforços mecânicos a que serão submetidos, condições ambientais, tipos de elementos que serão unidos, características dos materiais que estarão em contato com o conjunto, peso desejado, custo, normas de segurança e de legislação aplicáveis, facilidade de manutenção e necessidade de estanqueidade (YASSUDA, 2008).

As especificações quanto às dimensões de parafusos com diâmetro inferior a 12,50 mm devem atender as recomendações da ISO 4016 (2000) (Tabela 2 e Figura 3).

Tabela 2 Dimensões do parafuso

Dimensões do parafuso de diâmetro 10 mm conforme Figura 3	
Diâmetro do corpo - D máx	10
Largura da cabeça - F máx	16
Largura da cabeça - F mín	15,57
Largura da cabeça transversal - C mín	17,59
Espessura da cabeça - H nominal	6,4
Espessura da cabeça - H máx	6,85
Espessura da cabeça - H mín	5,95
Comprimento da rosca - T básico	25, 35 e 45
Comprimento total do corpo - L variável	25 a 120

Fonte: ISO 4016 (2000).

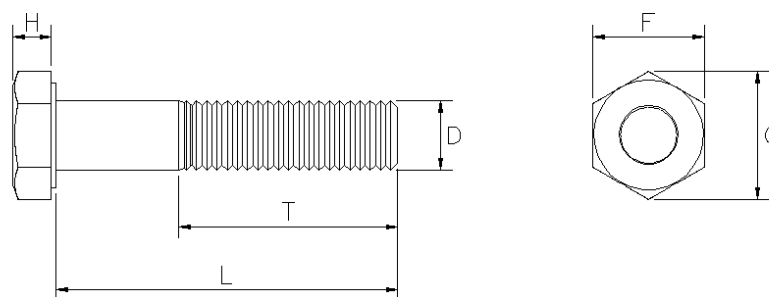


Figura 3 Partes constituintes do parafuso conforme ISO 4016 (2000).

Fonte: Adaptado de ISO 4016 (2000).

Ressalta-se a importância da análise das características do revestimento, pois poderá ocasionar mudança nas dimensões do elemento, uma vez que se acrescenta material,

umentando o raio das arestas e causando variações das dimensões devido a variações na espessura (YASSUDA, 2008).

Após a instalação, a extremidade no comprimento do parafuso deve coincidir ou ultrapassar a face externa da porca e, para isto, se faz necessário calcular uma folga no comprimento do mesmo.

### **3.3.2.2 Proteção contra corrosão e tratamento térmico**

Devido à existência de diferenças de potencial elétrico e a ausência de proteção, o metal base é exposto ao ambiente corrosivo. Neste caso, se faz necessário proteger os elementos de fixação contra a corrosão através de um revestimento.

Os tratamentos térmicos visam mudar as características mecânicas da superfície do substrato, sendo utilizados antes e depois da aplicação do revestimento. A difusão dos elementos permite a formação de interfaces diluídas, homogeneizando o revestimento e eliminando o hidrogênio retido.

### **3.3.3 Porca e arruela**

A função da porca no conjunto de fixação consiste em prender um conjunto mecânico por meio da pressão gerada por um torque de aperto (YASSUDA, 2008).

As dimensões das porcas hexagonais pesadas devem satisfazer as especificações da ASME B18.2.6.

A função da arruela lisa metálica é proteger a chapa do silo contra a abrasão ocasionada pela porca durante o aperto do parafuso. Esta deve apresentar dimensões compatíveis com a porca utilizada, não a considerando no cálculo de resistência das ligações (ESTEVES, 1989).

As dimensões das arruelas são especificadas tanto pela NBR 8800 (ABNT, 2008) quanto pela ASTM A325 (ASTM, 2004) recomendando a ASME B18.2.6 e esta, por sua vez, em conformidade com as especificações da ASTM F436 quando planas circulares e biseladas quadradas.

De acordo com o item 6.7.4.2 da NBR 8800 (ABNT, 2008) devem ser utilizadas arruelas endurecidas sob o elemento que não gira durante o aperto, no caso dos parafusos ASTM A490 assentados em aço estrutural com resistência ao escoamento inferior a 280 MPa, e sob o elemento que gira durante o aperto.

Quando uma das faces externas das partes parafusadas for superior a 1:20 de inclinação em relação ao plano normal ao eixo do parafuso, deve-se utilizar arruelas

endurecidas para compensar a ausência de paralelismo, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008).

A arruela de neoprene é alocada na cabeça do parafuso e impede a infiltração da água pela folga entre o furo e o corpo do parafuso, devendo apresentar plasticidade suficiente para deformar-se sob pressão do aperto do parafuso. O material de neoprene deve possuir resistência ao envelhecimento precoce e aos raios ultravioletas. Comercialmente apresentam espessuras entre 2,40 e 3,70 mm para parafusos de tamanho 8 e 10 mm (ESTEVES, 1989).

### **3.4 Dimensionamento de silos metálicos**

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

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

Independente da complexidade estrutural ou do material utilizado, deve-se exigir que o projeto estrutural desempenhe as funções para as quais foi concebido com eficiência, economia, segurança e durabilidade estrutural (HEZEL, 2007).

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

#### **3.4.1 Ações permanentes**

Nas combinações das ações, o peso próprio do silo é considerado uma ação permanente. Seu valor é estimado conforme experiências anteriores e históricos de silos já dimensionados (SCALABRIN, 2008).

A grande 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).

### 3.4.2 Ações variáveis

Para estas ações, pondera-se no mínimo de três naturezas diferentes:

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

### 3.4.3 Ações excepcionais

As ações excepcionais constituem carregamentos com probabilidade eventual de ocorrer. Considera-se pelos menos duas ações deste gênero no dimensionamento de silos:

- a) Cargas devido a explosões de pó: silos podem armazenar produtos que podem causar explosões e devem ser previstas ventilação de ar e resistência a sobrepressão de explosões na estrutura (EN, 2006);
- b) Impacto de veículos: quando não for prevista proteção adequada na estrutura do silo contra possíveis colisões (CALIL; CHEUNG, 2007).

### 3.4.4 Teoria de pressões

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

Por um longo período, estudos teóricos e experimentais para a determinação das pressões em silos foram realizados por pesquisadores de todo o mundo, permitindo fundar alguns consensos em tópicos, mas não um modelo definitivo que estabelecesse com precisão as pressões em silos (ESTEVES, 1989).

No estudo das pressões, há três fatores de interesse que, segundo Hezel (2007), merecem destaque. O primeiro é o econômico, pois o projeto de dimensionamento de um silo depende exclusivamente das pressões ocorridas em seu interior e, quando calculadas da maneira mais precisa possível, melhor é a relação custo benefício do investimento monetário

na estrutura com o produto armazenado. O segundo é o científico: mesmo após tantas pesquisas, os silos constituem estruturas complexas, combinando comportamentos estruturais de diferentes materiais, variabilidades nos produtos armazenados que acarretam nas mudanças das pressões. O terceiro é o ponto social, uma vez que vários problemas são prevenidos devido à falta de conhecimento estrutural das estruturas de armazenamento.

No projeto de silos, de acordo com Hezel (2007), as ações mais influentes no dimensionamento estrutural são as ações advindas do produto armazenado, que exercem pressões nas paredes laterais e no fundo do silo. A teoria de Janssen (1895) é utilizada por muitas normas internacionais 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.

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).

De maneira simplificada, podem-se descrever as pressões nas paredes verticais atuantes perpendicularmente na parede do silo como pressões horizontais ( $p_h$ ). 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 monotonamente com o aumento da altura. No fundo do silo, atuam pressões denominadas pressões verticais ( $p_v$ ), conforme descritas pela Figura 4.

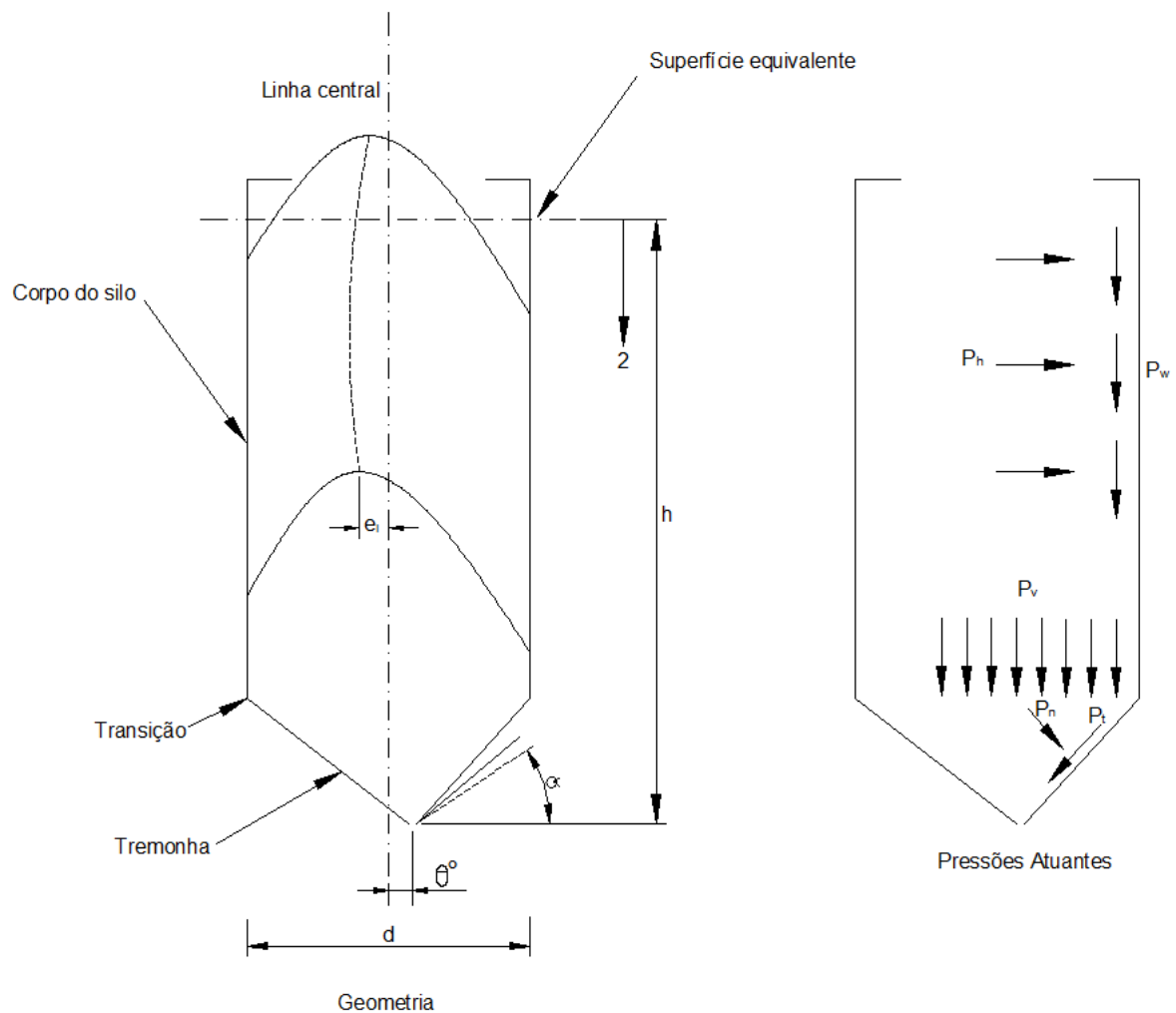


Figura 4 Pressões atuantes em silos.  
Fonte: Adaptado de Esteves (1989).

O equilíbrio de parte do peso do produto é distribuído nas paredes do silo através da pressão de atrito por meio de 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, como ocorre em pressões hidrostáticas, e sim um crescimento de característica exponencial tendendo a um valor máximo (RAVENET, 1992).

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

As pressões dos produtos armazenados são definidas pelas teorias. O princípio básico iniciou-se com Rankine, 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 processo de descarregamento, há de se prever sobrepressões localizadas dependendo do tipo de fluxo e das interferências ao escoamento do material armazenado. Conforme Calil (1990), na descarga do produto tem-se um aumento das pressões horizontais; porém, 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, no que se referem à determinação das pressões em silos, basicamente apoiam-se em duas teorias: 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.

### **3.5 Normas brasileiras recomendadas no dimensionamento de chapas metálicas à tração**

As sínteses que seguem referem-se à compilação das normativas brasileiras propostas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, sendo:

- 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).

#### **3.5.1 Recomendações gerais: NBR 14762 (ABNT, 2010)**

A verificação das condições de trabalho do parafuso proposto é regida por esta normativa brasileira. A utilização desta norma se dá pelo fato de o emprego de normas estrangeiras para o desenvolvimento de projetos estruturais em perfis de aço formados a frio terem acarretado algumas incompatibilidades com outras normas brasileiras de caráter mais geral, como, por exemplo, a NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento (ABNT, 1984).

Esta norma traz as ações e combinações pelo método dos estados limites e institui 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 utilização do material se dá pelo uso de aços com ou sem qualificação estrutural e que possuam propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio. Quanto ao uso de elementos de fixação, o parafuso é qualificado conforme seu uso, sendo: estrutural, comum ou de alta resistência.

Aços com qualificação estrutural devem atender 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 devem possuir “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).

### 3.5.2 Recomendações gerais: NBR 8800 (ABNT, 2008)

Nos itens referentes à análise desta dissertação de mestrado, quando não há considerações pertinentes ao caso na NBR 14762 (ABNT, 2010), sugere-se a utilização das recomendações desta normativa.

A normativa NBR 14762 (ABNT, 2010) não cita quais as especificações que carecem de ser adotadas para a qualificação do parafuso estrutural. Assim, seguir-se-á as recomendações da normativa NBR 8800 (ABNT, 2008).

### 3.6 Dimensionamento da resistência à tração das chapas metálicas - NBR 14762 (ABNT, 2010)

A escolha do tipo de aço para silos dependerá das propriedades mecânicas requeridas, 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 à resistência dos tipos de aços. Os principais tipos de aços utilizados em silos estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 Tipos de aços utilizados em silos

Tipos	Propriedades mecânicas		Aplicações	Produto
	$F_y$ (MPa)	$F_u$ (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 ZAR 345, denominados pela classe G350, são designados pela norma padrão australiana AS1397 (AS, 2011). Inclui-se nesta normativa a classe G450, recentemente utilizada nos silos de maior capacidade devido à elevada solicitação das pressões. Inclusive, estuda-se atualmente a possibilidade de implantação do aço LNE550 regido pela NBR 6656 Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade (ABNT, 2008). Na Tabela 4 encontram-se as especificações de aços utilizados em silos regidos pela AS1397 (AS, 2011) e NBR 6656 (ABNT, 2008).

Tabela 4 Aços utilizados em silos

Norma:	AS1397:2011	AS1397:2011	NBR 6656:2008
Designação da grade:	G350	G450	LNE550
Limite de escoamento mínimo:	350 MPa	450 MPa	550 MPa
Limite de ruptura mínimo:	420 MPa	480 MPa	600 MPa
Alongamento mínimo:	15%	10%	15%
Galvanização:	Z350	Z350	À fogo

Fonte: AS1397 (AS, 2011) e NBR 6656 (ABNT, 2008).

A verificação da força axial de tração resistente de cálculo,  $N_{t,Rd}$ , das chapas metálicas parafusadas são obtidas 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, de acordo com a NBR 14762 (ABNT, 2010). No entanto, além da  $N_{t,Rd}$ , a resistência das chapas laterais do silo são definidas incluindo 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.

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

No dimensionamento, 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) Para o escoamento da seção bruta:

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

b) Para a ruptura da seção líquida fora da região de ligação:

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

c) Para a ruptura da seção líquida na região de ligação:

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

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;

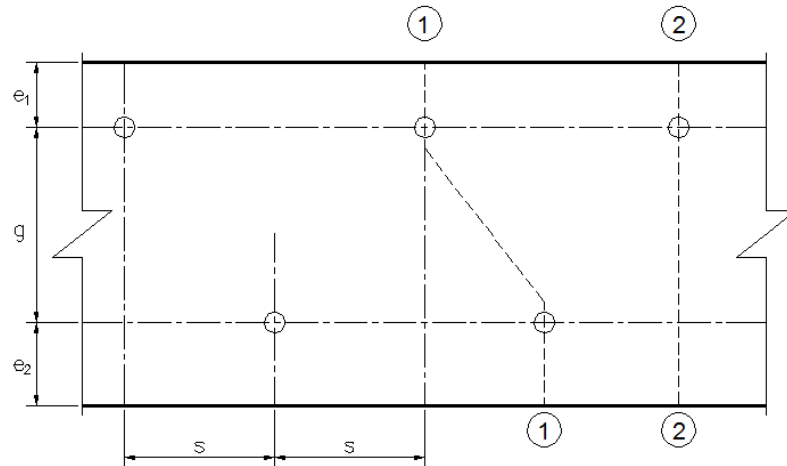
t - é a espessura da parte conectada;

g - é o espaçamento dos furos na direção perpendicular à solicitação (Figura 5). 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 5;

$f_y$  - 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 5 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:

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

Necessita-se permanecer atento no caso de divergências das condições acima colocadas. 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  $e_1 + e_2$ .

### **3.7 Propriedades Metalúrgicas e Mecânicas dos Parafusos**

#### **3.7.1 Propriedades Metalúrgicas**

De maneira geral, as ligas ferrosas são aquelas nas quais o ferro é o principal componente, mas o carbono, bem como outros elementos de liga podem estar presentes. De acordo com Callister (1991), classificam-se em três tipos de ligas ferrosas baseadas no teor de carbono: ferro, aço e ferro fundido.

Analogamente, o aço é uma liga metálica composta principalmente de ferro e de pequenas quantidades de carbono, geralmente entre 0,008% a 2,11%.

Os ferros fundidos também são ligas ferro carbono. No entanto, diferem-se dos aços por terem em sua estrutura uma maior quantidade de carbono, compreendida entre 2,11% e 6,70%. Estes são classificados em função de seu teor de carbono, como aços de alto, médio e baixo carbono. Temos ainda outras designações como aços liga, aços ferramentas e diversos aços especiais desenvolvidos para diversas aplicações (CALLISTER, 1991).

Para facilitar os esquemas de designação dos aços, devido à grande quantidade disponível no mercado, houve a necessidade de um método de padronização para possibilitar a identificação. Para isso, a designação desenvolvida foi uma metodologia numérica que com sua leitura é possível definir os elementos de liga e o conteúdo de carbono dos aços.

A Sociedade dos Engenheiros Automotivos (SAE), o American Institute of Steel and Iron (AISI) e a American Society for Testing and Materials (ASTM) são responsáveis pela classificação e especificação de aços, bem como de outras ligas. A designação AISI/SAE para estes aços é um número de 4 dígitos: os 2 primeiros dígitos indicam o teor do elemento de liga; os 2 últimos, a concentração de carbono.

A designação das propriedades mecânicas definidas pela ISO se dá através do código "X,Y". Ocorre que nem todas as designações fornecem valores exatos, mas em ordem de grandeza, dão razoáveis, aproximações. O "X" corresponde a 1/100 da resistência última à tração do parafuso em MPa, e o "Y" equivale a 10 vezes a relação entre a resistência ao escoamento e a resistência a ruptura, ou seja,  $10 \cdot (f_y / f_u)$  (CALIL; CHEUNG, 2007).

As propriedades metalúrgicas dos parafusos com qualificação estrutural, designados pela ASTM A325, regulamentam os diâmetros 12,7 mm até 38,1 mm. Quando o diâmetro for inferior ao valor limite especificado, deve-se utilizar o recomendado pela ISO 898-1 (2013) com têmpera a 425 °C, conforme Tabela 5.

Tabela 5 Propriedades metalúrgicas de parafuso – Classe 8.8 com  $d \leq 12,7$  mm

Propriedade metalúrgica	Aço carbono com aditivo e temperado		Aço carbono temperado	
	Composição química -%		Composição química -%	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Carbono - C:	0,15	0,40	0,25	0,55
Fósforo – P:	-	0,035	-	0,035
Sulfúrico – S:	-	0,035	-	0,035
Boro – B:	-	0,003	-	-

Fonte: ISO 898-1 (2013).

### 3.7.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos materiais são determinadas por experimentos de laboratório que replicam tanto quanto possível as condições da natureza da carga aplicada, e da magnitude, com o tempo e as condições ambientais.

Os materiais, quando em trabalho, são submetidos a forças em tais situações que se faz necessário conhecer as características do material e projetar um elemento estrutural de tal maneira que a deformação resultante não exceda seus limites e a fratura do material não ocorra. O comportamento mecânico do material reflete a correlação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada (CALLISTER, 1991).

As propriedades dos materiais podem ser afetadas por parâmetros diversos, dos quais os principais são composição química, histórico termomecânico do material, geometria, temperatura, estado de tensões e velocidade de deformação da estrutura. No caso específico do aço, o fator mais importante na determinação das propriedades é a composição química.

Para o aço liga ferro-carbono, as propriedades mecânicas são sensíveis ao teor de carbono. Alguns dos aços mais comuns são classificados de acordo com a concentração de carbono, isto é, em tipos baixo carbono, médio carbono e alto carbono.

Nos aços carbono comuns, os elementos carbono e manganês influenciam no controle de resistência, ductilidade e soldabilidade. Porém, o carbono afeta a ductilidade e a soldabilidade do aço. Assim, pequenas quantidades de outros elementos de liga são utilizadas na melhoria das propriedades do aço, obtendo o máximo desempenho em propriedades de uma liga (CALLISTER, 1991).

As propriedades mecânicas dos parafusos com qualificação estrutural, da classe de resistência 8.8, designados pela ASTM A325, regulamentam os diâmetros 12,7 mm até 38,1 mm. Quando o diâmetro for inferior ao valor limite especificado, deve-se utilizar o recomendado pela ISO 898-1 (2013). De acordo com a ISO 4016 (2000), para diâmetros inferiores ou iguais a 39 mm também se recomenda utilizar as propriedades da ISO 898-1 (2013), conforme Tabela 6. Quando existir um risco de decapagem da porca devido ao aperto excessivo, recomenda-se utilizar como referência a ISO 898-2 (2012).

Tabela 6 Propriedades mecânicas de parafuso com qualificação estrutural – Classe 8.8

Propriedade mecânica	Classe 8.8 com $d \leq 12$ mm	
	Mínimo	Máximo
Tensão admissível – N/mm <sup>2</sup> :	800	800
Dureza Vickers – HV:	250	320
Dureza Brinell – HB:	238	304
Dureza Rockwell – HR:	22	32
Alongamento a 0,2% não proporcional – N/mm <sup>2</sup> :	640	
Stresse sob prova de carga – N/mm <sup>2</sup> :	580	
Torque – N.m:	ISO 898-7	
Alongamento depois da fratura –%:	12	
Redução da área depois da fratura –%:	52	

Fonte: ISO 898-1 (2013).

### 3.8 Determinação da resistência de parafusos estruturais

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008) podem ser utilizados outros tipos de parafusos com qualificação estrutural em vez dos descritos pela 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 comprovações das propriedades mecânicas realizam-se por intermédio de ensaios em escala natural. As medidas do diâmetro do fuste e as áreas de contato sob a cabeça e porca, ou suas equivalentes, não podem ser inferiores às especificações da norma ASME B18.2.6 para parafuso e porca de mesmas dimensões nominais (ABNT, 2008).

#### 3.8.1 Análise das forças atuantes nos elementos roscados

O dimensionamento da resistência da ligação parafusada se dá baseada numa carga de trabalho agindo sobre esse conjunto. A resultante desta carga de trabalho pode acarretar uma força axial, uma força transversal, um momento de flexão e um momento de torque, dependendo de cada caso (YASSUDA, 2008). Neste estudo, considerar-se-á apenas a resultante da força de tração nas chapas metálicas, no sentido do cisalhamento do parafuso.

#### 3.8.2 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). Este quesito é irrelevante nesta



dissertação, pois o objetivo é comparar o limite último de resistência ao cisalhamento do parafuso tradicional e do parafuso alternativo.

### 3.8.2.1 Dimensão dos furos

Nas ligações cuja solicitação seja normal ao eixo dos parafusos, quando forçados ao cisalhamento, furos alongados ou muito alongados devem ter a dimensão alongada do furo no sentido normal à solicitação. No entanto, os furos não devem exceder as especificações da Tabela 7 e apresentar as características conforme Figura 6.

Tabela 7 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).

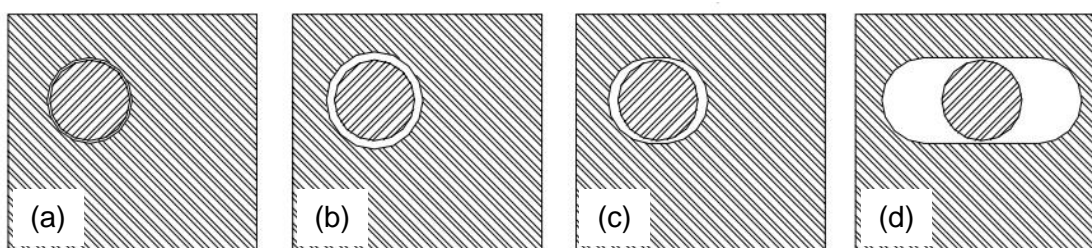


Figura 6 Caracterização dos furos conforme NBR 8800 (ABNT, 2008). a) Furo padrão. b) Furo alargado. c) Furo pouco alongado. d) Furo muito alongado.

Quando a espessura das partes ligadas for superior a 4,75 mm deve-se atender os requisitos da NBR 8800 (ABNT, 2008), conforme Tabela 8.

Tabela 8 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).

Os furos das partes ligadas, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), podem ser executados por punção, sub punção, alargado ou broqueado. No entanto, algumas limitações quanto ao emprego de furos alargados ou alongados devem ser atendidas, como descreve a Tabela 9.

Tabela 9 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.	
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).

### 3.8.2.2 Espaçamentos mínimos

Sendo  $d$  e  $d_b$  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 deve ser inferior a  $d$ , conforme demonstra a Figura 7 (NBR 14762, ABNT, 2010).

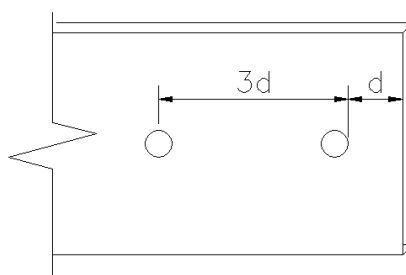


Figura 7 Espaçamentos mínimos nas ligações parafusadas.

Fonte: NBR 14762 (ABNT, 2010).

Recomenda-se utilizar  $3,0 d_b$  a distância livre entre furos. Para as distâncias entre um furo alargado ou alongado para qualquer borda deve-se acrescentar  $\beta d_b$  (Figura 8), sendo  $\beta$  definido por:

- $\beta = 0$  para furos alongados na direção paralela à borda considerada;
- $\beta = 0,12$  para furos alargados;
- $\beta = 0,20$  para furos pouco alongados na direção perpendicular à borda considerada;

- d)  $\beta = 0,75$  para furos muito alongados na direção perpendicular à borda considerada – NBR 8800 (ABNT, 2008).

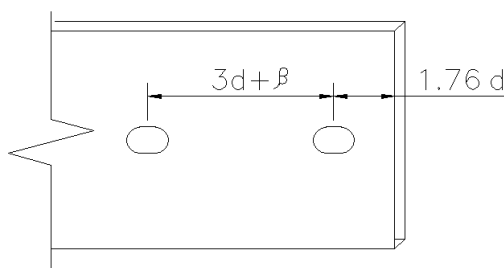


Figura 8 Espaços mínimos nas ligações parafusadas de furos oblongos.  
Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

No entanto, o diâmetro mínimo de  $d_b$  é 12,50 mm e, para ele, sugere-se a distância mínima do centro do furo à borda. Quando a mesma for cortada com serra ou tesoura, utilizar 22 mm e, em caso de corte da borda ser laminada ou cortada a maçarico, utilizar 19 mm.

### 3.8.2.3 Espaços máximos

Para as cobrejuntas sujeitas 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 cobrejunta,  $E$  módulo de elasticidade e  $f_y$  é a resistência ao escoamento do aço da cobrejunta (NBR 14762, ABNT, 2010).

Em ligações que vinculam uma chapa a outra chapa com espessuras maiores que 4,75 mm, em contato contínuo, e, para os aços resistentes a corrosão, o espaçamento máximo entre parafusos não deve exceder 14 vezes a espessura da parte ligada de menor espessura, nem 180 mm. A distância máxima de um parafuso às bordas não pode exceder 12 vezes a espessura da parte ligada, nem 150 mm, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), conforme Figura 9.

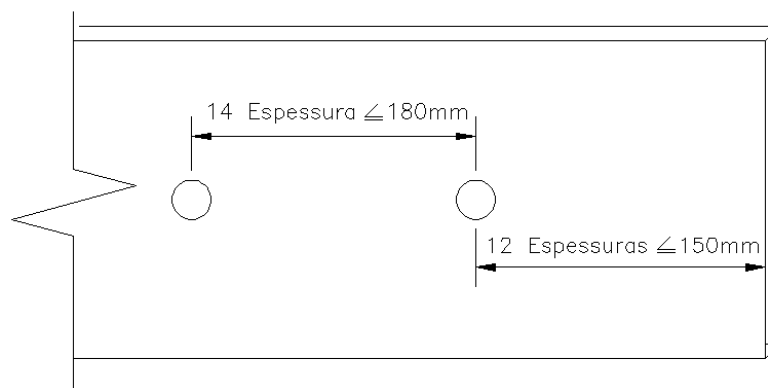


Figura 9 Espaçamento máximo nas ligações parafusadas.  
Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

### 3.8.2.4 Rasgamento entre furos ou entre furo e borda

A verificação da força resistente ao rasgamento entre furos (Figura 10) ou entre furo e borda são calculadas de acordo com a NBR 14762 (ABNT, 2010), descrita a seguir:

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

Onde:

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

$t$  - é a espessura do elemento conectado;

$\gamma$  - 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;

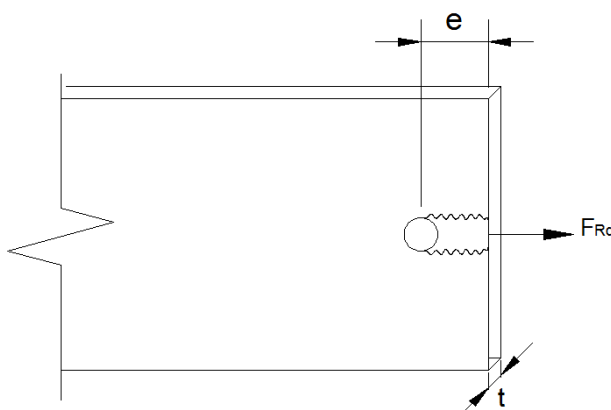


Figura 10 Rasgamento entre furos ou entre furo e borda nas ligações parafusadas.  
Fonte: NBR 14762 (ABNT, 2010).

### 3.8.2.5 Pressão de contato – esmagamento

A verificação da força resistente de cálculo ao esmagamento (Figura 11) é calculada de acordo com a NBR 14762 (ABNT, 2010) definida através da equação a seguir:

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

Onde:

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

$t$  - é a espessura do elemento conectado;

$\gamma$  - 1,35;

$d$  - é o diâmetro nominal do parafuso;

$f_u$  - é a resistência à ruptura do metal base;

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

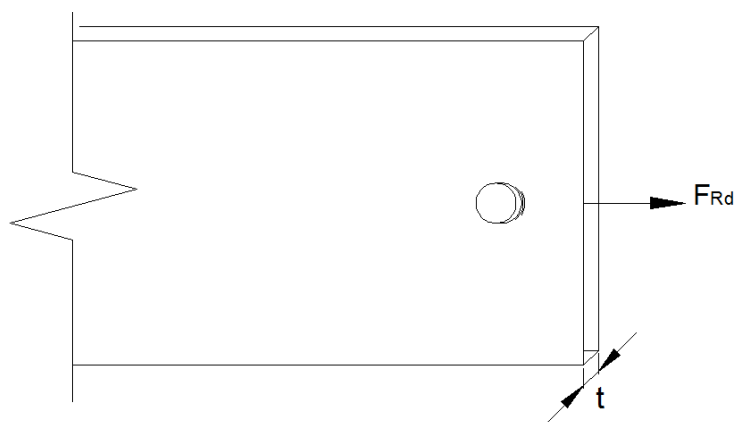


Figura 11 Esmagamento nas ligações parafusadas.  
Fonte: Adaptado de Esteves (1989).

### 3.8.2.6 Força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso

Winter (1956) classificou quatro modos de ruína da ligação e dentre eles constou 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 do mesmo, permitindo que alguns diagramas relacionando a razão da tensão cisalhante nominal na falha do parafuso ( $\tau_b$ ) e a resistência à ruptura do parafuso ( $f_{ub}$ ) com o diâmetro do parafuso ( $d$ ) fossem construídos.

Através 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 por:

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

### 3.8.2.6.1 Pela NBR 14762 (ABNT, 2010) e NBR 8800 (ABNT, 2008)

O dimensionamento da ligação parafusada no plano de corte, para o critério de resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso pelas normas NBR 14762 (ABNT, 2010) e NBR 8800 (ABNT, 2008) são dadas pela expressão:

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:

$\gamma$  - 1,35;

$f_{ub}$  - resistência a ruptura do parafuso à tração, verificada na Tabela 1 e ilustrada na Figura 12;

$A_b$  - 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.

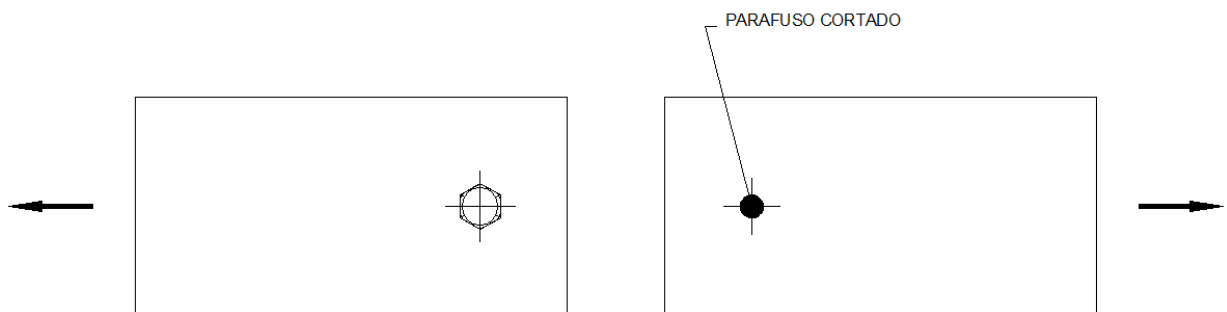


Figura 12 Ruptura do parafuso nas ligações parafusadas.  
Fonte: Adaptado de Esteves (1989).

### 3.8.2.6.2 Pela ANSI AISI S100:2007-S

De acordo com a AISI, a força resistente nominal do parafuso ( $P_n$ ) resultante do cisalhamento ou tração deve ser calculada de acordo com a Equação 16. Os condizentes fatores de segurança e de resistência são fornecidos na Tabela 10.

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

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 10.

Tabela 10 Tensão de tração e cisalhamento em parafusos

	Resistência a Tração			Resistência ao Cisalhamento		
	Fator de Segurança $\Omega$ (ASD)	Fator de Resistência $\Phi$ (LRFD)	Tensão Nominal $F_{nt}$ , ksi (MPa)	Fator de Segurança $\Omega$ (ASD)	Fator de Resistência $\Phi$ (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			101,0 (696)			59,0 (407)
Parafuso A354 Grade BD $6,40\text{mm} \leq d <$ $12,70\text{mm}$ quando o cisalhamento passa pela rosca	2,0	0,75	101,0 (696)	2,4	0,65	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 $6,40\text{mm} \leq d < 12,70\text{mm}$ 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).

Os correspondentes fatores de segurança e resistência utilizados quando o parafuso sofrer a combinação de tração e cisalhamento,  $\Omega$  e  $\Phi$ , devem estar de acordo com a Tabela 10 e devem ser calculados de acordo com as equações E3.4-2 e E3.4-3 da respectiva norma.

### 3.8.2.6.3 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) define a força resistente ao cisalhamento ( $F_{vRd}$ ) do parafuso:

- 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:

$\gamma_{M2}$  - 1,25;

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

$A_s$  - área transversal ao plano de corte do parafuso.

### 3.8.2.6.4 Pelo método da resistência dos materiais

A análise de tensões, esforços e as propriedades mecânicas dos materiais são os principais aspectos da resistência dos materiais. Por se tratar de pesquisa, as tensões de cisalhamento podem ser escritas na análise pura de resistência dos materiais.

A tensão é uma grandeza vetorial introduzida na resistência dos materiais em 1822, por Augustin Louis Cauchy. Conforme Beer e Johnston (1995), quando duas forças são aplicadas na direção transversal ao eixo de uma barra resultam na força cortante. Ao dividirmos a força constante ( $F$ ) pela área da seção transversal ( $A$ ), obtemos a tensão média de cisalhamento na seção ( $\tau$ ), conforme Equação 19:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{Eq. (19)}$$



### 3.9 Determinação das propriedades mecânicas dos materiais metálicos

Para a determinação das propriedades mecânicas de um material metálico são necessários vários ensaios, destrutivos ou não destrutivos. Os ensaios destrutivos promovem a ruptura ou a inutilização do material, como os ensaios de tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão e outros. Os ensaios não destrutivos, como o próprio nome sugere, preservam a integridade do material, são utilizados para determinar algumas propriedades físicas do metal e para detectar falhas internas do mesmo (SOUZA, 1982).

Dependendo da análise das forças atuantes, os ensaios mecânicos são realizados para determinar a resistência do material a cada um dos possíveis esforços: tração, compressão, flexão, torção, cisalhamento e pressão interna (SOUZA, 1982).

O ensaio mecânico adequado depende da finalidade do uso, dos tipos de esforços e propriedades mecânicas do material analisado. A ABNT regulamenta alguns ensaios a realizar em materiais metálicos, como:

- a) NBR ISO 6892-1: Ensaio de tração à temperatura ambiente (ABNT, 2013);
- b) NBR ISO 6892-2: Ensaio de tração à temperatura elevada (ABNT, 2013);
- c) NBR ISO 148-1: Ensaio de impacto por pêndulo Charpy (ABNT, 2013);
- d) NBR NM ISO 6507-1: Ensaio de dureza Vickers (ABNT, 2008);
- e) NBR NM ISO 6506-1: Ensaio de dureza Brinell (ABNT, 2010);
- f) NBR NM ISO 6508-2: Ensaio de dureza Rockwell (ABNT, 2008).

A ASTM F606 – Métodos de teste padrão para determinar as propriedades mecânicas dos parafusos, arruelas e rebites (métrico) (ASTM, 2009) estabelece os procedimentos para a realização de testes na determinação das propriedades mecânicas externas e internas de parafusos roscados métricos, arruelas e rebites.

#### 3.9.1 Determinação das propriedades mecânicas de parafusos métricos – ASTM F606 e ASTM A143M

A norma brasileira EB-168 (1991) agrupa os parafusos em classes de propriedades mecânicas, levando em conta os valores de resistência à tração, alongamento e tensão de escoamento, bem como estabelece as prescrições de peças roscadas, com diâmetro ISO inferior a 39mm, de qualquer forma geométrica de aço-carbono ou aço-liga.

A ASTM F606 (ASTM, 2009) não referencia os ensaios para a determinação da carga de ruptura por cisalhamento do parafuso. Pertinente a este estudo, preconiza a realização de no mínimo três leituras em cada amostra de produto acabado.

Segundo o fabricante de parafusos Industrial Rex Ltda., a normativa para este caso é a ASTM A143M – Prática padrão para a proteção contra fragilização de produtos siderúrgicos estruturais galvanizados e processo para determinar a fragilização (ASTM, 2014).

A prática da ASTM A143M (ASTM, 2014) abrange os procedimentos que podem ser seguidos para proteger os aços zincados por imersão a quente contra eventual fragilização após sua fabricação e descreve procedimentos de teste para a detecção de fragilização. É aplicável tanto em polegadas-libras ou unidades do Sistema Internacional de Medidas (SI).

O ensaio consiste na utilização de uma máquina universal de ensaios ou por meio de uma prensa com a carga aplicada lentamente, até a fratura do corpo de prova.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Esta dissertação foi desenvolvida utilizando como objeto de estudo dois elementos de fixação: parafuso silo tradicional e parafuso silo alternativo (Figura 13), através de um modelo de ligação parafusada em chapas metálicas, instrumentadas por meio de montagem manual e ensaiadas em prensa hidráulica, permitindo a verificação da resistência ao cisalhamento de ambos os tipos de parafusos.



Figura 13 Parafusos para silo tradicional e parafuso alternativo.

As cargas solicitantes nas chapas metálicas foram aplicadas até ocorrer a ruptura do parafuso. A interpretação dos dados coletados deu-se pelas análises estatísticas pertinentes.

O parafuso tradicional possui rosca inteira (Figura 13a) e rosca parcial (Figura 13b). Nota-se que o formato da cabeça pode variar, desde que dentro das especificações normativas. Comparou-se o parafuso alternativo, Figura 13c, com o parafuso tradicional de rosca parcial mais resistente que o parafuso tradicional de rosca inteira. O conjunto de porca e arruela apresentam-se na Figura 13 d.

### 4.1 Resistência ao cisalhamento de cálculo dos parafusos

A análise da tensão de cisalhamento foi efetuada através da Equação 19. No entanto, visando a utilização em silos metálicos, calculou-se a resistência ao cisalhamento através das Equações 14, 16 e 18, para ambos os tipos de parafuso, a fim de se obter dados para posterior comparação.

#### 4.1.1 Resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso tradicional

Verificou-se a resistência ao cisalhamento de cálculo recomendado pelas quatro normativas e definiu-se o valor teórico dado pela Equação 19, utilizando  $A_b$  e  $f_{ub}$  conforme

definidos na Tabela 11, tem-se uma força de cisalhamento de 62,83 kN. Como para o dimensionamento pela ANSI AISI S100 não traz a tensão nominal de resistência ao cisalhamento do parafuso ISO 898-1 (2013) e ou ISO 4016 (2000), utiliza-se o similar descrito pela NBR 8800 (ABNT, 2008) como sendo os contemplados na ASTM A325 – portanto,  $f_{ub}$  com 372 MPa. Os resultados obtidos provindos das quatro normativas apresentam-se na Tabela 11:

**Tabela 11 Resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso tradicional diâmetro 10 mm**

Norma	Dimensões do parafuso – mm:	Área bruta do parafuso no plano de corte ( $A_b$ ) – mm <sup>2</sup> :	Coefficiente de ponderação das ações - $\gamma$ - adm:	Resistência de ruptura do parafuso - $f_{ub}$ - MPa:	Resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso tradicional – kN:
NBR 8800 – $F_{vRd}$	$\Phi$ 10	78,54	1,35	800	23,27
NBR 14762 – $F_{vRd}$	$\Phi$ 10	78,54	1,35	800	23,27
ANSI AISI S100 - $P_n$	$\Phi$ 10	78,54	-	372 ( $F_{nv}$ )	29,22
EUROCODE 3 – Parte 1:3 – $F_{vRd}$	$\Phi$ 10	78,54	1,25	800	30,16

#### 4.1.2 Resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso alternativo

Para a apresentação ao mercado de um parafuso alternativo e mostrar as suas vantagens, a análise deve basear-se em dados de resistência ao cisalhamento juntamente com seu custo de venda. O preço do aço, em nível mundial, é avaliado basicamente pelo seu peso; portanto, o parafuso alternativo possui a mesma massa que o parafuso tradicional. Como o mesmo será montado sob forma de pino, o tamanho e o formato da cabeça do elemento tornam-se irrelevantes. Assim, retirou-se a massa dessas áreas e as implantou no plano de corte do oblongo, obtendo as dimensões no plano de corte com 10 mm por 15 mm, totalizando uma área bruta de 128,50 mm<sup>2</sup> (Figura 14).



Figura 14 Representação 3D do parafuso alternativo.

A área efetiva do parafuso no plano de corte ( $A_b$ ), pela verificação das normativas brasileiras NBR 8800 e NBR 14762, mantendo-se os mesmos parâmetros que os utilizados no parafuso circular, apresenta redução de 25% da área bruta do parafuso no plano de corte.

Utilizam-se a equação para determinar a tensão média de cisalhamento ( $\tau$ ) utilizando  $A_b$  e  $f_{ub}$  conforme definidos na Tabela 12, tem-se a resistência ao cisalhamento de cálculo de 77,10 kN. Para a resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso alternativo, verificou-se um aumento superior a 50% em ambas as normas, conforme Tabela 12.

Tabela 12 Resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso alternativo seção 15x10 mm

Norma	Dimensões do parafuso – mm:	Área bruta do parafuso no plano de corte ( $A_b$ ) – mm <sup>2</sup> :	Coefficiente de ponderação das ações - $\gamma$ - adm:	Resistência de ruptura do parafuso - $f_{ub}$ - MPa:	Resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso alternativo – kN:
NBR 8800 – $F_{vRd}$	15X10	128,50	1,35	800	38,07
NBR 14762 – $F_{vRd}$	15X10	128,50	1,35	800	38,07
ANSI AISI S100 - $P_n$	15X10	128,50	-	372 ( $F_{nv}$ )	47,80
EN3 – Parte 1:3 – $F_{vRd}$	15X10	128,50	1,25	800	49,34

#### 4.2 Confeção das amostras do parafuso alternativo

A partir da determinação do limite de resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso confeccionaram-se as amostras buscando haver conformidade mássica entre o parafuso tradicional e o parafuso alternativo. Realizaram-se testes na tentativa de aferir a montagem das chapas laterais dos silos, utilizando, primeiramente, amostras impressas em polietileno e usinadas em aço, conforme Figura 15 a) e b). Inicialmente observou-se apenas o aumento da resistência do parafuso; porém, devido ao aumento de massa, o custo x benefício os tornaram inviáveis.

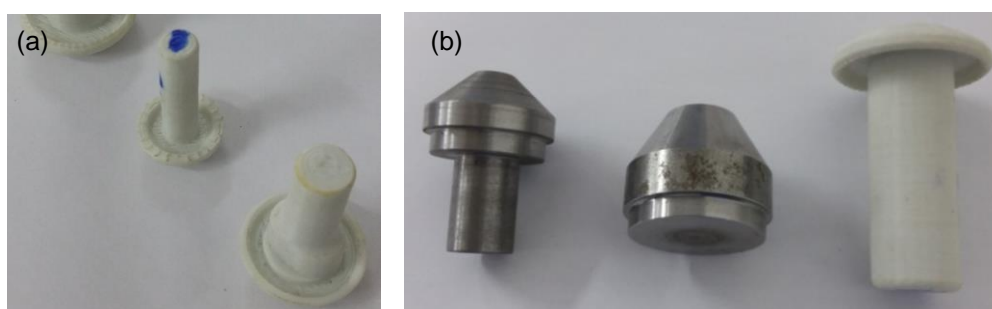


Figura 15 Amostras de parafusos até a obtenção do parafuso alternativo ideal. a) Amostras em plástico ABS. b) Amostras em aço e plástico ABS.

A matéria prima utilizada para a confecção das amostras do parafuso alternativo foi a mesma que a utilizada para a fabricação dos parafusos tradicionais, inclusive o fornecimento da barra de aço pelo próprio fabricante de parafusos. O processo de fabricação foi através da

usinagem de cada elemento em torno CNC. Para o processo automático de fabricação, o parafuso alternativo foi elaborado em arquivo digital, com especificações de rosca e cabeça de acordo com as recomendações normativas e a descrição detalhada do oblongo (Figura 16):

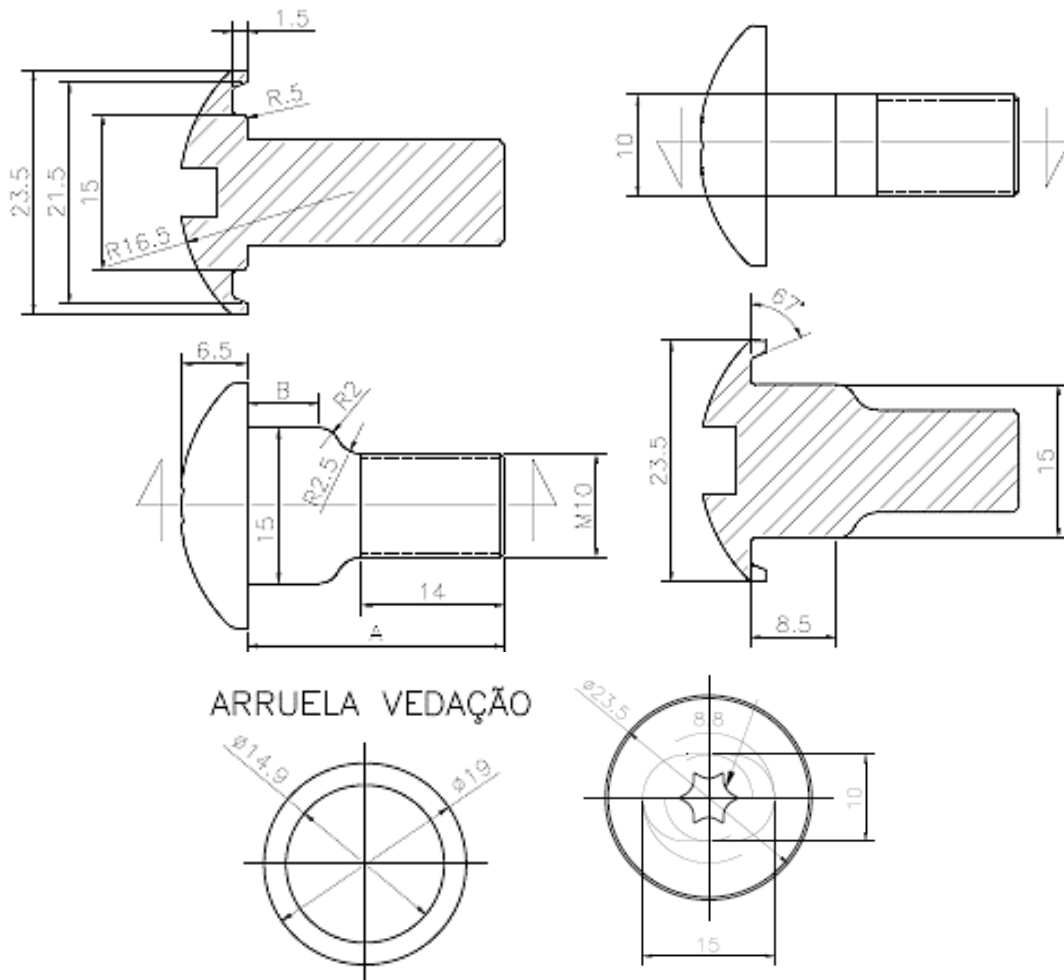


Figura 16 Vistas do parafuso alternativo, arruela de vedação e cabeça hexolobular.

Conforme visualiza-se nas Figuras 17a e 17b, devido à complexidade ferramental não foram executados o rebaixo para a arruela de vedação e a cabeça tipo hexolobular. Estas alterações não interferem na análise ao cisalhamento do parafuso. Após a confecção das amostras, para atingir as propriedades mecânicas e a proteção foram realizados os mesmos procedimentos de têmpera e bicromatização que as dos parafuso tradicional.



Figura 17 a) Amostra do parafuso alternativo usinado. b) Amostras após têmpera e bicromatização.

#### 4.3 Ensaio de cisalhamento direto dos parafusos tradicional e alternativo

Os ensaios foram realizados no laboratório da Industrial Rex Ltda através da máquina universal de ensaios do fabricante Emic modelo DL60000, calibrada pelo INMETRO em abril de 2016. Ensaíram-se 23 amostras do parafuso tradicional e, devido ao tamanho do lote fabricado, ensaiaram-se 16 amostras do parafuso alternativo, seguindo os procedimentos normativos recomendados pela ASTM A143M (ASTM, 2014), conforme visualiza-se na Figura 18.

Devido ao formato oblongo no plano de corte do parafuso alternativo, se fez necessária a confecção de um dispositivo para o ensaio de cisalhamento direto. Sua conformação se deu pela usinagem e têmpera a partir de um bloco de aço, conforme Figura 18d.

O parafuso tradicional apresentou os resultados individuais ao cisalhamento direto, descritos na Tabela 13:

Tabela 13 Resistência ao cisalhamento direto do parafuso tradicional

Amostra	Carga de ruptura – kN:	Amostra	Carga de ruptura – kN:	Amostra	Carga de ruptura – kN:
01	44,02	09	46,25	17	47,28
02	45,26	10	46,74	18	47,73
03	46,19	11	45,28	19	48,92
04	45,17	12	47,65	20	48,96
05	46,98	13	47,85	21	46,27
06	46,11	14	47,26	22	47,99
07	46,43	15	47,32	23	46,67
08	48,09	16	47,36		



Figura 18 Ensaio de cisalhamento direto dos parafusos. a) Máquina universal de ensaios. b) Dispositivo para ensaio de cisalhamento direto do parafuso tradicional. c) Forma de inserção do parafuso no dispositivo. d) Dispositivo confeccionado para o ensaio de cisalhamento direto do parafuso alternativo.

Na Tabela 14 estão apresentados os resultados individuais de cada amostra do parafuso alternativo ensaiados por cisalhamento direto:

Tabela 14 Resistência de cisalhamento direto do parafuso alternativo

Amostra	Carga de ruptura – kN:	Amostra	Carga de ruptura – kN:	Amostra	Carga de ruptura – kN:
01	107,31	07	102,12	13	111,18
02	110,11	08	108,85	14	107,84
03	104,54	09	109,34	15	111,26
04	102,96	10	111,59	16	104,92
05	102,41	11	107,52		
06	105,00	12	107,07		

#### 4.4 Chapas metálicas do corpo do silo

A determinação da resistência dos elementos de fixação é necessária para garantir a segurança dos componentes utilizados na construção do silo, especificamente as chapas metálicas. As características geométricas de um modelo de chapa lateral apresentam-se nas Figuras 19 e 20.



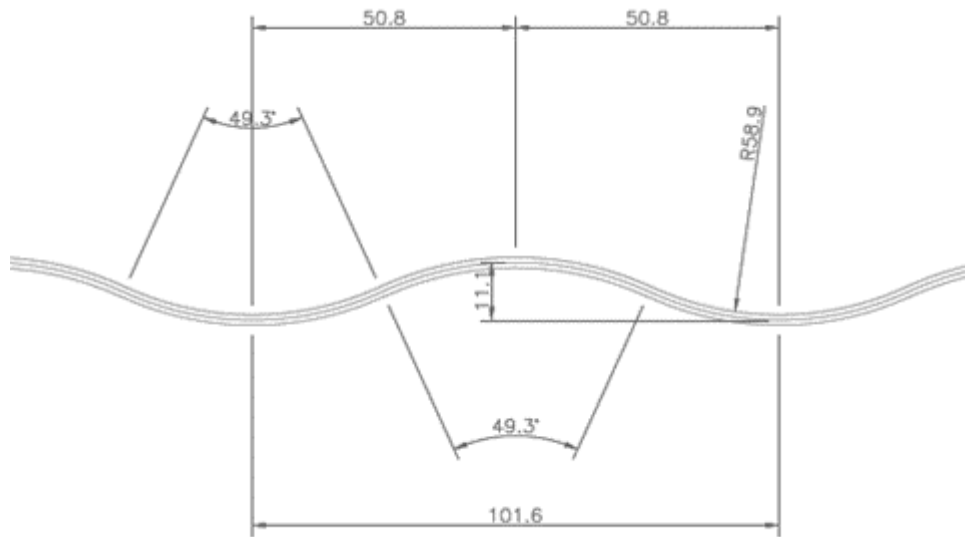


Figura 19 Geometria das chapas onduladas.

As paredes dos silos metálicos são formadas por chapas corrugadas e onduladas, presas onda por onda em chapas previamente calandradas e perfuradas.

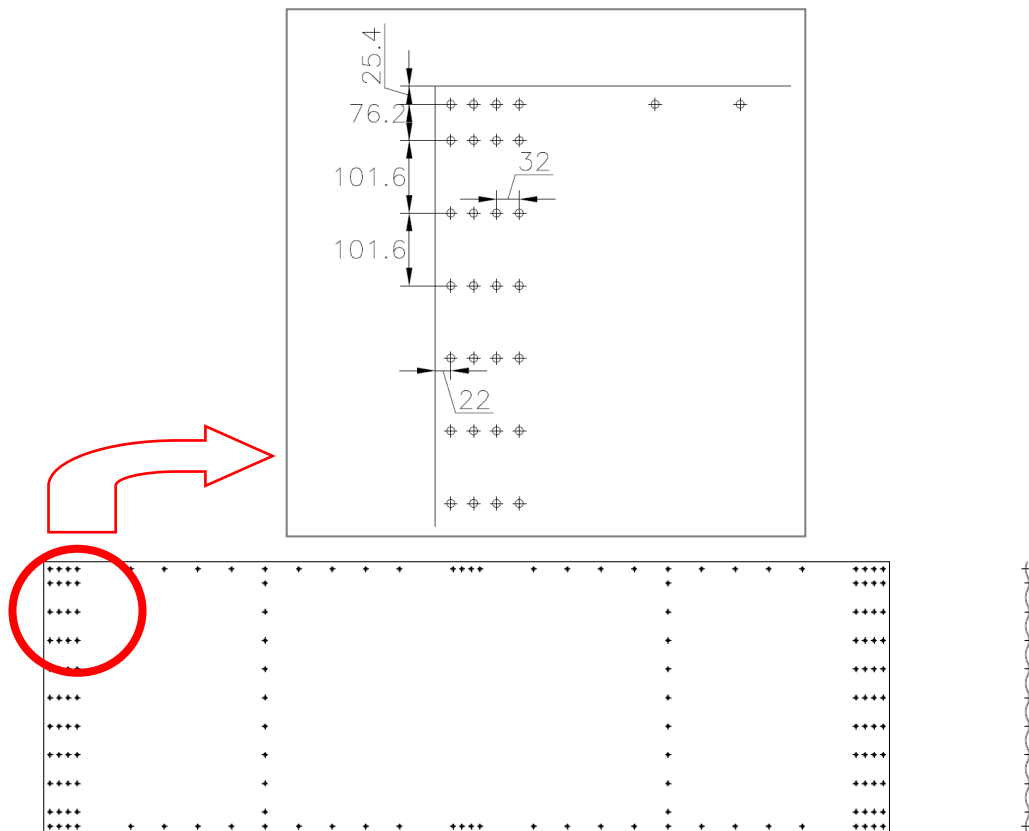


Figura 20 Modelo de chapa metálica.

As costuras das ligações geralmente são duplas, quádruplas e sêxtuplas com 11, 13, 17 e 19 linhas de parafusos. Para cada empresa fabricante de silos, o modelo de chapa

metálica utilizado é variado, atrelando as características geométricas de acordo com os maquinários para fabricação.

Sendo a ruptura dos parafusos um dos critérios na determinação da resistência final do conjunto do corpo do silo, neste estudo foram determinadas apenas as resistências provindas do elemento parafuso, avaliando apenas se há influência da chapa metálica.

#### **4.5 Resistência de cálculo das chapas de ligação para simulação do efeito da chapa lateral de silo metálico**

O propósito deste ensaio foi determinar a carga real de ruptura do parafuso quando submetido ao contato com a chapa lateral utilizada pelos fabricantes de silo, com o intuito de averiguar possíveis divergências entre o cisalhamento direto do parafuso e o cisalhamento por contato com a chapa lateral. Não se levou em consideração o modelo da costura das chapas laterais, e sim somente o cisalhamento do parafuso quando em contato com a chapa.

Pré determinadas as resistências ao cisalhamento de cálculo de ambos os tipos de parafusos, fez-se necessário o dimensionamento das chapas de apoio, pré-definidas pelos fabricantes de silo, que serviram como base para o ensaio de cisalhamento dos parafusos, sendo elas no mínimo mais resistentes que a resistência ao cisalhamento de cálculo do parafuso.

##### **4.5.1 Determinação da tensão de ruptura das chapas de ligação – Ensaio de tração**

Para estabelecer a real resistência ao esmagamento e rasgamento, fez-se necessário definir o limite de ruptura do aço da chapa de apoio através do ensaio de tração das amostras.

Os procedimentos utilizados nos ensaios à tração à temperatura ambiente foram os descritos na NBR 6892 – Materiais e Métodos – Ensaio de tração, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente (ABNT, 2013), os quais consistem em solicitar o corpo de prova com esforço de tração até a ruptura, a fim de determinar as propriedades mecânicas do material.

Para a chapa de apoio do parafuso tradicional retiraram-se 4 amostras de chapa com espessura 3,35 mm de classe estrutural G450 e moldaram-se os corpos de prova conforme as recomendações da NBR 6892 (ABNT, 2013), e as características conforme a Figura 21.

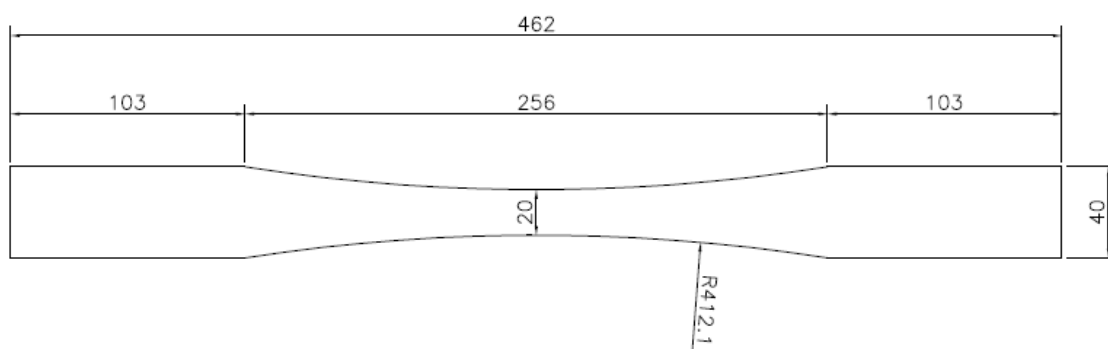


Figura 21 Corpo de prova para ensaio a tração com espessura superior a 3 mm.  
Fonte: NBR 6892 (ABNT, 2013).

Os ensaios foram realizados com o auxílio de uma prensa hidráulica com capacidade de 100 toneladas, calibrada pelo INMETRO e disponível no Laboratório de Construção Civil da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, *campus* Cascavel. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente, entre 10 e 35 °C.

Para as amostras ensaiadas, Figura 22, obteve-se uma tensão média de ruptura de 675,28 MPa, aproximadamente 41% superior ao indicado na Tabela 4, conforme a norma AS1397 (AS, 2011).



Figura 22 Ensaio de tração do aço utilizado nas chapas de apoio 3,35 mm.

Devido ao esmagamento da chapa 3,35 mm G450 aproximou-se do limite último de resistência ao cisalhamento do parafuso alternativo, utilizaram-se 6 amostras de chapa com espessura 4,00 mm de classe estrutural LNE550, moldando os corpos de prova e ensaiando-os conforme as recomendações acima citadas.

As amostras ensaiadas, Figura 23, resultaram em uma tensão média de ruptura de 783,16 MPa, aproximadamente 31% superior ao indicado na Tabela 4, conforme a norma AS1397 (AS, 2011).



Figura 23 Ensaio de tração do aço utilizado nas chapas de apoio 4,00 mm.

#### 4.5.2 Verificação do esmagamento e rasgamento das chapas de ligação

Determinada a tensão média de ruptura das chapas de apoio, verificou-se as resistências ao rasgamento (Equação 10) e ao esmagamento (Equação 11) para ambos os modelos de chapas de apoio, conforme Tabela 15. A definição das distâncias entre furo e borda se deu interativamente até a obtenção de um valor superior ao limite último de resistência ao cisalhamento do parafuso definido na Tabelas 11 e 12.

Tabela 15 Resistência ao esmagamento e rasgamento das chapas de apoio

Tipo do parafuso:	Espessura – mm:	Diâmetro do parafuso no sentido da carga – mm:	Ruptura do aço – MPa:	Distância entre furo e borda - mm:	Resistência ao esmagamento (Eq. 11) NBR8800 - kN:	Resistência ao rasgamento (Eq. 10) NBR8800 - kN:
Tradicional	6,70	10	675,28	70	80,43	80,44
Alternativo	8,00	10	783,16	70	111,38	111,38
Alternativo	8,00	15	783,16	70	167,07	167,07

Verificou-se que há influência do posicionamento na chapa de apoio do parafuso alternativo devido ao mesmo apresentar duas seções distintas. O diâmetro dos furos foi determinado a partir das tolerâncias estabelecidas na NBR 14762 (ABNT, 2010) apresentadas na Tabela 7, caracterizando-os como furo alargado. Prevendo a montagem no silo metálico, posicionou-se o parafuso alternativo com a menor face no sentido paralelo a solicitação dos esforços, conforme Figura 24b:

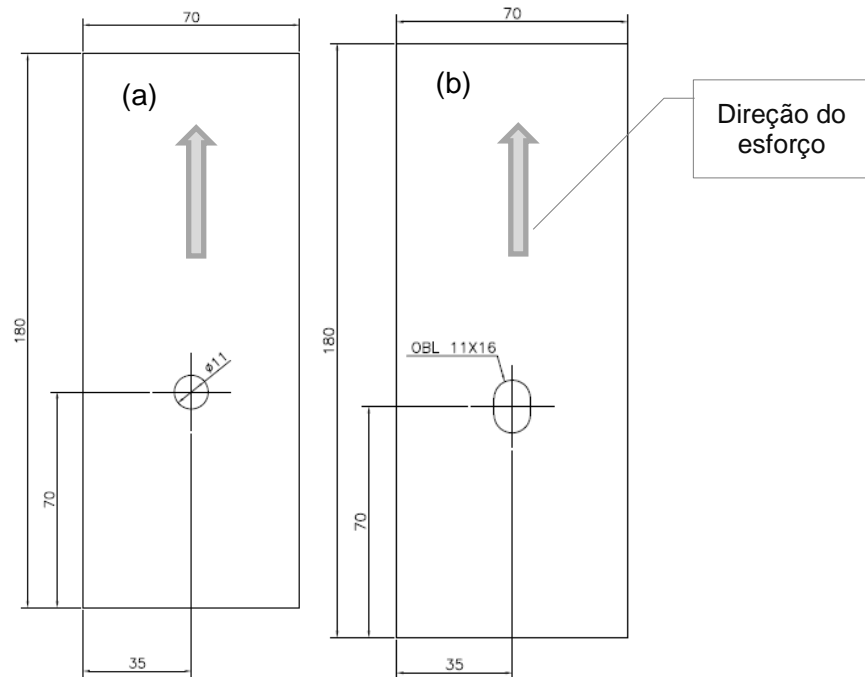


Figura 24 Modelos de chapa apoio para ensaio de cisalhamento dos parafusos. A) Chapa de apoio para o parafuso tradicional. B) Chapa de apoio para o parafuso alternativo.

#### 4.6 Ensaio de cisalhamento dos parafusos utilizando a chapa de ligação

A montagem do aparato para o ensaio de cisalhamento se deu pela união das chapas de apoio através do conjunto de um parafuso, arruela e porca (Figura 25). Para o aperto dos parafusos utilizou-se o torque de aperto de 54 kN.m de acordo com o diâmetro e classe de resistência 8.8, para ambos os tipos de parafusos. Realizaram-se 27 ensaios com o parafuso tradicional e três ensaios com o parafuso alternativo, número mínimo requerido por norma.

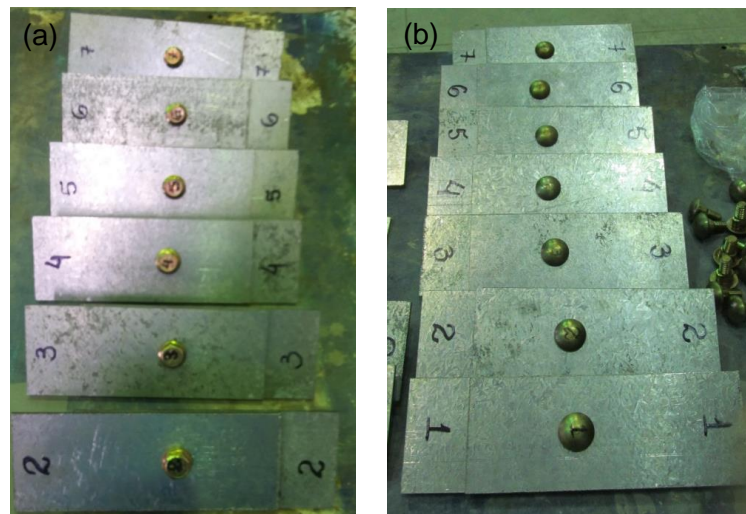


Figura 25 a) Conjunto do parafuso tradicional para ensaio de cisalhamento. b) Conjunto do parafuso alternativo para ensaio de cisalhamento.

#### 4.6.1 Resistência ao cisalhamento do parafuso tradicional utilizando a chapa de ligação

Na Tabela 16 apresentam-se os resultados individuais de cada amostra do parafuso alternativo ensaiados com a utilização da chapa lateral:

Tabela 16 Resistência ao cisalhamento do parafuso tradicional utilizando chapas de apoio 3,35 mm

Amostra	Carga de ruptura – kN:	Amostra	Carga de ruptura – kN:	Amostra	Carga de ruptura – kN:
01	51,59	10	51,27	19	56,34
02	57,73	11	58,30	20	53,38
03	57,23	12	52,51	21	56,05
04	57,76	13	52,66	22	55,12
05	51,55	14	59,41	23	55,09
06	57,70	15	51,12	24	52,59
07	55,95	16	56,45	25	53,34
08	56,02	17	58,60	26	55,99
09	52,23	18	53,66	27	51,91

#### 4.6.2 Resistência ao cisalhamento do parafuso alternativo utilizando a chapa de ligação

Utilizaram-se duas chapas de apoio de 4 mm, uma para cada apoio do equipamento, e uma terceira chapa, que serviu como arruela. Não foi possível realizar a amostragem prevista para o parafuso alternativo por consequência das deformações excessivas nas chapas de apoio ao término de cada ensaio, conforme Figuras 26 e 30.

Realizaram-se três ensaios até a constatação do esmagamento e rasgamento ocorrerem, anterior à ruptura do parafuso, conforme Tabela 17, encerrando o número de amostras ensaiadas.

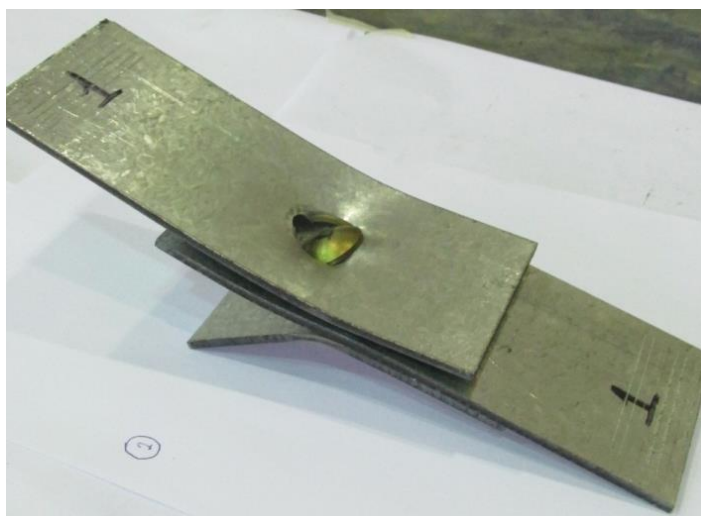


Figura 26 Conjunto do parafuso alternativo após o ensaio de cisalhamento.

Devido ao tamanho da amostra, a interpretação desta análise pode sofrer a interferência do erro amostral. A utilização de uma amostra implica na aceitação de uma margem de erro, denominada erro amostral. Não é possível evitar a ocorrência do erro amostral, porém há como limitar seu valor através da escolha de uma amostra de tamanho adequado. Quanto maior for o tamanho da amostra, menor será o erro padrão e mais perto os valores das duas médias estarão um do outro.

Tabela 17 Resistência de cisalhamento do parafuso alternativo utilizando chapas de apoio 4,00 mm

Amostra	Carga de ruptura – kN:	Amostra	Carga de ruptura – kN:	Amostra	Carga de ruptura – kN:
01	77,50	02	78,48	03	79,76

#### 4.7 Análise estatística pelo ensaio de cisalhamento direto dos parafusos

Por ser um material experimental confeccionado da mesma matéria prima, mesmo processo de conformação, têmpera, bicromatização e ensaio de cisalhamento, tem-se a homogeneidade das condições experimentais, permitindo uma comparação de médias pelo Teste t de *Student*.

Para a aplicação do teste, a comparação de médias só pode ser feita após a análise de variância. Isto porque todos os procedimentos para obter a diferença mínima significativa (d.m.s) exigem o cálculo do quadrado médio do resíduo. Contudo, a análise de variância também dá o valor de F, que permite decidir se as médias são ou não iguais, a determinado nível de significância.

Quando a fonte sendo testada não for uma interação e se reduzir a apenas um grau de liberdade, o teste F é adequadamente aplicado ao teste t de *Student*.

Assim, as 23 amostras dos parafusos dos tipos tradicional e alternativo que receberam os respectivos tratamentos foram distribuídas de forma inteiramente aleatória através de sorteio, para que cada unidade experimental tivesse a mesma probabilidade de receber qualquer um dos tratamentos avaliados, sem nenhuma restrição ou tendência no critério de casualização, podendo cada tratamento apresentar quantidades iguais ou diferentes de repetições.

Por apresentar somente um fator na análise do experimento, utilizou-se o experimento com um fator de efeito fixo, definido pela resistência ao cisalhamento do parafuso. Nesta situação, foram testadas hipóteses sobre as médias dos tratamentos e as conclusões obtidas foram aplicáveis somente aos níveis dos fatores considerados na análise. As suposições realizadas para validar o modelo foram: normalidade dos dados, aleatoriedade e independência.

No entanto, como as amostras são réplicas, é possível a obtenção de uma estimativa da variabilidade devido ao erro experimental.

#### 4.7.1 Erro de modelo ou coeficiente profissional

Por se tratar de um comparativo entre resultados experimentais ( $F_{exp}$ ), obtidos em laboratório por meio de ensaios, e resultados teóricos ( $F_{teo}$ ), obtidos com base em modelos matemáticos segundo previsões normativas, a variável aleatória erro de modelo ( $M_e$ ) é obtida considerando os valores do limite último de resistência ao cisalhamento de cálculo, através da Equação 20.

$$M_e = \frac{F_{exp}}{F_{teo}} \quad \text{Eq. (20)}$$

Sendo:

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

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

Esse procedimento consistiu em analisar os resultados da resistência ao cisalhamento obtidos nos ensaios previstos por determinado modelo analítico, para que com isso fosse possível a correta avaliação da variável erro de modelo.

Após o cálculo da variável aleatória  $M_e$ , construíram-se testes de aderência e ajustes para definir a melhor distribuição de probabilidades que se adequem à variável, de modo que toda a informação estatística possa ser obtida e posteriormente processada (BOLANDIM, 2011).

A média da variável erro de modelo ( $M_{e,mean}$ ) podem ser calculada para indicar o caráter de tendenciosidade do modelo, seja ele conservador ou inseguro. Através da  $M_{e,mean}$ , caso o modelo resulte unitário, o mesmo será exatamente o fenômeno mecânico estudado, revelando o quão conservador ou inseguro se encontra o modelo, de modo que possíveis correções possam ser feitas.

Logo, pode-se corrigir o modelo matemático fazendo-se uso do  $M_{e,mean}$ , proporcionando um modelo corrigido e resultando na força resistente correta (Equação 21).

$$F_{correto} = M_{mean} * F_{teo} \quad \text{Eq. (21)}$$



#### **4.7.2 Carta de controle – Gráfico de valores individuais a amplitude móvel**

Devido ao fato do parafuso tradicional ser fabricado em um processo contínuo por uma empresa especializada e o parafuso alternativo ser moldado em torno CNC, elaborou-se o gráfico de valores individuais e amplitude média, para certificar-se da existência ou não de desvios no processo de fabricação do parafuso alternativo.

Atendida a suposição de normalidade dos dados, utilizou-se a carta de controle dos valores individuais, limitado pela linha superior (limite superior de controle) e uma linha inferior (limite inferior de controle), além de uma linha média. O objetivo foi verificar, por meio do gráfico, se o processo estava sob controle, isto é, isento de causas especiais.

Para a amplitude móvel verificou-se a diferença entre as duas mensurações sequenciais, a fim de monitorar a variabilidade.

#### **4.8 Análise estatística para o ensaio de cisalhamento dos parafusos utilizando as chapas de apoio**

Para verificar a resistência da ligação parafusada utilizando ambos os tipos de parafusos, primeiramente elaborou-se uma análise exploratória a fim de analisar o desvio padrão e coeficiente de variação.

Foram verificadas e validadas as suposições do modelo e, então, se realizou o teste *t* de *Student*. O teste permite que duas médias obtidas de grupos experimentais com número de observações diferentes possam respectivamente ser comparadas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Características físicas da ruptura na área de cisalhamento de ambos os tipos de parafusos

#### 5.1.1 Ensaio de cisalhamento direto

As características de fratura de ambos os tipos de parafuso se assemelharam na região do plano de corte, conforme Figuras 27 e 28. Permaneceram intactas as cabeças dos parafusos, indicando a não influência do formato da mesma na resistência ao cisalhamento, não prejudicando os resultados do parafuso alternativo, visto que ocorreu uma redução de volume da cabeça para o preenchimento no oblongo do corpo.



Figura 27 Corpos de prova do parafuso tradicional após ruptura por ensaio de cisalhamento direto.

Os parafusos tradicionais apresentaram cisalhamento a meia altura do corpo, consideração ideal de acordo com as recomendações normativas; porém, nem sempre o que ocorre na montagem das chapas laterais de silos metálicos ou outras estruturas parafusadas.

Para as amostras do parafuso alternativo nem todas tiveram a ruptura a meia altura do corpo, sendo o dispositivo com as mesmas características do parafuso tradicional. Na Figura 28 nota-se que a amostra após o ensaio apresentou duas fraturas. A fratura entre a cabeça e o corpo refere-se à região de cisalhamento testada. A região entre o corpo e a rosca foi efetuada após o ensaio para a retirada das amostras do dispositivo.



Figura 28 Corpos de prova do parafuso alternativo após ruptura por ensaio de cisalhamento direto.

### 5.1.2 Ensaio de cisalhamento utilizando as chapas de apoio

A ruptura no plano de corte do parafuso tradicional assemelhou-se para as 27 amostras (Figura 29), com corte reto e levemente escoado na face oposta à aplicação da carga. Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), este tipo de ruptura caracteriza-se como cisalhamento com corte simples, conforme o esperado.

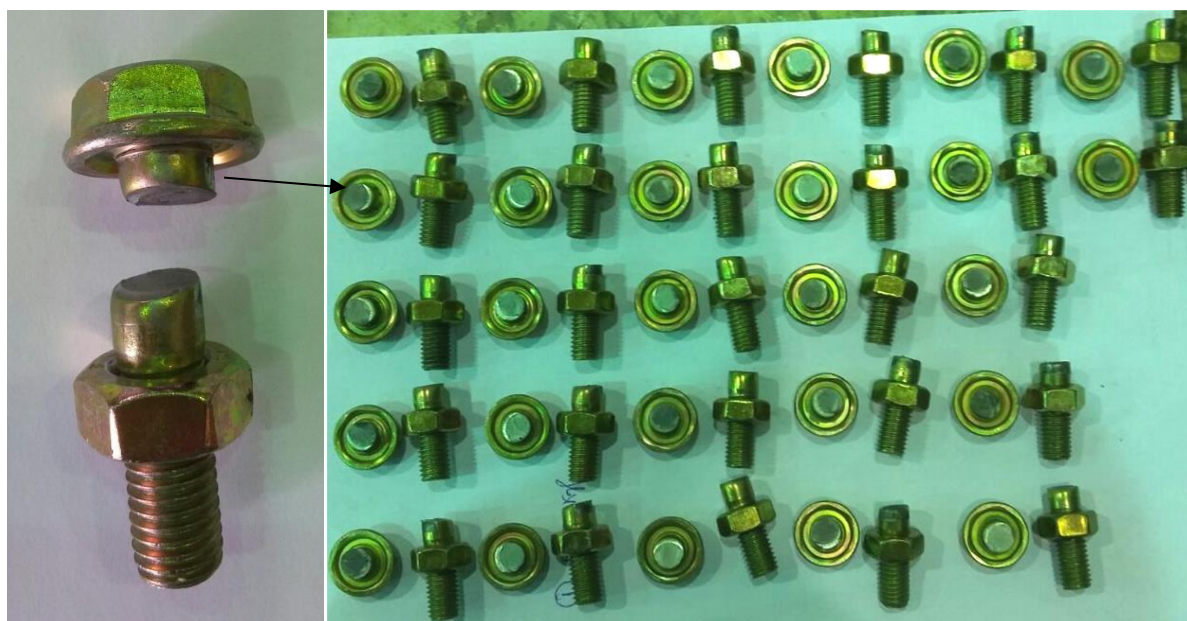


Figura 29 Corpos de prova do parafuso tradicional após ruptura por ensaio de cisalhamento com chapas de apoio.

No parafuso alternativo, após a desmontagem do conjunto verificou-se, anterior à ruptura por cisalhamento do parafuso, o rasgamento da chapa de apoio, conforme Figura 30a.

No parafuso alternativo constatou-se a deformação plástica no plano de corte do oblongo, não havendo visíveis interferências na cabeça e na rosca do mesmo – Figura 30b.

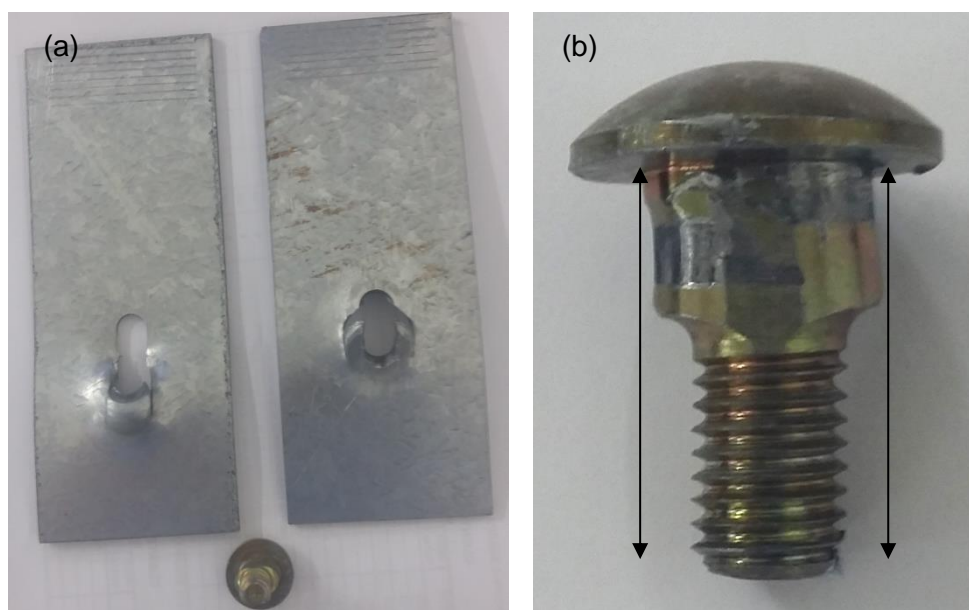


Figura 30 a) Rasgamento das chapas de apoio 4,00 mm. b) Deformação plástica no parafuso alternativo.

## 5.2 Análise estatística do parafuso tradicional por cisalhamento direto

A análise exploratória teve como objetivo organizar, conhecer e apresentar algumas características do conjunto de dados observados. A Tabela 18 apresenta o valor médio experimental da resistência de 46,86 kN para as 23 amostras do parafuso tradicional ensaiadas pelo método do cisalhamento direto.

Tabela 18 Análise exploratória da carga de ruptura (kN) do parafuso tradicional por cisalhamento direto

Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação %
44,02	46,98	46,86	48,96	1,48	1,22	2,60

Esta média sobrepõe aproximadamente 155% em relação a resistência de ruptura do parafuso obtida através do Eurocode 3 (Tabela 11) e 268% em relação a NBR 8800 e NBR 14762. Contudo, os valores apresentados pelas normativas utilizam os coeficientes parciais de segurança que ponderam essas forças.

Outro fato importante a ser citado foi que, para a avaliação das cargas resistentes dos parafusos, todos os coeficientes parciais de segurança que ponderam essas forças e a área bruta foram tomados como unitários, proporcionando dessa forma valores nominais da carga resistente quando a marcha de cálculo presente nessas prescrições normativas é seguida.



Utilizando, portanto, a teoria da resistência dos materiais, a média experimental preteriu-se cerca de 25% em relação às amostras ensaiadas.

Segundo Bolandim (2006), estes resultados não representam a informação estatística coerente, pois não foram realizados testes de aderência e ajustes para encontrar uma distribuição de probabilidades que melhor se adeque à variável. Por se tratar de uma comparação entre resultados experimentais, obtidos em laboratório por meio de ensaios, e resultados teóricos, obtidos com base em modelos matemáticos segundo previsões normativas, a variável erro do modelo foi obtida considerando os valores médios de resistência dos materiais sem a consideração dos coeficientes parciais de segurança.

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 18, neste experimento tem-se uma pequena diferença entre os valores da carga de ruptura do parafuso em relação à 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 2,60%, pois, segundo Pimentel Gomes (2000), quando inferior a 10% é considerado baixo. O histograma representado pela Figura 31 demonstra visualmente a análise exploratória geral dos resultados da carga de ruptura do parafuso tradicional pelo método do cisalhamento direto.

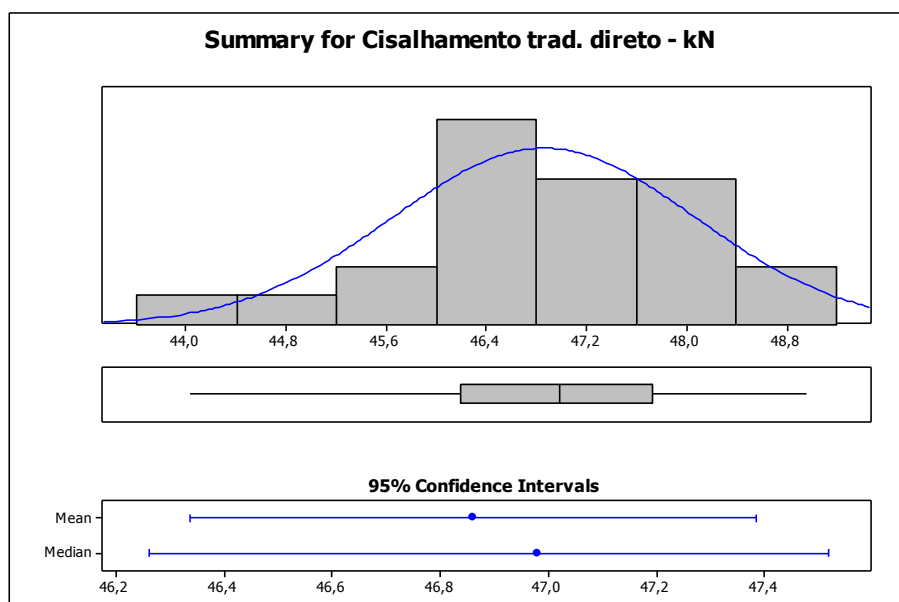


Figura 31 Histograma das amostras de parafuso tradicional por cisalhamento direto.

A análise de simetria indicou um pequeno grau de distorção, caracterizando-se como uma assimetria negativa para a esquerda e a medida de curtose indicou uma curva com achatamento platicúrtico.

### 5.2.1 Suposições do modelo

Para a análise das suposições do modelo considerou-se o nível de significância de 5%. Foram satisfeitas as pressuposições de normalidade, aleatoriedade e independência.

#### 5.2.1.1 Análise de normalidade

Os testes paramétricos partem do pressuposto que a população da qual as amostras foram retiradas sejam normalmente distribuídas para se decidir pelo uso do teste paramétrico ideal. Para isso, utilizaram-se os testes de normalidade de Shapiro-Wilk, Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov, conforme Tabela 19. Para ambos os testes foram tomadas duas hipóteses:

H0: a carga de ruptura do parafuso tradicional por cisalhamento direto seguiu a distribuição normal;

H1: a carga de ruptura do parafuso tradicional por cisalhamento direto não seguiu a distribuição normal.

Portanto, sendo  $p\text{-valor} < \alpha$ , rejeitou-se H0, e sendo  $p\text{-valor} \geq \alpha$ , não se rejeitou H0.

Tabela 19 Aplicação dos testes de normalidade para as amostras de parafuso tradicional por cisalhamento direto

Testes de normalidade	Ruptura – P-valor	Nível de significância $\alpha=5\%$	Distribuição Normal
Shapiro-Wilk	0,100	> 0,05	Sim
Anderson-Darling	0,774	> 0,05	Sim
Kolmogorov-Smirnov	0,150	> 0,05	Sim

Obteve-se  $p\text{-valor} > \alpha$ , portanto para as 23 amostras ensaiadas 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 32, evidenciou-se a distribuição normal dos dados.

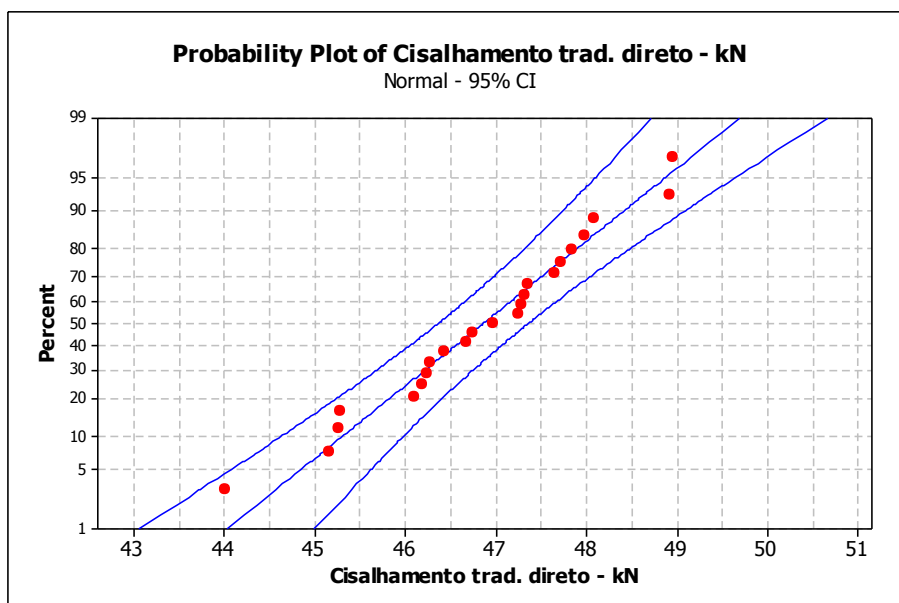


Figura 32 Papel de probabilidade das amostras de parafuso tradicional por cisalhamento direto.

### 5.2.1.2 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 Minitab se obteve  $p\text{-valor}$  igual a 0,137, resultando em um valor maior que 0,05, não se rejeitando a hipótese de aleatoriedade.

### 5.2.1.3 Análise de independência

Na análise de independência averiguou-se, através da Figura 33, a não tendência dos dados, verificando a existência da independência entre o número de amostras e as medidas das cargas de ruptura do parafuso tradicional por cisalhamento direto.

O gráfico de dispersão foi usado para indicar a independência. Neste caso, a hipótese só foi garantida por não existirem fatores estranhos e a aleatorização no sorteio das amostras, dado que o comportamento dos pontos não se repetiu de maneira relacionada, tendo, assim, indícios de independência.

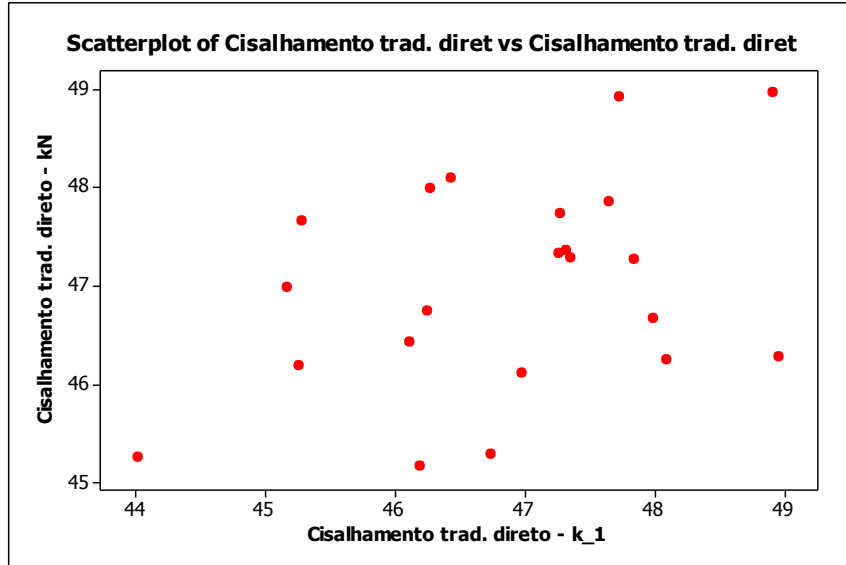


Figura 33 Análise de independência do parafuso tradicional utilizando a chapa de apoio.

Através da autocorrelação das amostras pela Figura 33 também não há evidências no padrão nos pontos, demonstrando a aleatoriedade dos mesmos.

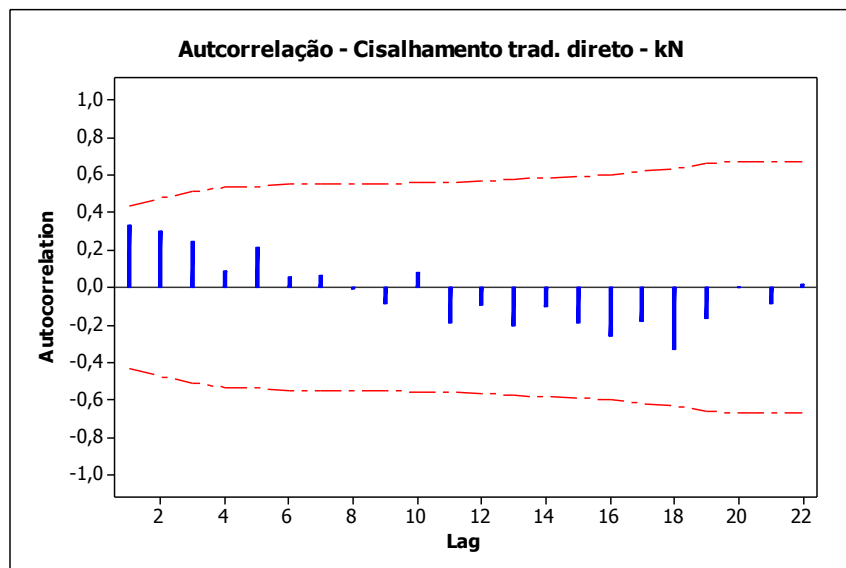


Figura 34 Autocorrelação do parafuso tradicional por cisalhamento direto.

### 5.3 Análise estatística da resistência do parafuso alternativo ao cisalhamento direto

A Tabela 20 apresenta os dados da análise exploratória das 16 amostras ensaiadas do parafuso alternativo pelo método do cisalhamento direto.



Tabela 20 Análise exploratória da carga de ruptura (kN) do parafuso alternativo por cisalhamento direto

Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação %
102,12	107,41	107,13	111,59	10,11	3,18	2,97

A média experimental de 107,13 kN em relação à resistência de ruptura do parafuso obtido através do Eurocode 3 (Tabela 11) sobressaiu em aproximadamente 281% e 375% em relação às NBR 8800 e NBR 14762; porém, os valores apresentados pelas normativas utilizam os coeficientes parciais de segurança que ponderam essas forças.

As cargas resistentes dos parafusos foram analisadas da mesma maneira que a utilizada no parafuso tradicional, tomando como unitário as ponderações das forças e a redução da área bruta. Assim, a resistência calculada, de 77,10 kN, foi inferior em 39% em relação à resistência experimental obtida.

Nos resultados experimentais obtidos tem-se uma pequena diferença entre os valores da carga de ruptura do parafuso em relação à média. O desvio padrão não evidenciou variação significativa ou dispersão existente em relação à média.

O experimento também se enquadrou com baixa variação e alta precisão nas respostas obtidas, segundo Pimentel Gomes (2000), com coeficiente de variação de 2,97%. Através da Figura 35, visualiza-se a distribuição das amostras ensaiadas e a curva de frequência da carga de ruptura do parafuso alternativo pelo método do cisalhamento direto.

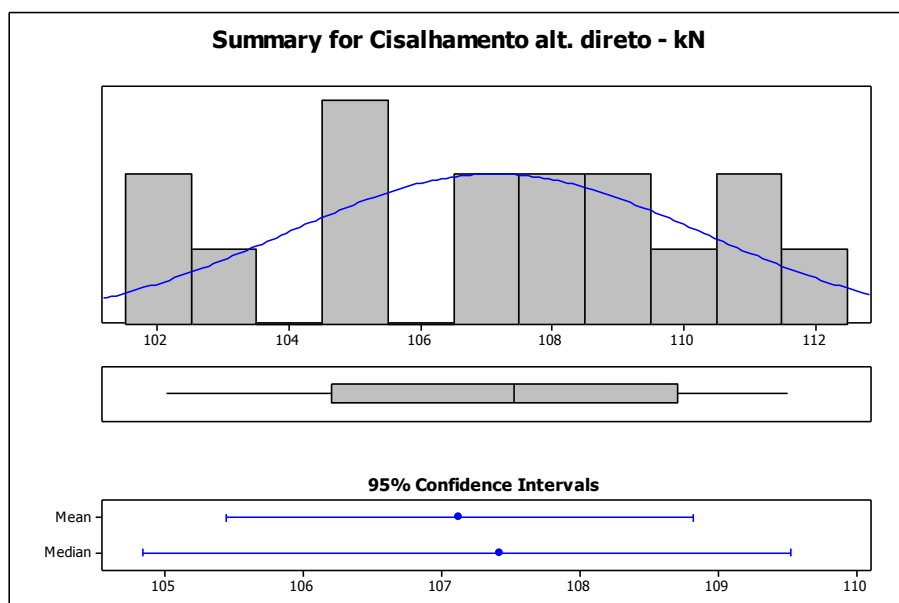


Figura 35 Histograma das amostras de parafuso alternativo por cisalhamento direto.

A análise de simetria indicou um pequeno grau de distorção, caracterizando-se como uma assimetria negativa para a esquerda e a medida de curtose indicou uma curva com achatamento platicúrtico.

### 5.3.1 Suposições do modelo

Atenderam-se as pressuposições: normalidade, aleatoriedade e independência. As análises das suposições do modelo consideraram o nível de significância de 5%.

#### 5.3.1.1 Análise de normalidade

Os testes paramétricos necessitaram de alguns pressupostos, como a população da qual as amostras foram retiradas serem normalmente distribuídas para se decidir pelo uso do teste paramétrico ideal. Utilizaram-se os mesmos testes de normalidade que os do parafuso tradicional: Shapiro-Wilk, Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov apresentados pela Tabela 21. Para ambos os testes foram tomadas duas hipóteses:

H0: a carga de ruptura do parafuso alternativo por cisalhamento direto segue a distribuição normal;

H1: a carga de ruptura do parafuso alternativo por cisalhamento direto não segue a distribuição normal.

Portanto, sendo  $p\text{-valor} < \alpha$  rejeitou-se H0 e sendo  $p\text{-valor} \geq \alpha$ , não se rejeitou H0.

Tabela 21 Aplicação dos testes de normalidade para as amostras de parafuso alternativo por cisalhamento direto

Testes de normalidade	Ruptura – P-valor	Nível de significância $\alpha=5\%$	Distribuição Normal
Shapiro-Wilk	0,100	> 0,05	Sim
Anderson-Darling	0,519	> 0,05	Sim
Kolmogorov-Smirnov	0,150	> 0,05	Sim

Obeve-se  $p\text{-valor} > \alpha$ , portanto, para os três testes realizados, assim como a análise do parafuso tradicional, 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, evidenciou-se a distribuição normal dos dados.

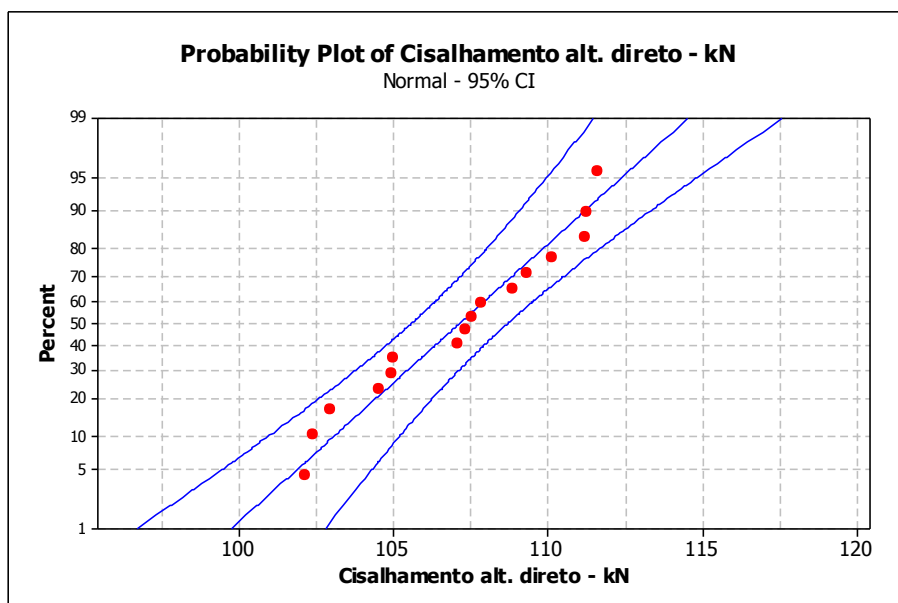


Figura 36 Papel de probabilidade das amostras de parafuso alternativo por cisalhamento direto.

### 5.3.1.2 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 são 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 são aleatórios.

Obteve-se  $p\text{-valor}$  igual a 0,130 resultando em um valor maior que 0,05, ou seja, não se rejeitou a hipótese de aleatoriedade.

### 5.3.1.3 Análise de independência

A Figura 37 foi utilizada para indicar a independência dos dados. Neste caso, a hipótese só foi garantida por não existirem fatores estranhos e a aleatorização no sorteio das amostras, dado que o comportamento dos pontos não se repetiu de maneira relacionada, tendo, assim, indícios de independência.

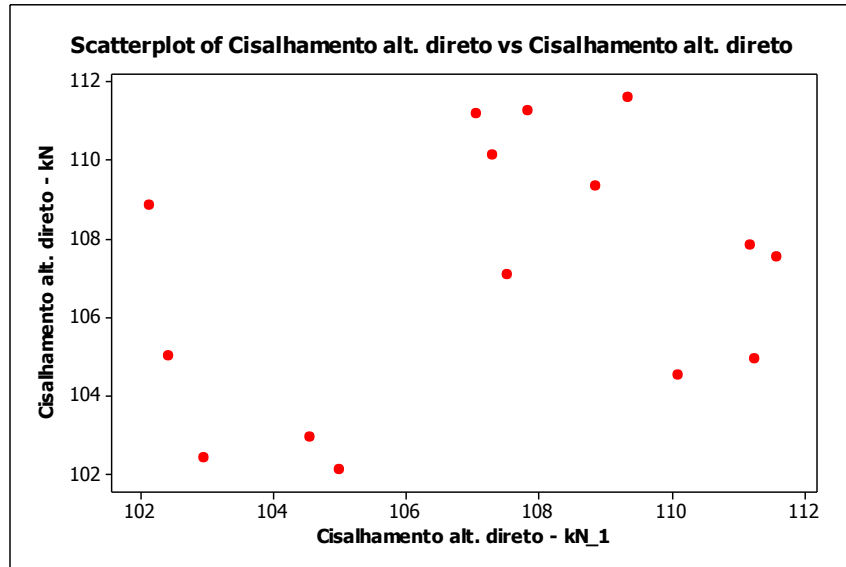


Figura 37 Análise de independência do parafuso alternativo por cisalhamento direto.

Para se ter a confiança desta condição, analisou-se a autocorrelação das amostras pela Figura 38, não evidenciando padrão nos pontos e demonstrando aleatoriedade dos mesmos.

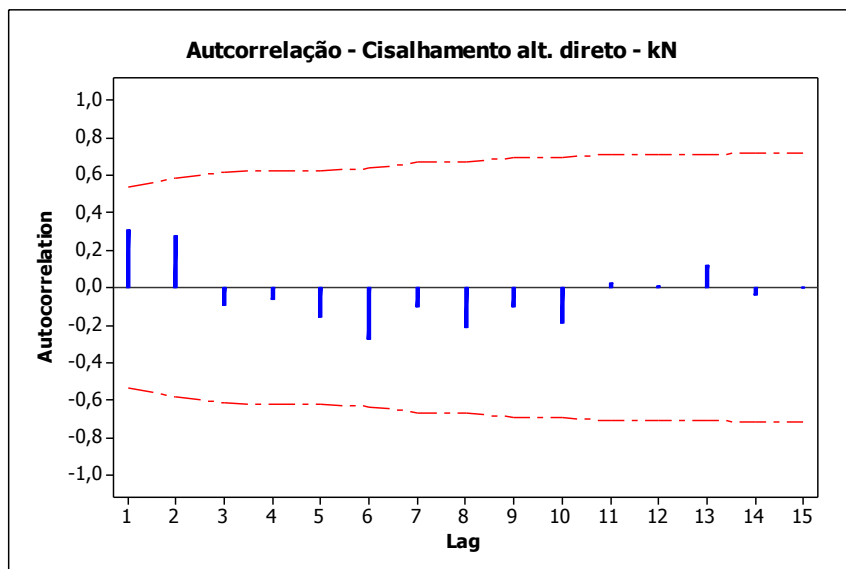


Figura 38 Autocorrelação do parafuso alternativo por cisalhamento direto.

#### 5.4 Comparações de média para os parafusos por cisalhamento direto - Teste t de student

Os resultados do teste T de *student* apresentaram p-valor zero. Assim, ao nível de 1% de significância há evidências muito fortes de se rejeitar a hipótese  $H_0$ . Ou seja, o tipo do parafuso é significativo, pois apresenta diferença entre as médias das amostras ensaiadas, como mostra a Figura 39. A estimativa da diferença estatística de ambos os modelos de

parafuso pelo método do cisalhamento direto foi de 60,27 kN, abrangendo um intervalo de confiança com nível de significância de 5% de 62,02 a 58,51 kN.

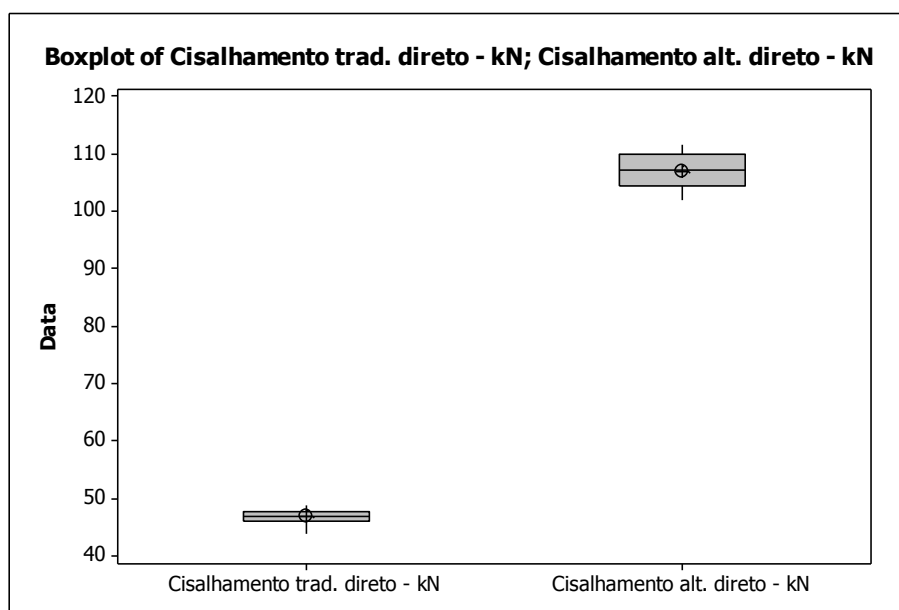


Figura 39 Box plot da comparação da carga de ruptura de ambos os tipos de parafusos por cisalhamento direto.

Para as amostras ensaiadas, o aumento da área de cisalhamento no plano de corte do parafuso alternativo aparenta ter produzido efeitos positivos na resistência ao cisalhamento do parafuso tradicional. A média de 107,13 kN dos parafusos alternativos que receberam este acréscimo de área foi significativamente melhor ( $\alpha = 0,01$ ) do que o grupo que não recebeu (com média de 46,86 kN).

### 5.5 Análise comparativa da resistência dos parafusos por cisalhamento direto

Por se tratar de comparações teóricas e experimentais, utilizou-se como referência a ruptura descrita pela teoria da resistência dos materiais para efetuar as comparações de resistência da ruptura. A descrição desta teoria é a simplificação das recomendações normativas, retirados apenas os coeficientes de ponderação das forças e a redução da área de corte.

O parafuso tradicional apresentou força de ruptura média experimental para as 23 amostras de 46,86 kN 25% inferior ao definido teoricamente (62,83 kN), porém superior aos dados recomendados normativamente.

Quanto ao parafuso alternativo a força média experimental obtida de 107,13 kN sobressaiu a resistência teórica dada de 77,10 kN em 39%, inversamente ao que aconteceu com o parafuso tradicional, no qual ocorreu uma redução de 25% da resistência experimental comparada com a resistência teórica.

A média experimental obtida pelo parafuso alternativo foi superior à resistência ao cisalhamento descrito pelas normativas (Tabela 11), mesmo apresentando os coeficientes parciais de segurança. A amplitude das variações presentes nas normativas foram em torno de 281% e 375%, sobressaindo a resistência do parafuso ensaiado em relação às normas.

Conforme a estimativa dada no Teste t, a diferença estatística de ambos os parafusos (60,27 kN) com ganho percentual de 128% na resistência do parafuso alternativo supera o aumento de área na parte oblonga do parafuso alternativo de 64% (78,53 mm<sup>2</sup> para 128,50 mm<sup>2</sup>).

## 5.6 Erro modelo do parafuso alternativo pelo método do cisalhamento direto

Após as amostras terem sido verificadas de acordo com os documentos normativos, nos quais foram utilizados valores médios da resistência dos materiais por meio da consideração de um intervalo de confiança de 95% para os resultados experimentais e coeficientes parciais de resistência unitários, a variável aleatória erro de modelo ( $M_e$ ) foi calculada.

No entanto, a verificação da variável  $M_e$  foi abordada apenas para o parafuso alternativo, visto que o mesmo se encontra em caráter experimental em relação ao parafuso tradicional normatizado.

Calculou-se a variável  $M_e$  para as 16 amostras ensaiadas do parafuso alternativo, para então determinar a média da variável erro de modelo ( $M_{e,mean}$ ). A Tabela 22 traz os resultados do erro de modelo utilizando como  $F_{teo}$  o valor de 77,10 kN definido pela Equação 19:

Tabela 22 Determinação da média da variável erro de modelo do parafuso alternativo -  $M_{e,mean}$

Amostra:	$F_{exp}$ – kN:	$M_e$ – adm:	$M_{mean}$ – adm:
01	107,31	1,39	
02	110,11	1,43	
03	104,54	1,36	
04	102,96	1,34	
05	102,41	1,33	
06	105,00	1,36	
07	102,12	1,32	
08	108,85	1,41	
09	109,34	1,42	1,393
10	111,59	1,45	
11	107,52	1,39	
12	107,07	1,39	
13	111,18	1,44	
14	107,84	1,40	
15	111,26	1,44	
16	104,92	1,36	

É importante comentar que a variável aleatória erro de modelo, ou, para ser mais preciso, a média do erro de modelo ( $M_{e,mean}$ ), tem a capacidade de indicar um possível caráter

conservador ou inseguro de modelos analíticos, quando inserido corretamente em uma análise de confiabilidade.

Como  $M_{e\ mean}$  não resultou em um valor unitário verifica-se que o valor teórico definido em cálculo (Equação 19) não se aplica exatamente ao fenômeno mecânico estudado. O valor de 1,393 indica o percentual de 39,30% na variação dos valores ensaiados em relação aos valores obtidos teoricamente.

Logo, corrigindo o modelo matemático fazendo uso do  $M_{e\ mean}$ , tem-se a força resistente correta do parafuso alternativo (Equação 21), como:

$$F_{correto} = 1,393 * 77,10\ kN$$

$$F_{correto} = 107,40\ kN$$

## 5.7 Carta de controle de ambos os tipos de parafusos

Atendido o pressuposto de normalidade de ambos os modelos de parafusos, verificou-se através da carta de controle individual e amplitude móvel a aleatoriedade dos pontos em torno da média.

Para o parafuso tradicional verificou-se, na Figura 40, que na amplitude móvel os valores estiveram dentro dos limites de controle e apresentaram um comportamento aleatório, indicando controle do processo estatístico. Porém, no gráfico de valores individuais a primeira observação se encontrou fora do limite inferior de controle, sendo que os pontos subsequentes apresentaram variação aleatória, o que pode indicar a presença de uma causa especial de variação no processo.

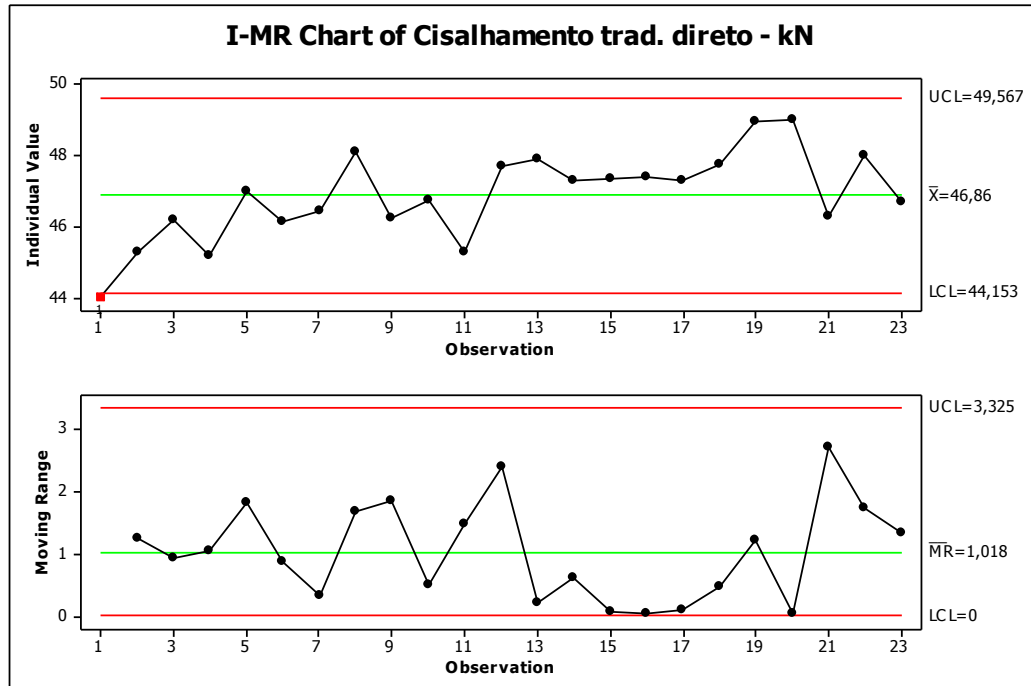


Figura 40 Carta de controle do parafuso tradicional por cisalhamento direto.

Segundo Montgomery (2009), os critérios suplementares geralmente são utilizados até que o processo esteja sob controle. Depois disso, pode-se adotar apenas o critério básico (1 ou mais pontos fora dos limites de controle), mas fica a cargo do analista responsável decidir quais regras serão empregadas pelo laboratório.

Nestes termos, adotou-se a primeira observação como variável excepcional do processo, visto que o valor experimentado de 44,02 kN se aproximou do limite inferior de 44,15 kN para três desvios padrão. Tendo a variável excepcional como primeira amostra ensaiada, pode-se caracterizá-la como um erro aleatório por variáveis no ajuste da amostra no dispositivo, calibração das mesas e/ou velocidade do ensaio.

O parafuso alternativo não apresentou tendências ou causas especiais, evidenciando a não existência de que o processo esteve fora de controle para as cartas de controle dos valores individuais e amplitude móvel (Figura 41).



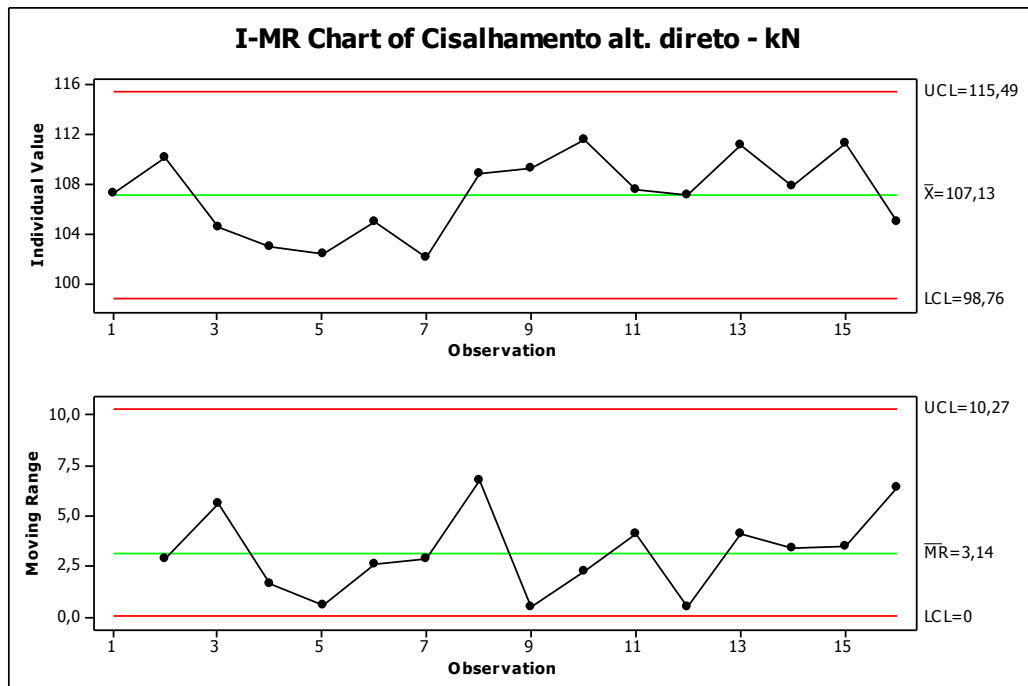


Figura 41 Carta de controle do parafuso alternativo por cisalhamento direto.

### 5.8 Análise estatística do parafuso tradicional utilizando a chapa de apoio 3,35 mm

O resultado experimental para as 27 amostras do parafuso tradicional ensaiadas utilizando a chapa de apoio apresenta-se na Tabela 23 e seu histograma pela Figura 43.

A média de 54,87 kN sobrepõe aproximadamente 182% em relação a resistência de ruptura do parafuso obtida através do Eurocode 3 (Tabela 11) e 236% em relação a NBR 8800 e NBR 14762. Porém, como já mencionado, os valores apresentados pelas normativas utilizam os coeficientes parciais de segurança que ponderam essas forças. A média obtida preteriu-se cerca de 13% ao utilizar a teoria da resistência dos materiais, dada pela Equação 19.

Tabela 23 Análise exploratória da carga de ruptura (kN) do parafuso tradicional utilizando a chapa de apoio

Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Variância	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação %
51,50	55,12	54,87	59,41	6,63	2,58	4,69

Em relação à variância, observou-se que as medidas da dispersão estatísticas encontraram-se dentro do valor esperado. Conforme a Tabela 23, o desvio padrão não evidenciou variação ou dispersão existente em relação à média. O experimento indicou alta precisão com um coeficiente de variação de 4,69%.

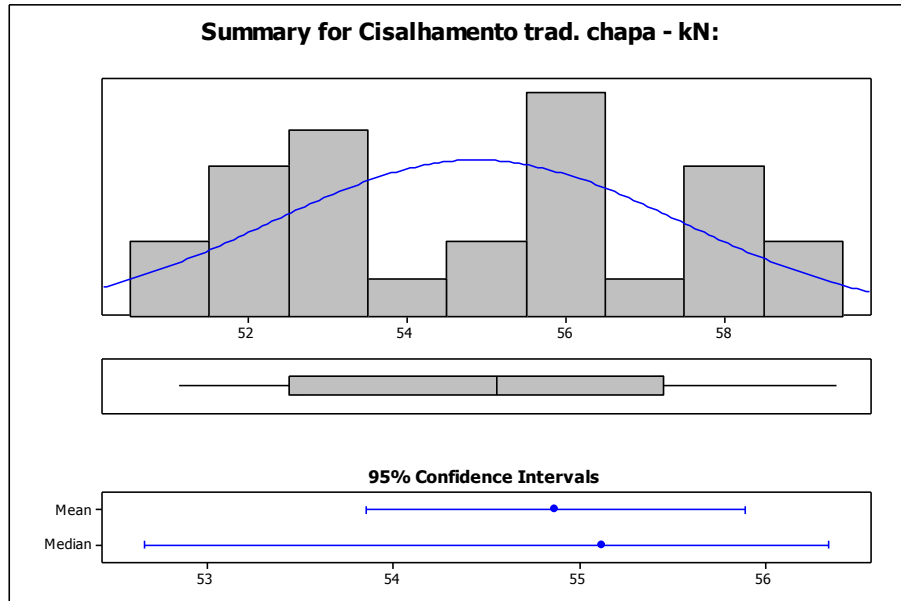


Figura 42 Histograma das amostras de parafuso tradicional utilizando a chapa de apoio.

A análise de simetria indicou um pequeno grau de distorção, caracterizando-se como uma assimetria negativa para a esquerda, e a medida de curtose indicou uma curva com achatamento platicúrtico.

### 5.8.1 Suposições do modelo

Foram satisfeitas determinadas pressuposições ao nível de significância de 5% de normalidade, aleatoriedade e independência.

#### 5.8.1.1 Análise de normalidade

Assim como nos demais testes de normalidade utilizaram-se: Shapiro-Wilk, Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov. Para ambos os testes foram assumidas duas hipóteses:

H0: a carga de ruptura do parafuso tradicional com chapa de apoio seguiu a distribuição normal;

H1: a carga de ruptura do parafuso tradicional com a chapa de apoio não seguiu a distribuição normal.

Conforme indicou a Tabela 24, com  $p\text{-valor} < \alpha$  rejeitou-se H0 e com  $p\text{-valor} \geq \alpha$ , não se rejeitou H0.

Tabela 24 Aplicação dos testes de normalidade para as amostras de parafuso tradicional com chapa de apoio

Testes de normalidade	Ruptura – P-valor	Nível de significância $\alpha=5\%$	Distribuição Normal
-----------------------	-------------------	--	---------------------

Shapiro-Wilk	0,100	> 0,05	Sim
Anderson-Darling	0,071	> 0,05	Sim
Kolmogorov-Smirnov	0,150	> 0,05	Sim

Como  $p\text{-valor} > \alpha$  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 43, evidenciou-se a distribuição normal dos dados.

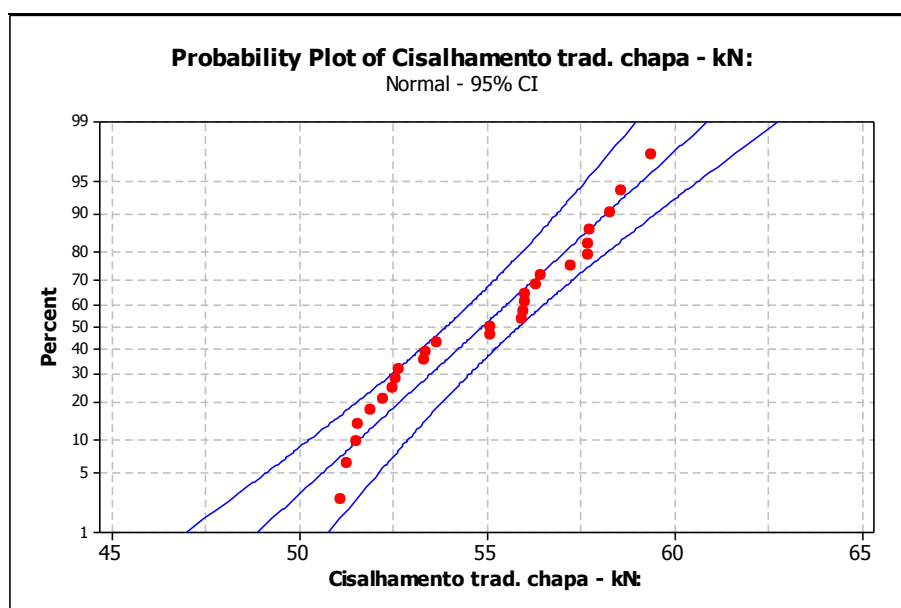


Figura 43 Papel de probabilidade do parafuso tradicional utilizando a chapa de apoio.

### 5.8.1.2 Análise da aleatoriedade

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

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

$H_1$ : 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 Minitab foi possível obter o  $p\text{-valor}$  de 0,289, resultando em um valor maior que 0,05, não se rejeitando a hipótese de aleatoriedade.

### 5.8.1.3 Análise de independência

Na análise de independência averiguou-se, através da Figura 44, a não tendência dos dados no gráfico de dispersão, verificando a existência da independência entre o número de amostras e as medidas das cargas de ruptura do parafuso tradicional. Neste caso, a hipótese só foi garantida por não existir fatores estranhos e a aleatorização no sorteio das amostras, sendo que o comportamento que não se repetiu de maneira relacionada.

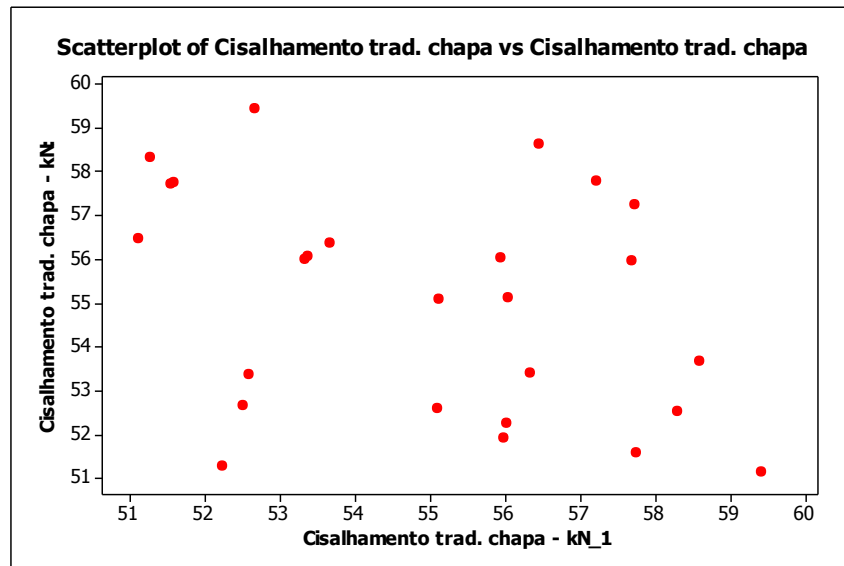


Figura 44 Análise de independência do parafuso tradicional utilizando a chapa de apoio.

A análise da autocorrelação das amostras, pela Figura 45, não evidenciou padrão nos pontos, mostrando que os mesmos se distribuíram de forma aleatória.

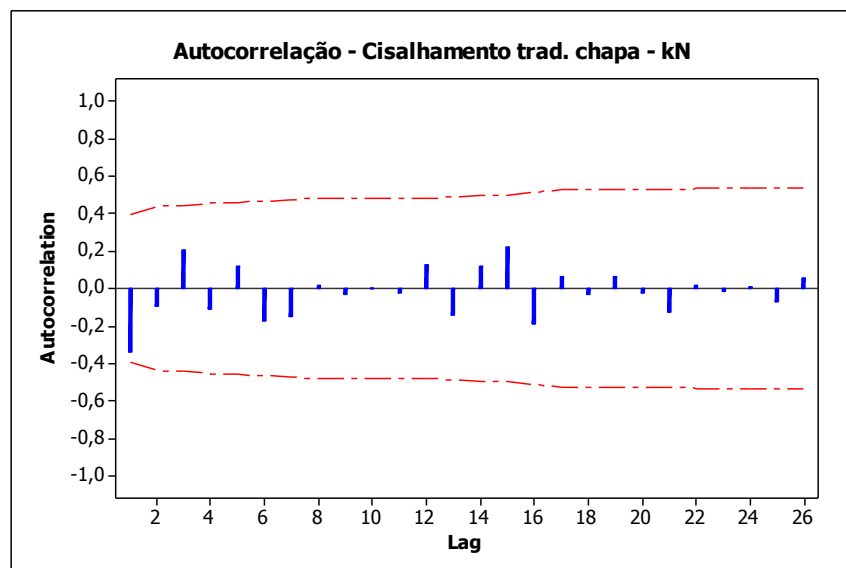


Figura 45 Autocorrelação do parafuso tradicional utilizando a chapa de apoio.

## 5.9 Análise estatística do parafuso alternativo com a utilização das chapas de apoio 4,00 mm

A análise exploratória deste experimento refere-se aos resultados de 3 amostras ensaiadas. A Tabela 25 retrata o resultado experimental do parafuso alternativo utilizando a chapa de apoio com média de 78,58 kN, sobrepondo-se 159% em relação à resistência de ruptura do parafuso obtida através do Eurocode 3 (Tabela 12) e 206% em relação a NBR 8800 e NBR 14762, considerando que ambas as comparações utilizam coeficientes parciais de segurança. Para tanto, a média obtida retraiu cerca de 2% ao utilizar a teoria da resistência dos materiais.

Por se tratar de uma população pequena, a dispersão estatística na análise da variância e desvio padrão tornam-se implausíveis. Contudo, as amostras ensaiadas ainda indicam um baixíssimo coeficiente de variação (1,44%), caracterizando o experimento como de alta precisão.

Tabela 25 Análise exploratória da carga de ruptura (kN) do parafuso alternativo utilizando a chapa de apoio

Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Variância	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação %
77,50	78,48	78,58	79,76	1,28	1,13	1,44

### 5.9.1 Suposições do modelo

Considerando as suposições de normalidade e aleatoriedade do modelo do parafuso alternativo, 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.

#### 5.9.1.1 Análise de normalidade

Utilizaram-se os testes de normalidade de Shapiro-Wilk, Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov representados na Tabela 26. Para ambos os testes utilizaram-se duas hipóteses:

H0: a carga de ruptura do parafuso alternativo com chapa de apoio seguiu a distribuição normal;

H1: a carga de ruptura do parafuso alternativo com chapa de apoio não seguiu a distribuição normal.

Tabela 26 Aplicação dos testes de normalidade para as amostras de parafuso alternativo com chapa de apoio

Testes de normalidade	Ruptura – P-valor	Nível de significância $\alpha=5\%$	Distribuição Normal
Shapiro-Wilk	0,100	> 0,05	Sim
Anderson-Darling	0,601	> 0,05	Sim
Kolmogorov-Smirnov	0,150	> 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 46, evidencia-se a distribuição normal dos dados através da distribuição linear das 3 amostras.

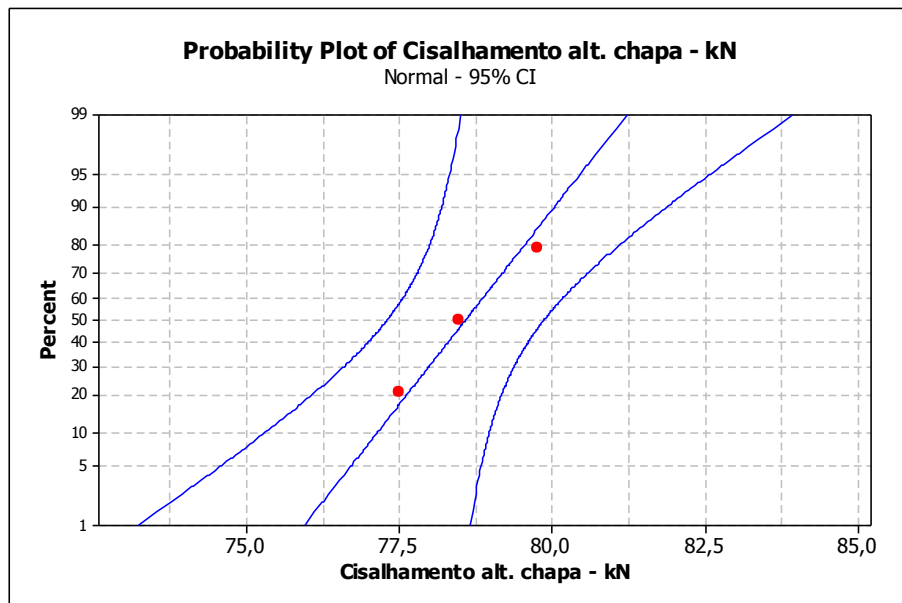


Figura 46 Papel de probabilidade do parafuso alternativo utilizando a chapa de apoio.

### 5.9.1.2 Análise da aleatoriedade

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

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

$H_1$ : 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 Minitab obteve-se  $p\text{-valor}$  de 0,480, resultando em um valor maior que 0,05, não rejeitando-se a hipótese de aleatoriedade.

### 5.9.2 Comparações de média para os parafusos utilizando a chapa de apoio – Teste t de student

Os resultados do teste T de *student* apresentaram p-valor zero. Assim ao nível de 1% de significância há evidências muito fortes de se rejeitar a hipótese  $H_0$ , ou seja, o tipo do parafuso é significativo pois apresenta diferença entre as médias das amostras ensaiadas, conforme mostra a Figura 47.

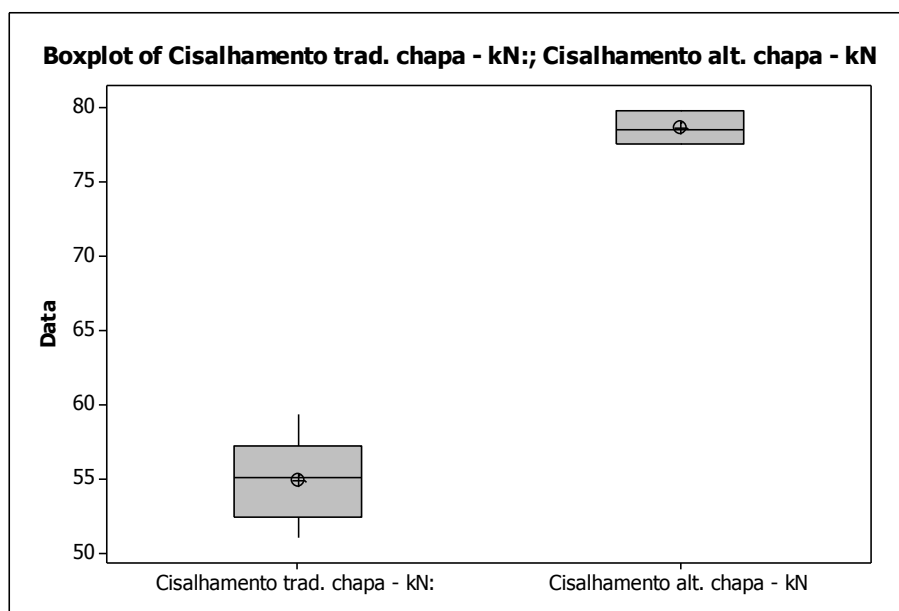


Figura 47 Box plot da comparação da carga de ruptura de ambos os tipos de parafusos utilizando a chapa de apoio.

A estimativa da diferença estatística de ambos os modelos de parafuso utilizando chapa de apoio circundou-se em 23,71 kN, abrangendo um intervalo de confiança entre 25,98 e 21,43 kN com nível de significância de 5%.

Para esta pequena amostra, o aumento da área de cisalhamento no plano de corte do parafuso e a utilização da chapa de apoio de 4 mm produziu efeitos positivos na resistência ao cisalhamento do parafuso. A média de 78,58 kN dos parafusos alternativos que receberam este acréscimo de área foi significativamente melhor ( $\alpha = 0,01$ ) do que o grupo que não recebeu, com média de 54,87 kN.

### 5.10 Análise comparativa da resistência de ambos os tipos de parafusos utilizando a chapa de apoio

Em ambos os modelos de parafuso notou-se que há influência da chapa de apoio na resistência ao cisalhamento do parafuso. Porém, a quantificação desta influência não é significativa devido à pequena população amostral do parafuso alternativo e à não ruptura do mesmo.

Por se tratar de comparações teóricas e experimentais, utiliza-se como referência a ruptura descrita pela teoria da resistência dos materiais para efetuar as comparações da resistência a ruptura.

O parafuso tradicional apresentou força de ruptura média experimental para as 27 amostras de 54,76 kN, 13% inferior ao definido teoricamente (62,83 kN). Mesmo a resistência ao esmagamento e rasgamento da chapa de apoio resultando em 80,44 kN, valor este superior à média experimental obtida, não se pode desconsiderar que a chapa de apoio não influenciou a resistência ao cisalhamento do parafuso.

A média experimental obtida pelo parafuso tradicional foi superior à resistência ao cisalhamento descrito pelas normativas (Tabela 11). Entretanto, as normativas possuem coeficientes parciais de segurança que ponderam essas forças. A amplitude das variações presentes nas normativas foram em torno de 206% e 313%, sobressaindo a resistência do parafuso.

Quanto ao parafuso alternativo, a média experimental obtida de 78,58 kN sobressaiu a resistência teórica dada de 77,10 kN, inversamente ao que aconteceu com o parafuso tradicional. Quando analisada a resistência ao cisalhamento utilizando os coeficientes de ponderação das forças (Tabela 12), o parafuso alternativo apresentou um percentual superior variando entre 156% e 270%; porém, 30% inferior a resistência ao esmagamento e rasgamento de 111,38 kN.

Diz-se então, que a resistência de ambos os tipos de parafusos utilizando a chapa de apoio foram superiores à resistência ao cisalhamento estabelecida pelas normativas; porém, inferiores aos valores de esmagamento e rasgamento definidos pelas mesmas.

Conforme a estimativa dada no Teste t, a diferença estatística de ambos os tipos de parafusos (23,71 kN) com ganho percentual de 43%, não supera os 64% do aumento de área na parte oblonga do parafuso alternativo, passando de 78,53 mm<sup>2</sup> para 128,50 mm<sup>2</sup>. Contudo, as 3 amostras do parafuso alternativo sofreram apenas deformações plásticas, não rompendo as amostras por cisalhamento no plano de corte. Sendo assim, a estimativa de 78,58 kN refere-se à resistência do conjunto da ligação e não da análise individual do parafuso alternativo.

A influência da chapa de apoio, como parte conjunta da simulação da chapa lateral de silo, na resistência do parafuso deverá ser abordada em trabalhos futuros e com população amostral significativa. Buscando, a princípio, uma ligação parafusada diferenciada, capaz de romper o parafuso alternativo.

## 5.11 Discussão geral



Este trabalho 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. O dimensionamento teórico de ambos os modelos se basearam 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 obtidos em laboratório por meio de ensaios e resultados teóricos, obtidos com base em modelos matemáticos segundo previsões normativas, adotou-se como unitários os coeficientes de ponderação das forças e a redução da área de cisalhamento no plano de corte.

Para a viabilidade do parafuso alternativo, manteve-se a mesma massa do parafuso tradicional e as mesmas recomendações normativas para o enquadramento da norma ISO e classe de resistência. Retirou-se massa da cabeça do parafuso tradicional (sextavada) para a inserção na área do plano de corte do parafuso alternativo, tornando-o com seção oblonga e cabeça redonda. Diversas configurações geométricas foram analisadas, na tentativa de investigar ao máximo o comportamento do elemento e seu comportamento nas ligações das chapas dos silos.

O estudo envolveu a análise de 23 parafusos tradicionais e 16 amostras do parafuso alternativo pelo ensaio de cisalhamento direto. Atendidas as suposições do modelo e o controle do processo de fabricação através das cartas de controle individual e da amplitude móvel, verificou-se através da comparação múltipla de médias a estimativa da diferença estatística de 60,27 kN, abrangendo um intervalo de confiança entre 62,02 e 58,51 kN, com nível de significância de 5%. 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.

Uma análise de erro do modelo foi contemplada no trabalho para a construção da variável aleatória erro de modelo ( $M_e$ ) do parafuso alternativo, 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 em um valor unitário, indicando que o resultado experimental obtido não aplicou-se 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 de 39% na resistência do parafuso tradicional em relação ao modelo matemático avaliado. Encontrou-se o  $F_{\text{correto}}$  do parafuso alternativo através da análise da média da  $M_e$  e do valor teórico, acertando-se a confiabilidade dos resultados do experimento.

Tendo como intuito a utilização em chapas do corpo de silos metálicos, verificou-se a influência da chapa do corpo na resistência ao cisalhamento dos parafusos. Foram analisadas

27 amostras do parafuso tradicional, com chapas de apoio 3,35 mm, e 3 amostras do parafuso alternativo, com chapas de apoio 4 mm.

Para os conjuntos do parafuso tradicional, adotou-se a mesma resistência ao cisalhamento do parafuso que a obtida pelo ensaio de cisalhamento direto e a verificação do esmagamento e rasgamento da chapa de apoio utilizando as recomendações da NBR 14762 (ABNT, 2010), sendo esta superior ao cisalhamento do parafuso. Atendidas as suposições do modelo, verificou-se que há influência da chapa de apoio na resistência ao cisalhamento do parafuso tradicional.

O conjunto do parafuso alternativo utilizando as chapas de apoio apresentou resultado inverso ao mesmo procedimento adotado pelo parafuso tradicional. As chapas de apoio rasgaram-se anterior ao cisalhamento esperado do parafuso, levando o mesmo apenas até a deformação plástica.

Atendidas as suposições do modelo para ambos os experimentos, aplicou-se o teste de comparação múltipla de médias e, ao nível de 1% de significância, há evidências muito fortes de que o parafuso alternativo seja significativo, pois apresentou diferença entre as médias ensaiadas. A estimativa da diferença estatística circundou-se em 23,71 kN, com 5% de significância o intervalo de confiança abrange 26,82 e 20,59 kN.

Para esta pequena amostra, o aumento da área na região de corte do parafuso alternativo e o formato do furo na chapa de apoio produziram efeitos significativos na resistência ao cisalhamento em relação ao parafuso tradicional.

Em virtude dos fatos mencionados, de uma maneira geral, as análises realizadas mostraram que o aumento da área no plano de corte do parafuso alternativo apresentou diferenças significativas em relação ao modelo tradicional, assim como houve influência das chapas de apoio na resistência do conjunto.

## 6 CONCLUSÕES

Nas condições em que foram realizados os ensaios, pode-se concluir que:

- I. 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;
- II. A viabilidade econômica do parafuso alternativo foi mantida devido à conservação da mesma massa de aço do parafuso tradicional;
- III. O acréscimo de 64% de área no plano de corte do parafuso alternativo significou um ganho de 128% na resistência ao cisalhamento do mesmo;
- IV. A determinação da média da variável aleatória erro de modelo do parafuso alternativo indicou um comportamento experimental seguro e conservador. Porém, os resultados obtidos não se aplicaram unitariamente ao fenômeno mecânico estudado. A confiabilidade dos resultados elevou em 39% o dimensionamento teórico, utilizando as normativas vigentes, retirando-se os coeficientes de ponderação das forças e a redução da área do plano de corte;
- V. 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;
- VI. 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.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos na pesquisa e no embasado no aporte literário neste texto dissertativo, recomenda-se, como estímulo ao desenvolvimento e à inserção de novas tecnologias e metodologias na confecção de silos metálicos, um estudo baseado na otimização das chapas laterais utilizando em suas costuras o parafuso alternativo.

Concluídos até o momento o ganho significativo de resistência ao cisalhamento e a expectativa da viabilidade econômica devido ao parafuso alternativo possuir o mesmo peso do parafuso tradicional, atestou-se neste trabalho que o parafuso alternativo se torna uma provável solução nas ligações parafusadas das chapas metálicas utilizadas no corpo dos silos.

Visto, a priori, que em silos com menor ou maior capacidade a resistência da chapa lateral depende do tipo de costura, das distâncias entre parafusos, das quantidades e da resistência dos parafusos. Portanto, sugere-se para trabalhos futuros:

Propor um modelo de ligação da chapa lateral visando o aumento da resistência;

- a) Reduzir o custo de um conjunto de chapa lateral de espessura fina parafusada utilizando menos parafusos alternativos, mas mantendo a mesma resistência que quando utilizado o parafuso tradicional;
- b) Maximizar a resistência das chapas laterais com espessuras superiores a 4,75 mm, visando o aumento do número de anéis dos silos e por consequência sua capacidade de armazenamento;
- c) Comparar a resistência das ligações parafusadas para ambos os modelos de parafusos;
- d) Verificar a redução de custo com a implantação do elemento alternativo;
- e) Confrontar tempos de montagem do corpo do silo utilizando ambos os tipos de parafusos.

## 8 REFERÊNCIAS

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.

\_\_\_\_\_. **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.

\_\_\_\_\_. **ASTM F606**: Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, and Rivets (Metric). United States, 2009.

\_\_\_\_\_. **ASTM A490**: Standard Specification for Structural Bolts, Alloy Steel, Heat Treated, 150 Ksi Minimum Tensile Strength. United States, 2012.

\_\_\_\_\_. **ASTM A143M**: Standard Practice for Safeguarding Against Embrittlement of Hot-Dip Galvanized Structural Steel Products and Procedure for Detecting Embrittlement. United States, 2014.

ANDRADE Jr., Luciano Jorge de. **A ação do vento em silos cilíndricos de baixa relação altura x diâmetro**. Tese de Doutorado: USP - São Carlos, 2002. 172 p.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 6123**: Força devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

\_\_\_\_\_. **NBR 8855**: EB168 – Propriedades mecânicas de elementos de fixação – Parafusos e prisioneiros – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 6656**: Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade, Especificação. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **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.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. R. **Resistência dos materiais**. 3.ed. São Paulo: Pearson Makron, 1995. 1255 p.

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

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

CALIL Jr., C. **Sobrepresiones em lãs Paredes de lós Silos para Almacenamento de Productos Pulverulentos Cohesivos**. Tese de Doutorado: EPB - Barcelona, 1984. 184 p.

CALIL Jr., C. **Silos Metálicos de Chapas Corrugadas**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – USP: 1989. 149 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: 2007.239 p.

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, 2007, 129-155 p.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an Introduction**. New York: John; & Sons, Inc, 1991. 408p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **ISSN 2318-3241, Perspectiva Agropecuária – Safra 2015/2016**. Volume 3. Brasília, 2016. 130 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.

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

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. 477 p.

HEZEL, C. R. **Avaliação das pressões em silos verticais conforme as diferentes normas internacionais**. Dissertação de Mestrado: UNIOESTE – Casc avel, 2007.161 p.

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

\_\_\_\_\_.**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.

\_\_\_\_\_. **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.

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

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

RAVENET, J. **Silos:** deformaciones, fallas, explosiones – prevención de accidentes. Editores Técnicos Asociados – Barcelona: 1978. 364 p.

RAVENET, J. **Silos:** flujo vaciado de sólidos. formación de bovedas. efectos. Editores Técnicos Asociados – Barcelona: 1983. 335 p.

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

SCALABRIN, L. A. **Dimensionamento de silos metálicos para armazenagem de grãos.** Dissertação de Mestrado: UFRGS, 2008. 160 p.

SOUZA, S. A. de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos.** Editora Edgard Blucher Ltda: São Paulo, 1982. 286 p.

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.** Dissertação de Mestrado – INPE: São José dos Campos, 2008. 104 p.