**CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG**
**GRAZIELE CRISTINA BROCARDO**

# DIMENSIONAMENTO DE DISPOSITIVO DE SEGURANÇA PARA SUPORTAR OS ESFORÇOS GERADOS POR CABOS DE TERMOMETRIA EM ESTRUTURAS DE TETO DE SILOS PARA ARMAZENAGEM DE GRÃOS

**CASCAVEL - PR**
**2016**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG**
**GRAZIELE CRISTINA BROCARDO**

# DIMENSIONAMENTO DE DISPOSITIVO DE SEGURANÇA PARA SUPORTAR OS ESFORÇOS GERADOS POR CABOS DE TERMOMETRIA EM ESTRUTURAS DE TETO DE SILOS PARA ARMAZENAGE DE GRÃOS

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Projeto Final, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Professor Orientador: Me. Julio Tozo Neto**
**Coorientadora: Ma. Daniele Cristina Ficanha**

**CASCAVEL - PR**
**2016**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG**

**GRAZIELE CRISTINA BROCARDO**

# DIMENSIONAMENTO DE DISPOSITIVO DE SEGURANÇA PARA SUPORTAR OS ESFORÇOS GERADOS POR CABOS DE TERMOMETRIA EM ESTRUTURAS DE TETO DE SILOS PARA ARMAZENAGEM DE GRÃOS

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Professor **Mestre / Engenheiro Civil Julio Tozo Neto.**

**BANCA EXAMINADORA**

Orientador Profª. **Me. Julio Tozo Neto**
Centro Universitário FAG
Engenheiro Civil

Coorientadora **Ma. Daniele Cristina Ficanha**
Centro Universitário FAG
Engenheira Civil

Professor **Esp. Jefferson T. Homrich**
Centro Universitário FAG
Engenheiro Civil

Cascavel, 26 de outubro de 2016.

*A Deus.*

*Aos meus pais, Claucedir e Beatriz.*

*À minha irmã, Gabriele.*

*Ao meu esposo, Jean.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pela sabedoria para fazer cada escolha no decorrer destes anos de estudo.

Aos meus queridos pais Claucedir e Beatriz, por todo incentivo e apoio, pois, sem dúvidas, são o alicerce que sustenta a vontade de ir cada vez mais longe. Vocês são o meu exemplo de pessoa e de caráter; por isso, sou grata por cada ensinamento e por sempre estarem ao meu lado.

Ao meu amado esposo Jean, pelo companheirismo e por todo apoio, principalmente nos momentos em que duvidei da minha capacidade, você sempre esteve ao meu lado para me dar forças para seguir em frente e querer ser melhor a cada dia.

À minha irmã Gabriele, pela amizade, pela cumplicidade, por me fazer rir em todos os momentos e por sempre estar ao meu lado.

Aos meus avós Orestes, Thereza, Waldecir e Terezinha, pelo carinho, por cada conselho, por todo incentivo e por me acolherem de braços abertos quando precisei.

À minha amiga Bruna, pelo carinho, pelas conversas e conselhos, pelo apoio em várias decisões e por sempre estar ao meu lado para me dizer “Calma Graziele!”.

À minha amiga Majore, pelo carinho, pelas ideias compartilhadas e por sempre se dispor a me ajudar quando foi preciso.

Ao Professor Julio Tozo, pela orientação e pela paciência.

À Engenheira Daniele C. Ficanha, pela coorientação, pela amizade, por me conduzir em cada etapa deste trabalho, pelos conhecimentos repassados e, principalmente, pela paciência.

Aos Engenheiros Edemar Schelle, Rafael Frank, Mariane Paula e Eduardo Cechin, pela amizade, por cada ensinamento e por sempre sanarem minhas dúvidas.

À empresa Comil Silos e Secadores pela oportunidade de estágio e por me proporcionar a base para a realização deste trabalho.

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”*

Albert Einstein

## RESUMO

A incidência de carregamentos sobre a estrutura do teto de silos metálicos, quando não consideradas em sua totalidade, ocasionam falhas estruturais que podem levar ao colapso total da estrutura. Visando contribuir para a segurança estrutural, este trabalho tem o intuito de propor um modelo de dispositivo de segurança para suportar os esforços gerados pelos cabos de termometria em estruturas de teto de silos metálicos para armazenamento de grãos. O dispositivo é constituído por uma chapa de aço de alta resistência fixada na estrutura do teto do silo por uma ligação parafusada e com um furo na extremidade livre, dimensionado para passar o cabo de termometria. Seu funcionamento é dado a partir do rasgamento da chapa antes que seja atingida a tensão resistente limite da estrutura do teto, evitando assim que a mesma entre em colapso. Para o seu dimensionamento verificaram-se as propriedades mecânicas do aço utilizado, através de ensaios de tração, elaborou-se uma planilha de cálculo para a verificação do esmagamento e rasgamento entre furo e borda e, realizaram-se ensaios de tração em amostras do dispositivo para obter seus valores. Através da análise dos resultados foi possível concluir que o dispositivo de segurança proposto é funcional, desde que sejam considerados os valores reais da resistência à ruptura do aço utilizado em sua composição.



**Palavras-chave**: Dispositivo de Segurança. Cabos de Termometria. Aço. Silo.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistemas estruturais para coberturas de silos. ..... 19
Figura 2.2 – Esmagamento do furo ..... 25
Figura 2.3 – Rasgamento entre furo e borda ..... 26
Figura 2.4 – Corpos de prova de seção transversal retangular. ..... 29
Figura 3.1 – Corpo de prova utilizado nos ensaios (valores em milímetros). ..... 32
Figura 3.2 – Corpos de prova aço ZAR 345 com espessuras de 1,55 mm. ..... 33
Figura 3.3 – Corpos de prova aço ZAR 345 com espessuras de 2,30 mm. ..... 33
Figura 3.4 – Corpo de prova fixo à máquina universal de ensaios de tração. ..... 34
Figura 3.5 – Corpo de prova rompido. ..... 35
Figura 3.6 – Corpos de prova 1,55 mm ..... 35
Figura 3.7 – Corpos de prova 2,30 mm ..... 36
Figura 3.8 – Dispositivo de Segurança ..... 38
Figura 3.9 – Dispositivo de segurança dimensionado ..... 45
Figura 3.10 – Dispositivo de Segurança com espessura de 1,55 mm ..... 40
Figura 3.11 – Dispositivo de Segurança com espessura de 2,30 mm ..... 41
Figura 3.12– Conjunto de dispositivo de segurança e suportes. ..... 42
Figura 3.13 – Conjunto de dispositivo de segurança e suportes fixo à máquina de ensaios. ..... 42
Figura 3.14 – Dispositivos de Segurança – 1,55 mm. ..... 43
Figura 3.15 – Dispositivos de Segurança – 2,30 mm. ..... 44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dimensionamento dispositivo de segurança ..... 39
Tabela 4.1 – Resistência à ruptura (*fu*) – Modelo 1 ..... 46
Tabela 4.2 – Resistência à ruptura (*fu*) - Modelo 2 ..... 47
Tabela 4.3– Cargas de Rasgamento - DS 1 ..... 49
Tabela 4.4 – Cargas de Rasgamento - DS 2 ..... 50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Aços especificados por Normas Brasileiras para uso estrutural ..... 23
Quadro 2.2 – Valores de propriedades mecânicas dos aços zincados de alta resistência. ..... 24
Quadro 2.3 – Dimensões máximas de furo (mm) ..... 27
Quadro 2.4 – Principais tipos de corpos de prova ..... 28
Quadro 2.5 – Dimensões dos corpos de prova ..... 29

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1– Comparação resistência à ruptura – Modelo 1 ..... 47
Gráfico 4.2 – Comparação resistência à ruptura - Modelo 2 ..... 48
Gráfico 4.3 – Comparação rasgamento (DS1) ..... 49
Gráfico 4.4 – Comparação rasgamento (DS1) ..... 51

**SUMÁRIO**

**CAPÍTULO 1 ..... 14**
1.1. INTRODUÇÃO ..... 14
1.2. OBJETIVOS ..... 15
1.2.1. Objetivo Geral ..... 15
1.2.2. Objetivos Específicos ..... 15
1.3. JUSTIFICATIVA ..... 15
1.4. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA ..... 16
1.5. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA ..... 16
**CAPÍTULO 2 ..... 18**
2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 18
2.1.1. Silos Metálicos para Armazenamento de Grãos ..... 18
2.1.1.1. Características da Estrutura do Teto do Silo de Armazenagem de Grão ..... 19
2.1.1.2. Cabos de Termometria ..... 20
2.1.2. Breve Histórico do Aço ..... 21
2.1.3. Definição e Classificação do Aço ..... 22
2.1.3.1. Propriedades Mecânicas dos Aços Zincados de Alta Resistência ..... 24
2.1.3.2. Resistência ao Esmagamento ..... 24
2.1.3.3. Resistência ao Rasgamento ..... 25
2.1.4. Dimensões dos Furos ..... 26
2.1.5. Ações, Combinações e Segurança ..... 27
2.1.6. Ensaios de Tração ..... 28
**CAPÍTULO 4 ..... 31**
3.1. METODOLOGIA ..... 31
3.1.1. Corpo de Prova do Aço Zincado de Alta Resistência – ZAR 345 ..... 31
3.1.1.1. Dimensionamento do Corpo de Prova ..... 31
3.1.1.2. Ensaios de Tração ..... 34
3.1.2. Dispositivo de Segurança ..... 36
3.1.2.1. Planilha de Dimensionamento ..... 36
3.1.2.2. Dimensionamento do Dispositivo de Segurança ..... 38
3.1.2.3. Ensaios de Tração ..... 41
**CAPÍTULO 4 ..... 45**

4.1. RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 45
4.1.1. Resistência à Ruptura (*fu*) – ZAR 345 ..... 45
4.1.2. Dispositivo de Segurança ..... 48
4.1.2.1. Modelo de Dispositivo de Segurança com Espessura de 1,55 mm ..... 49
4.1.2.2. Modelo de Dispositivo de Segurança com Espessura de 2,30 mm ..... 50
**CAPÍTULO 5 ..... 53**
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS ..... 53
**CAPÍTULO 6 ..... 55**
6.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS ..... 55
**REFERÊNCIAS ..... 56**
**APÊNDICE A – PLANILHA DE DIMENSIONAMENTO ..... 58**

# CAPÍTULO 1

## 1.1. INTRODUÇÃO

Os silos são estruturas construídas para o armazenamento de produtos granulares ou pulverulentos a granel, utilizados na agricultura, indústrias e siderurgia. Eles podem ser constituídos de diversos materiais, como concreto armado, aço ou madeira, no entanto, o mais utilizado atualmente na agricultura são os silos metálicos com chapa corrugada (PALMA, 2005, p. 1).

Segundo o Ministério da Agricultura (MAPA, 2016), o Brasil é um dos líderes mundiais na produção e exportação de vários produtos agropecuários. É o primeiro produtor e exportador de café, açúcar, etanol de cana-de-açúcar e suco de laranja. Além disso, lidera o ranking das vendas externas do complexo soja (farelo, óleo e grão). A partir disto percebe-se a grande necessidade de produção, armazenagem e transporte de produtos agropecuários, e dessa forma os silos surgem como um equipamento capaz de otimizar o processo.

O armazenamento de produtos em silos é considerado uma solução viável devido à possibilidade de conservação do produto ensilado, bem como à economia de espaço físico. A estocagem de produtos também pode ser considerada importante em termos econômicos, à proporção que se tem um maior controle do escoamento.

Com a crescente demanda por produtos agropecuários houve um aumento no número de silos existentes e juntamente com isso um aumento em suas capacidades e dimensões. Como consequência desse aumento cresceu também o número de acidentes resultantes de falhas de projeto assim como de montagem.

Conforme Martins (2012, p. 3), para que se projete um silo com eficiência, economia e segurança, é necessário que o projetista tenha conhecimento das pressões máximas exercidas pelo produto armazenado tanto na parede, como no teto e no fundo do silo. Na estrutura do teto, um dos fatores a serem considerados no cálculo são os esforços de tração gerados por cabos de termometria. A termometria consiste em cabos com sensores de temperatura fixados a estrutura do teto do silo os quais possuem a função de monitorar a temperatura e a umidade da massa de grãos.

Visando diminuir o número de acidentes e os prejuízos resultantes destes, atualmente são desenvolvidos vários estudos sobre o comportamento estrutural dos silos. A partir disto

tem-se uma contribuição para a elaboração de novas tecnologias que ajudam a melhorar a qualidade e a funcionalidade dos projetos estruturais de silos metálicos para armazenamento de grãos.

Este trabalho propõe um dispositivo de segurança que visa garantir a integridade estrutural do teto de silos metálicos para armazenamento de grãos, buscando evitar acidentes que geram grandes prejuízos humanos e financeiros.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo Geral

Dimensionar e ensaiar um dispositivo de segurança para suportar os esforços gerados pelos cabos de termometria em estruturas de tetos de silos metálicos.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Propor um modelo de dispositivo de segurança a partir do dimensionamento de uma chapa de aço de alta resistência;
- Verificar a resistência do aço através de ensaios de tração;
- Calcular a resistência ao rasgamento e esmagamento do aço, com base na NBR 14762/2010;
- Ensaiar amostras do dispositivo de segurança;
- Comparar os resultados teóricos com os resultados experimentais.

## 1.3. JUSTIFICATIVA

De acordo com Martins (2012, p. 3), o projeto estrutural de um silo fundamenta-se nos carregamentos que incidem sobre a estrutura. Como exemplo dos carregamentos tem-se a ação dos ventos, o peso próprio da estrutura, o peso dos acessórios que são fixados ao silo, as características do produto que será armazenado, entre outros. Quando estes fatores não são

totalmente considerados podem resultar em acidentes que causam grandes prejuízos humanos e financeiros.

O peso específico do grão que será armazenado é um dos principais fatores a serem considerados no dimensionamento de um silo, pois cada tipo de grão armazenado influenciará de um forma diferente sobre a estrutura do silo. Quando os fatores não são considerados corretamente nos cálculos estruturais poderá ocorrer o colapso da estrutura.

A partir do gráfico de Isopletas da velocidade básica de ventos, dado pela NBR 6123/1988, nota-se que o Brasil possui regiões com grandes variações de cargas vento. Sendo assim, os silos devem ser dimensionados para suportar as cargas de vento, incidentes em sua região, para que não ocorra a ruptura da estrutura.

De acordo com Scalabrin (2008, p. 44), os esforços gerados pelos cabos de termometria no teto dos silos metálicos para armazenamento de grãos ocorrem devido ao atrito causado entre o produto armazenado e os cabos de termometria suspensos na estrutura do teto do silo metálico. O atrito gera esforços de tração nos cabos que devem ser suportados pela estrutura do teto do silo. Caso não sejam dimensionados para suportar tais cargas a estrutura do teto entrará em colapso.

O dispositivo de segurança dimensionado neste trabalho trará uma solução para garantir a integridade da estrutura do teto de silos metálicos para armazenamento de grãos quando estes forem submetidos aos esforços gerados por cabos de termometria. Assim é possível evitar grandes prejuízos financeiros resultantes dos acidentes causados pelo colapso da estrutura do teto.

## 1.4. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Como evitar os prejuízos estruturais gerados pelos esforços resultantes dos cabos de termometria no teto de silos metálicos para armazenagem de grãos?

## 1.5. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Os cálculos utilizados para o dimensionamento do dispositivo foram definidos a partir da NBR 14762/2010. Após dimensionadas, as amostras do dispositivo foram fabricadas e cedidas por uma empresa fabricante de silos situada na cidade de Cascavel - Paraná. Os

ensaios de tração foram realizados no laboratório de ensaios da empresa Comil Silos e Secadores Ltda., utilizando a máquina universal de ensaios de tração.

# CAPÍTULO 2

## 2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1.1. Silos Metálicos para Armazenamento de Grãos

Silo é a construção designada para armazenar e conservar qualquer produto industrial e agrícola (CALIL E CHEUNG, 2007, p. 3).

Segundo a NBR 11162 TB-374/1990, os silos podem ser classificados de acordo com o formato e a posição do fundo:

- Silo de fundo plano: silo com fechamento inferior formado por superfície plana;
- Silo de fundo não plano: silo com fechamento inferior formado por superfície não plana;
- Silo de fundo elevado: silo com fechamento inferior situado em um nível superior ao solo;
- Silo de fundo enterrado: silo com fechamento inferior situado em um nível inferior ao solo;
- Silo de corpo semienterrado: silo com estrutura do corpo situada parcialmente abaixo do nível do solo.

Calil e Cheung (2007, p.6) classificam os silos de acordo com a forma geométrica e quanto à entrada de ar.

Quanto à forma geométrica, tem-se:

- Silos esbeltos: dispõem da relação entre a altura e o diâmetro (H/D) superior ou igual a 1,5;
- Silos baixos: dispõem da relação entre a altura e o diâmetro (H/D) inferior a 1,5.
- Silos horizontais: possuem dimensões longitudinais predominantemente superiores as outras dimensões.

Quanto a entrada de ar:

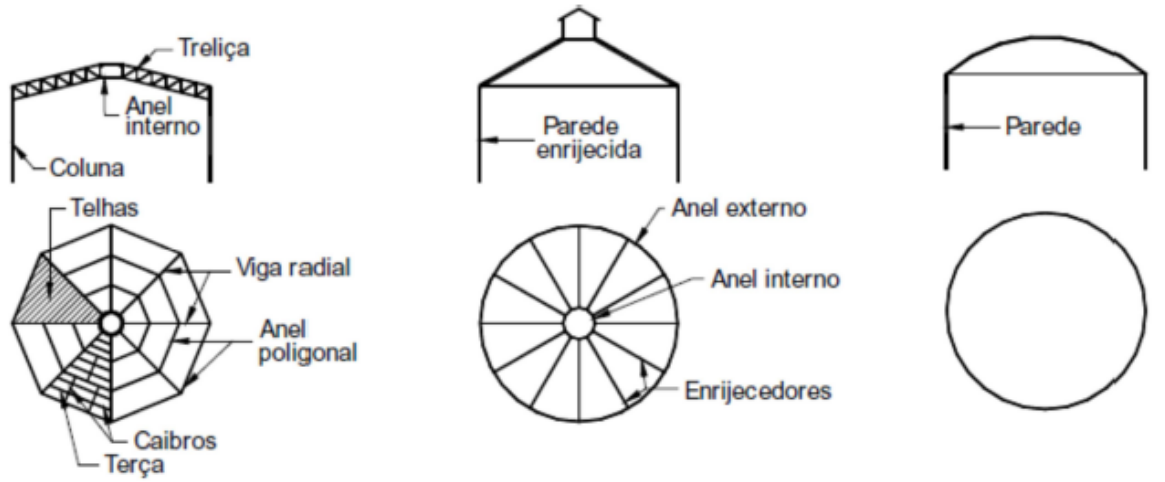
- Silos herméticos: não permitem a troca de ar entre o interior da célula e o exterior;
- Silos não-herméticos: permitem a troca de ar entre o interior da célula e o exterior.

De acordo com Scalabrin (2008, p. 31) os silos metálicos para armazenamento de grãos são compostos por duas partes, sendo corpo e teto. O corpo é constituído por chapas laterais, geralmente onduladas que formam os anéis, por montantes, sendo perfis metálicos que formam os pilares que dão suporte as chapas laterais, e por anéis de reforço, utilizados para enrijecer o silo quando este estiver sujeito a pressões de vento. O teto é composto por telhas que podem ser autoportantes, ou podem ser suportadas pela estrutura do teto.

### 2.1.1.1. Características da Estrutura do Teto do Silo de Armazenagem de Grão

Segundo Martins (2012, p. 12), a cobertura de um silo pode possuir forma plana, cônica ou duplamente curvada, como mostra a Figura 2.1. A forma cônica é a mais usual, uma vez que esta permite que o plano da cobertura fique aproximadamente paralelo ao produto armazenado. Já a cobertura em cúpula é pouco empregada em silos, pois requer dupla curvatura dos elementos e das telhas o que torna mais difícil a sua fabricação com boa precisão geométrica.

Figura 2.1 – Sistemas estruturais para coberturas de silos.




**a) Cobertura poliédrica com treliças** **b) Cobertura cônica enrijecida** **c) Cobertura esférica**

Fonte: TRAHAIR (1985b) *apud*. (Martins, 2012).

Conforme Scalabrin (2008, p. 31), a estrutura do teto de um silo pode ser autoportante ou pode necessitar de uma estrutura de suporte. A NBR 7821/1983 define teto cônico suportado como um teto com a forma aproximada de uma superfície cônica reta, no qual o suporte consiste em terças apoiadas em vigas radiais ou apoiadas em treliças, com ou sem colunas e o teto cônico autoportante como o teto que tem a forma aproximada de uma superfície cônica reta suportada unicamente pelo seu perímetro, e cujas chapas sustentam-se a si mesmas sem o auxílio de vigas radiais ou poligonais.

De acordo com Trahair (1985b, *apud* MARTINS, 2012, p. 13), a estrutura de apoio das chapas que formam a cobertura do silo é formada por um conjunto de elementos radiais ligados a um anel externo fixado aos montantes do silo. Geralmente, é necessário que os elementos radiais sejam ligados a um anel interno, o que permite o apoio do carregador do silo e forma a abertura por onde entra o produto que será armazenado. Quando houver o anel interno, o projeto estrutural deve prever ligações que transmitam o momento fletor dos elementos radiais para o anel.

#### 2.1.1.2. Cabos de Termometria

Martins (2012, p. 20) comenta que ao longo do período de estocagem a qualidade dos produtos armazenados pode ser afetada por diversos fatores que causam sua degradação, sendo o aumento da temperatura local dos grãos um deles. O método utilizado para controlar a qualidade do produto armazenado é o monitoramento contínuo da temperatura do produto com a utilização de cabos de termometria suspensos na estrutura do teto.

De acordo com Scalabrin (2008, p. 44), o atrito gerado entre os grãos armazenados e os cabos de termometria resultam em esforços transmitidos para a estrutura do teto do silo nos pontos em que estes são fixados. Segundo Thompson (1987, *apud* MARTINS, 2012, p. 20), tais esforços podem não causar a falha total da estrutura, todavia, podem ocasionar falhas localizadas nos pontos de fixação dos cabos.

Martins (2012, p. 55) realizou uma comparação baseada em quatro estudos teóricos sobre as tensões resultantes dos cabos de termometria. A partir de análises teóricas e experimentais, Martins (2012, p. 85) concluiu que para silos esbeltos, em que a relação entre a altura e o diâmetro (H/D) é maior que 1,5, a equação proposta pela norma Argentina IRAM 8 015 (1997) fornece uma estimativa mais apropriada. E para silos baixos, em que a relação

entre a altura e o diâmetro (H/D) é menor que 1,5, a equação proposta por SCHWAB et al. (1991) possui um cálculo aproximado mais adequado.

### 2.1.2. Breve Histórico do Aço

Dentre as formas de utilização dos metais ferrosos o aço, o ferro fundido e ferro forjado são as mais usuais. Sendo o aço considerado, atualmente, o mais importante devido a sua empregabilidade em vários setores como o da construção civil, por exemplo, em que o aço pode ser apresentado como parte das obras ou como o material principal. O aço era conhecido desde a antiguidade, entretanto, por não possuir um processo industrial de fabricação, não era comercializado a preços competitivos.

Segundo Pfeil e Pfeil (2008, p. 2) o primeiro material siderúrgico empregado na construção civil foi o ferro fundido, entre 1780 e 1820, utilizado na construção de pontes em arcos ou treliçadas, com elementos sujeitos a esforços de compressão.

Em meados do século XIX o ferro forjado foi substituindo o uso do ferro fundido, visto que este oferecia maior segurança onde foram construídas pontes de treliças de ferro forjado, consideradas as obras mais importantes construídas entre 1850 e 1880. Porém, devido ao grande número de acidentes relacionados a estas obras, tornou-se necessário o desenvolvimento de estudos de materiais com melhores características.

Em 1856, o inglês Henry Bessemer inventou um forno que permitiu a produção do material em larga escala, a partir de 1860 e 1870. Em 1864, os irmãos Martin desenvolveram outro forno com maior capacidade de produção. A partir disto, o aço substituiu o uso do ferro fundido e do ferro forjado na indústria da construção.

A indústria siderúrgica foi implantada no Brasil a partir da construção da Usina Presidente Vargas da CSN – Companhia Siderúrgica Nacional, após a Segunda Guerra Mundial, em Volta Redonda, no Estado do Rio de Janeiro. Segundo o Instituto Aço Brasil (Açobrasil, 2016), atualmente, o Brasil possui um parque siderúrgico formado por 14 empresas privadas que operam 29 usinas em 10 estados brasileiros. A indústria do aço no Brasil produziu, em 2014, 33,9 milhões de toneladas de aço bruto, o que levou o país a ocupar a 9ª posição no *ranking* da produção mundial.

### 2.1.3. Definição e Classificação do Aço

Segundo Chiaverini, (1996, p. 159) os aços podem ser classificados em grupos com base em suas propriedades comuns. São classificados por sua composição, como os aços-carbono e aços-liga, pelo processo de acabamento, sejam laminados a quente ou a frio, e pela forma do produto acabado como barras, chapas, tubos e perfis.

Para estruturas são utilizados os aços-carbono e os aços com baixo teor de liga, visto que possuem propriedades de boa ductilidade, homogeneidade, soldabilidade e elevada relação entre a tensão resistente e a tensão de escoamento (PFEIL E PFEIL, 2008, p. 1).

A NBR 8800/2008 define que o aço utilizado na estrutura deve ter especificado o grau de corrosão aceitável para sua superfície. Concomitantemente, Pfeil e Pfeil (2008, p. 1) comentam que a resistência à corrosão somente é alcançada com pequenas adições de cobre.

Nos aços-carbono, o aumento de resistência em relação ao ferro se dá principalmente pelo teor de carbono, além de manganês, silício e cobre como elementos adicionais. (PFEIL E PFEIL, 2008, p. 2).

Conforme Chiaverini (1996, p. 166), os aços possuem o carbono como elemento preeminente, as propriedades de resistência mecânica, ou seja, o limite de escoamento e resistência à tração melhoram à medida que seu teor aumenta. Por outro lado, pioram as propriedades relacionadas à ductilidade e à tenacidade, assim como ao alongamento, à estricção e á resistência ao choque.

Pfeil e Pfeil (2008, p. 10) definem aços de baixa liga como aços-carbono acrescidos de elementos de liga, como cromo colúmbio, cobre, manganês, molibdênio, níquel, fósforo, vanádio, zircônio, que melhoram algumas propriedades mecânicas.

De acordo com Chiaverini (1996, p. 171), a introdução de elementos de liga nos aços-carbono pode aumentar a dureza e a resistência mecânica, assim como a resistência ao calor e ao desgaste. O aumento de resistência se dá pela adição de alguns elementos de liga com teores relativamente baixos, onde sua soma não ultrapasse 5%. Por outro lado, se introduzidos elementos de liga com teores mais elevados obtêm-se outras características como a melhora das propriedades elétricas e magnéticas, além de conferir a resistência à corrosão.

Os aços definidos por Normas Brasileiras para uso estrutural em perfis e chapas, conforme a NBR 8800/2008, “devem atender às condições relacionadas às propriedades mecânicas, onde a resistência ao escoamento ($f_y$) é menor ou igual a 450 MPA e a relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento fu/fy maior ou igual a 1,18”.

A NBR 8800/2008 apresenta a Quadro 2.1 no qual são descritos os valores nominais mínimos da resistência ao escoamento ($f_y$) e da resistência à ruptura ($f_u$) para aços especificados por Normas Brasileiras para uso estrutural.

Quadro 2.1 – Aços especificados por Normas Brasileiras para uso estrutural

| ABNT NBR 7007 | | | ABNT NBR 6648 | | | ABNT NBR 6649 / ABNT NBR 6650 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral | | | Chapas grossas de aço-carbono para uso estrutural | | | Chapas finas (a frio/a quente) de aço-carbono para uso estrutural | | |
| Denominação | $f_y$ MPa | $f_u$ MPa | Denominação | $f_y$ MPa | $f_u$ MPa | Denominação | $f_y$ MPa | $f_u$ MPa |
| MR 250 | 250 | 400-560 | CG-26 | 255 | 410 | CF-26 | 260/260 | 400/410 |
| AR 350 | 350 | 450 | CG-28 | 275 | 440 | CF-28 | 280/280 | 440/440 |
| AR 350 COR | 350 | 485 | | | | CF-30 | ---/300 | ---/490 |
| AR 415 | 415 | 520 | | | | | | |

| ABNT NBR 5000 | | | ABNT NBR 5004 | | | ABNT NBR 5008 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Chapas grossas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica | | | Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica | | | Chapas grossas e bobinas grossas, de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural | | |
| Denominação | $f_y$ MPa | $f_u$ MPa | Denominação | $f_y$ MPa | $f_u$ MPa | Denominação | $f_y$ MPa | $f_u$ MPa |
| G-30 | 300 | 415 | F-32/Q-32 | 310 | 410 | CGR 400 | 250 | 380 |
| G-35 | 345 | 450 | F-35/Q-35 | 340 | 450 | | | |
| G-42 | 415 | 520 | Q-40 | 380 | 480 | CGR 500 e CGR 500A | 370 | 490 |
| G-45 | 450 | 550 | Q-42 | 410 | 520 | | | |
| | | | Q-45 | 450 | 550 | | | |

| ABNT NBR 5920/ABNT NBR 5921 | | | ABNT NBR 8261 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural | | | Perfil tubular, de aço-carbono, formado a frio, com e sem costura, de seção circular ou retangular para usos estruturais | | | | |
| Denominação | $f_y$ MPa | $f_u$ MPa | Denominação | Seção circular | | Seções quadrada e retangular | |
| | | | | $f_y$ MPa | $f_u$ MPa | $f_y$ MPa | $f_u$ MPa |
| CFR 400 | ---/250 | ---/380 | B | 290 | 400 | 317 | 400 |
| CFR 500 | 310/370 | 450/490 | C | 317 | 427 | 345 | 427 |

[a] Para limitações de espessura, ver norma correspondente.

Fonte: NBR 8800 (2008).

Sobre os aços com qualificação estrutural que possuam propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio a NBR 14762/2010 comenta que “devem apresentar a relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento fu/fy maior ou igual a 1,08 e o 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”.

### 2.1.3.1. Propriedades Mecânicas dos Aços Zincados de Alta Resistência

Conforme a NBR 7008-3/2012, aços zincados de alta resistência (ZAR) são os aços ligados que podem manifestar elevados valores de resistência mecânica, no entanto possuem capacidade reduzida de conformação. São produzidos nos graus ZAR-230, ZAR-250, ZAR-280, ZAR-320, ZAR-345, ZAR-400 E ZAR-550.

O Quadro 2.2, retirado da NBR 7008-3/2012, apresenta os limites de valores das propriedades mecânicas

Quadro 2.2 – Valores de propriedades mecânicas dos aços zincados de alta resistência.

| Grau do aço | Limite de escoamento (LE) [a] MPa | Limite de resistência (LR) MPa | Alongamento total (al) b c $l_0 = 50$ mm % mín | Anisotropia plástica $r_{90}$ mín [d] | Expoente de encruamento n90 mín [d] |
|---|---|---|---|---|---|
| ZAR-230 | 230 mín | 310 mín | 22 | – | – |
| ZAR-250 | 250 mín | 360 mín | 17 | – | – |
| ZAR-280 | 280 mín | 380 mín | 16 | – | – |
| ZAR-320 | 320 mín | 390 mín | 14 | – | – |
| ZAR-345 | 345 mín | 430 mín | 12 | – | – |
| ZAR-400 | 400 mín | 450 mín | 10 | – | – |
| ZAR-550 | 550 mín | 570 mín | – | – | – |

Fonte: NBR 7008-3 (2012).

De acordo com a NBR 7008-3/2012, podem ser definidos requisitos especiais de valores de propriedades mecânicas, desde que estejam expressamente indicados na ordem de compra.

### 2.1.3.2. Resistência ao Esmagamento

Conforme Bolandim (2011, p. 52), o esmagamento é caracterizado pela ondulação fora do plano de ligação da extremidade do furo, assim como pela distorção da chapa na adjacência do furo. A Figura 2.2 ilustra o esmagamento do furo.

Figura 2.2 – Esmagamento do furo

Fonte: Pfeil e Pfeil (2008).

A verificação do esmagamento se dá através da força resistente de cálculo ao esmagamento, sendo esta diretamente proporcional à espessura da chapa e ao diâmetro do parafuso. A NBR 14762/2010 determina que a força resistente de cálculo ao esmagamento $F_{Rd}$, deve ser calculada por:

$$F_{Rd} = \alpha_e.d.t.fu / \gamma \qquad (\gamma = 1,55)$$

Onde:

$\gamma$: é o coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral;

fu: é a resistência à ruptura do aço;

d: é o diâmetro nominal do parafuso;

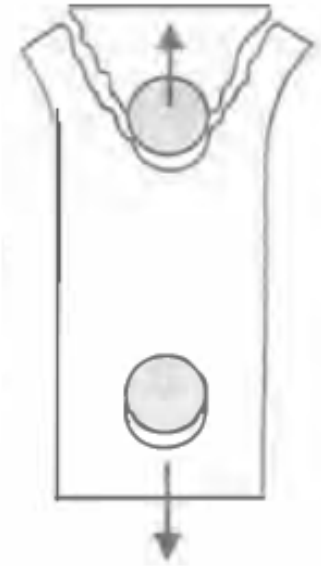
t: é a espessura da chapa de aço;

$\alpha_e$: é um fator igual a (0,183t + 1,53), com t em milímetros ($t \leq 4,75$ mm).

2.1.3.3. Resistência ao Rasgamento

Segundo Bolandim (2011, p. 49), o rasgamento da parede de um furo é identificado a partir do enrrugamento da chapa de aço, acompanhado pela ocorrência de um rasgo por arrancamento na direção da força aplicada. A Figura 2.3 demonstra a ocorrência do rasgamento entre furo e borda.

Figura 2.3 – Rasgamento entre furo e borda



Fonte: Pfeil e Pfeil (2008).

A verificação do rasgamento é feita por meio da força resistente de cálculo ao rasgamento, sendo esta diretamente proporcional à espessura da chapa de aço e à distância entre furo e borda em que ocorrerá o rasgamento. A NBR 14762/2010 determina que a força resistente de cálculo ao rasgamento $F_{Rd}$, deve ser calculada por:

$$F_{Rd} = t.e.fu / \gamma \qquad (\gamma = 1,45)$$

Onde:

$\gamma$: é o coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral;

fu: é a resistência à ruptura do aço;

t: é a espessura da chapa de aço;

e: é a distância, tomada na direção da força, do centro do furo-padrão à borda mais próxima do furo adjacente ou à extremidade do elemento conectado.

### 2.1.4. Dimensões dos Furos

Com base na NBR 14762/2010, o dimensionamento de furos para ligações parafusadas não devem ultrapassar os valores máximos especificados no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Dimensões máximas de furo (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 (2,5$d$) |
| ≥ 12,5 | $d$+1,5 | $d$ +5 | ($d$+1,5) x ($d$+6) | ($d$+1,5) x (2,5$d$) |

Fonte: NBR 14762 (2010).

### 2.1.5. Ações, Combinações e Segurança

A NBR 8681/2003 define ações como as causas que provocam esforços ou deformações nas estruturas, sendo as forças consideradas ações diretas e as deformações impostas como ações indiretas.

Segundo Calil e Cheung (2007, p. 57), toda estrutura deve permanecer adequada ao uso previsto, considerando o custo de construção e o prazo de referência da duração esperada, além de suportar todas as ações e outras influências que podem atuar durante a construção e sua utilização, a um custo razoável de manutenção.

Conforme a NBR 8681/2003, o conjunto de ações que podem operar simultaneamente em uma estrutura, durante um determinado período de tempo, é classificado como um tipo de carregamento. Em cada tipo de carregamento devem ser feitas as combinações necessárias para que a segurança seja verificada em todos os estados limites possíveis da estrutura.

As ações são classificadas conforme sua variabilidade de tempo em ações permanentes, ações variáveis e ações excepcionais (NBR 8681/2003).

### 2.1.6. Ensaios de Tração

De acordo com a NBR 6892-1/2013, o ensaio de tração é realizado por meio da solicitação de esforços de tração sobre o corpo de prova, até a ruptura, com o intuito de se obter os valores das propriedade mecânicas.

O corpo de prova pode ser obtido através da usinagem de uma amostra do produto ou pelo forjamento ou fundição (NBR 6892-1/2013). Os corpos de prova usinados devem possuir a curva de concordância entre as extremidades e o comprimento paralelo, quando estes possuírem dimensões diferentes. Já os corpos de prova obtidos através de fundição devem sempre ter curvas de concordâncias entre as extremidades e o comprimento paralelo.

Segundo a NBR 6892-1/2013, as extremidades do corpo de prova podem possuir qualquer formato, desde que sejam compatíveis com os dispositivos de fixação da máquina de ensaio. Sendo que o comprimento paralelo ($L_c$), ou comprimento livre entre os dispositivos de fixação nos casos em que o corpo de prova não possui curva de concordância, deve ser sempre superior ao comprimento original ($L_0$).

O Quadro 2.4 apresenta os tipos de corpos de prova definidos pela NBR 6892-1/2013, em que há um anexo correspondente na norma para cada tipo de corpo-de-prova.

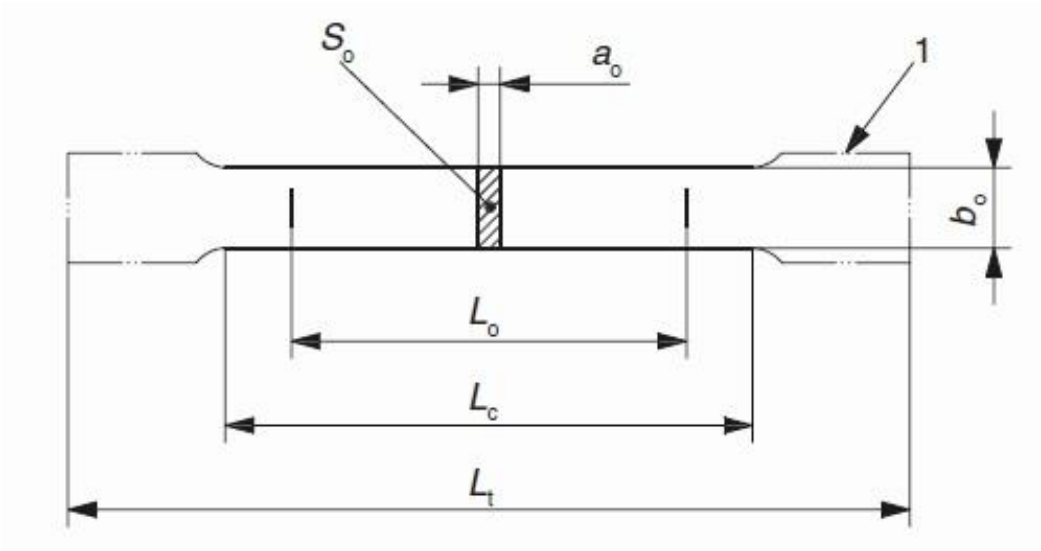
Quadro 2.4 – Principais tipos de corpos de prova

| **Tipo de produto** | | **Anexo correspondente** |
|---|---|---|
| **Chapas — Placas — Produtos planos**<br> <br>**Espessura**<br>*a* | **Fio — Barras — Perfis**<br> <br>**Diâmetro ou lado** | |
| 0,1 u *a* < 3 | — | B |
| — | < 4 | C |
| *a* W 3 | W 4 | D |
| **Tubos** | | E |

Fonte: NBR 6892-1 (2013).

Para este trabalho foram utilizados corpos de prova de seção retangular com espessuras inferior a 3 mm. A partir disto, a Figura 2.4 ilustra o modelo de corpo de prova de seção retangular, antes do ensaio de tração, conforme especificado pela NBR 6892-1/2013.

Figura 2.4 – Corpos de prova de seção transversal retangular.




Fonte: NBR 6892-1 (2013).

Segundo o Anexo B da NBR 6892-1/2013, o comprimento paralelo do corpo de prova, Lc, deve estar unido às extremidades através de curvas de transição com raio de pelo menos 20 mm, sendo a largura das extremidades igual a $1{,}2b_0$, onde $b_0$ é a largura inicial, e o comprimento paralelo maior ou igual que $L_0 + b_0/2$. Em situações que o corpo possui largura menor que 20 mm, e que a norma do produto não especifique o contrário, o comprimento de medida inicial, $L_0$, deve ser igual a 50 mm. Para este tipo de corpo de prova, o comprimento livre entre os dispositivos de fixação da máquina de ensaio deve ser igual a $L_0 + 3b_0$.

O Anexo B da NBR 6892-1/2013 destaca as três diferentes geometrias mais utilizadas para corpos de prova, conforme Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Dimensões dos corpos de prova

| Tipo de corpo de prova | Largura $b_0$ | Comprimento de medida inicial $L_0$ | Comprimento paralelo $L_c$ | | Comprimento livre entre garras para corpo de prova de lados paralelos |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Mínimo | Recomendado | |
| 1 | 12,5 ± 1 | 50 | 57 | 75 | 87,5 |
| 2 | 20 ± 1 | 80 | 90 | 120 | 140 |
| 3 | 25 ± 1 | 50 [a] | 60[a] | – | Não definido |

Fonte: NBR 6892-1 (2013).

A área da seção transversal inicial, $S_0$, é calculada com base nas dimensões do corpo de prova, sendo que não pode haver um erro na determinação da área da seção transversal inicial diferente de ± 2%. Tal erro influencia diretamente na medição da espessura do corpo de prova, de modo que esta não pode possuir um erro ± 0,2% (NBR 6892-1/2013).

De acordo com o Anexo B da NBR 6892-1/2013, a preparação dos corpos de prova se dá de forma que não afete qualquer propriedade da amostra, visto que qualquer ponto que possa ter sido encruado por corte ou prensagem deverá ser removido por usinagem.

# CAPÍTULO 3

## 3.1. METODOLOGIA

Este estudo tem por objetivo a elaboração de uma proposta de dispositivo de segurança que visa garantir a integridade da estrutura de teto de silos metálicos para armazenamento de grãos quando estes estiverem sujeitos a esforços resultantes dos cabos de termometria.

Trata-se de uma pesquisa quantitativa realizada de forma experimental, através do desenvolvimento de cálculos e da realização de ensaios em laboratório que, definem a funcionalidade do dispositivo de segurança proposto.

O dispositivo de segurança é constituído por uma chapa lisa de aço zincado de alta resistência - ZAR 345, fixada na estrutura do teto do silo por uma ligação parafusada e com um furo na extremidade livre, dimensionado para passar o cabo de termometria. Seu funcionamento se dá a partir do rasgamento da chapa constituinte antes que seja atingida a tensão resistente limite da estrutura do teto.

### 3.1.1. Corpo de Prova do Aço Zincado de Alta Resistência – ZAR 345

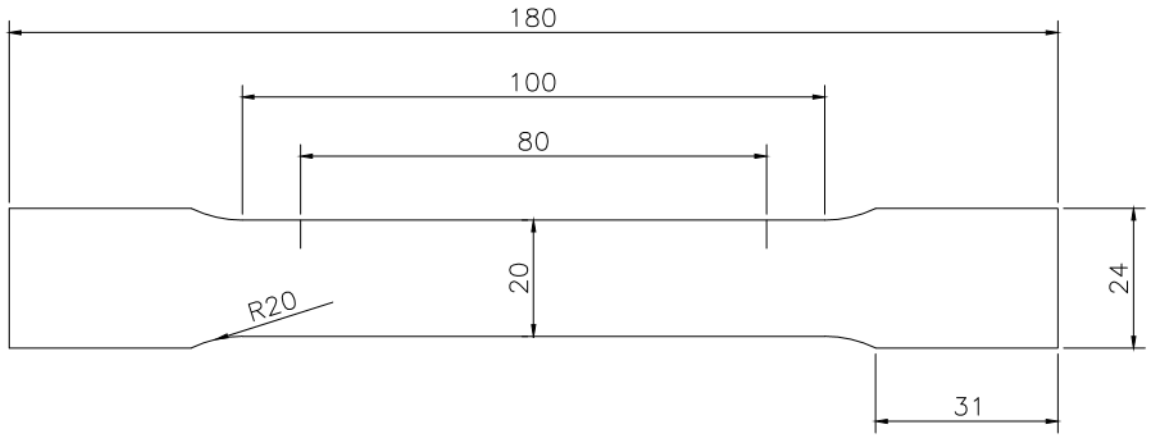
Para a verificação dos valores das propriedades do aço utilizado na composição do dispositivo de segurança, no caso o aço zincado de alta resistência – ZAR 345, elaboraram-se corpos de prova com base nas especificações apresentadas pela NBR 6892-1/2013.

#### 3.1.1.1. Dimensionamento do Corpo de Prova

O dimensionamento do corpo de prova se deu a partir do modelo pré-estabelecido pela NBR 6892-1/2013, o Tipo 2 dado pelo Quadro 5 apresentado no item 2.1.6. Sendo assim, admitiram-se a largura inicial ($b_0$) igual a 20 mm, o comprimento original ($L_0$) igual a 80 mm e o comprimento paralelo (Lc) igual a 100 mm. A partir destes valores calcularam-se a largura das extremidades ($b_1$) igual a 24 mm, onde $b_1$ é igual a $1{,}2b_0$, e o comprimento total do corpo de prova (Lt) igual a 180 mm.

Para a ligação entre o comprimento paralelo do corpo de prova e as extremidades admitiram-se curvas de transição com raio de 20 mm. A Figura 3.1 apresenta o corpo de prova com suas respectivas dimensões.

Figura 3.1 – Corpo de prova utilizado nos ensaios (valores em milímetros).

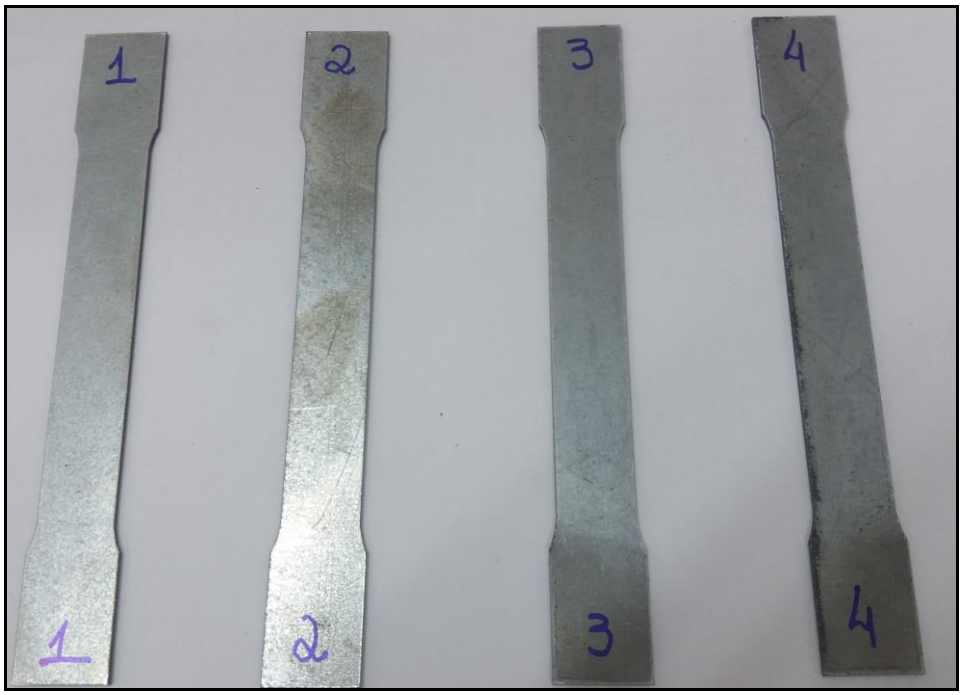



Fonte: Autora.

Dimensionaram-se dois modelos de corpos de prova, sendo um com a espessura de 1,55 mm e outro com espessura de 2,30 mm correspondendo às espessuras utilizadas no dimensionamento do dispositivo de segurança.

Foram fabricados quatro corpos de prova de cada modelo para a realização dos ensaios de tração. A Figura 3.2 apresenta os corpos de prova com espessura de 1,55 mm numerados de um a quatro.

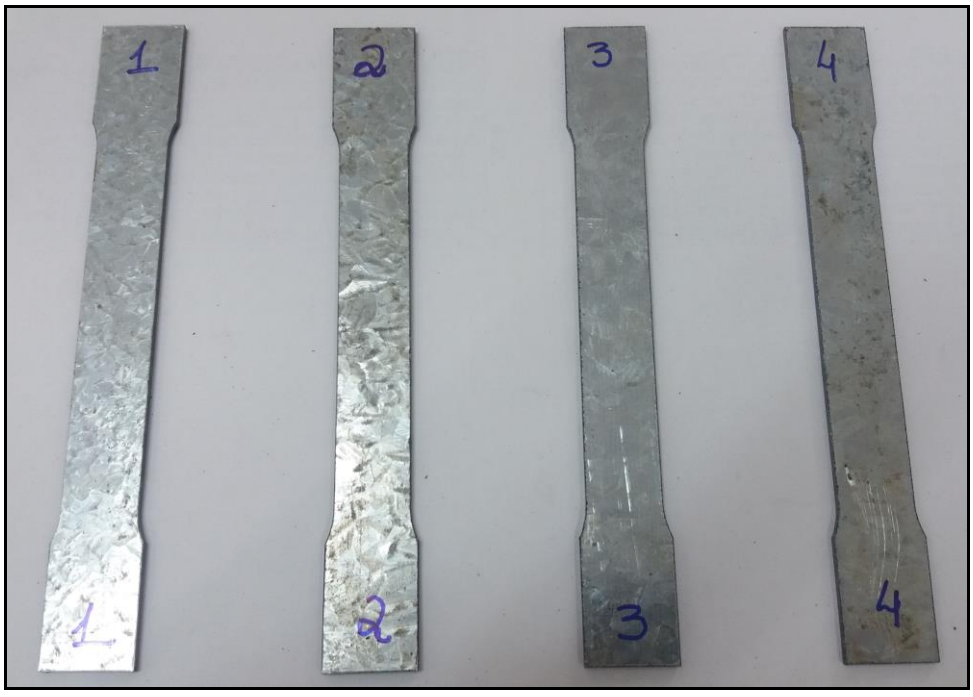
Figura 3.2 – Corpos de prova aço ZAR 345 com espessuras de 1,55 mm.




Fonte: Autora.

A Figura 3.3 exibe os corpos de prova com espessura de 2,30 mm numerados de um a quatro.

Figura 3.3 – Corpos de prova aço ZAR 345 com espessuras de 2,30 mm.




Fonte: Autora.

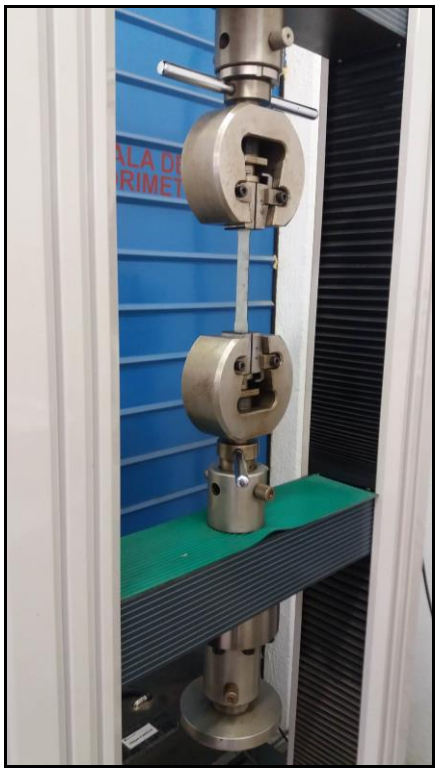
A partir do dimensionamento dos corpos de prova, realizaram-se os ensaios de tração para a verificação das propriedades mecânicas do aço ZAR 345.

### 3.1.1.2. Ensaios de Tração

Os ensaios de tração dos corpos de prova foram realizados no laboratório de ensaios da empresa Comil Silos e Secadores Ltda utilizando a máquina universal de ensaios de tração.

Primeiramente foram ensaiados os quatro corpos de prova com espessura de 1,55 mm e na sequência os quatro corpos de prova com espessura de 2,30 mm. A Figura 3.4 mostra o corpo de prova fixo à máquina universal de ensaios de tração.

Figura 3.4 – Corpo de prova fixo à máquina universal de ensaios de tração.



Fonte: Autora.

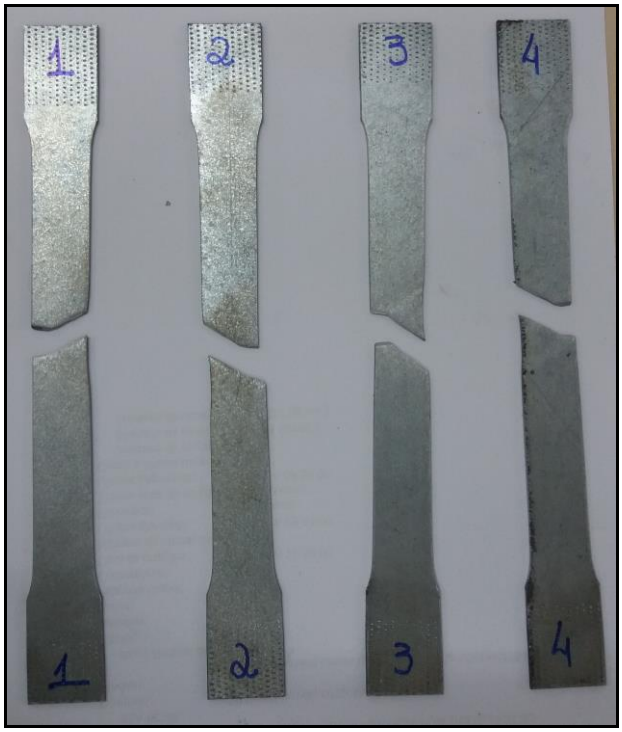
Fixado o corpo de prova à máquina de ensaios, iniciou-se a aplicação da carga de tração até atingir a ruptura do mesmo. A Figura 3.5 apresenta o corpo de prova após atingir o limite de ruptura.

Figura 3.5 – Corpo de prova rompido.

Fonte: Autora.

A Figura 3.6 mostra os corpos de prova com espessura de 1,55 mm rompidos.

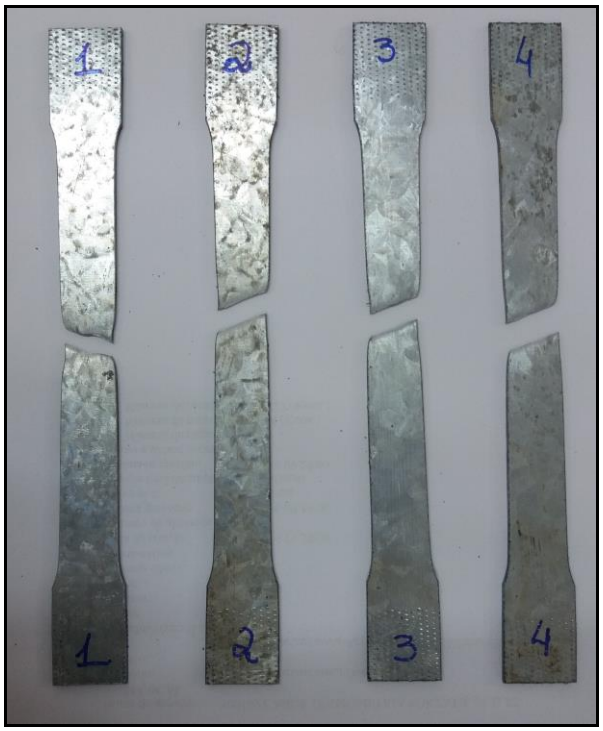
Figura 3.6 – Corpos de prova 1,55 mm




Fonte: Autora.

A Figura 3.7 mostra os copos de prova com espessura de 2,30 mm.

Figura 3.7 – Corpos de prova 2,30 mm




Fonte: Autora.

Com base nos resultados obtidos por meio dos ensaios de tração, calculou-se a resistência média à ruptura do aço ZAR 345 para cada modelo de corpo de prova.

### 3.1.2. Dispositivo de Segurança

Assim como os corpos de prova, os dispositivos de segurança foram fabricados e cedidos por uma empresa fabricante de silos situada na cidade de Cascavel – Paraná.

#### 3.1.2.1. Planilha de Dimensionamento

Elaborou-se uma planilha de cálculo no Excel para a realização do dimensionamento do dispositivo de segurança, assim como para a verificação do esmagamento e rasgamento que ocorrerá no aço, quando este for submetido a um determinado esforço de tração.

A planilha de cálculo é composta por uma tabela de verificações dadas a partir da carga de arrasto pré-estabelecida. A partir desta, calculou-se a distância entre furo e borda e são verificou-se o rasgamento e o esmagamento através das fórmulas dadas pela NBR 14762/2010.

Admitindo-se a carga de arrasto como o valor limite para ocorrência do rasgamento, calculou-se a distância entre furo e borda aplicando-se a resistência à ruptura do aço, a espessura da chapa de aço e a carga de arrasto, na seguinte fórmula do rasgamento:

$$F_{Rd} = t.e.fu / \gamma \qquad (\gamma = 1{,}45)$$

Onde:

$\gamma$: é o coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral;

fu: é a resistência à ruptura do aço;

t: é a espessura da chapa de aço;

e: é a distância, tomada na direção da força, do centro do furo-padrão à borda mais próxima do furo adjacente ou à extremidade do elemento conectado.

Para que a carga de rasgamento fosse menor que a carga limite estabelecida, adotou-se o valor arredondado imediatamente inferior ao resultado da distância calculada.

Para a verificação do esmagamento, aplicou-se o diâmetro do cabo de termometria, a espessura da chapa de aço e a resistência à ruptura do aço na seguinte fórmula do esmagamento:

$$F_{Rd} = \alpha_e.d.t.fu / \gamma \qquad (\gamma = 1{,}55)$$

Onde:

$\gamma$: é o coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral;

fu: é a resistência à ruptura do aço;

d: é o diâmetro do cabo de termometria;

t: é a espessura da chapa de aço;

$\alpha_e$: é um fator igual a (0,183t + 1,53), com t em milímetros ($t \leq 4{,}75$ mm).

Como resultado tem-se a carga limite em que o aço pode ser submetido até que ocorra seu esmagamento.

Para constatar se os valores adotados estão de acordo, verificou-se ainda se a resultante do esmagamento é inferior a do rasgamento e se a resultante do rasgamento é

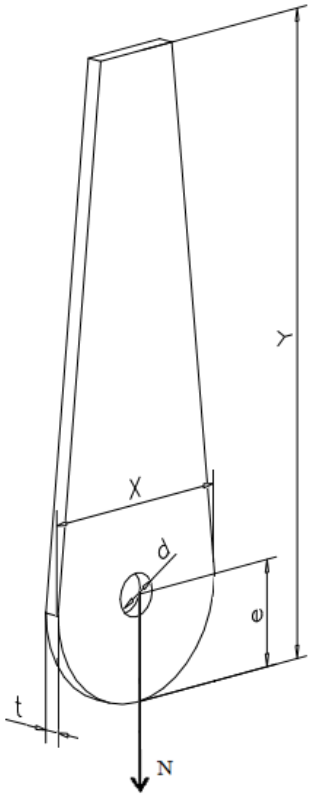
inferior a carga de arrasto. Se as verificações forem verdadeiras, a planilha exibe a mensagem “OK!”, caso contrário exibe a mensagem “ERRO!”, para que sejam adotados novos valores.

### 3.1.2.2. Dimensionamento do Dispositivo de Segurança

O dimensionamento do dispositivo de segurança proposto é dado a partir da inserção de valores na planilha de dimensionamento. Tais valores referem-se a carga de arrasto (N), resultante do cabo de termometria, à carga de ruptura do aço ($f_u$), à espessura da chapa (t) e o diâmetro do furo para passar o cabo (d).

A Figura 3.8 apresenta a representação do modelo de dispositivo de segurança, sendo X sua maior largura e Y seu comprimento.

Figura 3.8 – Dispositivo de Segurança




Fonte: Autora.

Foram dimensionados dois modelos de dispositivos de segurança baseados em duas cargas de arrasto distintas, 1700 Kgf e 2300 Kgf, disponibilizadas por uma empresa baseadas em suas tabelas de dimensionamento. Para o desenvolvimento dos cálculos foram adotadas as

unidades de força em Quilonewtons, sendo assim as cargas de arrasto são 16,67 kN e 22,56 kN, respectivamente.

O furo para passar o cabo de termometria foi dimensionado conforme as especificações dadas pela NBR 14762/2010, conforme Quadro 3 citado no item 2.1.4. O diâmetro do furo para passar o cabo de termometria é igual a 13,5 mm, visto que se considerou o diâmetro do cabo de termometria igual a 12 mm somado a 1,5 mm, admitindo-se furo alargado devido à maior facilidade na passagem do cabo de termometria.

Para o dimensionamento do Dispositivo de Segurança (DS1) estabeleceu-se a carga de arrasto de 16,67 kN, a espessura da chapa igual a 1,55mm, o diâmetro do cabo de termometria de 12 mm e a resistência à ruptura ($f_u$) de 465,60 MPa, resultante dos ensaios de tração. Admitindo-se que a carga de arrasto é a carga limite de rasgamento, calculou-se a distância entre furo e borda aplicando-se os valores na fórmula do rasgamento, resultando na distância de 33 mm. A partir disto, verificou-se a carga de esmagamento e rasgamento, resultando em 10,13 kN e 16,42 kN, respectivamente.

Para o dimensionamento do Dispositivo de Segurança (DS2) admitiram-se a carga de arrasto de 22,56 Kn, a espessura da chapa de 2,30 mm e o diâmetro do cabo de termometria de 12 mm e a resistência à ruptura ($f_u$) de 428,70 MPa, resultante dos ensaios de tração. Calculou-se a distância entre furo e borda aplicando-se os valores na fórmula do rasgamento, admitindo-se que a carga de arrasto é a carga limite de rasgamento, resultando na distância de 33 mm. A partir disto, verificou-se a carga de esmagamento e rasgamento, resultando em 14,89 kN e 22,45 kN.

A Tabela 3.1 apresenta o dimensionamento dos dispositivos de segurança DS-1 e DS-2, juntamente com as verificações de esmagamento e rasgamento.

Tabela 3.1 – Dimensionamento dispositivo de segurança

| DS | N (kN) | fu (MPa) | t (mm) | d (mm) | e calculado (mm) | e adotado (mm) | Esmagamento (kN) | Rasgamento (kN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 16,67 | 465,6 | 1,55 | 12 | 33,50 | 33 | 10,13 | 16,42 |
| 2 | 22,56 | 428,7 | 2,3 | 12 | 33,17 | 33 | 14,89 | 22,45 |

Fonte: Autora.

Para o comprimento do dispositivo de segurança adotou-se 200 mm sendo este baseado nas dimensões entre as garras da máquina universal de ensaios de tração, a qual possui limite de 400 mm. Para a largura do dispositivo de segurança admitiu-se na parte

superior a largura de 30 mm, visto que a largura máxima das garras de fixação da máquina universal de ensaios de tração é de 40 mm, na parte inferior duas vezes o valor da distância entre furo e borda calculada, ou seja, 66 mm.

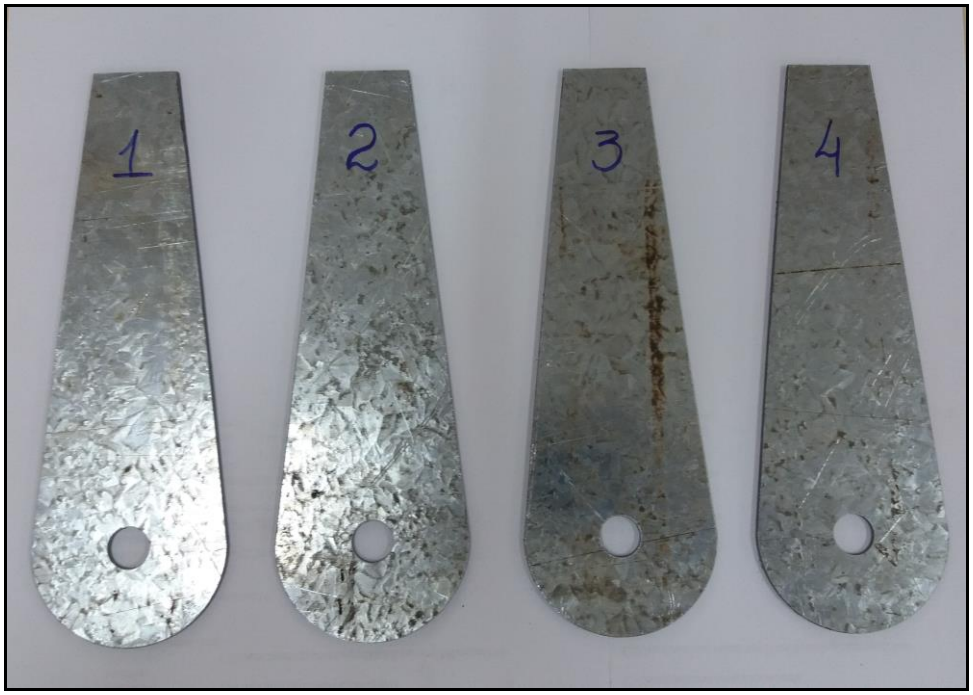
Foram fabricadas quatro amostras de cada dispositivo de segurança para a realização dos respectivos ensaios de tração. A Figura 3.9 mostra os dispositivos de segurança com espessura de 1,55 mm.

Figura 3.9 – Dispositivo de Segurança com espessura de 1,55 mm

Fonte: Autora.

Os dispositivos de segurança com espessura de 2,30 mm são ilustrados na Figura 3.10.

Figura 3.90 – Dispositivo de Segurança com espessura de 2,30 mm




Fonte: Autora.

3.1.2.3. Ensaios de Tração

Os ensaios de tração dos dispositivos de segurança foram realizados no laboratório de ensaios da empresa Comil Silos e Secadores Ltda sendo utilizada a máquina universal de ensaios de tração.

Devido à forma de fixação da máquina de ensaios, não foi possível utilizar cabos de termometria para a realização dos ensaios de tração; por isso, optou-se por utilizar duas chapas de aço e um parafuso para simular o cabo de termometria. As chapas de aço possuem espessura de 3 mm e foram utilizadas como suportes ligados ao dispositivo de segurança por um parafuso de 12 mm. Calculando-se o esmagamento do suporte verificou-se que este é superior à carga de esmagamento dos dispositivos de segurança, ou seja, os suportes resistirão à carga aplicada de forma a não influenciar na carga de rasgamento dos dispositivos de segurança. Com base nisto, a Figura 3.11 apresenta o conjunto formado pelo dispositivo de segurança e os suportes.

Figura 3.101 – Conjunto de dispositivo de segurança e suportes.

Fonte: Autora.

Primeiramente foram ensaiadas quatro amostras do dispositivo de segurança com espessura de 1,55 mm e na sequência quatro amostras do dispositivo de segurança com espessura de 2,30 mm. A Figura 3.12 mostra o conjunto de dispositivo de segurança e suportes fixos à máquina universal de ensaios de tração.

Figura 3.112 – Conjunto de dispositivo de segurança e suportes fixo à máquina de ensaios.

Fonte: Autora.

Após a fixação do conjunto de dispositivo de segurança e suportes na máquina de ensaios iniciaram-se a aplicação da carga de tração até que fosse atingido o rasgamento entre furo e borda do dispositivo de segurança. A Figura 3.13 apresenta os dispositivos de segurança com espessura de 1,55 mm após atingir o limite de ruptura.

Figura 3.123 – Dispositivos de Segurança – 1,55 mm.

Fonte: Autora.

A Figura 3.14 apresenta os dispositivos de segurança com espessura de 2,30 mm após atingir o limite de ruptura.

Figura 3.134 – Dispositivos de Segurança – 2,30 mm.

Fonte: Autora.

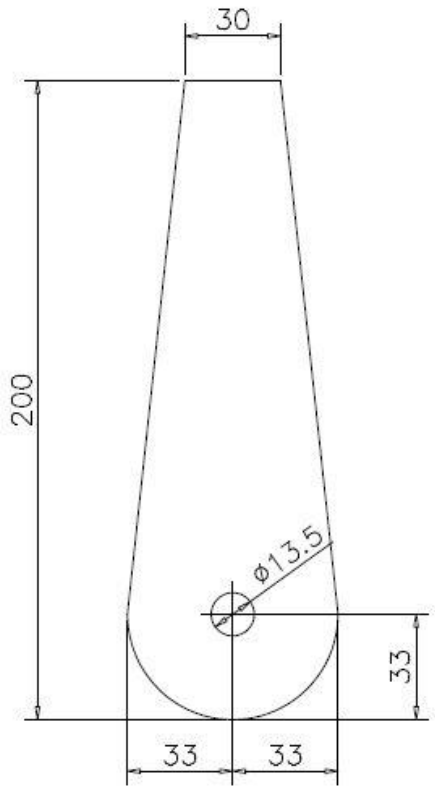
# CAPÍTULO 4

## 4.1. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1.1. Dimensionamento do Dispositivo de Segurança

A partir das verificações de rasgamento e esmagamento, e baseado nas dimensões de fixação da máquina de ensaios, determinou-se as dimensões do dispositivo de segurança conforme ilustra a Figura 3.15.

Figura 4.15 – Dispositivo de segurança dimensionado




Fonte: Autora.

A menor largura do dispositivo de segurança, no caso 30 mm, foi determinada com base na largura das garras de fixação da máquina de ensaios. No entanto, para casos práticos essa largura é definida a partir da distância entre furo e borda da ligação parafusada que fixará

o dispositivo de segurança na estrutura do teto do silo, sendo que esta deve ser superior à distância entre furo e borda da extremidade que passará o cabo de termometria.

### 4.1.2. Resistência à Ruptura (*fu*) – ZAR 345

A partir das cargas de ruptura resultantes dos ensaios de tração foi possível calcular a resistência à ruptura (*fu*) do aço ZAR 345 para cada modelo de corpo de prova, admitindo-se que a tensão é dada pela relação entre a força aplicada e a área da seção.

Para o modelo de corpo de prova 1 com espessura de 1,55 mm, verificou-se a área da seção igual a 31 mm². A Tabela 4.1 apresenta a resistência à ruptura (*fu*) de acordo com cada corpo de prova e sua respectiva média aritmética.

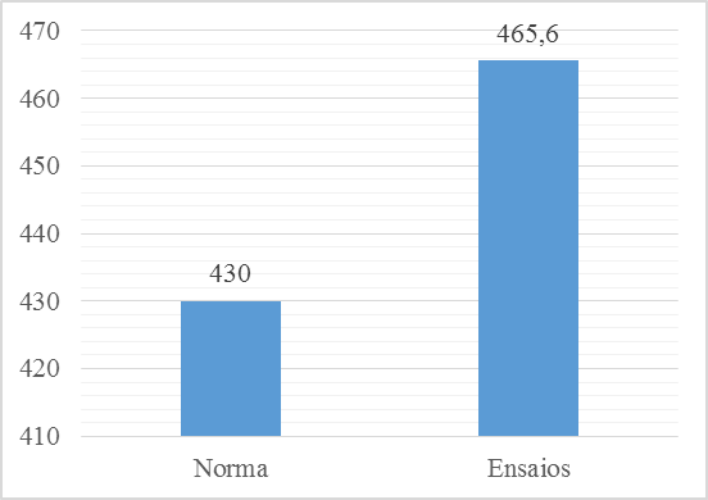
Tabela 4.1 – Resistência à ruptura (*fu*) – Modelo 1

| Corpo de Prova | Carga de Ruptura (kN) | Resistência à Ruptura (MPa) |
|---|---|---|
| 1 | 14428 | 465,40 |
| 2 | 14111 | 455,20 |
| 3 | 14589 | 470,60 |
| 4 | 14605 | 471,10 |
| *fu* médio (MPa) | | 465,60 |

Fonte: Autora.

O Gráfico 4.1 ilustra a comparação entre a resistência à ruptura mínima especificada pela norma e a resistência à ruptura média ensaiada para o modelo de corpo de prova 1.

Gráfico 4.1– Comparação resistência à ruptura – Modelo 1




Fonte: Autora.

Para o modelo de corpo de prova 2 com espessura de 2,30 mm verificou-se a área da seção igual a 46 mm². Dessa forma, a Tabela 4.2 mostra a resistência à ruptura (*fu*) de acordo com cada corpo de prova e sua respectiva média aritmética.

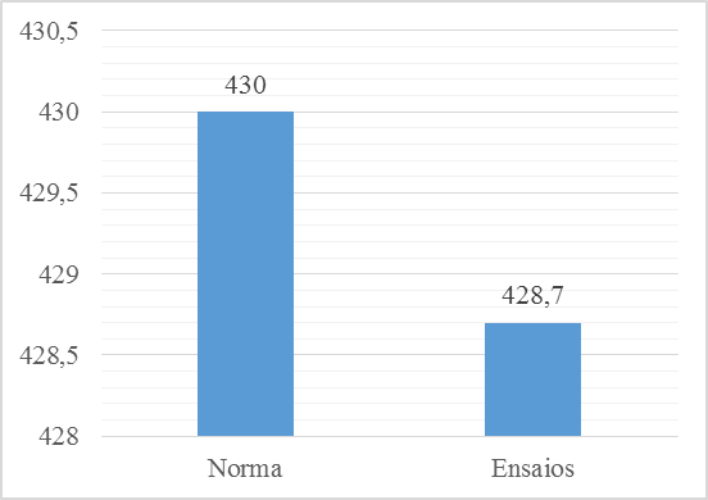
Tabela 4.2 – Resistência à ruptura (*fu*) - Modelo 2

| Corpo de Prova | Carga de Ruptura (kN) | Resistência à Ruptura (MPa) |
|---|---|---|
| 1 | 19780 | 430,00 |
| 2 | 19590 | 425,90 |
| 3 | 19795 | 430,30 |
| 4 | 19724 | 428,80 |
| *fu* médio (MPa) | | 428,70 |

Fonte: Autora.

O Gráfico 4.1 ilustra a comparação entre a resistência à ruptura mínima especificada pela norma e a resistência à ruptura média ensaiada para o modelo de corpo de prova 1.

Gráfico 4.2 – Comparação resistência à ruptura - Modelo 2




Fonte: Autora.

Para o aço ZAR 345 a NBR 7008-3/2012 especifica o valor mínimo de resistência à ruptura (*fu*) de 430 MPa, conforme Quadro 2.2 citado no item 2.1.3.1. Dessa forma é possível analisar que o modelo de corpo de prova com espessura de 1,55 mm o *fu* médio está de acordo com a norma, visto que o mesmo apresentou um valor superior ao mínimo estabelecido. Por outro lado, o modelo de corpo de prova com espessura de 2,30 mm apresentou o *fu* médio inferior ao mínimo especificado, estando em desacordo com a norma.

Com base nos resultados apresentados, utilizou-se a resistência média à ruptura verificada nos ensaios para o dimensionamento dos dispositivos de segurança mesmo que, no caso do dispositivo de segurança com espessura de 2,30 mm, o resultado apresentado fosse inferior ao mínimo estabelecido pela norma.

### 4.1.3. Dispositivo de Segurança

Por meio da realização dos ensaios de tração foi possível averiguar a carga de rasgamento para cada modelo de dispositivo de segurança dimensionado. Devido aos suportes utilizados para simular o cabo de termometria, não foi possível verificar a carga de esmagamento do furo, uma vez que eles dificultaram a visualização do furo do dispositivo de segurança durante a realização do ensaio. No entanto, analisando-se o formato do rasgamento de cada dispositivo de segurança é notável a ocorrência do esmagamento do furo.

#### 4.1.3.1. Modelo de Dispositivo de Segurança com Espessura de 1,55 mm

Para o dispositivo de segurança com espessura de 1,55 mm as cargas de rasgamento resultantes dos ensaios de tração são mostradas na Tabela 4.3, juntamente com a respectiva média aritmética.

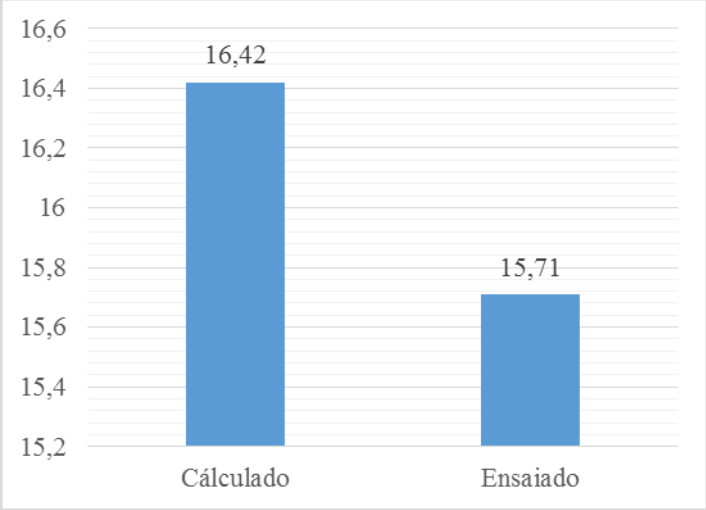
Tabela 4.3 – Cargas de Rasgamento (DS1)

| Dispositivo de Segurança | Carga de Rasgamento (kN) |
|---|---|
| 1 | 15,17 |
| 2 | 15,57 |
| 3 | 16,50 |
| 4 | 15,58 |
| Média | 15,71 |

Fonte: Autora.

O Gráfico 4.3 apresenta a comparação entre a carga média de resultante dos ensaios e a carga de rasgamento calculada.

Gráfico 4.3 – Comparação rasgamento (DS1)




Fonte: Autora.

Por meio da comparação entre a carga de rasgamento calculada e a ensaiada é possível constatar que houve uma diferença de 4,35% para menos. Tal diferença pode ser considerada mínima, visto que o rasgamento médio se deu antes que fosse atingida a carga limite calculada, garantindo o funcionamento do dispositivo de segurança.

#### 4.1.3.2. Modelo de Dispositivo de Segurança com Espessura de 2,30 mm

As cargas de rasgamento resultantes dos ensaios de tração para o modelo de dispositivo de segurança com espessura de 2,30 mm são apresentadas na Tabela 4.4, juntamente com a respectiva média aritmética.

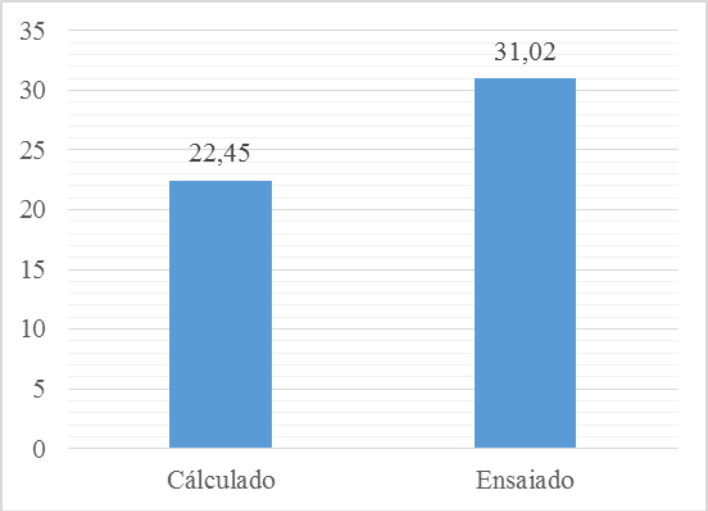
Tabela 4.4 – Cargas de Rasgamento (DS2)

| Dispositivo de Segurança | Carga de Rasgamento (KN) |
|---|---|
| 1 | 32,34 |
| 2 | 29,13 |
| 3 | 30,66 |
| 4 | 31,38 |
| Média | 30,88 |

Fonte: Autora.

O Gráfico 4.4 ilustra a comparação entre a carga média de resultante dos ensaios e a carga de rasgamento calculada.

Gráfico 4.4 – Comparação rasgamento (DS1)




Fonte: Autora.

Ao relacionar a carga média de rasgamento resultante dos ensaios com a carga de rasgamento calculada, analisa-se que houve uma diferença significativa de 37,54% para mais. Esse aumento de carga é considerado um fator negativo para o funcionamento do dispositivo de segurança, à medida que a carga de rasgamento calculada será repassada ao dimensionamento da estrutura do teto, sendo esta então a carga limite para o rompimento.

Com base na análise do dimensionamento do dispositivo de segurança e do método utilizado na realização dos ensaios, levantaram-se as seguintes hipóteses que podem ter contribuído para a diferença de carga de rasgamento:

- Devido à diferença de tempo entre a realização dos ensaios dos corpos de prova e as amostras do dispositivo de segurança, não houve um controle de estoque para constatar se o aço utilizado para ambos os ensaios é proveniente da mesma bobina de chapa de aço. Sendo assim, não é possível comprovar se a resistência a ruptura verificada nos corpos de prova é a mesma do aço constituinte do dispositivo de segurança;
- O atrito causado pelo contato do dispositivo de segurança com os suportes pode ter contribuído para o surgimento de uma carga contrária à carga de tração aplicada, resultando em uma maior resistência do dispositivo de segurança à ocorrência do rasgamento.

A partir das hipóteses levantadas pode-se constatar a necessidade da realização de novos ensaios para os corpos de prova do aço ZAR-345 com espessura de 2,30 mm, assim

como para as amostras do modelo de dispositivo de segurança com espessura de 2,30 mm. Uma vez que, somente assim será possível verificar a funcionalidade do modelo de dispositivo de segurança proposto.

# CAPÍTULO 5

## 5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os cabos de termometria geram esforços na estrutura do teto do silo localizados em seus pontos de fixação. O presente trabalho apresentou uma solução alternativa para lidar com tais esforços propondo um modelo de dispositivo de segurança para garantir a integridade da estrutura do teto do silo. O funcionamento do dispositivo de segurança é dado a partir do seu rompimento quando uma carga limite for atingida, ou seja, quando o dispositivo de segurança for rompido o cabo de termometria cairá sobre os grãos evitando que o carregamento seja solicitado à estrutura do teto, assegurando sua estabilidade.

Para o dimensionamento do dispositivo de segurança foi necessário verificar as propriedades mecânicas do material utilizado em sua composição, no caso o aço zincado de alta resistência. Foram realizados ensaios de tração em dois modelos de corpo de prova com espessuras distintas, sendo que em um dos modelos de corpo de prova foi verificado que a resistência à ruptura média resultou em um valor inferior ao mínimo especificado pela norma.

Dimensionaram-se dois modelos do dispositivo de segurança baseados em espessuras e carregamentos distintos. A partir disto foram realizados ensaios de tração para verificar a carga de rasgamento e posteriormente compará-la à carga de rasgamento calculada. Através da análise dos resultados verificou-se uma diferença significativa em um dos modelos do dispositivo de segurança, sendo que uma das hipóteses levantadas é a de que a resistência à ruptura do aço utilizado na fabricação do dispositivo de segurança é diferente da resistência à ruptura verificada nos ensaios dos corpos de prova e considerada nos cálculos.

Baseado no que foi analisado, destaca-se a importância da realização de ensaios para a constatação das propriedades mecânicas dos materiais, sendo assim é possível verificar se os materiais que estão sendo disponibilizados no mercado correspondem ao que a norma estabelece e, principalmente, se os valores que estão sendo utilizados no cálculos estruturais condizem com a realidade do material.

Em contrapartida, a carga de rasgamento resultante dos ensaios do outro modelo de dispositivo de segurança proposto apresentou resultados equivalentes à carga de rasgamento calculada, atestando assim sua funcionalidade. A partir disto é possível concluir que o

dispositivo de segurança proposto é funcional, de modo que seja considerado o valor real da resistência à ruptura do aço utilizado em sua composição.

# CAPÍTULO 6

## 6.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, propõem-se:

- A realização de novos ensaios de tração do dispositivo de segurança, utilizando o cabo de termometria;
- A análise de outras aplicações do dispositivo de segurança, como em gruas e guindastes;
- A utilização de aços com diferentes resistências;
- A utilização de materiais diferentes.

## REFERÊNCIAS


ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7821**: Tanques Soldados para armazenamento de petróleo e derivados. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR 6123**: Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 11162 – TB 374**: Silos cilíndricos para grãos vegetais. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas. Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 7008-3**: Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente. Parte 3 Aços estruturais. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 6892**: Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013.

BOLANDIM, E. A. **Análise da confiabilidade em ligações parafusadas em chapas finas e perfis de aço formados a frio.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

CALIL JUNIOR, C.; CHEUNG, A. B. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo**. 1ª Edição, São Paulo, Ed. Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 2007.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª Edição, Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1996.

Instituto Aço Brasil. Parque Siderúrgico, 2016. Disponível em <http://www.acobrasil.org.br/site2015/parque.html>. Acesso em: 11 mai. 2016.

MARTINS, G. C. A. **Estudo teórico e experimental de esforços devidos a cabos de termometria fixados em estruturas de coberturas de silos cilíndricos para armazenagem de grãos.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

Ministério da Agricultura. **Dados Estatísticos**, 2016. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/estatisticas>. Acesso em: 18 mar. 2016.

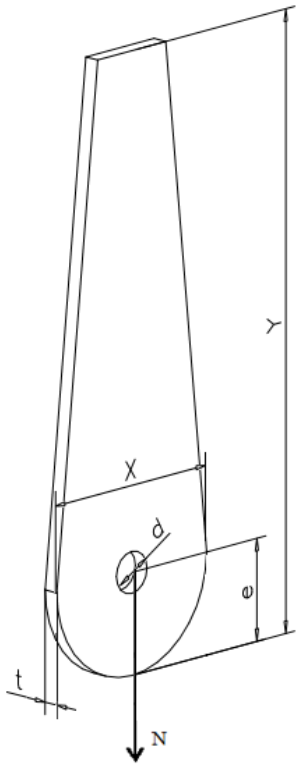
PALMA, G. **Pressões e Fluxo em Silos Esbeltos (h/d≥1,5)**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Aço Dimensionamento Prático**. 7ª Edição, Rio de Janeiro, Ed. Eletrônica, 2008.

SCALABRIN, L. A. **Dimensionamento de silos metálicos para armazenagem de grãos.** 2008. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

# APÊNDICE A – PLANILHA DE DIMENSIONAMENTO

| DIMENSIONAMENTO DISPOSITIVO DE SEGURANÇA | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DISPOSITIVO** | **N (KN)** | **Aço** | **fu (MPa)** | **t (mm)** | **d (mm)** | **e (mm)** | **e adotado (mm)** | **Esmagamento (KN)** | **Rasgamento (KN)** | **Verificação** |
| DS-1 | 16,67 | ZAR 345 | 465,6 | 1,55 | 12 | 33,50 | 33 | 10,13 | 16,42 | **OK!** |
| DS-2 | 22,56 | ZAR 345 | 428,7 | 2,3 | 12 | 33,17 | 33 | 14,89 | 22,45 | **OK!** |




**Sendo:**
N = Carga de arrasto
fu = Resistência à ruptura do aço
t = Espessura da chapa
d = Diâmetro do cabo de termometria
e = Distância entre furo e borda
X = 66 mm
Y = 200 mm

**NBR 14762/2010**

| | | |
|---|---|---|
| **Esmagamento:** | **FRd = (0,183.t + 1,53)d.t.fu / γ** | γ = 1,55 |
| **Rasgamento:** | **FRd = t.e.fu/γ** | γ = 1,45 |