

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FELIPE ROMERO DA MATA

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DOS ESFORÇOS
ESTRUTURAIS INDUZIDOS POR CABOS DE TERMOMETRIA EM
COBERTURAS DE SILOS METÁLICOS PARA ARMAZENAMENTO DE
RAÇÃO AVÍCOLA

DISSERTAÇÃO

MARINGÁ

2026

FELIPE ROMERO DA MATA

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DOS ESFORÇOS
ESTRUTURAIS INDUZIDOS POR CABOS DE TERMOMETRIA EM
COBERTURAS DE SILOS METÁLICOS PARA ARMAZENAMENTO DE
RAÇÃO AVÍCOLA**

**Theoretical and Experimental Study of Structural Stresses Induced by
Thermometry Cables in Roofs of Metal Silos for Poultry Feed Storage**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador(a): Prof. Dra. Gisele Cristina Antunes Martins.

MARINGÁ

2026

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central Maria Grazia Zolet - UEM, Maringá - PR, Brasil)

M425e

Mata, Felipe Romero da

Estudo teórico e experimental dos esforços estruturais induzidos por cabos de termometria em coberturas de silos metálicos para armazenamento de ração avícola / Felipe Romero da Mata. -- Maringá, PR, 2026.

88 f. : il. color., figs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Gisele Cristina Antunes Martins.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2026.

1. Estruturas metálicas. 2. Silos - Análise estrutural. 3. Cabos de termometria. 4. Segurança estrutural. 5. Armazenamento agrícola. I. Martins, Gisele Cristina Antunes, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 23.ed. 624.1821

Síntique Raquel de C. Eleutério - CRB 9/1641

FELIPE ROMERO DA MATA

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DOS ESFORÇOS ESTRUTURAIS
INDUZIDOS POR CABOS DE TERMOMETRIA EM COBERTURAS DE SILOS
METÁLICOS PARA ARMAZENAMENTO DE RAÇÃO AVÍCOLA**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 02/03/2026, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 GISELE CRISTINA ANTUNES MARTINS
Data: 03/03/2026 16:10:09-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Gisele Cristina Antunes Martins
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Professora Orientadora de Estudos

Documento assinado digitalmente
 JESELAY HEMETERIO CORDEIRO DOS REIS
Data: 11/05/2026 16:01:42-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá

Documento assinado digitalmente
 CARLITO CALIL JUNIOR
Data: 27/04/2026 15:20:03-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Carlito Calil Junior
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo

Aos meus pais, Sonia e Jair,
pelo suporte, apoio, confiança e amor.
Ao meu irmão, Matheus,
pelo exemplo e parceria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Estadual de Maringá e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil por me acolherem ao longo destes dois anos de mestrado.

À professora Dra. Gisele Cristina Antunes Martins, pela orientação sempre atenta e bem-humorada, pela confiança depositada em mim, pelos incentivos constantes, pela paciência e pela disponibilidade em ouvir e discutir todas as ideias e dificuldades que surgiram ao longo deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pelas valiosas contribuições desde o exame de qualificação, que certamente contribuíram para o aprimoramento desta pesquisa.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro e pelo incentivo à pesquisa científica.

Ao professor Dr. Andrés Batista Cheung, pela colaboração e apoio na realização dos ensaios laboratoriais.

À Kepler Weber, pelo empréstimo da célula de carga e sistema de aquisição.

À Comissão de Estudo Máquinas e Equipamentos para Sistemas de Armazenagem e Beneficiamento (CE-203:020.001), do Comitê Brasileiro de Tratores, Máquinas Agrícolas (ABNT/CB-203), pelas contribuições técnicas relevantes para esta pesquisa.

Aos amigos e amigas, que pela convivência, contribuíram para tornar essa trajetória mais equilibrada.

Especialmente as minhas amigas, irmãs, de Ubiratã. Contar com o apoio e o incentivo de vocês sempre foi uma fonte de motivação. Obrigado por estarem presentes e tornarem esse caminho mais leve.

Ao meu namorado, pela infinita paciência e por compreender que minha ausência em tantos momentos também foi pensando em nosso futuro juntos.

Ao meu irmão, por sempre ter sido um bom exemplo, conselheiro e meu parceiro.

E, por fim, aos meus pais. Guerreiros, que me ensinaram o valor do trabalho duro sendo exemplo. Ao meu pai, por ter colocado a mão na massa durante a realização dos ensaios experimentais, oferecendo apoio fundamental em todas as etapas, sem ele, este trabalho não teria sido possível. À minha mãe, pelo cuidado

constante, pelas visitas inesperadas que organizavam minha casa e deixavam tudo em ordem, e por sempre garantir que nada faltasse, inclusive uma refeição pronta nos momentos mais difíceis. Exemplos de honestidade, amor e amizade. Sem vocês, nada disso seria possível.

isso de querer
ser exatamente aquilo
que a gente é
ainda vai
nos levar além

Paulo Leminski

RESUMO

Da Mata, F. R. **Estudo teórico e experimental dos esforços estruturais induzidos por cabos de termometria em coberturas de silos metálicos para armazenamento de ração avícola.** 2026. 88 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2026.

O dimensionamento de silos metálicos representa um desafio devido à complexidade das ações atuantes nessas estruturas, que incluem a pressão dos grãos armazenados, a ação do vento sobre a cobertura cônica, as cargas provenientes de equipamentos acoplados e as condições operacionais. Entre esses fatores, destacam-se os esforços gerados pelos cabos de termometria fixados às estruturas de cobertura, os quais não são tratados de forma específica pela ABNT NBR 17066:2022 (Silos metálicos de chapas corrugadas) e tampouco apresentam consenso em normas internacionais correlatas, configurando uma lacuna normativa relevante. Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar diferentes métodos teóricos para a estimativa dos esforços de tração nos cabos de termometria e validar esses resultados por meio de ensaios experimentais realizados em um silo em operação, de modo a identificar abordagens mais consistentes para a previsão dessas forças. Os resultados indicaram que as formulações de Reimbert e Reimbert (1971) e de Schwab *et al.* (1991) foram as que mais se aproximaram dos valores experimentais, porém apresentem tendência a subestimar os esforços de tração, o que constitui uma condição desfavorável do ponto de vista da segurança estrutural. Por outro lado, as prescrições normativas IRAM 8015:1977 e IRAM 8151-1:2019, assim como o modelo empírico analisado, mostraram-se excessivamente conservadoras para as condições avaliadas. A formulação proposta por Atkinson (1983) apresentou boa aderência aos resultados experimentais, aliada a uma tendência à superestimação moderada dos esforços, posicionando-se de forma favorável à segurança.

Palavras-chave: Estruturas de armazenamento. Projeto de silo. Aço galvanizado. Carregamento. Descarga.

ABSTRACT

Da Mata, F. R. **Theoretical and experimental study of structural stresses induced by thermometry cables in roofs of metal silos for poultry feed storage.** 2026. 88 p. Dissertation (Master's degree) – State University of Maringá, Maringá, 2026.

The design of steel silos represents a challenge due to the complexity of the actions acting on these structures, which include the pressure exerted by the stored granular material, wind action on the conical roof, loads from attached equipment, and operational conditions. Among these factors, particular attention is given to the forces generated by thermometer cables fixed to the roof structure, which are not explicitly addressed by ABNT NBR 17066:2022 (Corrugated steel sheet silos) and for which there is also no consensus in related international standards, constituting a relevant regulatory gap. Within this context, the present study aimed to evaluate different theoretical methods for estimating the tensile forces acting on thermometer cables and to validate these estimates through experimental tests carried out on an operating silo, in order to identify the most consistent approaches for predicting these forces. The results indicated that the formulations proposed by Reimbert and Reimbert (1971) and Schwab et al. (1991) were the closest to the experimental values; however, they tended to underestimate the tensile forces, which represents an unfavourable condition from the standpoint of structural safety. On the other hand, the normative prescriptions IRAM 8015:1977 and IRAM 8151-1:2019, as well as the empirical model analysed, proved to be excessively conservative under the conditions evaluated. The formulation proposed by Atkinson (1983) showed good agreement with the experimental results, combined with a moderate tendency to overestimate the forces, thus positioning itself favourably with respect to structural safety.

Keywords: Storage structures. Bin design. Galvanised steel. Loading. Discharge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de armazenagem de grãos.....	22
Figura 2 - Silos metálicos típicos utilizados no armazenamento de grãos.	23
Figura 3 - Principais tipos de fluxo em silos.	25
Figura 4 - Subclassificações de Fluxo.	26
Figura 5 - Determinação gráfica do tipo de fluxo (ACI 313-16:2016).	27
Figura 6 - Componentes de um silo metálico.	27
Figura 7 - Tipos de coberturas de silos.	30
Figura 8 - Fenômeno da respiração dos grãos.....	30
Figura 9 - Detalhes da fixação dos cabos de termometria.	31
Figura 10 - Construção de cabo pêndulo termopar.	32
Figura 11 - Recomendações de carregamento.	33
Figura 12 - Forma de descarregamento.	34
Figura 13 – Aparato utilizado no experimento.	38
Figura 14 – Equilíbrio de forças.....	39
Figura 15 - Posição dos cabos no silo.....	41
Figura 16 – Equipamento de cisalhamento direto TSG 70-140.....	45
Figura 17 - Célula de cisalhamento de Jenike.....	46
Figura 18 - Ensaio de cisalhamento com as paredes.....	47
Figura 19 - Ensaio de determinação de ângulo de repouso.....	48
Figura 20 – Ensaio granulométrico por peneiramento.....	50
Figura 21 - Silo PDB2753 (medidas em mm).....	51
Figura 22- Carregamento do silo.....	53
Figura 23 – Tremonha inferior.	54
Figura 24 - Interior do silo com o cabo instalado.....	55
Figura 25 – Célula de carga.	56
Figura 26 - Sistema de aquisição de dados.	56
Figura 27 - Curva Granulométrica da ração avícola.....	57
Figura 28 - Resultado do ângulo de repouso para a ração.	59
Figura 29 - Tipo de fluxo no silo estudado.	60
Figura 30 - Esforços de tração durante o Ciclo 1.	62
Figura 31 - Esforços de tração durante o Ciclo 2.	62
Figura 32 - Esforços de tração durante o Ciclo 3.	63
Figura 33 - Esforços de tração durante o Ciclo 4.	64
Figura 34 - Esforços de tração durante o Ciclo 5.	64
Figura 35 - Esforços de tração durante o Ciclo 6.	65
Figura 36 - Esforços de tração agrupados (kgf).	66
Figura 37 – Tração medida nas 4 primeiras horas de cada ciclo.	67
Figura 38 - Resultados teóricos do esforço de tração no cabo (kgf).	70

Figura 39 – Esforço de tração em função do comprimento do cabo soterrado.	73
Figura 40 - Esforço de tração em função de diferentes seções transversais em cabos.....	75
Figura 41 - Esforço de tração teórica em função do diâmetro.....	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros considerados nas equações avaliadas.	72
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificações internacionais de silos quanto a esbeltez.	24
Tabela 2 - Dimensões e materiais de superfície para os cabos de termometria usados no experimento.	42
Tabela 3 - Condições de fluxo a partir do ângulo de repouso.	49
Tabela 4 – Propriedades físicas da ração obtidas a partir do teste de cisalhamento direto.	58
Tabela 5 – Esquema dos ciclos de carga e descarga realizados.....	61
Tabela 6 – Acréscimo de tensão após o carregamento.	67
Tabela 7 - Parâmetros físicos da ração.....	69
Tabela 8 - Silo Modelo PDB2753	69
Tabela 9 - Características do cabo.....	69
Tabela 10 – Esforço de tração teórica para diferentes seções transversais em cabos.	74
Tabela 11 - Esforço de tração teórico em função do diâmetro.	76
Tabela 12 - Esforços de tração máximas registrados por Martins (2012) e Casada <i>et al.</i> (2019).	80

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
AS	<i>Australian Standard</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DIN	Instituto Alemão para normatização
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IN	Instrução Normativa
IRAM	Instituto Argentino de Normalização e Certificação
ISO	Organização Internacional de Normalização
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas minúsculas

a	Área do cabo
d	Diâmetro do cabo
p_{vct}	pressão vertical adicional devida ao sistema de controle da temperatura em kN/m^2
z	Eixo cartesiano z , altura de referência para o cálculo das pressões, comprimento submerso do cabo em grãos

Letras romanas maiúsculas

A	Área, comprimento característico
D	Diâmetro do silo
D_g	Dimensão média do diâmetro das partículas
D_{tc}	Diâmetro equivalente do cabo
F_C	Forças dos cabos de termometria
F_E	Ações dos equipamentos de carregamento
F_G	Peso próprio
F_Q	Sobrecarga
F_M	Fator de majoração
F_{tc}	Fator de multiplicação
F_W	Pressão exercida pelo vento
H	Altura do corpo do silo
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
K	Relação entre a pressão horizontal e vertical
P_{vct}	pressão vertical adicional devida ao sistema de controle da temperatura em kN
R	Raio hidráulico
T	Esforço de tração

Letras gregas

γ	Peso específico
μ_w	Coeficiente de atrito entre o produto e a parede do corpo do silo
$\mu_{w,c}$	Coeficiente de atrito entre o produto armazenado e o cabo de termometria
δ	Variação

π	$\pi = 3,14\dots$
σ_{ii}	Tensão normal na direção i
τ_i	Tensão de cisalhamento
ϕ_i	Ângulo de atrito interno
ϕ_e	Ângulo de atrito interno efetivo
ϕ_r	Ângulo de repouso
ϕ_w	Ângulo de atrito do produto armazenado com a parede
$\phi_{w,c}$	Ângulo de atrito entre o produto armazenado e o cabo de termometria
Ψ_0	Fator de combinação
Ψ_i	Fatores de redução

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3 JUSTIFICATIVA	20
4 REVISÃO DA LITERATURA.....	21
4.1 TIPOS DE SILOS	21
4.2 TIPOS DE FLUXO	24
4.3 PARTES DE UM SILO METÁLICO.....	27
4.3.1 Base.....	28
4.3.2 Corpo	28
4.3.3 Telhado.....	28
4.3.4 Portas de acesso	28
4.3.5 Escadas e plataformas	29
4.3.6 Respiros.....	29
4.4 COBERTURA DE SILOS	29
4.5 TERMOMETRIA	30
4.5.1 Cabos de termometria (cabos pêndulos)	32
4.5.2 Fixação dos cabos	33
4.6 OPERAÇÕES DE CARGA E DESCARGA	33
4.7 FORÇAS ATUANTES EM COBERTURAS DE SILOS	34
4.7.1 Peso próprio da cobertura (FG).....	34
4.7.2 Sobrecarga (FQ).....	34
4.7.3 Cargas dos equipamentos de carregamento (FE).....	35
4.7.4 Pressão do vento (FW)	35
4.7.5 Forças devidas aos cabos de termometria (FC).....	36
4.7.5.1 REIMBERT e REIMBERT (1971).....	36
4.7.5.2 IRAM 8015 (1977).....	37
4.7.5.3 ATKINSON <i>et al.</i> (1983).....	37
4.7.5.4 SCHWAB <i>et al.</i> (1991)	40
4.7.5.5 IRAM 8151-1 (2019).....	43
5 METODOLOGIA.....	44
5.1 ETAPA LABORATORIAL.....	44
5.1.1 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DE JENIKE	45
5.1.2 ÂNGULO DE REPOUSO (ϕ_r)	48
5.1.3 Granulometria	49
5.1.4 ENSAIO DE UMIDADE.....	50
5.2 ETAPA EXPERIMENTAL NO SILO EM OPERAÇÃO	50

5.2.1 O silo.....	51
5.2.2 Dinâmica operacional do silo	52
5.2.3 O cabo de termometria	54
5.2.4 Célula de carga.....	55
5.2.5 Sistema de aquisição de dados	56
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
6.1 RESULTADOS DA ETAPA LABORATORIAL.....	57
6.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS NO SILO EM OPERAÇÃO.....	59
6.2.1 Caracterização dos ciclos de carregamento e descarregamento	60
6.2.2 Esforço de tração registrado nas primeiras quatro horas de cada ciclo.....	66
6.2.3 Esforços máximos de tração registrados na etapa experimental.....	68
6.3 RESULTADOS DA ETAPA TEÓRICA	68
6.3.1 Comparação entre resultados teóricos e experimentais	70
6.3.2 Avaliação paramétrica das equações da literatura para a determinação do esforço de tração em cabos	71
6.3.2.1 Influência de comprimento de cabo soterrado (z)	73
6.3.2.2 Influência das dimensões do cabo de termometria	74
6.3.2.3 Influência do diâmetro do silo (D).....	76
6.3.2.4 Síntese dos resultados da análise paramétrica	78
6.4 INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE DESCARREGAMENTO NOS ESFORÇOS DE TRAÇÃO	79
7 CONCLUSÃO.....	82
7.1 TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS.....	85

1 INTRODUÇÃO

Silos são estruturas utilizadas para o armazenamento de grãos vegetais de fluxo livre, apresentando paredes com formatos predominantemente circulares, quadradas ou retangulares. No Brasil, desempenham um papel estratégico no setor agrícola, o estado do Paraná possui uma capacidade de armazenamento de 18.806.194 toneladas (IBGE, 2023). Apesar de sua relevância econômica, essa capacidade ainda é insuficiente para acompanhar o crescimento contínuo da produção agrícola na região.

Além de sua importância econômica, silos apresentam particularidades técnicas que exigem atenção especial durante a etapa de projeto, como as forças dinâmicas geradas pela carga e descarga dos materiais armazenados. Até 2022, o Brasil carecia de uma norma específica para o dimensionamento desses elementos estruturais. Com a publicação da ABNT NBR 17066:2022 – Silos Metálicos de Chapas corrugadas – foram estabelecidos métodos para prever as pressões exercidas por grãos vegetais de fluxo livre e diretrizes básicas para projetar silos metálicos verticais de chapas corrugadas.

Historicamente, o estudo das pressões em silos remonta à teoria de Coulomb de 1776, que introduziu o atrito entre o produto e a parede. Janssen, em 1895, desenvolveu uma equação que correlaciona pressões horizontais e verticais em silos, amplamente usada até hoje. Teorias subsequentes, como as de Airy (1897), Walker (1966) e Walters (1973), contribuíram para a análise de tensões em silos e tremonhas, enquanto Jenike e Johanson (1968) avançaram no entendimento do movimento interno dos materiais.

Contudo, ainda persistem incertezas no dimensionamento estrutural, especialmente no que se refere à estimativa das ações atuantes nas coberturas de silos decorrentes da presença de cabos de termometria. Tais ações não são tratadas de forma consensual pelas normas técnicas vigentes, tampouco apresentam um procedimento de cálculo padronizado amplamente adotado no meio profissional. Nesse contexto, o presente trabalho busca contribuir para a compreensão desses efeitos, por meio de uma revisão crítica das formulações teóricas disponíveis na literatura e do desenvolvimento de um estudo experimental em silos em escala real.

2 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados o objetivo geral e específicos do estudo.

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo analisar e comparar diferentes metodologias de estimativa dos esforços de tração atuantes em cabos de termometria instalados em silos, visando ampliar a compreensão do comportamento mecânico desses sistemas e fornecer subsídios técnicos para o aprimoramento dos critérios de dimensionamento estrutural.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Avaliar o desempenho das diferentes formulações disponíveis na literatura para a estimativa dos esforços de tração, identificando suas tendências à sub ou superestimação.
- Investigar a influência de parâmetros geométricos do silo, das propriedades do produto armazenado e das condições operacionais sobre os esforços atuantes nos cabos de termometria.
- Analisar a evolução temporal dos esforços de tração após o carregamento do silo, com ênfase na identificação de possíveis condições de estabilização.
- Verificar os efeitos da adoção de abordagens simplificadas baseadas exclusivamente no comprimento do cabo soterrado, discutindo suas implicações no dimensionamento.
- Indicar a metodologia mais adequada para a estimativa dos esforços de tração, com base na comparação entre resultados teóricos e experimentais.

3 JUSTIFICATIVA

Os erros em projetos figuram entre as principais causas de colapso nas coberturas de silos cilíndricos metálicos, estando frequentemente associados a concepções estruturais inadequadas, subestimação de cargas atuantes e deficiências nos sistemas de ancoragem. Um fator agravante é a escassez de informações técnicas específicas sobre o comportamento das coberturas, tanto em literatura acadêmica, quanto na normativa brasileira. Embora a ABNT NBR 17066:2022 represente um avanço significativo no dimensionamento de silos, ainda não contempla uma abordagem detalhada sobre os esforços atuantes nas coberturas, levando projetistas a recorrerem a métodos empíricos ou a referências estrangeiras para estimar as reações estruturais.

Entre as lacunas identificadas, destaca-se a ausência de diretrizes normativas claras para a estimativa da magnitude do esforço de tração gerado pelos cabos de termometria sobre as coberturas dos silos. Na prática, algumas empresas adotam valores fixos por metro de cabo soterrado, enquanto outras utilizam métodos teóricos, como o proposto por Schwab *et al.* (1991). No entanto, tais estratégias carecem validação experimental, o que compromete tanto a precisão quanto a confiabilidade dos projetos estruturais.

Diante deste cenário, torna-se imprescindível a definição de uma equação baseada em experimentos realizados em silos em grande escala, capaz de descrever adequadamente as forças exercidas pelos cabos de termometria nas coberturas. Este avanço permitirá um dimensionamento mais preciso e econômico, reduzindo riscos de falhas estruturais, garantindo maior segurança às instalações e aumentando a durabilidade dos silos metálicos. Além disso, a criação de diretrizes normativas específicas para o tema contribuirá de forma significativa para a melhoria da qualidade e da confiabilidade dos projetos no setor.

4 REVISÃO DA LITERATURA

Os silos são estruturas fundamentais na história do armazenamento de produtos agrícolas e industriais. A partir do século XIX, observou-se um crescimento tanto no número quanto nas dimensões dessas estruturas o que impulsionou o desenvolvimento de estudos mais aprofundados sobre o comportamento estrutural dos silos. Tais estudos visam minimizar perdas econômicas e riscos à vida humana. Neste tópico serão apresentados, de forma mais detalhada, aspectos relevantes relacionados à análise estrutural desse tipo de elemento.

4.1 TIPOS DE SILOS

Os grãos vegetais destinados à alimentação humana ou animal frequentemente necessitam ser armazenados por períodos prolongados antes de sua utilização. Para garantir a preservação de suas características físicas, fisiológicas e nutricionais, é essencial que o armazenamento seja realizado em ambientes que ofereçam condições adequadas (Lima *et al.*, 2024).

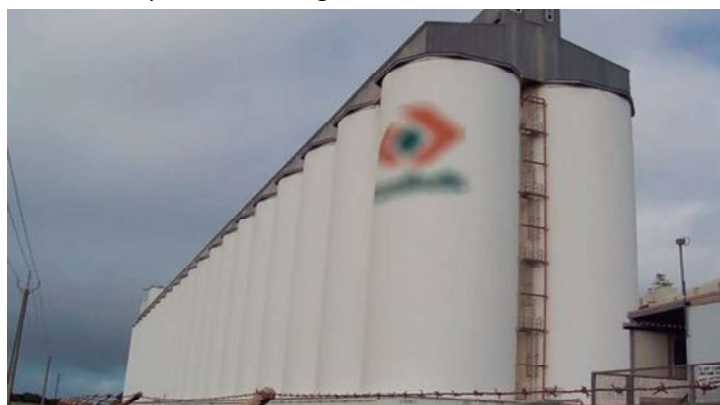
De acordo com Heming (2016), registros históricos indicam a utilização de sistemas de armazenagem de trigo há mais de 3.000 anos no Egito. Ao longo dos séculos, esses sistemas foram progressivamente aprimorados, evoluindo de depósitos rudimentares para estruturas como paióis, celeiros e sacarias, até alcançarem o estágio atual de armazenagem moderna a granel, realizada em silos metálicos verticais, amplamente adotados em escala global.

Além da armazenagem em silos verticais, também é possível utilizar sistemas horizontais, conhecidos como armazéns graneleiros (Figura 1.a). Silos verticais de concreto (Figura 1.b) são outra opção frequentemente empregada, embora apresente algumas desvantagens em relação ao sistema metálico que, de modo geral, os silos apresentam menor custo inicial, maior rapidez de fabricação e montagem, além de elevada padronização construtiva, o que atende de forma mais eficiente às demandas do agronegócio por flexibilidade, expansão futura e curto prazo de implantação. Em contrapartida, os silos de concreto exigem maior tempo de execução, mão de obra especializada e controle rigoroso de projeto e construção, especialmente quanto aos efeitos de fissuração, retração e fluência, o que tende a elevar os custos.

Figura 1 - Tipos de armazenagem de grãos.



a) Armazém graneleiro horizontal.



b) Silos verticais de concreto.

Fonte: Heming (2016).

Atualmente, é possível encontrar silos com capacidade que variam desde poucas toneladas de produto até aproximadamente 35 mil toneladas, conforme Agrolink & Assessoria (2013). O diâmetro máximo de silos metálicos com telhado autoportante existentes atualmente é da ordem de 60 m, enquanto a altura da parede lateral pode atingir até 25 m, dependendo do diâmetro do silo.

De acordo com Calil Jr. e Cheung (2007), os silos podem ser classificados quanto ao material estrutural empregado, à forma de construção em relação ao solo e à sua geometria. De acordo com os autores, no que se refere à construção em relação ao solo, os silos podem ser divididos em três grupos:

- Silos elevados ou aéreos: caracterizados por serem construídos acima do nível do solo (Figura 2.b).
- Silos subterrâneos: apresentam os compartimentos de estocagem localizados abaixo do nível do solo. São estruturas mais simples quando comparados aos silos elevados, contudo, são mais suscetíveis à infiltração de água e apresentam maior dificuldade no processo de esvaziamento.

- Silos semi-subterrâneos: constituem uma solução intermediária entre os dois tipos anteriores.

A Figura 2 apresenta dois tipos típicos de silos metálicos utilizados para o armazenamento de grãos vegetais, os quais correspondem aos modelos mais adotados nas unidades de recebimento e armazenagem de grãos no estado do Paraná.

Figura 2 - Silos metálicos típicos utilizados no armazenamento de grãos.



a) Silo metálico fundo plano.

b) Silo metálico fundo elevado.

Fonte: Kepler Weber (2013).

Segundo a Page Indústria e Comércio ([s.d.]), para o armazenamento de grãos por longos períodos são empregados silos de fundo plano. Já os silos elevados, também conhecidos como silos de processo ou silos pulmão, são utilizados principalmente para o abastecimento de equipamentos dentro do fluxo operacional da unidade, mantendo os grãos armazenados por períodos curtos. Nessas estruturas o fluxo do produto ocorre de forma contínua, sem o acúmulo significativo de resíduos.

De acordo com Heming (2016), os silos destinados à armazenagem definitiva podem apresentar, além do tradicional fundo plano, alternativas como fundos em formato de tronco de cone ou do tipo "Mellita". Essas configurações oferecem vantagens, tais como maiores capacidade estática de estocagem e maior eficiência no processo de descarga.

Conforme Calil Jr. e Cheung (2007), a geometria constitui outro critério para a classificação dos silos, os quais podem ser divididos em:

- Silos esbeltos: apresentam uma relação entre a altura e o diâmetro (H/D) maior ou igual a 1,5.
- Silos baixos: apresentam relação entre a altura e o diâmetro (H/D) menor que 1,5.
- Silos horizontais: aqueles cuja dimensão longitudinal é predominante sobre as demais dimensões.

A classificação quanto à entrada de ar permite separar os silos em:

- Silos herméticos: aqueles que possuem estruturas que impedem a troca de ar entre o interior da célula de armazenagem e o meio externo.
- Silos não-herméticos: estruturas que permitem a troca de ar com o meio externo.

Os autores também apresentam normas internacionais com suas respectivas classificações de silos quanto à esbeltez, conforme expresso na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificações internacionais de silos quanto a esbeltez.

Norma	Classificação		
	Baixos	Medianamente esbeltos	Esbeltos
Australiana AS3774:1996	$H/D < 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 3,0$	$H/D > 3,0$
Europeias EN 1991-4:2006, DIN 1055-03:2005	$0,4 \leq H/D \leq 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 2,0$	$H/D \geq 2,0$
Americanas ACI 313-16, ANSI/ASAE S433.1:2019 (R2024)	$H/D < 2,0$	-	$H/D > 2,0$

Fonte: Calil Jr. e Cheung (2007).

4.2 TIPOS DE FLUXO

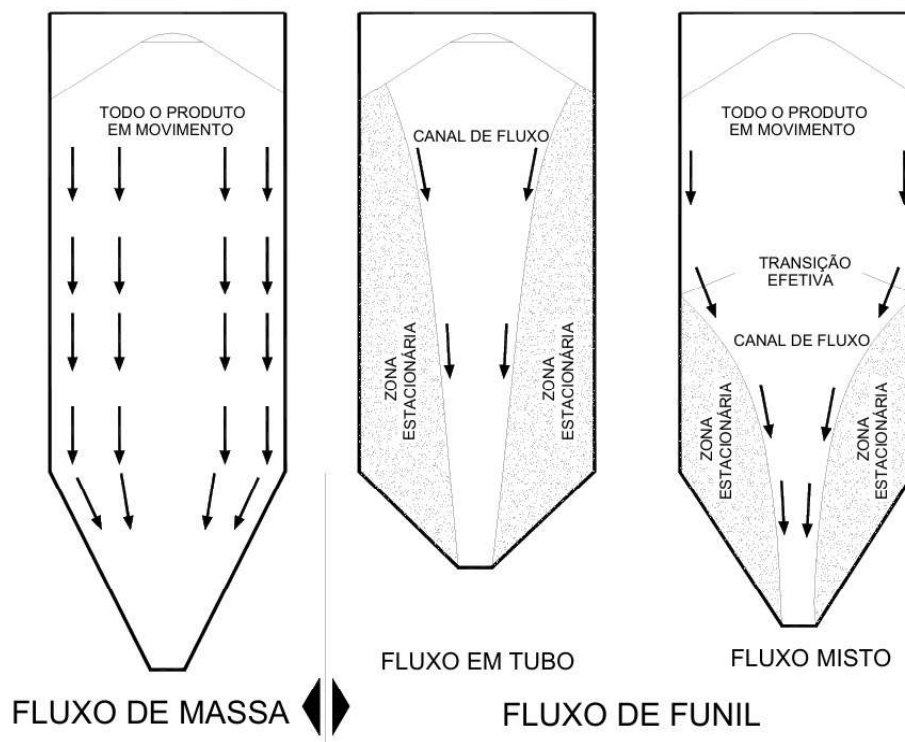
O tipo de fluxo no silo influencia aspectos como o descarregamento do produto, a segregação, a formação de zonas estagnadas, a possibilidade de

esvaziamento completo, a distribuição de pressões nas paredes e fundação, além da integridade e do custo da construção (Calil Jr., 1985).

De acordo com Calil Jr. e Cheung (2007) os tipos de fluxo são classificados em:

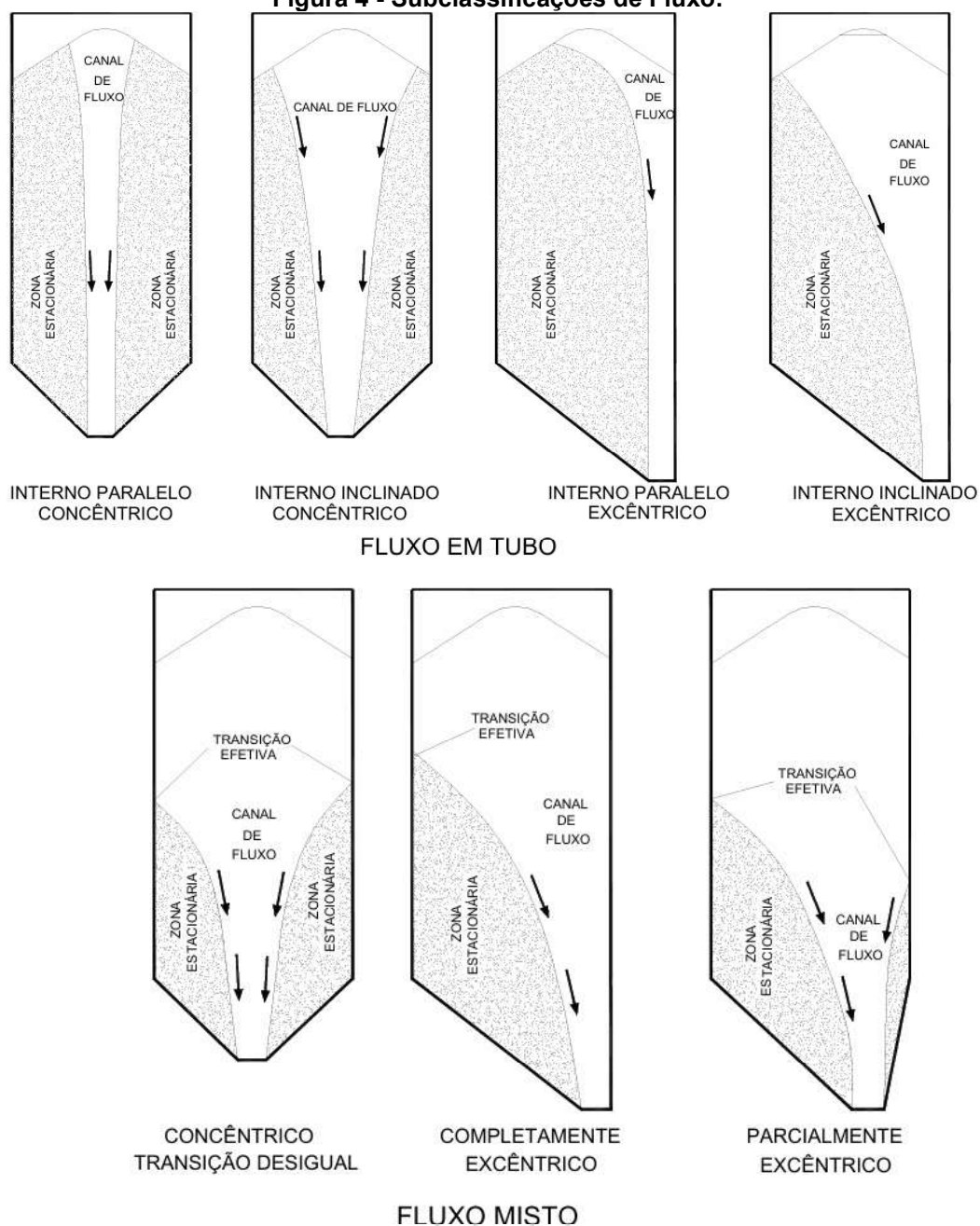
- Fluxo de Funil: Caracteriza-se pela formação de um canal de fluxo alinhado à boca de descarga, cercado por uma zona estacionária onde o produto permanece inerte.
- Fluxo de Massa: Considerado ideal, ocorre quando todas as partículas do produto armazenado estão em movimento durante o descarregamento, sem formação de zonas estagnadas.

Figura 3 - Principais tipos de fluxo em silos.



Fonte: Calil Jr. e Cheung (2007).

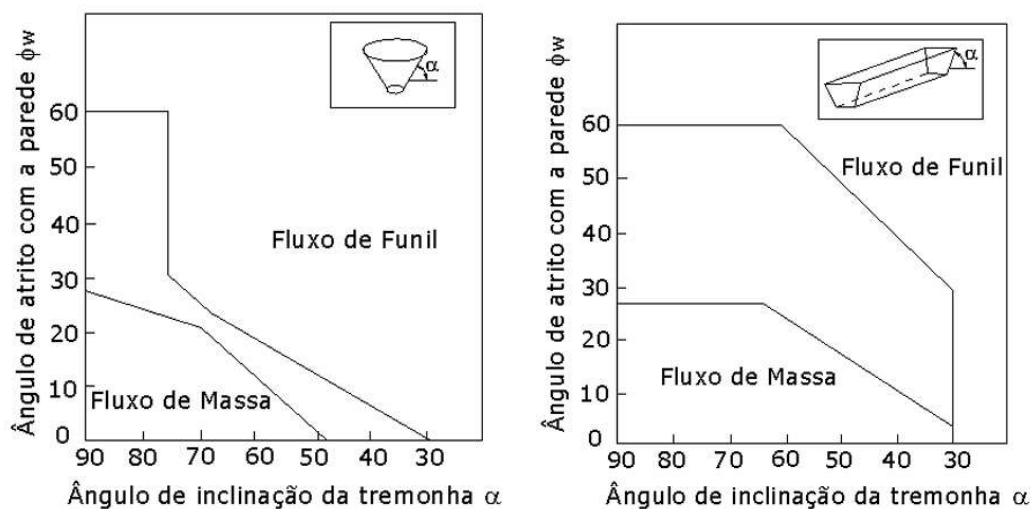
Os fluxos podem ainda ser subdivididos em subclasses, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Subclassificações de Fluxo.

Fonte: Calil Jr. e Cheung (2007).

Normas internacionais dispõe de gráficos para determinação do tipo de fluxo em função do ângulo ou coeficiente de atrito entre o produto armazenado e a parede, da inclinação das paredes da tremonha e do tipo de tremonha (geralmente cônicas ou em cunha). Calil Jr. e Cheung (2007) recomendam reduzir o ângulo α em 3° para garantir um padrão de fluxo seguro, considerando as incertezas do processo. A Figura 5 apresenta gráficos que descrevem o tipo de fluxo que ocorre em silos, em função das características geométricas da tremonha.

Figura 5 - Determinação gráfica do tipo de fluxo (ACI 313-16:2016).

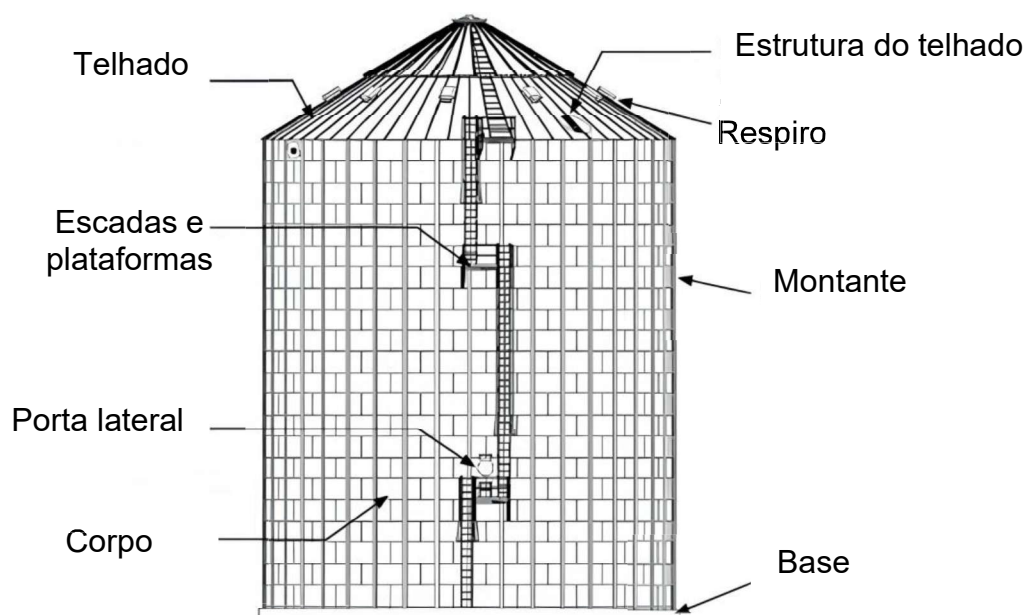


Fonte: Autor (2026), adaptado de ACI 313-16:2016.

4.3 PARTES DE UM SILO METÁLICO

A Figura 6 apresenta um desenho esquemático no qual estão indicados os principais componentes que integram a estrutura de um silo metálico de fundo plano.

Figura 6 - Componentes de um silo metálico.



Fonte: Kepler Weber (2013).

Nos itens subsequentes, apresenta-se uma breve descrição técnica de cada componente do silo, conforme especificado por Heming (2016).

4.3.1 Base

A maioria das bases é construída em concreto armado, consistindo em um anel estaqueado e um piso radier, que também pode ser estaqueado. Sua principal finalidade é sustentar toda a estrutura e os grãos armazenados, além de transferir os esforços para o solo. Essas bases podem ainda acomodar canais de aeração e o transportador responsável pela retirada do produto do silo.

4.3.2 Corpo

O corpo é a região que constitui toda a circunferência do silo. Composto por chapas metálicas corrugadas e colunas de montantes parafusados entre si. É responsável por conter o produto.

4.3.3 Telhado

Localizado no topo do silo, o telhado tem a função de proteger o produto armazenado contra intempéries e possíveis ataques de animais. Além disso, é responsável por sustentar os cabos de termometria e outros equipamentos necessários para o funcionamento do silo. O carregamento do produto armazenado também ocorre por meio do telhado.

4.3.4 Portas de acesso

Distribuídas pelo corpo e telhado, servem para permitir a entrada de pessoas no interior do silo, realizar inspeções, limpeza, manutenção e promover a retirada de algum componente interno.

4.3.5 Escadas e plataformas

Permitem acesso a diversos pontos da estrutura pra realização de inspeção, limpeza, manutenção e para acesso às portas citadas.

4.3.6 Respiros

São instalados no telhado dos silos, desempenham a função de permitir a circulação do ar no interior da estrutura. Eles facilitam a liberação do ar aquecido que se acumula acima da massa de grãos e abaixo do telhado, promovendo sua renovação. Além disso, os respiros são essenciais para viabilizar a entrada e a saída do ar utilizado no processo de aeração.

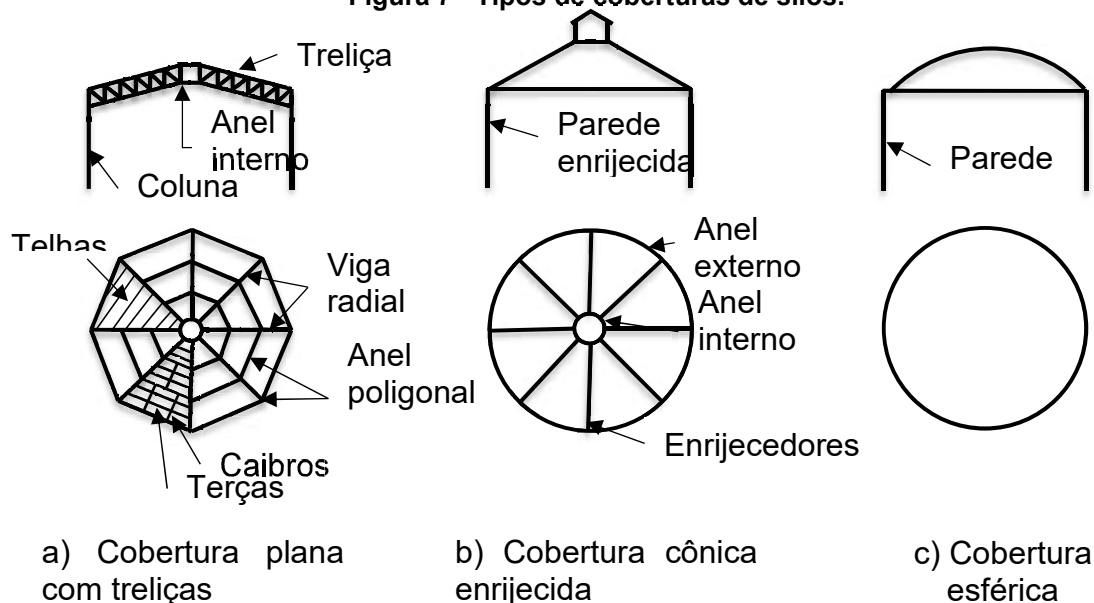
4.4 COBERTURA DE SILOS

As coberturas de silos podem ser confeccionadas em diferentes materiais, tais como madeira, cerâmica, zinco ou fibrocimento. No caso de silos de alvenaria, é comum a utilização de telhados em concreto armado. Todas as coberturas devem ser projetadas de modo a incluir um sótão ou alçapão que possibilite o acesso de operários ao interior do silo (Kepler Weber, 2013).

Além disso, quando devidamente fechadas, devem garantir vedação completa, evitando a infiltração de água no interior da estrutura, bem como proporcionar proteção contra intempéries, ataques de pássaros, entre outros agentes externos, além de suportar os cabos de termometria e o espalhador de grãos. No topo do telhado localizam-se os dispositivos de alimentação de produto e do carregamento do silo (Heming, 2016).

Os telhados dos silos podem apresentar diferentes configurações, como cônicos, planos ou duplamente curvados, conforme mostrado na Figura 7. Dentre essas alternativas, a forma cônica é a mais amplamente utilizada, pois permite que a superfície do produto armazenado se distribua paralelamente à cobertura, otimizando o aproveitamento do espaço interno (Calil Jr., 1985).

Figura 7 - Tipos de coberturas de silos.

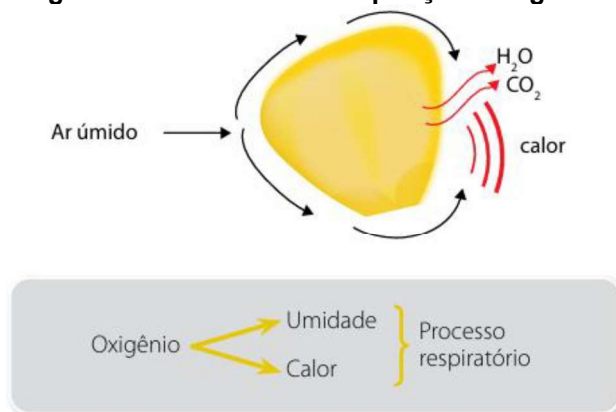


Fonte: Calil Jr. (1990).

4.5 TERMOMETRIA

Durante o período de armazenagem, a atividade metabólica dos grãos resulta na absorção de oxigênio e na liberação de calor, dióxido de carbono e vapor de água (Figura 8). Esses fatores devem ser rigorosamente monitorados, uma vez que a elevação da temperatura e da umidade relativa cria condições favoráveis para o desenvolvimento de fungos, comprometendo a qualidade e a integridade da massa armazenada. Por essa razão todo silo ou armazém de grãos deve dispor de um sistema de monitoramento da temperatura da massa armazenada (HEMING, 2016).

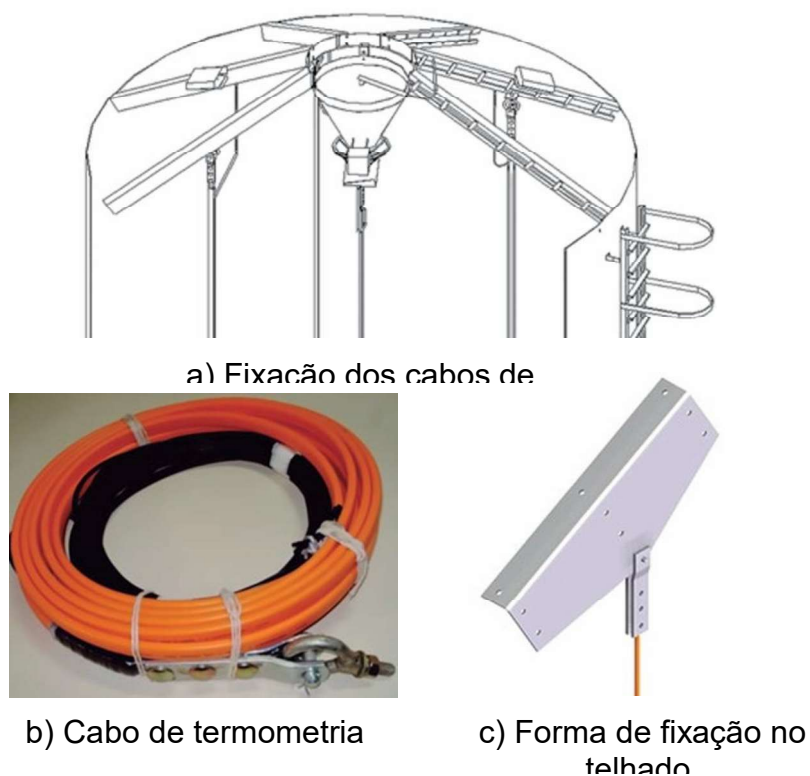
Figura 8 - Fenômeno da respiração dos grãos.



Fonte: Kepler Weber (2013).

De acordo com Heming (2016), a termometria consiste no sistema destinado ao monitoramento das condições dos grãos armazenados, realizado por meio da medição da temperatura em diversos pontos distribuídos no interior do silo. Essas medições podem ser efetuadas de forma local, por meio da conexão de uma unidade de leitura aos cabos instalados em cada silo, ou remotamente, a partir de uma sala de comando da unidade de armazenamento. Para otimizar o gerenciamento das condições do produto armazenado, é possível integrar os sistemas de termometria e aeração, promovendo a automatização do processo. Conforme estabelecido pela Instrução Normativa do MAPA (Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento), IN-29/2011 (BRASIL, 2011), deve-se adotar, no mínimo, um ponto de medição para cada 150 m³ de capacidade estática do silo. A fixação dos cabos que sustentam os sensores é realizada diretamente na estrutura do telhado do silo (Figura 9).

Figura 9 - Detalhes da fixação dos cabos de termometria.



Fonte: Adaptado de Kepler Weber (2013).

Devem ser observados os seguintes procedimentos relativos aos cabos de termometria, também denominados cabos pêndulos. Antes do início do carregamento do silo, o cabo deve ser fixado ao piso por meio de uma corda de poliamida (nylon),

com diâmetro de 4 mm, sendo expressamente vedada a utilização de arame para essa finalidade.

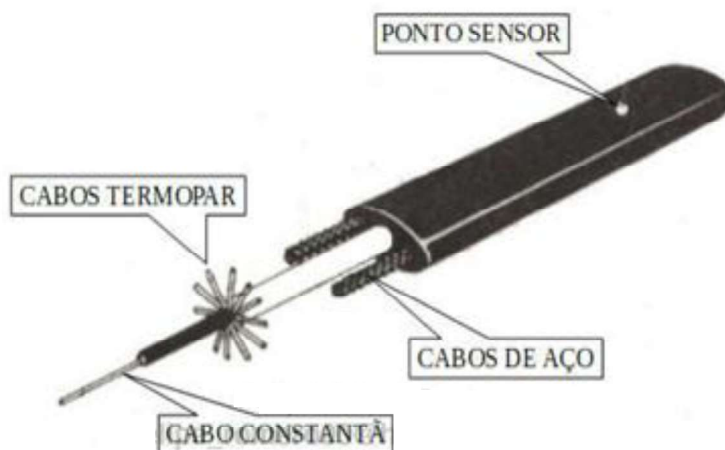
Após a descarga completa por gravidade, é fundamental liberar a corda de fixação antes de acionar a rosca varredora, a fim de evitar danos à estrutura do cabo. Além disso, não se deve enrolar ou realizar nós no cabo pêndulo, uma vez que essas práticas podem comprometer tanto os sensores de temperatura quanto a integridade do próprio cabo (HINNING, 2023).

4.5.1 Cabos de termometria (cabos pêndulos)

Os cabos pêndulos, apresentados na Figura 9 (b), são componentes responsáveis por abrigar os sensores de temperatura instalados na massa de grãos. Esses cabos podem ser classificados em dois tipos principais: termopares e digitais (Wendt, 2020).

Os cabos do tipo termopar, os mais utilizados, são constituídos por um fio de constantã comum a todos os sensores e fios de cobre, onde cada fio está associado a um sensor específico. Neste modelo cada fabricante adota um padrão sequencial de cores para a identificação do número ou da posição do sensor correspondente ao condutor de cobre ao longo do cabo, conforme ilustrado na Figura 10. Já os modelos digitais são fabricados com sensores eletrônicos endereçados, que são conectados em rede para facilitar o monitoramento e a coleta de dados.

Figura 10 - Construção de cabo pêndulo termopar.



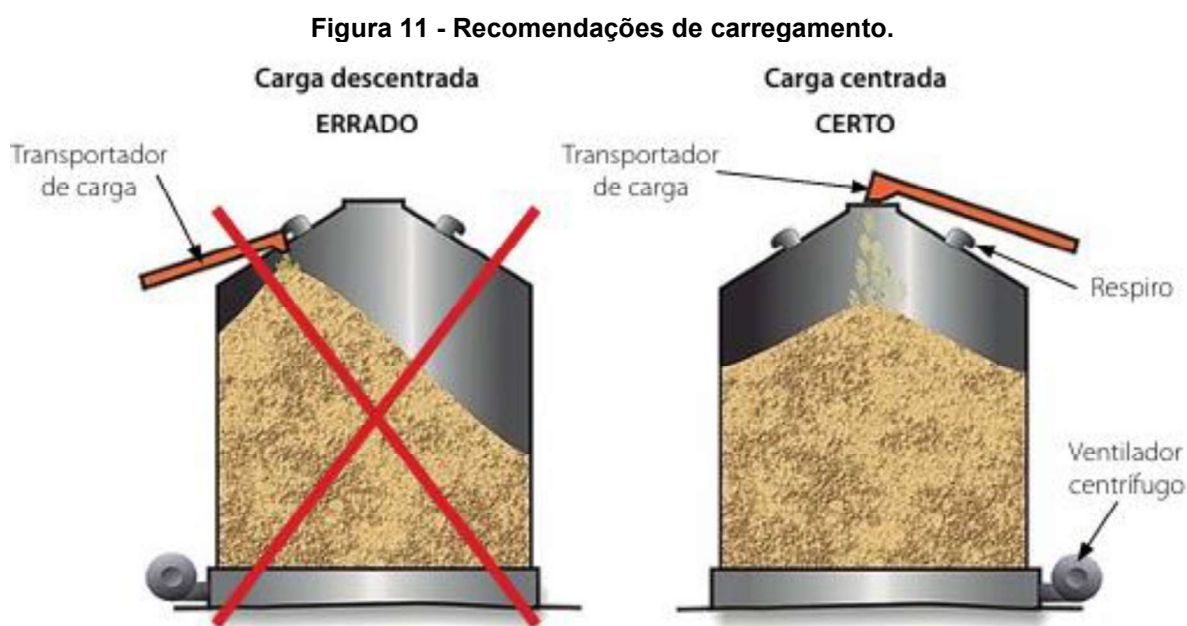
Fonte: Wendt (2020).

4.5.2 Fixação dos cabos

A fixação dos cabos na cobertura do silo é realizada por meio de dispositivos específicos, conforme ilustrado na Figura 9 (c). A posição dos cabos é definida com base nas recomendações técnicas fornecidas pelo fabricante do silo. Por sua vez, a fixação dos cabos na base do silo pode ser realizada de acordo com o procedimento descrito no item 4.5.

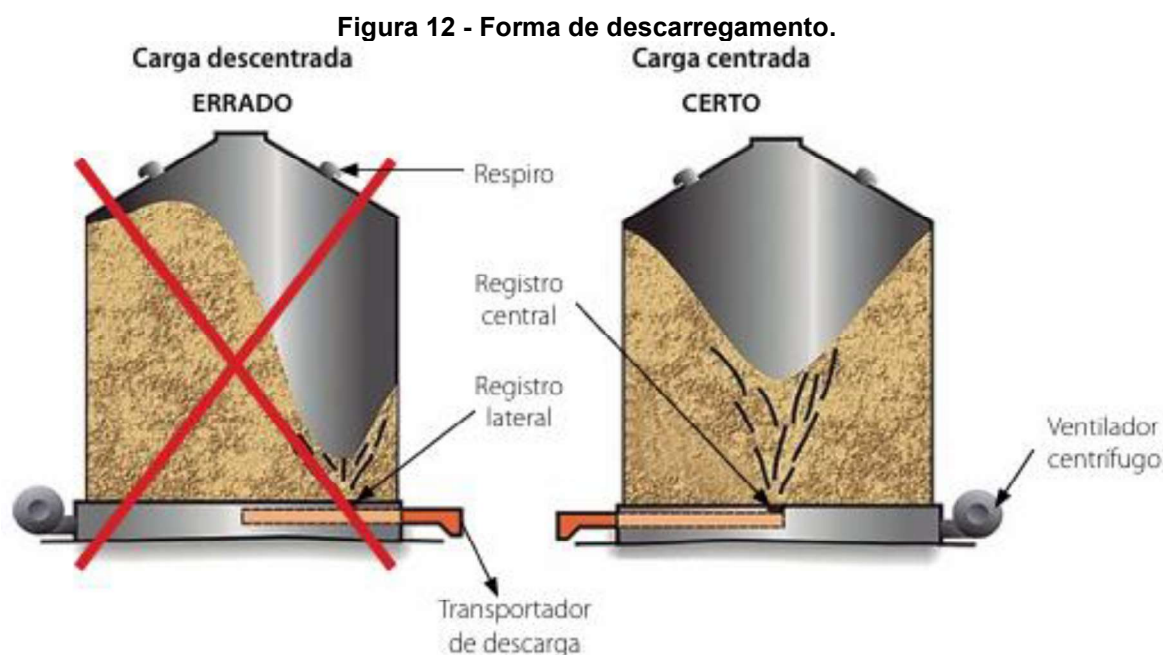
4.6 OPERAÇÕES DE CARGA E DESCARGA

Com os cabos de termometria devidamente instalados e fixados ao piso, bem como os demais equipamentos configurados corretamente, o carregamento do silo pode iniciar e deve ser realizado pelo centro da estrutura. Essa prática é essencial para evitar variações de pressão no corpo do silo, conforme ilustrado na Figura 11.



Fonte: Kepler Weber (2013).

Da mesma forma, o processo de descarga deve ser efetuado pelo centro do silo. A realização da descarga fora do centro não é recomendada, exceto nos casos em que a estrutura esteja equipada com um dispositivo especialmente projetado e instalado para permitir a descarga lateral, conforme exemplificado na Figura 12.



4.7 FORÇAS ATUANTES EM COBERTURAS DE SILOS

No projeto estrutural da cobertura de um silo metálico cilíndrico, é imprescindível considerar as seguintes ações: peso próprio (F_G), sobrecarga (F_Q), pressão exercida pelo vento (F_W), ações dos equipamentos de carregamento (F_E) e forças dos cabos de termometria (F_C).

4.7.1 Peso próprio da cobertura (F_G)

A norma brasileira responsável por definir as ações mínimas a serem consideradas no projeto de estruturas de edificações é a ABNT NBR 6120:2019 – Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Para o dimensionamento adequado da cobertura, torna-se essencial a determinação das ações associadas ao peso próprio da estrutura.

4.7.2 Sobrecarga (F_Q)

Segundo Trahair (1985), é fundamental incluir, no dimensionamento da cobertura de silos, as cargas provenientes de diferentes cenários operacionais.

Recomenda-se a adoção de uma carga uniformemente distribuída, representativa do armazenamento temporário de materiais ou equipamentos durante as etapas de montagem e manutenção da cobertura.

Adicionalmente, deve-se prever a aplicação de cargas concentradas nos pontos destinados a fixação de equipamentos de içamento utilizados na movimentação de peças durante a montagem. As terças, por sua vez, devem ser dimensionadas para resistir, em sua região mais crítica, a uma força concentrada equivalente ao peso de um trabalhador em pé.

O projeto da cobertura deve ainda contemplar a atuação de cargas estáticas e dinâmicas, bem como as possíveis forças horizontais geradas por equipamentos de carregamento. Em determinadas situações operacionais, como durante a aeração do produto armazenado, o silo pode ser pressurizado internamente, tornando necessária a consideração das pressões internas resultantes no cálculo estrutural.

4.7.3 Cargas dos equipamentos de carregamento (F_E)

De acordo com Trahair (1985) as cargas provenientes de máquinas e equipamentos instalados em estruturas devem ser especificadas com base nas informações técnicas fornecidas pelos respectivos fabricantes. Essas cargas incluem não apenas o peso próprio dos equipamentos, mas também os efeitos adicionais decorrentes de ações dinâmicas geradas durante seu funcionamento.

4.7.4 Pressão do vento (F_W)

O projeto do silo deve considerar o potencial arrancamento da cobertura superior, garantindo que as chapas onduladas sejam adequadamente dimensionadas para resistir à flambagem elástica. Para o aumento da estabilidade estrutural, pode ser necessária a instalação de anéis enrijecedores.

No contexto brasileiro, as ações do vento são regulamentadas pela norma ABNT NBR 6123:2023, intitulada “Forças devidas ao vento em edificações”, a qual estabelece que a intensidade dessas ações resulta da diferença de pressão entre as faces externa e interna da edificação analisada.

4.7.5 Forças devidas aos cabos de termometria (F_c)

A pressão causada pelos cabos de termometria constitui o objeto de estudo deste trabalho. De acordo com Wendt (2020), a força de tração atuante da nos cabos durante as operações de carga e descarga situa-se, aproximadamente, entre 40 e 50 kgf por metro cabo submerso na massa de grãos. Contudo, essa informação não é contemplada pela ABNT NBR 17066:2022, que trata do projeto e da execução de silos, e carece de um embasamento teórico consolidado.

No decorrer deste trabalho, serão apresentadas algumas das equações teóricas disponíveis na literatura para a estimativa dessas forças.

4.7.5.1 REIMBERT e REIMBERT (1971)

Conforme proposto por Reimbert e Reimbert (1971), a determinação da força vertical total atuante em um cabo suspenso no interior de uma massa granular pode ser obtida por meio da integração da componente tangencial vertical ao longo da superfície do cabo. Essa componente tangencial vertical é diretamente influenciada pela pressão lateral presente no silo e pelo coeficiente de atrito entre o cabo e o material granular. Sendo:

$$T = \gamma \cdot R \cdot d \cdot \frac{\tan \phi_{w,c}}{\tan \phi_w} \cdot \frac{z^2}{z + A} \quad (1)$$

Onde A é o comprimento característico, calculado por:

$$A = \frac{D}{4 \cdot \tan \phi_w \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right)} - \frac{D}{6} \cdot \tan \phi_i \quad (2)$$

Sendo:

- T: Esforço axial de tração
- γ : peso específico
- R: Raio hidráulico, que é calculado pela razão entre área e perímetro
- d: Diâmetro equivalente do cabo
- $\phi_{w,c}$: Ângulo de atrito entre o produto armazenado e o cabo de termometria
- ϕ_w : Ângulo de atrito do produto armazenado com a parede

- ϕ_i : Ângulo de atrito interno
- z : Comprimento submerso do cabo em grãos
- A : Comprimento característico
- D : Diâmetro do silo

4.7.5.2 IRAM 8015 (1977)

Conforme estabelecido pela norma argentina IRAM 8015:1977, atualmente fora de vigor desde 1997 as cargas atuantes nos cabos de termometria, expressas em kgf, devem ser determinadas da seguinte forma:

$$T = 1,4 \cdot d \cdot \gamma \cdot \tan \phi_{w,c} \cdot \left[0,84 \cdot z^2 \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right) + 0,27 \cdot \frac{D \cdot z}{\tan \phi_w} \right], \text{ para } z \leq L_1 \quad (3)$$

$$T = \frac{1,4 \cdot 0,35 \cdot d \cdot \gamma \cdot \tan \phi_{w,c} \cdot D^2}{\tan^2(\phi_w) \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right)} \cdot \left[\pi \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right) \cdot \tan \phi_w \cdot \frac{z}{D} - 0,57 \right], \text{ para } z \geq L_1 \quad (4)$$

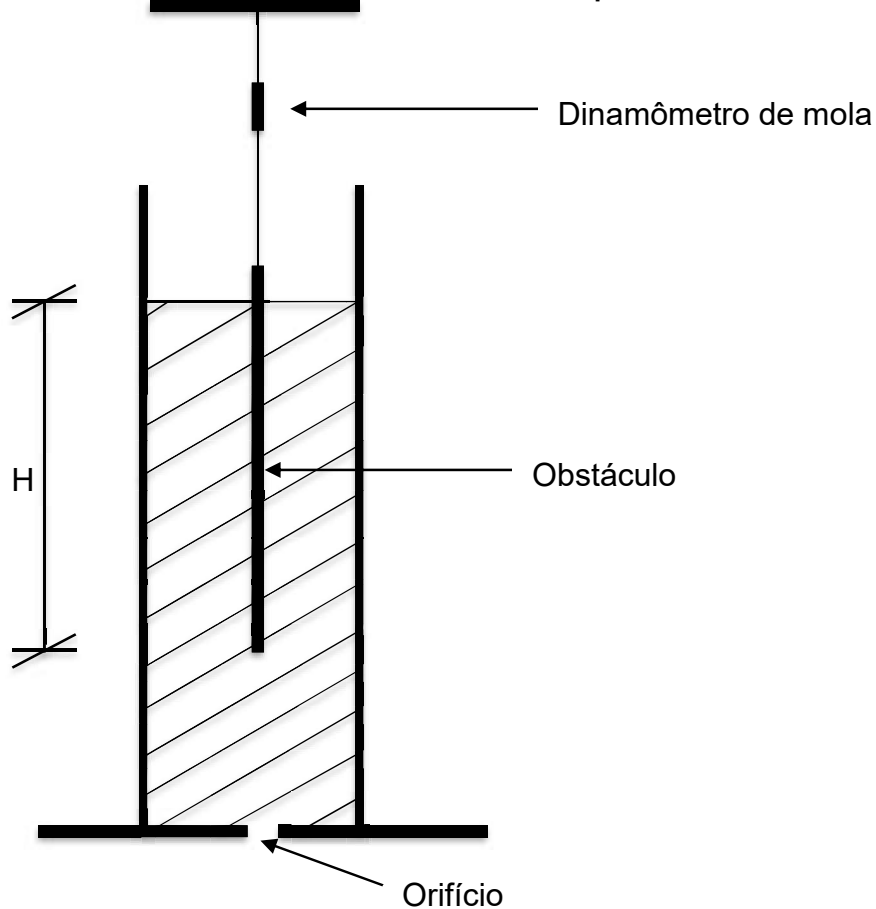
Sendo,

$$L_1 = \frac{D}{2 \cdot \tan(\phi_w) \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right)} \quad (5)$$

4.7.5.3 ATKINSON *et al.* (1983)

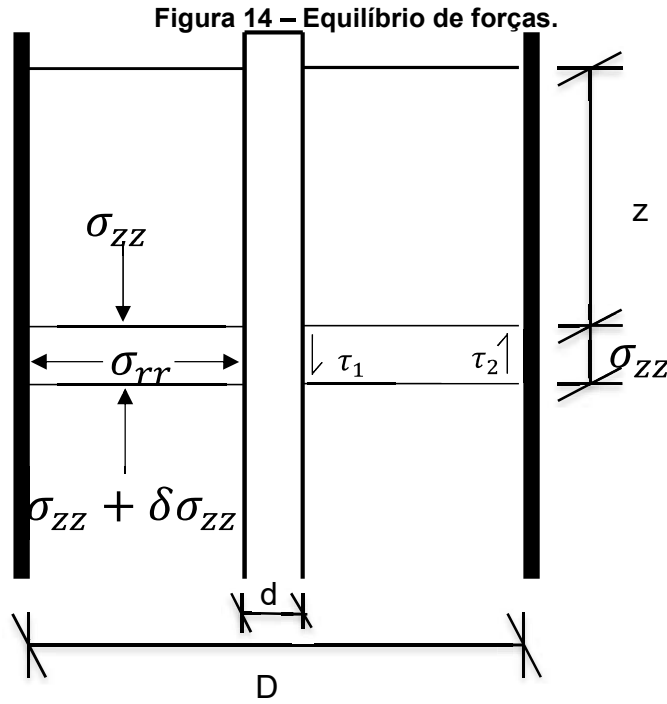
Atkinson, em 1983, desenvolveu uma teoria através de experimentos utilizando cilindros altos de vidro com diâmetros de 105 mm e 220 mm. Nas bases dos cilindros, foram inseridas placas com orifícios de diâmetros de 10 mm, 15 mm e 20 mm. Esses dispositivos foram empregados para investigar a influência de obstáculos posicionados no centro dos cilindros durante o escoamento de material granular em seu interior, conforme ilustrado na Figura 13. Os obstáculos testados consistiam em hastes de acrílico e tubos de vidro ou cobre.

Figura 13 – Aparato utilizado no experimento.



Fonte: Adaptado de ATKINSON (1983).

As pressões exercidas pelo fluxo de materiais foram medidas com o auxílio de uma balança de mola, na qual o obstáculo fora fixado, sendo utilizadas sementes de couve como produto de fluxo. A distribuição de tensões, considerando uma fatia elementar, está apresentada na Figura 14.



Fonte: Adaptado de ATKINSON (1983).

O equilíbrio de forças para o caso ilustrado é dado pela Equação (6).

$$\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \frac{d\sigma_{zz}}{dz} = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)\gamma - \pi D^2 \tau_1 - \pi D \tau_2 \quad (6)$$

Onde γ é a densidade, τ é a tensão de cisalhamento nas paredes, o subscrito 1 refere-se ao obstáculo e o subscrito 2 ao recipiente e σ é a tensão normal

Quando se trata de um produto não coesivo as tensões de cisalhamento nas paredes podem ser relacionadas à tensão radial σ_{rr} . Assim, tem-se $\tau_1 = \mu_{w,c} \sigma_{rr}$ e $\tau_2 = \mu_e \sigma_{rr}$ que, por sua vez, pode ser relacionado à tensão axial σ_{zz} por meio da equação de Janssen, na qual σ_{rr} é definido como $\sigma_{rr} = K \sigma_{zz}$ e $\mu_{w,c}$ se refere ao coeficiente de atrito entre o produto e o obstáculo e μ_e se refere ao coeficiente de atrito entre o produto e o cabo e a parede do cilindro.

Substituindo os valores de τ_1 e τ_2 na Equação (6) obtém-se

$$\frac{d\sigma_{zz}}{dz} + 4 \left(\frac{d_1 \mu_{w,c} K + D \mu_w K}{D^2 - d^2} \right) \sigma_{zz} = \gamma \quad (7)$$

Sujeita à condição de contorno $\sigma_{zz} = 0$ em $z = 0$,

$$\sigma_{zz} = \gamma A(1 - e^{-z/A}) \quad (8)$$

Onde,

$$A = \frac{D^2 - d^2}{4(d \cdot \mu_{w,c} \cdot K + D \cdot \mu_w \cdot K)} \quad (9)$$

O esforço axial de tração (T) no obstáculo central é dada pela Equação (10).

$$T = \int_0^z \pi \cdot d \cdot \tau_1 dz \therefore T = \int_0^z \pi \cdot d \cdot \mu_{w,c} \cdot K \cdot \sigma_{zz} dz \therefore$$

$$T = \pi \cdot d \cdot \mu_{w,c} \cdot K \cdot \gamma \cdot A^2 \left(\frac{z}{A} + e^{-z/A} - 1 \right) \quad (10)$$

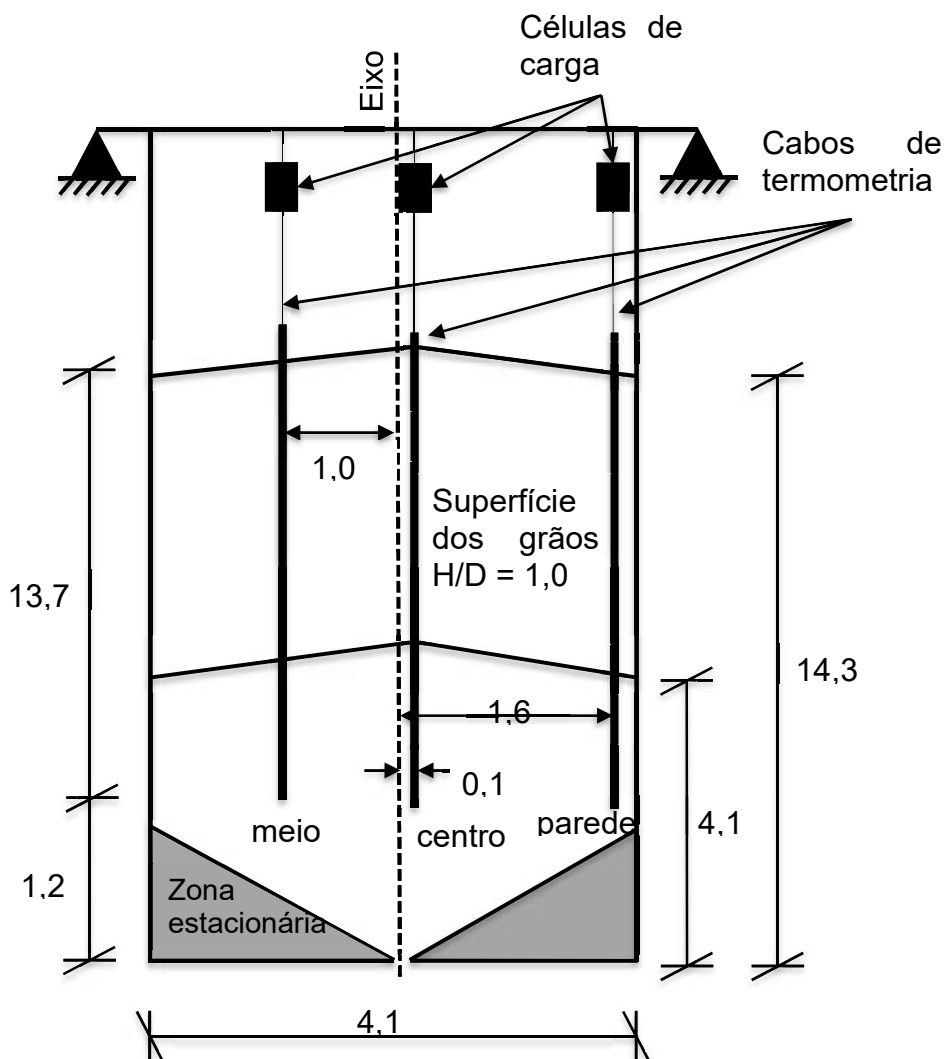
Sendo:

- K: Relação entre a pressão horizontal e vertical, dado pela expressão $K = 1,1(1 - \sin \phi_e)$, de acordo com Eurocode 1, 2006
- μ_w : Coeficiente de atrito entre o produto e a parede do corpo do silo ($\tan^{-1} \phi_w$)
- $\mu_{w,c}$: Coeficiente de atrito entre o produto e o cabo de termometria ($\tan^{-1} \phi_{w,c}$)

4.7.5.4 SCHWAB *et al.* (1991)

Schwab, em 1991, conduziu um estudo com o objetivo de investigar a influência da posição radial e do tipo de material empregado no cabo de termometria na magnitude das forças geradas por estes cabos na cobertura de silos. Em seu estudo foram posicionados cabos de termometria idênticos em três posições radiais distintas, conforme ilustrado na Figura 15. As posições radiais eram 0,1 m, 1,0 m e 1,6 m a partir do centro de um silo com 4,10 m de diâmetro, correspondendo, aproximadamente 7%, 50% e 80% do raio do silo, e representando às posições de centro, intermediária e de parede, respectivamente.

Figura 15 - Posição dos cabos no silo.



Fonte: Adaptado de Schwab *et al.* (1991).

As cargas foram medidas tanto no processo de carregamento quanto no descarregamento do silo. Adicionalmente, realizaram-se medições ao longo de três horas após o enchimento, possibilitando a análise das pressões nas fases estática e dinâmica.

Observou-se que os cabos localizados mais próximos da parede do silo apresentaram cargas superiores às daqueles posicionados próximos ao centro. Além disso, o tipo de cabo empregado também influenciou os resultados: os cabos de vinil geraram as maiores pressões, enquanto os de nylon e polietileno apresentaram esforços significativamente menores, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões e materiais de superfície para os cabos de termometria usados no experimento.

Cabo	Formato	Dimensão (mm)	Material	μ_{ue}
1	Oval	11,8 por 10,7	Nylon	0,242
2	Oval	7,8 por 4,7	Vinil	0,335
3	Cilíndrico	16,2	HDPE Polietileno	0,284
4	Oval	14,8 por 9,3	Nylon	0,293
5	Cilíndrico	8,6	Vinil	0,614

Fonte: Adaptado de Schwab *et al.* (1991).

Schwab *et al.* (1991) determinaram a estimativa da magnitude da força de atrito vertical exercida no cabo de termometria pela integração do produto entre a pressão lateral do grão, a área da superfície do cabo e o coeficiente aparente de fricção do grão no cabo (equação (11)), considerando todo o comprimento do cabo submerso abaixo da superfície do grão.

$$T = F_{tc} \cdot \frac{\pi \cdot \mu_{w,c} \cdot D_{tc} \cdot R \cdot \gamma}{\mu_w} \left\{ z + \frac{R}{\mu_w \cdot K} \left[\exp \left(-\frac{K \cdot \mu_w \cdot z}{R} \right) - 1 \right] \right\} \quad (11)$$

Onde D_{tc} é o diâmetro equivalente, calculado pela equação (12),

$$D_{tc} = \sqrt{4 \cdot \frac{a}{\pi}} \quad (12)$$

Sendo a a área da seção transversal do cabo, esta foi determinada de forma simplificada, assumindo-se uma geometria elíptica. Assim, a área foi calculada pelo produto entre o semi-eixo maior, o semi-eixo menor e o valor de π .

A equação de cálculo foi comparada com os valores medidos experimentalmente das forças verticais de atrito que atuaram em cinco cabos de termometria instalados em um silo em escala real. Verificou-se que, ao utilizar um fator multiplicador $F_{tc} = 1,40$, a equação fornece uma boa estimativa das forças quando a relação altura/diâmetro (H/D) é menor que 1,5. É importante destacar que esse fator não deve ser interpretado como um fator de sobrepressão como aqueles usados em normas de projeto estrutural. Ele é apenas um ajuste empírico do modelo.

Para $H/D > 1,5$, o valor $F_{tc} = 1,40$ passa a fornecer estimativas conservadoras (isto é, tende a superestimar as forças). Por isso, os autores calcularam valores específicos de F_{tc} para cada cabo, em duas posições radiais (próximo à parede e na

região central/intermediária), utilizando um ajuste por regressão não linear (SAS, 1982, *apud* Schwab *et al.*, 1991). Como as diferenças entre os valores de F_{tc} no centro e na posição intermediária foram pequenas, esses dois conjuntos de dados foram combinados em uma única categoria. Para prever as forças nos cabos quando $H/D > 1,5$, foram utilizados os valores médios de F_{tc} :

- $F_{tc} = 0,866$: para cabos próximos à parede, e
- $F_{tc} = 0,434$: para cabos na região central/intermediária.

Esses valores médios de F_{tc} representaram melhor os resultados experimentais do que o valor fixo 1,40 quando $H/D > 1,5$.

4.7.5.5 IRAM 8151-1 (2019)

A Norma Argentina IRAM 8150-1 (2019) aborda os esforços gerados pelo sistema de controle de temperatura de maneira distinta das demais equações apresentadas até aqui. Nesta norma além da equação para descrever o esforço no cabo, ela estabelece uma carga adicional por unidade de área superficial. Dessa forma, para os silos com uma capacidade de armazenamento igual ou superior a 1.000 toneladas, a norma prescreve a aplicação dessa carga distribuída (definida pela Equação (14), cujo valor é derivado da Equação (13), que diz respeito a carga vertical adicional devido ao sistema de monitoramento de temperatura.

$$T = 2 + 0,15 \cdot z \cdot (1 + 0,07 \cdot z^{1,25}) \quad (13)$$

$$p_{vct} = \frac{T}{20} \quad (14)$$

Onde,

T : carga vertical adicional devido ao sistema de controle de temperatura (kN)

p_{vct} : a pressão vertical adicional devida ao sistema de controle da temperatura em kN/m².

5 METODOLOGIA

Este trabalho consiste na investigação de métodos teóricos para a estimativa dos esforços de tração em cabos de termometria transferidos para coberturas de silos metálicos. No presente trabalho, os experimentos são realizados em um silo de escala reduzida em operação em uma propriedade rural. Adicionalmente, o estudo contempla a caracterização laboratorial do produto armazenado, com o objetivo de compreender seu comportamento mecânico e possibilitar a interpretação dos resultados obtidos.

Para a estimativa analítica dos esforços aplicados aos cabos de termometria, foram adotadas formulações consagradas na literatura, incluindo as equações propostas por Reimbert e Reimbert (1971), pela norma argentina IRAM 8015:1977, por Atkinson *et al.* (1983), Schwab *et al.* (1991) e pela norma argentina IRAM 8125:2019, além do valor empírico comumente empregado na prática industrial. Os valores obtidos a partir dessas formulações foram posteriormente comparados com os esforços efetivamente medidos por meio de instrumentação instalada em um silo metálico em operação, destinado ao armazenamento de ração avícola. Essa análise comparativa permitiu avaliar o grau de concordância entre as previsões teóricas e os valores experimentais observados.

O desenvolvimento metodológico da pesquisa foi estruturado em duas etapas complementares: (i) caracterização física e mecânica do produto armazenado, realizada em laboratório, e (ii) o monitoramento experimental dos esforços de tração atuantes no cabo de termometria instalado em um silo em operação. A integração dessas etapas permitiu uma comparação direta entre os valores obtidos teoricamente e durante as operações.

5.1 ETAPA LABORATORIAL

A primeira etapa da pesquisa consistiu na determinação das propriedades físicas e mecânicas do produto armazenado. Os ensaios foram conduzidos em parceria com o Laboratório da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), sob supervisão do professor Andrés Batista Cheung e nos laboratórios da Universidade Estadual de Maringá (UEM). A caracterização laboratorial teve como objetivo fornecer parâmetros físicos do produto necessários para o desenvolvimento

das análises teóricas e para a interpretação dos dados obtidos nas medições experimentais. Os ensaios realizados estão descritos a seguir.

5.1.1 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DE JENIKE

Na busca por um método apropriado para a medição das propriedades dos grãos, Jenike (1964) investigou inicialmente a aplicação de equipamentos tradicionalmente utilizados na mecânica dos solos. Diante dos resultados insatisfatórios, o autor concebeu e desenvolveu um novo aparato, denominado “*Jenike Shear Cell*”.

O equipamento empregado nos ensaios foi o aparelho de cisalhamento direto TSG 70-140, reconhecido internacionalmente como *Jenike Shear Tester* (Figura 16). O procedimento experimental adotado seguiu as recomendações presentes no manual *Standard Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell* (Técnica Padrão de Ensaio de Cisalhamento para Sólidos Particulados Utilizando a Célula de Cisalhamento de Jenike) (1989), elaborado pela Federação Europeia de Engenharia Química. A leitura dos dados foi realizada de forma eletrônica através de um *software*.

Figura 16 – Equipamento de cisalhamento direto TSG 70-140.

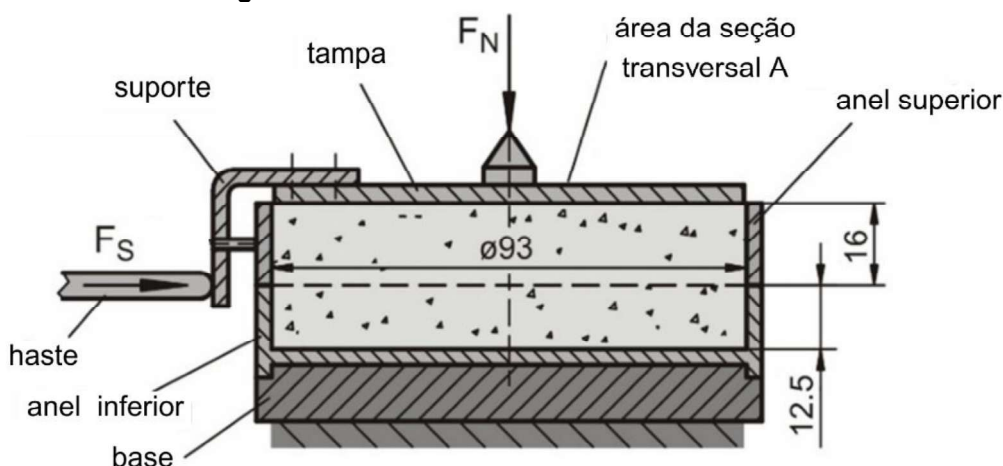


Fonte: Autor (2026).

O aparelho de Jenike é constituído por um anel inferior, um anel superior e uma tampa, conforme ilustrado na Figura 17. A tampa é carregada centralmente por

uma força normal (F_N). Durante o ensaio, a parte superior da célula de cisalhamento é deslocada horizontalmente em relação ao anel inferior, que permanece fixo, por meio de um sistema de avanço acionado por motor, o qual empurra um suporte fixado à tampa. A força necessária para provocar esse deslocamento, denominada força de cisalhamento (F_S), é medida por meio da haste de acionamento. Em decorrência do deslocamento relativo entre o anel superior e a tampa em relação ao anel inferior, o produto ensaiado é submetido a uma deformação por cisalhamento. As tensões normal (σ) e de cisalhamento (τ), atuantes no plano horizontal de contato entre os anéis, são determinadas pela razão entre as forças normal (F_N) e de cisalhamento (F_S) e a área da seção transversal da célula de cisalhamento.

Figura 17 - Célula de cisalhamento de Jenike.



Fonte: SCHULZE (2021).

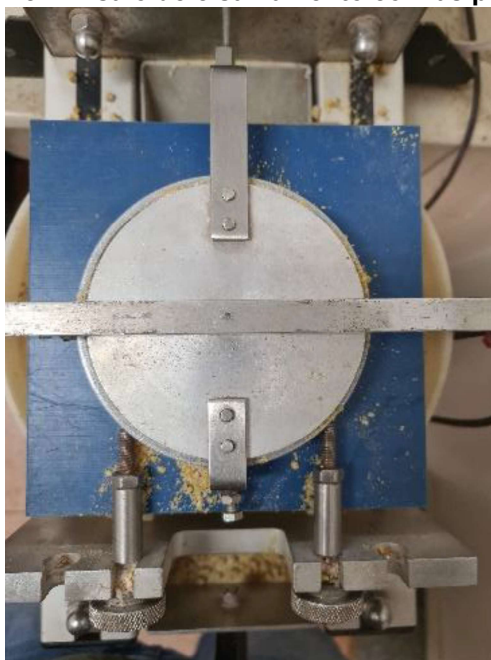
Para a determinação de um ponto do “*yield locus*”, a célula de cisalhamento é preenchida com a amostra do produto granular. Após uma etapa de pré-consolidação manual, a amostra é submetida ao pré-cisalhamento e, em seguida, ao cisalhamento até a ocorrência da falha. Para a obtenção de um novo ponto do “*yield locus*”, uma nova amostra do produto a granel deve ser preparada e ensaiada.

Por meio desses ensaios foram determinados parâmetros fundamentais para a caracterização do comportamento mecânico dos grãos, incluindo: peso específico, coesão, ângulo de atrito interno e ângulo de atrito efetivo.

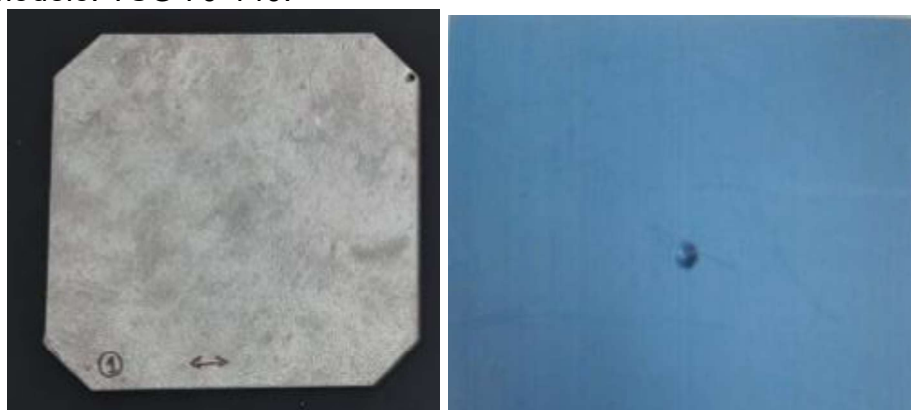
Além disso, a determinação do ângulo de atrito entre o produto armazenado e a parede, bem como entre o produto armazenado e o cabo, pode ser realizada por meio do aparelho de cisalhamento direto TSG 70-140 - AVT (Figura 18 (a)). Nesse

procedimento, uma amostra do material cuja interação se deseja avaliar é posicionada na base da célula, de modo que o produto ensaiado cisalhe contra essa superfície. Foram realizados ensaios de cisalhamento considerando, como superfícies de contato, o material da parede do silo e o material do cabo, correspondentes, respectivamente, ao aço galvanizado ZAR 345 e ao polietileno (Figura 18 (b)), respectivamente. Esses ensaios possibilitaram a obtenção dos parâmetros de interação produto-parede e produto-cabo, necessários para o dimensionamento e avaliação estrutural das células de armazenamento.

Figura 18 - Ensaio de cisalhamento com as paredes.



a) Ensaio de cisalhamento direto no equipamento de Jenike, modelo: TSG 70-140.

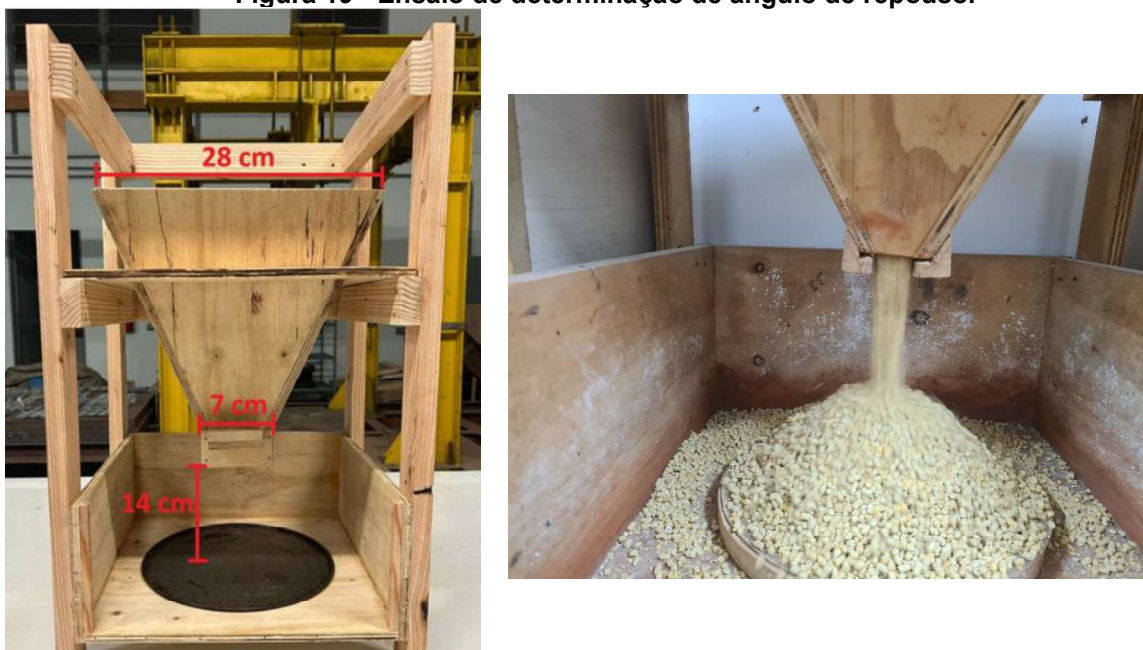


b) Tipos de materiais avaliados para atrito com a parede.
Fonte: Autor (2026).

5.1.2 ÂNGULO DE REPOUSO (ϕ_r)

Para a realização da medição do ângulo de repouso foi elaborado um aparato de madeira similar ao utilizado por Martins (2012), conforme pode ser observado na Figura 19. Este parâmetro é definido como o ângulo formado entre a superfície livre de um monte de produto granular e a linha horizontal, após este ser despejado sobre uma superfície plana. Segundo Calil Jr. e Cheung (2007), esse parâmetro é um importante indicador do potencial do produto em fluir. Além disso, o ângulo de repouso pode ser utilizado como uma estimativa do ângulo de atrito interno, segundo os autores, o ângulo de atrito interno coincide com o ângulo de repouso e pode ser utilizado para verificações preliminares.

Figura 19 - Ensaio de determinação de ângulo de repouso.



Fonte: Autor (2026).

Valores elevados do ângulo de repouso indicam maior coesão e menor propensão ao escoamento livre, enquanto valores mais baixos estão associados a materiais de menor coesão e maior fluidez, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Condições de fluxo a partir do ângulo de repouso.

ϕ_r	0 a 30°	30 a 35°	35 a 40°	40 a 45°	45 a 50°	50 a 60°	>60°
Fluxo	Excelente	Bom	Razoável	Apertado	Difícil	Muito Difícil	Extremamente difícil

Fonte: Adaptado de Calil Jr. e Cheung (2007).

5.1.3 Granulometria

A classificação granulométrica dos produtos armazenados foi realizada com base na dimensão média do diâmetro das partículas (D_g), conforme a seguinte classificação:

- $D_g > 0,42$ mm: materiais granulares;
- $0,42$ mm $\geq D_g \geq 0,149$ mm: materiais pulverulentos coesivos;
- $0,149$ mm $\geq D_g \geq 0,079$ mm: materiais pulverulentos coesivos finos;
- $D_g < 0,079$ mm: materiais pulverulentos coesivos extrafinos.

Essa classificação é relevante para a análise mecânica uma vez que o comportamento dos materiais particulados dentro de estruturas de armazenamento, especialmente no que se refere à fluência, tendência à formação de arcos e resistência ao escoamento, é fortemente influenciado pela granulometria. Materiais mais finos tendem a apresentar maior coesão, menor permeabilidade e maior suscetibilidade à compactação, aspectos que impactam diretamente as ações sobre as paredes e o fundo dos silos.

A determinação do diâmetro das partículas foi realizada por meio do método de peneiramento (Figura 20), amplamente empregado na caracterização granulométrica de materiais particulados. Inicialmente, as amostras previamente coletadas foram pesadas, peneiradas e novamente pesadas em balança de precisão. Em seguida, procedeu-se ao peneiramento utilizando um conjunto de peneiras normatizadas, dispostas em ordem decrescente de abertura, conforme procedimentos usuais adotados em análises granulométricas. Após o peneiramento, as frações retidas em cada peneira foram novamente pesadas, permitindo a determinação da distribuição granulométrica e do diâmetro representativo das partículas.

Figura 20 – Ensaio granulométrico por peneiramento.



Fonte: Autor (2026).

5.1.4 ENSAIO DE UMIDADE

De acordo com o documento *Regras para análise de sementes* (BRASIL, 2009), o método padrão recomendado para a determinação do teor de umidade em grãos é o método da estufa. No presente estudo, esse procedimento foi devidamente seguido. As amostras foram pesadas, acondicionadas em cápsulas apropriadas e submetidas à temperatura controlada de $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, durante um período contínuo de 24 horas, conforme prescrito. A variação de massa entre a condição inicial e a massa obtida após a secagem permitiu determinar o teor de umidade.

5.2 ETAPA EXPERIMENTAL NO SILO EM OPERAÇÃO

A segunda etapa consistiu no monitoramento em campo dos esforços de tração atuantes no cabo de termometria instalado em um silo metálico localizado em propriedade rural e utilizado para armazenamento de ração avícola. O objetivo desta etapa foi obter valores experimentais de forças transmitidas à cobertura pelo cabo durante o carregamento, consolidação e descarga do produto, permitindo a comparação direta com os valores obtidos por meio dos métodos teóricos.

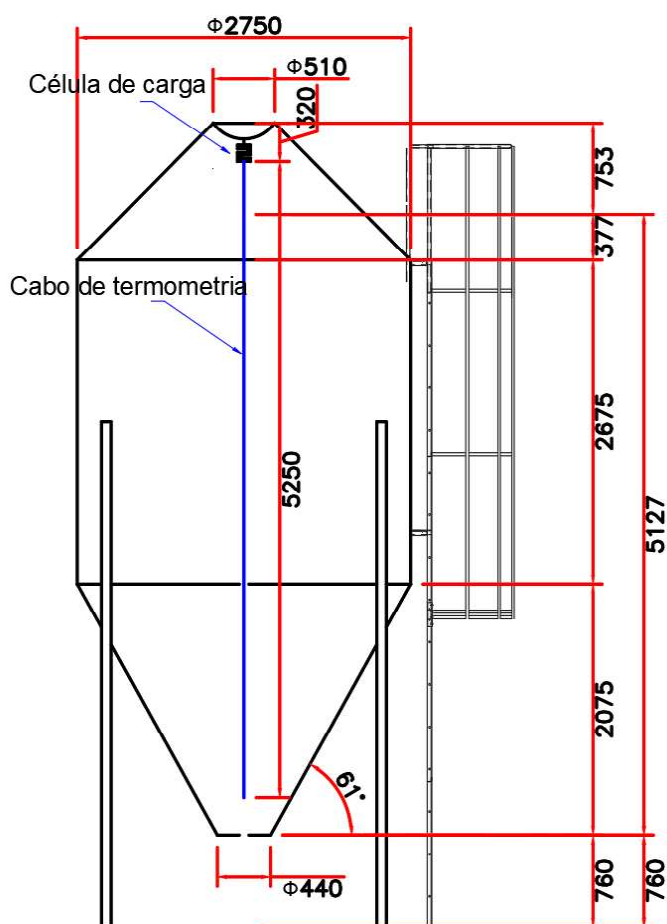
Para isso, foi instalada uma célula de carga acoplada ao trecho suspenso do cabo de termometria fixado na cobertura do silo. O dispositivo registrou continuamente os esforços resultantes ao longo de todas as etapas operacionais, incluindo:

- carregamento do produto no silo;
- período de armazenagem estática com consolidação do produto;
- descarga do produto.

5.2.1 O silo

Os ensaios foram realizados em um silo utilizado para o armazenamento de ração avícola, conforme representado na Figura 21. O modelo possui capacidade de armazenamento de 15.500 kg de ração e integra uma bateria de dois silos instalados em um aviário localizado no município de Ubatã (PR).

Figura 21 - Silo PDB2753 (medidas em mm).



Fonte: Autor (2026).

O silo é composto por três anéis de chapa corrugada galvanizada. Tanto a cobertura quanto a tremonha são fabricadas em chapa lisa galvanizada. A estrutura é sustentada por seis montantes galvanizados fixados ao primeiro anel.

De acordo com os critérios apresentados na Tabela 1, este silo pode ser classificado como esbelto pela maioria das metodologias analisadas, uma vez que a razão entre a altura e o diâmetro (H/D) do silo é igual a 2,14, com exceção da Norma Australiana AS 3774:1996, que o enquadra na categoria de silo medianamente esbelto.

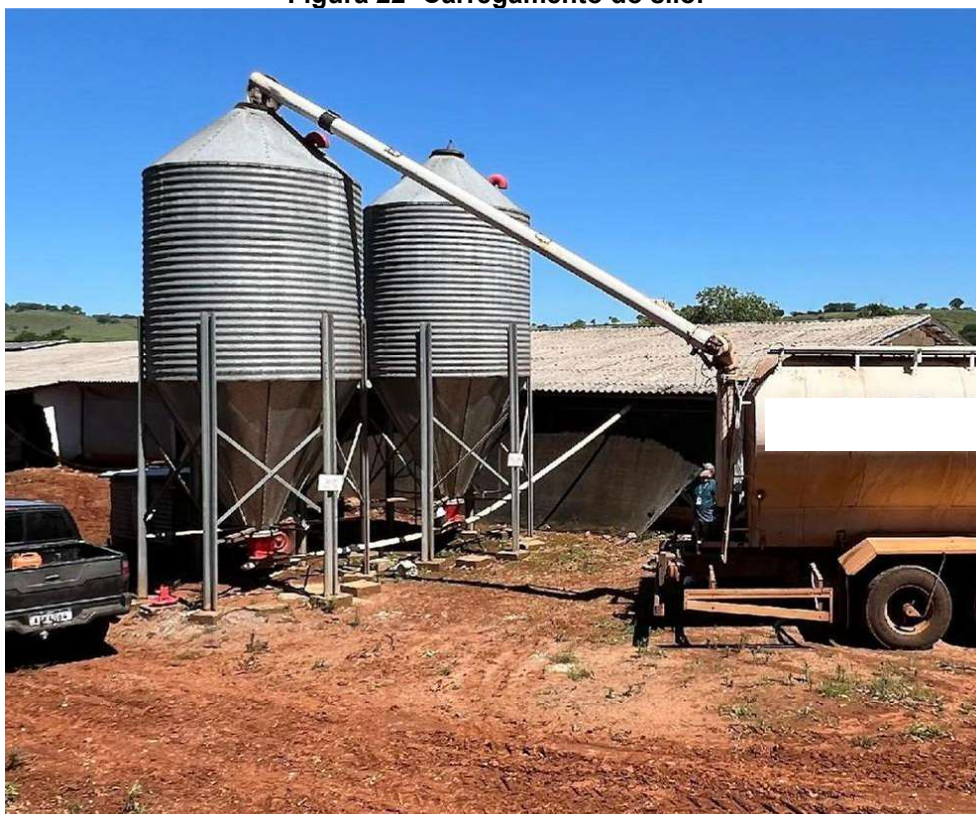
5.2.2 Dinâmica operacional do silo

O silo analisado integra o sistema de alimentação de frangos de corte, no qual a ração armazenada é consumida para atender a demanda do lote de aves. O consumo de ração varia significativamente ao longo do ciclo produtivo, estando diretamente relacionado à idade dos frangos. Nas fases iniciais do lote, quando as aves são mais jovens, o consumo ocorre de forma mais lenta, podendo o esvaziamento completo do silo demandar períodos superiores a uma semana. À medida que os frangos crescem, o consumo de ração se intensifica, de modo que, nas fases finais do ciclo produtivo, o conteúdo total do silo pode ser consumido em um intervalo de tempo significativamente menor, chegando a ocorrer praticamente em um único dia.

Os lotes de frango apresentam duração média de aproximadamente 42 dias, ao longo dos quais o padrão de consumo de ração se altera de forma progressiva. Todos os ciclos de carregamento e descarregamento foram realizados no mesmo lote de aves. Em razão dessa variabilidade operacional, os ciclos de carregamento e descarregamento do silo avaliados neste estudo apresentam durações distintas, não sendo caracterizados por intervalos de tempo uniformes.

Adicionalmente, destaca-se que o processo de carregamento do silo é realizado por meio de um alçapão central localizado na cobertura em um intervalo relativamente curto quando comparado ao tempo de descarregamento (Figura 22). O tempo médio necessário para o carregamento completo do silo é de aproximadamente 25 minutos, correspondendo a uma taxa média de alimentação da ordem de 620 kg/min. Destaca-se, ainda, que ao final do carregamento do silo, em algumas situações, a célula de carga permanecia completamente submersa.

Figura 22- Carregamento do silo.



Fonte: Autor (2026).

O descarregamento do silo, por sua vez, é realizado de forma centrada através da tremonha inferior (Figura 23) e apresenta caráter imprevisível, em função da forma como é realizado o manejo das aves. Enquanto o carregamento é previamente programado, o descarregamento não segue um cronograma fixo. Esse processo acontece de maneira pontual, sendo acionado várias vezes ao longo do dia, conforme a demanda imediata. Cada evento de descarregamento possui curta duração, geralmente inferior a um minuto. Dessa forma, o descarregamento não é contínuo. Entre um evento e outro, o produto permanece em repouso no interior do silo, caracterizando um regime de operação descontínuo, com períodos alternados de escoamento e estagnação do produto.

Figura 23 – Tremonha inferior.



Fonte: Autor (2026)

5.2.3 O cabo de termometria

O cabo de termometria utilizado apresenta uma estrutura composta por um cabo oco de 6 mm de diâmetro, 2 cordoalhas de aço com 4 mm de diâmetro cada, que atuam como elementos resistentes, e um invólucro de polietileno (preto), com seção aproximadamente retangular de cantos arredondados, medindo 28 mm no maior sentido e 14 mm no menor sentido. O conjunto possui comprimento total de 5,25 m. A fixação é realizada por meio de um grampo de tensão no topo, enquanto a base é mantida livre durante toda a operação.

A célula de carga foi posicionada no topo do cabo de termometria, o qual foi instalado no centro radial do silo, conforme Figura 24. A imagem apresenta o cabo suspenso sobre a ração, uma vez que foi registrada logo após a instalação do sistema. Em etapa posterior o silo foi completamente esvaziado e o cabo foi reposicionado de modo a permanecer alinhado e linear ao longo de todo o comprimento do silo durante a operação.

Figura 24 - Interior do silo com o cabo instalado.



Fonte: Autor (2026).

Ressalta-se que esse tipo de silo não requer, em condições usuais de operação, a instalação de cabos para o monitoramento de umidade e temperatura. No presente estudo, o cabo foi instalado exclusivamente para fins experimentais, sendo removido após a conclusão das medições. Ao longo dos ensaios, não houve variação da posição do cabo, tendo sido instalado apenas um cabo, posicionado no centro do silo.

5.2.4 Célula de carga

A célula de carga utilizada nos ensaios foi o modelo S9M tipo S, fabricada pela HBM (agora parte da HBK) (Figura 25), com capacidade nominal de 50 kN, projetada para medições de alta precisão em diferentes condições operacionais. Esse modelo permite a medição de forças de tração e compressão, sendo adequado para ensaios estáticos e dinâmicos.

Figura 25 – Célula de carga.



Fonte: Autor (2026).

5.2.5 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizado neste estudo foi o Amplificador Universal de 8 canais da família QuantumX (DAQ), desenvolvido pela empresa Hottinger Brüel & Kjær (HBK). Este sistema permite a aquisição simultânea de múltiplos sinais de sensores de força, deformação e outros transdutores.

Para os ensaios realizados, o DAQ foi configurado para coletar os sinais provenientes da célula de carga S9M tipo S uma vez por minuto, permitindo a medição contínua dos esforços de tração ao longo do ciclo de armazenagem.

A integração entre o DAQ e a célula de carga foi realizada por meio do *software* de aquisição, *Catman easy*, fornecido pelo fabricante, que possibilita o monitoramento em tempo real para análise posterior. Essa configuração permitiu uma avaliação precisa dos esforços de tração atuantes no cabo de termometria.

Figura 26 - Sistema de aquisição de dados.



Fonte: Autor (2026)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

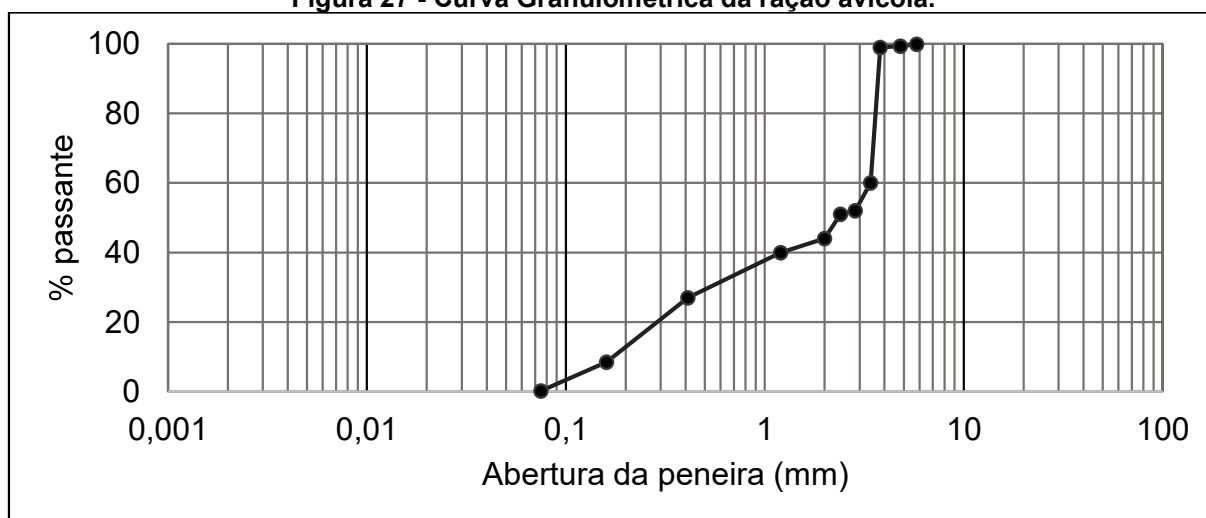
A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. Posteriormente, com base nos parâmetros físicos determinados, será realizada a estimativa dos esforços de tração atuantes no cabo de termometria, considerando como referência o silo modelo PDB2753. E, por fim, serão apresentados os valores de tração medidos durante os ciclos de carga e descarga de ração no silo.

6.1 RESULTADOS DA ETAPA LABORATORIAL

A análise dos resultados laboratoriais tem início com a determinação do teor de umidade do produto, uma vez que essa propriedade exerce influência direta sobre o comportamento de fluxo e, portanto, deve ser considerada na interpretação dos ensaios realizados posteriormente. O ensaio de umidade indicou um teor médio de 6,39%, evidenciando que a ração se encontrava em condição seca, sem presença significativa de água capaz de alterar de forma relevante o seu comportamento.

O ensaio de granulometria indica que a ração apresenta a predominância de característica de um material granular não coesivo, uma vez que em torno de 70% do produto apresenta diâmetro superior a 0,4 mm (Figura 27).

Figura 27 - Curva Granulométrica da ração avícola.



Fonte: Autor (2026).

Por meio do ensaio de cisalhamento de Jenike foi possível determinar, para o produto analisado, os valores de peso específico, coesão, ângulo de atrito interno, ângulo de atrito efetivo, ângulo de atrito entre o produto e a parede de aço galvanizado e ângulo de atrito entre o produto e o cabo. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4, para três amostras e, como padrão, será adotado o valor médio dos resultados obtidos.

Tabela 4 – Propriedades físicas da ração obtidas a partir do teste de cisalhamento direto.

Amostra	γ (Kg/m³)	c (kN/m²)	ϕ_i (°)	ϕ_e (°)	ϕ_w (°)	$\phi_{w,c}$ (°)
1	772,94	1,132	37,3	41,2	8,32	13,63
2	765,81	1,119	37,7	42,8	12,08	16,29
3	755,61	0,571	38,5	42,1	11,10	13,82
Média:	764,79	0,941	37,8	42,0	10,50	14,58

γ -Peso específico do grão, c-coesão, ϕ_i -ângulo de atrito interno, ϕ_e -ângulo efetivo de atrito, ϕ_w - ângulo de atrito do produto com a parede, $\phi_{w,c}$ -ângulo de atrito do produto com o cabo.

Fonte: Autor (2026).

Observando os resultados obtidos, destaca-se que os valores de coesão foram baixos, com média de 0,941 kN/m², indicando que a resistência ao cisalhamento do produto se dá majoritariamente pelo atrito entre partículas, e não por forças de ligação entre elas. Assim, a coesão exerce influência limitada no comportamento global do produto e tende a ter participação reduzida nas estimativas de tração nos cabos de termometria.

O ângulo médio de atrito com a parede de aço galvanizado (ϕ_w) foi de 10,5°, enquanto o ângulo médio de atrito entre o produto e o material do cabo ($\phi_{w,c}$) foi de 14,6°. Observa-se que o produto apresenta maior interação com o cabo do que com a parede, o que pode favorecer esforços localizados nos cabos de termometria. Essa diferença sugere a necessidade de considerar este parâmetro específico nos modelos de cálculo que estimem a força exercida pelos cabos nas coberturas dos silos.

No que diz respeito às propriedades de resistência ao cisalhamento, verificou-se uma média de 37,8° para o ângulo de atrito interno (ϕ_i) e 42,0° para o ângulo efetivo (ϕ_e). Esses valores encontram-se dentro da faixa típica para materiais granulares secos (AL-HASHEMI; AL-AMOUDI, 2018). Além disso, observou-se baixa variabilidade entre amostras, o que evidencia consistência nas características do produto.

Conforme mencionado anteriormente, o ângulo de repouso tende a se aproximar do ângulo de atrito interno, podendo, inclusive ser utilizado como uma estimativa deste. Nesse contexto, o resultado obtido no ensaio de ângulo de repouso da ração, de $37,7^\circ$ (Figura 28), reforça essa aproximação teórica. O valor observado confirma que o produto apresenta um fluxo razoável, compatível com as expectativas para esse tipo de produto. Dessa forma, a comparação experimental entre o ângulo de atrito interno e o ângulo de repouso valida a hipótese descrita por Calil Jr. e Cheung (2007).

Figura 28 - Resultado do ângulo de repouso para a ração.



Fonte: Autor (2026).

6.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS NO SILO EM OPERAÇÃO

Considerando que o ângulo de atrito entre a ração e a parede do silo é de $10,5^\circ$ e que o ângulo de inclinação da tremonha em relação ao plano horizontal é de 61° , observa-se, a partir da Figura 29, que essas condições geométricas e de atrito conduzem ao estabelecimento de um regime de fluxo de massa no silo estudado. Esse comportamento é vantajoso, de acordo com Calil Jr. e Cheung (2007), uma vez que apresenta vazão regular, tem efeitos de segregação radial reduzidos pelo aumento da homogeneidade e possui um campo de tensões mais previsível.

Figura 29 - Tipo de fluxo no silo estudado.



Fonte: Autor (2026), adaptado de ACI 313-16:2016.

6.2.1 Caracterização dos ciclos de carregamento e descarregamento

No total, foram realizados seis ciclos de carregamento e descarregamento ao longo da etapa experimental, no mesmo lote de frangos. Cada ciclo apresentou particularidades quanto às condições operacionais e à qualidade dos dados obtidos, conforme descrito a seguir.

Os Ciclos 1 e 2, iniciados em 19/10/2025 e 28/10/2025, respectivamente, consistiram no carregamento total do silo. No entanto, em ambos os casos, ocorreram falhas na aquisição dos dados após a etapa de carregamento. No Ciclo 1, o problema esteve associado a uma falha no fechamento da tampa do silo ao final do carregamento, o que ocasionou a perda de tensão no cabo de termometria e, consequentemente, inviabilizou a leitura dos dados durante as fases estática e de descarregamento. De forma semelhante, no Ciclo 2, também houve falha na leitura após o carregamento. Em razão desses problemas, para os dois primeiros ciclos são apresentados registros de apenas uma hora após o início do carregamento.

O Ciclo 3, iniciado em 06/11/2025, foi conduzido com o carregamento completo do silo, atingindo aproximadamente 15,5 toneladas de produto. Este ciclo foi encerrado com produto remanescente no interior da estrutura, estimado em cerca de

7 toneladas, não sendo realizado o descarregamento completo nessa etapa. Essa condição operacional ocorreu em função da estratégia de abastecimento adotada na unidade, na qual a solicitação de ração é definida pelo responsável pelo manejo dos frangos, que optou pelo enchimento simultâneo deste silo e do segundo silo existente no local. Em decorrência dessa decisão operacional, o Ciclo 4 apresentou maior duração, uma vez que o consumo da ração passou a ocorrer de forma compartilhada entre os dois silos, resultando em um esvaziamento mais lento da estrutura em estudo.

Na sequência, o Ciclo 4, cujo carregamento ocorreu em 08/11/2025, foi executado a partir do produto remanescente do Ciclo 3, sendo considerado até o esvaziamento completo do silo.

Por fim, os Ciclos 5 e 6, realizados em 11/11/2025 e 12/11/2025, respectivamente, corresponderam a ciclos completos, compreendendo o carregamento total do silo seguido de descarga integral para o Ciclo 5 e parcial para o Ciclo 6, sem ocorrência de falhas no sistema de aquisição de dados.

A Tabela 5 resume e concentra algumas das informações mais relevantes sobre os ciclos de carga e descarga realizados experimentalmente.

Tabela 5 – Esquema dos ciclos de carga e descarga realizados.

Ciclo ¹	Data	Condição do silo no início da fase de carregamento	Duração do Ciclo	Observações
1	19/10/2025	Vazio	1 hora	Erro de leitura
2	28/10/2025	Vazio	1 hora	Erro de leitura
3	06/11/2025	Vazio	38 horas	Descarga incompleta
4	08/11/2025	Apresentava aproximadamente 7 toneladas de ração	60 horas	Consumo dividido ²
5	11/12/2025	Vazio	39 horas	Ciclo completo
6	12/11/2025	Vazio	26 horas	Descarga incompleta

Notas:

¹ Entende-se como “Ciclo” o intervalo de tempo compreendido entre dois carregamentos consecutivos.

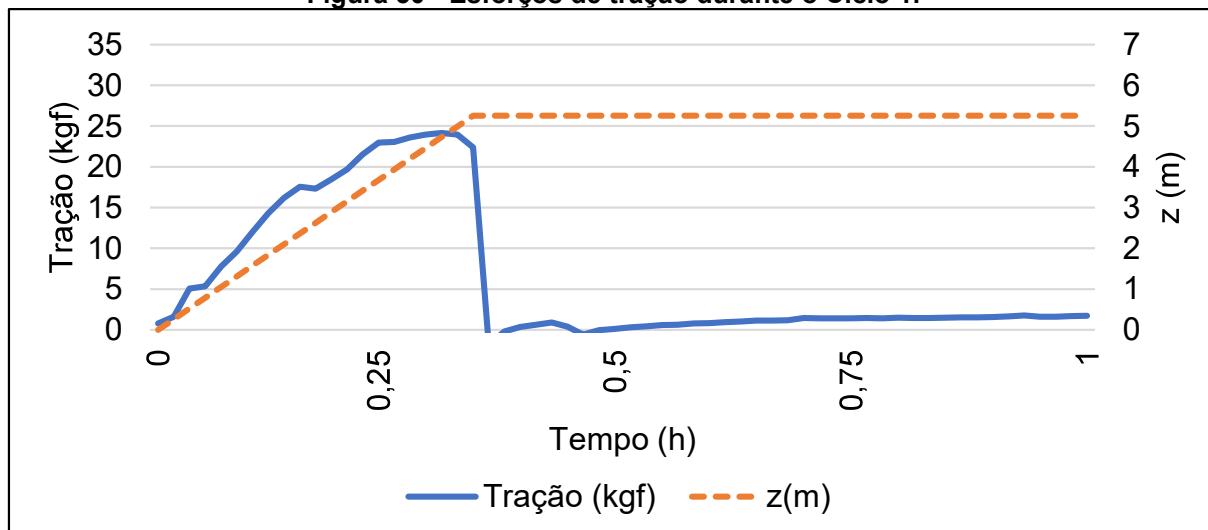
² Neste carregamento, um silo reserva, que não integra o escopo do estudo, também foi abastecido, o que resultou em um maior tempo de duração do ciclo, uma vez que dois silos foram utilizados para a alimentação dos frangos.

Fonte: Autor (2026).

Os esforços aferidos pela célula de carga, obtidos por meio do sistema de aquisição de dados, para cada ciclo experimental, são apresentados a partir da Figura

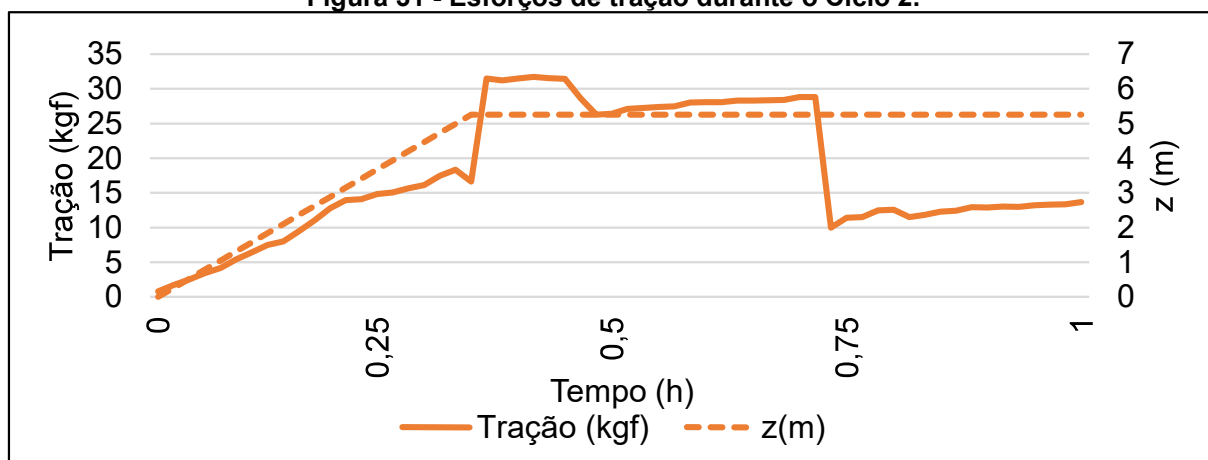
30 até a Figura 35. Os valores de z (comprimento do cabo soterrado pelos grãos) foram monitorados manualmente de forma periódica e estão apresentados de forma aproximada em cada gráfico.

Figura 30 - Esforços de tração durante o Ciclo 1.



Fonte: Autor (2026).

Figura 31 - Esforços de tração durante o Ciclo 2.

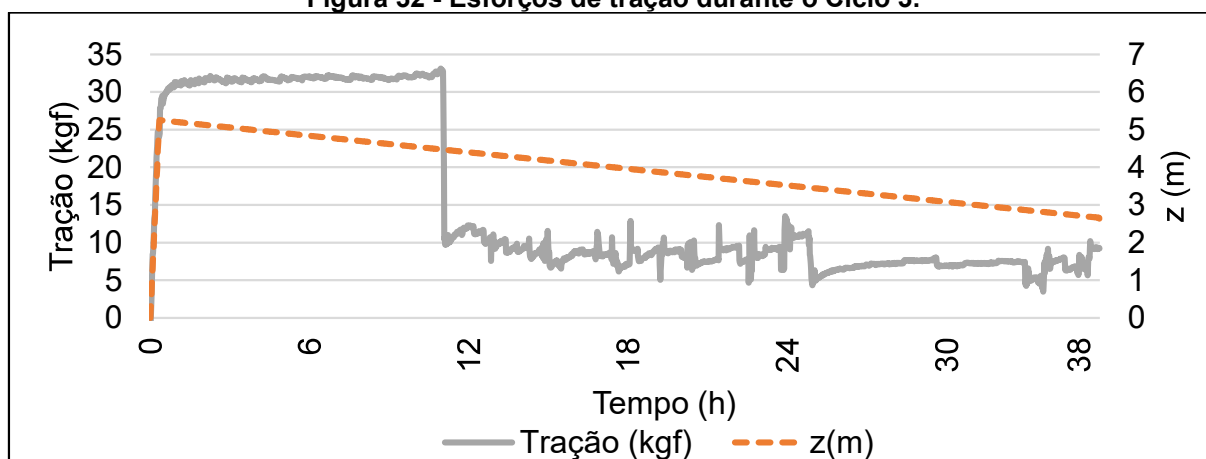


Fonte: Autor (2026).

A partir da análise dos gráficos correspondentes aos Ciclos 1 e 2, observa-se que a força de tração no cabo aumenta de forma acentuada à medida que ocorre o carregamento do silo. No Ciclo 1, a queda repentina da tração verificada ao final do carregamento está associada a um problema técnico no fechamento da tampa do silo, mencionado anteriormente, o qual provocou o distensionamento do cabo de termometria, resultando na redução praticamente total dos esforços registrados a partir desse instante.

Comportamento semelhante foi observado no Ciclo 2, no qual o cabo também sofreu distensionamento, comprometendo a continuidade e a confiabilidade da coleta de dados. Em razão dessas ocorrências, os gráficos referentes a ambos os ciclos apresentam apenas o intervalo inicial de uma hora após o início do carregamento.

Figura 32 - Esforços de tração durante o Ciclo 3.



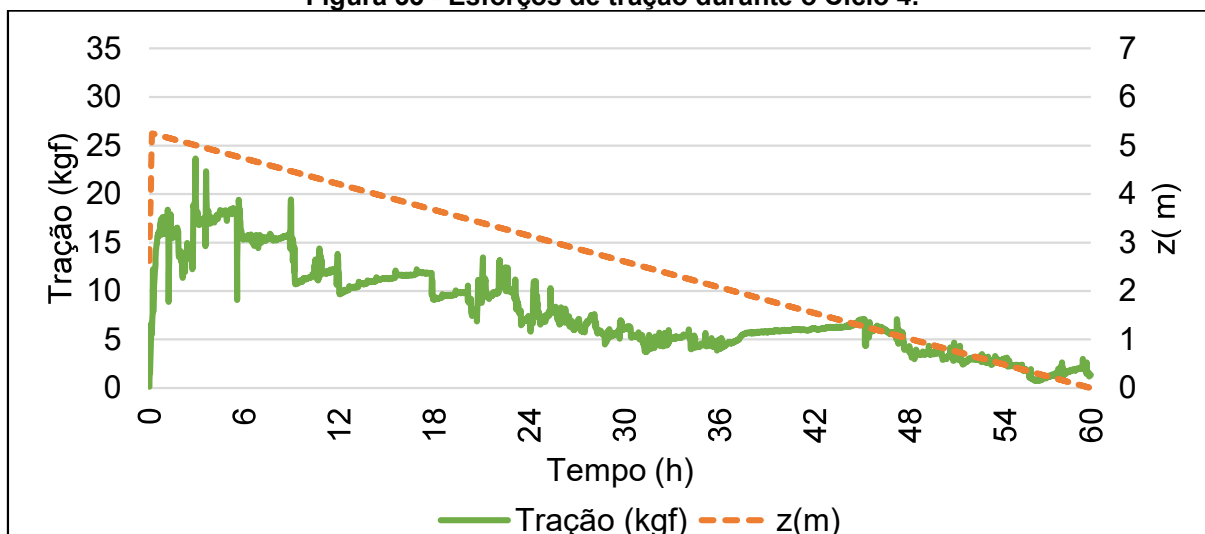
Fonte: Autor (2026).

No Ciclo 3, observou-se comportamento semelhante ao verificado nos ciclos anteriores durante a etapa de carregamento, com registro de aumento acentuado da força de tração no cabo ainda durante o processo de enchimento do silo. Após a conclusão do carregamento, verificou-se um período de relativa estabilidade dos esforços, caracterizado por um crescimento linear e lento da tração medida.

Por volta de 12 horas de duração do ciclo, foi observada uma queda brusca nos esforços de tração registrados. Uma possível explicação para esse comportamento está associada à formação gradual de um vazio interno no produto granular armazenado. Nesse cenário, o vazio teria se desenvolvido progressivamente ao longo do tempo, contribuindo para o aumento dos esforços no cabo, até que ocorreu seu colapso repentino, resultando na redução abrupta da tração medida. Após esse evento, os esforços mantiveram-se relativamente constantes.

Alternativamente, essa redução súbita da tração pode estar relacionada ao sistema de fixação do cabo, tais como um afrouxamento progressivo ou recalque dos elementos responsáveis pela ancoragem, o que teria provocado uma redistribuição dos esforços atuantes. Destaca-se que, na ausência de instrumentação complementar que permita identificar diretamente esses fenômenos, ambas as hipóteses devem ser consideradas plausíveis para a interpretação do comportamento observado.

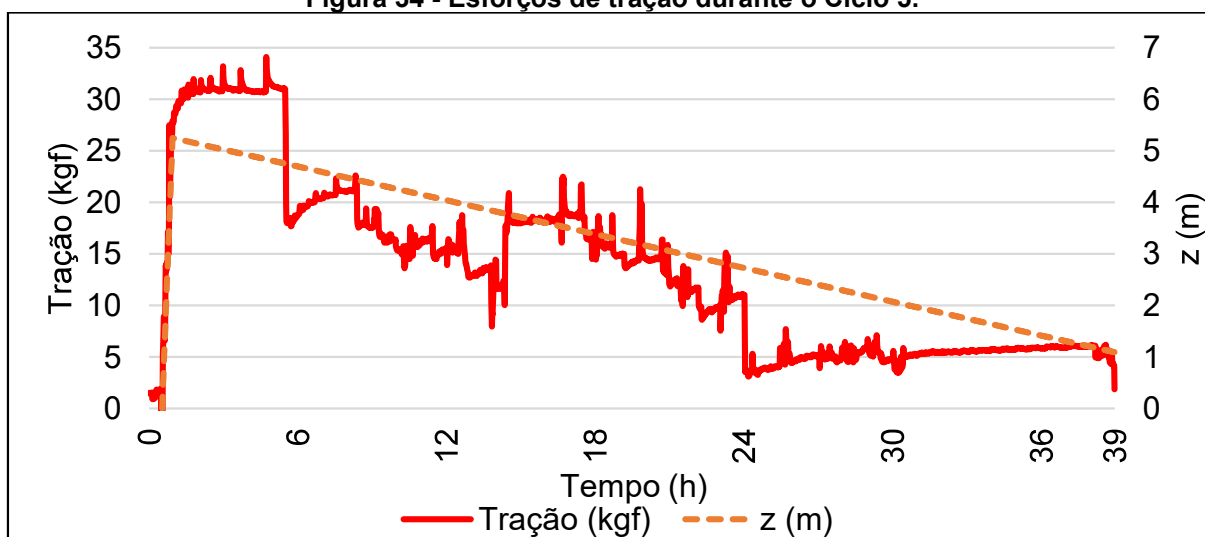
Figura 33 - Esforços de tração durante o Ciclo 4.



Fonte: Autor (2026).

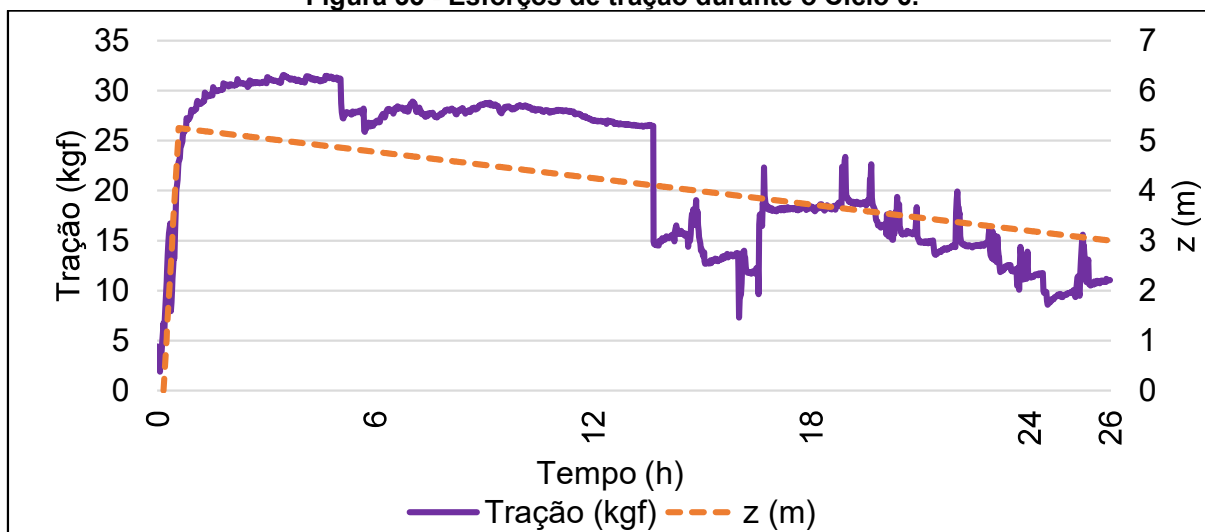
O Ciclo 4 distingue-se dos demais por ter sido iniciado com o silo parcialmente carregado. Nesse ciclo, foram adicionadas aproximadamente 7,5 toneladas de ração sobre as cerca de 7 toneladas de produto remanescente já existentes no interior do silo. Essa condição inicial diferenciada pode explicar o fato de este ciclo ter apresentado o menor valor máximo de tração registrado até o momento, uma vez que a redistribuição dos esforços ocorreu sobre uma massa previamente acomodada, reduzindo os efeitos associados ao carregamento inicial do produto granular.

Figura 34 - Esforços de tração durante o Ciclo 5.



Fonte: Autor (2026).

Figura 35 - Esforços de tração durante o Ciclo 6.



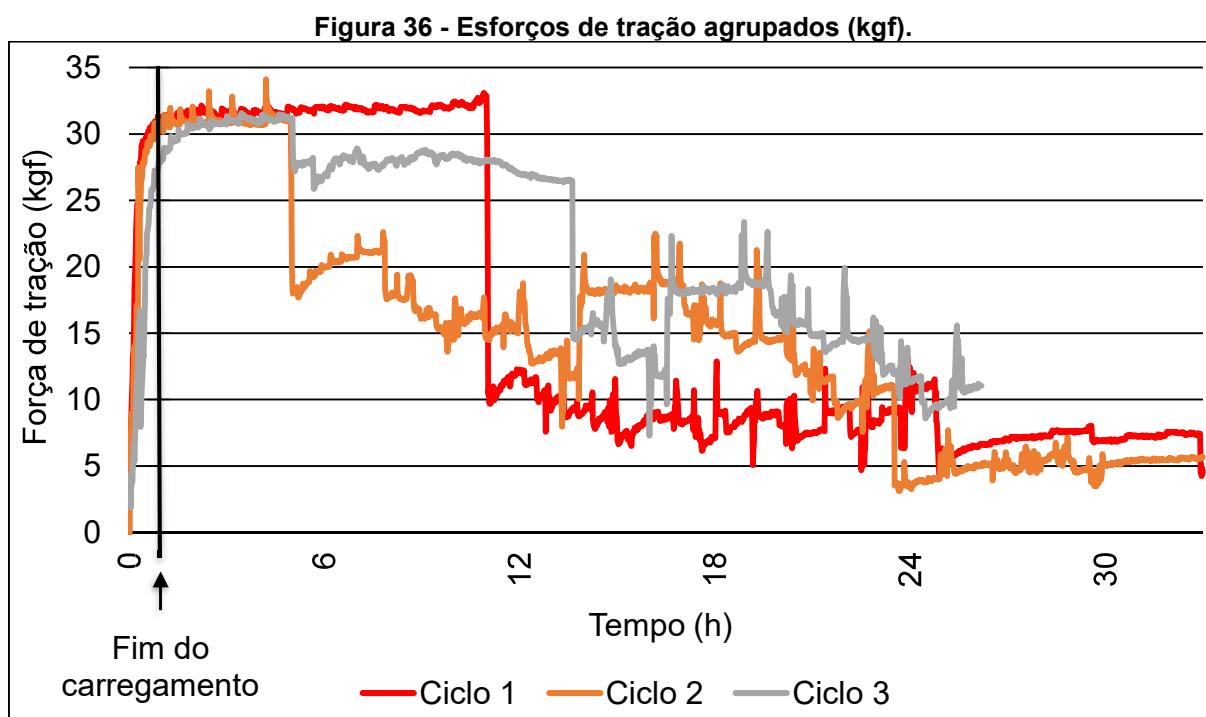
Fonte: Autor (2026).

Os Ciclos 5 e 6 apresentam configurações semelhantes no que se refere ao comportamento dos esforços de tração medidos no cabo. Em ambos casos, mantém-se e o padrão observado nos ciclos anteriores, caracterizado por um aumento acentuado da tração simultaneamente ao processo de carregamento do silo.

De forma análoga ao observado no Ciclo 3, os Ciclos 5 e 6 apresentam, após o término do carregamento, um período de relativa estabilidade dos esforços, acompanhado por um incremento lento e gradual da força de tração. Aproximadamente 6 horas após o início do ciclo, observa-se uma queda brusca nos esforços de tração em ambos os ciclos, sendo essa redução mais pronunciada no Ciclo 5 quando comparada ao Ciclo 6.

No Ciclo 6, além da queda inicial de menor magnitude, verifica-se um novo período de relativa estabilidade dos esforços, seguido por uma segunda redução abrupta da tração, ocorrida pouco após 12 horas de duração do ciclo. Por fim, em ambos ciclos, observa-se a diminuição progressiva dos esforços de tração à medida que ocorre o descarregamento da ração.

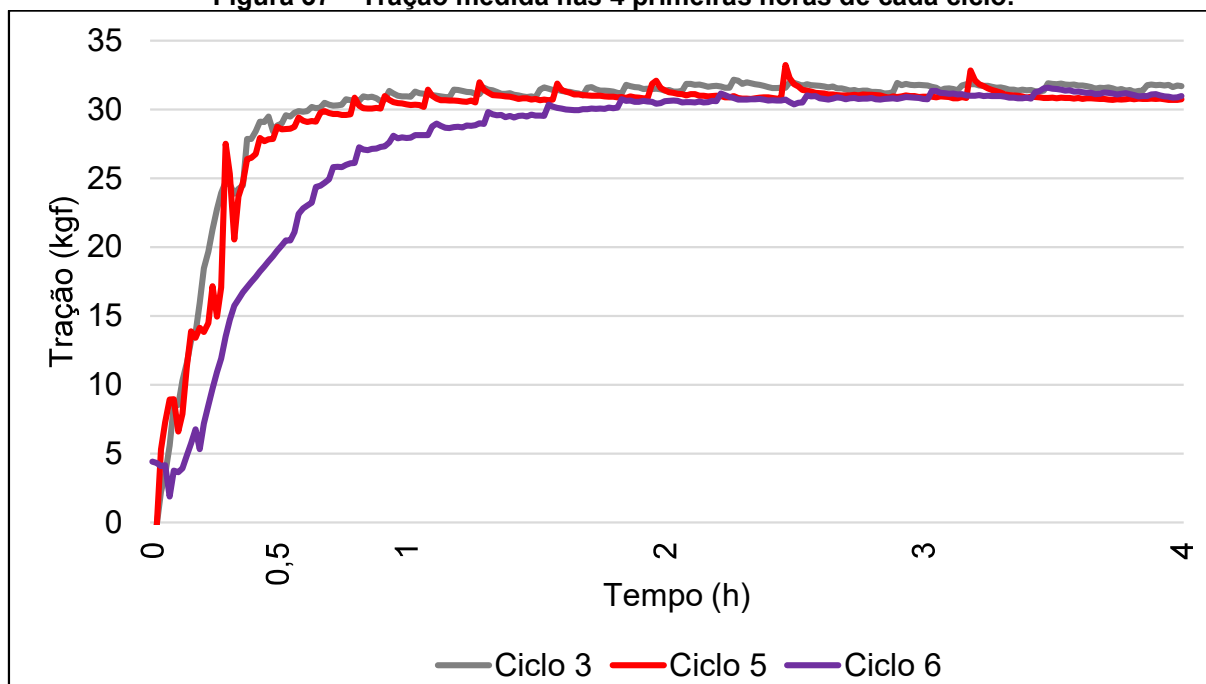
O resumo dos ciclos considerados válidos para a medição dos esforços de tração está apresentado na Figura 36.



6.2.2 Esforço de tração registrado nas primeiras quatro horas de cada ciclo

Schwab *et al.* (1991) observaram, em seu estudo conduzido em silo em escala real, que as cargas verticais atuantes nos cabos aumentam à medida que o tempo de permanência do produto no interior do silo se prolonga, mesmo durante a fase estática. Segundo os autores, esse acréscimo das cargas verticais associadas ao tempo de permanência deixa de ser significativo após aproximadamente três (3) horas, indicando a estabilização dos esforços. No referido estudo, verificou-se que a variação média das cargas verticais, para um tempo de permanência de três (3) horas, foi da ordem de 6,7% em relação à carga inicial. A Figura 37 apresenta a evolução da força de tração medida durante as primeiras quatro (4) horas dos Ciclos 3, 5 e 6, permitindo a comparação do comportamento observado neste estudo com os resultados reportados por Schwab *et al.* (1991). O Ciclo 4 foi omitido, uma vez que não houve carregamento completo do silo.

Figura 37 – Tração medida nas 4 primeiras horas de cada ciclo.



Fonte: Autor (2026).

Para facilitar a análise, os dados apresentados na Figura 37 foram consolidados na Tabela 6 a qual também apresenta uma análise do acréscimo de esforços axiais medidos entre cada fase destacada.

Tabela 6 – Acréscimo de tensão após o carregamento.

	Ciclo 3	Ciclo 5	Ciclo 6
Tração em 25 min (fim do carregamento)	28,41	26,75	17,83
Tração medida em 1 horas	30,94	30,36	27,91
Acréscimo	2,08%	6,35%	46,71%
Tração medida em 2 horas	31,36	31,38	30,60
Acréscimo	1,34%	3,37%	9,64%
Tração medida em 3 horas	31,75	30,92	30,75
Acréscimo	1,25%	-1,48%	0,49%
Tração medida em 4 horas	31,68	30,75	30,96
Acréscimo	- 0,00	- 0,01	0,01

Observação: Os valores em negrito foram os máximos esforços de tração detectados em cada ciclo.

Fonte: Autor (2026).

De modo coerente com os resultados apresentados por Schwab *et al.* (1991), observa-se que os esforços de tração tendem a se estabilizar após aproximadamente 3 horas de permanência do produto no interior do silo. Esse comportamento confirma a tendência de ganho seguido de estabilização dos esforços verticais associada à fase estática do produto armazenado.

6.2.3 Esforços máximos de tração registrados na etapa experimental

Os valores máximos registrados ao longo dos ciclos analisados concentram-se nas primeiras quatro horas de cada ciclo. Nos casos em que ocorreu o carregamento completo do silo e não foram identificadas falhas no sistema de medição, os valores máximos observados foram os seguintes:

- Ciclo 3: 31,75 kgf
- Ciclo 5: 31,38 kgf
- Ciclo 6: 30,96 kgf

O esforço máximo registrado foi de 31,75 kgf, correspondente ao Ciclo 3, enquanto o valor mínimo foi de 30,96 kgf, verificado no Ciclo 6. Considerando os ciclos 3, 5 e 6, obteve-se um valor médio de aproximadamente 31,36 kgf. A diferença absoluta entre os valores extremo máximo e mínimo foi de 0,79 kgf, o que corresponde a uma variação relativa de aproximadamente 2,5% em relação ao valor médio. Observa-se, portanto, elevada consistência dos resultados, com baixa dispersão tanto em termos absolutos quanto relativos, indicando boa repetibilidade das medições.

Destaca-se que todos os valores considerados foram obtidos com o silo totalmente carregado, condição correspondente à altura de cabo soterrado de $z = 5,25$ m, a qual representa a situação mais crítica.

6.3 RESULTADOS DA ETAPA TEÓRICA

Os valores médios dos parâmetros físicos da ração, determinados a partir dos ensaios laboratoriais e adotados nas equações teóricas, estão apresentados na Tabela 7:

Tabela 7 - Parâmetros físicos da ração.

γ (Kg/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ_i (°)	ϕ_r (°)	ϕ_e (°)	ϕ_w (°)	$\phi_{w,c}$ (°)	μ_w	$\mu_{w,c}$
764,79	0,941	37,8	37,7	42	10,5	14,58	0,1812	0,2492

γ -peso específico do grão, c -coesão, ϕ_i -ângulo de atrito interno, ϕ_r -ângulo de repouso, ϕ_e -ângulo efetivo de atrito, ϕ_w -ângulo de atrito do produto com a parede, $\phi_{w,c}$ -ângulo de atrito do produto com o cabo, μ_w -Coeficiente de atrito entre o produto e a parede do corpo do silo, $\mu_{w,c}$ - Coeficiente de atrito entre o produto armazenado e o cabo

Fonte: Autor (2026).

As características geométricas do silo PDB2753 estão apresentados na Tabela 8, onde o raio hidráulico é definido como a razão entre o perímetro e a área da seção transversal do silo.

Tabela 8 - Silo Modelo PDB2753

Diâmetro, D (m)	Raio hidráulico, R (m)	Altura do silo, H (m)	H/D	K
2,75	0,6875	5,127	1,86	0,364

Fonte: Autor (2026).

As características do cabo de termometria adotado na etapa teórica são as mesmas do cabo usado na etapa experimental e estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Características do cabo.

Seção transversal		Área (m ²)	Diâmetro equivalente, d (m)	Comprimento soterrado, z (m)
maior (mm)	menor (mm)	0,0004	0,012	5,25
28	14			

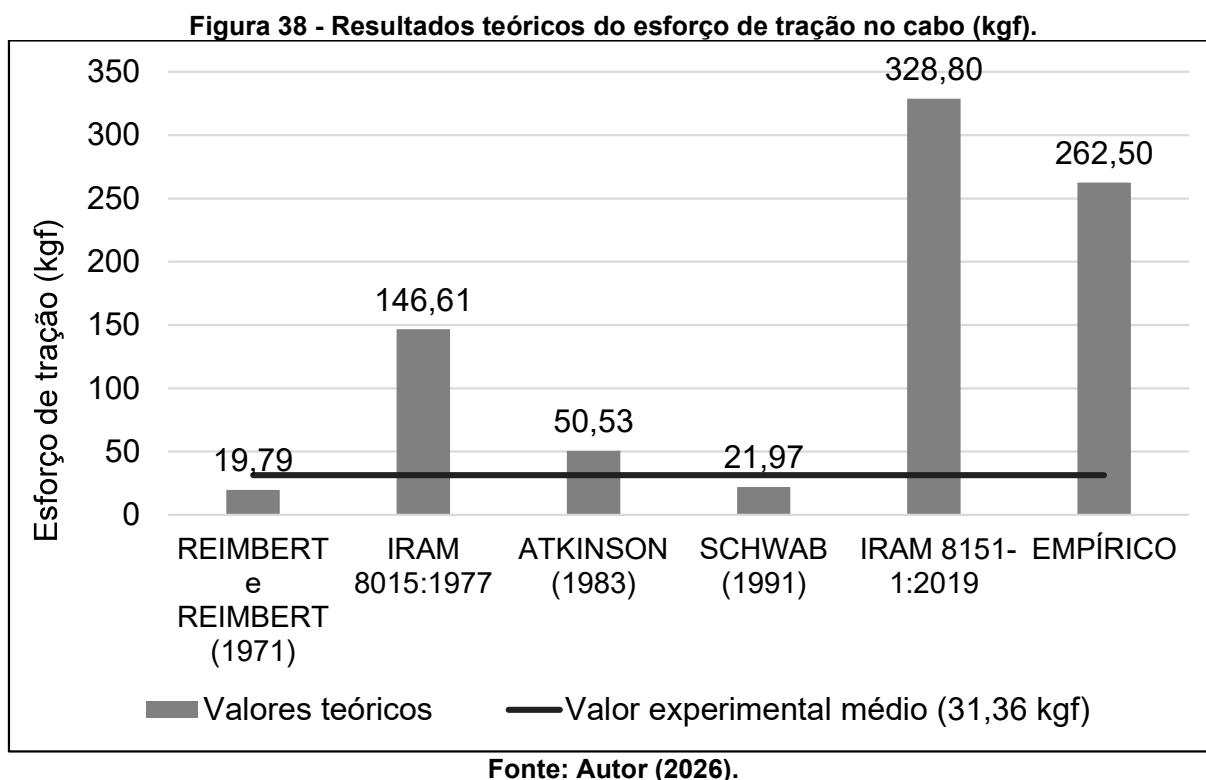
Fonte: Autor (2026).

Com os parâmetros físicos definidos, procede-se à aplicação desses dados nas equações teóricas utilizadas para estimar os esforços gerados na cobertura do silo, decorrentes da tração exercida pelos cabos de termometria, conforme apresentado na Subseção 4.7.5, bem como no método empírico, que considera um esforço de 50 kgf por metro de cabo soterrado na massa de grãos.

Ressalta-se, ainda, que, dentre todas as equações analisadas, apenas a formulação proposta por Schwab *et al.* (1991) incorpora a influência da posição do cabo e da relação altura e diâmetro do silo por meio do fator de multiplicação " F_{tc} ".

O silo PDB2753 apresenta razão altura e diâmetro igual a 1,86, e o cabo foi instalado na região central da estrutura. Portanto, para esse caso, o fator de multiplicação recomendado por Schwab *et al.* (1991) é $F_{tc} = 0,434$.

Os resultados obtidos para cada uma das propostas, considerando o cabo totalmente soterrado, estão reunidos na Figura 38.



6.3.1 Comparação entre resultados teóricos e experimentais

Os resultados teóricos obtidos para a estimativa da tração nos cabos de termometria, a partir das diferentes metodologias analisadas, apresentaram ampla dispersão quando comparados ao valor médio experimental observado nos ciclos analisados, igual a 31,36 kgf. Essa comparação permite avaliar de forma mais objetiva o nível de adequação e o grau de conservadorismo de cada abordagem.

As metodologias de Reimbert e Reimbert (1971) e Schwab *et al.* (1991) forneceram as menores estimativas de tração, com valores de 19,79 kgf e 21,97 kgf, respectivamente. Em relação ao valor médio experimental, esses resultados representam subestimações de aproximadamente 36,9% e 30,0%, indicando que, embora apresentem boa coerência entre si, ambas tendem a fornecer valores inferiores aos esforços efetivamente medidos em campo.

A metodologia proposta por Atkinson (1983) resultou em uma estimativa de 50,53 kgf, valor cerca de 61% superior ao esforço médio observado

experimentalmente. Embora mais conservadora que as abordagens de Reimbert e Reimbert (1971) e Schwab *et al.* (1991), essa metodologia ainda apresenta um afastamento significativo em relação ao comportamento medido, superestimando os esforços de tração.

Por sua vez, a norma IRAM 8015:1977 conduziu a uma estimativa de 146,61 kgf, correspondente a aproximadamente 4,7 vezes o valor médio experimental, ou seja, uma superestimação da ordem de 367%. Esse resultado evidencia um caráter marcadamente conservador, distanciando-se substancialmente dos esforços observados nos ciclos analisados.

As maiores estimativas de tração foram obtidas por meio da IRAM 8151-1:2019 e do modelo empírico, com valores de 328,80 kgf e 262,50 kgf, respectivamente. Em comparação ao valor médio experimental, essas estimativas correspondem a aproximadamente 10,5 vezes e 8,4 vezes o esforço medido, configurando superestimações de cerca de 948% e 737%. Apesar de relativamente próximas entre si, essas abordagens representam o grupo mais conservador entre as metodologias avaliadas.

De forma geral, observa-se que:

- As metodologias de Reimbert e Reimbert (1971) e Schwab *et al.* (1991) são as que mais se aproximam do valor médio experimental, contudo apresentam tendência à subestimação dos esforços, o que é um importante fato a ser considerado para no dimensionamento estrutural;
- A metodologia de Atkinson (1983) ocupa uma posição intermediária, porém com superestimação relevante em relação aos dados experimentais, fato que deve ser levado em conta quando se trata do dimensionamento de estruturas;
- As normas IRAM 8015:1977, IRAM 8151-1:2019 e o modelo empírico apresentam elevado grau de conservadorismo, com estimativas muito superiores aos valores medidos.

6.3.2 Avaliação paramétrica das equações da literatura para a determinação do esforço de tração em cabos

Para uma análise inicial das causas dessas discrepâncias, torna-se essencial identificar os parâmetros físicos e geométricos incorporados na formulação de cada

equação. O Quadro 1 apresenta, de forma comparativa, os principais parâmetros considerados por cada modelo teórico.

Quadro 1 - Parâmetros considerados nas equações avaliadas.

Equação Parâmetro	REIMBERT, M e REIMBERT, A. (1971)	IRAM 8015 (1977)	SCHWAB <i>et al.</i> (1991)	ATKINSON (1983)	IRAM 8151-1 (2019)	Empírico adotado pela indústria
Peso específico (γ)	X	X	X	X		
Ângulo de atrito interno (ϕ_i)	X	X				
Ângulo de atrito efetivo (ϕ_e)			X	X		
Angulo de atrito entre produto e parede (ϕ_w)	X	X	X	X		
Ângulo de atrito entre produto e cabo ($\phi_{w,c}$)	X	X	X	X		
Diâmetro do silo (D)	X	X	X	X		
Profundidade do cabo soterrado (z)	X	X	X	X	X	X
Diâmetro equivalente do cabo (d)	X	X	X	X		

Fonte: Autor (2026).

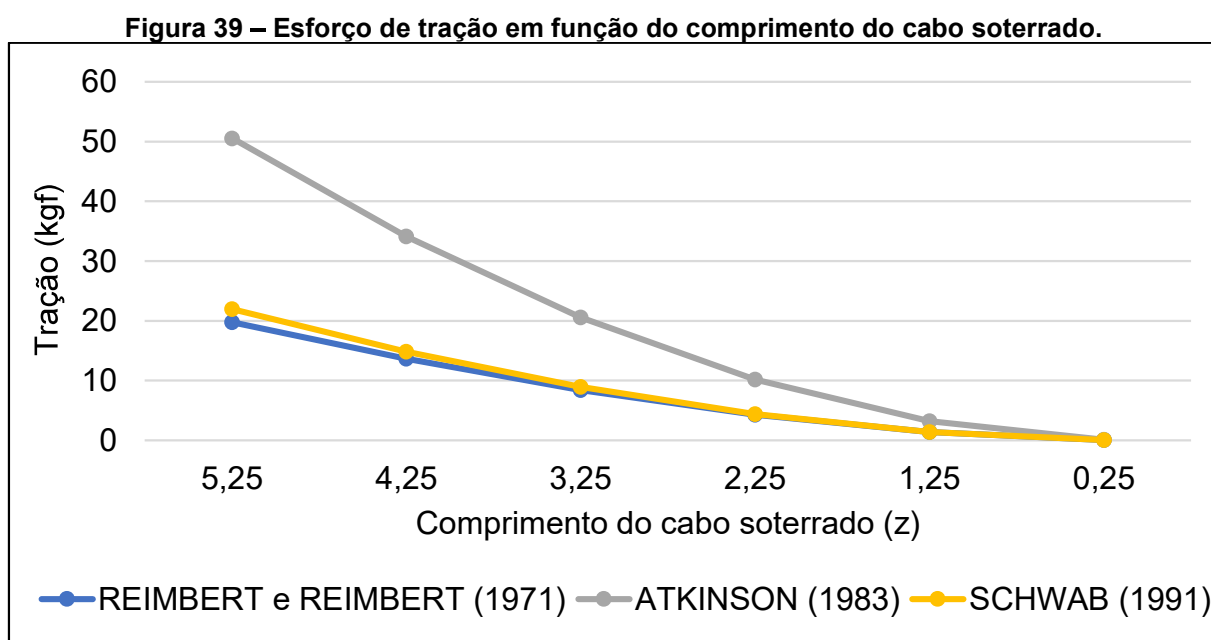
A comparação entre os modelos analisados indica que a maioria das metodologias considera um conjunto semelhante de parâmetros, entre os quais se destacam o peso específico do produto, o ângulo de atrito (interno ou efetivo), a interação do produto com a parede e com o cabo de termometria, diâmetro do silo, a profundidade do trecho de cabo soterrado e o diâmetro do próprio cabo. As principais exceções são a Norma Argentina IRAM 8151-1:2019 e o valor empírico adotado na prática industrial, que levam em conta, exclusivamente, o comprimento do cabo soterrado (z).

Considerando que as metodologias propostas por Reimbert e Reimbert (1971), Schwab *et al.* (1991) e Atkinson (1983) apresentaram as melhores aproximações em relação ao valor médio experimental, será realizada, para cada uma

dessas formulações, uma análise paramétrica com o objetivo de identificar os parâmetros de maior influência na estimativa dos esforços de tração.

6.3.2.1 Influência de comprimento de cabo soterrado (z)

A estimativa dos esforços de tração em função do comprimento de cabo soterrado, mantendo as propriedades do silo, do cabo e dos grãos, pode ser observada na Figura 39.



Fonte: Autor (2026).

A partir da interpretação do gráfico, observa-se que todas as equações analisadas apresentam uma tendência monotônica decrescente dos esforços de tração em função da coordenada vertical z . Para valores reduzidos de z , as magnitudes dos esforços estimados são inferiores, verificando-se um aumento progressivo desses esforços à medida que z se eleva. Tal comportamento indica uma dependência direta dos esforços de tração com a profundidade considerada ao longo do cabo.

Ademais, observa-se que as formulações propostas por Schwab *et al.* (1991) e por Reimbert e Reimbert (1971) apresentam resultados praticamente coincidentes em todo o intervalo analisado de z . Essa sobreposição indica que, apesar serem abordagens distintas, ambas as metodologias apresentam níveis equivalentes de sensibilidade à profundidade do cabo soterrado na massa. Consequentemente, a

proximidade entre as curvas sugere uma redundância prática entre essas formulações para as condições analisadas, reforçando a consistência interna dos modelos e indicando que a escolha entre esses dois métodos tende a não impactar significativamente a estimativa dos esforços de tração no intervalo considerado.

6.3.2.2 Influência das dimensões do cabo de termometria

A Tabela 10 permite analisar a influência das dimensões da seção transversal do cabo de termometria sobre os valores de esforços de tração estimados pelas metodologias de Reimbert e Reimbert (1971), Atkinson (1983) e Schwab *et al.* (1991), sendo que as dimensões das seções transversais dos cabos consideradas foram extraídas do estudo elaborado por Casada *et al.* (2019). De modo geral, observa-se que as três formulações apresentam tendências coerentes e comportamento qualitativamente semelhante frente à variação do tipo de cabo analisado, diferindo principalmente na magnitude absoluta dos valores estimados.

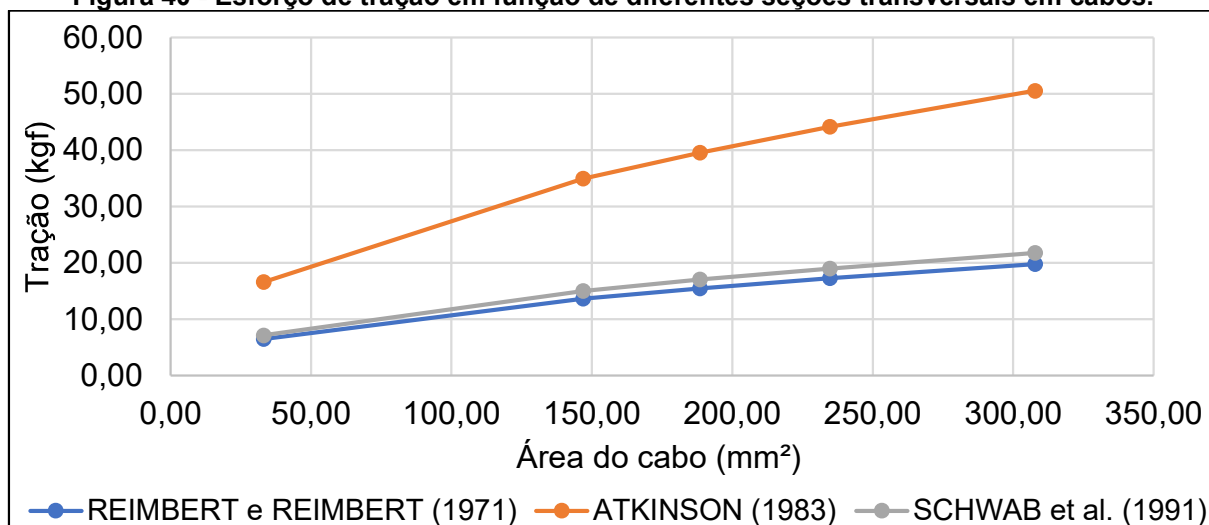
Tabela 10 – Esforço de tração teórica para diferentes seções transversais em cabos.

Seção transversal		Área (mm ²)	Diâmetro equivalente (m)	Esforço de tração (kgf)		
maior (m)	menor (m)			REIMBERT e REIMBERT (1971)	ATKINSON (1983)	SCHWAB <i>et al.</i> (1991)
0,0280 x 0,0140		307,88	0,019799	19,79	50,53	21,76
0,0230 x 0,0130		234,83	0,017292	17,28	44,14	19,01
0,0200 x 0,0120		188,50	0,015492	15,48	39,55	17,03
0,0170 x 0,0110		146,87	0,013675	13,67	34,92	15,03
0,0096 x 0,0044		33,18	0,006499	6,50	16,61	7,14

Fonte: Autor (2026).

Inicialmente, nota-se que o aumento das dimensões da seção transversal, refletido tanto no acréscimo da área quanto do diâmetro equivalente, resulta em um aumento sistemático do esforço de tração previsto por todas as metodologias. Esse comportamento, melhor observado na Figura 40, é fisicamente consistente, uma vez que cabos com maior seção transversal apresentam maior área de contato com o produto armazenado, estando sujeitos a forças de atrito e arraste mais elevadas ao longo de seu comprimento.

Figura 40 - Esforço de tração em função de diferentes seções transversais em cabos.



Fonte: Autor (2026).

A metodologia de Atkinson (1983) fornece, de maneira consistente, os maiores valores de esforço de tração dentre as abordagens avaliadas, variando de aproximadamente 16,6 kgf para a menor seção, até cerca de 50,5 kgf para a maior, uma diferença absoluta de 33,9 kgf. Isso indica um caráter mais conservador, sobretudo para cabos de maior dimensão, nos quais a diferença em relação às demais metodologias se torna mais pronunciada.

Os resultados obtidos pelas metodologias de Schwab *et al.* (1991) e de Reimbert e Reimbert (1971) apresentam valores de tração teórica muito próximos entre si, variando, respectivamente, de aproximadamente 7,1 a 21,8 kgf e de 6,5 a 19,8 kgf, representando diferenças absolutas de 14,7 e 13,3 kgf, respectivamente. Ambas acompanham de forma regular a variação das dimensões da seção transversal do cabo, mantendo uma relação quase proporcional entre o aumento da seção e o acréscimo do esforço de tração. Essa proximidade indica que a adoção de uma ou outra metodologia não resulta em diferenças significativas, em termos absolutos, para o silo analisado, preservando-se a mesma tendência de crescimento dos esforços com o aumento do diâmetro do cabo.

Ao variar as dimensões do cabo, mantendo as demais características, as três metodologias analisadas apresentam curvas de comportamento semelhantes, com variações monotônicas em função da dimensão do cabo, distinguindo-se essencialmente pelo nível de conservadorismo, sendo a formulação de Atkinson

(1983) a mais conservadora, enquanto as de Schwab *et al.* (1991) e Reimbert e Reimbert (1971) mostram-se praticamente coincidentes.

Vale ressaltar que o material constitutivo do cabo influencia a magnitude dos esforços de tração estimados, uma vez que as equações consideram o ângulo de atrito entre o produto armazenado e a superfície do cabo. Entretanto, no presente estudo, esse parâmetro foi determinado apenas para a interação entre a ração e o cabo de polietileno utilizado nos ensaios experimentais.

6.3.2.3 Influência do diâmetro do silo (D)

Mantendo-se constante a altura do silo e considerando o cabo de termometria completamente soterrado, procedeu-se à análise da influência do diâmetro do silo e, conseqüentemente, da relação altura e diâmetro (H/D) na estimativa dos esforços de tração. Os resultados apresentados na Tabela 11 evidenciam que a variação do diâmetro não produz um comportamento uniforme entre as diferentes metodologias analisadas, contrastando com o observado no subitem anterior.

Tabela 11 - Esforço de tração teórico em função do diâmetro.

Altura	Diâmetro	H/D	Reimbert e Reimbert (1971)	Atkinson (1983)	Schwab <i>et al.</i> (1991)
Silos classificados como esbeltos					
5,88	1,50	3,92	29,86	44,49	19,40
5,88	1,75	3,36	27,10	46,27	20,15
5,88	2,00	2,94	24,81	47,68	20,75
5,88	2,25	2,61	22,87	48,81	21,23
5,88	2,50	2,35	21,22	49,75	21,63
5,88	2,75	2,14	19,79	50,53	21,97
5,88	3,00	1,96	18,54	51,20	22,25
5,88	3,25	1,81	17,44	51,78	22,50
5,88	3,50	1,68	16,46	52,28	22,71
5,88	3,75	1,57	15,58	52,72	22,90
Silos classificados como baixos					
5,88	4,00	1,47	14,80	53,11	74,41
5,88	4,25	1,38	14,09	53,45	74,88
5,88	4,50	1,31	13,44	53,76	75,31
5,88	4,75	1,24	12,85	54,04	75,70

Fonte: Autor (2026).

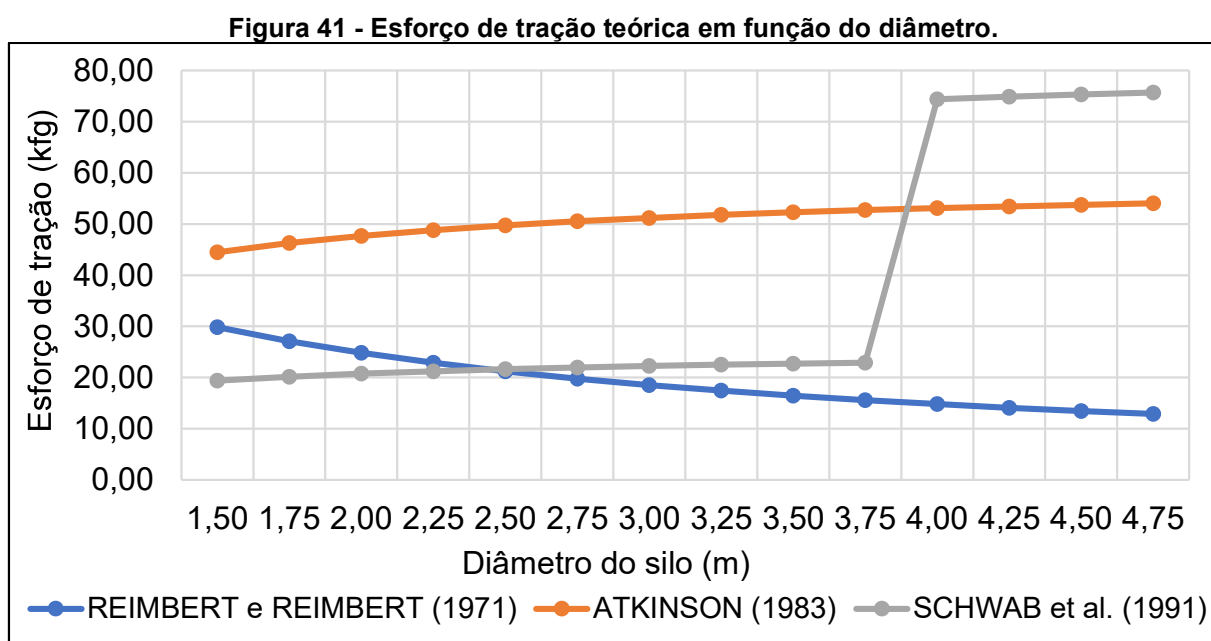
Para a metodologia de Reimbert e Reimbert (1971), observa-se uma tendência clara de redução dos esforços de tração com o aumento do diâmetro do silo (ou redução da relação H/D). O valor máximo ocorre para o menor valor de diâmetro analisado ($D = 1,5$), sendo progressivamente reduzido à medida que o diâmetro aumenta. Em termos absolutos houve uma variação de 17,01 kgf, o que indica elevada sensibilidade desse modelo à geometria do silo.

Em sentido oposto, a metodologia proposta por Atkinson (1983) apresenta um comportamento crescente dos esforços de tração com o aumento do diâmetro do silo. Os valores mínimos estão associados às maiores relações H/D, enquanto os máximos ocorrem para os maiores diâmetros analisados, o que evidencia uma influência inversa da relação H/D quando comparada ao modelo de Reimbert e Reimbert (1971). Em termos absolutos esta variação foi de 9,55 kgf, indicando menor sensibilidade quando comparado ao outro método já citado.

A metodologia proposta por Schwab *et al.* (1991) evidencia uma forte sensibilidade da estimativa dos esforços de tração ao fator F_{tc} , utilizada pelos autores como parâmetro de majoração associado à posição no cabo no interior do silo. Para silos com relação H/D $< 1,5$, verifica-se uma variação abrupta desse fator, passando de 0,43 para 1,40. Com isso, nessa faixa geométrica, a metodologia responde de forma não linear às variações do diâmetro do silo, conforme observa-se na Tabela 11, com destaque para a faixa de relação H/D na qual ocorre a transição da classificação de silos esbeltos para silos baixos. Por outro lado, fora dessa condição específica, observa-se uma tendência global de redução dos esforços estimados à medida que os silos se tornam mais esbeltos, ou seja, com a diminuição do diâmetro em relação à altura.

Cabe destacar que a proximidade observada entre os valores estimados pelas metodologias de Reimbert e Reimbert (1971) e Schwab *et al.* (1991), para o silo analisado, não é extensível a outras geometrias de silo. Conforme indicado pelos resultados da Tabela 11, essa convergência ocorre predominantemente para relações H/D situadas, aproximadamente, entre 2,35 e 2,61, sendo substancialmente alterada fora desse intervalo, especialmente no caso de silos classificados como baixos. Essa constatação é relevante, pois evidencia que a aparente concordância entre os modelos está fortemente condicionada à geometria do silo, influenciando diretamente a interpretação dos resultados discutida no item anterior.

Com o objetivo de facilitar a comparação entre as metodologias e evidenciar as tendências associadas à variação do diâmetro, a Figura 41 apresenta os valores de tração em função do diâmetro do silo, permitindo uma visualização conjunta dos diferentes comportamentos observados e destacando as divergências entre os modelos teóricos.



Fonte: Autor (2026).

6.3.2.4 Síntese dos resultados da análise paramétrica

De modo geral, a análise paramétrica evidenciou que as metodologias avaliadas respondem de forma consistente às variações geométricas e físicas do sistema, embora apresentem diferentes níveis de sensibilidade e conservadorismo. A análise da influência do comprimento de cabo soterrado mostrou que todas as equações apresentam variação unidirecional em relação à coordenada vertical, indicando aumento progressivo dos esforços de tração com a profundidade ao longo do cabo. Nesse contexto, as metodologias de Reimbert e Reimbert (1971) e de Schwab *et al.* (1991) apresentaram resultados praticamente coincidentes, sugerindo sensibilidade equivalente à profundidade do cabo e indicando que, para as condições analisadas, a escolha entre esses modelos não altera significativamente as estimativas.

Quanto às dimensões do cabo de termometria, verificou-se que as três metodologias apresentam tendências semelhantes, com crescimento contínuo dos esforços de tração à medida que se ampliam as dimensões da seção transversal. As diferenças observadas concentram-se, sobretudo, no nível de conservadorismo adotado, destacando-se a metodologia de Atkinson (1983) como a mais conservadora, especialmente para cabos de maior diâmetro. As formulações de Schwab *et al.* (1991) e de Reimbert e Reimbert (1971) por sua vez, mostraram-se novamente muito próximas entre si.

Por fim, a análise da influência do diâmetro do silo revelou comportamentos distintos entre as metodologias. Enquanto o modelo de Reimbert e Reimbert (1971) apresenta elevada sensibilidade à geometria do silo, com redução dos esforços de tração à medida que o diâmetro aumenta, a metodologia de Atkinson (1983) indica tendência oposta, associada a uma menor sensibilidade global às variações geométricas. Já a equação de Schwab *et al.* (1991) mostra-se fortemente influenciada devido pelo fator F_{tc} , resultando em incrementos abruptos dos esforços estimados para silos com baixa relação altura e diâmetro (H/D). Observou-se ainda que a proximidade entre os resultados de Reimbert e Reimbert (1971) e Schwab *et al.* (1991) ocorre apenas em uma faixa específica de esbeltez, não sendo extensível a outras geometrias de silo. Dessa forma, conclui-se que a concordância entre as metodologias depende fortemente da geometria do silo e dos parâmetros considerados na análise.

6.4 INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE DESCARREGAMENTO NOS ESFORÇOS DE TRAÇÃO

Durante a fase de descarregamento, não foram observados valores de esforço de tração superiores àqueles registrados ao final do carregamento. Esse comportamento difere dos resultados reportados na literatura para silos esbeltos, conforme apresentado nos estudos de Schwab *et al.* (1991), Martins (2012) e Casada *et al.* (2019), nos quais são identificados incrementos significativos dos esforços de tração durante a descarga. Ressalta-se, contudo, que nos trabalhos citados o processo de descarregamento foi caracterizado por um fluxo contínuo e ininterrupto

de produto, mantido até o esvaziamento completo do silo, condição que favorece a mobilização global do produto armazenado.

No presente estudo, por outro lado, o descarregamento ocorreu de forma pontual, lenta e intermitente, com duração de poucos minutos em cada evento e remoção de pequenas quantidades de produto por vez. Esse regime operacional limita a formação de um fluxo plenamente desenvolvido no interior do silo, reduzindo a reorganização das tensões no produto armazenado, e consequentemente, restringindo a ocorrência de incrementos adicionais nos esforços de tração atuantes sobre o cabo durante a fase de descarga.

Estudos conduzidos por Martins (2012) em silos de grande escala e em silo piloto com armazenamento de soja e milho, bem como por Casada *et al.* (2019), em silos de grande escala com trigo e milho, indicam que, para silos esbeltos submetidos a descarregamento contínuo, os esforços máximos de tração tendem a ocorrer durante a operação de descarga, com acréscimos próximos de 300%, conforme sintetizado na Tabela 12.

Tabela 12 - Esforços de tração máximas registrados por Martins (2012) e Casada *et al.* (2019).

Autor	Produto	Tipo de Silo	H/D	Carga (kgf)	Descarga (kgf)	Acréscimo
Martins (2012)	Soja	Baixo	1,24	252	258	2%
	Soja	Esbelto	2,17	-	12,3	-
	Soja	Esbelto	4,34	-	21,7	-
	Soja	Esbelto	7,08	8,4	33,3	296,43%
	Milho	Esbelto	2,17	-	12,3	-
	Milho	Esbelto	4,34	-	21,7	-
	Milho	Esbelto	7,08	8,8	34,3	289,77%
Casada <i>et al.</i> (2019)	Trigo	Esbelto	5,33	335	473	41%
	Milho	Esbelto	5,33	282	452	60,28%

Fonte: Autor (2026), adaptado de Martins (2012) e Casada *et al.* (2019).

Em todos os cenários analisados por Martins (2012) para silos classificados como esbeltos, os valores máximos de esforços de tração foram registrados durante a etapa de descarregamento. Observa-se que o único silo classificado como baixo ($H/D = 1,24$) corresponde ao silo de grande escala, no qual o acréscimo dos esforços em relação à etapa de carregamento foi relativamente pequeno, da ordem de 2%.

Esse resultado indica que, mesmo sob descarregamento contínuo, silos com menor esbeltez tendem a apresentar variações mais moderadas nos esforços de tração.

Nos ensaios realizados em silo piloto, caracterizado por relações altura e diâmetro (H/D) mais elevadas, verificou-se um aumento expressivo dos esforços de tração durante a etapa de descarga a medida em que o silo se torna mais esbelto.

Resultados semelhantes foram reportados por Casada *et al.* (2019). Nesse estudo, os esforços de tração também se mostraram mais elevados durante a operação de descarga, com acréscimos na ordem de 41% para o trigo e de 60% para o milho.

Esses resultados indicam que a etapa de descarregamento tende a representar a condição mais crítica para a atuação dos esforços de tração nos cabos de termometria, sobretudo em silos mais esbeltos e sob condições que favorecem a elevada mobilização do fluxo interno do produto armazenado. Embora o presente estudo não tenha contemplado de forma explícita a avaliação de diferentes regimes operacionais de descarregamento, os dados analisados sugerem que o modo de operação exerce influência significativa sobre a magnitude desses esforços. Neste contexto, os resultados experimentais obtidos permanecem válidos e representativos para as condições efetivamente observadas neste trabalho.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar e comparar diferentes metodologias de estimativa dos esforços de tração atuantes em cabos de termometria instalados em silos, por meio da confrontação entre previsões teóricas, dados experimentais e observações em escala real. Essa abordagem permitiu a obtenção de conclusões relevantes tanto do ponto de vista técnico quanto prático, contribuindo para o dimensionamento e a avaliação desses sistemas.

Nesse contexto, os resultados obtidos ampliam a compreensão do comportamento mecânico dos cabos de termometria em silos e fornecem subsídios técnicos para a escolha criteriosa das metodologias de cálculo e para o aprimoramento dos critérios de dimensionamento. As conclusões apresentadas são particularmente aplicáveis a sistemas semelhantes aos analisados neste estudo, que envolvem um silo metálico cilíndrico vertical do modelo PDB2753, com relação altura/diâmetro (H/D) igual a 2,14 (silo esbelto), carregado com ração para aves, produto granular de baixa coesão cujos parâmetros físicos e de atrito foram determinados experimentalmente em laboratório

De modo geral, verificou-se que as equações propostas por Reimbert e Reimbert (1971) e por Schwab *et al.* (1991) foram as que apresentaram maior proximidade em relação aos esforços reais de tração observados. Entretanto, ambas tendem a subestimar os valores medidos, o que representa uma condição desfavorável do ponto de vista do dimensionamento estrutural. Essas metodologias mostraram-se consistentes frente à variação do comprimento de cabo soterrado e das dimensões da seção transversal do cabo, apresentando diferenças mais significativas quando houve variação do diâmetro do silo, refletida na alteração da relação altura e diâmetro (H/D). A equação proposta por Atkinson (1983), por sua vez, apresentou uma aproximação globalmente satisfatória, com tendência à superestimação dos esforços, caracterizando-se como uma abordagem mais conservadora e, portanto, potencialmente mais adequada para fins de dimensionamento estrutural.

Entretanto, estudos como o de Martins (2012) indicam maior concordância entre os resultados experimentais e os esforços previstos pela formulação de Schwab *et al.* (1991), a qual se destaca por constituir, até o momento, uma das abordagens mais abrangentes acerca dos esforços atuantes em cabos de termometria. Nesse

contexto, o presente estudo recomenda a adoção dessa formulação para a estimativa dos esforços de tração, desde que acompanhada de critérios adicionais de segurança, a fim de mitigar a tendência de subestimação observada.

Em contrapartida, as equações normativas IRAM 8015:1977, IRAM 8151-1:2019, bem como a metodologia empírica analisada, resultaram em valores excessivamente elevados de tração, distantes dos esforços efetivamente observados. Esses métodos mostraram-se demasiadamente conservadores para as condições avaliadas neste estudo. Adicionalmente, observou-se que abordagens baseadas unicamente no comprimento do cabo soterrado (z) conduzem a resultados superdimensionados, com estimativas de tração muito superiores às observadas na prática. Esse resultado evidencia que a consideração isolada desse parâmetro não é suficiente para representar adequadamente o comportamento do sistema, sendo necessária a inclusão de outros fatores mecânicos, geométricos e operacionais para uma previsão mais realista dos esforços.

A análise temporal dos dados mostrou que os esforços de tração tendem a se estabilizar nas primeiras quatro horas após o término do carregamento, em concordância com as observações relatadas por Schwab *et al.* (1991). Esse intervalo pode ser interpretado como um período de acomodação do produto armazenado, durante o qual ocorrem rearranjos internos do produto granular, com consequente redistribuição das tensões atuantes sobre o cabo.

De forma geral, os resultados deste trabalho demonstram que a estimativa dos esforços de tração em cabos de termometria é fortemente influenciada pela geometria do silo, pelas propriedades do produto armazenado e pelas condições operacionais, exigindo uma escolha criteriosa das metodologias de cálculo.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Como desdobramento natural deste trabalho, recomenda-se, em estudos futuros, a ampliação do programa experimental por meio da realização de ensaios em silos com diferentes geometrias e escalas, contemplando não apenas silos esbeltos, uma vez que a maior parte dos estudos disponíveis na literatura concentra-se em silos com essa configuração, mas também silos classificados como baixos, ainda pouco

investigados sob a ótica dos esforços de tração em cabos de termometria. Essa ampliação permitiria avaliar de forma mais abrangente a influência da relação altura e diâmetro (H/D) no comportamento mecânico dos cabos e na aplicabilidade das metodologias de cálculo existentes.

Adicionalmente, sugere-se a variação da posição radial do cabo de termometria no interior do silo, de modo a investigar a influência dessa variável na magnitude dos esforços de tração atuantes, considerando diferentes regimes de fluxo do produto armazenado. Recomenda-se também a análise de condições de descarregamento contínuas e controladas, uma vez que estudos anteriores indicam que a etapa de descarga tende a representar a condição mais crítica em termos de solicitação dos cabos de monitoramento.

A incorporação dessas análises poderá proporcionar uma avaliação mais robusta da aplicabilidade das equações teóricas estudadas, contribuindo para o aprimoramento dos critérios de estimativa dos esforços de tração em cabos de termometria empregados em silos metálicos

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 17066:2022 - Silos metálicos de chapas corrugadas. Rio de Janeiro: Sede da ABNT, 2022

ABNT. NBR 6120:2019 – Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

ABNT. NBR 6123:2023 forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023.

AGROLINK; ASSESSORIA. Kepler Weber apresenta silo com capacidade para 35 mil toneladas. Agrolink, 4 dez. 2013. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/noticias/kepler-weber-apresenta-silo-com-capacidade-para-35-mil-toneladas_188210.html. Acesso em: 12 jan. 2025.

AIRY, W. (1897). *The pressure of grain. In: PROCEEDINGS OF INSTITUTION OS CIVIL ENGINEES. CXXXI. Anais. London: Institution of civil engineers.* v. 131.

AL-HASHEMI, Hamzah M. Beakawi; AL-AMOUDI, Omar S. Baghabra. *A review on the angle of repose of granular materials. Powder Technology*, v. 330, p. 397–417, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591018301153>. Acesso em: 31 mar. 2026.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 313-16: *Design of concrete silos and stacking tubes*. Farmington Hills, 2016.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. ANSI/ASAE S433.1:2019 (R2024): *Loads exerted by free-flowing grain on bins*. St. Joseph, 2019. Reaffirmed 2024.

ATKINSON, T.D; BUTCHER, J.C; IZARD, M.J.; NEDDERMAN, R.M. (1983). The forces on obstacles suspended in flowing granular materials. *Chem. Eng. Sci.*

AUSTRALIAN STANDARD (1997). AS 3774: Supplement 1: Loads on bulk containers. Sidney.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Regras para análise de sementes*. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399 p. ISBN 978-85-99851-70-8.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 29, de 8 de junho de 2011. Aprova o Regulamento Técnico do Sistema Nacional de Certificação de Unidades Armazenadoras. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 jun. 2011.

CASADA, M. E.; THOMPSON, S. A.; ARMSTRONG, P. R.; MCNEILL, S. G.; MAGHIRANG, R. G.; MONTROSS, M. D.; TURNER, A. P. Forces on monitoring cables during grain bin filling and emptying. *Applied Engineering in Agriculture*, St. Joseph, v. 35, n. 3, p. 409–415, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/aea.13147>

CALIL JR. JÚNIOR, Carlito e CHEUNG, Andrés Batista. Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. São Carlos: SET/EESC-USP. Acesso em: 16 jan. 2025, 2007

CALIL JR. JUNIOR, C. Determinação das propriedades físicas de materiais granulares e pulverulentos para o projeto estrutural de silos. *Revista Brasileira de Armazenamento*, São Carlos, v. 9-10, n. 1-2, p. 3-6, jun./dez. 1985.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 1055-3:2005: *Actions on structures – Part 3: Loads due to bulk materials*. Berlin, 2005.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 1055-6:2005: *Actions on structures – Part 6: Loads on silos and tanks*. Berlin, 2005.

EFCE WORKING PARTY ON THE MECHANICS OF PARTICULATE SOLIDS; INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS. Standard shear testing technique for particulate solids using the Jenike shear cell. Rugby: Institution of Chemical Engineers, 1989.

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

HEMING, Flávio Luis Bueno. Armazenagem de grãos: armazenamento e conservação. Curitiba: SENAR-PR, 2016. ISBN 978-85-7565-133-9.

HINNING, Davi. Projeto de automação do sistema de rosca varredora em silos de armazenagem de grãos. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Automação Industrial) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha, Campus Panambi, Panambi, 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Capacidade de armazenagem agrícola cresce 4,8% e chega a 201,4 milhões de toneladas no 1º semestre de 2023. Agência de Notícias IBGE. 9 nov. 2023. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/38305-capacidade-de-armazenagem-agricola-cresce-4-8-e-chega-a-201-4-milhoes-de-toneladas-no-1-semester-de-2023>>. Acesso em: 25 jun. 2024

INSTITUTO ARGENTINO DE RACIONALIZACION DE MATERIALES. 8015: Silos aéreos metálicos para almacenamiento de granos: cilindros y desarmables. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1977.

INSTITUTO ARGENTINO DE RACIONALIZACION DE MATERIALES. IRAM 8150-1:2019: Silos aéreos de acero para almacenamiento de granos. Parte 1 - Método de cálculo. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2019.

JANSSEN, H. A. (1895). Versuche Über Gestreindedruck in Silozellen. Zeitschrift. Verein Deutscher Ingenieure. v. 39.

JENIKE, A.W.; JOHANSON, J.R. (1968). Bin loads. Journal of the Structural Division. ASCE. v.95. nº ST4.

JENIKE, A. W. Storage and flow of solids. Salt Lake City: University of Utah, 1964. (Bulletin. Utah Engineering Experiment Station, nº123).

KEPLER WEBER. Apostila Operação e manutenção de equipamentos KW. Panambi, RS: Kepler Weber, 2013.

LEMINSKI, Paulo. Toda poesia. São Paulo: Companhia das Letras, 2013.

LIMA, Willian Felipe; JUNIOR, Marcos Sergio Muzel; BERTIN, Lucas Pereira; LINO, Beatriz Maria Rodrigues. Técnicas de armazenamento e conservação de grãos de trigo. Revista Científica Eletrônica de Ciências Aplicadas da FAIT, v. 9, n. 2, out. 2024. ISSN 1806-6933.

MARTINS, G. C. A. Estudo teórico e experimental de esforços devidos a cabos de termometria fixados em estruturas de coberturas de silos cilíndricos para armazenamento de grãos. 2012. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

PAGE INDÚSTRIA E COMÉRCIO. Silo de fundo plano. Page Indústria, [s.d.]. Disponível em: <https://www.page.ind.br/produtos/12-silo-de-fundo-plano/>. Acesso em: 12 jan. 2025.

REIMBERT, M; REIMBERT, A. (1971). Silos: Théorie et Pratique. 5.ed. Paris: Éditions Eyrolles.

SCHULZE, Dietmar. *Powders and bulk solids: behavior, characterization, storage and flow*. 2. ed. Cham: Springer, 2021.

SCHWAB, C.V.; CURTIS, R. A.; THOMPSON, S.A.; ROSS, I.J. (1991). Vertical loading of temperature cables. Transactions of the ASAE 34(1): 269-274

TRAHAIR, N.S. (1985). Design of Roof Structures. In: Design of steel bins for the storage of bulk solids. University of Sydney. School of civil and mining Engineering. ISBN 0-86758-174-3. Edited by J. M. Rotter. Sydney.

WALKER, D. M. (1966). An Appoximate Theory for Pressures and Arching in Hoppers. Chem. Eng. Sci.. V.21.

WALTERS, J. K. (1973). A theoretical analysis of stresses in silos with vertical walls. Chemical Engineering Science, V. 28, pp. 13 – 21.

WENDT, Marcos Cristian. *Termometria e aeração: guia prático para armazenagem de grãos*. Parambi: [s.n.], 2020. Disponível em: [<https://hotmart.com/pt-br/marketplace/produtos/termometria-e-aeracao-guia-pratico-para-armazenagem-de-graos/K43399219K>]. Acesso em: 30 dez. 2024.