

GISELE CRISTINA ANTUNES MARTINS

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE ESFORÇOS DEVIDOS A
CABOS DE TERMOMETRIA FIXADOS EM ESTRUTURAS DE COBERTURAS DE
SILOS CILÍNDRICOS PARA ARMAZENAMENTO DE GRÃOS**

**Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Mestre em Engenharia
de Estruturas**

Orientador: Prof. Titular Carlito Calil Junior

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

São Carlos

2012

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M386e

Martins, Gisele Cristina Antunes.

Estudo teórico e experimental de esforços devidos a cabos de termometria fixados em estruturas de coberturas de silos cilíndricos para armazenamento de grãos. / Gisele Cristina Antunes Martins ; orientador Carlito Calil Junior. São Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas)-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Silo. 2. Estrutura de Cobertura. 3. Cabos de termometria. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **GISELE CRISTINA ANTUNES MARTINS**.

Título da dissertação: "Estudo teórico e experimental de esforços devidos a cabos de termometria fixados em estruturas de coberturas de silos cilíndricos para armazenamento de grãos".

Data da defesa: 09/03/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Carlito Calil Junior (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APPROVADA

Prof. Titular **Walter Savassi**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APPROVADA

Engenheiro **Ari Antonio Negrisoni**
(Consultoria e Projetos de Engenharia S/C Ltda/ENGESILOS)

APPROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas):

Profa. Associada **Ana Lucia Homce de Cresce El Debs**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

*Aos meus pais, Geraldo e Edna pelo apoio e incentivo
para continuar meus estudos.*

*Aos meus irmãos, Gilson, Poliana, Francisco e Bruna
pela amizade e carinho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me guiar.

À Escola de Engenharia de São Carlos pela acolhida.

À Universidade Federal de Ouro Preto pela formação acadêmica

Ao professor Carlito Calil Junior, pela orientação fornecida durante a elaboração desse trabalho e pela confiança que depositou em mim.

Aos meus pais, Geraldo e Edna pela formação de caráter e por sempre acreditaram na minha capacidade. Obrigada mãe pelas orações, nos momentos mais difíceis você orou por mim e me ajudou a enfrentá-los.

Ao meu irmão Gilson, que sempre foi meu amigo e conselheiro.

A minha querida irmã Poliana, à distância me fez valorizar a sua presença e as nossas conversas. Sinto sua falta todos os dias.

Aos pequenos e queridos irmãos, Francisco e Bruninha, Deus escolheu vocês para abençoarem a nossa família.

“Embora voes alto, não deixes teu ninho sem calor” Jacinto Benavente. A minha grande e carinhosa família que me apoiam em seguir meu caminho, mas sempre esperam o meu retorno ansiosos e com os braços abertos.

As minhas amigas, irmãs, Aninha, Fernandinha, Luana, Janaína, Joana, que nasceram pela fé e sempre me deram um ombro amigo, mesmo a longa distância.

As amigadas que iniciaram na graduação e que irão continuar por toda a vida.

Sem amizade a vida não é nada e a estadia em uma nova cidade não seria nada fácil. Obrigada Aduari, Alessandra, Alexandre, Arnaldo, Danieli, David, Enio, Érica, Fabio, Larissa, Patrícia, Socorro, Vinicius, Wagner. Vocês foram amigos, ouvintes, me apoiaram e ajudaram em momentos de indecisões. Tornaram esse tempo especial.

Aos técnicos do LaMEM, pelo apoio técnico

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado.

À Kepler Weber Industrial S/A, que forneceu informações para análise experimental do silo em grande escala.

À DiSolo Sementes pelo empréstimo dos grãos para a realização dos ensaios.

À NBRTec, pela doação do cabo de termometria.

“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer”

Mahatma Gandhi

RESUMO

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. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

Um dos acidentes comuns em estruturas de armazenamento é o colapso da estrutura de cobertura do silo. Na prática, observa-se que as ruínas estruturais nesse sistema são na maior parte devidas ao desconhecimento das ações nestas estruturas. Devido à escassa informação disponível sobre os esforços de cabos de termometria fixados em estruturas de cobertura de silos cilíndricos verticais, a ênfase desta pesquisa é a análise teórica e experimental da avaliação destes esforços com o objetivo de fornecer subsídios para os projetistas e informações para uma futura normalização no dimensionamento de estruturas de cobertura para silos metálicos cilíndricos. Inicialmente realizou-se uma ampla revisão bibliográfica sobre as ações, esforços e sistemas estruturais e construtivos de cobertura para silos cilíndricos. Com base na análise teórica e experimental realizada dos esforços em cabos de termometria conclui-se que as equações propostas pela norma Argentina IRAM 8 015: 1977 são as mais adequadas para avaliação desses esforços.

Palavras-Chaves: Silo. Estrutura de Cobertura. Cabos de Termometria

ABSTRACT

MARTINS, G.C.A. **Theoretical and experimental study of efforts due to temperature cables fixed to roof structures of cylindrical storage silos for granular products.** 2012. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

One of the common accidents in storage structures is the silo's roof failure. In practice, it is observed that the structural problems in this system are mostly due to the lack of knowledge about the actions in these structures. Due to limited available information on temperature cables loads fixed to roof structure of vertical silos, this work has the aim in the theoretical and experimental analysis of these efforts in two different silos: the pilot-silo in LaMEM - SET - EESC-USP and silo Kepler Weber Industry, in order to provide support for designers and information's for the development of a future Brazilian Standard for the design of roof structures of cylindrical steel silos. Initially was carried out an extensive literature review on the loads, efforts and structural systems for silos roofs. The conclusions obtained from the experimental and theoretical analyzes are that the equations proposed by Argentina Standard IRAM 8015: 1977 is the most suitable for the evaluation of these loads.

Keywords: Silo. Roof Structure. Temperature Cables

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Principais tipos de fluxo. Fonte: CHEUNG (2007)	6
Figura 1.2: Determinação gráfica do tipo de fluxo. Fonte: Adaptado de ISO 11697:1995	7
Figura 2.1 - Sistemas estruturais para coberturas de silos. Fonte: Traduzido de TRAHAIR (1985b).	12
Figura 2.2 - Peças componentes dos telhados. Fonte: Esteves Junior (1989)	14
Figura 2.3: Silo com anéis enrijecedores.....	16
Figura 2.4 - Deformação devida ao vento em topo sem restrição. Fonte: ANSOURIAN (1992)	17
Figura 2.5 - Deformação devida ao vento em silos com cobertura. Fonte: ANSOURIAN (1992)	17
Figura 2.6 - Distribuição circunferencial de carga de vento em parede cilíndrica (Fonte: BRIASSOULIS & PECKNOLD, 1986).....	18
Figura 2.7 - Distribuição de carga de vento em cobertura cônica	19
Figura 2.8: Sistema de ensaio. Fonte: ATKINSON et al. (1983).....	22
Figura 2.9: Equilíbrio de forças. Fonte: ATKINSON et al. (1983).....	22
Figura 2.10 - Posição dos cabos no silo. Fonte: Schwa et al. (1991)	25
Figura 3.1: Representação espacial do critério de ruptura de Drucker-Prager.....	28
Figura 3.2: (a) Embalagem original (b) Amostras de soja	31
Figura 3.3: Amostras de milho	32
Figura 3.4: Aparelho medidor de Umidade Digital	32
Figura 3.5: Ensaio com amostra de soja.....	32
Figura 3.6: Equipamento utilizado para a determinação das propriedades físicas.....	33
Figura 3.7: Dados armazenados por software desenvolvido no LaMEM	33
Figura 3.8: Ensaio de cisalhamento direto	34
Figura 3.9: Tipos de paredes utilizadas nos ensaios.....	34
Figura 3.10 (a) e (b): Ensaio de determinação de ângulo de repouso	34
Figura 3.11 - Edifício de madeira construído para abrigar o silo-piloto (LaMEM).....	35
Figura 3.12 - Visão geral do silo de armazenamento	35
Figura 3.13 - Sistema de ensaio.....	36
Figura 3.14 - Visão geral silo de armazenamento e silo-piloto.....	36
Figura 3.15: Célula de carga fixada ao cabo de termometria	37
Figura 3.16: Controle do nível utilizado nos ensaios. Fonte: CHEUNG, 2007	37
Figura 3.17 - Detalhe do sistema de operação dos ensaios. Fonte: CHEUNG, 2007.....	38
Figura 3.18 – Sistema de Aquisição Kyowa.....	39
Figura 3.19 – Tubo interno com os 4 extensômetros	39
Figura 3.20 - Circuito em ponte completa Wheastone	39
Figura 3.21 - Cabos condutores e sua codificação por cores. Fonte: Manual de Instrução KYOWA (1967)	39
Figura 3.22: Desenho representativo da célula de carga. Fonte: Manual de Instrução KYOWA (1967)	40
Figura 3.23: Carregamento aplicado pela máquina universal	41

Figura 3.24: Silo fundo plano KW. Fonte: Grupo Kepler Weber (2010)	41
Figura 3.25 - Suporte do cabo fixado na longarina do telhado. Fonte: Grupo Kepler Weber (2009)	42
Figura 3.26 - Célula de carga adaptada para o suporte do cabo. Fonte: Grupo Kepler Weber (2009)	42
Figura 3.27 - Posicionamento dos cabos de termometria na cobertura. Fonte: Grupo Kepler Weber (2009)	43
Figura 3.28 - Posicionamento dos cabos no silo. Fonte: Grupo Kepler Weber (2009)	43
Figura 3.29 (a) e (b): Vinculação do cabo de termometria e a base do silo. Fonte: Grupo Kepler Weber (2011)	43
Figura 3.31 - Detalhes do cabo pêndulo	44
Figura 3.32 - Cabo de Termometria e seu elemento de fixação Fonte: Empresa NBRTec (2010)	44
Figura 4.1: Determinação do ângulo de repouso	46
Figura 4.2: Programa de cálculo das propriedades físicas	47
Figura 4.3: Programa de cálculo do ângulo de atrito	48
Figura 4.4: Classificação do tipo de fluxo	49
Figura 4.5: Esforços de tração durante o descarregamento da soja para H/D de 3 anéis	50
Figura 4.6: Esforços de tração durante o descarregamento da soja para H/D de 6 anéis	50
Figura 4.7: Esforços de tração durante o descarregamento da soja para H/D de 10 anéis	50
Figura 4.8: Esforços de tração durante o descarregamento do milho para H/D de 3 anéis	51
Figura 4.9: Esforços de tração durante o descarregamento do milho para H/D de 6 anéis	51
Figura 4.10: Esforços de tração durante o descarregamento do milho para H/D de 10 anéis	51
Figura 4.11: Influência da relação H/D para o silo-piloto carregado de soja	52
Figura 4.12: Influência da relação H/D para o silo-piloto carregado de milho	52
Figura 4.13 - Posição dos cabos de termometria no silo modelo 4815. Fonte: Grupo Kepler Weber (2009)	53
Figura 4.14: Esforços de tração durante a operação de carregamento de soja no silo do Grupo Kepler Weber	53
Figura 4.15: Esforços de tração durante a operação de descarregamento de soja no silo do Grupo Kepler Weber	54
Figura 4.16: Esforços de tração de acordo com as quatro teorias propostas com variação na profundidade dos grãos e do diâmetro	61
Figura 4.17: Esforços de tração de acordo com as quatro teorias proposta com diâmetro constante	62
Figura 4.18: Esforços de tração de acordo com as quatro teorias proposta com altura constante	62
Figura 4.19: Análise comparativa do esforço de tração do cabo no centro do silo do Grupo Kepler Weber	64
Figura 4.20: Equilíbrio de forças. Fonte ATKINSON et al. (1983)	65
Figura 4.21: Pressão horizontal obtida via análise numérica	65
Figura 4.22: Pressões horizontais de carregamento fundo plano	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Classificação dos silos quanto à esbeltez	5
Tabela 2.1 - Coeficientes de pressão C_p para silos (Fonte: Traduzido de GAYLORD e GAYLORD, 1984)	19
Tabela 2.2 - Coeficientes de pressão C_p para elementos individuais. Fonte: Traduzido de GAYLORD e GAYLORD (1984).....	19
Tabela 2.3: Descrição das dimensões e materiais dos cabos. Fonte: Traduzido de SCHWAB et al. (1991).....	24
Tabela 3.1: Propriedades físicas dos produtos utilizados na simulação numérica	28
Tabela 3.2: Propriedades físicas do aço da parede utilizado na simulação numérica	29
Tabela 3.3 - Dimensões das células de carga da série LT-C. Fonte: Manual de Instrução KYOWA (1967)	40
Tabela 3.4: Cargas de aferição e deformações correspondentes	40
Tabela 4.1: Resultados dos ensaios de umidade para a Soja	45
Tabela 4.2: Resultados dos ensaios de umidade para o Milho	45
Tabela 4.3: Ângulo de repouso da Soja.....	46
Tabela 4.4: Ângulo de repouso do Milho	46
Tabela 4.5: Propriedades Físicas da Soja	48
Tabela 4.6: Propriedades Físicas do Milho	48
Tabela 4.7: Ângulo de atrito da soja com três tipos de parede.....	49
Tabela 4.8: Ângulo de atrito do milho com três tipos de parede.....	49
Tabela 4.9: Valores máximos dos esforços de tração nos cabos de termometria.....	54
Tabela 4.10: Valores de propriedades físicas utilizadas em análise teórica.....	55
Tabela 4.11: Dimensões do silo - piloto com tremonha	56
Tabela 4.12: Relação altura/ diâmetro do silo-piloto	56
Tabela 4.13: Dimensões do cabo de termometria.....	56
Tabela 4.14: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo REIMBERT e REIMBERT (1971)	56
Tabela 4.15: Esforços de tração nos cabos de termometria ATKINSON (1983).....	57
Tabela 4.16: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo a norma IRAM 8 015: 1977	57
Tabela 4.17: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo SCHWAB et al. (1991).58	58
Tabela 4.18: Dimensões do silo fundo plano, modelo 4815	58
Tabela 4.19: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo REIMBERT e REIMBERT (1971)	59
Tabela 4.20: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo ATKINSON (1983)	59
Tabela 4.21: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo a norma IRAM 8 015: 1977	59
Tabela 4.22: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo SCHWAB et al. (1991).60	60
Tabela 4.23: Esforços de tração em silos do Grupo Kepler Weber variando altura e diâmetro	60

Tabela 4.24: Esforços de tração em silos do Grupo Kepler Weber variando altura e diâmetro constante.....	61
Tabela 4.25: Esforços de tração em silos do Grupo Kepler Weber variando diâmetro e altura constante.....	62
Tabela 4.26: Comparação dos esforços de tração experimental e teórico no silo – piloto em kN para a Soja	63
Tabela 4.27: Comparação dos esforços de tração experimental e teórico no silo – piloto em kN para o Milho	63
Tabela 4.28: Comparação dos esforços de tração experimental e teórico no silo, em kN.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
AS	Australian Standard
ASTM	American Society for Testing and Materials
DIN	Deutsches Institut für Normung
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EN	European Committee of Standardization
ISO	International Organization for Standardization
LaMEM	Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira
SET	Departamento de Engenharia de Estruturas
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas minúsculas

a	área do cabo
c	Coesão
d	Diâmetro do cabo
p_h	Pressão horizontal
t	Espessura da chapa do silo metálico ou tempo
x	Eixo cartesiano x
y	Eixo cartesiano y
z	Eixo cartesiano z, altura de referência para o cálculo das pressões, comprimento submerso do cabo em grãos
q	Pressão dinâmica
q_r	Velocidade do vento na cobertura

Letras romanas maiúsculas

A	Área, comprimento característico
C_{pe}	Coefficiente de pressão externo
C_{pi}	Coefficiente de pressão interno
C_a	Coefficientes de arrasto
C_s	Coefficientes de sustentação
D	Diâmetro do silo
D_{tc}	Diâmetro equivalente do cabo
K	Relação entre a pressão horizontal e vertical
E	Módulo de Elasticidades
FF	Função Fluxo instantânea
F_{tc}	Fator de multiplicação
F_E	Carga dos equipamentos de carregamento

F_G	Peso próprio da cobertura
F_Q	Sobrecarga na cobertura
F_w	Pressão do vento
H	Altura do corpo do silo
H_t	Altura da tremonha
R	Raio hidráulico
S_1	Fator que considera a topografia
S_2	Fator que considera a rugosidade do terreno e a altura (onde atua o vento)
S_3	Fator estatístico que considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação
T	Esforço de tração
V	Velocidade dez metros acima do solo em campo aberto
V_k	Velocidade característica do vento, em m/s
V_0	Velocidade básica do vento, em m/s

Letras gregas minúsculas

α	Ângulo da tremonha com o eixo vertical
γ	Peso específico
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
ϕ_r	Ângulo de repouso do produto
ϕ_i	Ângulo de atrito interno
ϕ_e	Ângulo de atrito interno efetivo
μ_w	Coefficiente de atrito entre o produto e a parede do corpo do silo
$\mu_{w,c}$	Coefficiente de atrito entre o produto e o cabo de termometria
μ_e	Coefficiente de atrito interno do produto
ν	Coefficiente de Poisson
Δp	Diferença de pressão nas faces opostas
ΔC_p	Coefficiente de pressão total

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
1 INTRODUÇÃO	3
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	3
1.2 TIPOS DE SILOS	4
1.3 TIPOS DE FLUXOS	5
1.4 ESTUDOS REALIZADOS NA ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS (USP)	7
1.5 JUSTIFICATIVA	10
1.6 OBJETIVO	11
1.7 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 COBERTURAS	12
2.1.1 Sistemas estruturais e construtivos.....	12
2.2 AÇÕES A CONSIDERAR.....	13
2.2.1 Peso próprio da cobertura (F_G)	13
2.2.2 Sobrecarga na cobertura (F_Q)	14
2.2.3 Carga dos equipamentos de carregamento (F_E).....	15
2.2.4 Pressão do vento (F_W).....	15
2.2.5 Cabos de termometria (F_C)	20
2.2.6 Combinação de ações	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 ANÁLISE TEÓRICA	27
3.2 ANÁLISE NUMÉRICA	27
3.2.1 Modelos e parâmetros numéricos	27
3.2.2 Simulação do contato produto – parede	29
3.3 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	30

3.3.1	Metodologia experimental	30
3.3.2	Origem dos produtos ensaiados	31
3.3.3	Amostragem dos produtos	31
3.3.4	Ensaio de umidade	32
3.3.5	Ensaio de cisalhamento direto de Jenike.....	32
3.3.6	Ensaio de cisalhamento com a parede.....	33
3.3.7	Ângulo de repouso	34
3.3.8	Ensaio no silo-piloto	35
3.3.9	Ensaio no silo KW.....	41
3.3.10	Cabos de Termometria	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	ANÁLISE EXPERIMENTAL	45
4.1.1	RESULTADOS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS	45
4.1.2	RESULTADOS DOS ESFORÇOS DE TRAÇÃO NO CABO DE TERMOMETRIA SUSPENSO NO SILO - PILOTO	49
4.1.3	RESULTADOS DOS ESFORÇOS DE TRAÇÃO NOS CABOS DE TERMOMETRIA SUSPENSOS NO SILO DO GRUPO KEPLER WEBER.....	53
4.2	ANÁLISE TEÓRICA.....	55
4.2.1	Silo-Piloto	55
4.2.2	Silo Grupo Kepler Weber	58
4.3	ANÁLISE EXPERIMENTAL X TEÓRICA.....	63
4.3.1	Silo Piloto.....	63
4.3.2	Silo Grupo Kepler Weber, modelo 4815	64
4.4	ANÁLISE NUMÉRICA.....	65
4.5	ANÁLISE EXPERIMENTAL X NUMÉRICA.....	66
5	CONCLUSÕES	67
5.1	Silo - Piloto.....	67
5.2	Silo Grupo Kepler Weber.....	67
5.3	Proposta de cálculo dos esforços de tração devido aos cabos de termometria.....	68
5.4	Análise Numérica	69
	REFERÊNCIAS	70
	ANEXO A - Detalhes construtivos da cobertura	77

1

CAPÍTULO

Introdução

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os silos são estruturas muito usadas ao longo da história de armazenamento de todo tipo de produtos agrícolas e industriais. A partir do século XIX houve um aumento no número de silos existentes e um aumento em suas dimensões e, como consequência, cresceu o número de acidentes resultando no aprofundamento dos estudos sobre o comportamento estrutural para reduzir perdas econômicas e humanas.

Na teoria de Coulomb publicada em 1776 foi considerada a existência de atrito entre o produto e a parede de contenção, admitindo que o maciço está em um estado ativo. RANKINE publicou em 1857 uma teoria em que analisa o estado de tensão em um maciço granular, fofo, não coesivo e semi-infinito. Os estudos de JANSSEN (1895) resultaram na dedução de uma equação para cálculo das pressões nas paredes dos silos, sendo que atualmente sua teoria ainda é recomendada para condições estáticas. Em 1897, AIRY desenvolveu uma teoria para cálculo da força horizontal nas paredes, aplicando no cálculo de silos de madeira, aço e concreto armado. A teoria de WALKER (1966) fornece as tensões na massa de um produto granular ou pulverulento em tremonhas e ainda os fatores críticos que asseguram a continuidade do fluxo gravitacional. As pesquisas desenvolvidas por JENIKE e JOHANSON (1968) contribuíram para melhorar o conhecimento sobre o movimento do produto no interior dos silos. WALTERS (1973) aprofundou os estudos de WALKER (1966) analisando as tensões desenvolvidas durante o carregamento e aquelas durante a descarga nas paredes verticais dos silos.

Para projetar um silo com segurança, economia e eficiência, é necessário que o projetista conheça as máximas pressões exercidas pelo produto armazenado durante sua vida operacional tanto na parede, como em outras partes do silo, como a tremonha e cobertura. O atrito da massa granular com os cabos de termometria suspensos em coberturas de silos

provoca esforços de tração nos cabos, que segundo WICKSTROM (1980) causam falhas localizadas em alguns componentes da estrutura de cobertura. As ruínas em coberturas podem ser catastróficas, portanto as ligações dos elementos estruturais da viga exigem atenção especial (TRAHAIR, 1985a). Os irmãos REIMBERT em 1971, ATKINSON et al. em 1983, THOMPSON em 1987 e SCHWAB et al. em 1991 realizaram estudos sobre a determinação da força nesses cabos na cobertura. A única norma que fez referência ao cálculo desse esforço foi a norma Argentina IRAM 8 015: 1977, entretanto deixou de vigorar em 1997.

1.2 TIPOS DE SILOS

Os silos podem ser construídos de concreto armado, concreto protendido, chapas metálicas (lisas, corrugadas e trapezoidais), madeira, alvenaria, argamassa armada, fibras, plásticos, entre outros.

De acordo com a ABNT NBR 11162 TB-374: 1990, a classificação dos silos quanto à forma e posição do fundo é:

- Silo de fundo plano: estrutura cujo fechamento inferior é constituído por superfície plana;
- Silo de fundo não plano: estrutura cujo fechamento inferior é constituído por superfície não plana;
- Silo de fundo elevado: estrutura cujo fundo encontra-se em plano superior ao nível do solo;
- Silo de fundo enterrado: estrutura cujo fundo encontra-se abaixo do nível do solo;
- Silo de fundo semi-enterrado: estrutura cujo fundo encontra-se parcialmente abaixo do nível do solo.

PALMA (2005) classifica segundo a relação entre a altura efetiva (H) e o maior diâmetro inscrito (D):

- Silos baixos: são aqueles que possuem uma relação entre a altura do corpo e o diâmetro (H/D) menor que 1,5;
- Silos esbeltos: são aqueles que possuem uma relação entre a altura do corpo e o diâmetro (H/D) maior ou igual a 1,5.

Quanto à orientação do eixo pode ser classificado em:

- Silos horizontais: são aqueles cuja dimensão longitudinal é preponderante sobre as outras dimensões. A ABNT NBR 11162 TB-374: 1990 define como uma estrutura que se desenvolve segundo o eixo horizontal;

- Silos verticais: definido pela ABNT NBR 11162 TB-374: 1990 como estrutura que se desenvolve segundo eixo vertical.

Quanto à entrada de ar os silos são classificados, de acordo com CALIL e CHEUNG (2007) em:

- Silos herméticos: silos que possuem um impedimento para a troca de ar do interior da célula com o exterior;
- Silos não herméticos: silos que permitem a troca de ar com o exterior.

A Tabela 1.1 apresenta algumas classificações de silos quanto à esbeltez. Sendo H representando a altura total do silo com a tremonha, D o diâmetro do corpo do silo e ϕ_e o ângulo de atrito efetivo.

Tabela 1.1: Classificação dos silos quanto à esbeltez

NORMA	CLASSIFICAÇÃO		
	Baixo	Medianamente Esbelto	Esbeltos
Australiana AS3774:1996	$H/D < 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 3,0$	$H/D > 3,0$
Europeias PrEN 1991-4:2003 (Draft) DIN 1055-06:2005	$0,4 \leq H/D \leq 1,0$	$1,0 \leq H/D \leq 2,0$	$H/D > 2,0$
Americanas ACI-313:1991 ANSI/ASAE EP433:2001	$H/D < 2,0$	-	$H/D > 2,0$
Canadense CFBC: 1983	$H/D \leq 1,0$ ou $H/D < \tan^2(\phi_e/2 + \pi/4)$	-	$H/D > 1,0$ e $H/D \geq \tan^2(\phi_e/2 + \pi/4)$

Fonte: CALIL e CHEUNG (2007)

1.3 TIPOS DE FLUXOS

A determinação do tipo de fluxo deve ser feita enquanto o silo está sendo projetado ou selecionado, ou quando são previstas mudanças em sua estrutura ou na manipulação dos produtos a serem armazenados. De acordo com CALIL (1990), o tipo de fluxo caracteriza o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. Segundo a norma ISO

11697:1995 para avaliação do fluxo de material é necessário distinguir entre os principais padrões de fluxo.

Fluxo de massa: Um perfil de fluxo em que todas as partículas estocadas estão em movimento durante a operação de descarregamento. Segundo CALIL e CHEUNG (2007) é o ideal e deve ser utilizado sempre que possível.

Fluxo de funil: Um perfil de fluxo em que forma-se um canal de fluxo dentro de uma zona confinada, alinhado com a boca de descarga na qual o material adjacente à parede permanece estático.

Diferentes distribuições de pressão são associadas com cada um dos fluxos acima mencionados, Figura 1.1. A condição necessária para o fluxo de massa depende da inclinação da parede da tremonha e o coeficiente de atrito da parede. (ISO 11697:1995).

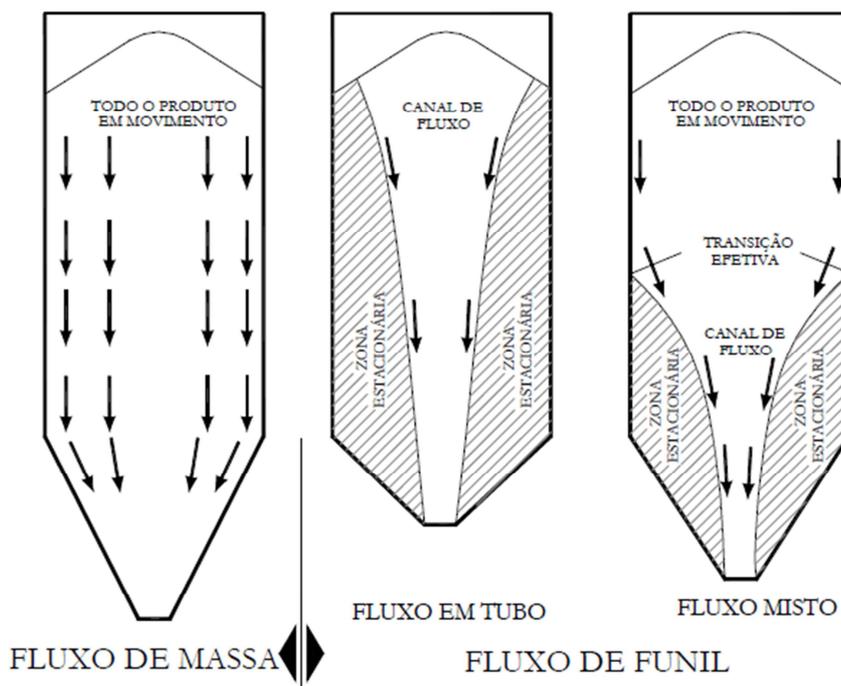


Figura 1.1: Principais tipos de fluxo. Fonte: CHEUNG (2007)

O tipo de fluxo pode ser estimado usando a Figura 1.2 para tremonhas cônicas e axissimétricas. A região de transição mostrada na figura representa condições em que o tipo de fluxo pode mudar abruptamente entre fluxo de massa e fluxo de funil. Se tais condições não puderem ser evitadas o silo deve ser projetado para fluxo de massa e de funil, segundo a ISO 11697:1995.

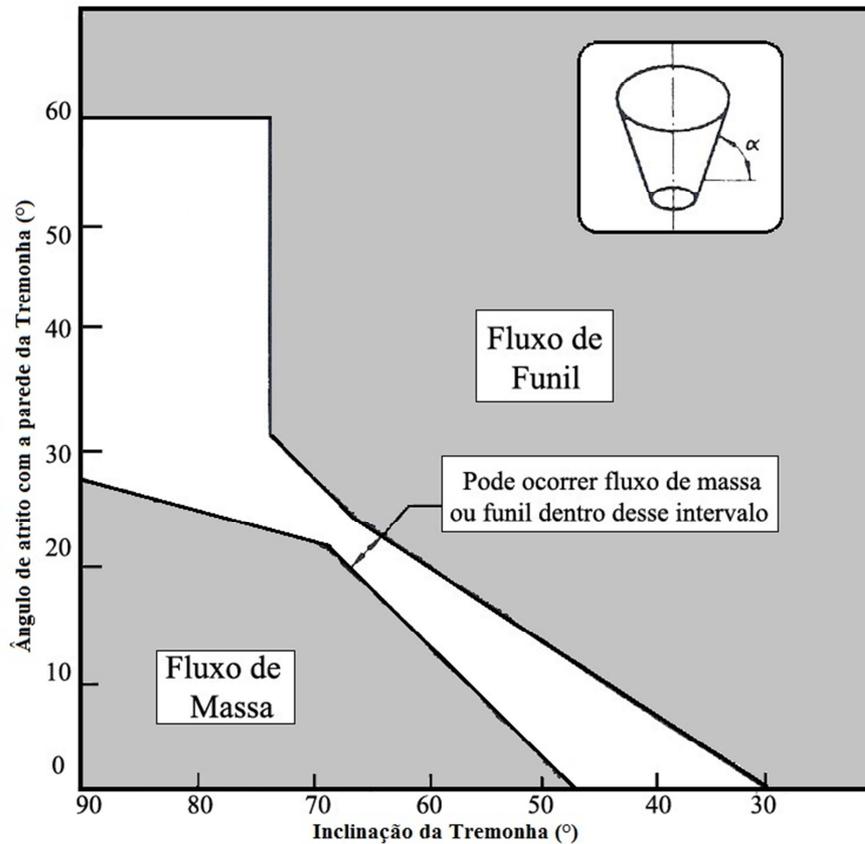


Figura 1.2: Determinação gráfica do tipo de fluxo. Fonte: Adaptado de ISO 11697:1995

1.4 ESTUDOS REALIZADOS NA ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS (USP)

No Brasil, o Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP), possui uma linha de pesquisa com o intuito de aprimorar o conhecimento, comprovar as teorias existentes e desenvolver tecnologia própria na área de silos. Até o momento, foram desenvolvidos os seguintes trabalhos de Mestrado, Doutorado e Livre Docência:

CALIL (1978), em sua dissertação de Mestrado “Estudo dos Silos de Madeira a Nível de Fazendas”, propõe como alternativa para o pequeno produtor a construção de tais estruturas nas propriedades agrícolas, utilizando madeira tanto como material estrutural quanto de revestimento.

CALIL (1982), em sua tese de Doutorado “Sobrepresiones en las Paredes de los Silos para Almacenamiento de Productos Pulverulentos Cohesivos”, realiza estudos em modelos reduzidos, determinando os tipos de fluxo de produtos armazenados, a intensidade das pressões de carregamento e descarga para produtos granulares e para produtos pulverulentos.

FORTES FILHO (1985), em sua dissertação de Mestrado “Uma Introdução ao Estudo dos Silos”, aborda a problemática dos silos de maneira ampla e suficientemente profunda para as aplicações correntes, apoiando-se em uma análise de estudos teóricos e experimentais realizados por diversos autores.

VAZ (1987), em sua dissertação de Mestrado "Silos Verticais de Madeira Compensada", apresenta uma proposta de silos de madeira compensada de seção hexagonal para o pequeno produtor.

COUTO (1989), em sua dissertação de Mestrado "Contribuição ao Estudo dos Silos de Argamassa Armada para o Armazenamento de Cereais", propõe uma metodologia de dosagem para argamassa armada, verificando sua viabilidade construtiva em dois silos protótipos cilíndricos.

ESTEVES JUNIOR (1989), em sua dissertação de Mestrado "Silos Metálicos de Chapa Corrugada", apresenta estudo teórico e experimental destas unidades com vistas à caracterização dos materiais e das ligações utilizadas, além de propor uma metodologia de ensaio para a avaliação dos componentes estruturais.

CALIL (1990), em sua tese de Livre - Docência "Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais", realiza o estudo das teorias e práticas que envolvem as várias fases de carregamento e fluxo de produtos armazenados, propondo recomendações para o armazenamento destes produtos em silos.

SILVA (1993)¹, em sua tese de Doutorado "Estudo da Variabilidade de Pressões em Silos", estuda as pressões em silos sob o ponto de vista probabilístico, com ênfase na análise da variabilidade das propriedades dos produtos armazenados e na variabilidade das pressões.

MILANI (1993), em sua tese de Doutorado "Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados para Projeto de Pressões e Fluxo em Silos", apresenta uma metodologia de ensaio para a determinação das propriedades de produtos armazenados, com base em estudos teóricos e experimentais utilizando o equipamento de translação "Jenike Shear Cell".

FASSONI (1994), em sua dissertação de Mestrado "Sistema Construtivo Modular em Madeira para Silos Horizontais", apresenta proposta de projeto de silo horizontal de madeira utilizando peças maciças e chapas de compensado, com ênfase na pré-fabricação.

GOMES (1994), em sua dissertação de Mestrado "Silos para Armazenamento de Laranjas", propõe o projeto e detalhes construtivos de um silo-protótipo, utilizando madeiras

¹ Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo sob orientação do Prof. Dr. Carlito Calil Junior.

de reflorestamento para o armazenamento de laranjas, tanto em fazendas como em indústrias.

MANFRIN (1994), em sua dissertação de Mestrado “Um Estudo dos Silos para Açúcar: Propriedades Físicas do Material Armazenado, Recomendações Construtivas, Normativas e Análise Estrutural”, analisa as condições ideais que o açúcar deve apresentar para uma adequada armazenagem, bem como avalia a distribuição dos esforços solicitantes a partir do confronto entre uma análise discreta, que trata a estrutura como um conjunto de pilares e vigas curvas, e de outra contínua, na qual a estrutura da parede é tratada como casca.

NASCIMENTO (1996), em sua tese de Doutorado "Estudo de Silos Prismáticos para Fábricas de Ração", desenvolve estudo teórico e experimental de painéis metálicos com conformação zigzague horizontal, fornecendo subsídios técnicos para projetos de silos prismáticos metálicos para uso industrial.

ARAÚJO (1997), em sua tese de Doutorado "Estudo Teórico Experimental de Tremonhas Piramidais para Silos Metálicos Elevados", realiza estudos para a determinação dos esforços em tremonhas enrijecidas e não enrijecidas por modelo analítico, numérico e experimental, confrontando os métodos utilizados.

ANDRADE JÚNIOR. (1998), em sua dissertação de Mestrado “Análise Estrutural das Chapas Metálicas de Silos e de Reservatórios Cilíndricos”, procura dispor conceitos claros e distintos do comportamento e dos fenômenos de perda de estabilidade do equilíbrio de reservatórios e silos metálicos, bem como estabelece configurações estruturais que apresentam maiores riscos à perda da estabilidade da estrutura e fornece relações de diâmetro/espessura e de diâmetro/altura em que é possível evitar os problemas advindos da perda de estabilidade do equilíbrio.

GOMES (2000), em sua tese de doutorado “Estudo Teórico e Experimental das Ações em Silos Horizontais”, compara resultados teóricos com os obtidos por meio de medições diretas das pressões em um modelo-piloto e um silo horizontal em escala real, com a relação entre as pressões horizontais e verticais, K . Com base nos resultados obtidos, propõe um novo método de cálculo fundamentado em um modelo empírico para a determinação das pressões horizontais nessas unidades.

FREITAS (2001), em sua tese de doutorado “Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano”, realiza ensaios em um silo-protótipo e um silo-piloto. Com base nos resultados experimentais, propõe modelos empíricos para a determinação das pressões horizontais e verticais no fundo plano do silo para esse tipo de unidade armazenadora.

ANDRADE JÚNIOR. (2002), em sua tese de doutorado “Ação do Vento em Silos

Cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro”, realiza estudos teóricos e experimentais em modelos aerodinâmicos e aero elásticos sobre as ações do vento em silos, determinando coeficientes aerodinâmicos no costado e na cobertura.

PALMA (2005), em sua dissertação de mestrado “Pressões e Fluxo em Silos Esbeltos ($H/D \geq 1,5$)”, realiza estudos teóricos sobre teorias e normas vigentes sobre as pressões e fluxo em silos esbeltos.

CHEUNG (2007), em sua tese de doutorado “Modelo Estocástico de Pressões de Produtos Armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de Silos Esbeltos” realiza um tratamento estocástico nas pressões dos silos verticais esbeltos com ênfase na estimativa da confiabilidade de silos verticais cilíndricos.

NASCIMENTO (2008), em sua dissertação de mestrado “A relação entre as Pressões horizontais e verticais em Silos Elevados: o parâmetro K” determina experimentalmente a relação entre as pressões horizontais e verticais em um silo piloto vertical, cilíndrico, de fundo plano e realiza um estudo comparativo das principais recomendações propostas pelos especialistas e normas internacionais para o cálculo do K.

MADRONA (2008), em sua dissertação de mestrado “Pressões em Silos Esbeltos com descarga excêntrica”, realiza um estudo teórico e numérico da distribuição de pressões e seu aumento para a condição de descarga em silos verticais com descarga excêntrica.

Dentro deste contexto este trabalho tem como objetivo dar continuidade nos estudos que estão sendo realizados na área de estruturas de armazenamento na USP.

1.5 JUSTIFICATIVA

Os erros de projeto estão entre as maiores causas de colapso nas estruturas de coberturas de silos cilíndricos metálicos. As falhas mais comuns vão desde a concepção estrutural errônea, a subestimativa das ações e até mesmo a ancoragem inadequada. Acredita-se que um dos fatores que tenha contribuído para essa realidade seja a escassa informação disponível a respeito do tema. Na maioria dos livros de silos não existe um capítulo específico sobre coberturas e não há uma norma brasileira específica para construção de silos e, por isso normalmente os calculistas utilizam para o dimensionamento as seguintes normas internacionais: AS 3774 (1996), ISO – 11697 (1995), EUROCODE 1-Part 4 (2002) e DIN 1055-6 (2005). GAYLORD Jr & GAYLORD (1984) sugerem a adoção dos critérios de dimensionamento da API 650 (1973) (*American Petroleum Institute*) para coberturas de tanques de óleo, porém o emprego dessa norma induz a estruturas pesadas e de custo elevado. As normas citadas não apresentam como calcular a magnitude do esforço de tração que os

cabos de termometria causam nas coberturas e atualmente as empresas adotam para o dimensionamento valores baseados em estimativas não confiáveis, com base em histórico prático e com valores consideravelmente altos.

1.6 OBJETIVO

Realizar uma revisão bibliográfica sobre as ações em estruturas de cobertura de silos metálicos cilíndricos verticais com ênfase no estudo teórico e experimental dos esforços devidos aos cabos de termometria suspensos na cobertura.

1.7 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

Espera-se com os estudos dos esforços devidos aos cabos de termometria fornecer subsídios para os projetistas e informações para uma normalização no dimensionamento de estruturas de cobertura para silos metálicos cilíndricos e também propor um critério de cálculo para a determinação de esforços devidos a cabos de termometria em silos metálicos cilíndricos. Sendo assim, possibilitar a construção de silos mais seguros, econômicos e eficientes, tecnologicamente apropriados, podendo, desta forma, diminuir desperdícios e prejuízos, hoje bastante significativos na atividade rural e industrial.

2

CAPÍTULO

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica sobre as ações, esforços e sistemas construtivos de cobertura para silos cilíndricos.

2.1 COBERTURAS

2.1.1 Sistemas estruturais e construtivos

A forma da cobertura de um silo pode ser plana, cônica ou duplamente curvada como mostra a Figura 2.1. A forma cônica é a mais comum, pois, permite que o plano da cobertura fique aproximadamente paralelo ao produto armazenado. Já a cobertura em cúpula exige dupla curvatura dos elementos e das telhas sendo mais difícil de fabricar com boa precisão geométrica. Por este motivo as coberturas em cúpula são pouco empregadas em silos.

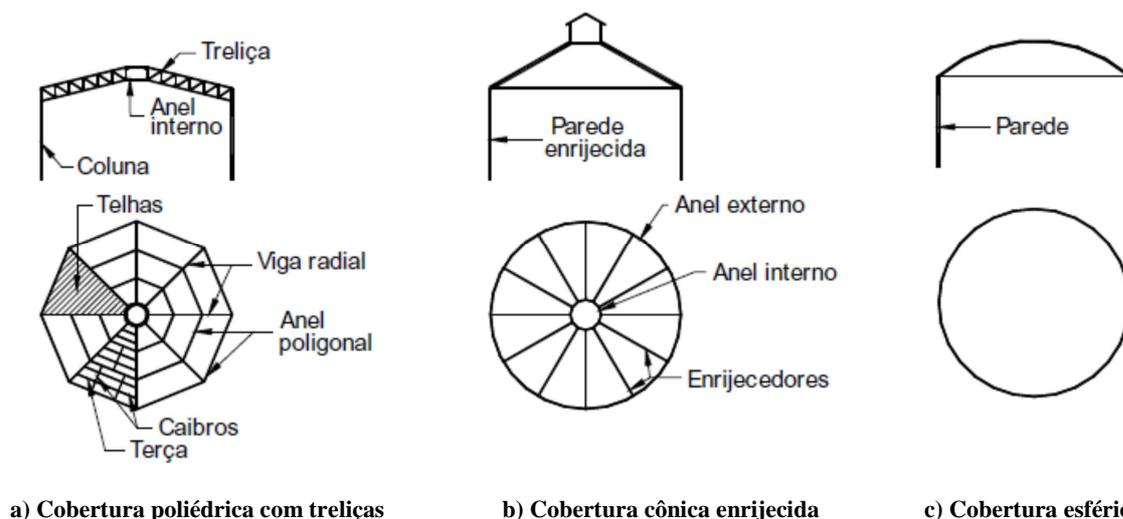


Figura 2.1 - Sistemas estruturais para coberturas de silos. Fonte: Traduzido de TRAHAIR (1985b).

A cobertura pode ser autoportante ou pode necessitar de uma estrutura de suporte. A ABNT NBR 7821:1983 definiu o teto cônico suportado sendo um teto com a forma aproximada de uma superfície cônica reta, cujo suporte consiste em terças apoiadas em vigas

radiais ou apoiadas em treliças, com ou sem colunas e o teto cônico autoportante tem a forma aproximada de uma superfície cônica reta suportado apenas pelo seu perímetro, e cujas chapas sustentam-se a si mesmas sem o auxílio de vigas radiais ou poligonais. A estrutura de apoio das chapas de cobertura em geral é constituída por um conjunto de elementos radiais ligados a um anel externo fixado nos montantes do silo, como explica TRAHAIR (1985b).

Segundo TRAHAIR (1985b) para coberturas de pequenos silos, o anel externo pode ser eliminado e a cobertura pode ser ligada diretamente à parede do silo. Para coberturas de maiores dimensões empregam-se adicionalmente enrijecedores na cobertura e na parede do silo. Geralmente, as coberturas necessitam também de um anel interno para formar uma abertura por onde entra o produto a ser armazenado e também para permitir o apoio do carregador do silo. Quando os elementos radiais forem ligados a um anel interno devem-se prever ligações capazes de transmitir o momento fletor dos elementos radiais para o anel. As barras radiais e os anéis podem ser formados por perfis laminados a quente, perfis de chapa dobrada a frio, perfis tubulares, treliças de banzos paralelos ou podem ser fabricados a partir de chapas para a composição de seções.

2.2 AÇÕES A CONSIDERAR

As principais ações a serem consideradas no projeto das estruturas de coberturas de silos são o peso próprio (F_G), a sobrecarga (F_Q), a pressão de vento (F_W), ações dos equipamentos de carregamento (F_E) e forças dos cabos de termometria (F_C).

2.2.1 Peso próprio da cobertura (F_G)

No Brasil, as cargas referentes ao peso próprio dos materiais e as sobrecargas são definidas pela norma ABNT NBR 6120:1980 “Cargas para o cálculo de estruturas de edificações”. Para o dimensionamento das estruturas é importante à determinação das ações decorrentes do peso próprio, mesmo sendo pequenas quando comparadas com outras cargas, principalmente na cobertura. Na Figura 2.2 são apresentados elementos estruturais e de vedação de uma cobertura de um silo metálico cilíndrico vertical.

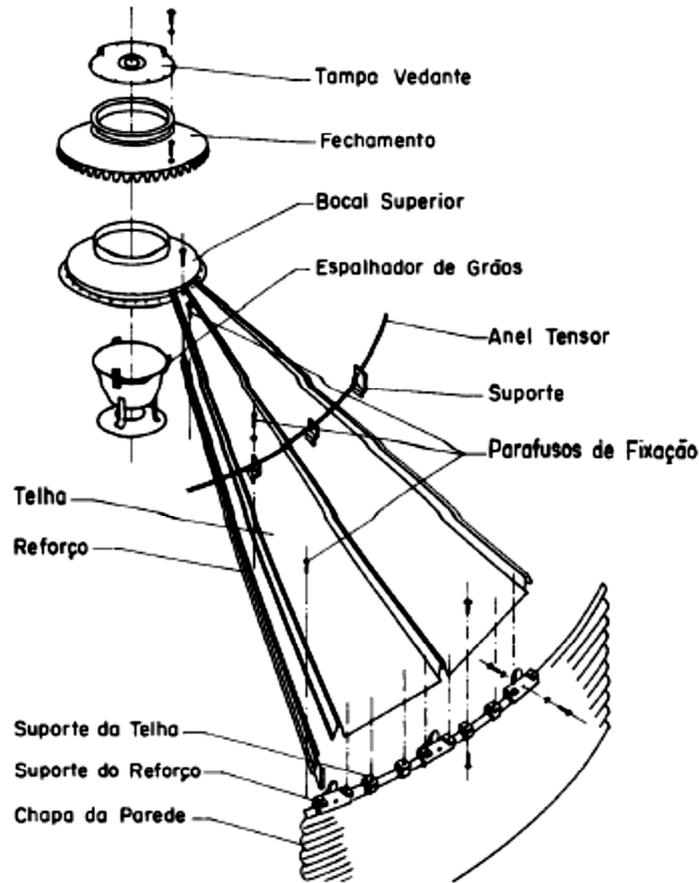


Figura 2.2 - Peças componentes dos telhados. Fonte: Esteves Junior (1989)

ESTEVES JUNIOR (1989) propõe os seguintes valores para estimativa da carga na cobertura em projeção vertical em silos metálicos, Figura 2.2, cujos diâmetros não ultrapassem 20 metros e com inclinação de 30°:

Telhas e reforços:

$$P_1 = 153 \text{ N/m}^2 \quad (1)$$

Anéis tensores para $d \geq 8$ m:

$$P_2 = \left[\frac{77}{d} \left(INT \frac{D}{8} \right) + \frac{153}{d} \right] \text{ N/m}^2 \quad (2)$$

Tampa vedante, fechamento, bocal superior, espalhador de grãos:

$$P_3 = 4,2 \text{ N/m}^2 \quad (3)$$

2.2.2 Sobrecarga na cobertura (F_Q)

De acordo com TRAHAIR (1985b), deve-se considerar como sobrecarga sobre a cobertura do silo uma carga uniformemente distribuída prevendo o armazenamento provisório

de material ou equipamentos durante as operações de montagem e manutenção da cobertura. Deve-se considerar também uma carga concentrada nos locais onde possam ser fixados equipamentos para içamento das peças durante a montagem. As terças devem também suportar, no seu ponto mais crítico, uma força concentrada correspondente ao peso de um homem em pé.

Além disso, devem ser previstas no projeto da cobertura as cargas estáticas e dinâmicas e as possíveis forças horizontais dos equipamentos de carregamento. Em algumas circunstâncias também é possível que o silo seja pressurizado internamente por processos de aeração do produto. Nesses casos, devem-se levar em conta as pressões correspondentes.

2.2.3 Carga dos equipamentos de carregamento (F_E)

TRAHAIR (1985b) sugere que as cargas de máquinas e instalações devem ser fornecidas pelos fabricantes destes equipamentos. Além do peso próprio e os efeitos de carga dinâmica de máquinas e instalações.

2.2.4 Pressão do vento (F_W)

A ação do vento em silos, especialmente quando vazios, tem sido responsável por inúmeros acidentes. Os silos cilíndricos metálicos são os que mais têm sofrido com a ação do vento. Deve-se projetar o silo considerando o efeito de arrancamento da cobertura superior e dimensionar as chapas onduladas a resistirem à flambagem elástica com a possível colocação de anéis enrijecedores, Figura 2.3. As forças de arrancamento nos chumbadores do silo e o dimensionamento da placa de base devem ser verificados para garantir a estabilidade global. (CALIL e CHEUNG, 2007).

No Brasil as forças de vento são especificadas pela ABNT NBR 6123: 1988 “Forças devidas ao vento em edificações” e considera que a força de vento depende da diferença de pressão nas faces opostas (externas e internas) da parte da edificação em estudo e adota:

$$\Delta p = (C_{pe} - C_{pi})q \quad (4)$$

Sendo:

$$q = 0,613V_k^2 \quad (5)$$

$$V_k = V_o \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (6)$$

$$\Delta p = (C_{pe} - C_{pi}) \cdot 0,613 \cdot V_k^2 = \Delta C_p \cdot 0,613 \cdot V_k^2 \quad (7)$$

Onde:

Δp : diferença de pressão nas faces opostas;

C_{pe} : coeficiente de pressão externa;

C_p : coeficiente de pressão interna;

q : pressão dinâmica, em N/m^2 ;

V_k : velocidade característica do vento, em m/s ;

V_0 : velocidade básica do vento, em m/s ;

S_1 : fator que considera a topografia;

S_2 : fator que considera a rugosidade do terreno e a altura (onde atua o vento);

S_3 : fator estatístico que considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação;

ΔC_p : coeficiente de pressão total.

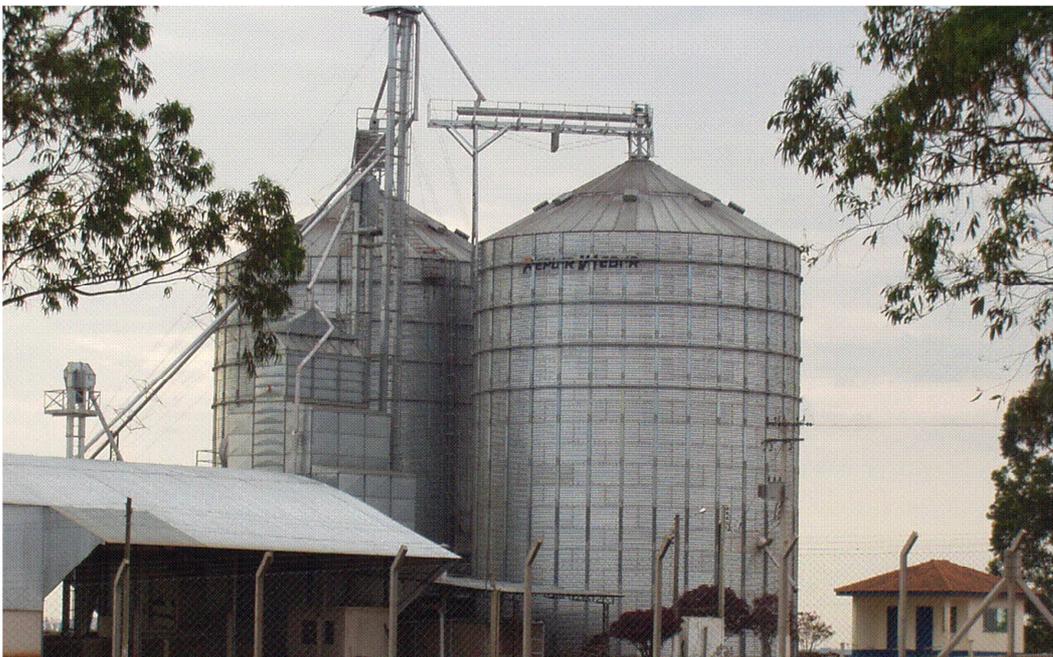


Figura 2.3: Silo com anéis enrijecedores

PORTELA e GODOY (2005) concluem em seu trabalho que as forças críticas de silos são apenas marginalmente afetadas pela distribuição de pressão negativa em torno do tanque e pela distribuição das pressões ao longo da altura do corpo do silo. Para os tanques com um telhado cônico, a distorção é induzida por efeitos locais devidos a pressões do vento positivo na região do barlavento. A cobertura de um tanque oferece rigidez adicional à estrutura, de modo que a capacidade de resistir à deformação do tanque com um telhado cônico é aumentada por um fator de dois em relação a um tanque sem cobertura.

Na Figura 2.4 apresentada por ANSOURIAN (1992) observa-se a ruína local em um tanque sob carregamento de vento, ocorrida por ausência de cobertura. A deformação prolongada ocorreu até a primeira mudança na espessura da parede de 8 para 10 mm. A cobertura enrijece o topo, como se fosse um diafragma no topo da superfície cilíndrica e a

deformação toma a forma de metade de uma onda senoidal no sentido vertical, como visto na Figura 2.5.

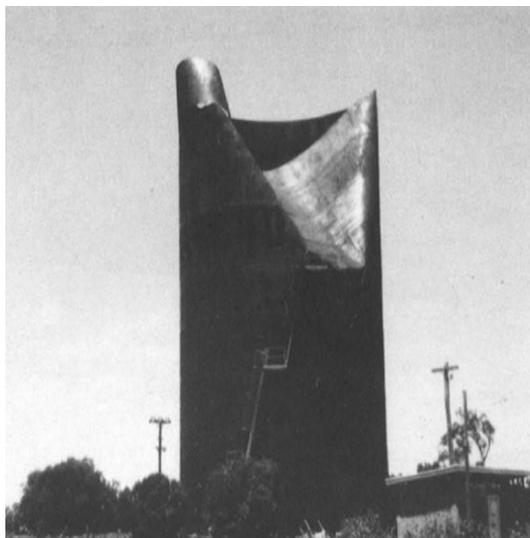


Figura 2.4 - Deformação devida ao vento em topo sem restrição. Fonte: ANSOURIAN (1992)

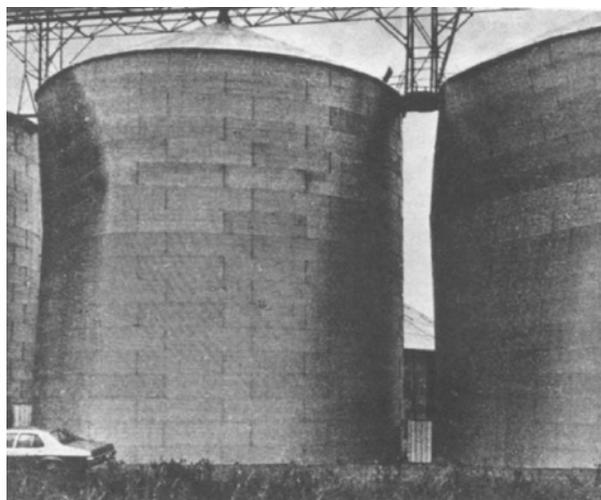


Figura 2.5 - Deformação devida ao vento em silos com cobertura. Fonte: ANSOURIAN (1992)

Em SABRANSKY e MELBOURNE (1987) foi apresentado o estudo das distribuições de pressões em modelos de silos cilíndricos de cobertura cônica a partir de ensaios em túnel de vento, comparando-se os resultados aos silos em escala real. Há um relato de acidentes de amassamento da parede cilíndrica do silo metálico a barlavento e de tombamento do silo, sendo raros os acidentes nas coberturas cônicas, embora estas sejam leves e delgadas.

Segundo ANDRADE JÚNIOR. (2002) o estudo dos silos cilíndricos e de coberturas cônicas sob a ação do vento inicia-se com a constatação do problema de perda de estabilidade do costado e da necessidade de caracterização do comportamento do silo. Realizou estudos teóricos e experimentais sobre as ações do vento em silos. O trabalho foi desenvolvido com ensaios de modelos aerodinâmicos e aeroelásticos em um túnel de vento na Universidade de Cranfield, Inglaterra, com o objetivo de determinar os coeficientes aerodinâmicos no costado e na cobertura.

Segundo BRIASSOULIS e PECKNOLD (1986) a distribuição dos coeficientes de pressão para uma cúpula montada em uma base cilíndrica pode ser aproximada admitindo uma variação linear da borda de barlavento do topo da cúpula e uma variação linear do topo para a borda de sotavento e propõem uma distribuição de pressão simples para coberturas cônicas mostrada na Figura 2.6.

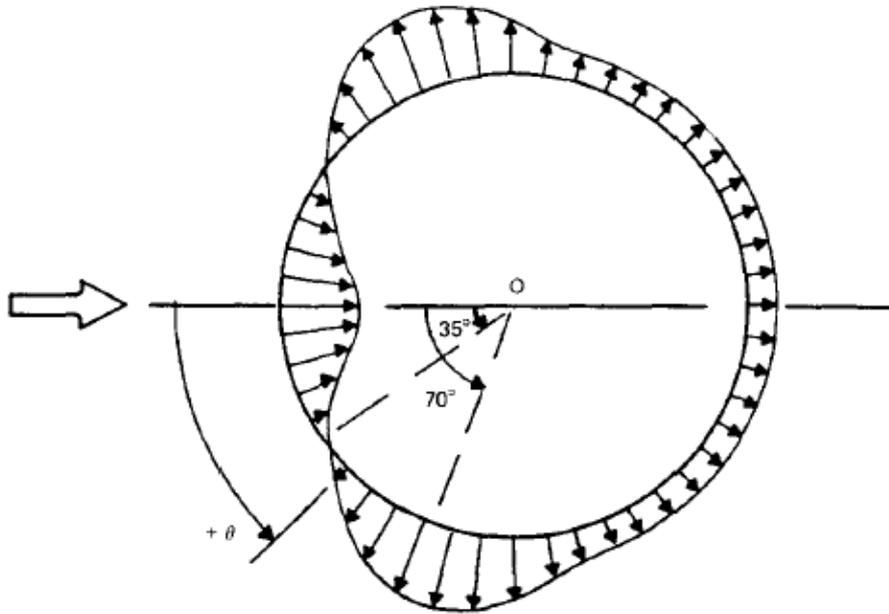


Figura 2.6 - Distribuição circunferencial de carga de vento em parede cilíndrica (Fonte: BRIASSOULIS & PECKNOLD, 1986)

A pressão permanece aproximadamente constante, perpendicular à direção do vento. Com essa aproximação, três parâmetros são requeridos para especificar a distribuição de pressão de vento na cobertura. Esses parâmetros foram determinados usando os coeficientes de pressão para uma cúpula montada em uma base cilíndrica. Os coeficientes de pressão dependem da relação altura/diâmetro da cúpula e relação altura/diâmetro do cilíndrico. A cobertura de silo cônica tipicamente tem uma inclinação de aproximadamente 30°. BRIASSOULIS e PECKNOLD (1986) selecionaram uma cúpula com relação altura/diâmetro de 1/4,5 para representar a geometria de coberturas. A distribuição de pressão de vento obtida nestas condições é apresentada na Figura 2.8.

Os coeficientes de pressão (C_{pc}) incluem influência da altura da parede, então a pressão na cobertura é dada simplifcamente por:

$$p_t = 0,00256 \cdot V^2 \cdot C_{pc} = q_r \cdot C_{pc} \quad (8)$$

sendo q_r a velocidade da pressão na cobertura e V a velocidade do vento dez metros acima do solo em campo aberto para a velocidade do vento básico. A magnitude da força de vento na cobertura aumenta consideravelmente de silo alto para o baixo, enquanto que a força de vento nas paredes não aumenta significativamente. O carregamento do vento sobre o telhado puxa para cima o telhado e a parte superior da parede para dentro. Esse comportamento influencia o estado de tensões na estrutura da parede cilíndrica.

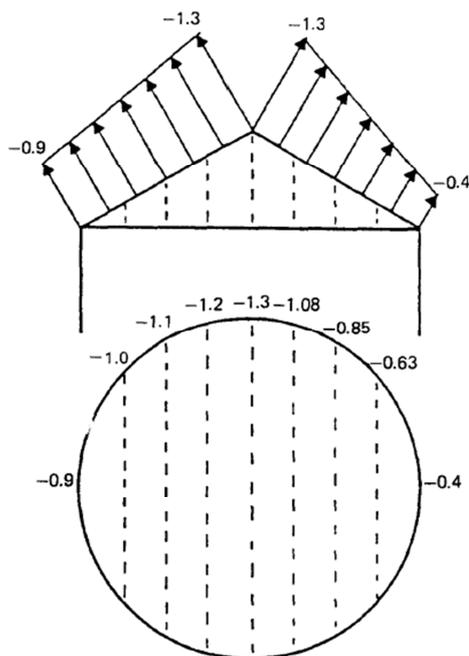


Figura 2.7 - Distribuição de carga de vento em cobertura cônica

GAYLORD e GAYLORD (1984) apresentam coeficientes de pressão C_p para silos (Tabela 2.1) e elementos de suporte (Tabela 2.2). Observam que as pressões do vento especificadas pelas normas incluem uma tolerância para ambos os coeficientes de pressão e fator de rajada, e seria excessivamente conservador o uso destes com os coeficientes indicados nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1 - Coeficientes de pressão C_p para silos (Fonte: Traduzido de GAYLORD e GAYLORD, 1984)

Formato	Tipos de superfície	H/D	
		1	7
Quadrado (vento normal à face)	Todas	1,3	1,4
Quadrado (vento ao longo da diagonal)	Todas	1,0	1,1
Hexagonal, octagonal	Todas	1,0	1,2
Circular	Moderadamente lisa	0,5	0,6
	Rugosa	0,7	0,8

Nota: H = altura (ft), D = diâmetro ou menor dimensão horizontal (ft), z = profundidade de elementos tal como reforços.

Tabela 2.2 - Coeficientes de pressão C_p para elementos individuais. Fonte: Traduzido de GAYLORD e GAYLORD (1984)

Formato	C_p
Lado plano	2
Cilindrico, $d\sqrt{q} < 2,5$	1,2
Cilindrico, $d\sqrt{q} > 2,5$	0,8

Nota: d = diâmetro (ft), q = pressão de velocidade (psf)

2.2.5 Cabos de termometria (F_C)

Durante a estocagem a qualidade dos produtos granulares pode ser afetada por diferentes fatores como roedores, insetos e fungos, além do aumento da temperatura local dos grãos que é um indicativo de um problema de deterioração. Segundo SCHWAB et al.(1991) a inspeção diária da temperatura dos grãos estocados pode detectar a presença de um “hot spot”, ou seja, um local quente antes de qualquer grão ser seriamente deteriorado. O operador pode escolher arejar os grãos para esfriar o “hot spot” ou remover o grão do silo. Um dos métodos para controlar a qualidade da massa de grãos estocados no interior de um silo é o constante monitoramento da temperatura da massa de grãos com a utilização de cabos de termometria suspensos na cobertura.

Devido à localização dos cabos dentro da massa de grãos, uma força vertical é transmitida para a estrutura de cobertura nos pontos de fixação dos cabos. De acordo com THOMPSON (1987) essas forças podem não causar a falha total na estrutura, no entanto, pode ocorrer um problema localizado nos pontos de fixação dos cabos. Até o presente momento as cargas que esses cabos transmitem para a estrutura de cobertura não são bem avaliadas.

REIMBERT e REIMBERT (1971) propuseram que a carga vertical total agindo em um cabo suspenso dentro de uma massa de produto granular pode ser determinada pela integração da força vertical tangencial sobre a superfície do cabo. A força vertical tangencial é função da pressão lateral existente dentro do silo e do coeficiente de atrito do cabo com o produto granular, sendo a força de atrito agindo sobre um elemento dz do cabo:

$$d \cdot d_z \cdot p_h \cdot \tan \phi_{w,c} \quad (9)$$

e a força de atrito ao longo de todo o comprimento do cabo:

$$\int_0^z d \cdot \tan \phi_{w,c} \cdot p_h \cdot dz \quad (10)$$

Supondo que o valor da pressão horizontal (p_h) é constante sobre a seção transversal horizontal, o esforço de tração no cabo será:

$$T = d \cdot \tan \phi_{w,c} \cdot \frac{\gamma \cdot R}{\tan \phi_w} \cdot \int_0^z \left[1 - \left(\frac{z}{A} + 1 \right)^{-2} \right] dz \quad (11)$$

ou

$$T = \gamma \cdot R \cdot d \cdot \frac{\tan \phi_{w,c}}{\tan \phi_w} \cdot \frac{z^2}{z + A} \quad (12)$$

sendo o comprimento característico de um silo cilíndrico, dado por:

$$A = \frac{D}{4 \cdot \operatorname{tg} \phi_w \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right)} - \frac{D}{6} \cdot \tan \phi_i \quad (13)$$

onde:

A: comprimento característico

D: diâmetro do silo

H: altura do corpo do silo

R: raio hidráulico

T: esforço de tração

z: comprimento submerso do cabo em grãos

γ : peso específico

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

ϕ_r : ângulo de repouso do produto

ϕ_i : ângulo de atrito interno

ϕ_e : ângulo de atrito efetivo

ATKINSON et al. (1983) realizaram estudos sobre as forças em obstáculos suspensos em material granular, baseado no modelo de Janssen e de Walker. As medições foram realizadas em silos esbeltos com diâmetros de 10,5 e 22 cm, ambos com paredes de vidro e como base uma placa horizontal com um orifício de diâmetros de 10mm, 15mm e 20mm (Figura 2.8). Primeiramente considerou-se uma distribuição de tensão em um cilindro contendo um cilindro longo, como mostrado na Figura 2.9.

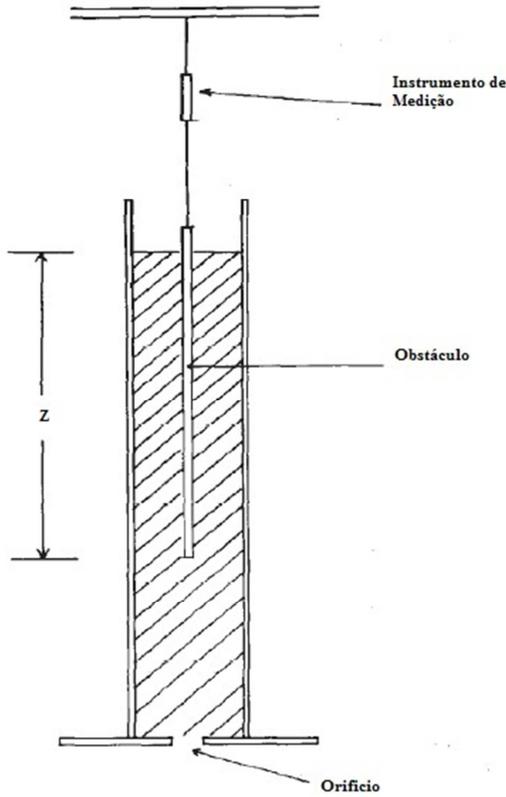


Figura 2.8: Sistema de ensaio. Fonte: ATKINSON et al. (1983)

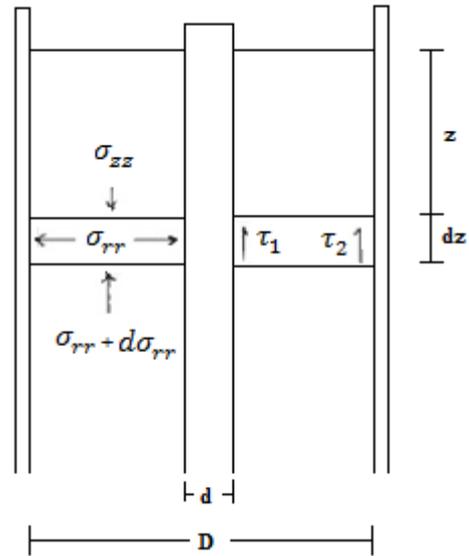


Figura 2.9: Equilíbrio de forças. Fonte: ATKINSON et al. (1983)

Considerando uma fatia elementar, Figura 2.9, o equilíbrio de forças é dado por:

$$\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \frac{d\sigma_{rr}}{dz} = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \cdot \gamma - \pi \cdot d \cdot \tau_1 - \pi \cdot D \cdot \tau_2 \quad (14)$$

Se o produto granular é de baixa coesão, as tensões cisalhantes, τ_1 e τ_2 , podem ser relacionadas à tensão radial, σ_{rr} por $\tau_1 = \mu_{w,c} \sigma_{rr}$ e $\tau_2 = \mu_w \sigma_{rr}$. A tensão radial pode ser relacionada com a tensão axial, σ_{zz} , por meio da constante de Janssen, K , definida por $\sigma_{rr} = K \sigma_{zz}$.

Substituindo τ_1 e τ_2 na equação anterior(14)

$$\frac{d\sigma_{zz}}{dz} + 4 \left(\frac{d \cdot \mu_{w,c} \cdot K + D \cdot \mu_w \cdot K}{D^2 - d^2} \right) \sigma_{zz} = \gamma \quad (15)$$

Considerando a condição de contorno, $\sigma_{zz} = 0$ em $z = 0$, portanto,

$$\sigma_{zz} = \gamma \cdot A (1 - \exp^{-z/A}) \quad (16)$$

onde,

$$A = \frac{D^2 - d^2}{4(d \cdot \mu_{w,c} \cdot K + D \cdot \mu_w \cdot K)} \quad (17)$$

é um comprimento característico para o sistema. A força T no centro do cabo é dada por:

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

$$T = \pi \cdot d \cdot \mu_{w,c} \cdot K \cdot \gamma \cdot A^2 \left(\frac{z}{A} + \exp^{-z/A} - 1 \right) \quad (18)$$

A norma IRAM 8 015:1977, que deixou de vigorar em 1997, propõe para o cálculo dos esforços de tração devidos aos cabos de termometria duas equações que devem ser utilizadas de acordo com o valor obtido para o parâmetro L_1 , calculado conforme a norma.

- Para $z \leq L_1$

$$T [Kgf] = 1,4 \cdot d \cdot \gamma \cdot \tan \phi_{w,c} \left[0,84 \cdot z^2 \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right) + 0,27 \cdot \frac{D \cdot z}{\tan \phi_w} \right] \quad (19)$$

- Para $z \geq L_1$

$$T [Kgf] = \frac{1,4 \cdot 0,35 \cdot d \cdot \gamma \cdot \tan \phi_{w,c} \cdot D^2}{\tan^2 \phi_w \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right)} \left[\pi \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right) \tan \phi_w \cdot \frac{z}{D} - 0,57 \right] \quad (20)$$

- Cálculo de L_1 (em metro)

$$L_1 = \frac{D}{2 \cdot \tan \phi_w \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right)} \quad (21)$$

Adotando 1,4 para o fator de multiplicação considerando o efeito dinâmico produzido durante a descarga e adotando os valores propostos pela norma para os ângulos de atrito ($\phi_i = 30^\circ$, $\phi_w = 22^\circ 30'$, $\phi_{w,c} = 11^\circ$)

- Para $z \leq L_1$

$$T = 0,272 \cdot d \cdot \gamma \cdot (0,28 \cdot z^2 + 0,65 \cdot D \cdot z) \quad (22)$$

- Para $z \geq L_1$

$$T = 1,6654 \cdot d \cdot \gamma \cdot D^2 \left(0,4337 \cdot \frac{z}{D} - 0,57 \right) \quad (23)$$

- L_1

$$L_1 = 3,621 \cdot d \quad (24)$$

THOMPSON (1987) realizou um estudo para determinar a força vertical transmitida pelos cabos de termometria durante os carregamentos estático e dinâmico variando a posição dos cabos dentro do silo (centro do silo, metade do raio e próximo à parede), a altura dos grãos e o diâmetro do cabo. Em todos os testes nos cabos localizados próximos a parede do silo, fora da região de fluxo ativo, as forças medidas foram maiores do que nos cabos em outras duas posições. Para ambas as condições de carregamento a carga vertical é diretamente proporcional à altura dos grãos e ao diâmetro dos cabos.

Uma estimativa da magnitude da força de atrito vertical do cabo de termometria, proposta por SCHWAB et al. (1991) foi determinada pela integração do produto da pressão lateral dos grãos, área da superfície do cabo e o coeficiente de atrito dos grãos com o cabo sobre o comprimento imerso do cabo nos grãos. Portanto, a equação para carga vertical de atrito do cabo de termometria é:

$$T = F_{tc} \cdot \frac{\pi \cdot \mu_{w,c} \cdot D_{tc} \cdot R \cdot \gamma}{\mu_w} \left\{ z + \frac{R}{\mu_w \cdot K} \left[\exp \left(-\frac{K \cdot \mu_w \cdot z}{R} \right) - 1 \right] \right\} \quad (25)$$

$$D_{tc} = \sqrt{4 \cdot \frac{a}{\pi}} \quad (26)$$

Onde,

a: área do cabo

D_{tc} : diâmetro equivalente do cabo

K: relação entre a pressão horizontal e vertical

μ_w : coeficiente de atrito entre o produto e a parede do corpo do silo

$\mu_{w,c}$: coeficiente de atrito entre o produto e o cabo de termometria

μ_e : coeficiente de atrito interno do produto

SCHWAB et al. (1991) realizou ensaios em um silo real de 4,1 m de diâmetro por 14,9 m de altura, com cinco tipos de cabos, apresentados na Tabela 2.3. Em diferentes posições radiais, ilustradas na Figura 2.10, mediu-se a força vertical em cabos de termometria idênticos logo após o carregamento. Essas posições representam aproximadamente 7, 50 e 80% do raio do silo. A equação proposta adotando o valor de F_{tc} de 1,40 fornece uma estimativa adequada de carga para silos com relação altura/ diâmetro (H/D) menor do que 1,5. O fator de multiplicação, F_{tc} , não é interpretado como um fator de sobrepressão como definido em normas técnicas.

Tabela 2.3: Descrição das dimensões e materiais dos cabos. Fonte: Traduzido de SCHWAB et al. (1991)

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

SCHWAB et al. (1991) com base nos resultados obtidos concluiu que a força vertical de atrito é maior nos cabos localizados próximo das paredes do silo e que o nível de preenchimento dos grãos e a taxa do fluxo de descarregamento não influenciam significativamente na força vertical de atrito.

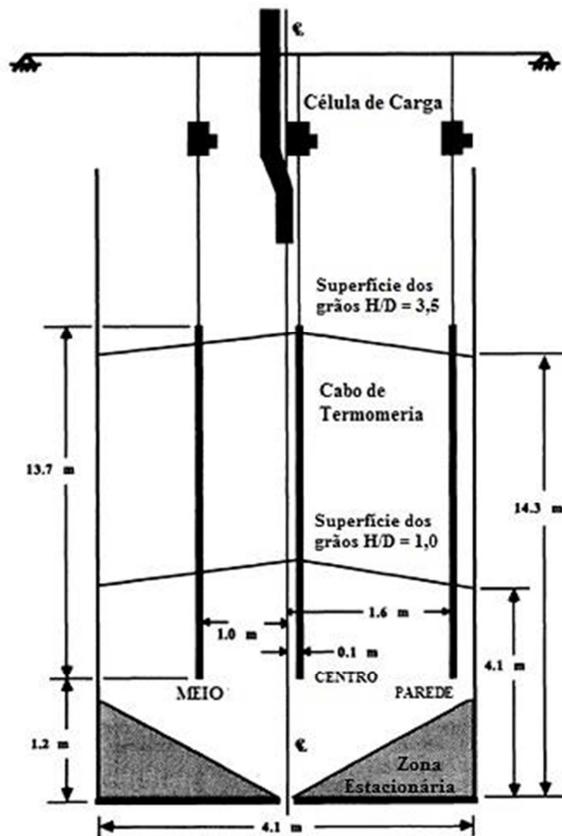


Figura 2.10 - Posição dos cabos no silo. Fonte: Schwa et al. (1991)

WICKSTROM (1980) baseado em referências fez recomendações para adoção do valor da força de tração em cada cabo. Um gráfico publicado por Fosse American, Inc. apresentava tração inferior a 9,79 km em silos com profundidade de grãos de 24,32 metros e diâmetro de 9,14 metros. O escritório de George A. Rolfs sugeria tração inferior a 6,23 km para 24,32 metros de profundidade de grãos. O Buri Aere-o and. Eletrônicas Corporation recomendava um projeto de 7,12 km para profundidades de grãos menores do que 15,24 metros, para tração de 14,24 km acima de 22,86 metros e 28,47 km acima de 45,72 metros. As referências utilizadas por WICKSTROM (1980) definiram esse valores a partir de forças de ruptura teórica dos cabos utilizados. De todas as informações avaliadas, WICKSTROM (1980) cita a estimativa do Buri Aerai-o and. Eletrônicas Corporation, sendo a mais alta e que provavelmente permite um fator razoável de segurança, desde que não haja pesos fixados na parte inferior dos cabos para conservar os cabos imóveis durante o carregamento. A partir da

análise das informações, o autor recomenda uma tração de 14,24 KN por cabo e a utilização de uma linha de pesca com resistência de 89 N com quatro voltas para fixar os cabos durante o carregamento.

2.2.6 Combinação de ações

A estrutura da cobertura do silo deve ser dimensionada para a combinação de carregamento mais desfavorável. Para as condições normais de carregamento dessa estrutura entende-se que as combinações mais desfavoráveis para o estado limite último sejam:

Para sobrepressão:

$$F_d = 1,4 \cdot \left[\sum F_G + \sum F_E + \left(\sum F_Q + 0,5F_w \right) \right] \quad (27)$$

$$F_d = 1,4 \cdot \left[\sum F_G + \sum F_E + \left(\sum F_w + 0,4F_Q \right) \right] \quad (28)$$

E para sucção tem-se:

$$F_d = \sum F_G + \sum F_E + 1,4 \left(\sum F_Q + 0,5F_w \right) \quad (29)$$

$$F_d = \sum F_G + \sum F_E + 1,4 \left(\sum F_w + 0,4F_Q \right) \quad (30)$$

Para o estado limite de utilização a combinação de ações de longa duração é expressa por:

$$F_d = \sum F_G + \sum F_E + 0,2 \sum F_Q \quad (31)$$

3

CAPÍTULO

Materiais e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida com determinação teórica e experimental dos esforços devidos aos cabos de termometria.

3.1 ANÁLISE TEÓRICA

Nesta parte do trabalho foi realizada a avaliação dos esforços devidos aos cabos de termometria por meio de equações propostas por REIMBERT e REIMBERT (1971), pela norma IRAM 8 015:1977, por ATKINSON et al. (1983) e por SCHWAB et al. (1991).

3.2 ANÁLISE NUMÉRICA

Foram realizadas simulações numéricas no pacote computacional ANSYS®. Os resultados obtidos numericamente foram comparados com as pressões horizontais nas paredes do silo obtidas experimentalmente em trabalho anterior. O silo analisado foi o silo-piloto instalado no LaMEM, apresentado no item 3.2.8, para fins de análise foram consideradas as paredes lisas, fundo plano e o produto armazenado sendo a soja, realizou-se uma análise bidimensional e axissimétrica.

3.2.1 Modelos e parâmetros numéricos

Para a simulação numérica é necessário adotar um modelo que representa o comportamento real do produto armazenado. Neste trabalho foi adotado o modelo elastoplástico com o critério de Drucker-Prager, como sugerido por VAZQUEZ (2006), por ser análogo ao modelo de Mohr- Coulomb com a diferença de possuir a superfície de deslizamento arredondada, Figura 3.1 e já vem incluído na biblioteca do programa. Para a utilização do modelo de Druck-Prager, três parâmetros dos produtos armazenados são necessários: coesão, ângulo de atrito interno e ângulo de dilatância.

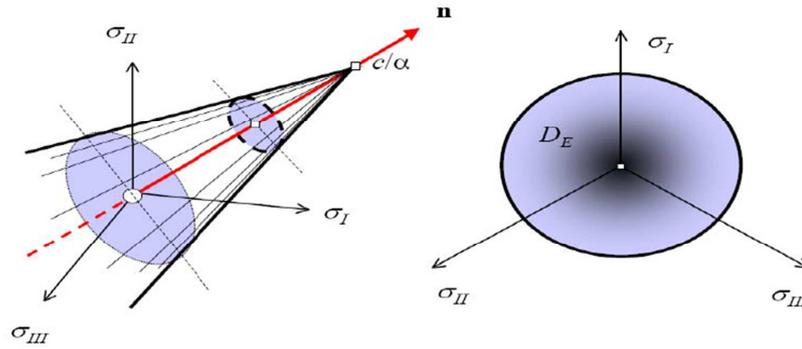


Figura 3.1: Representação espacial do critério de ruptura de Drucker-Prager

Os valores dos parâmetros adotados nas simulações numéricas no programa computacional ANSYS® foram baseados nos ensaios experimentais e são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades físicas dos produtos utilizados na simulação numérica

		Soja
Peso específico	γ (kN/m ³)	0,676
Módulo de elasticidade	E (kN/m ²)	1542
Coefficiente de Poisson	ν	0,26
Ângulo de atrito interno	Φ_i	39,78
Coesão	c (kPa)	nula
Ângulo de dilatância	ϕ_d (°)	14
Atrito com a parede lisa	ϕ_w (°)	18,631
Atrito com a parede do cabo	$\phi_{w,c}$ (°)	9,766

O coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade foram calculados como sugeridos por MADRONA (2008). O coeficiente de Poisson é determinado indiretamente baseando-se em estudos experimentais de ROTTER (2001), que mostram que este coeficiente está relacionado com a relação entre a pressão horizontal e vertical, K, no interior do produto no estado estático (K_0), ou seja, sem deformações:

$$\nu = \frac{K_0}{1 + K_0} \quad (32)$$

Seguindo recomendação da EUROCODE (2002) para o módulo de elasticidade do produto foi adotado um valor constante, apesar de depender da tensão que atua sobre o produto:

$$E = 3\gamma^{3/2} \cdot p_{vtf} \quad (33)$$

Para representar o produto foi utilizado o elemento PLANE42 que consiste em um tipo de elemento plano com quatro nós e dois graus de liberdade cada nó, translações nos eixos locais x e y. Esse elemento pode ser usado como um elemento plano (tensões planas ou deformações planas) ou como um elemento axissimétrico. O PLANE 42 admite diferentes modelos de plasticidade e permite que sejam adotadas diversas leis de comportamento do produto armazenado, com a inclusão de parâmetros como critério de deslizamento ou ruptura considerando a dilatação do produto e alta capacidade de deformação.

Para representar a parede do silo e o cabo de termometria foi utilizado o elemento BEAM3, um tipo de elemento uniaxial que admite tração, compressão e momentos fletores. Formado por dois nós com três graus de liberdade cada nó, translações nas direções x e y e rotação em torno do eixo z.

Tabela 3.2: Propriedades físicas do aço da parede utilizado na simulação numérica

Propriedades mecânicas do aço		
Módulo de elasticidade	E (MPa)	200000
Coefficiente de Poisson	ν	0,30

Nota: Valores obtidos pela ABNT NBR 8800:2008

3.2.2 Simulação do contato produto – parede

Para o caso de silos, o contato é a interação entre o produto armazenado e a parede do silo. No pacote computacional ANSYS, estudos anteriores determinaram que o procedimento mais adequado para representar o contato é o denominado “Superfície-a-Superfície” (Surface-to-Surface). Esse método se baseia na definição de duas superfícies: a superfície alvo (Target Surface) e a superfície de contato (Contact Surface).

A parede é representada pela superfície alvo, pois representa o material mais rígido e a superfície de contato representa o material deformável, ou seja, o produto granular. O elemento TARGET169 foi utilizado para representar a superfície alvo e o elemento CONTA 172 para representar a superfície de contato. Os próprios elementos finitos de contato sobrepõem os elementos finitos alvo sólidos, descrevendo o contorno de um corpo deformado e estão potencialmente em contato com a superfície alvo de contato. A superfície alvo de contato com os elementos finitos TARGET169 é discretizada por um conjunto de elementos finitos segmentados que emparelham uns com os outros da outra superfície de contato. O contato ocorre quando o elemento finito CONTA172 penetra em um dos elementos finitos de contato alvo, TARGET169. Determinando-se qual a superfície alvo do contato e qual a superfície de contato, é possível modelar uma superfície respectivamente deformável e uma rígida. (ANSYS INC., 2009).

Para que a geração de um contato no ANSYS funcione bem é necessário considerar um valor adequado para algumas constantes reais. A constante real FTOLN, define um fator de tolerância à penetração, ou seja, o nível de penetração da superfície alvo (*Target*) na superfície de contato (*Contact*). A constante real FKN, define o fator de rigidez do contato, que representa um dos principais aspectos a determinar durante a simulação de contato.

Segundo VÁZQUEZ (2006) a correta definição do comportamento da superfície de contato é fundamental para que o funcionamento do modelo criado se realize segundo as características desejadas. Neste trabalho foi utilizado o modelo de contato sem separação, pois permite a separação inicial entre as superfícies *target* e *contact*, entretanto, depois de estabelecido o contato, as superfícies *target* e *contact* se unem, sendo permitido o deslizamento entre elas. Para as constantes reais adimensionais FKN e FTOLN, foram utilizados os valores propostos em MADRONA (2008), 5 e 0,1, respectivamente.

3.3 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Na parte experimental analisaram-se os esforços nos elementos estruturais da cobertura devidos a fixação dos cabos de termometria no silo. A maioria dos silos horizontais e verticais tem vários cabos distribuídos ao longo da seção transversal do silo para a avaliação da temperatura dos grãos e posterior acionamento do sistema de aeração da unidade.

Os experimentos consistiram de três partes: estudo em laboratório para determinar as propriedades físicas dos grãos armazenados, ensaios no silo-piloto no LaMEM – SET – EESC –USP (Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo) e uma análise em silos reais juntamente com o grupo Kepler Weber do Rio Grande do Sul.

Foram instaladas células de carga nos cabos de termometria suspensos na cobertura dos silos para verificação da força resultante na parte superior do cabo com intervalos de tempo pré-determinados.

3.3.1 Metodologia experimental

Para a realização dos ensaios foram escolhidos dois produtos: milho e soja. A escolha foi feita a partir da grande produção nacional e no interesse do comportamento destes produtos granulares.

A soja é um produto granular que apresenta forma geométrica esférica e de fluxo livre e o milho apresenta forma irregular e, apesar de ter um peso específico próximo ao da soja, possui propriedades físicas distintas das obtidas nos ensaios com a soja.

Os ensaios experimentais foram divididos em 3 tipos:

- Ensaios das propriedades físicas do produto armazenado: determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados;
- Ensaio no silo-piloto: foram obtidos os valores dos esforços de tração no cabo de termometria suspenso no centro do silo;
- Ensaio no silo do grupo Kepler Weber: foram obtidos os valores dos esforços de tração nos cabos de termometria suspensos na cobertura do silo em cinco posições.

3.3.2 Origem dos produtos ensaiados

Os produtos foram adquiridos na região de São Carlos e são oriundos de campos de produção localizados nos estados de São Paulo e Goiás, foram cedidos pela empresa Di Solo Sementes.

3.3.3 Amostragem dos produtos

Foram retiradas três amostras das embalagens originais para cada produto de forma aleatória, Figura 3.2 (a), embaladas em sacos plásticos transparentes, lacrados com fita adesiva para evitar a perda de umidade, Figura 3.2(b) e Figura 3.3 e armazenadas na sala de ensaios de propriedades físicas do LaMEM.



(a)



(b)

Figura 3.2: (a) Embalagem original (b) Amostras de soja



Figura 3.3: Amostras de milho

3.3.4 Ensaio de umidade

Para a determinação do teor de umidade foram executados ensaios com Medidor de Umidade Digital modelo G800, utilizando a tecnologia “*Flow Thru*” (Figura 3.4 e Figura 3.5).



Figura 3.4: Aparelho medidor de Umidade Digital



Figura 3.5: Ensaio com amostra de soja

3.3.5 Ensaio de cisalhamento direto de Jenike

O equipamento usado para estas determinações é o aparelho de cisalhamento de translação, modelo TSG 70 -140, conhecido internacionalmente por “*Jenike Shear Cell*”, Figura 3.6, seguindo o procedimento de ensaio apresentado no manual “*Standart Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell*” (SSTT, 1989), elaborado pela Federação Européia de Engenharia Química. A leitura dos dados é realizada pela ferramenta computacional desenvolvida no LaMEM (Figura 3.7).

A célula de cisalhamento de Jenike pode ser usada para a obtenção dos principais parâmetros dos produtos armazenados:

- Peso específico (γ);
- Coesão (c);
- Ângulo de atrito interno (ϕ_i);
- Ângulo de atrito interno efetivo (ϕ_e);
- Ângulo de atrito entre o produto armazenado e o material da parede (ϕ_w);
- Ângulo de atrito entre o produto armazenado e o cabo ($\phi_{w,c}$);
- Função fluxo instantânea (FF).



Figura 3.6: Equipamento utilizado para a determinação das propriedades físicas

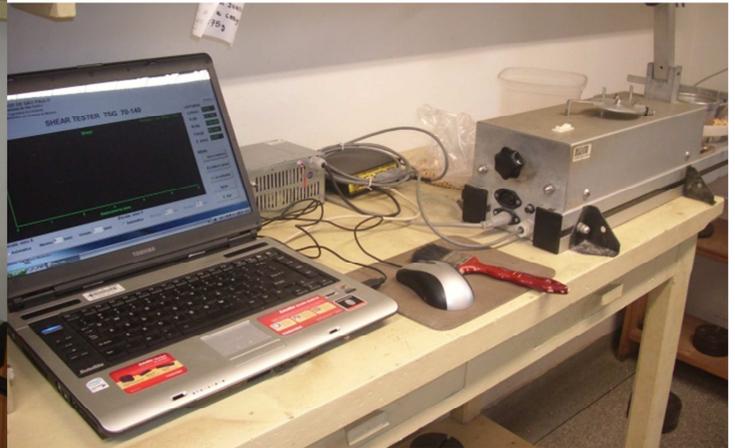


Figura 3.7: Dados armazenados por software desenvolvido no LaMEM

De acordo com CHEUNG (2007) a célula de cisalhamento de Jenike é um dos aparelhos com maior precisão para a determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados. Foi utilizada uma ferramenta computacional desenvolvida no LaMEM para a obtenção das propriedades físicas acima relacionadas a partir dos dados medidos.

3.3.6 Ensaio de cisalhamento com a parede

O aparelho de cisalhamento direto TSG 70 -140 também é utilizado para determinação do ângulo de atrito do produto armazenado com a parede (Figura 3.8). A base da célula de cisalhamento é substituída por uma amostra do material da parede que será avaliada. Foram realizados ensaios de cisalhamento com 3 tipos de materiais de paredes para a soja e o milho: aço liso (1), aço rugoso (2) e poliestileno (3) (Figura 3.9).



Figura 3.8: Ensaio de cisalhamento direto

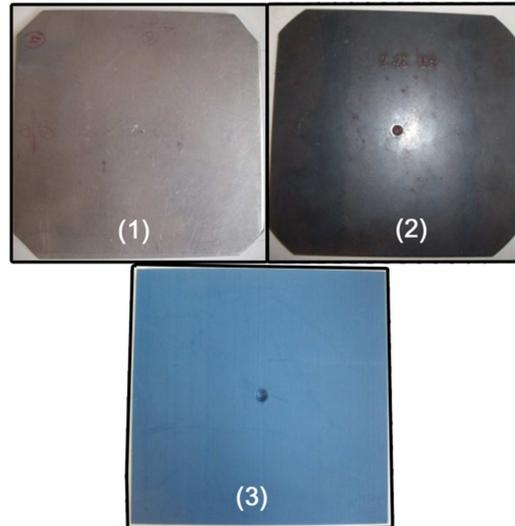


Figura 3.9: Tipos de paredes utilizadas nos ensaios

3.3.7 Ângulo de repouso

O ângulo formado entre a superfície do produto e a horizontal após o produto acumular-se a superfície horizontal é chamado de ângulo de repouso, segundo CALIL e CHEUNG (2007) o ângulo de repouso pode inferir sobre o ângulo de atrito interno e o fluxo do produto, sendo um indicativo do potencial do produto em fluir. A Figura 3.10 (a) e (b) apresenta o sistema de ensaios para a determinação de ângulo de repouso.



(a)



(b)

Figura 3.10 (a) e (b): Ensaio de determinação de ângulo de repouso

3.3.8 Ensaio no silo-piloto

O silo-piloto utilizado nesta pesquisa foi projetado com base no modelo confeccionado por PIEPER e SCHÜTZ (1980), do ponto de vista da análise experimental, é um equipamento concebido para realizar medições indiretas das ações do produto na célula, no silo. As pressões são medidas a partir das deformações dos anéis que são instrumentados com células de carga. A estação experimental consiste em um silo auxiliar de armazenamento, um elevador de canecas e um silo-piloto, instalada na parte interna de um edifício de madeira, construído no LaMEM, Figura 3.11. O silo-piloto é formado por 12 anéis independentes suspensos de modo estaticamente determinado, cada um com 50 cm de altura, entre os anéis foram coladas borrachas internas de vedação. Quando utilizada a parede interna lisa o diâmetro interno do silo é de 70,6 cm ou 64,36 cm quando utilizada a parede interna ondulada, com uma altura total de 600 cm, capacidade de armazenamento de 2,55 m³ para produto granular utilizando a tremonha assimétrica com $\alpha = 15^\circ$, Figura 3.12. Para o ensaio proposto o cabo de termometria foi suspenso no centro da cobertura do silo, Figura 3.13, sendo este cedido pela empresa NBRTec de Panambi, Rio Grande do Sul.



Figura 3.11 - Edifício de madeira construído para abrigar o silo-piloto (LaMEM)



Figura 3.12 - Visão geral do silo de armazenamento

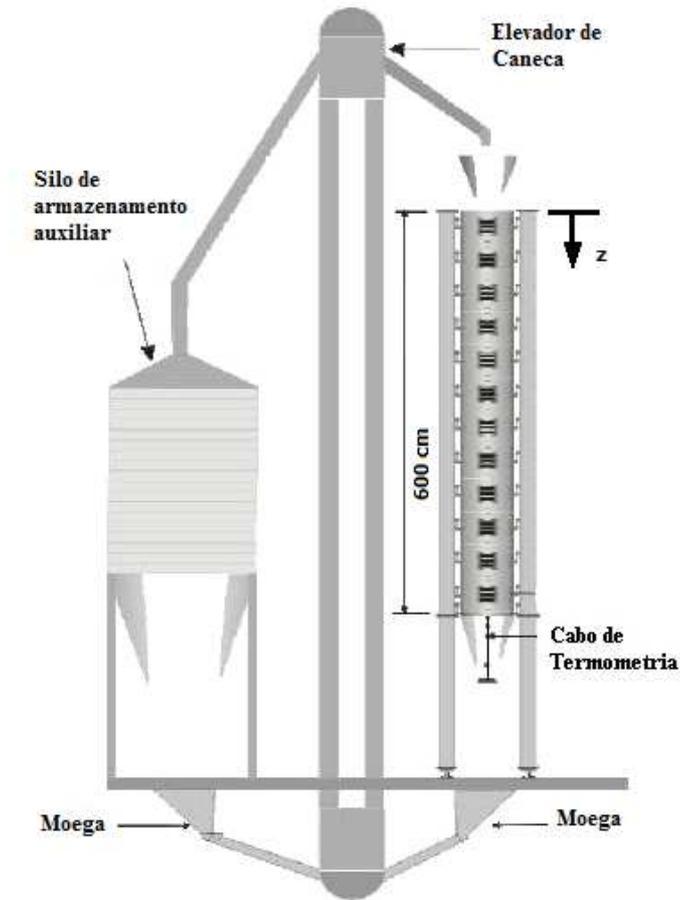


Figura 3.13 - Sistema de ensaio



Figura 3.14 - Visão geral silo de armazenamento e silo-piloto



Figura 3.15: Célula de carga fixada ao cabo de termometria

3.3.8.1 Operação e execução dos ensaios no silo piloto

O modelo foi equipado de forma a realizar as operações de carregamento e descarregamento de forma automatizada, com exceção do nível do produto que é feito manualmente para avaliação de várias alturas de preenchimento, Figura 3.16. A Figura 3.17 mostra que o sistema inteiro possui dois silos, sendo um para os ensaios (silo-piloto) e outro para o armazenamento, no centro do conjunto está localizado um elevador de canecas para a operação de carregamento e descarregamento do silo.

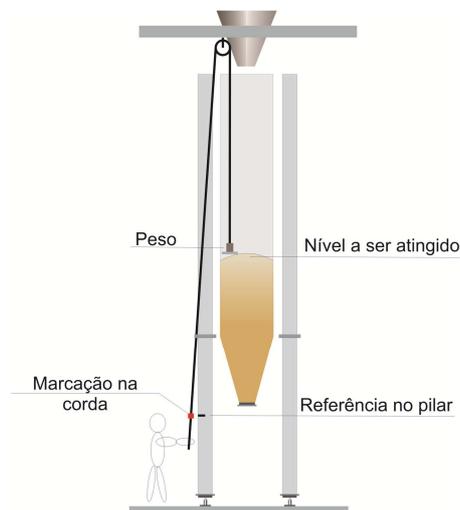


Figura 3.16: Controle do nível utilizado nos ensaios. Fonte: CHEUNG, 2007

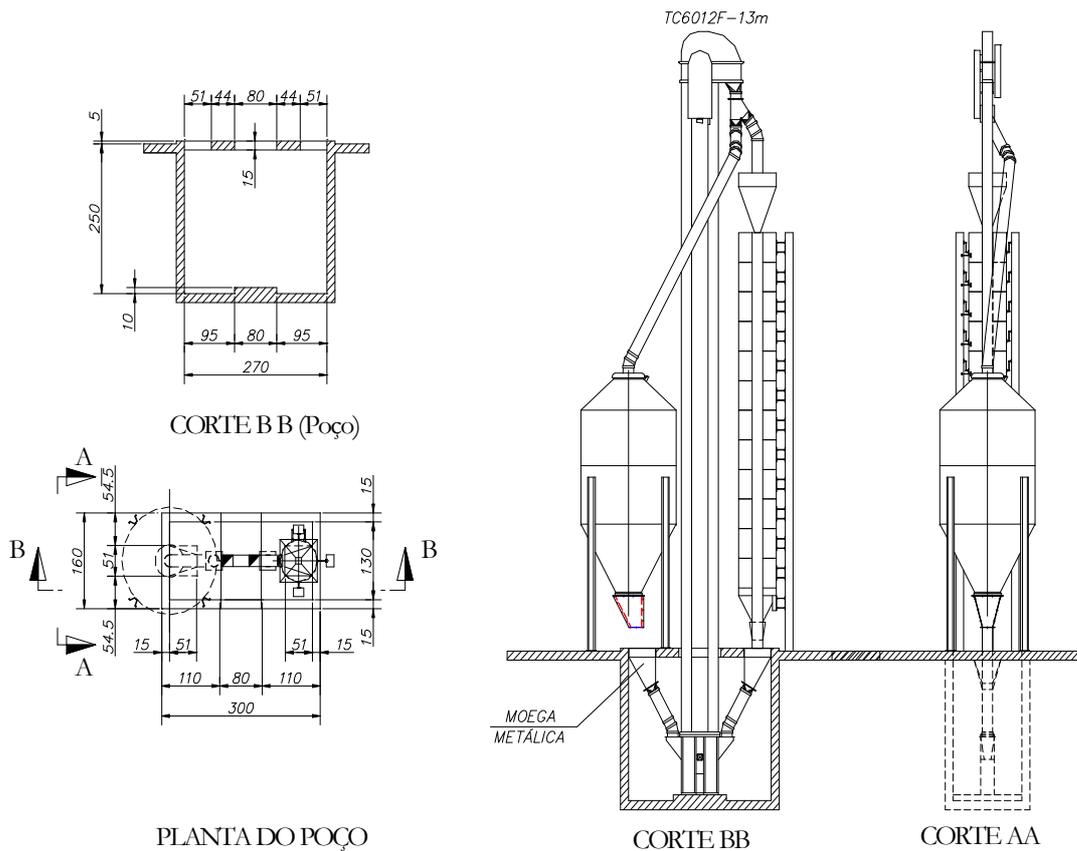


Figura 3.17 - Detalhe do sistema de operação dos ensaios. Fonte: CHEUNG, 2007

Os ensaios foram conduzidos com as seguintes configurações:

- relações de altura/diâmetro (H/D): 2,17 (3 anéis), 4,34 (6 anéis) e 7,08 (10 anéis);
- dois tipos de produtos: soja e milho;
- inclinação de tremonha: 15°;
- taxa de fluxo na operação de carregamento: 14,4 m³/h
- taxa de fluxo na operação de descarga: 4,5 m³/h
- tipo de parede: lisa.

3.3.8.2 Aquisição de dados do silo-piloto

A aquisição de dados foi realizada com um medidor de deformação KYOWA (SM-808) através de uma caixa Switching & Balancing (Kyowa SS-24R), Figura 3.18.

Para a medição da força de tração no cabo foi instalada uma célula de carga da série LT- C, modelo LT-1TC fabricada pela KYOWA, com capacidade de carga de 10 kN. A célula é constituída de um tubo interno de aço e quatro extensômetros montados na superfície em um arranjo de ponte completa de Wheatstone, Figura 3.19 e Figura 3.20.



Figura 3.18 – Sistema de Aquisição Kyowa

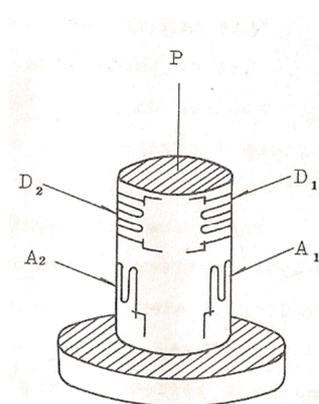


Figura 3.19 – Tubo interno com os 4 extensômetros

Fonte: Manual de Instrução KYOWA (1967)

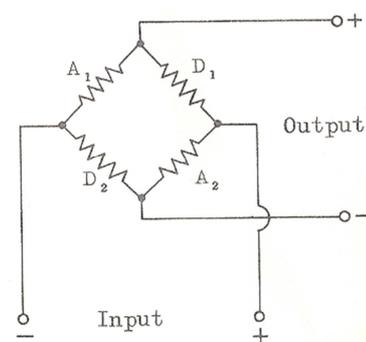


Figura 3.20 - Circuito em ponte completa Wheatstone

Fonte: Manual de Instrução KYOWA (1967)

Cada célula de carga está equipada com quatro cabos condutores de neoprene blindado, que são codificadas por cores, Figura 3.21. Na Tabela 3.3 são apresentadas as dimensões das células de carga da série LT-C.

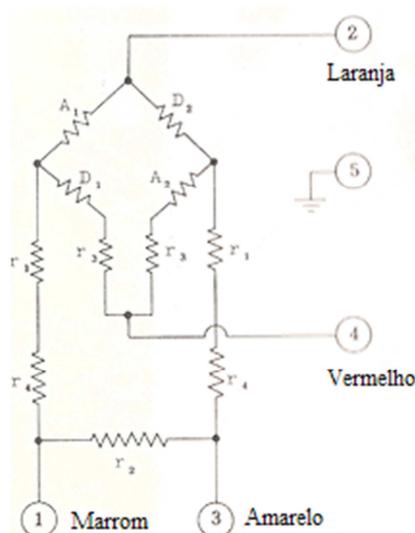


Figura 3.21 - Cabos condutores e sua codificação por cores. Fonte: Manual de Instrução KYOWA (1967)

Tabela 3.3 - Dimensões das células de carga da série LT-C. Fonte: Manual de Instrução KYOWA (1967)

		B	D	I	M	N
LT – 1TC	1	98	55	77	60	40

Nota: Dimensões em mm

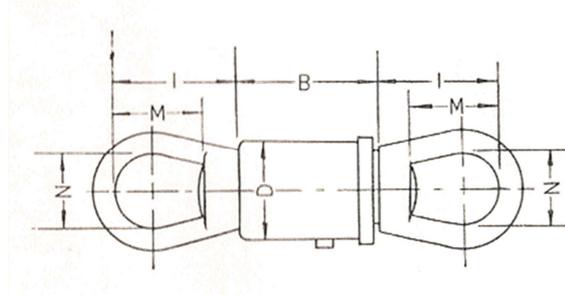


Figura 3.22: Desenho representativo da célula de carga. Fonte: Manual de Instrução KYOWA (1967)

A célula de carga foi aferida por regressão linear, o sensor foi submetido a um valor conhecido em unidade de engenharia utilizando a máquina universal de ensaios, AMSLER (Figura 3.23) e constituiu-se na aplicação de uma força de tração. A célula é conectada ao sistema de aquisição de dados para a leitura e comparação das forças de tração, Tabela 3.4, com esses pontos determina-se, por regressão linear, a melhor reta que passa por esses pontos e conseqüentemente calcula-se uma equação característica, ou seja, determinam-se os valores em unidades de engenharia correspondentes à deformação.

Tabela 3.4: Cargas de aferição e deformações correspondentes

Y: Força(kN)	X: Deformações		
	1ª Série	2ª Série	Média
0	0	0	0
1	370	360	365
2	650	640	645
3	920	920	920
4	1200	1190	1195
5	1470	1460	1465
6	1760	1760	1760
7	2050	2040	2045
8	2330	2320	2325
9	2620	2620	2620



Figura 3.23: Carregamento aplicado pela máquina universal

3.3.9 Ensaios no silo KW

Os ensaios em silos em escala real foram realizados no Grupo Kepler Weber, foram instalados equipamentos para aquisição de dados em um silo fundo plano, na cooperativa agropecuária COAMO em sua unidade em Toledo/PR.



Figura 3.24: Silo fundo plano KW. Fonte: Grupo Kepler Weber (2010)

A estrutura do telhado é constituída de longarinas estruturais galvanizadas ligadas a partir do colar central aos montantes garantindo maior rigidez e transferindo uniformemente

carregamentos, como vento, cabos de termometria, passarela e transportadores de carga. (CATALOGO KEPLER WEBER, 2011). As células foram posicionadas sob os suportes, sendo uma no cabo central do silo e outras quatro nos cabos radiais, o cabo central foi suspenso diretamente no colar central do silo devido à ausência de espalhador de grãos. Os suportes dos cabos de termometria são fixados nas longarinas do telhado do silo por meio de um elemento estrutural metálico, conforme ilustra a Figura 3.25, sendo esse elemento responsável pela transmissão da força resultante no topo do cabo para a longarina do telhado. As células de carga foram confeccionadas para carga máxima de 50 kN e adaptadas para esse suporte padrão, Figura 3.26, já o cabo central de termometria é fixado no espalhador de grãos, quando existente, ou diretamente no colar central. As Figura 3.27 e Figura 3.28 ilustram o posicionamento dos cabos de termometria no silo.

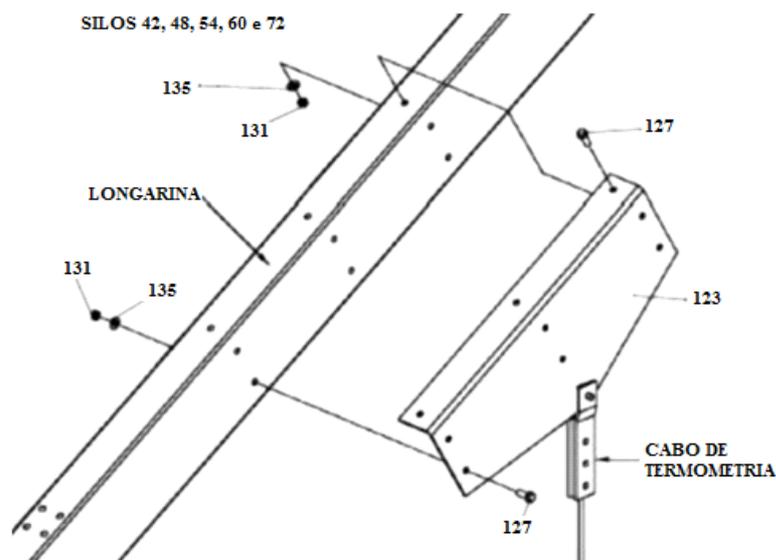


Figura 3.25 - Suporte do cabo fixado na longarina do telhado. Fonte: Grupo Kepler Weber (2009)



Figura 3.26 - Célula de carga adaptada para o suporte do cabo. Fonte: Grupo Kepler Weber (2009)

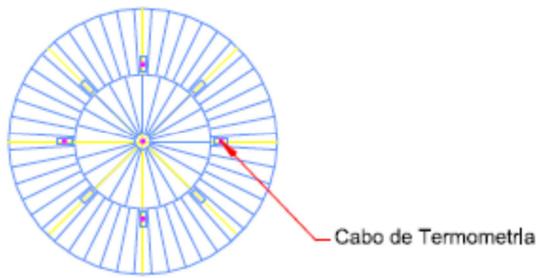


Figura 3.27 - Posicionamento dos cabos de termometria na cobertura. Fonte: Grupo Kepler Weber (2009)

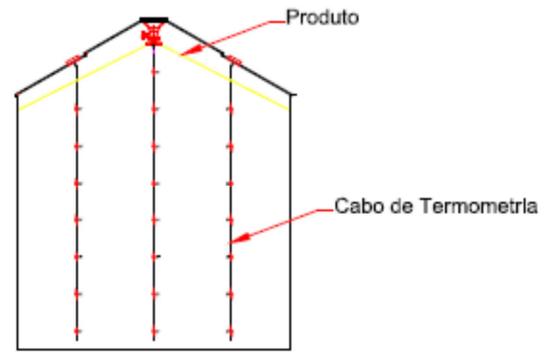
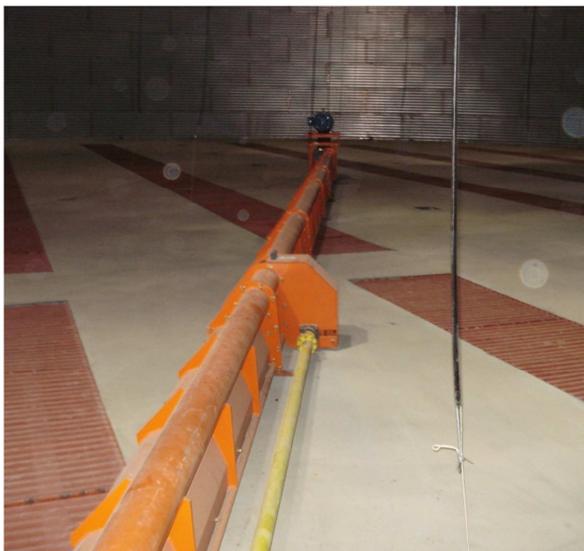


Figura 3.28 - Posicionamento dos cabos no silo. Fonte: Grupo Kepler Weber (2009)

A vinculação do cabo de termometria e a base do silo foi feita por uma corda (1 a 3 mm de espessura) ou fio de nylon, que é atada à extremidade do cabo de termometria e a um chumbador afixado à base, conforme mostrado em Figura 3.29 (a) e (b).



(a)



(b)

Figura 3.29 (a) e (b): Vinculação do cabo de termometria e a base do silo. Fonte: Grupo Kepler Weber (2011) ²

3.3.9.1 Aquisição de dados do silo

A aquisição dos dados foi realizada com um equipamento de medição automático (Data Logger), com as características indicadas abaixo:

- 05 módulos de entrada para ponte completa , com fonte de 5V estabilizada;
- 2 soquetes para saída de sinal/comunicação;
- Adaptador para rede elétrica, entrada 85 a 260 Vca, saída 12 Vcc;

²Grupo Kepler Weber (2011). Comunicação por correio eletrônico.

- Interface RS 232 com cabo de 1,5 metros;
- Memória de 520 kByte para, aproximadamente, 100 mil medidas.

As leituras foram realizadas durante as fases de carregamento e descarregamento dos silos e são armazenadas no *Data Logger*. A leitura dos dados pode ser feita in loco pelo programa computacional específico (AMR Control/AHLBORN) e computador portátil.

3.3.10 Cabos de Termometria

Os cabos pêndulos são fabricados especialmente para sistemas de termometria, sendo compostos de duas cordoalhas de aço especial, com alma de aço, sendo um cabo de fios de aço de torção para direita e outro para esquerda, Figura 3.30, para manter o cabo equilibrado e reto (sem torções) garantindo alta durabilidade quando submetido ao esforço de tração. Os cabos têm uma resistência à tração de ruptura de 15 ou 30 kN e permitem suportar os golpes de tração lateral exercidos pelos grãos quando ocorre o escoamento de grandes volumes de cereais (EMPRESA WIDITEC³, 2010) e são suspensos na cobertura do silo com o auxílio de um elemento de fixação, Figura 3.31.

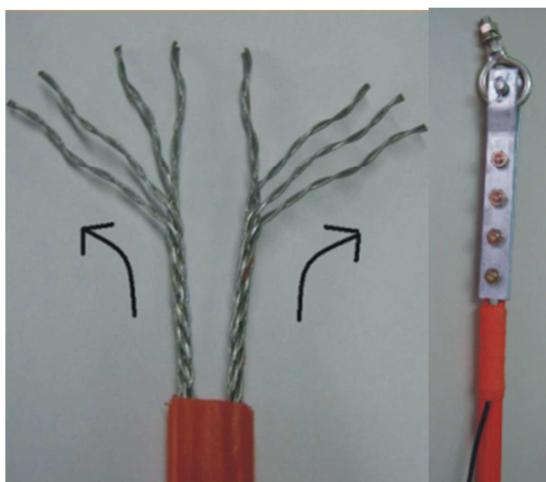


Figura 3.30 - Detalhes do cabo pêndulo
Fonte: Empresa Widitec (2010)³



Figura 3.31 - Cabo de Termometria e seu elemento de fixação
Fonte: Empresa NBRTec (2010)⁴

³ Empresa Widitec. Comunicação por correio eletrônico. (2010).

⁴ Empresa NBRTec - Eng. Ricardo Neutzling. Comunicação por correio eletrônico. (2010).

4

CAPÍTULO

Resultados e Discussões

Neste capítulo são analisados os resultados obtidos nos ensaios de propriedades físicas, nos ensaios para determinação dos esforços de tração em cabos no silo-piloto e em silos em grande escala e as pressões horizontais no silo-piloto obtidos em ensaios experimentais e em análises numéricas.

4.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1.1 RESULTADOS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

4.1.1.1 Ensaio de umidade

Os ensaios de umidade são apresentados nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2

Tabela 4.1: Resultados dos ensaios de umidade para a Soja

	Umidade (%)
Média	11,8
Desvio Padrão	4,1830
Máximo	12
Mínimo	11,7

Tabela 4.2: Resultados dos ensaios de umidade para o Milho

	Umidade (%)
Média	12,85
Desvio Padrão	0,1033
Máximo	13
Mínimo	12,6

4.1.1.2 Ângulo de repouso

Realizaram-se três testes seguindo procedimentos padrões da literatura para determinação do ângulo de repouso dos produtos, Figura 4.1. Os valores obtidos estão apresentados em Tabela 4.3 e Tabela 4.4.

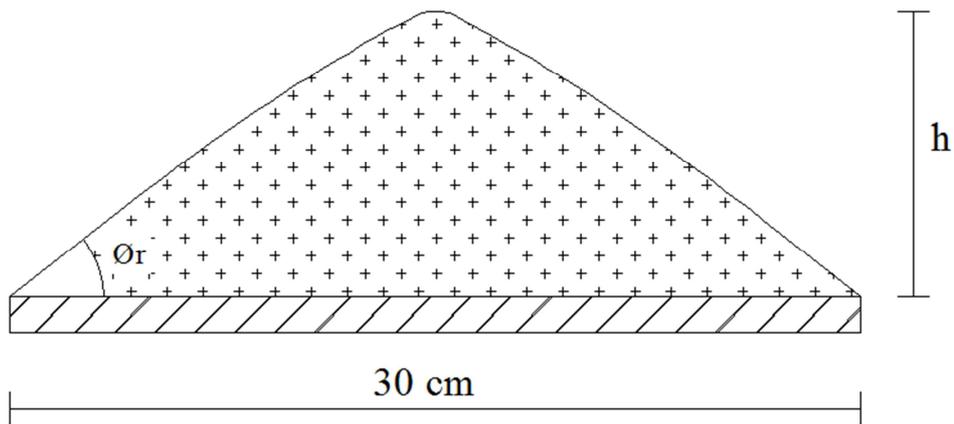


Figura 4.1: Determinação do ângulo de repouso

Tabela 4.3: Ângulo de repouso da Soja

	Diâmetro (cm)	h (cm)	Φ_r (°)
Teste 1	30	7,5	26,57
Teste 2	30	8,2	28,66
Teste 3	30	8,0	28,07
		Φ_r (°) Médio	27,77

Tabela 4.4: Ângulo de repouso do Milho

	Diâmetro (cm)	h (cm)	Φ_r (°)
Teste 1	30	6,4	23,12
Teste 2	30	6,2	22,46
Teste 3	30	6,2	22,46
		Φ_r (°) Médio	22,68

4.1.1.3 Ensaio de cisalhamento direto

Para análise das propriedades físicas, foi utilizado o programa desenvolvido no LaMEM para obtenção dos envoltórios de resistência, “Yield Locus”, conforme mostrado na Figura 4.2.

Os resultados obtidos para o peso específico (γ), coesão (c), ângulo de atrito interno (ϕ_i), ângulo de atrito interno efetivo (ϕ_e), resistência confinada (σ_1) e resistência incondfinada (σ_{ic}) estão apresentados na Tabela 4.5.e Tabela 4.6.

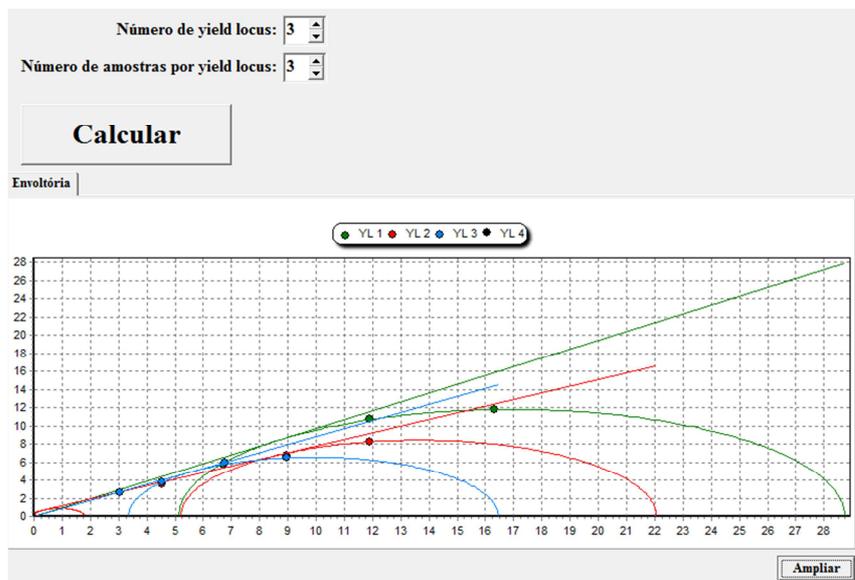
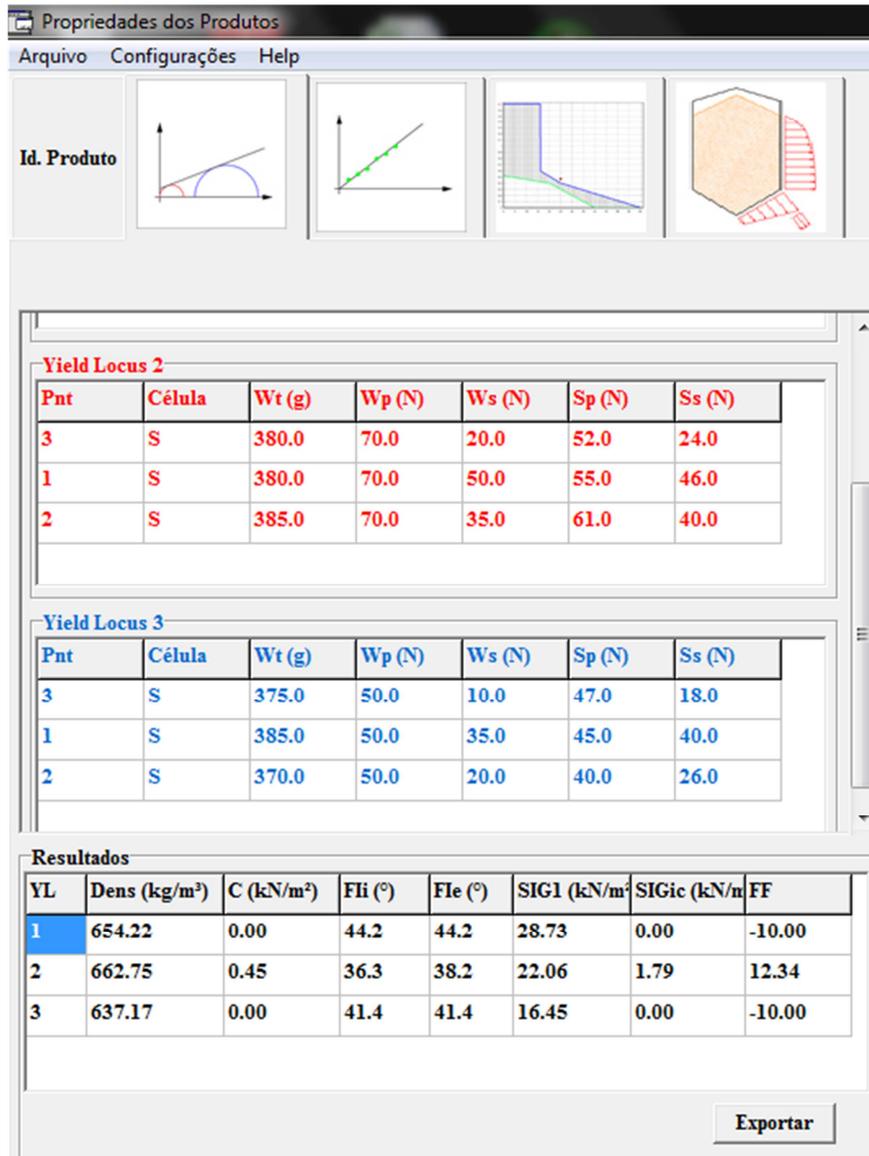


Figura 4.2: Programa de cálculo das propriedades físicas

Tabela 4.5: Propriedades Físicas da Soja

	γ (kg/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ_i (°)	ϕ_e (°)	σ_1 (kN/m ²)	σ_{ic} (kN/m ²)
Amostra 1	637,17	1,40	38,7	42,6	34,42	5,83
	637,17	1,65	29,5	0,0	0,00	5,66
	645,69	0,36	41,0	42,8	19,26	1,60
Amostra 2	654,22	0,00	44,2	44,2	28,74	0,00
	662,75	0,48	36,3	38,3	22,02	1,89
	637,17	0,00	41,4	41,4	16,47	0,00
Média	645,70	0,42	39,85	42,0	20,64	1,75

Tabela 4.6: Propriedades Físicas do Milho

	γ (kg/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ_i (°)	ϕ_e (°)	σ_1 (kN/m ²)	σ_{ic} (kN/m ²)
Amostra 1	705,37	0,24	32,1	32,9	25,83	0,87
	705,37	0,37	29,5	31,3	18,08	1,26
	713,90	1,14	19,7	26,5	13,98	3,25
Amostra 2	722,42	0,00	34,4	34,4	24,17	0,00
	730,95	0,19	31,0	31,8	19,52	0,67
	713,90	0,00	40,4	40,4	12,47	0,00
Média	715,32	0,22	31,55	32,35	18,8	0,77

4.1.1.4 Ângulo de atrito com a parede

Foram analisados os resultados obtidos para três diferentes tipos de paredes utilizando o programa desenvolvido no LaMEM, Figura 4.3. As Tabela 4.7 e Tabela 4.8 mostram os resultados para todas as paredes ensaiadas.

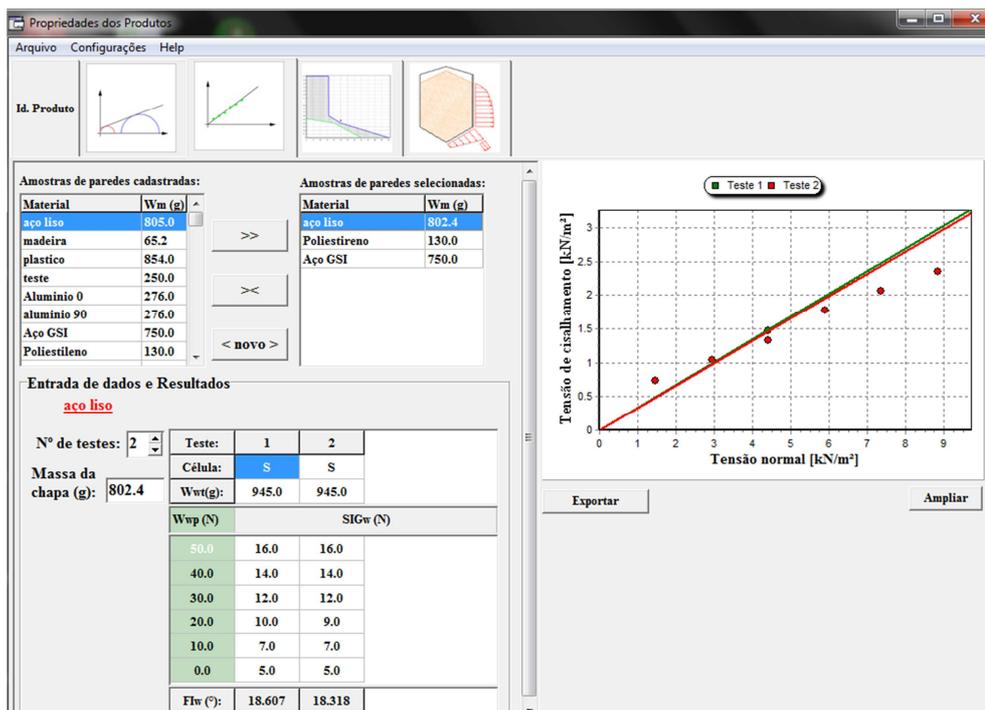


Figura 4.3: Programa de cálculo do ângulo de atrito

Tabela 4.7: Ângulo de atrito da soja com três tipos de parede

	Ângulo de atrito - ϕ_w (°)					
	Aço Liso		Aço Rugoso		Poliestileno	
	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2
Amostra 1	18,607	18,318	13,587	13,534	8,912	8,699
Amostra 2	18,819	18,780	14,326	14,535	11,436	11,178
Média	18,713	18,549	13,957	14,035	10,174	9,939
	18,631		13,996		10,057	

Tabela 4.8: Ângulo de atrito do milho com três tipos de parede

	Ângulo de atrito - ϕ_w (°)					
	Aço Liso		Aço Rugoso		Poliestileno	
	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2
Amostra 1	10,476	9,965	10,357	10,115	7,702	7,207
Amostra 2	9,395	9,226	11,354	10,753	9,132	8,537
Média	9,936	9,596	10,856	10,434	8,417	7,872
	9,766		10,645		8,145	

4.1.1.5 Tipo de Fluxo do Silo Piloto

Determinou-se o tipo de fluxo conforme a norma ISO 11697:1995, com o gráfico apresentado na Figura 1.2.

Figura 4.4: Classificação do tipo de fluxo

	Inclinação da Tremonha, α (°)	Ângulo de atrito com a parede, ϕ_w (°)	Tipo de Fluxo
Soja	15	18,63	Fluxo de Massa
Milho	15	10,06	Fluxo de Massa

4.1.2 RESULTADOS DOS ESFORÇOS DE TRAÇÃO NO CABO DE TERMOMETRIA SUSPENSO NO SILO - PILOTO

A seguir são apresentados os resultados dos esforços obtidos para a soja e o milho, Figura 4.5 a Figura 4.10 e analisados os resultados dos esforços de tração obtidos experimentalmente em quatro ensaios de carregamento e descarregamento do silo-piloto para três relações altura/diâmetro (H/D) e com uma taxa de descarga média de 4,4 m³/h.

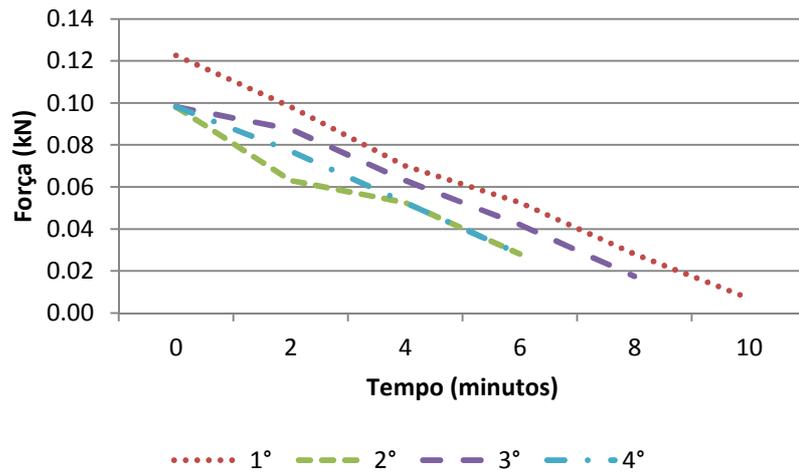


Figura 4.5: Esforços de tração durante o descarregamento da soja para H/D de 3 anéis

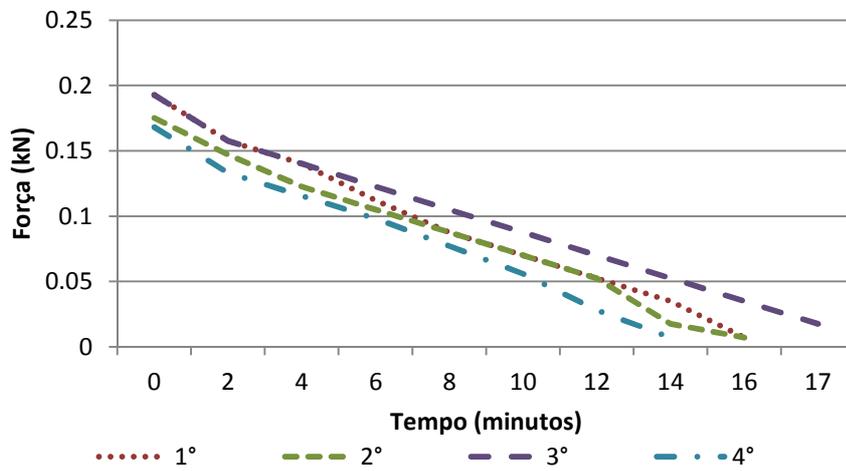


Figura 4.6: Esforços de tração durante o descarregamento da soja para H/D de 6 anéis

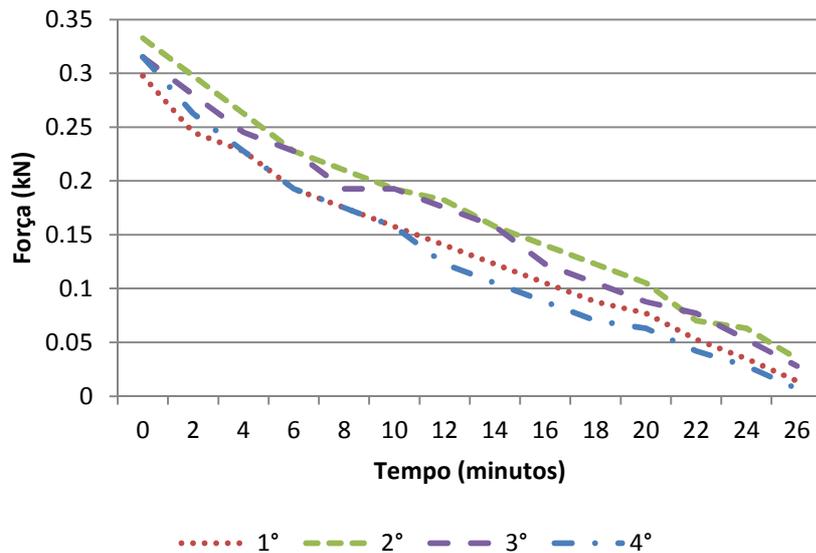


Figura 4.7: Esforços de tração durante o descarregamento da soja para H/D de 10 anéis

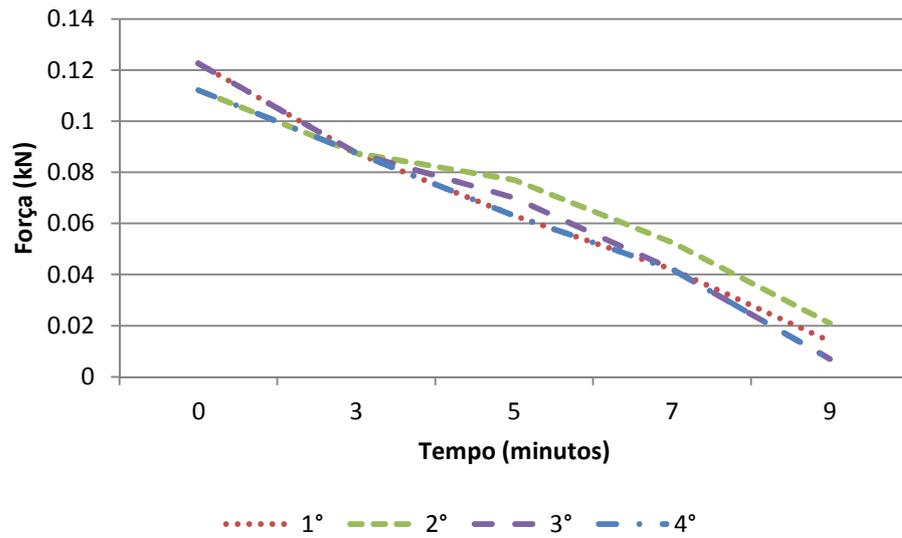


Figura 4.8: Esforços de tração durante o descarregamento do milho para H/D de 3 anéis

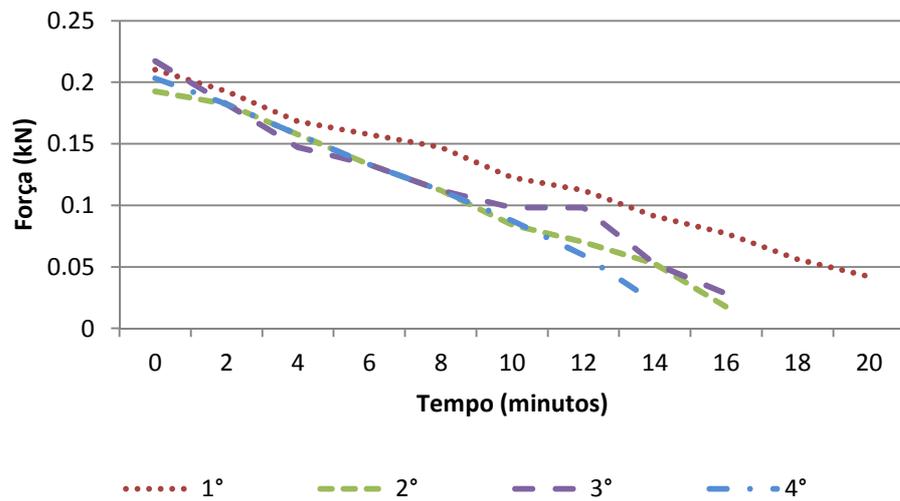


Figura 4.9: Esforços de tração durante o descarregamento do milho para H/D de 6 anéis

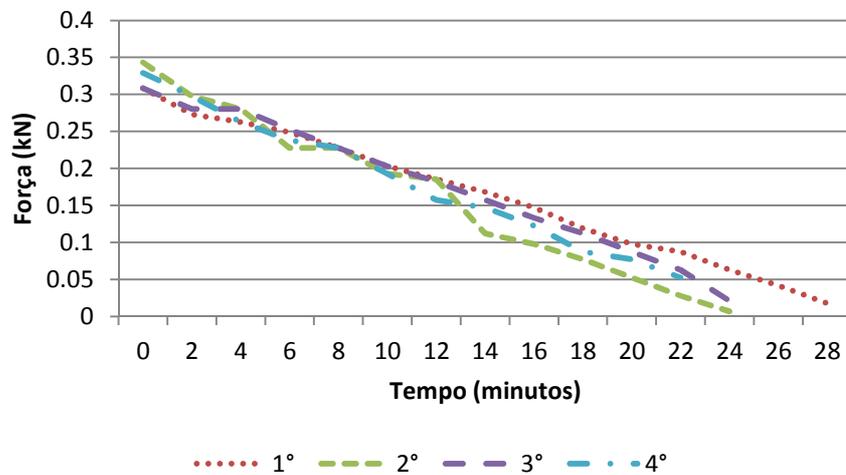


Figura 4.10: Esforços de tração durante o descarregamento do milho para H/D de 10 anéis

Durante a operação de carregamento o esforço máximo registrado foi 0,084 e 0,088 kN para o armazenamento de soja e milho, respectivamente.

Após o carregamento, os grãos foram deixados em repouso para permitir que as condições de pressão dentro da massa de grãos estabilizassem. Entretanto para o silo-piloto não foi observado um aumento considerável da carga durante esse período.

O esforço máximo obtido durante a operação de descarregamento para 3, 6, 10 anéis foi 0,123; 0,217 e 0,333 kN, respectivamente, para o silo piloto carregado com soja e 0,123; 0,217 e 0,343 kN para o silo carregado com milho. A carga máxima foi observada no início do descarregamento e o comprimento imerso influenciou significativamente no esforço de tração nos cabos de termometria, como pode ser observado em Figura 4.11 e Figura 4.12.

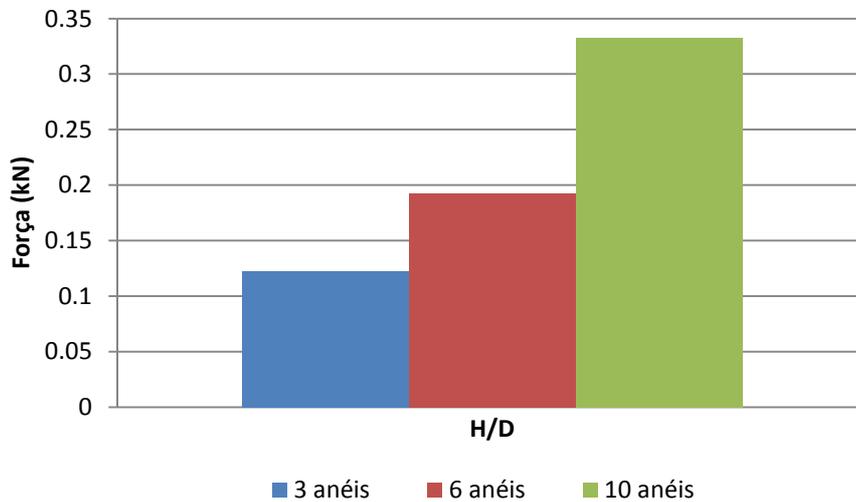


Figura 4.11: Influência da relação H/D para o silo-piloto carregado de soja

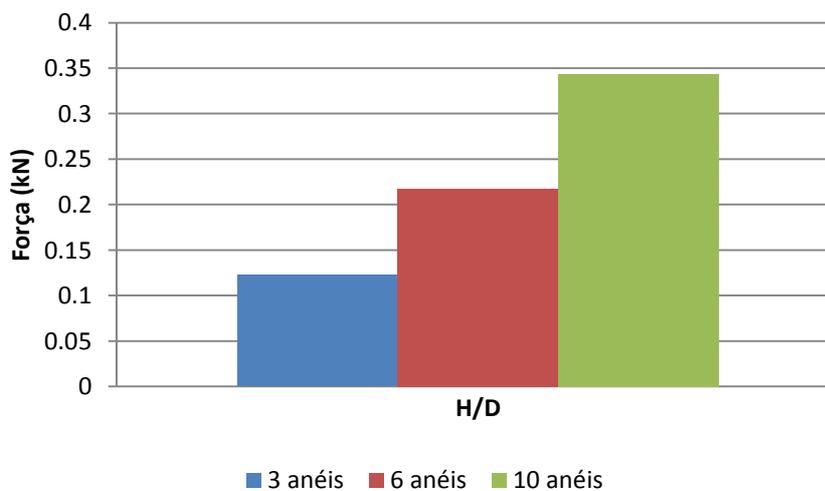


Figura 4.12: Influência da relação H/D para o silo-piloto carregado de milho

4.1.3 RESULTADOS DOS ESFORÇOS DE TRAÇÃO NOS CABOS DE TERMOMETRIA SUSPENSOS NO SILO DO GRUPO KEPLER WEBER

As células de carga foram instaladas nos cabos de termometria no silo modelo 4815, fundo plano, nas posições onde os cabos de termometria encontravam-se inicialmente posicionados e numerados conforme a Figura 4.13. O silo foi carregado com soja e a leitura dos dados foi realizada pelo programa computacional AMR Control/AHLBORN, os dados são apresentados na Figura 4.15.

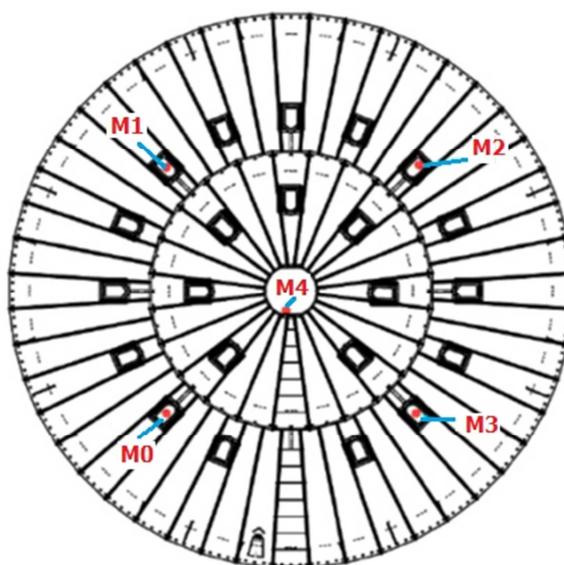


Figura 4.13 - Posição dos cabos de termometria no silo modelo 4815. Fonte: Grupo Kepler Weber (2009)

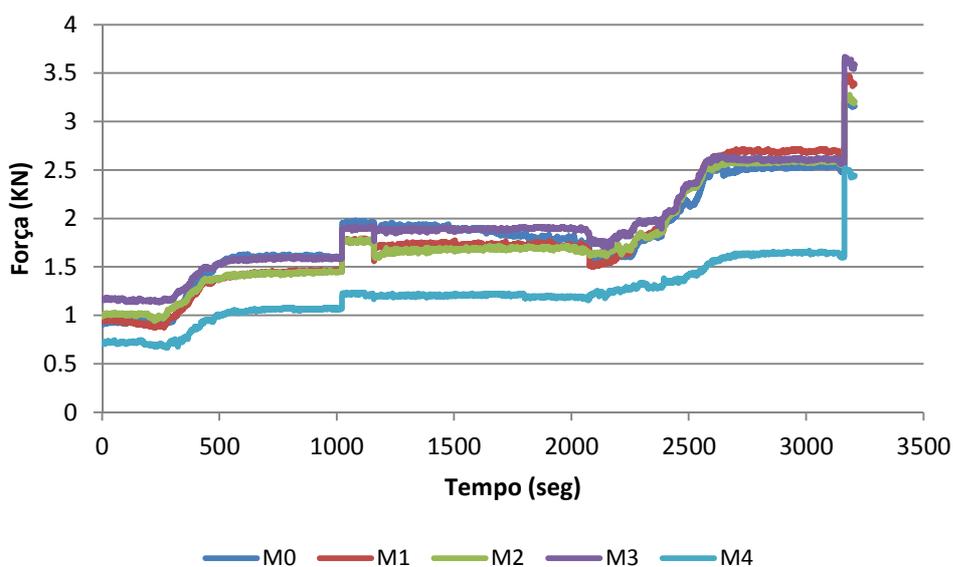


Figura 4.14: Esforços de tração durante a operação de carregamento de soja no silo do Grupo Kepler Weber

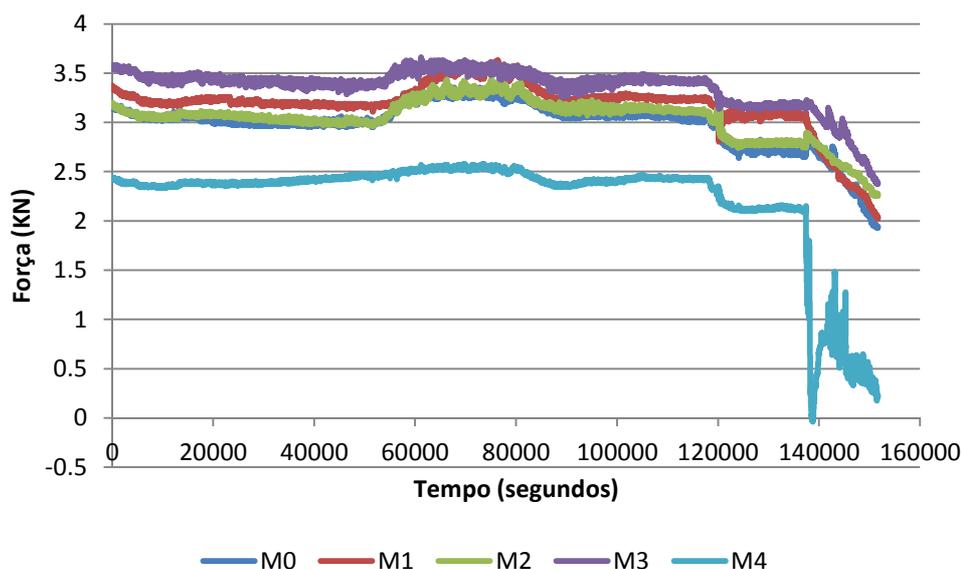


Figura 4.15: Esforços de tração durante a operação de descarregamento de soja no silo do Grupo Kepler Weber

A Tabela 4.9 apresenta os valores máximos para os esforços de tração obtidos durante as operações de carregamento e descarregamento do silo nos cinco pontos indicados na Figura 4.13. Os valores máximos durante a operação de carregamento foram observados no final da operação e durante o descarregamento foram observados no início.

Tabela 4.9: Valores máximos dos esforços de tração nos cabos de termometria

CARREGAMENTO				
M0 (kN)	M1 (kN)	M2 (kN)	M3 (kN)	M4 (kN)
3,246	3,472	3,275	3,668	2,520
DESCARREGAMENTO				
M0 (kN)	M1 (kN)	M2 (kN)	M3 (kN)	M4 (kN)
3,393	3,628	3,442	3,658	2,579

Encontrou-se que a carga vertical nos cabos próximos à parede é maior do que a carga no cabo central, como observado por SCHWAB et al. (1991). O esforço de tração máximo foi registrado nos primeiros minutos da operação de descarregamento. Os esforços nos cabos mais próximos da parede foram 1,4 vezes maiores do que o esforço no cabo central. A diferença das magnitudes dos esforços de tração entre as posições radiais deve-se a variação das pressões nas posições radiais e velocidade dos grãos durante o descarregamento.

4.2 ANÁLISE TEÓRICA

Nesta seção são analisados os resultados dos esforços de tração obtidos teoricamente durante o descarregamento do silo-piloto e do silo do grupo Kepler Weber segundo quatro teorias. Os valores apresentados na Tabela 4.10 foram os resultados das propriedades físicas determinadas pelos ensaios e utilizados para os cálculos teóricos e análise numérica.

Tabela 4.10: Valores de propriedades físicas utilizadas em análise teórica

		Soja	Milho
Peso Específico - γ (kg/m³)	Inferior	637,17	705,37
	Médio	645,70	715,32
	Superior	654,22	730,95
Ângulo de atrito interno - ϕ_i (°)	Inferior	29,5	19,7
	Médio	39,85	31,55
	Superior	44,2	40,4
Ângulo de atrito interno efetivo - ϕ_e (°)	Inferior	38,3	26,5
	Médio	42,0	32,35
	Superior	44,2	40,4
Ângulo de atrito com a parede lisa - ϕ_w (°)	Inferior	18,318	8,912
	Médio	18,631	10,057
	Superior	18,819	11,436
Ângulo de atrito com o cabo - $\phi_{w,c}$ (°)	Inferior	9,226	7,207
	Médio	9,766	8,145
	Superior	10,476	9,132
Coesão - c (KN/m²)	Inferior	0,00	0,00
	Médio	0,42	0,22
	Superior	1,65	1,14
Ângulo de atrito com a parede ondulada lisa - ϕ_{we} (°)	Inferior	10,787	7,033
	Médio	11,895	8,422
	Superior	13,051	10,228

4.2.1 Silo-Piloto

Para o cálculo do esforço de tração do cabo de termometria suspenso na cobertura do silo-piloto foram utilizadas as dimensões apresentadas em Tabela 4.11 a Tabela 4.13.

Tabela 4.11: Dimensões do silo - piloto com tremonha

D (m)	Altura do corpo (m)	Altura da tremonha (m)	Inclinação da tremonha (°)
0,706	6	1	15

Tabela 4.12: Relação altura/ diâmetro do silo-piloto

	H/D	z (m)
3 anéis	2,17	2,5
6 anéis	4,34	4
10 anéis	7,08	6

Tabela 4.13: Dimensões do cabo de termometria

	Diâmetro (m)	Diâmetro equivalente (m)	Comprimento (m)	Perímetro (m)
Formato Oval	0,02	0,0134	8	0,0974
	0,009			

O silo-piloto possui relação entre altura e o diâmetro, H/D, maior do que 1,5, portanto é classificado como silo esbelto. Multiplicando os valores obtidos nas expressões pelo valor da aceleração da gravidade, obtém-se, T, expresso em newton. Adota-se como valor da aceleração da gravidade $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ para conversão das unidades no SI (Sistema Internacional de Unidades).

- REIMBERT e REIMBERT (1971)

$$A = \frac{D}{4 \cdot tg\phi_w \cdot \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2}\right)} - \frac{D}{6} \cdot \tan\phi_i \quad (34)$$

$$T = \gamma \cdot R \cdot d \cdot \frac{\tan\phi_{w,c}}{\tan\phi_w} \cdot \frac{z^2}{z + A} \quad (35)$$

Tabela 4.14: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo REIMBERT e REIMBERT (1971)

		SOJA		
	A (m)	3 anéis	6 anéis	10 anéis
Inferior	1,501	0,058	0,108	0,179
Médio	2,293	0,051	0,099	0,170
Superior	2,788	0,049	0,097	0,169
		MILHO		
Inferior	2,228	0,089	0,174	0,296
Médio	3,107	0,076	0,153	0,268
Superior	3,986	0,064	0,134	0,241

Nota: Valores em kN

- ATKINSON et al. (1983)

$$A = \frac{D}{4 \cdot \operatorname{tg} \phi_w \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right)} - \frac{D}{6} \cdot \tan \phi_i \quad (36)$$

$$F = \pi \cdot d \cdot \mu_{w,c} \cdot K \cdot \gamma \cdot A^2 \left(\frac{z}{A} + \exp^{-z/A} - 1 \right) \quad (37)$$

Tabela 4.15: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo ATKINSON et al. (1983)

		SOJA		
	A (m)	3 anéis	6 anéis	10 anéis
Inferior	1,347	0,093	0,186	0,319
Médio	1,488	0,100	0,202	0,351
Superior	1,650	0,106	0,219	0,385
		MILHO		
Inferior	1,833	0,117	0,244	0,436
Médio	1,924	0,122	0,257	0,461
Superior	2,271	0,133	0,286	0,526

Nota: Valores em kN

- Norma Argentina IRAM 8 015:1977

Cálculo de L_1

$$L_1 = \frac{D}{2 \cdot \tan \phi_w \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right)} \quad (38)$$

Sendo $z \leq L_1$

$$T = 1,4 \cdot d \cdot \gamma \cdot \tan \phi_{w,c} \left[0,84 \cdot z^2 \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right) + 0,27 \cdot \frac{D \cdot z}{\tan \phi_w} \right] \quad (39)$$

Tabela 4.16: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo a norma IRAM 8 015: 1977

		SOJA		
	L_1 (m)	3 anéis	6 anéis	10 anéis
Inferior	3,135	0,086	0,193	0,402
Médio	4,782	0,080	0,163	0,334
Superior	5,805	0,080	0,151	0,307
		MILHO		
Inferior	4,541	0,111	0,235	0,470
Médio	6,359	0,106	0,194	0,384
Superior	8,173	0,103	0,164	0,322

Nota: Valores em kN

- SCHWAB et al. (1991)

$$T = F_{tc} \cdot \frac{\pi \cdot \mu_{w,e} \cdot D_{tc} \cdot R \cdot \gamma}{\mu_w} \left\{ z + \frac{R}{\mu_w \cdot k} \left[\exp \left(-\frac{k \cdot \mu_w \cdot z}{R} \right) - 1 \right] \right\} \quad (40)$$

Tabela 4.17: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo SCHWAB et al. (1991)

SOJA			
	3 anéis	6 anéis	10 anéis
Inferior	0,046	0,087	0,144
Médio	0,045	0,086	0,143
Superior	0,043	0,084	0,141
MILHO			
Inferior	0,087	0,174	0,298
Médio	0,077	0,154	0,265
Superior	0,064	0,132	0,232

Nota: Valores em kN

4.2.2 Silo Grupo Kepler Weber

Para o cálculo dos esforços de tração dos cabos de termometria, suspensos no centro da cobertura do silo fundo plano, foram utilizadas as dimensões apresentadas na Tabela 4.18 e desconsiderado o fator de multiplicação, que representa o efeito dinâmico produzido durante a descarga. De acordo com CALIL e CHEUNG (2007), para o caso de paredes de chapa ondulada ou trapezoidal, o coeficiente de atrito efetivo pode ser um modelo ponderado pelas superfícies de deslizamento, calculado conforme a equação abaixo:

$$\mu_{ef} = \frac{b_e}{b_e + b_w} \tan \phi_e + \frac{b_w}{b_e + b_w} \cdot \mu_w \quad (41)$$

onde

$$b_e + b_w = 1$$

Tabela 4.18: Dimensões do silo fundo plano, modelo 4815

Diâmetro (m)	Altura Total (m)	Altura do Corpo (m)	Volume total (m³)	H/D	z (m)	Raio Hidráulico (m)
14,55	18,14	13,82	2508,3	1,21	17,7	3,64

O silo fundo plano possui relação entre altura e o diâmetro, H/D, menor do que 1,5, portanto é classificado como silo baixo.

- REIMBERT e REIMBERT (1971)

$$A = \frac{D}{4 \cdot \operatorname{tg} \phi_w \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right)} - \frac{D}{6} \cdot \tan \phi_i \quad (42)$$

$$T = \gamma \cdot R \cdot d \cdot \frac{\tan \phi_{w,c}}{\tan \phi_w} \cdot \frac{z^2}{z + A} \quad (43)$$

Tabela 4.19: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo REIMBERT e REIMBERT (1971)

	Tração (kN)	
	A	M04
Inferior	47,279	7,890
Médio	67,673	5,947
Superior	76,667	5,395

- ATKINSON (1983)

$$A = \frac{D}{4 \cdot \operatorname{tg} \phi_w \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right)} - \frac{D}{6} \cdot \tan \phi_i \quad (44)$$

$$F = \pi \cdot d \cdot \mu_{w,c} \cdot K \cdot \gamma \cdot A^2 \left(\frac{z}{A} + \exp^{-z/A} - 1 \right) \quad (45)$$

Tabela 4.20: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo ATKINSON et al.(1983)

	Tração (kN)	
	A	M04
Inferior	28,093	5,396
Médio	31,019	5,887
Superior	34,390	6,479

- Norma Argentina IRAM 8 015:1977

Cálculo de L1

$$L_1 = \frac{D}{2 \cdot \tan \phi_w \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right)} \quad (46)$$

Sendo $z \leq L_1$

$$T = 1,4 \cdot d \cdot \gamma \cdot \tan \phi_{w,c} \left[0,84 \cdot z^2 \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right) + 0,27 \cdot \frac{D \cdot z}{\tan \phi_w} \right] \quad (47)$$

Tabela 4.21: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo a norma IRAM 8 015: 1977

	Tração (kN)	
	L ₁	M04
Inferior	112,273	6,397
Médio	157,752	6,066
Superior	175,891	6,041

- SCHWAB et al. (1991)

$$T = F_{tc} \cdot \frac{\pi \cdot \mu_{w,e} \cdot D_{tc} \cdot R \cdot \gamma}{\mu_w} \left\{ z + \frac{R}{\mu_w \cdot k} \left[\exp\left(-\frac{k \cdot \mu_w \cdot z}{R}\right) - 1 \right] \right\} \quad (48)$$

Tabela 4.22: Esforços de tração nos cabos de termometria segundo SCHWAB et al. (1991)

Tração (kN)	
M04	
Inferior	2,386
Médio	2,296
Superior	2,224

Para análise da influência da relação altura/diâmetro foi realizado o cálculo teórico dos esforços de tração nos silos comerciais fundos planos do Grupo Kepler Weber disponíveis no catálogo da empresa, considerando os valores médios para as propriedades físicas disponíveis na Tabela 4.10. A altura, H, refere-se à altura do corpo do silo e a profundidade, z, é o comprimento do cabo imerso nos grãos. Na

Tabela 4.23 para o cálculo dos esforços de tração nos cabos de termometria selecionou-se silos com diferentes diâmetro e altura.

Tabela 4.23: Esforços de tração em silos do Grupo Kepler Weber variando altura e diâmetro

Modelo	D(m)	H(m)	H/D	z (m)	ESFORÇOS DE TRAÇÃO (kN)			
					REIMBERT	IRAM	SCHWAB	ATKINSON
					T	T	T	T
1202	3,63	1,94	0,62	2,91	0,204	0,345	0,076	0,205
1502	4,55	2,85	0,72	4,06	0,393	0,618	0,146	0,398
1802	5,46	3,76	0,78	5,22	0,641	0,966	0,240	0,652
2104	6,36	4,68	0,82	6,38	0,950	1,391	0,357	0,970
2404	7,28	5,59	0,86	7,53	1,319	1,895	0,496	1,350
3005	9,1	6,51	0,80	8,94	1,873	2,776	0,702	1,909
3306	10	6,51	0,74	9,18	1,995	3,085	0,745	2,024
3606	10,91	7,42	0,77	10,33	2,516	3,816	0,942	2,559
4208	12,72	8,34	0,74	11,73	3,258	5,023	1,218	3,307
4815	14,55	9,25	0,72	13,13	4,094	6,400	1,528	4,150
5410	16,37	10,17	0,71	14,54	5,029	7,943	1,876	5,092
6010	18,19	11,08	0,70	15,93	6,053	9,646	2,256	6,122
7210	21,83	11,99	0,64	17,81	7,641	12,755	2,837	7,692
9016	27,28	14,74	0,63	22,01	11,690	19,658	4,337	11,760
10516	31,83	15,65	0,58	24,14	14,167	24,848	5,240	14,196

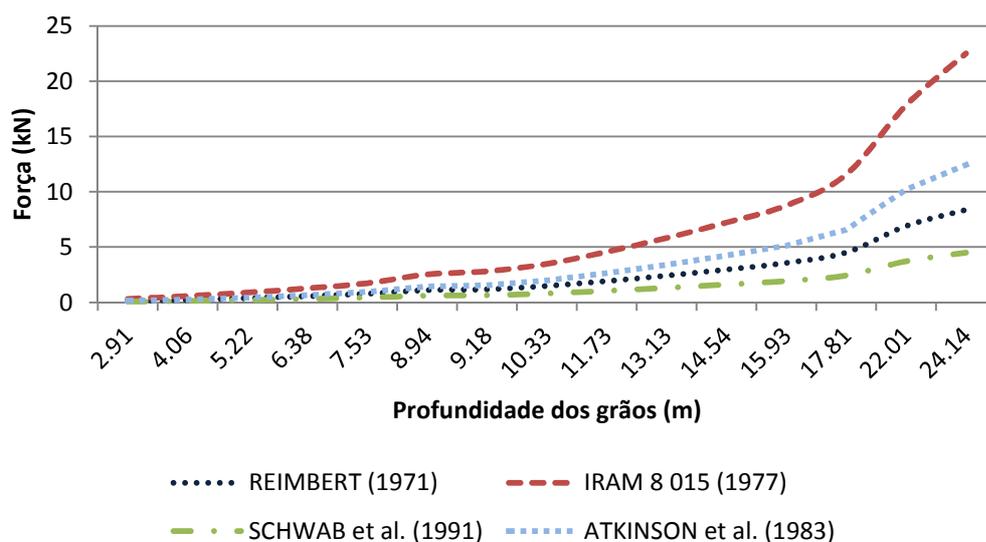


Figura 4.16: Esforços de tração de acordo com as quatro teorias propostas com variação na profundidade dos grãos e do diâmetro

Na Figura 4.16 observa-se que a magnitude da carga vertical aplicada nos cabos é proporcional ao aumento do comprimento imerso nos grãos e do diâmetro. Na

Tabela 4.24 manteve-se constante o diâmetro dos silos e variou-se a altura do corpo, observou-se que L_1 e abscissa característica, A , ficaram constantes, pois são funções somente do diâmetro.

Tabela 4.24: Esforços de tração em silos do Grupo Kepler Weber variando altura e diâmetro constante

Modelo	D(m)	H(m)	H/D	z (m)	ESFORÇOS DE TRAÇÃO (kN)			
					REIMBERT	IRAM	SCHWAB	ATKINSON
					T	T	T	T
4808	14,55	7,42	0,60	11,3	3,10	5,34	1,15	3,11
4809	14,55	8,34	0,66	12,22	3,58	5,87	1,33	3,61
4810	14,55	9,25	0,72	13,13	4,09	6,40	1,53	4,15
4811	14,55	10,17	0,79	14,05	4,64	6,95	1,74	4,73
4812	14,55	11,08	0,85	14,96	5,21	7,51	1,96	5,33
4813	14,55	11,99	0,91	15,87	5,80	8,09	2,19	5,97
4814	14,55	12,91	0,98	16,79	6,43	8,68	2,44	6,64
4815	14,55	13,82	1,04	17,7	7,08	9,28	2,69	7,35
4816	14,55	14,74	1,10	18,62	7,76	9,90	2,96	8,09
4817	14,55	15,65	1,16	19,53	8,46	10,53	3,24	8,85
4818	14,55	16,57	1,23	20,45	9,18	11,17	3,53	9,65
4819	14,55	17,48	1,29	21,36	9,93	11,83	3,82	10,48
4820	14,55	18,39	1,35	22,27	10,69	12,49	4,13	11,33
4821	14,55	19,31	1,42	23,19	11,49	13,18	4,45	12,23
4822	14,55	20,22	1,48	24,1	12,29	13,87	4,78	13,14

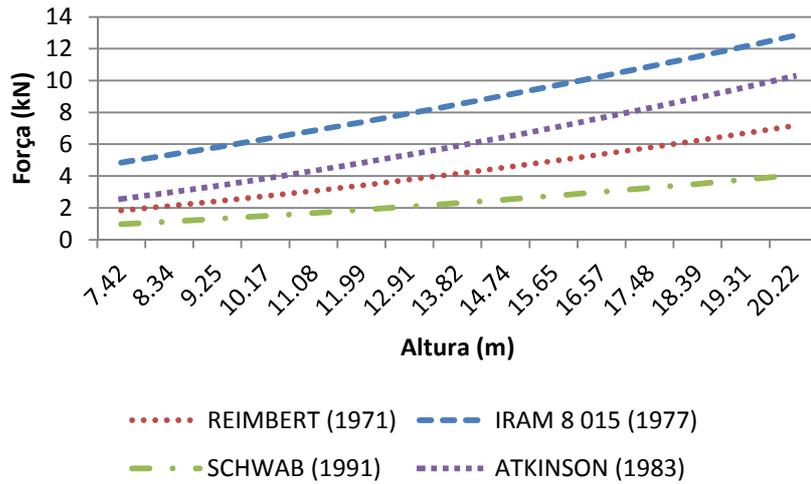


Figura 4.17: Esforços de tração de acordo com as quatro teorias proposta com diâmetro constante

As curvas das equações de REIMBERT e REIMBERT (1971), IRAM 8 015 (1977) e ATKINSON et al. (1983) possuem o mesmo comportamento com o aumento da altura do corpo do silo, ou seja, aumento do comprimento do cabo imerso nos grãos, Figura 4.17.

Tabela 4.25: Esforços de tração em silos do Grupo Kepler Weber variando diâmetro e altura constante

Modelo	D(m)	H(m)	H/D	z (m)	ESFORÇOS DE TRAÇÃO (kN)			
					REIMBERT	IRAM	SCHWAB	ATKINSON
					T	T	T	T
4808	5,46	7,42	1,45	8,88	1,26	1,76	0,55	1,40
4809	6,36	7,42	1,26	9,12	1,38	2,01	0,59	1,51
4810	7,28	7,42	1,11	9,36	1,50	2,29	0,64	1,63
4811	9,1	7,42	0,90	9,85	1,74	2,86	0,72	1,86
4812	10	7,42	0,83	10,09	1,86	3,16	0,76	1,97
4813	10,91	7,42	0,77	10,33	1,98	3,47	0,81	2,08
4814	12,72	7,42	0,67	10,81	2,22	4,13	0,89	2,32
4815	14,55	7,42	0,60	11,30	2,47	4,84	0,98	2,56

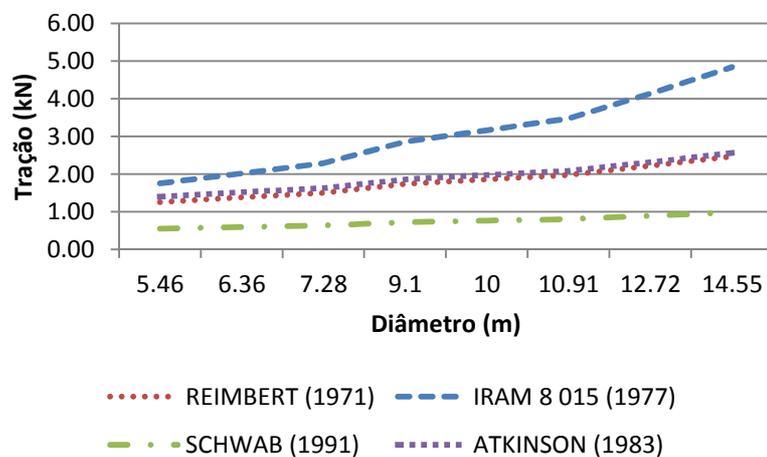


Figura 4.18: Esforços de tração de acordo com as quatro teorias proposta com altura constante

As curvas das equações de REIMBERT e REIMBERT (1971) e de ATKINSON et al. (1983) possuem o mesmo comportamento com o aumento do diâmetro do silo, Figura 4.18. Observa-se que a magnitude do esforço de tração é proporcional ao aumento do diâmetro.

4.3 ANÁLISE EXPERIMENTAL X TEÓRICA

4.3.1 Silo Piloto

A Tabela 4.26 e a Tabela 4.27 apresentam os valores dos esforços de tração experimental e teórico para uma análise comparativa.

Tabela 4.26: Comparação dos esforços de tração experimental e teórico no silo – piloto em kN para a Soja

		Experimental	Teórico			
			REIMBERT	NORMA	SCHWAB	ATKINSON
3 anéis	Inferior	0,098	0,051	0,080	0,043	0,093
	Médio	0,102	0,049	0,083	0,045	0,100
	Superior	0,123	0,058	0,086	0,046	0,106
6 anéis	Inferior	0,168	0,097	0,151	0,084	0,256
	Médio	0,184	0,099	0,163	0,086	0,267
	Superior	0,193	0,108	0,193	0,087	0,278
10 anéis	Inferior	0,298	0,169	0,307	0,141	0,476
	Médio	0,306	0,170	0,334	0,143	0,499
	Superior	0,333	0,179	0,402	0,144	0,523

Tabela 4.27: Comparação dos esforços de tração experimental e teórico no silo – piloto em kN para o Milho

		Experimental	Teórico			
			REIMBERT	NORMA	SCHWAB	ATKINSON
3 anéis	Inferior	0,112	0,064	0,103	0,064	0,117
	Médio	0,116	0,076	0,106	0,077	0,122
	Superior	0,123	0,090	0,111	0,087	0,133
6 anéis	Inferior	0,193	0,134	0,164	0,132	0,244
	Médio	0,207	0,153	0,194	0,154	0,257
	Superior	0,217	0,174	0,235	0,174	0,286
10 anéis	Inferior	0,308	0,241	0,322	0,232	0,436
	Médio	0,319	0,268	0,384	0,265	0,461
	Superior	0,343	0,296	0,470	0,298	0,526

Com base nos resultados observa-se que a equação proposta por ATKINSON et al. (1983) fornece uma estimativa mais adequada para a determinação da magnitude da carga vertical no cabo de termometria comparada com os valores obtidos pelas demais expressões propostas para o silo carregado até o terceiro anel, porém para os outros carregamentos a equação proposta pela norma IRAM 8 015: 1977 fornece valores mais próximos dos valores obtidos experimentalmente.

4.3.2 Silo Grupo Kepler Weber, modelo 4815

A Tabela 4.28 apresenta os valores máximos dos esforços de tração experimental e teórico no ponto central do silo para uma análise comparativa, Figura 4.19.

Tabela 4.28: Comparação dos esforços de tração experimental e teórico no silo, em kN

	Experimental	Teórico			
		REIMBERT	NORMA	SCHWAB	ATKINSON
M04	2,579	8,163	7,060	2,933	7,138

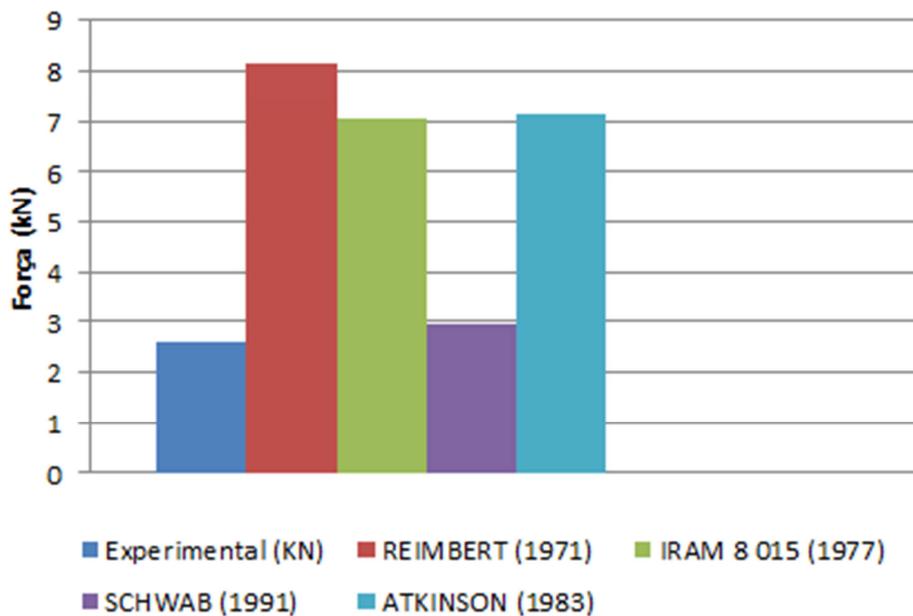


Figura 4.19: Análise comparativa do esforço de tração do cabo no centro do silo do Grupo Kepler Weber

Observa-se pela Figura 4.19 que a equação proposta por SCHWAB et al (1991) é a que fornece um valor mais próximo do esforço de tração medido *in loco* pelo Grupo Kepler Weber.

4.4 ANÁLISE NUMÉRICA

Nesta seção são analisados os valores das pressões horizontais no silo-piloto obtidos pela análise numérica através do pacote computacional ANSYS. No trabalho de ATKINSON et al. (1983) foi apresentado o estudo sobre as forças em obstáculos suspensos em material granular, baseado no modelo de Janssen e de Walker. O autor apresentou a distribuição de tensão em um cilindro longo, como mostrado na Figura 4.20.

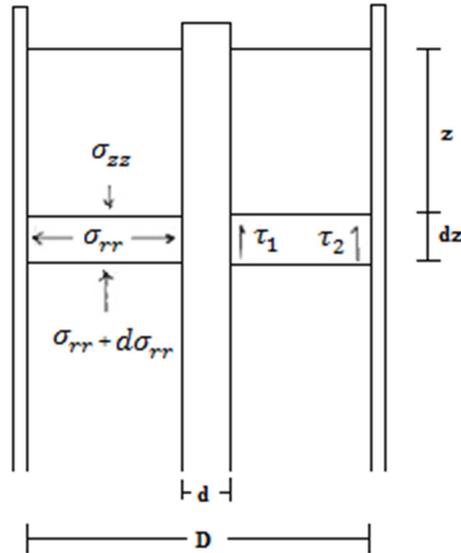


Figura 4.20: Equilíbrio de forças. Fonte ATKINSON et al. (1983)

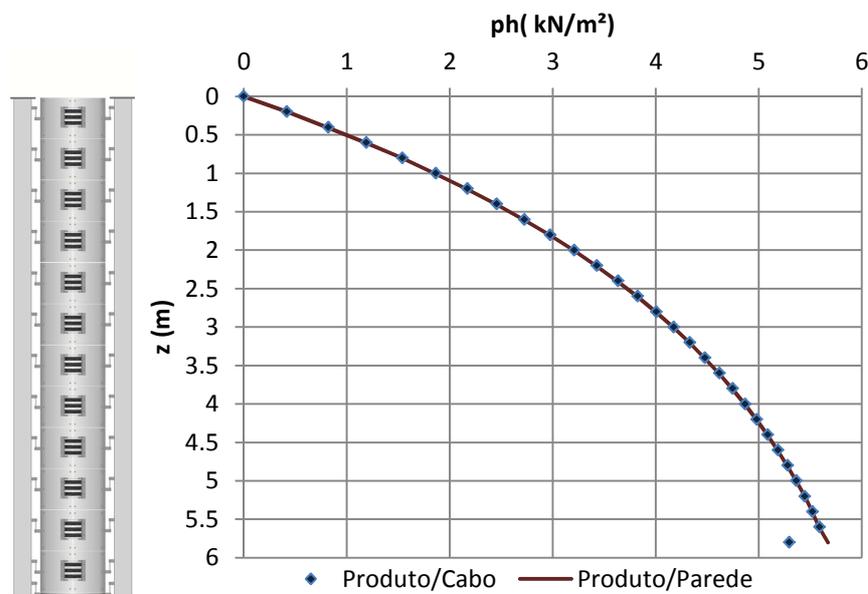


Figura 4.21: Pressão horizontal obtida via análise numérica

Observa-se na Figura 4.21 que a pressão horizontal ao longo da parede do silo coincide com a resposta obtida no cabo, sendo coerente com o equilíbrio de forças apresentado por ATKINSON et al. (1983).

4.5 ANÁLISE EXPERIMENTAL X NUMÉRICA

Nesta seção são analisados os resultados das pressões horizontais obtidas numericamente por meio do pacote computacional ANSYS e comparados com os valores obtidos experimentalmente no trabalho de CHEUNG (2007)

CHEUNG (2007) realizou um grande número de ensaios no silo-piloto do LaMEM. Para validação da análise numérica são apresentados somente os resultados das pressões horizontais ao longo da parede para o silo-piloto carregado com soja, com configuração de tremonhas fundo plano.

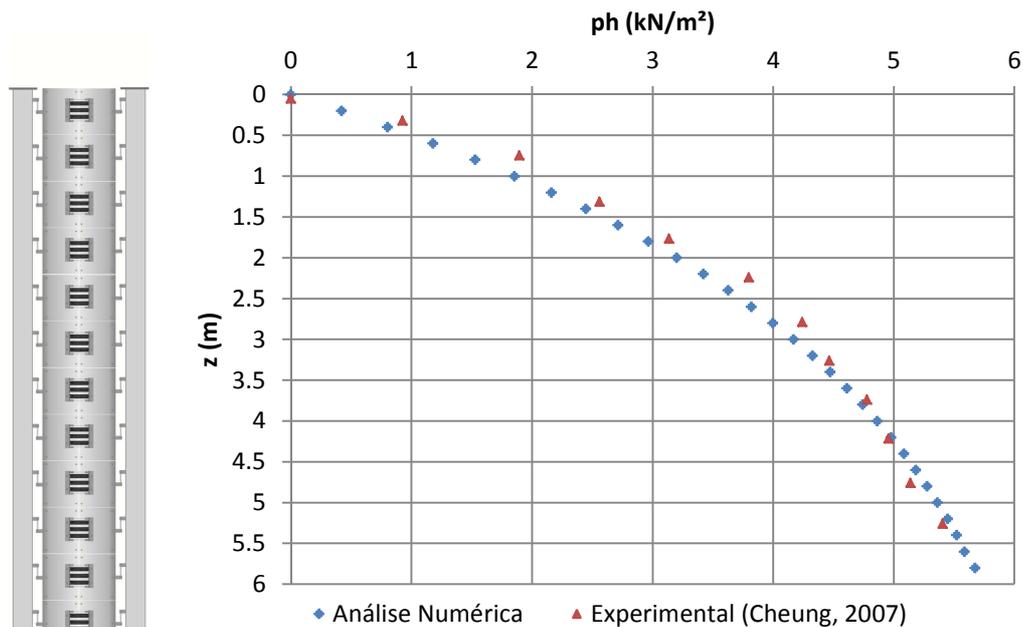


Figura 4.22: Pressões horizontais de carregamento fundo plano

Comparando os valores obtidos pela análise numérica e pelos ensaios experimentais, Figura 4.22, observa-se que a solução numérica reproduz de forma satisfatória os resultados obtidos para as pressões horizontais nos ensaios. Entretanto, não foi possível realizar uma solução numérica para a determinação do esforço de tração no cabo de termometria, devido a dificuldades de representação do comportamento do cabo imerso no produto granular.

5

CAPÍTULO

Conclusões

Os cabos de termometria suspensos na estrutura de coberturas de silos provocam esforços localizados nos pontos de fixação. O presente trabalho determinou a magnitude e as características dos esforços de tração em cabos de termometria suspensos na cobertura de um silo-piloto e de um silo em grande escala do Grupo Kepler Weber, analisando as influências do comprimento imerso e da posição radial. Valores calculados com equações propostas em estudos anteriores foram comparados com os valores obtidos experimentalmente para validação desse cálculo do esforço de tração.

5.1 Silo - Piloto

O estudo dos esforços de tração no cabo de termometria suspenso no centro do silo - piloto considerou a influência do comprimento imerso nos grãos. Para esta finalidade realizou-se os carregamentos para ter três comprimentos de imersão.

Observou-se o esforço máximo registrado no início da operação de descarregamento e influência significativa do nível do comprimento de imersão.

A equação proposta pela norma Argentina IRAM 8 015:1977 fornece uma estimativa mais adequada para silos com relação altura/diâmetro maior que 1,5 (silos esbeltos).

5.2 Silo Grupo Kepler Weber

O estudo dos esforços de tração nos cabos de termometria suspensos na cobertura do silo fundo plano, modelo 4815, foi analisado com a influência da posição radial.

Observou-se o esforço máximo registrado no início da operação de descarregamento e que o esforço é maior nos cabos próximos à parede do silo. A diferença das magnitudes do esforço de tração entre as posições radiais deve-se à variação das pressões nas posições

radiais e velocidade dos grãos durante o descarregamento. SCHWAB et al. (1991) observou que a carga nas posições próximas à parede diminui mais lentamente do que na posição central.

A equação proposta por SCHWAB et al. (1991) fornece uma estimativa mais adequada para silos com relação altura/diâmetro menor que 1,5 (silos baixos).

5.3 Proposta de cálculo dos esforços de tração devido aos cabos de termometria

Em comparação com a força vertical suportada pelos cabos e as equações propostas para sua estimativa, sugere-se para o cálculo da força a equação proposta pela norma Argentina IRAM 8 015 (1977). Embora a equação proposta por SCHWAB et al. (1991) forneceu uma melhor estimativa para o cálculo da força em silos baixos ($H/D < 1,5$), essa estimativa foi baseada em apenas um ensaio em silo com essa relação altura/diâmetro. Isso posto e levando em consideração a segurança, recomenda-se o cálculo do esforço de tração exercido pelos cabos na estrutura de cobertura por meio das equações propostas pela norma IRAM 8 015 (1977) considerando que esta apresentou os melhores resultados comparados com os valores experimentais para o silo – piloto e seus valores são mais conservadores para a escala do silo real.

- Cálculo de L_1 (em metro)

$$L_1 = \frac{D}{2 \cdot \tan \phi_w \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right)} \quad (49)$$

- Para $z \leq L_1$

$$T [Kgf] = 1,4 \cdot d \cdot \gamma \cdot \tan \phi_{w,c} \left[0,84 \cdot z^2 \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right) + 0,27 \cdot \frac{D \cdot z}{\tan \phi_w} \right] \quad (50)$$

- Para $z \geq L_1$

$$T [Kgf] = \frac{1,4 \cdot 0,35 \cdot d \cdot \gamma \cdot \tan \phi_{w,c} \cdot D^2}{\tan^2 \phi_w \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right)} \left[\pi \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_i}{2} \right) \tan \phi_w \frac{z}{D} - 0,57 \right] \quad (51)$$

Adota-se como valor da aceleração da gravidade $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, para conversão das unidades no SI (Sistema Internacional de Unidades).

Para manter o posicionamento do cabo de termometria durante a operação de carregamento é feita uma vinculação do cabo de termometria e a base do silo por uma corda

(1 a 3 mm de espessura) ou fio de nylon, que é atada à extremidade do cabo de termometria e a um chumbador afixado à base.

5.4 Análise Numérica

As pressões horizontais obtidas em ensaios experimentais apresentaram um padrão similar aos resultados observados numericamente. Os resultados da análise numérica das pressões horizontais ao longo da parede do silo e no cabo foram coerentes com o equilíbrio de forças apresentado no trabalho de ATKINSON et al. (1983) baseado no estudo de Janssen e Walker.

Não foi possível obter um resultado do esforço de tração no cabo de termometria por meio da análise numérica, devido a dificuldades de representação do comportamento do cabo imerso no produto granular.

Referências

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

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. (1973). **API 650: Recommended rules for design and construction of large, welded, low pressure storage tanks**. 5th ed. American Petroleum Institute. Washington. DC.

ANDRADE Jr, L. J. (1998). **Análise Estrutural das Chapas Metálicas de Silos e de Reservatórios Cilíndricos**. 208f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

_____. (2002) **Ação do Vento em Silos Cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro**. 151f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos. Universidade de São Paulo.

ANSYS INC. (2009). **Ansys Release 12.0** - Documentation

ANSOURIAN, P. (1992). **On the Buckling Analysis and Design of Silos and Tanks**. Journal of Constructional Steel Research. 23. 21p.

ARAÚJO, E.C.. (1997). **Estudo Teórico e Experimental de Tremonhas Piramidais para Silos Metálicos Elevados**. 317f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1980). **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. Rio de Janeiro.

_____. (1988). **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. Rio de Janeiro.

_____. **NBR 7821: Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados.**

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. Rio de Janeiro.

_____. **NBR 11162/TB-374: Silos Cilíndricos para grãos vegetais.** Associação Brasileira

de Normas Técnicas. ABNT. Rio de Janeiro.

_____. **NBR11165/TB-374: Componentes de Silos Cilíndricos Metálicos para grãos**

vegetais. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. Rio de Janeiro.

_____. **TB-377: Silos Cilíndricos para grãos vegetais.** Associação Brasileira de Normas

Técnicas. ABNT. Rio de Janeiro.

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.

AUSTRALIAN STANDARD. (1996). **AS 3774: Loads on bulk containers.** Sidney.

BRIASSOULIS, D.; PECKNOLD, D. A. (1986). **Behaviour of empty steel grain silos under wind loading: part 1: the stiffened cylindrical shell.** Engineering Structures. Vol 8. pp. 260-275

CALIL Jr., C. (1978). **Silos de Madeira.** 198 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. Orientador Prof. Dr. João C. Hellmeister.

_____. (1982). **Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica de Barcelona.

Espanha. Publicação do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos. USP. 184p.

_____. (1990). **Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais**. Tese de Livre Docência. EESC – USP. 198p.

CALIL Jr.,C.; CHEUNG. A.B.. (2007). **Silos: pressões. fluxos. recomendações para o projeto e exemplos de cálculo**. São Carlos: EESC.

CHEUNG, A. B. (2007). **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 252 p. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.

CLINCH, J. A. (1985). **Minimum considerations in design of Bins for bulk solids. 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. pp.198 – 204.

COUTO, L.G.. (1989). **Contribuição ao Estudo dos Silos de Argamassa Armada para Armazenamento de Cereais**. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

DEUTSCHE NORM (2005). **DIN 1055 Part 6: Design loads for buildings. Loads in silos bins**. Berlin. Verlaz.

ESTEVES Jr., P.. (1989). **Silos Metálicos de Chapa Corrugada**. 118f. . Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

EUROCODE 1. (2002). **PrEN 1991 – 4: Actions on silos and tanks**. CEN. Brussels.

FASSONI, D. P..(1994). **Sistema Construtivo Modular em Madeira para Silos Horizontais**. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

FORTES FILHO, J. (1985). **Uma introdução ao estudo de silos**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 427 p. Orientador Prof. Dr. Walter Savassi.

FREITAS, E.G. (2001). **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 175 p. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Junior.

GAYLORD Jr., E. H.; GAYLORD, C. N. (1984). **Design of steel bins for storage of bulk solids**. Prentice-Hall. New Jersey.

GOMES, F. C. (1994). **Silos para armazenamento de laranjas**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 107 p. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Junior.

GOMES, F. C. (2000). **Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 205 p. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Junior.

GRUPO KEPLER WEBER (2009). **Ensaio de cabos em termometria**. Panambi.

_____. (2010). **Silos KW**. Disponível em:

<<http://www.kepler.com.br/view/v1/prodCategoria.aspx?idSegmento=1&idCategoria=4>>.

Acesso em: 06 out. 2010.

INTERNACIONAL STANDARD. (1995). **ISO 11697: Bases for design of structures : Loads due to bulk materials**. London.

INSTITUTO ARGENTINO DE RACIONALIZACION DE MATERIALES. (1997). **IRAM 8 015: Silos aéreos metálicos para almacenamiento de granos: cilindros y desarmables**. Argentina.

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. n° ST4.

JOHANSON, J.R. (1964). **Stress and velocity fields in gravity flow of bulk solids**. Journal Application Mechanics, Trans. ASME, p.499-506.

KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS. (1967). **Instruction Manual for Strain Gage Type Load Cells LC-. LT- & LU**. Japan.

MADRONA, F. S. (2008). **Pressões em Silos Esbeltos com descarga excêntrica**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 119 p. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Junior.

MANFRIN, I.M.S. (1994). **Um estudo dos silos para açúcar: Propriedades físicas do material armazenado. recomendações construtivas. normativas e análise estrutural**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 82 p. Orientador Prof. Titular Sérgio P. B. Proença.

MILANI, A.P. (1993). **Determinação das propriedades de produtos armazenados para o projeto de pressões e fluxo em silos**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 272 p. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Junior.

NASCIMENTO, F.C. (2008). **A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro K**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 119 p. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Junior.

NASCIMENTO, J. W. (1996). **Estudo de silos metálicos prismáticos para fábricas de ração**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 152 p. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Junior.

PIEPER, K.; SCHÜTZ, M. (1980). **Bericht Über das Forschungsvorhaben – Norm-Mess-Silo für Schüttguteigenschaften**. Technische Universität Braunschweig – Lehrstuhl für Hochbaustatik. Deutschland. 109p.

PALMA, G. (2005). **Pressões e fluxo em silos esbeltos ($H/D \geq 1.5$)**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 109 p. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Junior.

PORTELA, G; GODOY, L. A. (2005). **Wind pressures and buckling of cylindrical steel tanks with a conical roof**. Journal of Constructional Steel Research; 61: 786-807.

REIMBERT, M; REIMBERT, A. (1943). **Recherches noveles sur les efforts exercs par les matieres pulverulentos ensilees sur les parois des silos**. Annales Institute Technique du Batiment et des Travaux Publics. Series I. N° 11.

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

ROTTER, J.M. (1985). **Membrane Theory of Shells for bins and silos. 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.

SABRANSKY, I.J.; MELBOURNE, W. H. (19987). **Design Pressure distribution on circular Silos with conical roofs**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 26: 65 – 84.

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

SILOS KEPLER WEBER (2011). **Catálogo Técnico**. 16p. Panambi.

SILVA, M. C. A. T. (1993). **Estudo da Variabilidade pressões em silos**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 192 p. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Junior.

SSTT. (1989). **Standart Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell**. England: UK: Institution of Chemical Engineers. 46p.

THOMPSON, S. A. (1987). **Vertical loads on cables in a model grain bin**. Transactions of the ASAE 30 (2): 485-491.

TRAHAIR, N.S. (1985a). **Criteria of Failure. 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.

_____ (1985b). **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.

VAZ, J. (1987). **Silos verticais de madeira compensada**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 346 p. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Junior.

VAZQUES, E. G. (2006). **Numerical simulation of loads exerted by stored materials in silos with non-elastic material models**. Tese (Doutorado) – Polytechnic University of Madrid. Madrid. 417p. Orientador: Prof. Francisco Florentino Ayuga Tellez.

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

WALTER, J.K. (1973). **A theoretical analysis of stresses in silos with vertical walls**. Chemical Engineering Science. v. 28.

WICKSTROM, L. (1980). **Loads applied to grain bin roofs**. ASAE Paper No. 80-4505. St Joseph. MI: ASAE

ANEXO A - Detalhes construtivos da cobertura

A título ilustrativo apresentam-se na Figura A.1 até a Figura A.6 os sistemas construtivos comerciais de cobertura de silos cilíndricos metálicos e alguns detalhes construtivos dos elementos estruturais responsáveis pela resistência da cobertura e suas ligações.

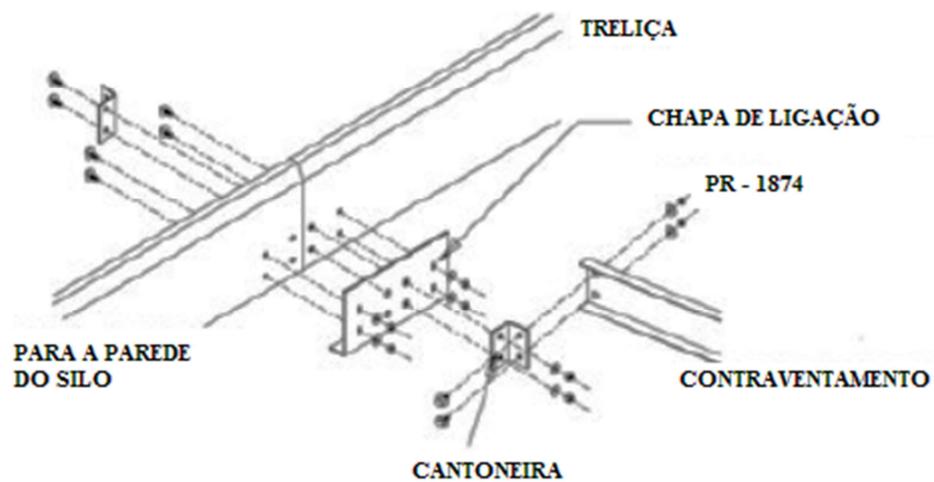


Figura A.1- Detalhes das emendas das treliças dos silos da empresa GSI

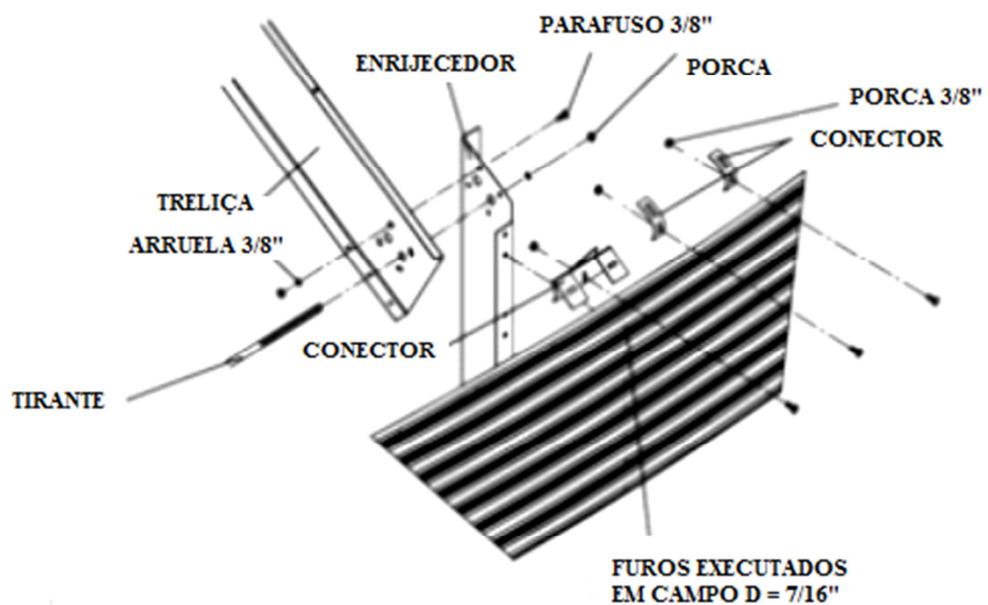


Figura A.2 - Detalhes da ligação das treliças com a parede do silo da empresa GSI

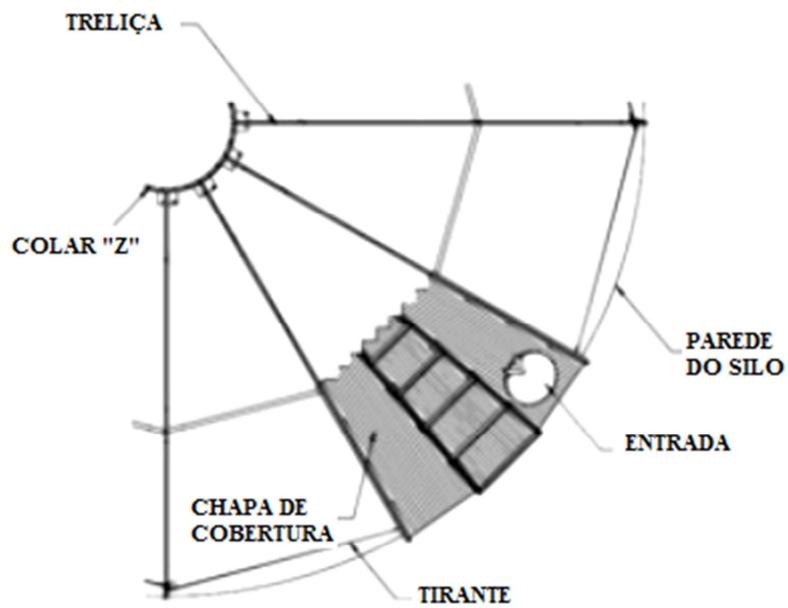


Figura A.3 - Vista superior da estrutura de cobertura dos silos da empresa GSI

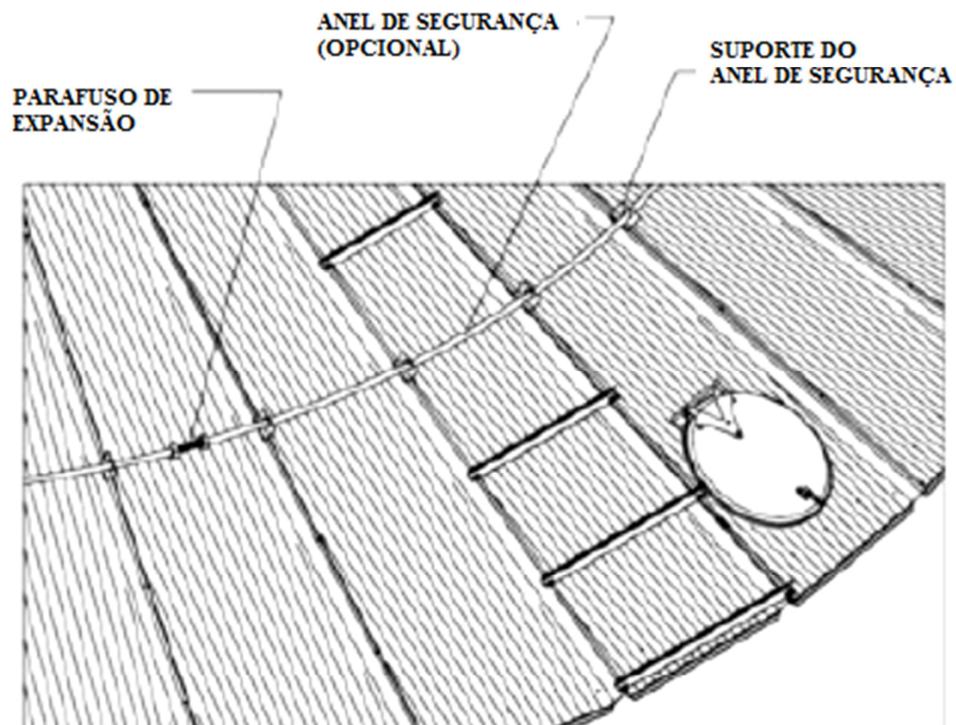


Figura A.4 - Detalhe do anel de segurança dos silos da empresa GSI

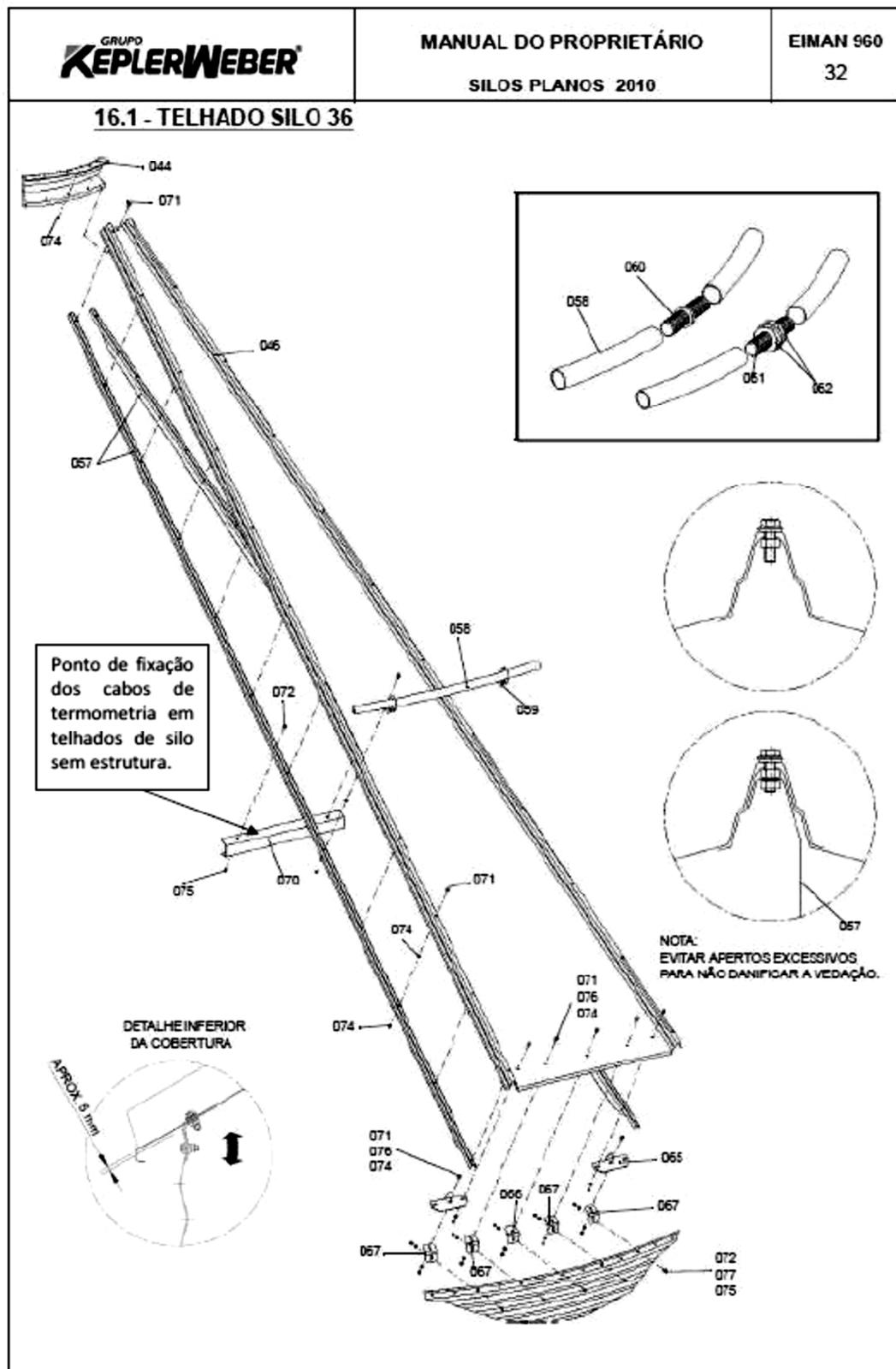


Figura A.5 - Ponto de fixação dos cabos de termometria em telhados sem estrutura

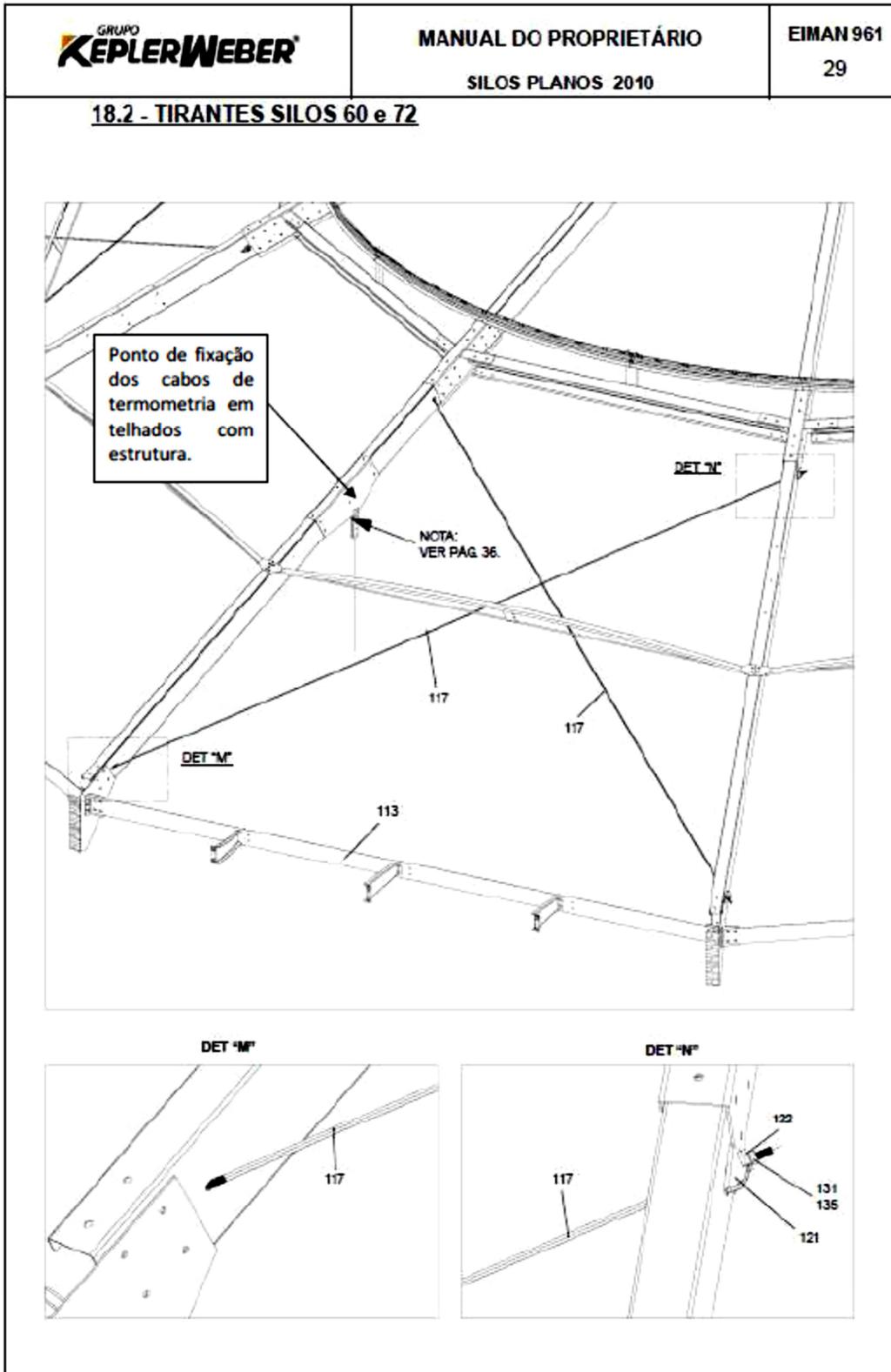


Figura A.6 - Ponto de fixação dos cabos de termometria em telhados com estrutura