

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DIMENSIONAMENTO DE SILOS METÁLICOS PARA
ARMAZENAGEM DE GRÃOS

Luciano Argenta Scalabrin

Porto Alegre
junho, 2008

LUCIANO ARGENTA SCALABRIN

**DIMENSIONAMENTO DE SILOS METÁLICOS PARA
ARMAZENAGEM DE GRÃOS**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA. ORIENTAÇÃO: PROF. DR. INÁCIO
BENVEGNUM MORSCH.

Porto Alegre
junho, 2008

5281d Scalabrin, Luciano Argenta

Dimensionamento de silos metálicos para armazenagem de grãos / Luciano Argenta Scalabrin. – 2008.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2008.

Orientação do Prof. Dr. Inácio Benvegnú Morsch.

1. Silo. 2. Estrutura metálica. 3. Dimensionamento. 4. Vento – Estruturas. I. Morsch, Inácio Benvegnú, orient. II. Dimensionamento de silos metálicos para armazenagem de grãos

CDU – 624.042.4 (043)

LUCIANO ARGENTA SCALABRIN

**DIMENSIONAMENTO DE SILOS METÁLICOS PARA
ARMAZENAGEM DE GRÃOS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA** e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 06 de Junho de 2008.

Prof. Inácio Benvegnu Morsch
Dr. pelo PPGEC / Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ignácio Iturrioz
Dr. pelo PPGEC / Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Acir Mércio Loredo Souza
PhD – University of Western Ontario

Prof. Luis Carlos Pinto da Silva
PhD – University of Leeds

Dedico este trabalho a minha esposa Irene, meus pais e meu orientador Inácio pelo apoio constante e fundamental para o seu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

O apoio de meus pais para meu crescimento como indivíduo e para a realização de vários sonhos foi importantíssimo. A vocês, que deixaram de realizar seus sonhos para que os filhos tivessem um futuro melhor, meu muito obrigado. Mãe, pai, vocês são sensacionais!

Agradeço à minha esposa Irene, por sempre me incentivar a terminar esta dissertação além de auxiliar na correção ortográfica. O companheirismo e interesse mútuo pela área de armazenagem iniciou nossa união. O conhecimento sobre secagem e armazenagem de grãos me foi transmitido por ti. Eu te amo!

A minha avó Cecília, pela alegria e entusiasmo pela vida, lucidez, garra, solidariedade e bondade. Alicerce de toda uma família. Beijos!

Aos meus padrinhos, Tio Darci e Tia Juca, e aos primos Rogério, Luci e Marcelo com quem vivi e nunca vou poder retribuir tanto amor e carinho. Muito obrigado e que Deus esteja sempre com vocês.

Agradeço ao colega e professor Inácio, bem como a sua esposa Vera e aos filhos Filipe e Ana Clara, pelo tempo despendido, muitas vezes deixando de aproveitar fins de semana para me receber e orientar. Pela grandeza de sua amizade, muito obrigado.

A empresas Kepler Weber, onde iniciei meu aprendizado na área de armazenagem de grãos, minha gratidão e meu reconhecimento. As memórias de cálculo e bibliografia do acervo técnico foram de fundamental importância para meus primeiros cálculos de silos.

Ao meu grande amigo Nicolaas Cornelis de Gelder, grande exemplo de vida, nascido em Amsterdã-Holanda, tornou-se meu mestre na arte de projetar elevadores, transportadores de corrente e correias transportadoras para grãos. Amigos para sempre!

Ao empresário Declécio Corradi para quem tive a honra de trabalhar e pude contribuir com o sonho da fundação da empresa EMA que fabrica equipamentos para armazenagem. Poucos tiveram ou terão a oportunidade de realizar o sonho de criar uma linha de silos. Este era meu sonho e ele foi possível graças ao amigo, engenheiro, empreendedor e administrador Deoclécio. Obrigado pela confiança!

RESUMO

SCALABRIN, L.A. **Dimensionamento de Silos Metálicos para Armazenagem de Grãos.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

Neste trabalho, apresentam-se as formas mais comuns de acidentes em silos buscando explicar as causas que ocasionaram o colapso. Trata-se de analisar a teoria e as recomendações de duas das principais normas para a determinação das pressões devidas aos grãos armazenados no interior do silo. Desenvolvem-se planilhas de cálculo para auxiliar o dimensionamento de um silo. Busca-se maximizar a força de tração admissível para cada espessura de chapa lateral com o intuito de obter silos mais leves e conseqüentemente mais econômicos. Da mesma forma, uma planilha de cálculo é apresentada para maximizar a força de compressão para diferentes espessuras de montantes. Um configurador de silo é apresentado no decorrer do trabalho, tendo como dados de entrada o diâmetro e altura do silo e obtendo as diferentes espessuras de chapa laterais com relação à altura bem como os diferentes montantes. Apresentam-se formas de análise de silos, quando vazios, submetidos à carga de vento e a necessidade de colocação de anéis de reforço na circunferência e sua distribuição na altura. Trata-se de analisar o efeito de silos quando vazios pelo método dos elementos finitos, levando em consideração a rigidez da chapa lateral.

Palavras-chave: silo; estrutura metálica; dimensionamento; vento.

ABSTRACT

SCALABRIN, L.A. Dimensionamento de Silos Metálicos para Armazenagem de Grãos. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

Design of Steel Silos for Grain Storage

In this work, some accidents in silos are presented and the causes are discussed. The theory and the recommendations of two standards for determination of pressure due to grain stored inside the silo are presented. Sheets for silos design are developed. The goal is to maximize the tension force in the silos lateral sheet for each thickness, in order to improve economical benefits. Similarly, another sheet is developed with the goal to maximize the compression force in the stiffeners for different thicknesses. A design sheet for silos is presented in the course of the work; diameter and height of the silo are the input data and different thicknesses of lateral sheet and stiffeners are output data. Different approach for empty silos considering wind loads are presented and the use of wind-rings are verified. Empty silos are examined by the finite elements method considering lateral rigidity of the lateral sheet.

Keywords: silo; steel structure; design; wind.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS	16
LISTA DE ABREVIATURAS.....	23
1 INTRODUÇÃO.....	24
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	26
1.1.1 Justificativa	27
1.1.2 Estrutura do Trabalho	27
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2 DADOS GERAIS	31
2.1 PARTES E COMPONENTES DE UM SILO.....	31
2.2 MATERIAIS.....	32
2.2.1 Aços sem Qualificação Estrutural para Perfis	34
2.2.2 Parafuso sem Qualificação Estrutural.....	35
2.3 ACIDENTES COM SILOS	35
2.3.1 Acidentes Durante a Montagem	35
2.3.2 Acidentes Devido a Ancoragem	36
2.3.3 Acidentes com Galerias	38
2.3.4 Acidentes Devido a Projeto	38
3 CARGAS ATUANTES EM SILOS.....	41
3.1 PESO PRÓPRIO.....	41
3.1.1 Telhados.....	41
3.1.2 Corpo	42
3.2 CARGA DE EQUIPAMENTOS ACESSÓRIOS	43
3.2.1 Termometria	43
3.2.2 Cargas no Centro do Telhado	44
3.2.3 Cargas Adicionais nos Montantes Devido às Passarelas.....	45
3.3 PRESSÕES DEVIDAS AOS GRÃOS ARMAZENADOS	47
3.3.1 Teoria de Janssen.....	47
3.3.2 Análise conforme ANSI/ASAE EP433 JUN00.....	49
3.3.3 Análise conforme UNE-ENV 1991-4 Eurocódigo-1 Parte:4 – Ano:1998	57
3.3.4 Comparação entre as Normas	70
3.4 CARGAS DE VENTO	73

3.4.1	Cargas nos Montantes.....	75
4	CÁLCULO DOS COMPONENTES DE UM SILO.....	78
4.1	DEFINIÇÕES.....	78
4.2	AÇÕES E COMBINAÇÕES DE AÇÕES.....	79
4.2.1	Combinações de Ações para os Estados Últimos.....	79
4.2.2	Combinações de Ações para os Estados Limites de Utilização.....	80
4.2.3	Combinações de Ações para os Estados Limites Últimos para Silos.....	82
4.3	DIMENSIONAMENTO.....	82
4.3.1	Valores Máximos da Relação Largura-Espessura.....	82
4.3.2	Flambagem Local.....	83
4.3.3	Largura Efetiva de Elementos Uniformemente Comprimidos com um Enrijecedor Intermediário.....	87
4.3.4	Largura Efetiva de Elementos Uniformemente Comprimidos com Enrijecedor de Borda	88
4.4	BARRAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO.....	90
4.4.1	Perfis com Dupla Simetria.....	91
4.4.2	Perfis Monossimétricos.....	93
4.4.3	Perfis Assimétricos.....	93
4.4.4	Flambagem por Distorção da Seção Transversal.....	93
4.4.5	Cálculo de Montantes de Silos.....	94
4.5	BARRAS SUBMETIDAS À TRAÇÃO.....	97
4.5.1	Chapas com Ligações Parafusadas.....	98
4.5.2	Exemplo de Cálculo da Força de Tração Admissível em Chapas Laterais.....	99
4.6	CÁLCULO DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS.....	101
4.6.1	Rasgamento entre Furos ou entre Furo e Borda.....	101
4.6.2	Pressão de Contato (Esmagamento).....	103
4.6.3	Força Cortante no Parafuso.....	104
4.6.4	Análise da Força de Tração Resistente Efetiva das Chapas das Figura 4.6 e Figura 4.7.....	105
4.7	FORMULAÇÃO DE FERRAMENTA PARA ANÁLISE DA FORÇA DE TRAÇÃO RESISTENTE DAS CHAPAS A SEREM EMPREGADAS EM MODELOS DE SILOS PADRONIZADOS.....	106
4.7.1	Resultados do Programa.....	106
4.7.2	Comparação com dimensões de chapas padrão do principal fabricante brasileiro	107
4.7.3	Aplicação do procedimento para cálculo das Chapas Laterais.....	109
4.7.4	Cálculo dos Montantes do Silo do Item 3.3.3.7.....	110
5	CÁLCULO DE SILO VAZIO SUBMETIDO À CARGA DE VENTO.....	114
5.1	TEORIA - BUTLER.....	114
5.1.1	Distribuição dos Anéis de Reforço.....	116

5.2	TEORIA DE BECKER - GERARD	118
5.3	TEORIA DE ANSOURIAN	119
6	ALGORITMO PARA CÁLCULO DE SILOS	122
7	ANÁLISE DE SILOS VAZIOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	125
7.1	O MODELO NUMÉRICO DA CHAPA CORRUGADA	126
7.1.1	Teoria de Placa	126
7.1.2	Modelando a chapa corrugada como material ortotrópico	128
7.2	TESTE DO ELEMENTO DE CASCA	134
7.2.1	Exemplo 1	134
7.3	ANÁLISE DE UM SILO VAZIO	142
8	CONCLUSÕES	154
8.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	155
	REFERÊNCIAS	156

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fotos de Unidades Armazenadoras.....	24
Figura 2.1 – Parafusos para silos.....	34
Figura 2.2 – Fotos de Silos em Montagem.....	36
Figura 2.3 – Fotos de acidente de silo durante montagem.	36
Figura 2.4 – Foto de acidente de silo durante montagem e detalhe de chumbador adequado.	37
Figura 2.5 – Foto montante a flexão devido a problema na chapa de ancoragem.....	37
Figura 2.6 – Fotos de acidentes com galerias.....	38
Figura 2.7 – Fotos de acidentes por provável erro de projeto.	39
Figura 2.8 – Fotos de montantes com problema de flambagem local das abas.....	39
Figura 2.9 – Foto de Silo mal dimensionado ao vento.....	40
Figura 2.10 – Fotos de acidentes de silo causados por vento.....	40
Figura 3.1 – Silo com telhado autoportante.....	41
Figura 3.2 – Foto da montagem da estrutura sob telhado de um silo de 21,82m de diâmetro.	42
Figura 3.3 – Fotos de cabos de termometria em silo com estrutura sob o telhado.....	43
Figura 3.4 – Fotos de Acessórios apoiados no centro do telhado.....	45
Figura 3.5 – a) apoio pilar passarela nos montantes b) Esquema e c)Passarela Fechada sobre silo.....	46
Figura 3.6 - Equilíbrio de Forças conforme Janssen.	48
Figura 3.7 – Foto de silos com fundo cônico elevado.....	49
Figura 3.8 - Tipos de fluxo no interior de um silo.....	50
Figura 3.9 – Representação da pressão lateral.....	53
Figura 3.10 – Pressões sobre o fundo cônico.	54
Figura 3.11 – Silo D14,55 com 22 anéis.	56
Figura 3.12 – Dados geométricos.....	58
Figura 3.13 – Tipos de Fluxo dos grãos no interior dos silos.....	59
Figura 3.14 – Gráficos para determinação do tipo de fluxo em função do tipo de funil.....	60
Figura 3.15 – Pressão Local (Pp)	62

Figura 3.16 – Pressões em Funis	64
Figura 3.17 – Cargas sobre as paredes e fundos planos em silos baixos.....	68
Figura 3.18 – Sentido do vento para determinação do coeficientes de pressão externo	73
Figura 3.19 – Posicionamento dos montantes	75
Figura 3.20 – Coeficiente de Pressão externa em cobertura cônica	77
Figura 4.1 – Tipos de elementos de perfis formados a frio	78
Figura 4.2 – Foto de montante com a alma contendo um enrijecedor intermediário.....	87
Figura 4.3 – Elemento uniformemente comprimido com enrijecedor intermediário	88
Figura 4.4 – Elemento uniformemente comprimido com enrijecedor de borda.....	89
Figura 4.5 – Montantes padrões utilizados pela empresa EMA	94
Figura 4.6 – Chapas Laterais com 4 linhas de furo	99
Figura 4.7 – Chapa Lateral com duas linhas de furo.....	100
Figura 5.1 – Seção transversal de uma chapa lateral de silo	115
Figura 5.2 – Silo D14,55 com localização de anéis de reforço.	117
Figura 5.3 – Detalhamento da parede de silos enrijecidos.	121
Figura 7.1 – Detalhe das ligações parafusadas.	125
Figura 7.2 – Definição de placa fina ou média. (GROEHS, 2002).	127
Figura 7.3 – Representação de um elemento representativo da chapa corrugada por uma casca ortotrópica equivalente.	129
Figura 7.4 – Dados do exemplo 1.....	134
Figura 7.5 – Distribuição de deslocamentos [mm] ortogonais à placa lisa isotrópica. Fig.A corresponde aos lados a engastados e Fig. B corresponde aos lados b engastados.	135
Figura 7.6 – Geometria simplificada do corrugado.....	136
Figura 7.7 – Distribuição de deslocamentos [mm] na direção y para placa isotrópica com corrugado simplificado. Fig.A corresponde aos lados a engastados e Fig. B corresponde aos lados b engastados.	137
Figura 7.8 – Geometria detalhada do corrugado.	138
Figura 7.9 – Distribuição de deslocamentos [mm] na direção y para placa isotrópica com corrugado detalhado. Fig.A corresponde aos lados a engastados e Fig. B corresponde aos lados b engastados.	139

Figura 7.10 – Sistemas de referência global e local.	140
Figura 7.11 – Distribuição de deslocamentos [mm] ortogonais ao plano da placa ortotrópica e lisa. Fig.A corresponde aos lados a engastados e Fig. B corresponde aos lados b engastados.	141
Figura 7.12 – Distribuição do deslocamento (m) na direção x – chapa lisa e isotrópica.	143
Figura 7.13 – Detalhe da distribuição de deslocamentos [m] na direção x na região de valor máximo – chapa lisa e isotrópica.	143
Figura 7.14 – Distribuição do vetor soma dos deslocamentos [m] – chapa lisa e isotrópica.	144
Figura 7.15 – Distribuição do deslocamento [m] na direção x –chapa corrugada e isotrópica.	145
Figura 7.16 – Detalhe da distribuição de deslocamentos [m] na direção x na região de valor máximo – chapa corrugada e isotrópica.	146
Figura 7.17 – Distribuição do vetor deslocamento [m] na direção x – chapa corrugada e isotrópica.	147
Figura 7.18 – Distribuição do vetor deslocamento [m] na direção x – chapa lisa e ortotrópica.	148
Figura 7.19 – Detalhe da distribuição de deslocamentos [m] na direção x na região de valor máximo – chapa lisa e ortotrópica.	149
Figura 7.20 – Distribuição do vetor deslocamento [m] na direção x – chapa lisa e ortotrópica.	149
Figura 7.21 – Distribuição do vetor deslocamento [m] na direção x – chapa lisa e ortotrópica.	150
Figura 7.22 – Geometria da chapa analisada.....	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Massa mínima de revestimento para aços – NBR7008.....	33
Tabela 2-2 – Tabela de Propriedades Mecânicas dos Aços.....	33
Tabela 3-1 – Propriedades do material de fabricação dos silos.....	52
Tabela 3-2 – Resultados da planilha eletrônica para as Pressões do Silo D14,55/22 – ANSI/ASAE EPP433.....	56
Tabela 3-3 – Propriedades de alguns materiais armazenados	68
Tabela 3-4 – Resultados da Planilha eletrônica para as Pressões do Silo D14,55/22 – UNE-ENV 1991-4.....	69
Tabela 3-5 – Pressão Horizontal ANSI/ASAE EPP433 x UNE-ENV 1991-4.....	70
Tabela 3-6 – Pressão Vertical ANSI/ASAE EPP433 x UNE-ENV 1991-4.....	71
Tabela 3-7 – Carga atrito total ANSI/ASAE EPP433 x UNE-ENV 1991-4.....	72
Tabela 3-8 – Tabela dos coeficientes de pressão externo.....	74
Tabela 3-9 – Tabela dos coeficientes de arrasto.....	74
Tabela 3-10 – Tabela dos coeficientes de arrasto para rugosidade os saliências 0,01.D	75
Tabela 4-1 – Coeficientes de ponderação das ações.....	80
Tabela 4-2 –Fatores de combinação e de utilização.....	81
Tabela 4-3 – Relação Largura-Espessura Máxima.....	83
Tabela 4-4 – Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos tipo AA.....	85
Tabela 4-5 – Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos tipo AL	86
Tabela 4-6 – Seções e curvas de resistência associadas à flambagem por flexão.....	92
Tabela 4-7 – Valores mínimos de D/bw para seções U enrijecido submetidos à compressão centrada para dispensar a verificação da flambagem por distorção.....	94
Tabela 4-8 – Planilha eletrônica das larguras efetivas para os montantes da Figura 4.5	95
Tabela 4-9 – Planilha Eletrônica das larguras efetivas para os elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda para os montantes da Figura 4.5 (conforme 4.3.4-I).....	95
Tabela 4-10 – Planilha Eletrônica das larguras efetivas para os elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda para os montantes da Figura 4.5 (conforme 4.3.4-II).	95

Tabela 4-11 – Planilha Eletrônica das larguras efetivas para os elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda para os montantes da Figura 4.5 (conforme 4.3.4-III)	96
Tabela 4-12 – Planilha Eletrônica da força normal de compressão resistente de cálculo para as chapas da Figura 4.5.	96
Tabela 4-13 – Planilha Eletrônica da força normal de compressão resistente de cálculo para as chapas da Figura 4.5, considerando efeito do trabalho a frio.	96
Tabela 4-14 – Planilha Eletrônica da força normal de compressão resistente de cálculo para as chapas da Figura 4.5 (conforme resultados das Tabela 4-12 e Tabela 4-13).....	97
Tabela 4-15 – Planilha Eletrônica para cálculo da força resistente de tração para as chapas das Figura 4.6 e Figura 4.7	105
Tabela 4-16 – Planilha Eletrônica para cálculo das chapas laterais dos silos	106
Tabela 4-17 – Resumo da Tabela 4-16.....	107
Tabela 4-18 – Planilha Eletrônica com resultados da carga de tração para as chapas laterais do principal fabricante de silos no Brasil.....	107
Tabela 4-19 – Resumo da Tabela 4-18.....	108
Tabela 4-20 – Chapas laterais da dissertação x Chapa do principal fabricante de silos no Brasil.....	108
Tabela 4-21 – Chapas Laterais do silo do exemplo do item 3.3.3.7.....	109
Tabela 4-22 – Cálculo do Peso Próprio do silo por montante para o exemplo do item 3.3.3.7.....	112
Tabela 4-23 – Planilha Eletrônica com as cargas para o cálculo dos montante para o exemplo do item 3.3.3.7	113
Tabela 5-1 – Resultados para a Pressão Lateral Crítica considerando silo chapa lisa.	115
Tabela 5-2 – Quantidade e posição dos anéis de reforço, conforme planilha eletrônica, para o silo do item 3.3.3.7.....	118
Tabela 7-1 Resultados da Chapa modelada com elemento de pórtico	152
Tabela 7-2 Resultados da Chapa modelada com elemento de casca.....	152

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas Maiúsculas

A	Área bruta da seção transversal da barra Área da seção transversal do silo
A_{ef}	Área efetiva do enrijecedor
A_n	Área da seção líquida da seção transversal da barra
A_p	Área bruta da seção transversal do parafuso
A_s	Área reduzida do enrijecedor
B_c	Parâmetro usado no cálculo da resistência ao escoamento da região das dobras f_{yc}
C	Relação entre a área total de todas as dobras do perfil e sua área total
C_a	Coefficiente de arrasto
C_b	Coefficiente de majoração da pressão sobre o fundo.
C_h	Coefficiente de majoração da pressão horizontal
C_{pe}	Coefficiente de pressão externo
C_{pi}	Coefficiente de pressão interno
C_t	Coefficiente de redução da área líquida, dado no item 3.1.6.1
C_w	Coefficiente de majoração da pressão de atrito com a parede Constante de empenamento da seção
C_z	Coefficiente de Janssen
D	Largura nominal do enrijecedor de borda
E	Módulo de elasticidade
F_c	Força de arraste no corpo do silo
F_E	Carga de compressão atuando nos montantes devido a equipamentos instalados no silo
F_{Gi}	Ações permanentes

F_{grao}	Carga de compressão atuando nos montantes devido aos grãos armazenados
F_p	Força horizontal total devida a carga local em silos circulares de parede fina
$F_{Q,EXC}$	Ação excepcional
F_{Qi}	Demais ações variáveis
F_{Q1}	Ação variável considerada como principal
F_{Rd}	Força resistente de cálculo, em geral
F_t	Força de arraste no telhado do silo
F_v	Força de compressão ou tração no montante devida ao vento com $\beta_1 = 0$
$F_{0,1,...}$	Força de compressão ou tração no montante devida ao vento
G	Módulo de elasticidade transversal Constante gravitacional ($9,81 \cdot 10^{-3}$ kN/kg)
I_a	Momento de inércia de referência do enrijecedor intermediário ou de borda.
I_h	Comprimento da parede do funil (m)
I_s	Momento de inércia da seção bruta do enrijecedor em relação ao seu eixo principal
I_t	Momento de inércia à torção uniforme (constante de torção de Saint-Venant)
I_x, I_y	Momento de inércia da seção bruta em relação aos eixos principais x e y
K_s	Razão entre a pressão horizontal e pressão vertical (P_h / P_v)
$K_{s,m}$	Valor médio da razão entre a pressão horizontal e pressão vertical (P_h / P_v)
$K_t \cdot L_t$	Comprimento efetivo de flambagem por torção
$K_x \cdot L_x$	Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo x
$K_y \cdot L_y$	Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo y
$N_{C,Rd}$	Força normal de compressão resistente de cálculo
N_e	Força normal de flambagem elástica
N_{et}	Força normal de flambagem elástica por torção

N_{ex}	Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo x
N_{ext}	Força normal de flambagem elástica por flexo-torção
N_{ey}	Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y
$N_{t,Rd}$	Força normal de tração resistente de cálculo
P_t	Força de levantamento do telhado
P_w	Carga vertical resultante por unidade de na parede do silo no carregamento
R_e	Número de Reynolds
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator que considera a rugosidade do terreno, dimensões e altura do silo.
S_3	Fator que considera conceitos estatísticos e considera o grau de segurança requerido.
U	Perímetro da seção transversal do silo
V_k	Velocidade característica do vento
V_{Rd}	Força cortante resistente de cálculo
V_0	Velocidade básica do vento
Z_o	Parâmetro empregado nos cálculos das pressões

Letras romanas minúsculas

a	Largura ou o menor lado de um silo retangular
b	Comprimento ou maior lado de um silo retangular
	Largura do elemento
b_c	Largura da região comprimida do elemento, calculada com base na seção efetiva
b_{ef}	Largura efetiva do elemento
b_f	Largura nominal da mesa ou do conjunto mesa enrijecedores de borda
b_w	Largura nominal da alma

b_0	Largura do elemento enrijecido intermediário
c	comprimento equivalente calculado em função de a e b
d	Largura do enrijecedor de borda Diâmetro nominal do parafuso
d_c	Dimensão característica da seção transversal (Figura 3.12)
d_{ef}	Largura efetiva do enrijecedor
d_f	Dimensão do furo na direção perpendicular à solicitação
d_s	Largura efetiva reduzida do enrijecedor
e	Maior entre as excentricidades e_i e e_o
e_i	Excentricidade devida ao carregamento (Figura 3.12)
e_o	Excentricidade do centro da boca de saída (Figura 3.12)
$e_1; e_2$	Distâncias dos centros dos furos de extremidade às bordas na direção perpendicular a solicitação
f_y	Tensão de escoamento
f_{ya}	Resistência ao escoamento do aço modificada, considerando o trabalho a frio
f_{yc}	Resistência ao escoamento do aço na região das dobras do perfil
f_u	Tensão de Ruptura
f_{up}	Resistência à ruptura do parafuso na tração
g	Maior espaçamento entre furos na direção perpendicular à solicitação
h	Altura medida do ponto de descarga até a superfície equivalente
k	Coefficiente de flambagem local
k_a	Utilizado no cálculo de k de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda
l_{ch}	Comprimento útil da chapa lateral do silo
m	Parâmetro usado no cálculo da resistência ao escoamento da região das dobras f_{yc}

n_f	Quantidade de furos contidos na linha de ruptura analisada
p_h	Pressão horizontal devida ao material armazenado
p_{h0}	Pressão horizontal calculada na interseção da parede vertical e funil
p_{he}	Pressão horizontal devida ao material armazenado no descarregamento
$p_{he,s}$	Pressão horizontal devida ao material armazenado no descarregamento, simplificado
p_{hf}	Pressão horizontal devida ao material armazenado no carregamento
$p_{hf,s}$	Pressão horizontal devida ao material armazenado no carregamento, simplificado
p_n	Pressão normal à parede inclinada do funil
p_{ni}	Pressão normal à parede inclinada do funil no ponto i
p_p	Pressão local
p_{ps}	Pressão local (silos circulares de parede fina)
$p_{p,sq}$	Pressão local em silos baixos
p_s	Sobrepressão no funil
p_t	Pressão de atrito com a parede inclinada do funil
p_v	Pressão vertical devida ao material armazenado
p_{vf}	Pressão vertical devida ao material armazenado no carregamento
$p_{vf,sq}$	Pressão vertical no carregamento em silos baixos
p_{vi}	Componente empregados na determinação da pressão vertical em silos baixos
p_{v0}	Pressão vertical calculada na interseção da parede vertical e funil
p_w	Pressão devida ao atrito do material armazenado com a parede do silo
p_{we}	Pressão devida ao atrito do material armazenado com a parede do silo no descarregamento
$p_{we,s}$	Pressão devida ao atrito do material armazenado com a parede do silo no descarregamento, simplificado

p_{wf}	Pressão devida ao atrito do material armazenado com a parede do silo no carregamento
$p_{wf,s}$	Pressão devida ao atrito do material armazenado com a parede do silo no carregamento, simplificado
r_x, r_y	Raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia x e y
r_0	Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção
s	Dimensão da zona afetada pela pressão local Espaçamento dos furos na direção da solicitação
t	Espessura do elemento
x	variável empregada no cálculo das pressões no funil
$x_0; y_0$	Coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais x e y, em relação ao centróide da seção.
z	Profundidade onde estarão sendo calculadas as pressões ou variável de integração com relação a profundidade

Letras gregas

α	Ângulo da superfície inclinada do funil com a horizontal (°) Fator de imperfeição inicial
β	Coeficiente de majoração da pressão local Parâmetro empregado no cálculo do fator de redução associado à flambagem ρ
β_1	Ângulo de incidência do vento
γ	Peso específico (densidade) do material armazenado
γ_g	Coeficiente de ponderação das ações permanentes
γ_q	Coeficiente de ponderação das ações variáveis
λ_0	Índice de esbeltez reduzido da barra
λ_p	Índice de esbeltez reduzido do elemento
λ_{p0}	Valor de referência do índice de esbeltez reduzido do elemento

- μ Razão entre a pressão de atrito e pressão horizontal (P_w / P_h)
- μ_m Valor médio da razão entre a pressão de atrito e pressão horizontal (P_w / P_h)
- ψ Relação σ_2 / σ_1 empregada no cálculo de coeficientes de flambagem local k
- ψ_o Fator de combinação
- $\psi_{o,ef}$ Fator de combinação efetivo das demais ações variáveis.
- $\psi_1 \cdot F_Q$ Valor freqüente da ação
- $\psi_2 \cdot F_Q$ Valor quase permanente da ação
- ψ_1, ψ_2 Fatores de utilização.
- ρ Fator de redução associado à flambagem
- ρ_{FLT} Fator de redução associado à flambagem lateral com torção.
- σ Tensão normal de compressão

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CENTREINAR: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a agricultura tem sido fator de garantia de superávit da balança comercial brasileira. Infelizmente, continua-se à mercê dos fatores climáticos durante a colheita e os locais de armazenagem não são suficientes e não estão distribuídos adequadamente. Existem grandes problemas logísticos e os meios para escoamento da safra são precários. Para tentar melhorar a situação o governo vem incentivando o agricultor a ter armazenamento próprio. Os ganhos são indiscutíveis. O armazenamento na fazenda garante que o produtor poderá esperar o melhor momento para entregar o produto, evitando o transporte na época de safra, momento em que o frete fica inflacionado e, além disso, poderá esperar por melhor preço. Na Figura 1.1 pode-se ver alguns exemplos de unidades armazenadoras de grãos.

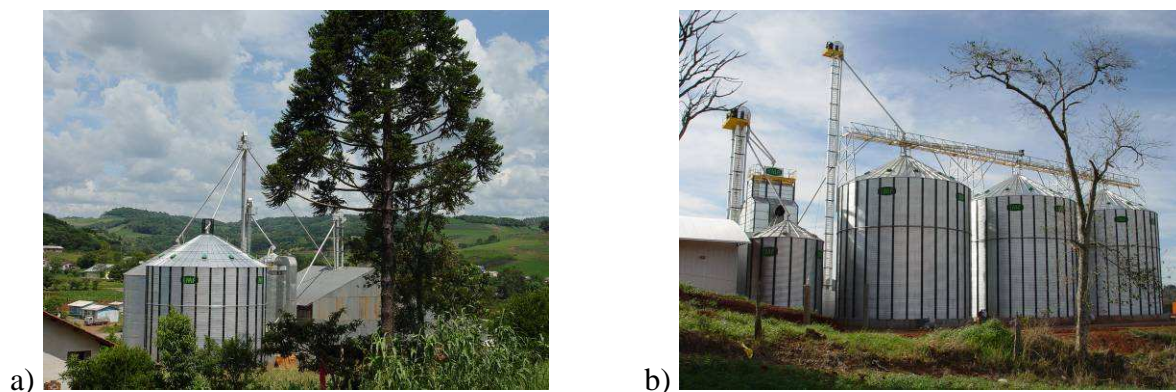


Figura 1.1 – Fotos de Unidades Armazenadoras.

O Brasil tem hoje condições de armazenar aproximadamente 100% da sua safra anual enquanto os Estados Unidos possuem uma capacidade de armazenagem de 250%. A CONAB, nas considerações finais de seu relatório de 2006, indica a necessidade de que a capacidade estática brasileira seja pelo menos 20% superior à produção (120%). A produção brasileira de grãos em 2006 foi de 122 milhões de toneladas. A capacidade de armazenagem é de 121 milhões de toneladas. Isso significa que existe uma deficiência de armazenagem de 25,4 milhões de toneladas. Em média, os silos brasileiros têm capacidade de armazenamento de 3 mil toneladas, o que implica na urgente fabricação de 8.400 silos que pesam 25 ton em média

cada. Somando a capacidade de processamento de todas as fábricas brasileiras de silos, que se estima ao redor de 3 mil toneladas por mês, seriam necessários 70 meses ou quase 6 anos para atender a esta deficiência sem considerar o aumento da produção de grãos no período interveniente.

A capacidade de armazenamento está dividida em 78% a granel e 22% em sacas (CONAB, 2006). A armazenagem em sacas não é aconselhável porque põe o grão em risco de contaminação, seja por surgimento de fungos, seja por promover ambiente adequado à proliferação de insetos. Em silos de armazenamento a granel, estes fatores podem ser controlados com aeração, isto é, fazendo com que determinado fluxo de ar cruze pelos grãos com o objetivo de diminuir, sempre que possível, a temperatura no interior do silo. Temperaturas baixas podem garantir que não ocorra proliferação de fungos e que o ambiente não seja adequado para os insetos. Além disso, quanto menor a temperatura, menor será o metabolismo dos grãos e haverá uma menor perda de massa durante o período de armazenagem. Não se deve esquecer que os grãos armazenados são seres vivos e respiram. Levando-se em conta a necessidade de substituição destes 22% de armazenagem em sacas por armazenagem a granel, será necessário fabricar mais 8.875 silos, que demandariam outros 6 anos com todas as fábricas trabalhando para atender o mercado.

Não se pode deixar de salientar que a agricultura brasileira vem batendo recordes de produção e que, para cada aumento de produção, existe a necessidade de aumento de armazenagem. Nos últimos 10 anos, a produção tem aumentado a uma média de 5% ao ano. Este aumento demandará outros 2.000 silos que necessitarão outros 17 meses de produção de todas as fábricas.

O país vem aumentando a área plantada e tem-se constantemente incrementado os índices de produção por hectare. Essa realidade gera um déficit de armazenagem crescente e que é agravado quando o agricultor não encontra preços adequados para o seu produto e não tem como investir em armazenagem. Outro fator cuja influência deve ser analisada com cuidado é o incremento de produção de biocombustível.

O incentivo ao biocombustível tem que ser analisado sob dois pontos de vista quando o assunto é a armazenagem de grãos. O álcool produzido com cana-de-açúcar vem tomando antigas áreas de produção de grãos, o que ocasionará uma diminuição na demanda de armazenagem nestas regiões. Por outro lado, o biodiesel, principalmente o produzido com soja, vai provocar uma necessidade de aumento de armazenagem próximo às usinas. Outro

ponto importante é que o milho produzido nos EUA vem sendo utilizado para a produção de metanol e o preço desta *commodity* vem crescendo. A simples troca, por razões econômicas, da soja (cuja produção média é de 2.824 kg/hectare – CONAB, 2006) por milho (produção média de 3.628 kg/hectare – CONAB, 2006), poderá aumentar em 30% a necessidade de armazenamento em algumas regiões do Brasil. Este fato ocorreu no EUA, nos anos de 2006 e 2007, provocando uma procura por silos nunca vista naquele país.

No Brasil existem várias empresas fabricantes de silos metálicos e muitas construtoras que se dedicam a construir silos de concreto e armazéns graneleiros. Como não existe norma brasileira para a determinação das pressões ocasionadas pelos grãos, busca-se em normas estrangeiras o subsídio necessário para a determinação dos esforços atuantes nestas estruturas.

O Brasil conta hoje com excelentes centros de pesquisa para o estudo de armazenamento de grãos, como é o caso da Universidade de Viçosa em Minas Gerais, que abriga o CENTREINAR, a Universidade de São Carlos em São Paulo, que possui laboratório de alto nível e publica vários trabalhos no âmbito da determinação de fluxos e pressões no interior dos silos. Aliás, o Prof. Calil Junior, docente desta universidade, é o principal responsável pela formatação de uma norma brasileira para a determinação dos esforços no interior de silos.

No Rio Grande do Sul estão localizadas as maiores indústrias de silos e estima-se que na região sul do país concentre-se a produção de 85% dos silos metálicos fabricados no Brasil. Apesar disso, o estado não conta com um centro de pesquisa para estudo deste tipo de estrutura e possui poucas universidades onde o curso de engenharia agrícola seja oferecido. Diversos estudos são necessários nas áreas de secagem de grãos, transporte e armazenagem. Vale observar que mesmo na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, os cursos de engenharia civil e engenharia mecânica não dispõem de disciplinas associadas com o tema de armazenamento, transporte e conservação de grãos.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Diversos fatores influenciam o projeto de silos como:

- material a ser armazenado e suas características físicas,
- dimensões gerais do silo,
- excentricidade da descarga, inclinação, forma e abertura do funil de descarga,
- materiais empregados na fabricação, etc...

Encontram-se, por estes motivos, diversos trabalhos que verificam a influência destas variáveis no comportamento do escoamento do produto armazenado e no cálculo das pressões.

Devido à importância destas estruturas, verificou-se a necessidade de um estudo apropriado de todas as ações que atuam nos silos, especificamente naqueles destinados a armazenagem de grãos.

Como o mercado de comercialização de silos é muito competitivo, os fabricantes buscam constantemente diminuir o peso destas estruturas desenvolvendo novos materiais e projetando novas soluções de perfis e uniões.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivos:

- Apresentar as teorias para a determinação das pressões devidas aos grãos;
- Determinar as cargas de vento;
- Apresentar o memorial completo de cálculo de um silo;
- Propor um algoritmo de projeto de um silo;
- Desenvolver planilhas eletrônicas auxiliares ao projeto;
- Analisar, por elementos finitos, um silo sujeito a carga de vento quando vazio.

1.1.1 Justificativa

Inexistência de norma brasileira aplicada ao projeto de silos e deficiência na literatura técnica, escrita em português, aplicada ao tema. Falta de um trabalho atual que analise o contexto completo de um silo.

1.1.2 Estrutura do Trabalho

Neste trabalho o capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema da pesquisa, bem como faz uma revisão bibliográfica. No capítulo 2 apresenta as partes componentes de um silo e alguns acidentes com este tipo de estrutura são analisados. O capítulo 3 apresenta um estudo sobre cargas atuantes em silos. O capítulo 4 apresenta o cálculo dos componentes do corpo de um silo. O capítulo 5 apresenta algumas teorias correspondentes ao cálculo de um silo vazio submetido à carga de vento. O capítulo 6 apresenta um algoritmo para cálculo de um silo. O capítulo 7 apresenta o cálculo de um silo quando vazio submetido a carga de vento analisado

por elementos finitos através de análise elástica linear. O capítulo 8 apresenta as conclusões deste trabalho.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dentre as teorias formuladas para a determinação das pressões e a forma do fluxo do produto no interior de um silo, pressões devidas ao vento, etc., podem ser citadas as seguintes, conforme referido na tese de Doutorado de CALIL JR, (1984).

Isaac Roberts, na Inglaterra em 1882, foi quem iniciou estudos teóricos e experimentais sobre as pressões em silos. Realizou vários experimentos em silos de seção retangular e hexagonal construídos em madeira.

Janssen, na Alemanha em 1895, realizou estudos e publicou sua teoria para a determinação das pressões no interior de silos que serviu de base para muitas normas. Seu estudo forneceu, com razoável exatidão, as pressões que ocorrem durante o carregamento dos silos.

Jamieson, no Canadá em 1904, realizou os primeiros ensaios em maquetes reduzidas, medindo as pressões laterais por meio de diafragmas hidráulicos.

Reimbert, na França em 1943, realizou ensaios e verificou aumento nas pressões durante o descarregamento de até 80% quando comparado com as pressões que ocorrem no carregamento do silo, quando comparado com as pressões de Janssen. Verificou por meio de ensaios, que a relação entre as pressões lateral e vertical não é constante, mas varia com a altura no silo. Outra verificação é que em um silo retangular, num mesmo nível, as pressões são distintas nas paredes com diferentes medidas. Desenvolveu fórmulas para o cálculo de pressões levando em conta as experiências realizadas. Em 1956, publicou livro na França com indicações de cálculos das pressões em silos com base em suas teorias e comparou com a teoria de Janssen, além de fornecer indicações sobre o armazenamento de cereais e oleaginosas, aeração dos grãos, comportamento em atmosfera de gás carbônico, e sobre os perigos de explosão e asfixia no interior dos silos (Reimbert, 1971).

Platanov e Kovtun, na Rússia em 1959, investigaram as pressões laterais durante o descarregamento e chegaram a resultados cerca de 2,32 vezes maiores que as pressões durante o carregamento. As normas russas têm como base esse trabalho.

Na Alemanha, em 1964, foi publicada a norma DIN-1055-6 que trata das pressões em silos.

Jenike e Johanson, nos Estados Unidos em 1968, estudaram o fluxo dos materiais obtendo uma teoria para a dimensão e inclinação ótima dos funis, para um fluxo contínuo, sem formação de abóbadas ou arcos.

Klaus Pieper, na Alemanha em 1969, investigou as pressões críticas em silos para verificar a norma alemã ensaiando modelos cilíndricos e quadrados na Universidade Tecnológica de Braunschweig.

Ravenet apresentou sua tese de doutorado em 1974 denominada “Sobre-pressões nas paredes de silos devido à descarga e efeitos produzidos pela forma do funil e excentricidade da descarga”. Publicou entre 1977 e 1983 seus três livros intitulados “Silos”, nos quais se pode encontrar uma rica fonte de dados para o engenheiro que pretende iniciar seus conhecimentos nesta área.

Em 1978, Calil Jr apresentou sua dissertação de mestrado “Estudo de Silos de Madeira a Nível de Fazendas” e dedica-se até os dias de hoje à pesquisa e comportamento de fluxos no interior de silos.

O Prof. Ivo Wolff, em 1979, realizou vários trabalhos de cálculos para a empresa Kepler Weber nos quais empregou formulários para cálculo das pressões devidas aos grãos armazenados em silos com base na teoria de Janssen e na norma alemã. Determinou as cargas atuantes em cada componente comparando as mesmas com as cargas críticas, verificou a flambagem devida ao vento e realizou ensaios de ruptura de diversas ligações. Este trabalho teve origem em um grande acidente ocorrido em unidade da Cibrazem localizada em Rio Verde – Goiás (CIENITEC, 1979).

Na Argentina, em 1977, foi publicada a norma para “*Silos aéreos Metálicos para almacenamiento de granos – Cilíndricos y desarmables*” (IRAM 8 015, 1977), porém esta deixou de vigorar em 1997 e está sendo revisada.

Na Austrália, a Universidade de Sydney realizou várias pesquisas que resultaram em muitos trabalhos publicados na década de 80, entre os quais se devem salientar os trabalhos realizados pelo Dr. J.M. Rotter. Nestes trabalhos estudou-se a estabilidade elástica de uniões em cascas cilíndricas sobre compressão axial (Rotter, 1988-a), projeto estrutural de silos para aplicação agrícola (Rotter, 1988-b) e flambagem elástica em cascas cilíndricas imperfeitas contendo sólidos granulares (Rotter, 1989). Outras pesquisas foram desenvolvidas naquela

universidade envolvendo cargas de vento em silos circulares (Macdonald, P.A., Holmes, J.D., Kwok, K.C.S., 1989), Estabilidade sob carregamento de vento (Ansourian, 1985), etc.

Calil Jr, em 1984, defendeu sua tese de doutorado intitulada “*Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos*” com orientação do Dr. Juan Ravenet.

Benink, em 1989, defendeu tese de doutorado na Holanda comparando normas de vários países e indicando que somente com o conhecimento das propriedades do material a ser armazenado pode-se ter um projeto adequado de silo. Constatou que o comportamento do fluxo depende do grão armazenado, da geometria e material das paredes do silo. O autor concluiu, após comparar várias teorias com dados experimentais, que a teoria de Janssen é a mais simples e fornece uma precisão suficiente na determinação das pressões nas paredes. A seguir o autor desenvolveu uma nova teoria para determinar as pressões nas paredes dos funis durante a descarga, pois as teorias existentes não estavam de acordo com análises experimentais. O autor desenvolveu também um programa de computador para determinar o tipo de fluxo, a abertura crítica e quantidade de fluxo na descarga, além de determinar as pressões nas paredes durante a carga e descarga para diferentes teorias e normas.

Andrade Jr., em 2002, estudou a ação do vento em silos cilíndricos de baixa relação altura/ diâmetro e confrontou os dados encontrados com os apresentados na norma brasileira, NBR-6123 (1988). O mesmo apresentou importantes indicações de comportamento e ações de vento em silos com montantes montados externamente.

Atualmente as normas mais empregadas para o cálculo das pressões no interior de silos são a ANSI/ASAE EP433 *Loads Exerted by Free-Flowing Grain on Bins* (Cargas exercidas por grãos com fluxo livre em silos), de 2000, a DIN 1055/06 *Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter* (Cargas em silos e tanques), de 2003 e a UNE-ENV 1991-4 *Acciones en Silos y Depósitos* (Ações em Silos e Depósitos), de 1998. As duas últimas normas são similares. Portanto, nesta dissertação serão comparados os resultados da ANSI/ASAE EP433 e UNE-ENV 1991-4.

No Brasil, a norma DIN 1055/6 de 1964 e a norma ASAE D240 foram muito utilizadas pelos fabricantes de silos metálicos até 1996. Posteriormente, os mesmos adotaram a norma DIN 1055/6, de 1987. Esta norma continua sendo utilizada, apesar de ter sido revisada em 2003.

2 DADOS GERAIS

2.1 PARTES E COMPONENTES DE UM SILO

Os silos são divididos em partes: telhado e corpo.

O telhado possui como componentes as telhas, que podem ser autoportantes, ou podem estar apoiadas na estrutura do telhado.

Um dos parâmetros de padronização dos silos é a quantidade de telhas por chapa lateral do corpo. A grande maioria das empresas padroniza esta quantidade em 3, sendo que algumas usam 4 telhas para cada chapa do corpo.

O corpo do silo possui como componentes:

- Chapa Lateral: perfiladas com diferentes ondulações, sendo os mais comuns aqueles com comprimento de onda de 101,6mm e altura de onda de 12mm, são montadas nos silos, formando anéis cuja espessura varia conforme a carga que deverão resistir.
 - As empresas usualmente otimizam o projeto padronizando o comprimento útil da chapa a ser utilizada em todos os modelos de silos. Os diâmetros padrões são originados da quantidade de chapas padrão utilizado em um anel.

Como exemplo, tomando-se o comprimento útil da chapa “ l_{ch} ” como sendo igual a 3,1416m, caso tenhamos “ n ” chapas na circunferência, tem-se um silo de diâmetro “ n ”, pois:

$$diâmetro = \frac{n.l_{ch}}{\pi} = \frac{n.3,1416}{\pi} = \frac{n.\pi}{\pi} = n \text{ (m)} \quad (\text{Eq. 2-1})$$

A grande maioria dos silos no Brasil segue padrões americanos e por isso o comprimento útil das chapas é 2,873m (9,424778'). Assim, o diâmetro do silo em pés é 3.n ou seja, três vezes o número de chapas utilizadas para a montagem de um anel.

$$diâmetro = \frac{n \cdot 9,424778}{\pi} = \frac{n \cdot 9,424778}{3,1416} = 3 \cdot n \text{ (pés)} \quad (\text{Eq. 2-2})$$

- A largura da bobina a ser utilizada definirá a altura útil da chapa. As alturas padrão dos modelos de silos serão múltiplas da altura útil da chapa. Para um bobina de 1m de largura, se for utilizada a ondulação de 101,6mm, pode-se averiguar que a altura útil será de 914,4mm.
- Montantes: nome dado às colunas dos silos que podem ser montadas no interior ou exterior. Um bom projeto padroniza o perfil e varia a espessura destas peças de acordo com a carga que deverão resistir.
 - Deve-se padronizar também a quantidade de montantes por chapa lateral. O mais comum são dois montantes por chapa, porém existem fabricantes que utilizam um ou três montantes por chapa. Silos de pequena altura também podem ser fabricados sem montantes, porém a chapa lateral deverá suportar as cargas de atrito do grão e estar calculada para que não ocorra flambagem.
- Anéis de reforço: São elementos usados para enrijecer o silo quando o mesmo está sujeito a pressões de vento que não podem ser absorvidas somente pelo conjunto chapa lateral e montante. Na Figura 2.10-a pode-se verificar que o silo com anéis de reforço praticamente não sofreu danos devidos ao vento.

2.2 MATERIAIS

Os materiais comumente utilizados para silos metálicos variam conforme a peça empregada. As chapas laterais do corpo do silo utilizam aços galvanizados condizentes com a NBR7008 (2003) tipo ZAR (sigla que indica aço de qualidade estrutural, zincado, de alta resistência) sendo comum o emprego dos revestimentos de zinco Z-275 e Z-350, com as especificações indicadas na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 – Massa mínima de revestimento para aços – NBR7008

Designação do revestimento	Massa mínima de revestimento g/m^2	
	Ensaio triplo total nas duas faces	Ensaio individual total nas duas faces
Z 275	275	235
Z 350	350	300
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Massa de revestimento de $100g/m^2$ em ambas as faces corresponde a uma espessura de revestimento de aproximadamente $7,1 \mu m$ por face. ▪ O valor apresentado no ensaio triplo corresponde ao valor médio de 3 amostras de área conhecida. ▪ O valor apresentado no ensaio individual corresponde ao menor valor possível de ser admitido entre as três amostras utilizadas. 		

As espessuras das chapas normalmente empregadas são: 0,80; 0,95; 1,25; 1,55; 1,95; 2,30; 2,70 e 3,00mm. Porém, em muitos casos, pode haver a necessidade de espessuras maiores. Nestes casos os fabricantes de silos utilizam duas chapas montadas em conjunto para chegar a uma espessura de até 6,00mm (duas chapas 3,00mm montadas uma sobre a outra).

Nos montantes, diversos aços podem ser utilizados, porém popularizou-se no Brasil o uso do aço fornecido pela CSN, denominado ARC-600, ou de ligas similares produzidas por outras companhias, devido ao custo benefício (conforme estudos realizados pelo autor). Em alguns silos, devido à facilidade de obtenção no mercado, utilizam-se aços sem qualificação estrutural, tais como SAE-1008, NBR7008-ZC (zincado de qualidade comercial) entre outros. As propriedades mecânicas dos aços ZAR e ARC-600 são apresentadas na Tabela 2-2.

Tabela 2-2 – Tabela de Propriedades Mecânicas dos Aços

Aço	Resistência ao escoamento f_y (MPa)	Resistência à ruptura f_u (MPa)
ZAR 230	230	310
ZAR 250	250	360
ZAR 280	280	380
ZAR 320	320	390
ZAR 345	345	430
ZAR 400	400	450
ZAR 550	550	570
ARC 600	480	600

Todas as peças que compõem um silo são unidas por parafusos com acabamento superficial efetuado através de processo de zincagem ou bicromatização. O parafuso mais utilizado segue a especificação ISO 7411 – grau 8.8, do tipo alta resistência, com diâmetros 8, 10 e 12mm. A utilização de parafusos com especificação ISO 7411 – grau 10.9, que resultam mais alta resistência, ainda não é viável economicamente no Brasil quando comprado de fabricantes locais, porém seu uso deve se popularizar tão logo o valor diminua.

Os fabricantes de parafusos no Brasil oferecem produtos específicos para silos, com cabeça flangeada (Figura 2.1(a)), onde fica alojada uma arruela de neoprene, para garantir que a água da chuva não penetre no silo pelos furos da chapa, e que essa umidade venha a danificar o produto armazenado. Este tipo de parafuso pode não ser eficiente, pois a arruela de neoprene pode romper quando do aperto da porca, se por acaso a cabeça girar, atritando a arruela de neoprene contra a chapa.

Silos fabricados nos Estados Unidos utilizam conjuntos parafuso-arruela Figura 2.1(b) não integrados. As arruelas são fabricadas em aço, sendo em um dos lados fixada uma camada de borracha para evitar a entrada de água. Este sistema é aparentemente mais eficiente, pois é mais difícil que a borracha rompa no momento do aperto da porca.

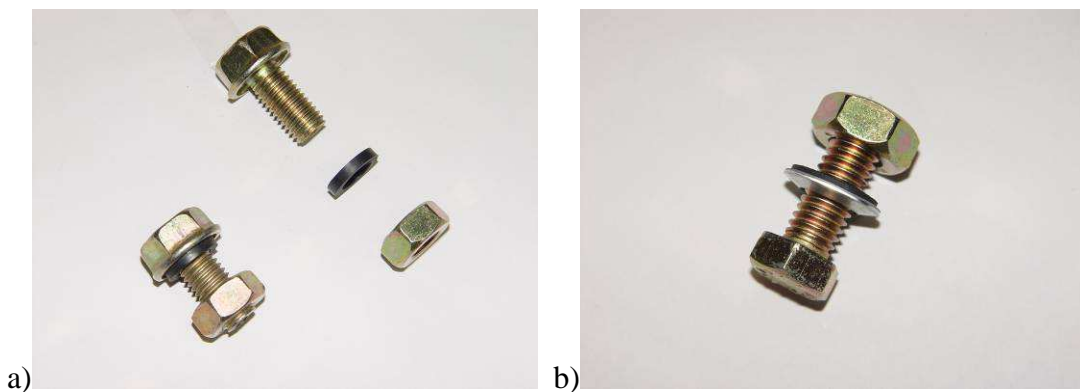


Figura 2.1 – Parafusos para silos

2.2.1 Aços sem Qualificação Estrutural para Perfis

A utilização de aços sem qualificação estrutural para perfis é tolerada, conforme NBR-14762 (2001) se o aço possuir propriedades mecânicas adequadas para receber trabalho a frio. Exemplos destes tipos de aço são todos aqueles designados como SAE, NBR7008-ZC, entre outros.

Quando utilizados, estes aços devem adotar para resistência ao escoamento f_y e a resistência à ruptura f_u os valores abaixo:

$$f_y \leq 180MPa \text{ e } f_u \leq 300MPa \quad (\text{Eq. 2-3})$$

2.2.2 Parafuso sem Qualificação Estrutural

Conforme NBR-14762 (2001), podem ser adotados parafusos sem qualificação estrutural desde que o limite para a resistência à ruptura dos mesmos (f_{up}) não seja superior a 300MPa.

Em resumo, pode-se concluir que, para silos de pequenas capacidades, aços e parafusos sem qualificação estrutural podem ser adotados pois se tornam muito adequados economicamente devido às cargas atuantes serem de pequena magnitude. Já em silos de capacidades maiores, a utilização de materiais e parafusos sem qualificação tornará o projeto inviável. Desta forma, cada caso deve ser estudado para obtenção do melhor projeto.

2.3 ACIDENTES COM SILOS

Acidentes com silos se devem a diversas razões, sendo que o maior número ocorre durante a montagem. Porém, diversas falhas têm ocorrido por erro no dimensionamento e nas análises das cargas.

2.3.1 Acidentes Durante a Montagem

Os silos são montados iniciando-se pelo telhado (Figura 2.2/a/b/d) e depois são erguidos anel por anel de chapa utilizando-se dispositivos de elevação, comumente tripés com talhas de corrente manual ou outros dispositivos elétricos ou hidráulicos (Figura 2.2/c/d).



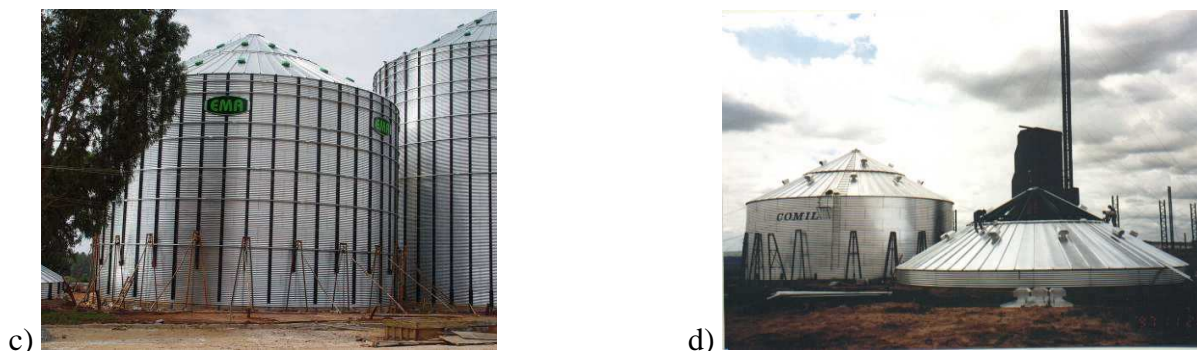


Figura 2.2 – Fotos de Silos em Montagem.

No momento em que todo o silo permanece elevado para a montagem de um anel, se ocorrer uma rajada de vento, esta poderá ocasionar o tombamento do silo. Problemas também ocorrem caso o silo não estiver bem nivelado durante a elevação, o que pode ocasionar sobrecarga em algum dos sistemas de elevação.

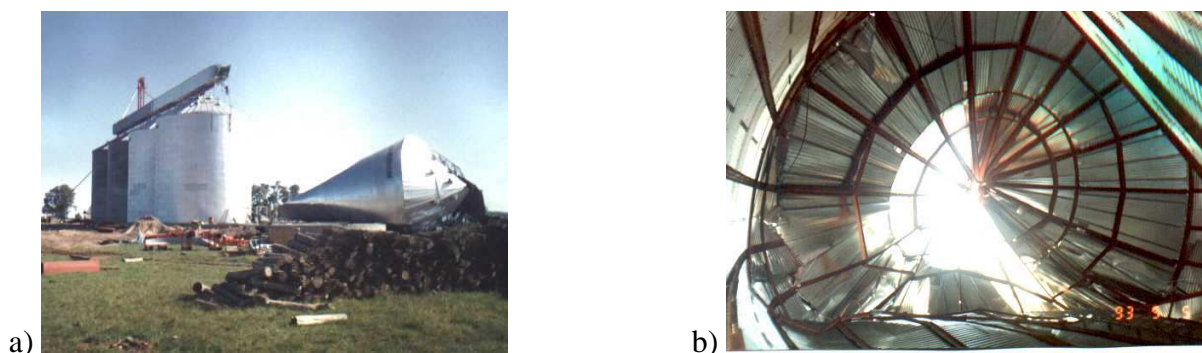


Figura 2.3 – Fotos de acidente de silo durante montagem.

As fotos acima (Figura 2.3) mostram um acidente ocorrido com um silo durante a montagem. A foto (b) mostra o interior do silo após a queda.

2.3.2 Acidentes Devido a Ancoragem

Nos silos metálicos, existe a possibilidade de aumentar a altura, e conseqüentemente a capacidade de uma unidade em operação, desconectando o silo da base, elevando-o por meio de dispositivos de elevação e acrescentando novos anéis de chapa e montantes.

Ocorre que, muitas vezes, os chumbadores existentes não são adequados à nova altura do silo e o colapso pode ocorrer por rompimento destes elementos.

Por experiência sabe-se que a utilização de chumbadores rápidos ou químicos não é recomendável. Neste caso indica-se a utilização de chumbadores do tipo “bengala” (Figura 2.4).

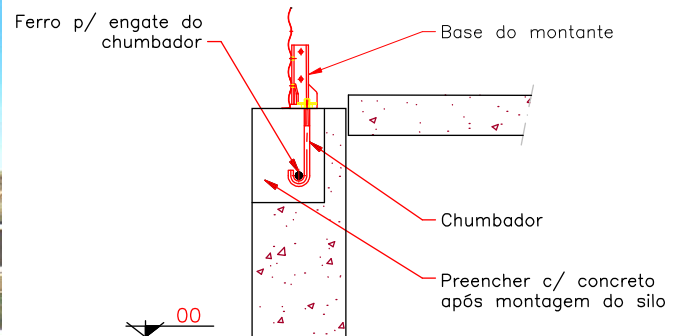


Figura 2.4 – Foto de acidente de silo durante montagem e detalhe de chumbador adequado.

Outro problema ligado à ancoragem é a falta de possibilidade de deslocamento do montante no sentido “centro do silo – montante” que causa flexão. Conforme “Relatório de Consultoria nos Silos da GSI” realizado pela empresa Capacittà – Soluções em Pós-Colheita e Engenharia Ltda., o montante do silo que aparece nas fotos das Figura 2.5 a e 1-5 b apresenta curvatura devido à flexão provocada pela falta de furo alargado na base (Figura 2.5c). O montante é calculado para resistir somente a esforços de compressão e tração e, neste caso, por deficiência do projeto, ficou submetido à carga de flexão devido a restrição ao deslocamento (Figura 2.5-a-b).

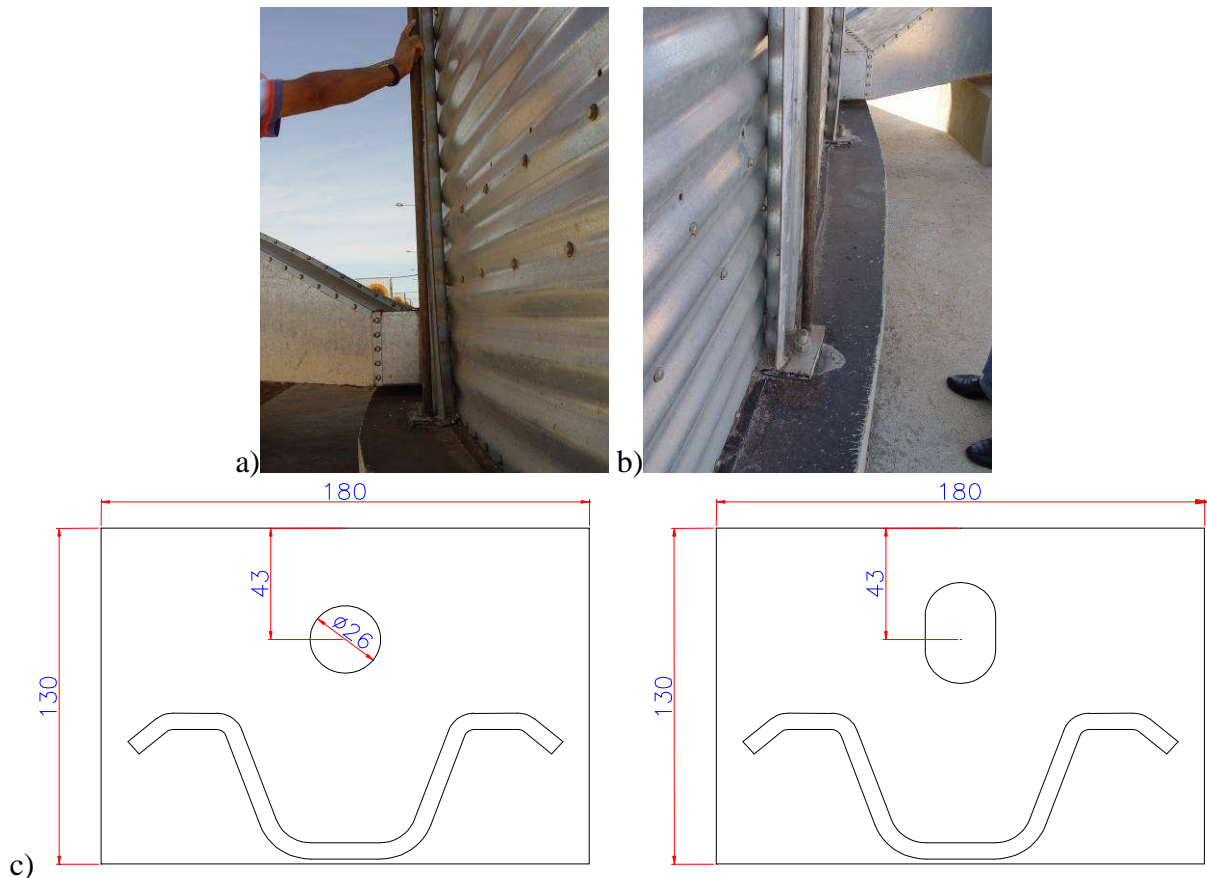


Figura 2.5 – Foto montante a flexão devido a problema na chapa de ancoragem.

2.3.3 Acidentes com Galerias

Os acidentes em galerias (também chamadas de passarelas fechadas) onde se encontram correias transportadoras são, infelizmente, bastante comuns (Figura 2.6). Não se tratam de acidentes diretamente ligados ao silo, mas ocasionam grandes prejuízos a estes. Problemas de dimensionamento são freqüentes e acredita-se que os efeitos do vento nestas estruturas tenham que ser mais bem estudados.

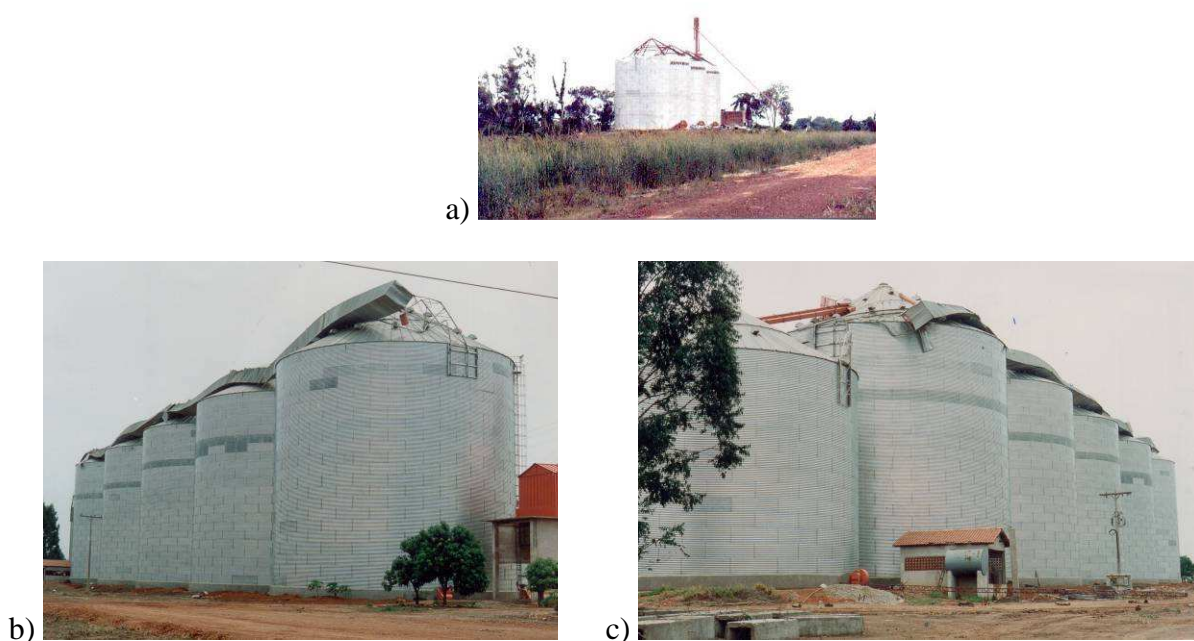


Figura 2.6 – Fotos de acidentes com galerias.

A foto acima (Figura 2.6/a) mostra uma bateria de silos que possuía uma galeria ligando os 3 silos e que foi arrancada com o vento. Nas fotos (b) e (c), queda de galeria que estava sobre bateria de silos com o transportador de carga do mesmo.

2.3.4 Acidentes Devido a Projeto

Os fabricantes de silos calculam e projetam modelos de silos padrões. Caso exista algum erro de dimensionamento, ocorrerão, seguramente, várias quedas de silo em um mesmo período e de um mesmo modelo.

Problemas também podem ocorrer quando o silo foi concebido para um tipo de grão específico e utilizado para outros tipos de grãos com características que elevam as pressões em seu interior.

No Brasil, em regiões onde o arroz é a única cultura, muitos fabricantes oferecem silos especificamente projetados para a armazenagem destes grãos. Como o arroz tem peso específico menor que outros grãos, o silo fica conseqüentemente mais barato. Porém, nestas mesmas regiões, que anteriormente eram somente utilizadas para cultura de arroz, passou-se a cultivar outros grãos que, caso venham a ser armazenados nestes silos, poderão ocasionar colapso dos mesmos. Trigo, soja e milho, por exemplo, têm peso específico ao redor de $7,5 \text{ kN/m}^3$, enquanto o arroz tem peso específico em torno de $6,0 \text{ kN/m}^3$. Assim, o aumento da pressão nas paredes do silo será da ordem de 25%.

A Figura 2.7 apresenta acidente com silos provavelmente por erro de projeto.

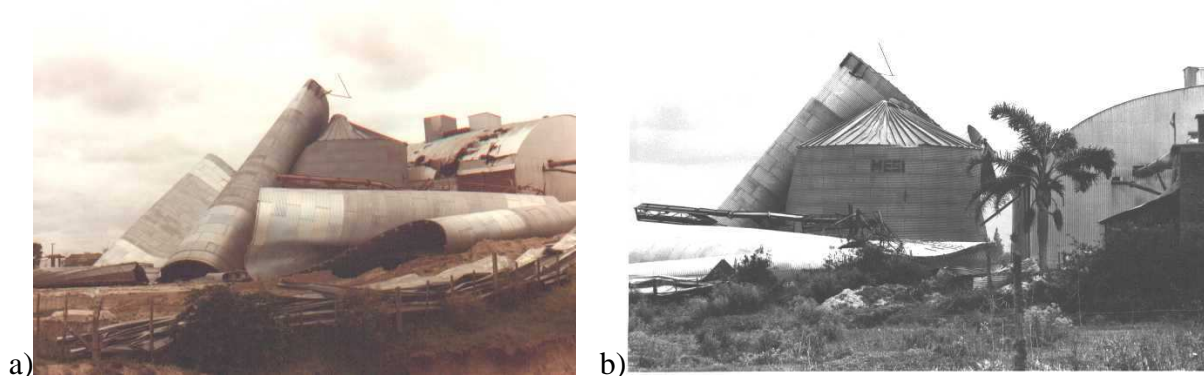


Figura 2.7 – Fotos de acidentes por provável erro de projeto.

Além disto, no Brasil, devido à concorrência entre fabricantes para aumentar mercado e lucratividade, os mesmos buscam a substituição de aços tradicionais por outros de maior resistência. Verificou-se que muitos acidentes em silos ocorreram por flambagem local de alguns dos elementos dos montantes (

Figura 2.8). Anteriormente não ocorria flambagem local pois o aço utilizado tinha tensão de escoamento baixa. Ao manter o mesmo perfil e substituir o aço por outro com tensão de escoamento maior, negligenciou-se o cálculo da largura efetiva conforme discutido em maior detalhe em 4.3.2.



Figura 2.8 – Fotos de montantes com problema de flambagem local das abas.



Figura 2.9 – Foto de Silo mal dimensionado ao vento.

Em regiões de vento mais intenso, ocorre o afundamento dos silos que não tenham sido devidamente dimensionados para estas cargas, principalmente quando vazios (Figura 2.9). Figura 2.10 mostra duas fotos de acidente em uma mesma obra no norte do RS, a) dano causado pelo vento agindo diretamente no silo e b) silo danificado por choque de outro silo arrancado da base pelo vento, provavelmente por problema de ancoragem.



Figura 2.10 – Fotos de acidentes de silo causados por vento.

3 CARGAS ATUANTES EM SILOS

Para projetar um silo adequadamente, devem ser levadas em conta as cargas que podem ocorrer durante a vida útil desta estrutura. Neste capítulo abordam-se os principais carregamentos que ocorrem em silos a serem instalados no Brasil, isto é, peso próprio, peso dos acessórios, pressões devidas ao grão armazenado e vento. Ficam de fora as cargas de baixíssima ocorrência como as originadas pela neve e abalos sísmicos, entre outras.

3.1 PESO PRÓPRIO

O peso próprio do silo pode ser estimado conforme experiências anteriores e levando em conta os pesos de silos já dimensionados anteriormente. Nesta dissertação informam-se as cargas utilizadas pelo autor com o objetivo de servirem como primeiro parâmetro de cálculo.

3.1.1 Telhados

Silos com telhados autoportantes são aqueles onde a chapa da telha não necessita de uma estrutura de sustentação. Conforme a necessidade, anéis de reforço devem ser instalados para aumentar a rigidez (Figura 3.1).

Levando-se em conta os diversos silos calculados pelo autor da dissertação, recomenda-se a utilização de uma carga distribuída de $0,25 \text{ kN/m}^2$ como primeiro parâmetro de cálculo para o peso próprio do telhado.



Figura 3.1 – Silo com telhado autoportante.

Este valor foi verificado tomando-se o maior peso entre todos os telhados autoportantes de uma importante empresa fabricante de silos no Brasil. Esta empresa utiliza telhados autoportantes para silos de diâmetro de 13,70m e menores.

Para silos com estrutura sob o telhado para suportar as telhas (Figura 3.2, mostra uma vista aérea de estrutura inferior do telhado em montagem), a carga distribuída adotada para um primeiro cálculo fica em torno de $0,35 \text{ kN/m}^2$. Esta carga também é uma recomendação para uma primeira análise para silos de diâmetro entre 14,55m e 32,74m conforme experiência do autor.



Figura 3.2 – Foto da montagem da estrutura sob telhado de um silo de 21,82m de diâmetro.

3.1.2 Corpo

Basicamente o corpo do silo é constituído de duas partes: chapa lateral e montante.

Como se verá mais adiante, a chapa lateral é responsável por suportar as pressões horizontais devidas aos grãos e, para este cálculo, o peso próprio da mesma não é importante. Assim, o dimensionamento desta chapa pode ser realizado antes, e, ao invés de estimado, se poderá utilizar o peso correto destes elementos na determinação do peso próprio do silo.

Os montantes são calculados por anel, dimensionando-os de cima para baixo, considerando o peso próprio dos montantes calculados anteriormente. Para o montante no anel em análise considera-se, como peso próprio destes montantes, um peso igual ao das chapas laterais.

Após o cálculo de todo o silo, os montantes podem ser recalculados utilizando os perfis escolhidos, em um processo iterativo, porém a prática indica que este procedimento não é necessário.

3.2 CARGA DE EQUIPAMENTOS ACESSÓRIOS

A grande maioria dos silos conta com diversos acessórios incorporados que devem ter suas cargas determinadas e acrescentadas aos silos.

3.2.1 Termometria

A termometria consiste em cabos que se devem instalar fixados ao telhado (Figura 3.3) e que possuem sensores de temperatura que monitorarão a massa de grãos. Conforme a norma argentina IRAM 8 015, 1977 as cargas dos cabos de termometria devem ser determinadas da seguinte forma:

$$T = 1,4.d.\gamma.\tan(a_3).\left(0,84.L^2.\tan^2\left(45^\circ - \frac{a_1}{2}\right) + 0,27.\frac{D.L}{\tan(a_2)}\right), \text{ para } L \leq L_1 \quad (\text{Eq. 3-1})$$

$$T = \frac{1,4.0,35.d.\gamma.\tan(a_3).D^2}{\tan^2(a_2).\tan^2\left(45^\circ - \frac{a_1}{2}\right)}.\left(\pi.\tan^2\left(45^\circ - \frac{a_1}{2}\right).\tan(a_2).\frac{L}{D} - 0,57\right), \text{ para } L > L_1 \quad (\text{Eq. 3-2})$$

Sendo,

$$L_1 = \frac{D}{2.\tan(a_2).\tan^2\left(45^\circ - \frac{a_1}{2}\right)} \quad (\text{Eq. 3-3})$$



Figura 3.3 – Fotos de cabos de termometria em silo com estrutura sob o telhado.

Nas expressões (Eq. 3-1) a (Eq. 3-3), T é a força de tração (kN) devido aos cabos de medição de temperatura, a_1 é o ângulo de atrito entre grãos (podendo-se adotar para a_1 o valor de 30°), a_2 é o ângulo de atrito entre grão e parede (podendo-se adotar para a_2 o valor de $22^\circ30'$), a_3 é o ângulo de atrito entre grão e material externo do cabo de termometria (podendo-se adotar para a_3 o valor de 11°), d é o diâmetro do cabo de termometria (em m), D é o diâmetro do silo (em m), L é o comprimento do cabo imerso nos grãos (em m), 1,4 é o coeficiente para levar-se em conta o efeito dinâmico produzido durante a descarga e γ é o peso específico do grão armazenado (kN/m^3).

Considerando-se que a carga em um cabo de termometria é devida ao atrito do grão com o material que envolve o cabo, a expressão abaixo também pode ser utilizada para o cálculo desta carga:

$$T = d \cdot \pi \cdot \tan(a_3) \int_0^L P_h \cdot dl \quad (\text{Eq. 3-4})$$

onde, P_h é a pressão horizontal devida ao grão armazenado que ocorre no interior do silo, conforme item 3.3.

3.2.2 Cargas no Centro do Telhado

Acessórios como distribuidores de grãos (Figura 3.4 a), roscas mescladoras (b), carga devida a apoios de passarela no centro dos silos (c), peso de canalizações (d), entre outros, podem existir e suas cargas deverão ser consideradas. Cada fabricante de silo considera uma carga extra no centro (cume) do telhado. Nesta dissertação, recomenda-se a adoção de uma carga no centro do silo, referente a equipamentos a serem instalados, de 2kN multiplicado pelo número de chapas laterais na circunferência do silo. Esta carga, por experiência do autor, é suficiente para atender à sobre-carga dos equipamentos a serem instalados no centro do silo.

Assim,

$$Cat = 2 \cdot n \quad (\text{Eq. 3-5})$$

Sendo, Cat a carga acidental no centro do telhado que poderá ser acrescida.

Esta carga, Cat , deve ser confrontada com as diversas cargas que irão ser instaladas, e não poderá ser ultrapassada.

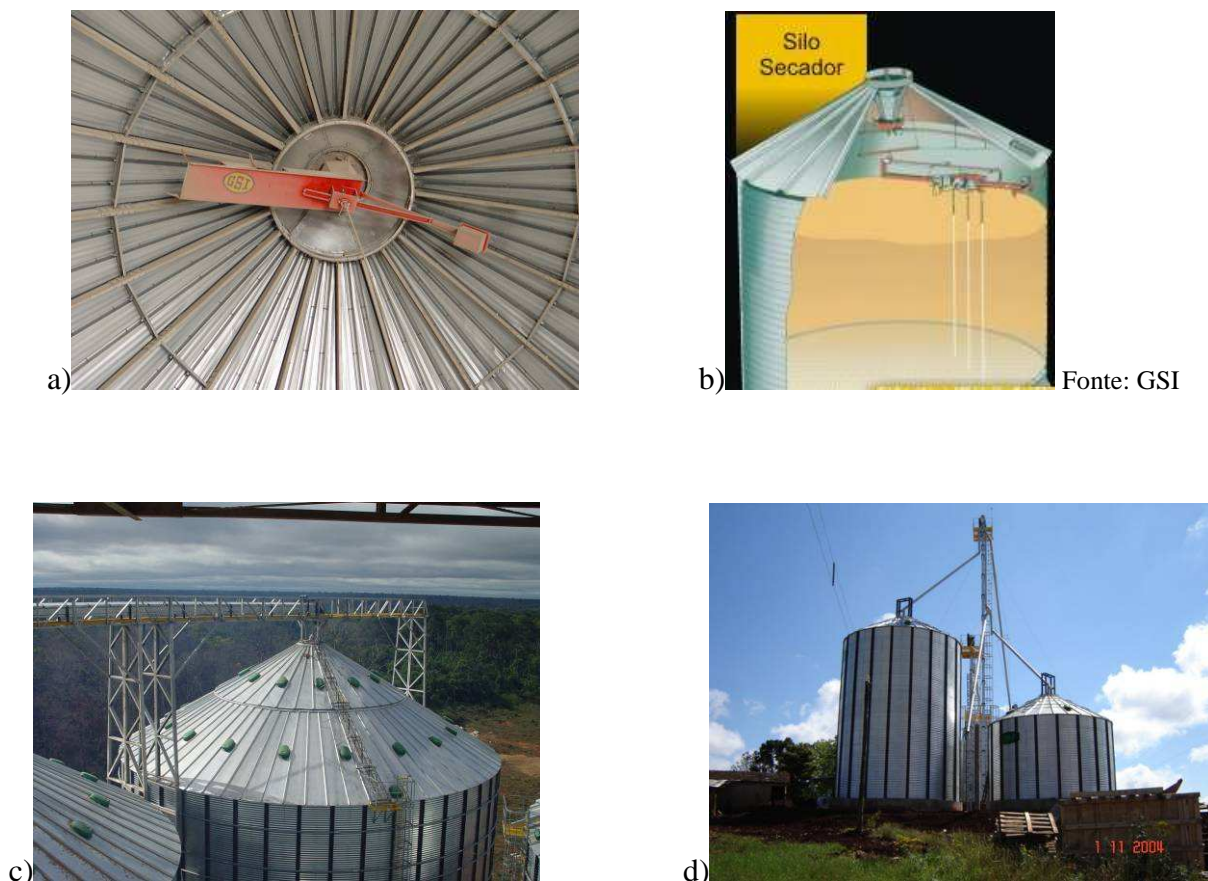


Figura 3.4 – Fotos de Acessórios apoiados no centro do telhado.

3.2.3 Cargas Adicionais nos Montantes Devido às Passarelas

Além das cargas verticais que o montante deve suportar, devido ao atrito do grão com as paredes, peso próprio, ação do vento, acessórios, (neve, abalos sísmicos, etc.), freqüentemente pode ser necessário que estruturas tipo passarelas ou galerias sejam instaladas sobre os silos, apoiadas nos montantes.

Passarelas são estruturas metálicas existentes sobre silos usadas para apoio de transportadores, podendo ser abertas (Figura 3.4 c) ou fechadas (Figura 3.5 c), também chamadas de galerias.

As cargas das reações das passarelas devem ser acrescentadas à carga dos montantes para cálculo dos mesmos (Figura 3.5 a). Para o caso de configurações de silos padrão, indica-se que seja considerada uma determinada carga máxima e que o projetista das estruturas tipo passarela e galerias observem que esta carga não pode ser excedida. Caso isso ocorra, o silo não será mais o padrão e uma verificação de cálculo deve ser feita para redimensionamento dos montantes de apoio para esta carga ou a passarela não poderá ser apoiada no silo e pilares apoiados diretamente ao solo deverão ser considerados no projeto.

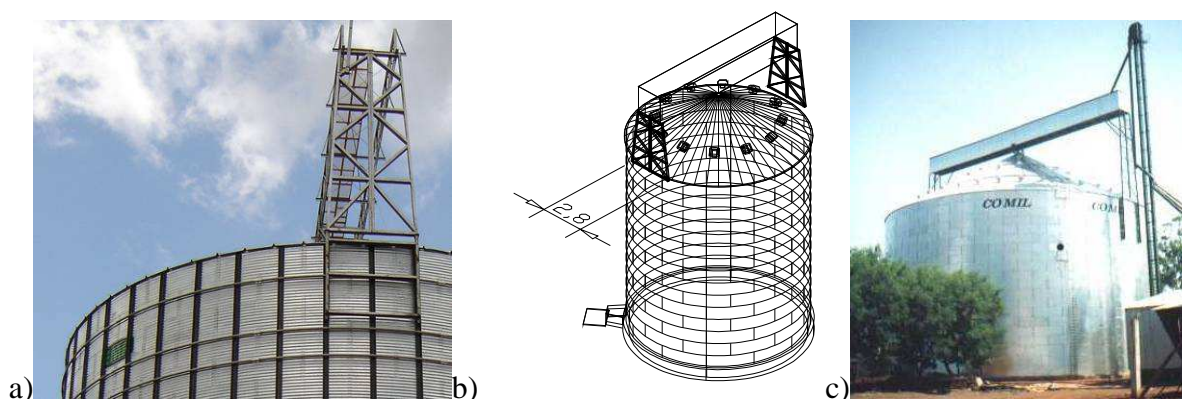


Figura 3.5 – a) apoio pilar passarela nos montantes b) Esquema e c) Passarela Fechada sobre silo.

Para carga adicional de passarelas e galerias o autor recomenda, como expressão para o dimensionamento:

$$C_{pg} = D/2 + (D/2 \cdot \tan(\alpha) + 2) \cdot D/2,8 \quad (\text{Eq. 3-6})$$

no qual C_{pg} é a reação estimada de passarelas e galerias sobre os montantes, α é o ângulo de inclinação do telhado com a horizontal, 2,8 é o valor estimado da abertura das colunas da torre da galeria. Admite-se, ainda, que a carga da galeria e equipamentos no interior seja de 2kN/m e que a carga de vento agindo na passarela seja de 1kN/m² (altura da galeria: 2m).

A reação horizontal da passarela no vínculo com o silo não está sendo considerada neste pré-cálculo. A princípio, esta carga será absorvida pelos parafusos da união dos pilares com os montantes do silo. A distribuição da força horizontal em cada parafuso poderá ser mais bem estudada através da análise dos componentes e ligações, em modelo a ser introduzido em programa para cálculo pelo método dos elementos finitos.

As pressões devidas ao vento sobre as passarelas fechadas deveriam ser mais bem estudadas pois se tratam de estruturas que tem fechamento nas laterais e na parte superior. No entanto, a parte inferior é aberta e os operadores caminham sobre um piso de chapa expandida perfurada. Desta forma, o vento que atinge as passarelas tem efeito desconhecido e dever-se-ia levar em conta a influência do telhado inclinado logo abaixo, o que provavelmente provoca um movimento de ar ascendente embocando por baixo da passarela. Trata-se de um assunto importante e que demanda mais estudos.

3.3 PRESSÕES DEVIDAS AOS GRÃOS ARMAZENADOS

Diferentemente de um tanque onde se armazena líquido (carregamento hidrostático com distribuição linear com a profundidade) e que apresenta somente pressão horizontal normal à parede, na armazenagem de grãos e demais granéis sólidos surge outra pressão oriunda do atrito deste material com a parede. Como exemplo pode-se recordar a época da infância e da brincadeira de encher um balde com areia na praia. Ao virar-se o balde de cabeça para baixo, dependendo do teor de umidade da areia, granulometria, dimensões do balde, material com que foi fabricado o balde, parte da areia fica presa e não cai.

Apresentam-se, a seguir, duas normas baseadas na teoria de Janssen e que são as mais usadas atualmente na determinação das pressões exercidas pelos grãos em silos. Por falta de uma norma brasileira, adotou-se como base teórica a norma UNE-ENV 1991-4 Eurocódigo-1 Parte:4, que é a mais atualizada. Apresenta-se também a norma ANSI/ASAE EP433 para uma confrontação de resultados.

3.3.1 Teoria de Janssen

A teoria de Janssen que é utilizada por muitas normas internacionais, apresenta fórmulas para a determinação das pressões que ocorrem em paredes e fundo de silos.

Considerando que γ é o peso específico aparente do material (kN/m^3), p_v é a pressão vertical (kN/m^2), p_h é a pressão horizontal (kN/m^2), p_w é a pressão de atrito (kN/m^2), z é a profundidade onde estão sendo calculadas as pressões (m), A é a área da seção do silo (m^2), U é o perímetro da seção do silo (m) e K_s é a razão entre a pressão horizontal e a pressão vertical p_H / p_V , tem-se:

$$p_H = K_s \cdot p_V \quad (\text{Eq. 3-7})$$

$$p_w = \mu \cdot p_H = \mu \cdot K_s \cdot p_V \quad (\text{Eq. 3-8})$$

em que μ é a razão entre a pressão de atrito e a pressão horizontal p_w / p_H .

Considerando agora o equilíbrio de forças (Figura 3.6) agindo na vertical $\sum F_y = 0$:

$$p_w \cdot U \cdot d_z + \left(p_V + \frac{dp_V}{dz} \cdot d_z \right) \cdot A = p_V \cdot A + \gamma \cdot A \cdot d_z \quad (\text{Eq. 3-9})$$

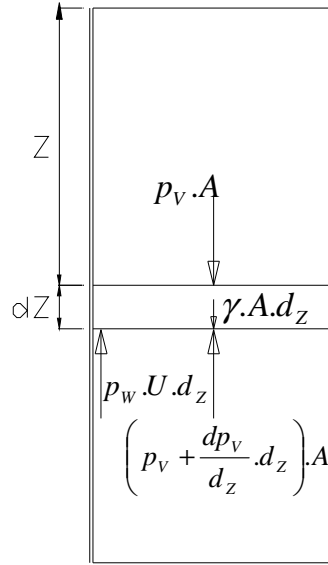


Figura 3.6 - Equilíbrio de Forças conforme Janssen.

$$\frac{dp_v}{dz} \cdot dz \cdot A = \gamma \cdot A \cdot dz - p_w \cdot U \cdot dz \quad (\text{Eq. 3-10})$$

$$\frac{dp_v}{dz} \cdot dz = \gamma \cdot dz - \frac{p_w \cdot U}{A} \cdot dz \quad (\text{Eq. 3-11})$$

Substituindo p_w por p_v , tem-se:
$$\frac{dp_v}{dz} = \gamma - \frac{\mu \cdot K_s \cdot p_v \cdot U}{A}$$

Adotando:
$$Z_0 = \frac{A}{\mu \cdot K_s \cdot U} \quad (\text{Eq. 3-12})$$

$$\frac{dp_v}{dz} = \gamma - \frac{p_v}{Z_0} \quad (\text{Eq. 3-13})$$

O resultado desta equação diferencial é:

$$p_v = \gamma \cdot Z_0 \cdot (1 - e^{-z/Z_0}) \quad (\text{Eq. 3-14})$$

Pode-se verificar derivando esta equação e substituindo,

$$\frac{dp_v}{dz} = -\gamma \cdot Z_0 \cdot \left(\frac{-1}{Z_0} \right) \cdot e^{-z/Z_0} = \gamma \cdot e^{-z/Z_0} \quad (\text{Eq. 3-15})$$

$$\frac{dp_v}{dz} = \gamma - \frac{p_v}{Z_0} \quad (\text{Eq. 3-16})$$

$$\gamma \cdot e^{-z/Z_0} = \gamma - \frac{\gamma \cdot Z_0 \cdot (1 - e^{-z/Z_0})}{Z_0} = \gamma - \frac{\gamma \cdot Z_0}{Z_0} + \frac{\gamma \cdot Z_0 \cdot e^{-z/Z_0}}{Z_0} = \gamma - \gamma + \gamma \cdot e^{-z/Z_0} = \gamma \cdot e^{-z/Z_0} \quad (\text{Eq. 3-17})$$

3.3.2 Análise conforme ANSI/ASAE EP433 JUN00

A proposta desta norma é apresentar métodos de estimativa das pressões devidas aos grãos armazenados com carregamento e descarregamento centralizado, usado para armazenar grãos agrícolas de fluxo livre.

Alguns termos usados na prática são definidos a seguir:

- Silo: Depósito com relação altura pelo diâmetro maior ou igual a 0,5 (para silo de seção retangular, no lugar do diâmetro, toma-se o menor lado);
- Tubo antidinâmico: É um duto vertical, geralmente no centro do silo, com o fundo do tubo ligado diretamente ao orifício onde o grão será descarregado, cujo objetivo é limitar as pressões durante o descarregamento, de modo que não sejam superiores as pressões que ocorrem durante o carregamento do silo.
- Conduto antidinâmico (“flume”): Conduto vertical ligado à parede do silo por onde o grão pode fluir. Pontos de entrada do grão no conduto deverão ser instalados ao longo da vertical.
- Fluxo de funil: Fluxo no interior de um silo, o movimento do grão ocorre nas proximidades do centro e não existe movimento dos grãos ao longo das paredes do silo (Figura 3.8).
- Fluxo de funil em fundo cônico: Fundo cônico onde um canal de fluxo de grãos é formado no sentido da descarga, porém os grãos junto à parede do cone não se movem (Figura 3.8).

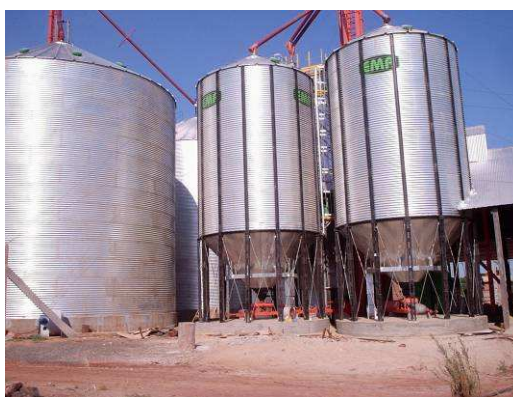


Figura 3.7 – Foto de silos com fundo cônico elevado.

- Fundo Cônico: parte inclinada do silo usado para auxiliar a descarga (Figura 3.7).
- Fluxo de Massa em fundo cônico: Fundo cônico onde todo o grão movimentar-se em sentido a saída, até mesmo aquele em contato com a parede do fundo cônico (Figura 3.8).

- Pressões induzidas pela alteração de umidade: Pressões induzidas pela expansão dos grãos resultado do aumento da umidade destes no interior do silo.
- Fluxo-Plug: fluxo em um silo onde o grão se movimenta em toda ou em parte da parede do silo.
- Pressões induzidas pela temperatura: Pressão induzida em um silo carregado quando submetido a temperaturas ambientes em declínio.
- Pressões induzidas por vibrações: provocadas por movimentos do solo ou por máquinas vibratórias.

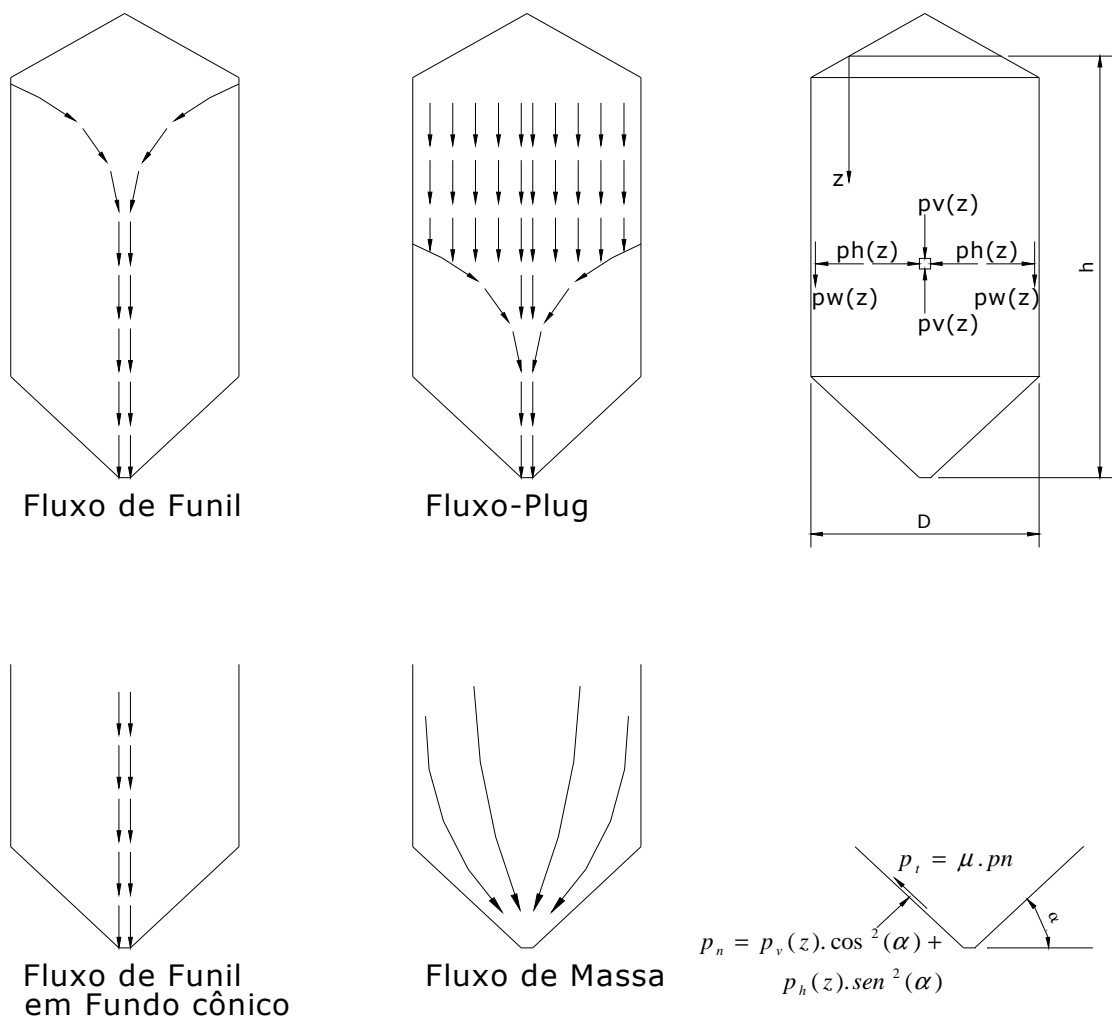


Figura 3.8 - Tipos de fluxo no interior de um silo.

Esta norma utiliza o método proposto por Janssen (1895) para prever as cargas estáticas em paredes e fundo de silos. Janssen assume que o peso específico, a razão entre pressão lateral e vertical, e coeficiente de atrito entre grão e parede do silo são constantes para qualquer configuração adotada. A técnica de Janssen assume que a pressão causada pelo grão

não varia sobre uma determinada seção transversal. Os valores de K_s , μ e γ listadas na ASAE Data D241, são valores estimados para um limite superior de pressões devidas aos grãos, onde K_s é a razão entre a pressão horizontal e vertical (adimensional), μ é o coeficiente de atrito do grão com a superfície da estrutura (adimensional) e γ é a densidade ou peso específico dos grãos armazenados (kg/m³).

- Pressões Estáticas

Silos com fluxo de funil têm pressões nas paredes laterais previstas pela (Eq. 3-19) e ocorrerão em silos com $h / D < 2$, onde h (em m) é a altura medida do ponto de descarga até 1/3 da altura do cone formado pela carga dos grãos se ocorrer, e D é o diâmetro do silo (em m). Não será necessário considerar efeitos dinâmicos neste caso. O movimento do grão ocorrerá em um certo diâmetro interno central da massa de grãos. O restante da massa de grãos continuará estático.

A estimativa da pressão estática em função da profundidade (z) é efetuada de acordo com a seguinte equação de Janssen:

$$p_v(z) = \frac{\gamma \cdot R \cdot G}{\mu \cdot K_s} \left[1 - e^{-\left(\frac{\mu \cdot K_s \cdot z}{R}\right)} \right] \quad (\text{Eq. 3-18})$$

$$p_h(z) = K_s \cdot p_v(z) \quad (\text{Eq. 3-19})$$

A estimativa das tensões de atrito entre parede vertical e grão é dado por:

$$p_w(z) = \mu \cdot p_h(z) \quad (\text{Eq. 3-20})$$

Sendo z a variável de integração com relação à profundidade (em m), G a constante gravitacional ($9,81 \cdot 10^{-3}$ kN/kg), R o raio hidráulico do silo (área transversal dividida pelo perímetro) (em m), z a profundidade equivalente de um grão qualquer (em m), P_v a pressão vertical por unidade de comprimento na parede do silo (kN/m), p_w a pressão de atrito entre a parede vertical e os grãos (kPa), p_h a pressão lateral dos grãos com a profundidade z (kPa) e p_v a pressão vertical dos grãos com a profundidade z (kPa).

Em silos retangulares, para estimar as pressões próximas à parede de menor comprimento, deve-se usar: $R = a/4$ (conforme a norma ANSI/ASAE EP433 JUN00)

Para as pressões próximas à parede de maior comprimento, usar $R = c/4$ onde, $c = \frac{2.a.b}{a+b}$, a é a largura ou o menor lado de um silo retangular (em m), b é o comprimento ou maior lado de um silo retangular (em m) e c é o comprimento equivalente calculado em função de a e b .

Para qualquer grão com fluxo-livre, o peso específico máximo recomendado por esta norma é de 834 kg/m³ (ou 8,18154kN/m³).

Para pressões impostas por um grão específico que não seja trigo, esta norma recomenda que a densidade seja determinada pela *Winchester Bushel Test* (USDA,1980). Pode-se, ainda, usar o peso específico listado na *ASAE Data D241, Density, Specify Gravity and Weight-Moisture Relationships of Grain for Storage*, multiplicada por um fator de compactação de 1,08.

Dependendo do material utilizado na construção do silo, deve-se adotar valores de μ , K_s e C_h conforme explicitado na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 – Propriedades do material de fabricação dos silos

Material da Parede do Silo	μ	K_s	C_h
Aço	0,30	0,50	1,40
Concreto	0,40	0,50	1,40
Aço Corrugado	0,37	0,50	1,40

- Pressões dinâmicas

Como dito anteriormente, as equações de Janssen são originadas de condições estáticas. Quando ocorrem efeitos dinâmicos, forças maiores que as previstas por Janssen surgirão.

Em silos com escoamento do tipo Fluxo-Plug, ocorrem pressões dinâmicas nas paredes laterais, que são maiores que aquelas previstas pela equação que determina a pressão lateral p_h . Silos com $h/D > 2$ devem ter descarga com este tipo de fluxo. Neste caso, deve-se multiplicar o valor encontrado para p_h por um fator de sobrepressão, C_h , que é dado na Tabela 3-1. Para silos de fundo plano, esta sobre-pressão poderá ser aplicada de uma altura correspondente a $D/4$ do fundo para cima (Figura 3.9).

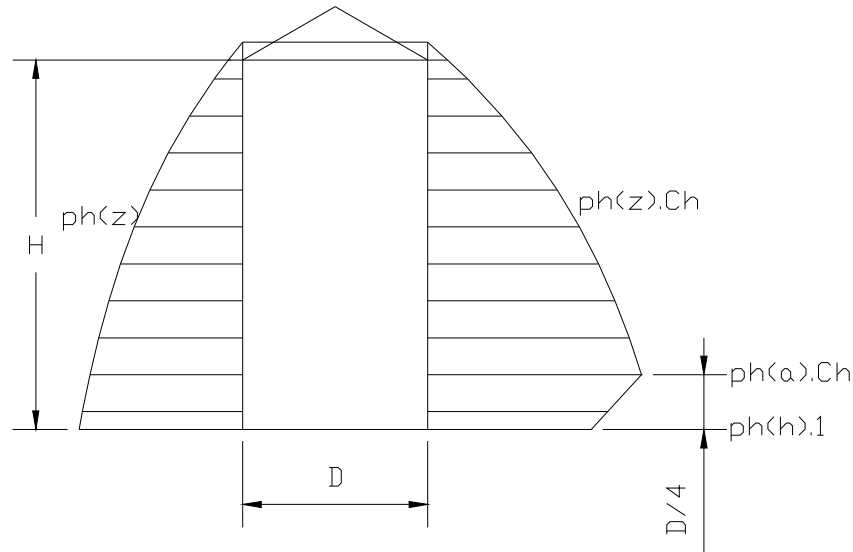


Figura 3.9 – Representação da pressão lateral.

A redução do fator de sobre-pressão em silos com descarga tipo fluxo-plug é baseada na constatação de que, em silos de fundo plano, certa quantidade de produto ficará estática durante a descarga, e não será removida por gravidade. A redução no fator de sobre-pressão é permitida da altura de $D/4$ até a base de silos com fundo plano, interpolando linearmente o fator de sobre-pressão obtida na Tabela 3-1 para a altura de $D/4$, e adotando para o valor de sobre-pressão no fundo do silo o valor 1,00.

- Carga vertical nas paredes

Para o cálculo da carga vertical nas paredes, a uma profundidade z , pode-se usar a equação abaixo:

$$P_w(z) = [\gamma \cdot G \cdot z - p_v(z)] R \quad (\text{Eq. 3-21})$$

Por esta norma (ANSI/ASAE EP433 JUN00), estimam-se as cargas verticais no piso de fundos planos usando a equação que fornece os valores de $p_v(z)$.

- Pressões nos fundos inclinados

Para o caso de fundos cônicos (Figura 3.10) onde não ocorra fluxo de massa, determina-se p_n em qualquer ponto do fundo calculando primeiramente $p_v(z)$ e $p_h(z)$ usando as equações correspondentes com a profundidade z desejada. Deve-se usar a geometria do silo na interseção do fundo cônico com a parede vertical do silo para calcular o

raio hidráulico. Após, aplicar o fator de sobre-pressão nesta interseção. O fator de sobre-pressão poderá ser linearmente reduzido de C_h , no topo, até 1,0 no ponto de descarga. Assim,

$$p_n = p_v(z) \cdot \cos^2(\alpha) + p_h(z) \cdot \sin^2(\alpha) \quad (\text{Eq. 3-22})$$

Para tensões de atrito tangenciais nas superfícies inclinadas:

$$p_t = \mu \cdot p_n \quad (\text{Eq. 3-23})$$

onde p_t é a pressão de atrito com a parede inclinada do funil (em kPa), p_n é a pressão normal de uma superfície inclinada (α) com a horizontal (em kPa) e α é o ângulo da superfície inclinada com a horizontal (em graus).

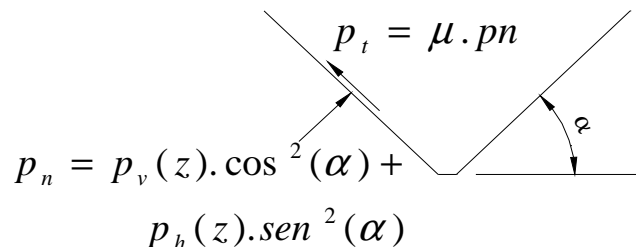


Figura 3.10 – Pressões sobre o fundo cônico.

- Pressões em dutos antidinâmicos central ou nas paredes

Um duto antidinâmico central manterá o carregamento simétrico, ao contrário dos dutos antidinâmicos colocados junto às paredes dos silos. O cálculo da pressão externa em qualquer nível destes dutos antidinâmicos é estimado como sendo igual à pressão lateral nas paredes do silo no mesmo nível. A pressão lateral interna poderá ser desconsiderada, ou calculada tomando o diâmetro interno equivalente do duto antidinâmico. A tensão vertical externa será estimada multiplicando a pressão lateral nas paredes do silo no mesmo nível pelo coeficiente de atrito do material usado para fabricar o duto. Já a tensão vertical interna será estimada pela multiplicação da pressão lateral interna pelo coeficiente de atrito do material do duto.

- Considerações devidas ao incremento de pressões devidas à temperatura

Estimam-se as pressões térmicas em silos circulares de aço incrementando as cargas estáticas em 8% para declínios de temperatura de 10°C por hora e em 15% para declínios de temperatura de 20°C por hora.

- Pressões induzidas por diferença de umidade do grão

Diferenças de umidade de 4% ou mais podem causar acréscimo de pressões laterais muitas vezes maiores que aquelas consideradas em carregamentos estáticos. Precauções deverão ser tomadas no projeto, localização e gerenciamento dos silos para prevenir a ocorrência de aumento de umidade dos grãos.

3.3.2.1 EXEMPLO: Silo D14,55/22A

Para compreender melhor o cálculo das pressões devidas aos grãos armazenados com base na norma ANSI/ASAE EP433 de 2000, apresenta-se abaixo um exemplo para o silo da Figura 3.11 com as seguintes características:

Silo Modelo: 14,55
 Número de Anéis: 22
 Número de Chapas por Anel: 16
 Número de Montantes por chapa: 2
 Altura útil da chapa (m): 0,9144
 Comprimento útil da chapa do corpo (m) 2,8572
 Incl. do Telhado(°): 30

$$\text{Diâmetro(m)} \left(D = \frac{n \cdot l_{ch}}{\pi} = \frac{16 \cdot 2,8572}{\pi} = \right) \text{ (Eq. 2-1): } 14,55$$

Área (m²): 166,31
 Perímetro (m): 45,72

Produto: Soja
 Densidade do Produto (kN/m³): 8,18154
 Relação de Pressões (Ks) (Ph/Pv): 0,5
 Relação entre Atrito Produto com a Parede (μ) (Pw/Ph): 0,37
 Coeficiente de Sobrepressão ($H_{\text{máx}}/D=22,22/14,55 < 2$): Ch= 1,0

Peso específico de 8 kN/m³ adotado para a soja não é o valor recomendado pela norma, porém foi adotado neste exemplo para que os valores pudessem ser comparados com a norma UNE-ENV 1991-4.

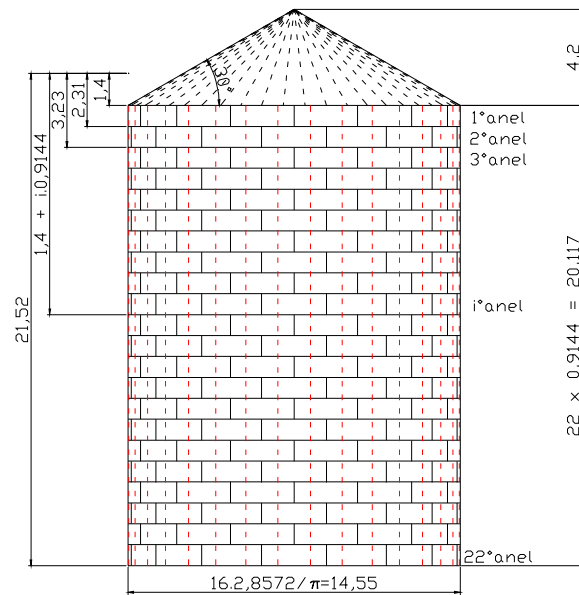


Figura 3.11 – Silo D14,55 com 22 anéis.

As pressões calculadas são:

Tabela 3-2 – Resultados da planilha eletrônica para as Pressões do Silo D14,55/22 – ANSI/ASAE EPP433

Anel	z(m)	$p_h(z)$ (kN/m ²)	$p_v(z)$ (kN/m ²)	$P_w(z)$ (kN)
1	2,31	8,93	17,87	178,29
2	3,23	12,18	24,36	341,77
3	4,14	15,28	30,57	554,35
4	5,06	18,24	36,49	813,80
5	5,97	21,07	42,14	1.118,00
6	6,89	23,77	47,53	1.464,90
7	7,80	26,34	52,68	1.852,58
8	8,72	28,80	57,60	2.279,16
9	9,63	31,15	62,29	2.742,90
10	10,54	33,39	66,77	3.242,10
11	11,46	35,52	71,05	3.775,14
12	12,37	37,57	75,13	4.340,50
13	13,29	39,51	79,03	4.936,70
14	14,20	41,37	82,75	5.562,34
15	15,12	43,15	86,30	6.216,08
16	16,03	44,84	89,69	6.896,65
17	16,95	46,46	92,92	7.602,83
18	17,86	48,00	96,01	8.333,46
19	18,77	49,48	98,96	9.087,42
20	19,69	50,89	101,77	9.863,65
21	20,60	52,23	104,46	10.661,14
22	21,52	53,51	107,02	11.478,93

3.3.3 Análise conforme UNE-ENV 1991-4 Eurocódigo-1 Parte:4 – Ano:1998

Os Eurocódigos compreendem um grupo de normas para projeto de edificações e obras de engenharia do ponto de vista estrutural e subdividem-se em 9, onde o EN 1991 Eurocódigo-1 denomina-se “Base de projeto e ações em estruturas”.

O Eurocódigo-1 também é subdividido, onde na Parte-4 se encontra o tema relacionado a “Ações em silos e depósitos”.

3.3.3.1 Definições

Deve-se usar esta norma somente quando os silos se enquadram nos seguintes casos:

- Silos com seções transversais como as mostradas na Figura 3.12.
- Onde carregamento produz efeitos de inércia e cargas de impacto desprezíveis.
- O diâmetro máximo do material a ser armazenado não for maior que $0,3.d_c$
- A excentricidade e_i do material armazenado devido ao carregamento deve ser menor que $0,25.d_c$ (Figura 3.12).
- A excentricidade e_o do centro da descarga deve ser menor que $0,25.d_c$, e nenhuma parte da descarga deverá estar a uma distância maior que $0,30.d_c$ do plano central para um silo com descarga alongada ou da linha de centro para os demais silos (Figura 3.12).
- A relação entre a altura e o diâmetro deve ser menor que 10 ($h/d_c < 10$), a altura deve ser menor que 100m ($h < 100m$) e o diâmetro deve ser menor que 50m ($d_c < 50m$).

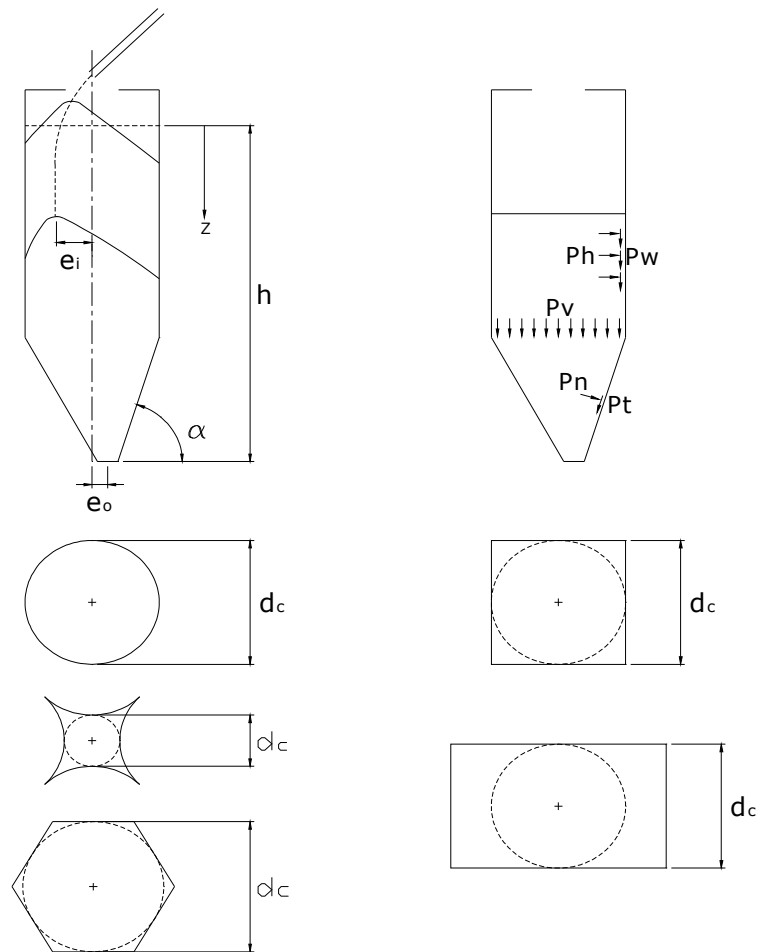


Figura 3.12 – Dados geométricos

Definem-se a seguir alguns termos utilizados no cálculo de silos:

“Superfície Equivalente”: Superfície horizontal a um nível que resulte o mesmo volume armazenado no silo com a superfície real. Os grãos dentro do silo formam cones na parte superior e a superfície equivalente resultaria do trabalho de nivelar a superfície superior encontrando-se o nível equivalente.

“Fundo plano”: Silo com o fundo plano ou silo com fundo inclinado menor ou igual a 20° com a horizontal.

“Funil”: Fundo de silo com paredes inclinadas com $\alpha > 20^\circ$.

“Tipo de Fluxo”: Modo de fluir do material armazenado quando o fluxo estiver completamente estabelecido (com o silo próximo a sua capacidade máxima - Figura 3.13).

“Fluxo de Funil”: Tipo de fluxo onde se produz um canal de fluxo de material dentro de uma zona confinada acima da saída enquanto o material adjacente a parede e próxima a

saída permanece estagnado. O canal de fluxo pode interceptar a parede vertical ou estender-se até a superfície do material armazenado.

“Fluxo interno”: Tipo de fluxo de funil onde o canal de fluxo se estende até a superfície do material armazenado.

“Fluxo de Massa”: Tipo de fluxo em que todas as partículas armazenadas se movem durante o descarregamento.

“Material fluidizado”: Material armazenado ao qual se injeta ar tendo como objetivo modificar significativamente o comportamento do fluxo.

“Silo de homogeneização”: Silo que contém material fluidizado.

“Sobre-pressão no funil”: Carga local produzida na transição (funil x corpo) durante o descarregamento.

“Transição”: Interseção do funil com a parede vertical.

Tipos de Silos:

- Silo Esbelto: Silo onde $h/d_c \geq 1,5$
- Silo Baixo: Silo onde $h/d_c < 1,5$

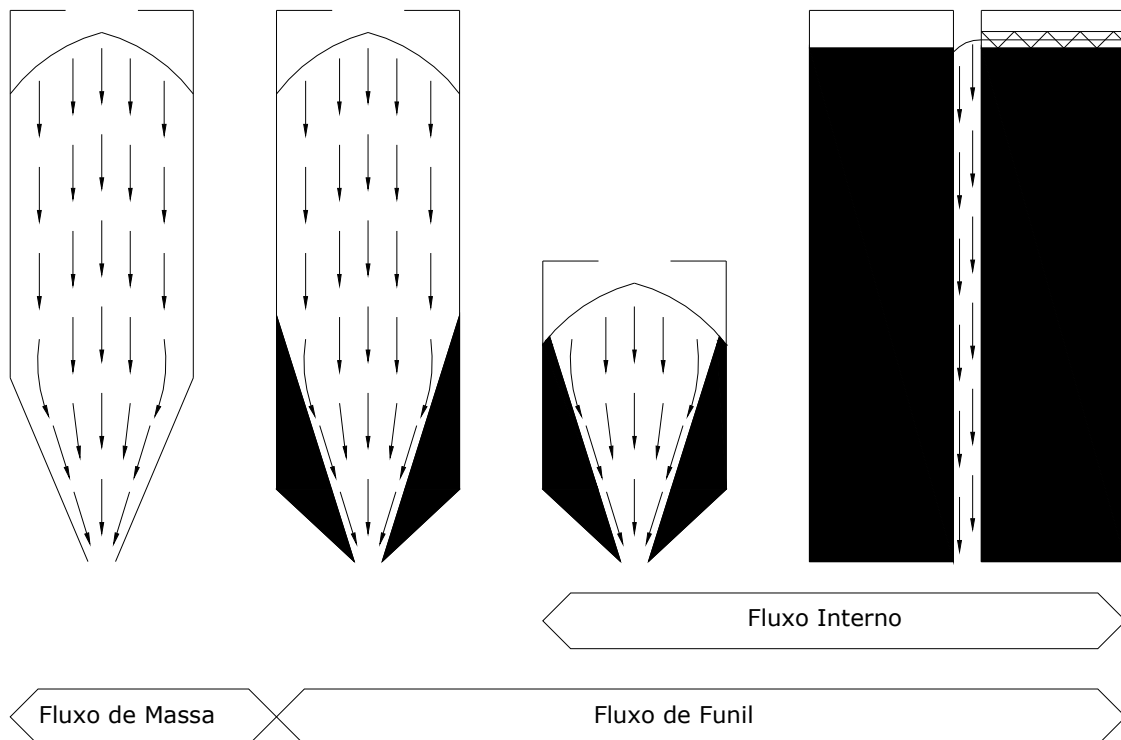


Figura 3.13 – Tipos de Fluxo dos grãos no interior dos silos

3.3.3.2 Variáveis a considerar

As variáveis a considerar no cálculo das pressões devidas aos grãos armazenados são:

- Propriedades dos grãos:
 - Peso específico (γ);
 - Atrito com a parede (μ);
 - Atrito entre grãos (φ);
 - Relação entre Pressão horizontal e vertical (K_s);
- Variações nas condições de atrito com a superfície,
- Geometria do silo;
- Os métodos de carga e descarga;
- Tipo de silo: Esbelto, Baixo, Silo de Homogeneização ou Silos de alta velocidade de carga;
- Tipo de fluxo quando da descarga, que pode ser determinado através da Figura 3.14.

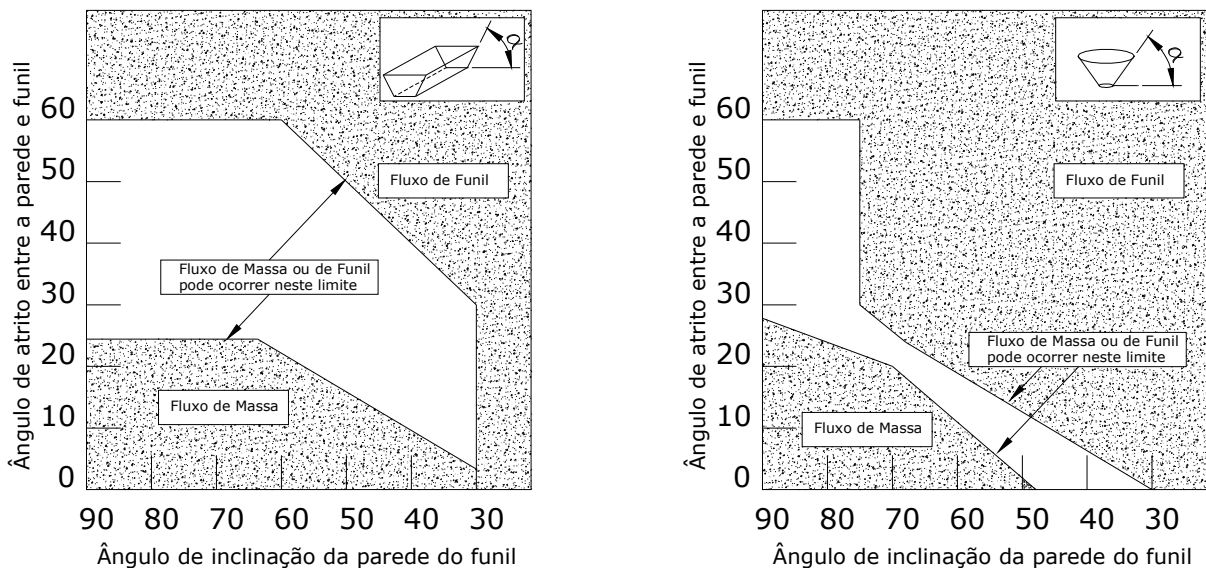


Figura 3.14 – Gráficos para determinação do tipo de fluxo em função do tipo de funil.

3.3.3.3 Pressão no Carregamento

São pressões que atuam nas paredes internas oriundas do processo de carregamento do silo. Estas pressões se compõem de uma pressão fixa e de uma pressão local.

3.3.3.3.1 Pressão Fixa

Estas pressões são consideradas distribuídas uniformemente a uma dada profundidade z e calculadas conforme as expressões:

$$p_{wf}(z) = \gamma \cdot \frac{A}{U} \cdot C_z(z) \quad (\text{Eq. 3-24})$$

$$C_z(z) = 1 - e^{(-z/z_0)} \quad (\text{Eq. 3-25})$$

$$p_{hf}(z) = \frac{\gamma \cdot A}{\mu \cdot U} \cdot C_z(z) \quad (\text{Eq. 3-26})$$

$$Z_0 = \frac{A}{K_s \cdot \mu \cdot U} \quad (\text{Eq. 3-27})$$

$$p_v(z) = \frac{\gamma \cdot A}{K_s \cdot \mu \cdot U} \cdot C_z(z) \quad (\text{Eq. 3-28})$$

onde, U é o perímetro interior do silo e z é a profundidade no ponto analisado.

A força vertical resultante sobre a parede por unidade de comprimento do perímetro, atuando a uma profundidade z é dada por:

$$P_w(z) = \int_0^z P_{wf}(z) \cdot dz = \int_0^z \gamma \cdot \frac{A}{U} \cdot C_z(z) \cdot dz = \gamma \cdot \frac{A}{U} \cdot [z - z_0 \cdot C_z(z)] \quad (\text{Eq. 3-29})$$

$$P_w(z) = \gamma \cdot \frac{A}{U} \cdot [z - z_0 \cdot C_z(z)] \quad (\text{Eq. 3-30})$$

3.3.3.3.2 Pressão Local (P_p)

A pressão local (P_p) se considera atuando sobre qualquer parte da parede do silo. Pode-se verificar pela Figura 3.15 que a mesma não se distribui de forma uniforme. A pressão local é fornecida pela expressão abaixo:

$$p_p = 0,2 \cdot \beta \cdot P_{hf} \quad (\text{Eq. 3-31})$$

onde,

$$\beta = 1 + 4 \cdot \frac{e_i}{d_c} \quad (\text{ver Figura 3.12}) \quad (\text{Eq. 3-32})$$

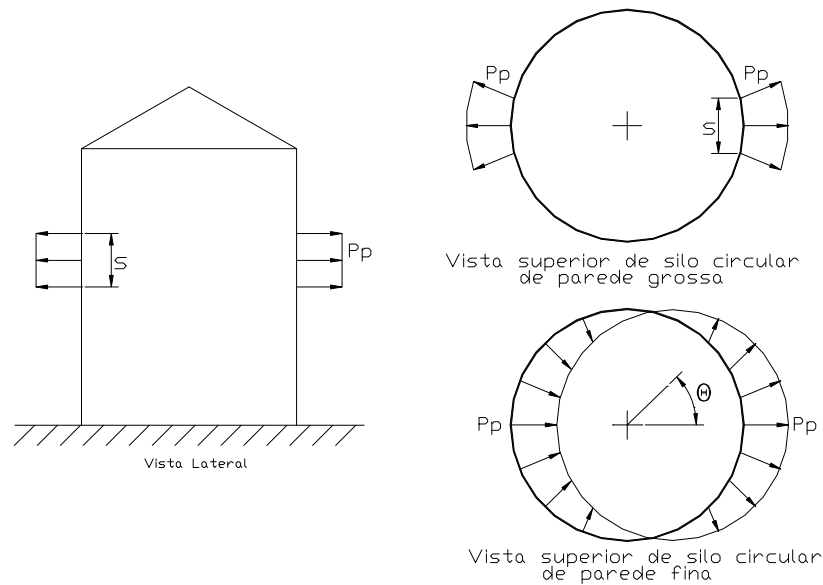


Figura 3.15 – Pressão Local (P_p)

Em silos de concreto, silos com enrijecedores e silos de seção transversal não circular, a pressão local se considera atuando sobre duas superfícies quadradas opostas, de lado s , como indicado na Figura 3.15:

$$s = 0,2 \cdot d_c \quad (\text{Eq. 3-33})$$

Geralmente se pode empregar uma aproximação simplificada para a aplicação da pressão local. Pode-se tomar como carga mais desfavorável, a aplicação da pressão local na metade da altura do silo e utilizar o incremento percentual de tensão na parede a esta altura para incrementar a tensão das paredes em todo o silo.

Em silos circulares de parede fina, a pressão local se considera atuando sobre uma faixa de altura s , porém variando esta pressão, tomando que de um lado ela é para fora do silo e do lado oposto para dentro do silo, conforme Figura 3.15. A variação será:

$$p_{ps} = p_p \cdot \cos(\theta) \quad (\text{Eq. 3-34})$$

A força horizontal total F_p devida à pressão local em silos de aço não enrijecidos se obtém de:

$$F_p = \frac{\pi}{2} \cdot s \cdot d_c \cdot p_p \quad (\text{Eq. 3-35})$$

Pode-se utilizar um método simplificado para a aplicação da pressão local sobre silos circulares de parede delgada. A pressão local se pode considerar atuando a uma profundidade z_0 abaixo da superfície equivalente, ou a metade da altura da parede vertical, tomando a posição mais alta da carga.

3.3.3.3.3 Pressão em Fundos Planos

As pressões verticais atuantes sobre o fundo plano ou liso de um silo, com inclinação $\alpha \leq 20^\circ$, se calculam da seguinte forma:

$$p_{vf} = C_b \cdot p_v \quad (\text{Eq. 3-36})$$

com, $C_b = 1,2$, sendo C_b o coeficiente de majoração da pressão sobre o fundo, considerando a distribuição desigual da carga.

3.3.3.3.4 Pressão em Funis

Quando $\alpha > 20^\circ$ (como pode ser verificado pela Figura 3.16), a pressão perpendicular exercida sobre a parede inclinada do funil p_n se calcula como segue:

$$p_n = p_{n3} + p_{n2} + (p_{n1} - p_{n2}) \cdot \frac{x}{I_h} \quad (\text{Eq. 3-37})$$

$$p_{n1} = p_{v0} \cdot (C_b \cdot \cos^2 \alpha + \text{sen}^2 \alpha) \quad (\text{Eq. 3-38})$$

$$p_{n2} = C_b \cdot p_{v0} \cdot \cos^2 \alpha \quad (\text{Eq. 3-39})$$

$$p_{n3} = 3,0 \cdot \frac{A}{U} \cdot \frac{\gamma \cdot K_s}{\sqrt{\mu}} \cdot \text{sen}^2 \alpha \quad (\text{Eq. 3-40})$$

em que x é a variável do comprimento iniciando em 0 até I_h ; p_{n1}, p_{n2} é a pressão devida ao carregamento do funil; p_{n3} é a pressão devida à pressão vertical sobre o material armazenado diretamente acima da transição do corpo com o funil; C_b é o coeficiente de majoração da

pressão sobre o fundo, $C_b = 1,2$ (conforme norma UNE-ENV 1991-4) e p_{v0} é a pressão vertical atuante na transição, calculado conforme (Eq. 3-28).

- O valor da pressão de atrito sobre a parede inclinada do funil p_t é dado por:

$$p_t = p_n \cdot \mu \quad (\text{Eq. 3-41})$$

- No projeto de silo com funil, para o cálculo da viga circular que une o corpo com o funil (anel de ligação) é necessário calcular a reação vertical na união corpo-funil, considerando a pressão vertical no nível superior do funil $C_b \cdot p_{v0}$ mais o peso do material contido no funil.

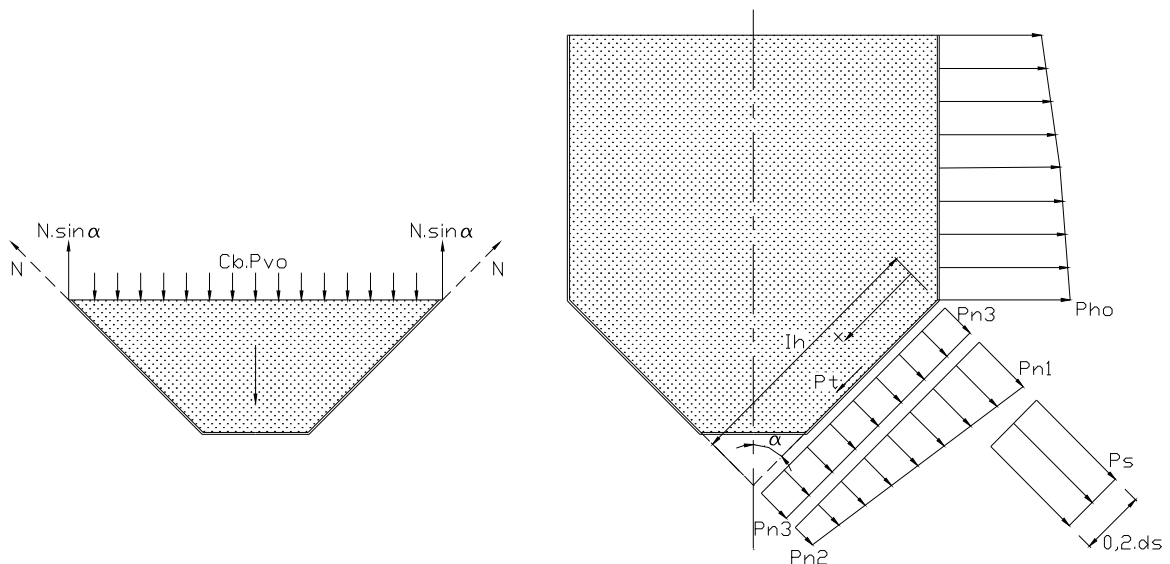


Figura 3.16 – Pressões em Funis

3.3.3.4 Pressões no Descarregamento

3.3.3.4.1 Paredes verticais

As pressões de descarregamento se compõem de uma pressão fixa e de uma pressão livre, chamada de pressão local.

As pressões fixas p_{we} , p_{he} obtém-se de:

$$p_{we} = C_{wi} \cdot p_{wf} \quad (\text{Eq. 3-42})$$

$$p_{he} = C_h \cdot p_{hf} \quad (\text{Eq. 3-43})$$

onde,

C_w e C_h são os coeficientes de majoração das pressões, que para relação $h/d_c < 1,5$ é:

$$C_w = 1 \text{ e } C_h = 1 \quad (\text{Eq. 3-44})$$

Para os silos esbeltos, com $h/d_c \geq 1,5$, os coeficientes de majoração das pressões sobre as paredes e das pressões horizontais serão:

$$C_w = 1,1 \text{ e } C_h = C_o \quad (\text{Eq. 3-45})$$

O valor da pressão local de descarregamento p_p é:

$$p_p = 0,2 \cdot \beta \cdot p_{he} \quad (\text{Eq. 3-46})$$

na qual β depende da maior entre as excentricidades de carregamento ou descarregamento.

$$\beta = 1 + 4 \cdot \frac{e}{d_c} \quad (\text{Eq. 3-47})$$

Para os cálculos das pressões locais de descarregamento, se pode utilizar o exposto para o cálculo das pressões locais de carregamento.

3.3.3.4.2 Fundos Planos e Funis

Em silos com fluxo de funil, as pressões de descarregamento sobre fundo plano e sobre as paredes do funil podem ser calculadas aplicando o exposto para as pressões de carregamento.

Em silos com fluxo de massa, se aplicará uma pressão perpendicular fixa adicional (sobrepessão no funil p_s Figura 3.16), a uma distância inclinada de $0,2 \cdot d_c$ ao longo da parede do funil em todo o perímetro.

$$p_s = 2 \cdot p_{h0} \quad (\text{Eq. 3-48})$$

na qual p_{h0} é a pressão horizontal de carregamento na transição.

Em silos para armazenagem de grãos, dificilmente o fluxo será de massa.

3.3.3.4.3 Método Simplificado para Cálculo das Pressões no carregamento e descarregamento

Nos silos onde $d_c < 5,0m$, pode-se aplicar um método simplificado para a consideração dos processos de carregamento e descarregamento. Com este método, as pressões indicadas nos itens “3.3.3.3” e “3.3.3.4” podem ser desconsideradas, incrementando as pressões horizontais.

Em silos de concreto, com enrijecedores, ou de seção transversal não circular, os incrementos das pressões horizontais de carregamento ($p_{hf,s}$) e de descarregamento ($p_{he,s}$) são:

$$p_{hf,s} = p_{hf} \cdot (1 + 0,2 \cdot \beta) \quad (\text{Eq. 3-49})$$

$$p_{he,s} = p_{he} \cdot (1 + 0,2 \cdot \beta) \quad (\text{Eq. 3-50})$$

Em silos circulares de paredes delgadas, os incrementos de pressão horizontal de carregamento ($p_{hf,s}$) e de descarregamento ($p_{he,s}$) e os incrementos de pressão vertical de carregamento ($p_{wf,s}$) e de descarregamento ($p_{we,s}$) são:

$$p_{hf,s} = p_{hf} \cdot (1 + 0,1 \cdot \beta) \quad (\text{Eq. 3-51})$$

$$p_{he,s} = p_{he} \cdot (1 + 0,1 \cdot \beta) \quad (\text{Eq. 3-52})$$

$$p_{wf,s} = p_{wf} \cdot (1 + 0,1 \cdot \beta) \quad (\text{Eq. 3-53})$$

$$p_{we,s} = p_{we} \cdot (1 + 0,1 \cdot \beta) \quad (\text{Eq. 3-54})$$

3.3.3.5 SILOS BAIXOS

As cargas sobre as paredes de silos baixos $h/d_c < 1,5$, se calculam da mesma forma que nos silos esbeltos, com as correspondentes modificações para os coeficientes de majoração das pressões, pressão local, pressões horizontais e as pressões sobre o fundo.

As modificações referentes aos coeficientes de majoração das cargas C_h , C_w e a pressão local serão:

Para silos com $h/d_c \leq 1,0$:

$$C_w = C_h = 1,0 \quad \text{e} \quad p_{p,sq} = 0 \quad (\text{Eq. 3-55})$$

Para silos com $1,0 < h/d_c \leq 1,5$:

$$C_w = 1,0 + 0,2 \cdot \left(\frac{h}{d_c} - 1,0 \right) \quad (\text{Eq. 3-56})$$

$$C_h = 1,0 + 2 \cdot (C_0 - 1,0) \cdot \left(\frac{h}{d_c} - 1,0 \right) \quad (\text{Eq. 3-57})$$

$$p_{p,sq} = 2 \cdot p_p \cdot \left(\frac{h}{d_c} - 1,0 \right) \quad (\text{Eq. 3-58})$$

Determina-se p_p de acordo com 3.3.3.3.2 e 3.3.3.4.1.

Na Figura 3.17 são mostradas as modificações realizadas para a pressão lateral que no ponto onde a superfície superior do material armazenado encontra-se com a parede do silo pode se reduzir a zero. Abaixo deste ponto pode-se supor uma variação linear da pressão, calculada empregando um valor de $K_s = 1,0$, até que esta pressão linear seja igual a pressão determinada pela mais apropriada das equações (Eq. 3-26) ou (Eq. 3-43).

As pressões verticais $p_{vf,sq}$ durante o carregamento e o descarregamento atuantes sobre o fundo do silo são dadas por:

$$p_{vf,sq} = C_b \cdot \left(p_{v1} + (p_{v2} - p_{v3}) \cdot \frac{1,5 \cdot D - h}{1,5 \cdot D - h_1} \right) \quad \text{onde,} \quad (\text{Eq. 3-59})$$

em que p_{v1} é obtido da equação (Eq. 3-28) com $z = h$; p_{v2} é obtido de $p_{v2} = \gamma \cdot h_2$; p_{v3} é obtido da equação (Eq. 3-28) com $z = h_1$; D é o ponto mais baixo da parede que não está em contato com o material armazenado e C_b é calculado conforme item 3.3.3.3.3

As pressões sobre o funil durante o carregamento são calculadas empregando a (Eq. 3-37) e no esvaziamento são calculadas empregando as indicações dadas no item 3.3.3.4.2 para fundos planos e funis.

A grande maioria dos silos para armazenagem de grãos são classificados como silos baixos ou possuem relação $h/d_c \leq 1,5$. Na prática, todos estes silos têm sido dimensionados tomando: $C_w = C_h = 1,0$ e $p_{p,sq} = 0$.

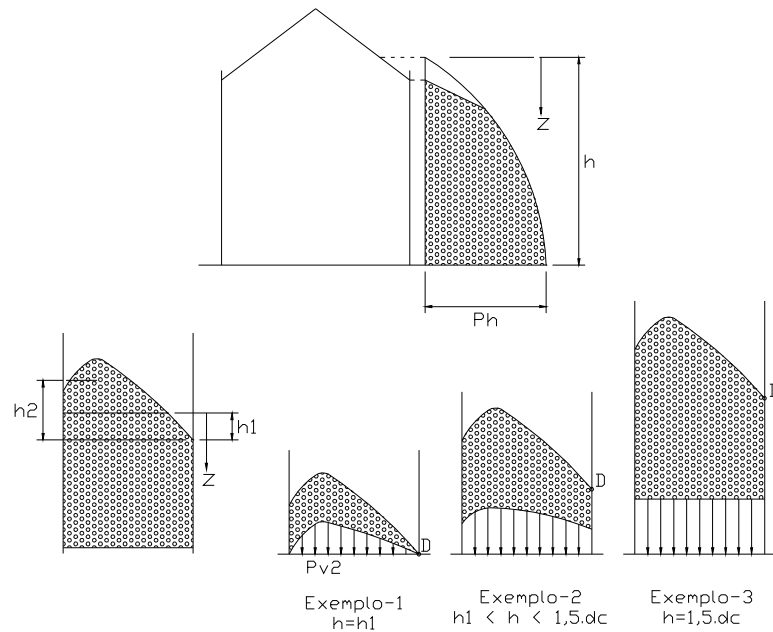


Figura 3.17 – Cargas sobre as paredes e fundos planos em silos baixos

3.3.3.6 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ARMAZENADOS

Na Tabela 3-3 (DIN-1055/06 – 1987) são apresentados alguns valores para γ , $K_{s,m}$, μ_m e C_o para produtos armazenados em silos com paredes ásperas ou rugosas, como é o caso de silos de aço corrugado horizontalmente.

Tabela 3-3 – Propriedades de alguns materiais armazenados

Material	Densidade (γ)	$K_{s,m}$	μ_m	Co
Trigo	9,0	0,60	0,60	1,4
Milho	8,0	0,60	0,60	1,6
Cevada	8,0	0,65	0,50	1,4
Soja	8,0	0,70	0,50	1,4

Levando-se em conta a variabilidade das propriedades dos materiais granulares e para obter valores que representem as propriedades extremas, deve-se aplicar fatores de conversão variando entre 0,9 e 1,15 aos valores de $K_{s,m}$ e μ_m (conforme norma UNE-ENV 1991-4). Deste modo, para calcular as pressões máximas, empregam-se as seguintes combinações:

- Para máximo p_h : $K_s = 1,15.K_{s,m}$ e $\mu = 0,9.\mu_m$
- Para máximo p_v : $K_s = 0,9.K_{s,m}$ e $\mu = 0,9.\mu_m$
- Para máximo p_w : $K_s = 1,15.K_{s,m}$ e $\mu = 1,15.\mu_m$

3.3.3.7 EXEMPLO: Silo D14,55/22A

Tomando o mesmo silo do exemplo 3.3.2.1:

Silo Modelo: 14,55
 Número Máximo de Anéis: 22
 Número de Chapas por Anel: 16
 Número de Montantes por chapa: 2
 Altura útil da chapa (m): 0,9144
 Comprimento útil da chapa do corpo (m) 2,8575
 Incl. do Telhado(°): 30
 Diâmetro(m): 14,55
 Área (m²): 166,34
 Perímetro (m): 45,72

E considerando soja como o produto que provocará as maiores pressões no silo:

Produto: soja
 Densidade do Produto (kN/m³): 8
 Relação de Pressões (Ph/Pv): 0,7
 Relação entre Atrito Produto com a Parede (Pw/Ph): 0,5
 Coeficiente de majoração da pressão (Co): 1,4

A Tabela 3-4 apresenta as pressões calculadas para o carregamento e descarregamento.

Tabela 3-4 – Resultados da Planilha eletrônica para as Pressões do Silo D14,55/22 – UNE-ENV 1991-4

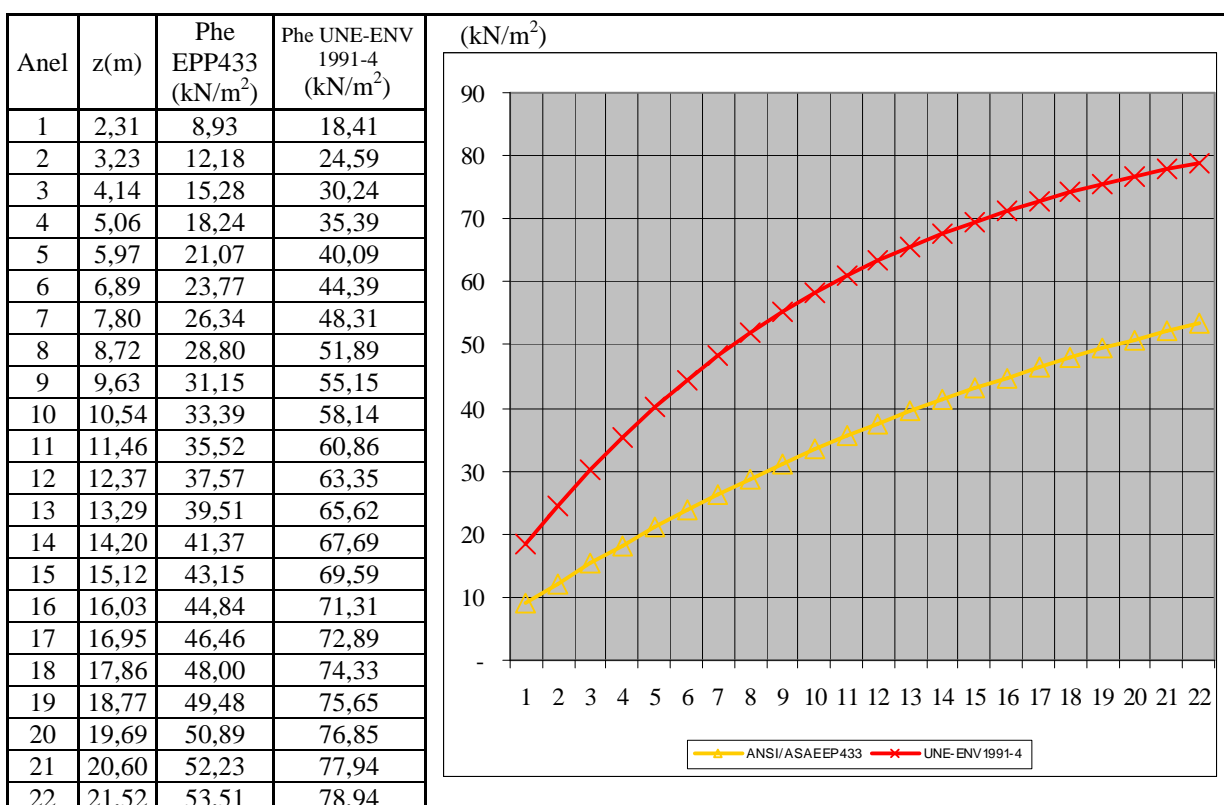
Anel	z(m)	Carregamento			Descarregamento		
		$p_{hf}(z)$ (kN/m ²)	$p_{vf}(z)$ (kN/m ²)	$P_{vf}(z)$ (kN)	$p_{he}(z)$ (kN/m ²)	$p_{ve}(z)$ (kN/m ²)	$P_{ve}(z)$ (kN)
1	2,31	13,31	20,33	412,14	18,41	20,33	451,59
2	3,23	17,78	27,41	773,28	24,59	27,41	847,29
3	4,14	21,87	34,00	1.228,39	30,24	34,00	1.345,96
4	5,06	25,59	40,13	1.767,16	35,39	40,13	1.936,29
5	5,97	28,99	45,84	2.380,39	40,09	45,84	2.608,21
6	6,89	32,10	51,16	3.059,91	44,39	51,16	3.352,76
7	7,80	34,93	56,12	3.798,43	48,31	56,12	4.161,96
8	8,72	37,52	60,73	4.589,49	51,89	60,73	5.028,73
9	9,63	39,89	65,03	5.427,30	55,15	65,03	5.946,72
10	10,54	42,04	69,03	6.306,74	58,14	69,03	6.910,33
11	11,46	44,01	72,75	7.223,23	60,86	72,75	7.914,53
12	12,37	45,81	76,22	8.172,70	63,35	76,22	8.954,87
13	13,29	47,45	79,45	9.151,53	65,62	79,45	10.027,38
14	14,20	48,95	82,46	10.156,50	67,69	82,46	11.128,53
15	15,12	50,32	85,26	11.184,74	69,59	85,26	12.255,18
16	16,03	51,57	87,87	12.233,69	71,31	87,87	13.404,52
17	16,95	52,71	90,30	13.301,08	72,89	90,30	14.574,06
18	17,86	53,75	92,57	14.384,87	74,33	92,57	15.761,58
19	18,77	54,70	94,67	15.483,28	75,65	94,67	16.965,11
20	19,69	55,57	96,63	16.594,69	76,85	96,63	18.182,89
21	20,60	56,37	98,46	17.717,68	77,94	98,46	19.413,35
22	21,52	57,09	100,16	18.850,97	78,94	100,16	20.655,11

3.3.4 Comparação entre as Normas

Nos itens 3.3.2.1 e 3.3.3.7 são apresentados os resultados das pressões horizontais e verticais no interior de silos com a mesma forma geométrica e para armazenagem de grãos (soja) para as duas normas apresentadas.

Comparando os resultados da pressão horizontal (P_{he} -Tabela 3-5) verifica-se que a norma UNE-ENV 1991-4 apresenta valores mais elevados, acima de 47,5% para este exemplo (diferença encontrada no ponto mais baixo do silo, anel 22, profundidade de 21,52m), chegando a 106,1% no primeiro anel na profundidade de 2,31m. Pela norma ANSI/ASAE EPP433, como a relação altura pelo diâmetro não foi superior a 2, não foi necessário utilizar fator de sobrepressão para o cálculo da pressão horizontal. Por outro lado, pela norma UNE-ENV 1991-4, com a mesma relação (21,52/14,55=1,48) é maior que 1, de acordo com 3.3.3.5, os valores apresentados na tabela estão acrescidos do fator multiplicador $Ch=1,3828$.

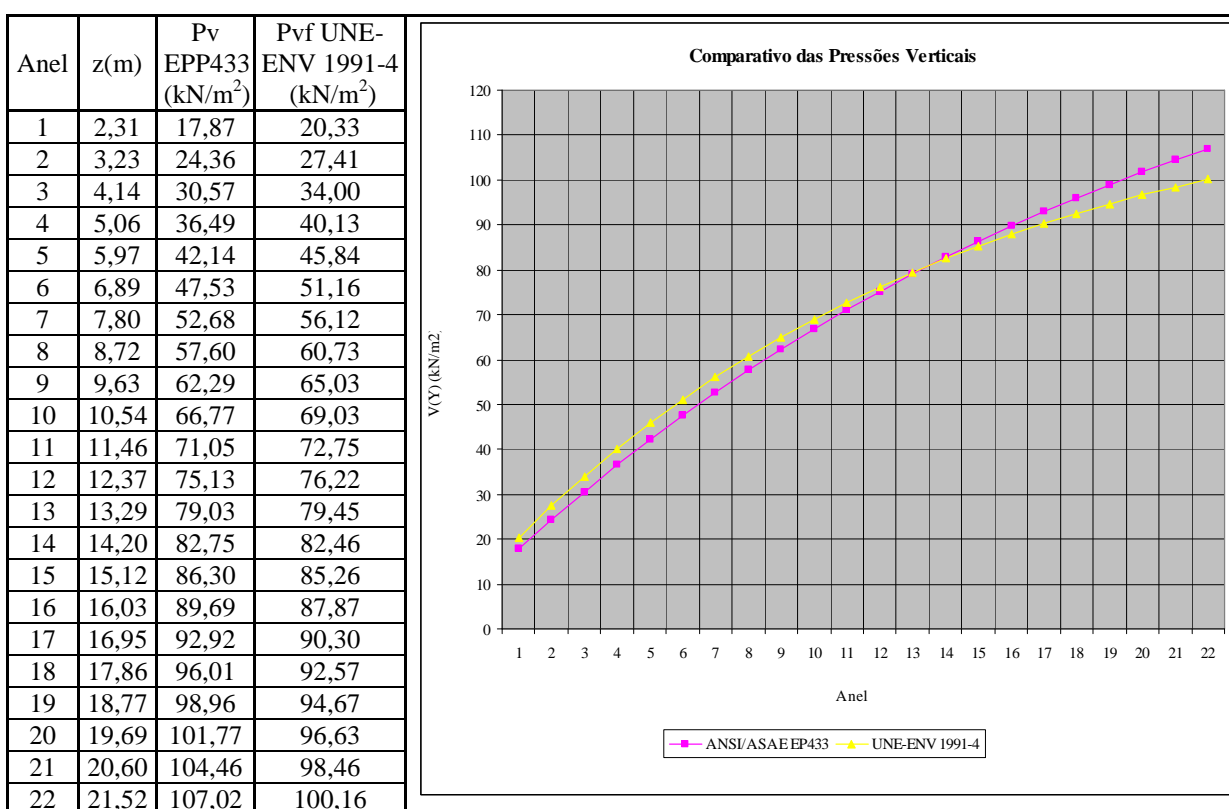
Tabela 3-5 – Pressão Horizontal ANSI/ASAE EPP433 x UNE-ENV 1991-4



A pressão vertical (P_{vf} - Tabela 3-6) apresenta valores muito semelhantes com diferença não superior a 13,8% (anel-1, profundidade de 2,31m) variando até 6,84% (anel-22, profundidade de 21,52m) na comparação entre as duas normas. Neste exemplo, a norma UNE-ENV 1991-4 sempre apresenta valores superiores aos encontrados utilizando-se a norma

ANSI/ASAE EPP433. Porém, incremento de 20% (conforme item 3.3.3.3) deve ser aplicado para o cálculo das pressões na base conforme a norma UNE-ENV 1991-4. Recalculando a pressão no fundo, a diferença, dependendo da altura do silo, ficará entre 36,5% e 12,3% para o exemplo em questão.

Tabela 3-6 – Pressão Vertical ANSI/ASAE EPP433 x UNE-ENV 1991-4

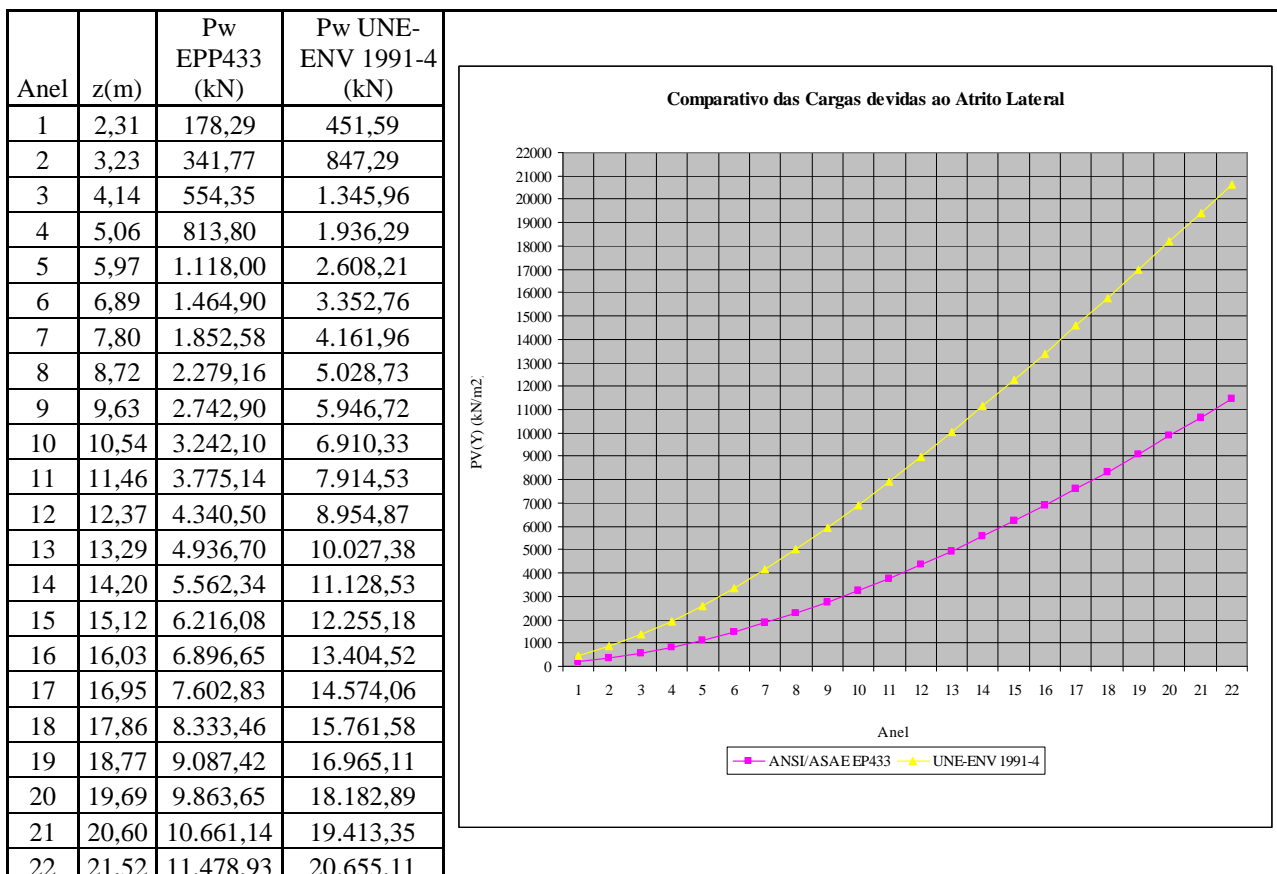


A soma das pressões devidas ao atrito na parede necessária para a determinação do esforço que os montantes dos silos estarão submetidos é apresentado na Tabela 3-7. Esta carga será dividida pelo número de montantes do silo para a determinação do esforço de compressão que cada montante estará submetido devido ao produto armazenado.

Comparando os resultados encontrados pelas duas normas, observa-se que os valores calculados utilizando-se a UNE-ENV 1991-4 são no mínimo 80% superiores (conforme anel-22 na profundidade de 21,52m), chegando a 153,2% no anel-1 na profundidade de 2,31%. A Tabela 3-7 considera o pior caso entre as pressões que podem ocorrer no silo em questão quando do carregamento e do descarregamento. Cabe salientar que, para relações entre a altura e o diâmetro dos silos maiores que 1, as pressões de atrito na parede tem um incremento considerado pela norma UNE-ENV 1991-4 ao passo que este incremento inexistente na norma ANSI/ASAE EPP433.

Muito provavelmente esta diferença explica o grande número de silos com problemas nos montantes.

Tabela 3-7 – Carga atrito total ANSI/ASAE EPP433 x UNE-ENV 1991-4



Pelo exposto acima, recomenda-se a utilização da UNE-ENV 1991-4 para dimensionamento por ser uma norma mais atualizada e por apresentar valores que oferecem maior segurança ao cálculo.

Conforme a experiência do autor, silos calculados conforme a norma ANSI/ASAE EPP433 muitas vezes apresentam problemas, principalmente flambagem dos montantes

Figura 2.8. Isto ocorre porque a principal carga de projeto de um montante é gerada pelo atrito do grão com a parede do silo, o que sugere que esta carga está sub-avaliada.

Existem muitas normas para cálculo das pressões no interior de silos e as diferenças encontradas mostram a importância de que seja redigida uma norma brasileira que leve em conta as variedades e tipos de produtos que são armazenados.

3.4 CARGAS DE VENTO

A influência da carga de vento é de fundamental importância no dimensionamento de um silo, principalmente em silos metálicos que estejam vazios. Silos metálicos de grande diâmetro têm pouca rigidez e estão sujeitos a flambagem do conjunto chapas laterais mais montantes.

A determinação da carga de vento que estará atuando em silos e sua distribuição pode ser determinada utilizando-se a norma brasileira NBR-6123 Forças devidas ao vento em edificações (1988).

Conforme esta norma, a velocidade característica do vento V_k será dada por:

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (\text{m/s}) \quad (\text{Eq. 3-60})$$

A pressão dinâmica será dada por:

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (\text{Eq. 3-61})$$

nas quais V_0 é a velocidade de uma rajada de 3 segundos, que pode ser excedida em média uma vez em 50 anos, a 10m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano. A norma apresenta figura com as isopletas da velocidade básica; S_1 considera fatores topográficos; S_2 considera a rugosidade do terreno, dimensões do silo e altura sobre o terreno e S_3 considera conceitos estatísticos e considera o grau de segurança requerido e vida útil da edificação. Silos estão dentro do Grupo 3 da norma para o qual o valor de $S_3 = 0,95$.

Para a determinação dos coeficientes de pressão externos que indicarão o perfil de pressões devidas ao vento no contorno do silo, toma-se por base a posição de incidência do vento conforme Figura 3.18.

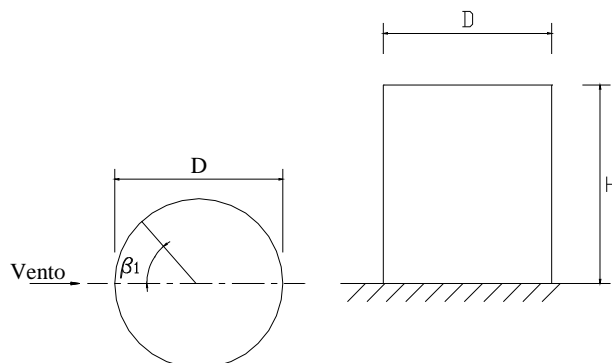


Figura 3.18 – Sentido do vento para determinação do coeficientes de pressão externo

Os coeficientes de pressão externos C_{pe} para edificações cilíndricas de seção circular, conforme norma NBR-6123 (1988), para $H/D \leq 2,5$, estão indicados na Tabela 3-8. O uso desta tabela segue o fato de que a grande maioria dos silos para armazenagem de grão tem relação $H/D \leq 2,5$. Além disso, o uso da tabela está condicionado a que $R_e > 420.000$ sendo $R_e = 70.000.V_k.D$. Readequando a fórmula, temos $D > 6/V_k$ que é o caso da grande maioria dos silos.

Tabela 3-8 – Tabela dos coeficientes de pressão externo

β_1	Superfície rugosa ou com saliências	Superfície Lisa
0^0	+1,0	+1,0
10^0	+0,9	+0,9
20^0	+0,7	+0,7
30^0	+0,4	+0,35
40^0	0	0
50^0	-0,4	-0,5
60^0	-0,8	-1,05
70^0	-1,1	-1,25
80^0	-1,05	-1,3
90^0	-0,85	-1,2
100^0	-0,65	-0,85
120^0	-0,35	-0,4
140^0	-0,3	-0,25
160^0	-0,3	-0,25
180^0	-0,3	-0,25

ANDRADE Jr. (2002), obteve valores distintos para C_{pe} . Porém, os valores da norma estão a favor da segurança, principalmente quando os silos são montados com montantes externos. A Tabela 3-9 apresenta os coeficientes de arrasto C_a para o corpo dos silos conforme a NBR-6123.

Tabela 3-9 – Tabela dos coeficientes de arrasto

Rugosidade	$R_e \cdot 10^{-5}$	H/D						
		$\frac{1}{2}$	1	2	5	10	20	∞
liso : (metal, concreto, alvenaria rebocada)	$\leq 3,5$	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
	$\geq 4,2$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
com rugosidade ou saliências: = $0,02.D$	Todos Valores	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2
com rugosidade ou saliências: = $0,08.D$	Todos Valores	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4

ANDRADE Jr. (2002), confirma os valores para silos lisos e com rugosidade igual a 0,02.D e 0,08.D e apresenta valores para rugosidade igual a 0,01.D (Tabela 3-10).

Tabela 3-10 – Tabela dos coeficientes de arrasto para rugosidade os saliências 0,01.D

Rugosidade	$R_e \cdot 10^{-5}$	H / D	
		1/2	1
com rugosidade ou saliências: = 0,01.D	Todos Valores	0,6	0,6

Pela experiência, e verificando na prática as rugosidades encontradas na maioria dos silos fabricados no Brasil, constata-se que as dimensões das rugosidades ou saliências ficam entre 0,002.D (para silos de grande diâmetro, ao redor de 32m de diâmetro) e 0,005 para silos de pequeno diâmetro (ao redor de 11m). Desta forma, recomenda-se aqui o uso de $C_a = 0,5$ já que, para o caso de silos metálicos para armazenagem de grãos, $Re > 4,2 \cdot 10^5$, $H / D < 10$ e a razão entre a altura da saliência e o diâmetro é menor que 0,005.

Conforme NBR6123, o coeficiente de pressão interna (C_{pi}) é dado por:

$$H / D \geq 0,3, \quad C_{pi} = -0,8 \quad (\text{Eq. 3-62})$$

$$H / D < 0,3, \quad C_{pi} = -0,5 \quad (\text{Eq. 3-63})$$

3.4.1 Cargas nos Montantes

Para a determinação do esforço normal em cada montante do silo devida à pressão originada pelo vento, calcula-se os somatório dos momentos em torno do eixo perpendicular à direção do vento, conforme Figura 3.19.

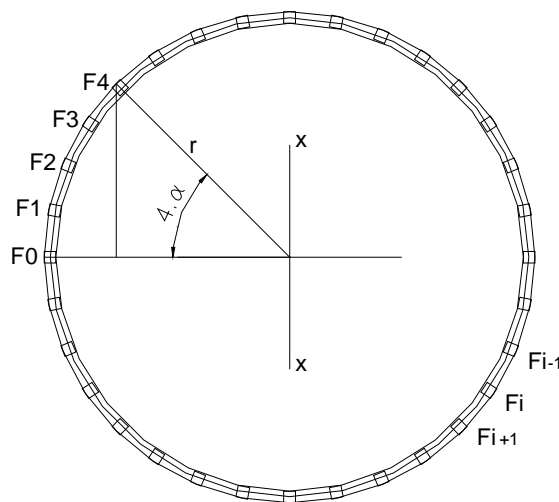


Figura 3.19 – Posicionamento dos montantes

$$\sum M_x = 0 \quad (\text{Eq. 3-64})$$

$$M = F_0.r + F_1.r.\cos(\alpha) + F_2.r.\cos(2.\alpha) + F_3.r.\cos(3.\alpha) + \dots \quad (\text{Eq. 3-65})$$

Substituindo na expressão os valores das forças $F_1 = F_0 \cos(\alpha)$, $F_2 = F_0 \cos(2\alpha)$,

$$M = F_0.r + F_0.r.\cos^2(\alpha) + F_0.r.\cos^2(2.\alpha) + F_0.r.\cos^2(e.\alpha) + \dots \quad (\text{Eq. 3-66})$$

$$M = F_0.r. \sum_{i=1}^{Num.mont} \cos^2(i.\alpha) = F_0.r. \frac{Num.mont}{2} = \frac{F_0.D.Num.mont}{4} \quad (\text{Eq. 3-67})$$

Chamando $F_v = F_0$ e isolando:

$$F_v = \frac{4.M}{n_{mont}.D} \quad (\text{Eq. 3-68})$$

sendo, n_{mont} o número de montantes; D o diâmetro do silo e M o momento resultante da ação do vento, considerando o silo como uma barra engastada na base e com a resultante da carga de vento agindo no centro geométrico do silo calculado com base em um plano de corte passando no eixo do silo e perpendicular a carga resultante do vento, levando em conta o coeficiente de arrasto determinado anteriormente. Teremos, então:

Força de arrasto no corpo (ESTEVEZ, JR., 1989)

$$F_c = C_a.q.H.D \quad (\text{Figura 3.20}) \quad (\text{Eq. 3-69})$$

Força de arrasto no telhado (ESTEVEZ, JR., 1989)

$$F_t = \frac{\pi.D^2}{24}.q.(A - B).sen\alpha \quad (\text{Figura 3.20}) \quad (\text{Eq. 3-70})$$

Força de levantamento do telhado (ESTEVEZ, JR., 1989)

$$P_t = \frac{\pi.D^2}{12}.q.(3.c.\pi - 2.(2.C - A - B)).cos\alpha \quad (\text{Figura 3.20}) \quad (\text{Eq. 3-71})$$

Momento de Tombamento (ESTEVEZ, Jr., 1989)

$$M = 0,5.F_c.H + P_t.e + F_t.H \quad (\text{Eq. 3-72})$$

Força Total de arrasto (ESTEVEZ, Jr., 1989)

$$F = F_c + F_t \quad (\text{Eq. 3-73})$$

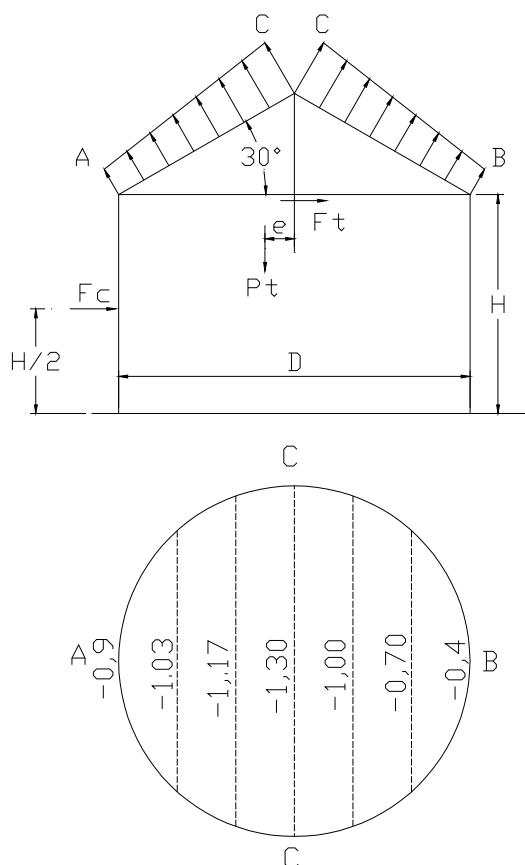


Figura 3.20 – Coeficiente de Pressão externa em cobertura cônica

Fonte: ESTEVES, JR., 1989

A força F_v deverá ser calculada nos diversos níveis, abaixo de cada anel, pois será importantíssima para a determinação da carga total que o montante deverá suportar. A força total de arrasto e o esforço máximo no montante F_v , serão também importantes no cálculo dos elementos de fixação do silo a base de concreto.

4 CÁLCULO DOS COMPONENTES DE UM SILO

Para o dimensionamento de peças que compõem um silo e suas ligações, recomenda-se o uso da NBR-14762 (2001). No desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se esta norma e suas recomendações, buscando alinhar o conteúdo ao projeto de peças destinadas a silos.

4.1 DEFINIÇÕES

A seção transversal de perfis de aço conformados a frio pode ser dividida genericamente em elementos como mesa, alma e enrijecedor, sendo que cada elemento pode receber designações diferenciadas conforme as ligações que tenham com os outros elementos da seção (Figura 4.1).

Denominam-se elementos com bordas vinculadas, designados como tipo (AA) na Figura 4.1, aqueles nos quais as duas extremidades estão unidas a outros elementos na direção longitudinal do perfil. Quando somente uma extremidade tiver tal vinculação, denomina-se elemento com borda livre, simbolizada pela sigla (AL).

Denomina-se enrijecedor de borda simples aquele elemento ligado à borda de outro elemento, de tal forma que o primeiro seja considerado como elemento de bordas vinculadas.

Denomina-se elemento com enrijecedor intermediário àquele que contém um ou mais elementos de enrijecimento entre as bordas, aplicados com o objetivo de enrijecer o todo. As partes compreendidas entre os enrijecedores são denominadas de subelementos.

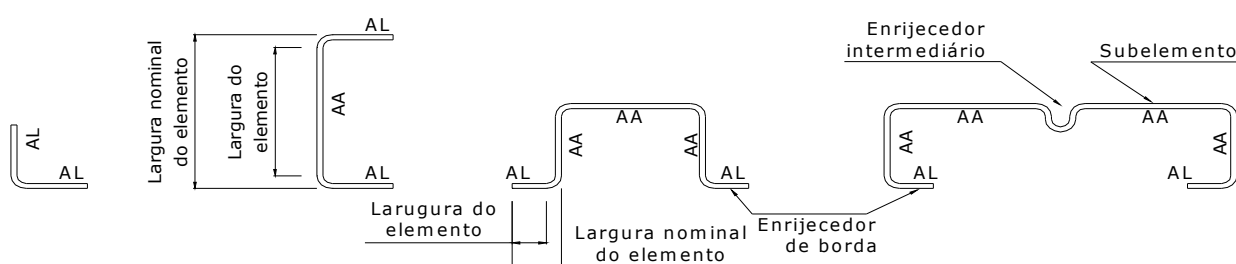


Figura 4.1 – Tipos de elementos de perfis formados a frio

Cada elemento ou subelemento que constitui a seção do perfil poderão ter sua largura reduzida para efeito de projeto, devido à consideração do efeito de flambagem local. A largura calculada desta forma é chamada de “largura efetiva”.

4.2 AÇÕES E COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Como no caso de outras estruturas, cada peça que compõe o silo estará sujeita a um conjunto de ações que deverão ser combinadas para a obtenção dos esforços que estarão agindo em cada seção.

Estas ações são divididas em três tipos: Ações permanentes (F_G), que consideram o peso próprio da estrutura; ações variáveis (F_Q), que consideram as sobrecargas que agem na estrutura como vento, variação de temperatura e pressões devidas ao produto armazenado; e ações excepcionais ($F_{Q,EXC}$), como aquelas que ocorrem no evento de incêndios, explosões ou manifestações sísmicas.

4.2.1 Combinações de Ações para os Estados Últimos

De acordo com a fase da construção e dos tipos de ação que estarão atuando no silo e em suas peças componentes, as combinações a serem utilizadas são:

Combinações últimas normais:

$$\sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \cdot F_{Gi}) + \gamma_{q1} \cdot F_{Q1} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \cdot \psi_{0j} \cdot F_{Qj}) \quad (\text{Eq. 4-1})$$

Combinações últimas especiais ou de construção:

$$\sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \cdot F_{Gi}) + \gamma_{q1} \cdot F_{Q1} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \cdot \psi_{0j,ef} \cdot F_{Qj}) \quad (\text{Eq. 4-2})$$

Combinações últimas excepcionais:

$$\sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \cdot F_{Gi}) + F_{Q,EXC} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \cdot \psi_{0j,ef} \cdot F_{Qj}) \quad (\text{Eq. 4-3})$$

onde: F_{Gi} representa as ações permanentes; F_{Q1} é a ação variável considerada como principal nas combinações normais, ou como principal nas combinações transitórias, especiais ou de construção; F_{Qj} representa as demais ações variáveis; $F_{Q,EXC}$ é a ação excepcional; γ_g é o coeficiente de ponderação das ações permanentes; γ_q é o coeficiente de ponderação das ações

variáveis; ψ_0 é o fator de combinação e $\psi_{0,ef}$ é o fator de combinação efetivo das demais ações variáveis. A Tabela 4-1 apresenta os valores dos coeficientes de ponderação das ações enquanto a Tabela 4-2 indica os fatores de combinação e utilização.

Tabela 4-1 – Coeficientes de ponderação das ações.

Combinações	Ações Permanentes		Ações variáveis		
	Grande Variabilidade	Pequena Variabilidade	Recalques diferenciais	Variação de Temperatura	Ações variáveis em geral, incluindo as decorrentes do uso
	$\gamma_g^{1)}$	$\gamma_g^{1)2)}$	γ_q	$\gamma_q^{3)}$	$\gamma_q^{4)}$
Normais	1,4 (0,9)	1,3 (1,0)	1,2	1,2	1,4
Especiais de construção	1,3 (0,9)	1,2 (1,0)	1,2	1,0	1,2
Excepcionais	1,2 (0,9)	1,1 (1,0)	0	0	1,0

1) Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis a segurança. Ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

2) Todas as ações permanentes podem ser consideradas de pequena variabilidade quando o peso próprio da estrutura superar 75% da totalidade das ações permanentes (que não ocorre no caso de silos). Também podem ser consideradas ações permanentes de pequena variabilidade os pesos próprios de componentes metálicos e pré-fabricados em geral, com controle rigoroso de peso (pode ser o caso de silos, onde se aplicar esta norma, e onde se tenha a certeza que não haverá substituição de material).

3) A variação de temperatura citada não inclui a gerada por equipamentos, a qual deve ser considerada como ação decorrente do uso da edificação. Neste caso, o aumento ou diminuição da temperatura dos grãos armazenados no interior dos silos deve ser considerada como decorrente do uso.

4) Ações decorrentes do uso incluem sobrecargas como aquelas geradas pelas pressões dos grãos no interior do silo, sobre cargas de equipamentos como passarelas, transportadores, espalhadores de grãos, etc...

4.2.2 Combinações de Ações para os Estados Limites de Utilização

Para o caso da combinação de ações para os estados limites de utilização, verificam-se as deformações elásticas e compara-se com os valores limites dados pela experiência. No anexo A da norma NBR14762 (ABNT, 2001), encontram-se valores limites de deslocamentos

recomendados para diversas partes de estruturas metálicas, mas nenhum dado para deslocamentos limites para peças do corpo do silo.

Na prática, silos metálicos para armazenagem de grãos não tem o corpo verificado pelos estados limites de utilização. Já a cobertura de silos, onde as telhas estão apoiadas em estruturas (item 3.1.1), normalmente tem os deslocamentos analisados.

Conforme a NBR14762 (ABNT, 2001), quando analisadas combinações quase permanentes de utilização, que são aquelas que podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, deve-se utilizar a equação:

$$\sum_{i=1}^m (F_{Gi}) + \sum_{j=1}^n (\psi_{2j} \cdot F_{Qj}) \quad (\text{Eq. 4-4})$$

No caso de combinações freqüentes de utilização, da ordem de 105 vezes em 50 anos, ou que ocorram durante 5% do período de vida útil do projeto, deve-se usar a combinação:

$$\sum_{i=1}^m (F_{Gi}) + \psi_1 \cdot F_{Q1} + \sum_{j=2}^n (\psi_{2j} \cdot F_{Qj}) \quad (\text{Eq. 4-5})$$

Já nas combinações raras de utilização, que ocorrerão no máximo por algumas horas durante a vida útil da estrutura, deve-se usar:

$$\sum_{i=1}^m (F_{Gi}) + F_{Q,1} + \sum_{j=2}^n (\psi_{1j} \cdot F_{Qj}) \quad (\text{Eq. 4-6})$$

onde: F_G é a ação permanente; F_{Q1} é a ação variável principal da combinação; $\psi_1 \cdot F_Q$ é o valor freqüente da ação; $\psi_2 \cdot F_Q$ é o valor quase permanente da ação. ψ_1, ψ_2 são os fatores de utilização. Valores recomendados pela norma para os fatores de combinação e utilização são fornecidos na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 –Fatores de combinação e de utilização.

Ações	ψ_0 ¹⁾	ψ_1	ψ_2
Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Pressão dinâmica do vento na estrutura	0,4	0,2	0
Pressão dinâmica do vento nas estruturas em que a ação variável principal tem pequena variabilidade durante grandes intervalos de tempo.	0,6	0,2	0
Cargas acidentais com predominância de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo.	0,7	0,6	0,4
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	0,6	0,4	0,2
¹⁾ Os coeficiente ψ_0 devem ser admitido como 1,0 para ações variáveis de mesma natureza da ação variável principal F_{Q1}			

Para o caso de silos, todas as cargas que não sejam cargas devidas ao vento, abalos sísmicos ou variação de temperatura ambiente, têm ações de mesma natureza da ação devida ao carregamento ou descarregamento do silo. Desta forma, toma-se ψ_0 igual a 1.

4.2.3 Combinações de Ações para os Estados Limites Últimos para Silos

Nesta caso considera-se as cargas devidas a:

- Peso Próprio - F_G
- Carga de compressão devida aos grãos armazenados - $F_{Q1} = F_{grao}$
- Vento - F_V
- Equipamentos fixados permanentemente ao silo, tais como: passarelas, cabos de termometria, espalhador de grãos, tubulações, etc... - F_E

Tomando a (Eq. 4-1) e considerando $F_V < F_{grao}$

Substituindo:

$$1,4.F_G + 1,4.F_{grao} + (1,4.0,6.F_V + 1,4.1.F_E) \quad (\text{Eq. 4-7})$$

Considerando o silo vazio e dependendo se o peso próprio e equipamentos agirem a favor da segurança, usa-se uma das combinações abaixo:

$$-0,9.F_G + 1,4.F_V - 0,9.1.F_E \quad (\text{Eq. 4-8})$$

$$+1,4.F_G + 1,4.F_V + 1,4.1.F_E \quad (\text{Eq. 4-9})$$

4.3 DIMENSIONAMENTO

4.3.1 Valores Máximos da Relação Largura-Espessura

Silos são estruturas metálicas cujos componentes são perfis de aço que devem obedecer às relações de largura e espessura indicadas na NBR14762 (ABNT, 2001). Um perfil é dividido em elementos (segmentos) que são formados através de processos de dobra durante a fabricação (Figura 4.1). Conforme a localização e a união a outros elementos, as mesmas deverão obedecer às relações de largura e espessura indicadas na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 – Relação Largura-Espessura Máxima

Caso a ser analisado	Valor máximo da relação largura-espessura ¹⁾
Elemento comprimido AA, tendo de um lado alma ou mesa e no outro lado um enrijecedor de borda simples	(b/t)máx = 60 ²⁾
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada à alma e a outra à mesa ou outro tipo de enrijecedor de borda com, $I_s \geq I_a$ e $D/b \leq 0,8$ (conforme 4.3.4)	(b/t)máx = 90
Alma de perfis U não enrijecidos, sujeita à compressão uniforme	(b/t)máx = 90
Elemento comprimido, com ambas as bordas vinculadas a elementos AA	(b/t)máx = 500 ³⁾
Elemento comprimido AL ou AA, com enrijecedor de borda, tendo $I_s \geq I_a$ e $D/b \leq 0,8$ (conforme 4.3.4)	(b/t)máx = 60 ²⁾
Alma de vigas sem enrijecedores transversais	(b/t)máx = 200
¹⁾ b é a largura do elemento e t a espessura	
²⁾ Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se (b/t)máx=30	
³⁾ Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se (b/t)máx=250	

4.3.2 Flambagem Local

A flambagem local de elemento totalmente ou parcialmente comprimido deve ser considerada por meio de larguras efetivas. Exemplos de flambagem local dos montantes de silos podem ser vistos na

Figura 2.8.

Todos os elementos tipo AA (Tabela 4-4) e os elementos tipo AL (Tabela 4-5) sem inversão de sinal da tensão ($\psi \geq 0$), devem ter suas larguras efetivas calculadas pela seguinte expressão:

$$b_{ef} = b \cdot (1 - 0,22 / \lambda_p) / \lambda_p \leq b \quad (\text{Eq. 4-10})$$

Elementos AL (Tabela 4-5) com inversão do sinal da tensão ($\psi < 0$), devem ter sua largura efetiva dada por:

$$b_{ef} = b_c \cdot (1 - 0,22 / \lambda_p) / \lambda_p \leq b \quad (\text{Eq. 4-11})$$

onde b é a largura do elemento, b_c é a largura da região comprimida do elemento, calculada com base na seção efetiva, e λ_p é o índice de esbeltez reduzido do elemento, definido como:

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95 \cdot \left(\frac{k \cdot E}{\sigma} \right)^{0,5}} \quad (\text{Eq. 4-12})$$

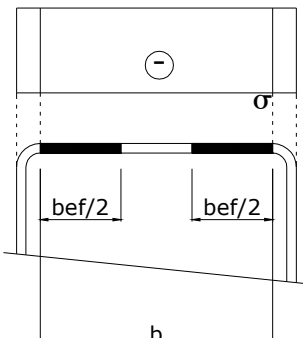
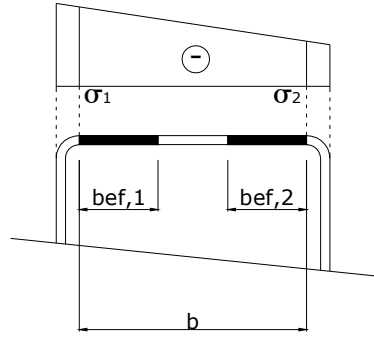
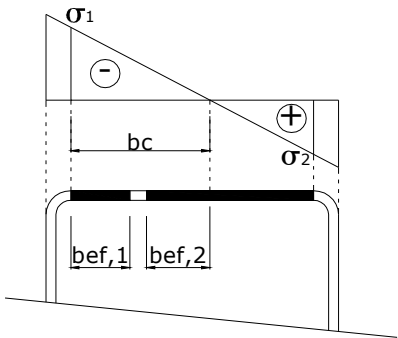
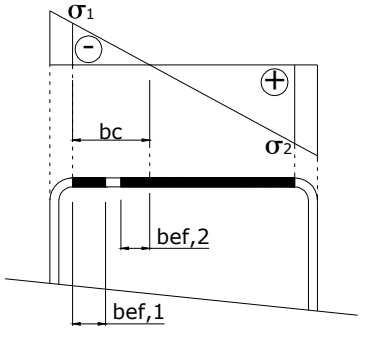
onde t é a espessura do elemento, k é o coeficiente de flambagem local, calculado de acordo com a Tabela 4-4 ou Tabela 4-5 (para elementos AA e AL, respectivamente) e σ é a tensão normal de compressão, definida para os seguintes casos:

- Estado limite último de escoamento da seção: para cada elemento totalmente ou parcialmente comprimido, σ é a máxima tensão de compressão que ocorre quando a seção atinge o escoamento, calculada para a seção efetiva. Se a máxima tensão for de tração, σ pode ser calculada admitindo-se distribuição linear de tensões. A seção efetiva, neste caso, deve ser determinada por aproximações sucessivas.
- Estado limite último de flambagem da barra: se a barra for submetida à compressão, $\sigma = \rho \cdot f_y$, sendo ρ o fator de redução associado à flambagem, item 4.4. Se a barra for submetida à flexão, $\sigma = \rho_{FLT} \cdot f_y$, sendo ρ_{FLT} o fator de redução associado a flambagem lateral com torção.

Considera-se que os montantes dos silos estão submetidos unicamente à compressão e desta forma não se considera o cálculo da barra submetida à flexão neste caso.

Para $\lambda_p \leq 0,673$, a largura efetiva é a própria largura do elemento.

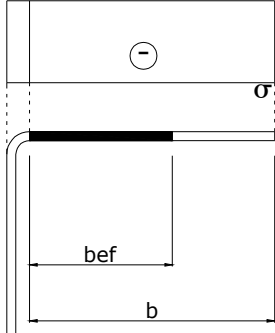
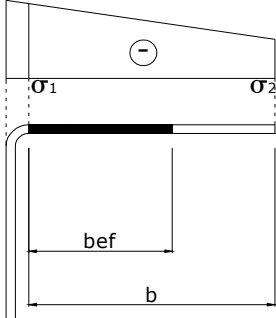
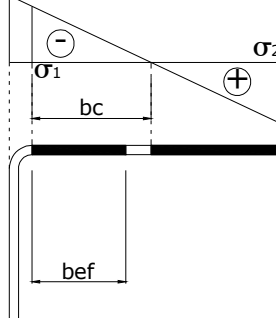
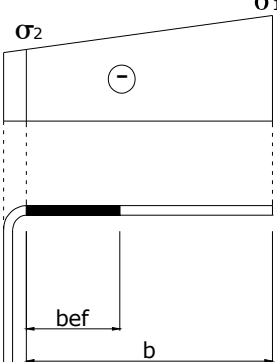
Tabela 4-4 – Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos tipo AA

<p>Caso a</p> 	$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 = 1,0$ $k = 4,0$
<p>Caso b</p> 	$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3 - \psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2 \cdot (1 - \psi) + 2 \cdot (1 - \psi)^3$
<p>Caso c</p> 	$-0,236 < \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3 - \psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2 \cdot (1 - \psi) + 2 \cdot (1 - \psi)^3$
<p>Caso d</p> 	$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 \leq -0,236$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3 - \psi)$ $b_{ef,2} = 0,5 \cdot b_{ef}$ $\text{sendo, ... } b_{ef,1} + b_{ef,2} \leq b_c$ $k = 4 + 2 \cdot (1 - \psi) + 2 \cdot (1 - \psi)^3$

A parte tracionada deve ser considerada como totalmente efetiva.

O sinal (-) indica compressão.

Tabela 4-5 – Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos tipo AL

<p>Caso A</p> 	$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 = 1,0$ $k = 0,43$
<p>Caso b</p> 	$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$ $k = 0,578 / (\psi + 0,34)$
<p>Caso c</p> 	$-1,0 < \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$ $k = 1,7 - 5,\psi + 17,1,\psi^2$
<p>Caso d</p> 	$-1,0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 \leq 1,0$ $k = 0,57 - 0,21,\psi + 0,07,\psi^2$

A parte tracionada deve ser considerada como totalmente efetiva

O sinal (-) indica compressão.

4.3.3 Largura Efetiva de Elementos Uniformemente Comprimidos com um Enrijecedor Intermediário

Alguns fabricantes de silos utilizam montantes com um enrijecedor intermediário, conforme pode ser observado na Figura 4.2, para obter uma largura efetiva igual a largura do elemento.



Figura 4.2 – Foto de montante com a alma contendo um enrijecedor intermediário.

Fonte: site da empresa Behlen Manufacturing.

Para isso, calcula-se o valor de referência do índice de esbeltez reduzido do elemento:

$$\lambda_{p0} = \frac{b_0/t}{1,9.(E/\sigma)^{0,5}} \quad (\text{Eq. 4-13})$$

onde σ é a tensão normal definida em 4.3.2, b_0 é a largura do elemento enrijecido intermediário Figura 4.3, A_s é a área reduzida do enrijecedor (calculada conforme indicado nesta seção e adotada no cálculo das propriedades da seção efetiva do perfil e onde o centróide e os momentos de inércia do enrijecedor devem ser assumidos em relação à sua seção bruta), I_a é o momento de inércia de referência do enrijecedor intermediário ou de borda e I_s, A_{ef} são o momento de inércia da seção bruta do enrijecedor em relação ao seu eixo principal paralelo ao elemento a ser enrijecido e a área efetiva do enrijecedor, respectivamente. Para enrijecedor de borda, a região das dobras entre o enrijecedor e o elemento a ser enrijecido não deve ser considerada como parte integrante do enrijecedor.

Caso I: $\lambda_{p0} \leq 0,673$, enrijecedor intermediário não é necessário: $b_{ef} = b$ e $A_s = A_{ef}$

Caso II: $0,673 < \lambda_{p0} < 2,03$

$$I_a = 50.t^4 [1,484.\lambda_{p0} - 1] \quad (\text{Eq. 4-14})$$

b_{ef} e A_{ef} devem ser calculados conforme 3.1.4.2 onde:

$$k = 3.(I_S / I_a)^{0,5} + 1 \leq 4 \quad (\text{Eq. 4-15})$$

$$A_S = A_{ef} . (I_S / I_a) \leq A_{ef}$$

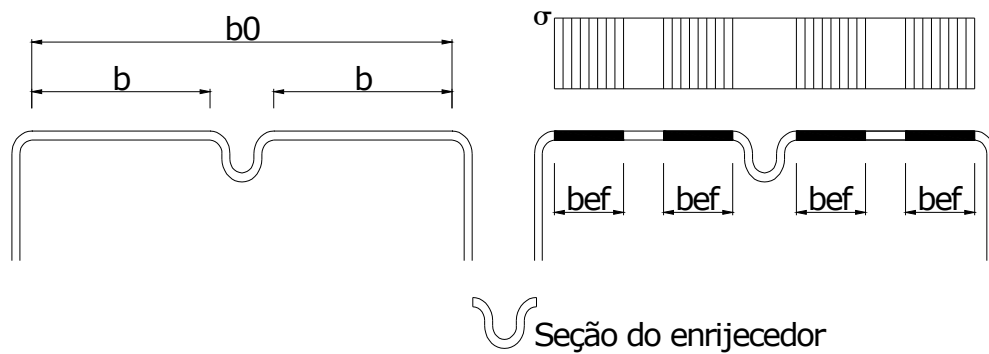


Figura 4.3 – Elemento uniformemente comprimido com enrijecedor intermediário

Caso III: $\lambda_{p0} \geq 2,03$

$$I_a = [190.\lambda_{p0} - 285]t^4 \quad (\text{Eq. 4-16})$$

b_{ef} e A_{ef} calculados conforme 4.3.2 onde:

$$k = 3.(I_S / I_a)^{0,33} + 1 \leq 4 \quad (\text{Eq. 4-17})$$

$$A_S = A_{ef} . (I_S / I_a) \leq A_{ef}$$

4.3.4 Largura Efetiva de Elementos Uniformemente Comprimidos com Enrijecedor de Borda

O valor de referência do índice de esbelteza reduzido do elemento uniformemente comprimido, com enrijecedor de borda, é calculado por:

$$\lambda_{p0} = \frac{b/t}{0,623.(E/\sigma)^{0,5}} \quad (\text{Eq. 4-18})$$

Para o enrijecedor representado na Figura 4.4 considera-se a (Eq. 4-19):

$$I_S = (d^3 . t . \text{sen}^2 \theta) / 12 \quad (\text{Eq. 4-19})$$

$$A_{ef} = d_{ef} . t$$

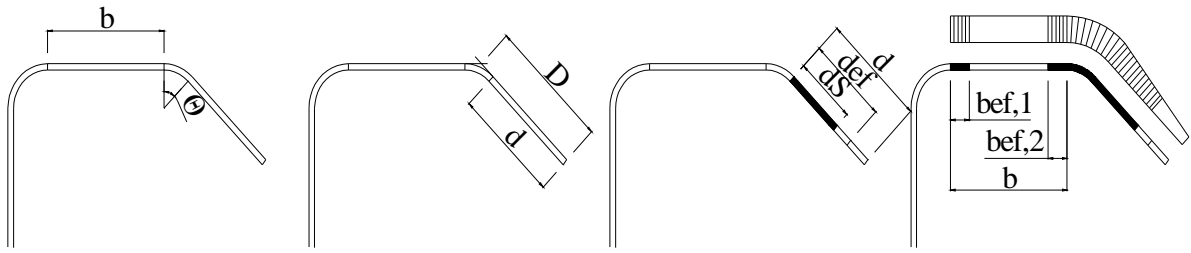


Figura 4.4 – Elemento uniformemente comprimido com enrijecedor de borda

onde: k é o coeficiente de flambagem local; D , b e d são as dimensões indicadas na Figura 4.4; d_{ef} é a largura efetiva do enrijecedor, calculada conforme 4.3.2 e d_s é a largura efetiva reduzida do enrijecedor, adotada no cálculo das propriedades da seção efetiva do perfil

Caso I: $\lambda_{p0} \leq 0,673$, onde o enrijecedor de borda não é necessário:

$$b_{ef} = b \quad (\text{Eq. 4-20})$$

$$d_s = d_{ef} \text{ (enrijecedor de borda simples)} \quad (\text{Eq. 4-21})$$

$$A_s = A_{ef} \text{ (outro tipo de enrijecedor)} \quad (\text{Eq. 4-22})$$

Caso II: onde $0,673 < \lambda_{p0} < 2,03$

$$I_a = 400.t^4.[0,49.\lambda_{p0} - 0,33]^3 \quad (\text{Eq. 4-23})$$

$$b_{ef,2} = (I_s / I_a).(b_{ef} / 2) \leq b_{ef} / 2 \quad (\text{Eq. 4-24})$$

$$b_{ef,1} = b_{ef} - b_{ef,2}$$

b_{ef} deve ser calculado conforme 4.3.2, onde:

$$k = (I_s / I_a)^{0,5}.(k_a - 0,43) + 0,43 \leq k_a \quad (\text{Eq. 4-25})$$

$k_a = 5,25 - 5.(D/b) \leq 4,0$ para enrijecedor de borda simples com $40^\circ \leq \theta \leq 140^\circ$ e $D/b \leq 0,8$, onde θ é indicado na Figura 4.4

$$d_s = (I_s / I_a).d_{ef} \leq d_{ef} \quad (\text{Eq. 4-26})$$

$k_a = 4$ para outros tipos de enrijecedor

$$A_s = A_{ef}.(I_s / I_a) \leq A_{ef} \quad (\text{Eq. 4-27})$$

Caso III: onde $\lambda_{p0} \geq 2,03$

$$I_a = [56.\lambda_{p0} + 5]t^4 \quad (\text{Eq. 4-28})$$

$$k = (I_s / I_a)^{0,33} . (k_a - 0,43) + 0,43 \leq k_a \quad (\text{Eq. 4-29})$$

$$b_{ef}, b_{ef,1}, b_{ef,2}, d_s, k_a \text{ e } A_s \text{ devem ser calculados conforme caso II} \quad (\text{Eq. 4-30})$$

4.4 BARRAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO

De acordo com o anexo B da norma NBR14762 (ABNT, 2001), a resistência ao escoamento pode ser aumentada devido ao efeito do trabalho a frio, desde que todos os elementos da seção apresentem $\lambda_p \leq 0,673$. Assim:

$$f_{ya} = C.f_{yc} + (1 - C).f_y \quad (\text{Eq. 4-31})$$

$$f_{yc} = \frac{B_c . f_y}{(r_i / t)^m} \quad (\text{Eq. 4-32})$$

$$B_c = 2,69.(f_u / f_y) - 0,819.(f_u / f_y)^2 - 1,79 \quad (\text{Eq. 4-33})$$

$$m = 0,192.(f_u / f_y) - 0,068 \quad (\text{Eq. 4-34})$$

sendo C a relação entre a área total de todas as dobras e a área total da seção.

A força normal de compressão resistente de cálculo ($N_{C,Rd}$) para barra sujeita a flambagem por flexão, torção ou flexo-torção deve ser calculada por:

$$N_{C,Rd} = \rho . A_{ef} . f_y / 1,1 \quad (\text{Eq. 4-35})$$

onde,

$$\rho = \frac{1}{\beta + (\beta^2 - \lambda_o^2)^{0,5}} \leq 1,0 \quad (\text{Eq. 4-36})$$

$$\beta = 0,5.(1 + \alpha.(\lambda_o - 0,2) + \lambda_o^2) \quad (\text{Eq. 4-37})$$

sendo α o fator de imperfeição inicial que, nos casos de flambagem por flexão, deve ser considerado conforme Tabela 3-8.

- para curva a: $\alpha = 0,21$
- para curva b: $\alpha = 0,34$
- para curva c: $\alpha = 0,49$

No caso de flambagem por torção ou por flexo-torção, deve-se tomar a curva b.

Para o cálculo do índice de esbeltez reduzido da barra, λ_0 , utilizado na (Eq. 4-37):

$$\lambda_0 = \left[\frac{A_{ef} \cdot f_y}{N_e} \right]^{0.5}, \text{ onde} \quad (\text{Eq. 4-38})$$

onde A_{ef} é a área efetiva, conforme calculado em 4.3.2, adotando $\sigma = \rho \cdot f_y$ e calculando ρ de forma aproximada, tomando $A_{ef} = A$, para o cálculo de λ_0 e N_e é a força normal de flambagem elástica da barra, conforme 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3

4.4.1 Perfis com Dupla Simetria

A força normal de flambagem elástica (N_e) é o menor valor entre aqueles indicados abaixo:

Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} \quad (\text{Eq. 4-39})$$

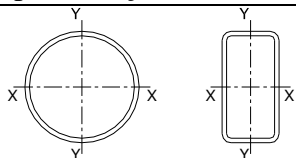
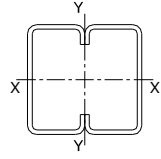
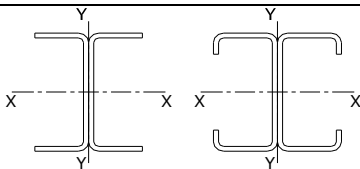
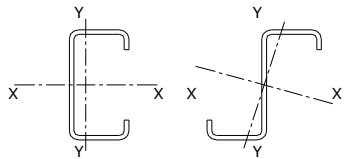
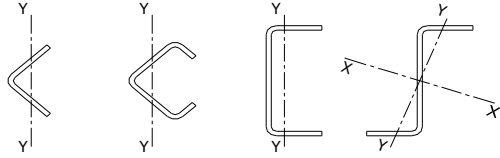
Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} \quad (\text{Eq. 4-40})$$

Força normal de flambagem elástica por torção:

$$N_{et} = \frac{1}{r_0^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot I_t \right] \quad (\text{Eq. 4-41})$$

Tabela 4-6 – Seções e curvas de resistência associadas à flambagem por flexão

Tipo de Seção transversal		Eixos	Curvas
		x-x ou y-y	a
	Para o caso de utilizar LE aumento	x-x ou y-y x-x ou y-y	b c
		x-x y-y	a b
		Indicados	b
		Indicados	c
Para demais seções		Aplicáveis	c

onde C_w é a constante de empenamento da seção, E é o módulo de elasticidade, G é o módulo de elasticidade transversal, I_t é momento de inércia à torção uniforme, $K_x.L_x$ é o comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo x , $K_y.L_y$ é o comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo y , $K_t.L_t$ é o comprimento efetivo de flambagem por torção (quando não houver garantia de impedimento ao empenamento, deve-se tomar $K_t = 1$) e r_0 é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção.

$$r_0 = [r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2]^{0,5} \quad (\text{Eq. 4-42})$$

sendo r_x, r_y os raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia x e y ; e $x_0; y_0$ as coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais x e y em relação ao centróide da seção.

4.4.2 Perfis Monossimétricos

A força normal de flambagem elástica N_e de um perfil com seção monossimétrica, cujo eixo x é o eixo de simetria, é o menor valor entre:

Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} \quad (\text{Eq. 4-43})$$

Força normal de flambagem elástica por flexo-torção:

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot (1 - (x_0/r_0)^2)} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot (1 - (x_0/r_0)^2)}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right) \quad (\text{Eq. 4-44})$$

com N_{ex} ; N_{et} ; r_0 ; x_0 sendo as variáveis definidas no item anterior.

4.4.3 Perfis Assimétricos

Já a força normal de flambagem elástica N_e de um perfil com seção assimétrica é dada pela menor das raízes da seguinte equação cúbica:

$$r_0^2 \cdot (N_e - N_{ex}) \cdot (N_e - N_{ey}) \cdot (N_e - N_{et}) - N_e^2 \cdot (N_e - N_{ey}) \cdot x_0^2 - N_e^2 \cdot (N_e - N_{ex}) \cdot y_0^2 = 0 \quad (\text{Eq. 4-45})$$

onde N_{ex} , N_{ey} , N_{et} , r_0 , x_0 e y_0 são calculados conforme itens anteriores.

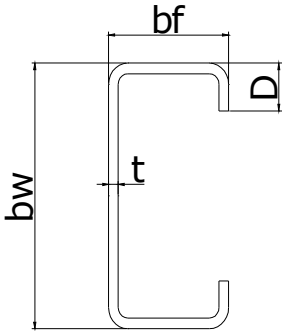
4.4.4 Flambagem por Distorção da Seção Transversal

As seções transversais de barras submetidas à compressão centrada, principalmente as constituídas por elementos enrijecedores de borda, podem apresentar flambagem por distorção da mesa e elemento enrijecedor.

Para que não haja a necessidade de verificação da flambagem por distorção, é necessário que valores de D/b_w sejam maiores que os indicados na Tabela 4-7.

A tabela abaixo foi retirada da norma NBR 14762 para perfil do tipo U enrijecido submetido à compressão centrada. Os perfis tipo U enrijecido e cartola são os tipos de seções mais empregadas em montantes de silo.

Tabela 4-7 – Valores mínimos de D/b_w para seções U enrijecido submetidos à compressão centrada para dispensar a verificação da flambagem por distorção.

b_f / b_w	b_w / t					Para valores intermediários, interpolar linearmente.
	250	200	125	100	50	
0,4	0,02	0,03	0,04	0,04	0,08	
0,6	0,03	0,04	0,06	0,06	0,15	
0,8	0,05	0,06	0,08	0,10	0,22	
1,0	0,06	0,07	0,10	0,12	0,27	
1,2	0,06	0,07	0,12	0,15	0,27	
1,4	0,06	0,08	0,12	0,15	0,27	
1,6	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27	
1,8	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27	
2,0	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27	

4.4.5 Cálculo de Montantes de Silos

Tomando como exemplo os montantes utilizados pela empresa EMA, onde se adotou a largura de 250mm para o corte dos *blanks* (chapa recortada antes de ser furada e dobrada), pode-se ver na Figura 4.5 as seções utilizadas, que variam conforme a espessura da chapa.

Quando da padronização dos perfis dos montantes, varia-se à espessura mantendo a seção interna para posicionamento da emenda do montante inalterada. Assim, no caso da figura abaixo, a altura do perfil é mantida em 54mm, bem como a largura interna de 62mm e o raio de dobra interno de 10mm. Esta padronização também é idealizada para o caso de tais perfis serem conformados em um perfilador de rolos.

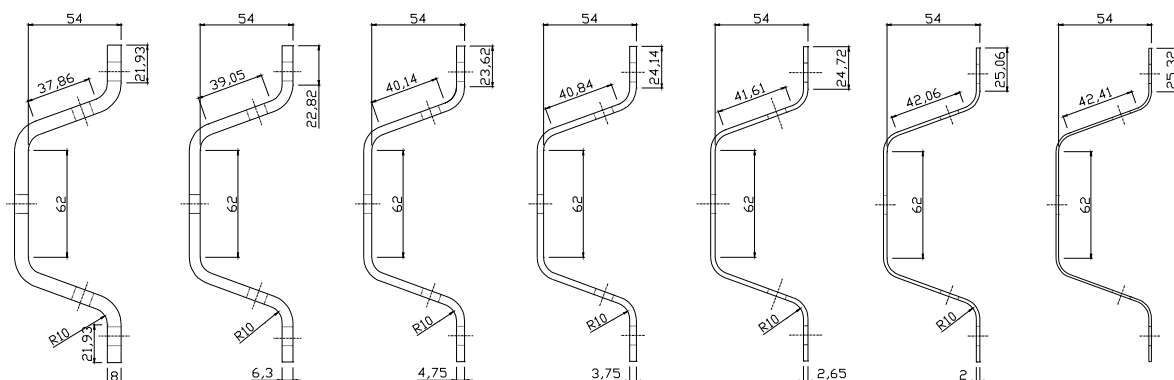


Figura 4.5 – Montantes padrões utilizados pela empresa EMA

Considerando que os montantes sejam fabricados com aço que tenha como propriedades mecânicas, $f_y=480\text{MPa}$ e $f_u=600\text{MPa}$, na Tabela 4-8 apresentam-se as larguras efetivas calculadas para cada perfil, sendo que os valores em amarelo são dados de entrada, valores em vermelho são aqueles que apresentam largura efetiva diferente da largura original.

Tabela 4-8 – Planilha eletrônica das larguras efetivas para os montantes da Figura 4.5

Geometria da Seção (mm)					λ_p (4.3.2) $\lambda_p = \frac{b/t}{0,95 \cdot \left(\frac{k \cdot E}{\sigma}\right)^{0,5}}$			b_{ef} (4.3.2) $b_{ef} = b \cdot (1 - 0,22 / \lambda_p) / \lambda_p \leq b$			L total (mm)
Esp.	Alma	Mesa	Enrij.	R	Alma	Mesa	Enrij. Borda	Alma	Mesa	Enrij. Borda	
1,50	62,00	42,41	25,32	10	1,05	0,72	1,31	46,59	40,90	16,07	249,99
2,00	62,00	42,06	25,06	10	0,79	0,54	0,97	56,65	42,06	19,93	250,00
2,65	62,00	41,61	24,72	10	0,60	0,40	0,72	62,00	41,61	23,76	250,00
3,75	62,00	40,84	24,14	10	0,42	0,28	0,50	62,00	40,84	24,14	249,99
4,75	62,00	40,14	23,62	10	0,33	0,22	0,39	62,00	40,14	23,62	250,00
6,30	62,00	39,05	22,82	10	0,25	0,16	0,28	62,00	39,05	22,82	250,00
8,00	62,00	37,86	21,93	10	0,20	0,12	0,21	62,00	37,86	21,93	250,00
9,50	62,00	35,21	22,75	10	0,17	0,09	0,19	62,00	35,21	22,75	250,00

Conforme item 4.3.4, para os elementos com enrijecedores de borda destes montantes, deve-se entrar em um processo de cálculo conforme os valores de referência do índice de esbeltez sejam menores que 0,673 (Tabela 3-11), estejam entre 0,673 e 2,03 (Tabela 3-12) ou seja maiores que 2,03 (Tabela 3-13).

Tabela 4-9 – Planilha Eletrônica das larguras efetivas para os elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda para os montantes da Figura 4.5 (conforme 4.3.4-I)

Largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda (4.3.4) Caso I: $\lambda_{p0} \leq 0,673$						
Esp.	Mesa	I_s	A_{ef}	λ_{p0}	$b_{ef} - (I)$	d_s
4,75	40,14	4.606,00	112,20	0,66	40,14	23,62
6,30	39,05	5.509,06	143,77	0,48	39,05	22,82
8,00	37,86	6.208,64	175,44	0,37	37,86	21,93
9,50	35,21	8.231,11	216,13	0,29	35,21	22,75

Tabela 4-10 – Planilha Eletrônica das larguras efetivas para os elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda para os montantes da Figura 4.5 (conforme 4.3.4-II).

Largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda (4.3.4) Caso II: $0,673 < \lambda_{p0} < 2,03$												
Esp.	Mesa	I_s	A_{ef}	λ_{p0}	k_a	k	λ_p	b_{ef}	I_a	$b_{ef,2}$	$b_{ef,1}$	d_s
2,00	42,06	2.316,13	39,86	1,63	1,27	1,27	0,95	34,03	666,04	17,01	17,01	19,93
2,65	41,61	2.945,65	62,96	1,22	1,25	1,25	0,72	40,28	377,97	20,14	20,14	23,76
3,75	40,84	3.881,80	90,53	0,85	1,25	1,25	0,50	40,84	47,70	20,42	20,42	24,14

Tabela 4-11 – Planilha Eletrônica das larguras efetivas para os elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda para os montantes da Figura 4.5 (conforme 4.3.4-III)

Largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda (4.3.4) Caso III: $\lambda_{p0} \geq 2,03$												
Esp.	Mesa	I_s	A_{ef}	λ_{p0}	k_a	k	λ_p	b_{ef}	I_a	$b_{ef,2}$	$b_{ef,1}$	d_s
1,50	42,41	1.791,73	24,11	2,20	1,32	1,32	1,26	27,86	647,88	13,93	13,93	16,07

A força normal de compressão resistente de cálculo de cada montante está apresentada na Tabela 4-12. As mesmas foram determinadas conforme 4.4, considerando que, devido aos montantes estarem ligados por meio de parafusos muito próximos à chapa lateral, e esta ser curvada conforme o raio do silo, a flambagem elástica em relação aos eixos x e y tem valores bastante altos, o que leva λ_o a tender a zero.

Tabela 4-12 – Planilha Eletrônica da força normal de compressão resistente de cálculo para as chapas da Figura 4.5.

Esp.	Alma	Mesa	Enrij.	Raio	b_{ef} Alma	b_{ef} Mesa	b_{ef} Enrij	A_{ef}	α	β	ρ	$N_{C,Rd}$ (kN)
1,50	62,00	42,41	25,32	10,00	46,59	27,86	16,07	280,47	0,34	0,47	1,00	122,39
2,00	62,00	42,06	25,06	10,00	56,65	34,03	19,93	436,63	0,34	0,47	1,00	190,53
2,65	62,00	41,61	24,72	10,00	62,00	40,28	23,76	650,35	0,34	0,47	1,00	283,79
3,75	62,00	40,84	24,14	10,00	62,00	40,84	24,14	937,47	0,34	0,47	1,00	409,08
4,75	62,00	40,14	23,62	10,00	62,00	40,14	23,62	1.187,48	0,34	0,47	1,00	518,17
6,30	62,00	39,05	22,82	10,00	62,00	39,05	22,82	1.575,02	0,34	0,47	1,00	687,28
8,00	62,00	37,86	21,93	10,00	62,00	37,86	21,93	1.999,98	0,34	0,47	1,00	872,72
9,50	62,00	35,21	22,75	10,00	62,00	35,21	22,75	2.375,02	0,34	0,47	1,00	1.036,37

Levando em consideração a possibilidade de aumento da resistência ao escoamento do aço devido ao efeito do trabalho a frio, e recordando que, para isso, todos os elementos devem ter $\lambda_{p0} \leq 0,673$ (4.4), apresenta-se, na Tabela 4-13, a força normal de compressão para os montantes que atendem a esta exigência.

Tabela 4-13 – Planilha Eletrônica da força normal de compressão resistente de cálculo para as chapas da Figura 4.5, considerando efeito do trabalho a frio.

Esp.	Alma	Mesa	Enrij.	Raio	A_{bruta}	α	β	ρ	f_{ya}	$N_{C,Rd}$ (kN)
3,75	62,00	40,84	24,14	10,00	937,47	0,34	0,52	0,95	513,80	417,98
4,75	62,00	40,14	23,62	10,00	1.187,48	0,34	0,52	0,95	521,50	537,39
6,30	62,00	39,05	22,82	10,00	1.575,02	0,34	0,52	0,95	532,43	727,72
8,00	62,00	37,86	21,93	10,00	1.999,98	0,34	0,52	0,95	543,67	943,57
9,50	62,00	35,21	22,75	10,00	2.375,02	0,34	0,52	0,95	553,25	1.140,25

O resultado para a força normal de compressão resistente $N_{C,Rd}$ para todos os perfis utilizados, conforme Tabela 4-14, será:

Tabela 4-14 – Planilha Eletrônica da força normal de compressão resistente de cálculo para as chapas da Figura 4.5 (conforme resultados das Tabela 4-12 e Tabela 4-13).

Esp.	Alma	Mesa	Enrij.	Raio	$N_{C,Rd}$ (kN)
1,50	62,00	42,41	25,32	10,00	122,39
2,00	62,00	42,06	25,06	10,00	190,53
2,65	62,00	41,61	24,72	10,00	283,79
3,75	62,00	40,84	24,14	10,00	417,98
4,75	62,00	40,14	23,62	10,00	537,39
6,30	62,00	39,05	22,82	10,00	727,72
8,00	62,00	37,86	21,93	10,00	943,57
9,50	62,00	35,21	22,75	10,00	1.140,25

4.5 BARRAS SUBMETIDAS À TRAÇÃO

Entre as peças que compõem um silo, as chapas laterais são aquelas que estão submetidas à carga de tração devida à pressão horizontal oriunda do carregamento dos grãos. Além delas, dependendo da relação altura e diâmetro e carga de vento, os montantes dos silos na região de barlavento podem estar sujeitos à tração.

A força normal de tração deverá ser tomada como a menor entre:

- Escoamento da seção bruta (condição de ductilidade):

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{1,1} \quad (\text{Eq. 4-46})$$

ou

- Ruptura da seção líquida (condição de resistência):

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t \cdot A_n \cdot f_u}{1,35} \quad (\text{Eq. 4-47})$$

onde, A é a área bruta da seção transversal da barra, A_n é a área da seção líquida da seção transversal da barra, devendo ser considerado, para ligações parafusadas, as prováveis linhas de ruptura, sendo a seção crítica aquela correspondente ao menor valor de área líquida.

$$A_n = 0,9 \cdot \left(A - n_f \cdot d_f \cdot t + \frac{\sum t \cdot s^2}{4 \cdot g} \right) \quad (\text{Eq. 4-48})$$

sendo d_f a dimensão do furo na direção perpendicular à solicitação, n_f a quantidade de furos contidos na linha de ruptura analisada, s o espaçamento dos furos na direção da solicitação, g o maior espaçamento entre furos na direção perpendicular à solicitação, t a espessura da parte conectada analisada e C_t o coeficiente de redução da área líquida, dado no item 4.5.1.

4.5.1 Chapas com Ligações Parafusadas

De acordo com o número de linhas de parafusos que contenham a peça submetida à tração, o coeficiente C_t a ser adotado será calculado de acordo com uma das expressões abaixo.

Onde todos os parafusos da ligação estejam contidos em uma única seção transversal:

$$C_t = 2,5 \cdot (d / g) \leq 1,0 \quad (\text{Eq. 4-49})$$

Se dois parafusos estão na direção da solicitação, alinhados ou em ziguezague:

$$C_t = 0,5 + 1,25 \cdot (d / g) \leq 1,0 \quad (\text{Eq. 4-50})$$

Caso três parafusos estejam na direção da solicitação, alinhados ou em ziguezague:

$$C_t = 0,67 + 0,83 \cdot (d / g) \leq 1,0 \quad (\text{Eq. 4-51})$$

E onde quatro ou mais parafusos estejam na direção da solicitação, alinhados ou em ziguezague:

$$C_t = 0,75 + 0,625 \cdot (d / g) \leq 1,0 \quad (\text{Eq. 4-52})$$

sendo d o diâmetro nominal do parafuso. Em caso de espaçamentos diferentes, a norma recomenda que se tome sempre o maior valor de g para cálculo de C_t .

Nos casos em que o espaçamento entre furos g for inferior à soma das distâncias entre os centros dos furos de extremidade às respectivas bordas, na direção perpendicular à solicitação ($e_1 + e_2$), C_t deve ser calculado substituindo g por $e_1 + e_2$.

Um dos elementos mais importantes no silo, a chapa lateral, servirá para:

- Suportar os esforços de tração originados pela pressão horizontal causada pelos grãos,
- Transmitirá os esforços oriundos do atrito dos grãos para os montantes,
- Deverá auxiliar na flambagem do silo sujeito ao esforço de vento (quando vazio),
- Garantir a estanqueidade, etc...

4.5.2 Exemplo de Cálculo da Força de Tração Admissível em Chapas Laterais

Na Figura 4.6 e Figura 4.7 estão representados esquemas de fabricação de três chapas laterais de distintos fabricantes.

Levando em conta que é utilizada chapa de aço NBR7008-ZAR345 com $t=1,95\text{mm}$, $F_y=345\text{MPa}=0,345\text{kN/mm}^2$ e $F_y=430\text{MPa}=0,43\text{kN/mm}^2$ e considerando que os parafusos utilizados tem diâmetro nominal $d=10\text{mm}$, que o plano de corte passa pela rosca e que o material utilizado segue a norma ISO 7411 grau 8.8 com $f_{up}=800\text{MPa}=0,8\text{kN/mm}^2$.

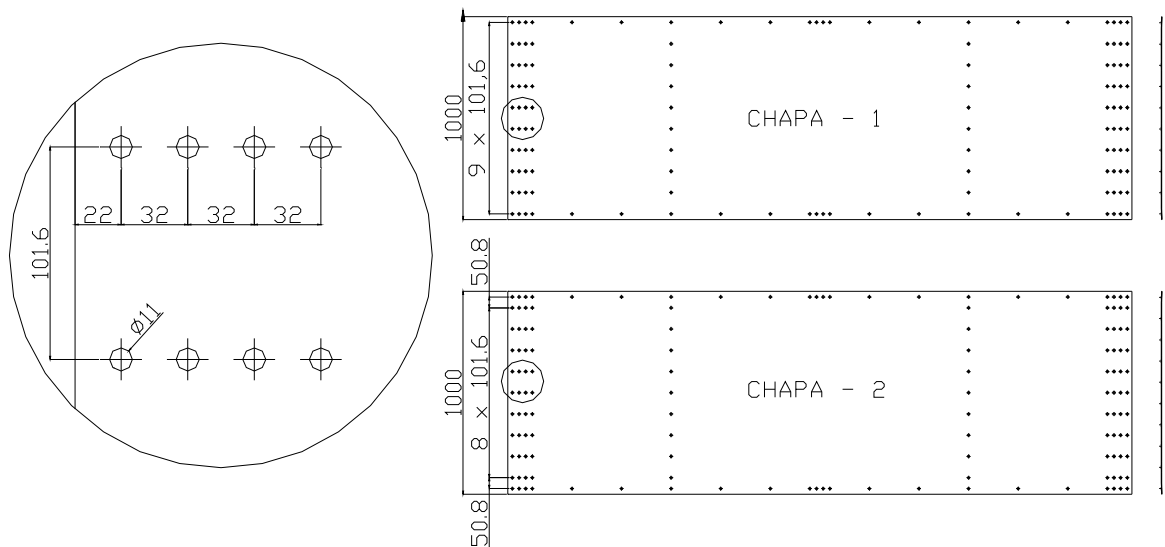


Figura 4.6 – Chapas Laterais com 4 linhas de furo

Pode-se calcular a força normal de tração resistente de cálculo ($N_{t,Rd}$) para as três chapas, conforme a (Eq. 4-46), que leva em conta a área bruta :

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{1,1} = \frac{(1000 \cdot 1,95) \cdot 0,345}{1,1} = 611,59 \text{ kN}$$

Determina-se C_t , considerando que nas chapas da Figura 4.6 existem quatro parafusos na direção solicitada:

$$C_t = 0,75 + 0,625 \cdot (d / g) = 0,75 + 0,625 \cdot (10 / 101,6) = 0,8115$$

Para **Chapa-1:**

$$A_n = 0,9 \cdot \left(A - n_f \cdot d_f \cdot t + \frac{\sum t \cdot s^2}{4 \cdot g} \right) = 0,9 \cdot (1000 \cdot 1,95 - 10 \cdot 11 \cdot 1,95) = 1.561,95 \text{ mm}^2$$

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t \cdot A_n \cdot f_u}{1,35} = \frac{0,8115 \cdot 1.561,95 \cdot 0,430}{1,35} = 403,73 \text{ kN}$$

$$N_{t,Rd} = \text{mínimo}(611,59; 403,73) = 403,73 \text{ kN}$$

Para **Chapa-2:**

$$A_n = 0,9 \cdot \left(A - n_f \cdot d_f \cdot t + \frac{\sum t \cdot s^2}{4 \cdot g} \right) = 0,9 \cdot (1000 \cdot 1,95 - 11 \cdot 11 \cdot 1,95) = 1.542,65 \text{ mm}^2$$

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t \cdot A_n \cdot f_u}{1,35} = \frac{0,8115 \cdot 1.542,65 \cdot 0,43}{1,35} = 398,74 \text{ kN}$$

$$N_{t,Rd} = \text{mínimo}(611,59; 398,74) = 398,74 \text{ kN}$$

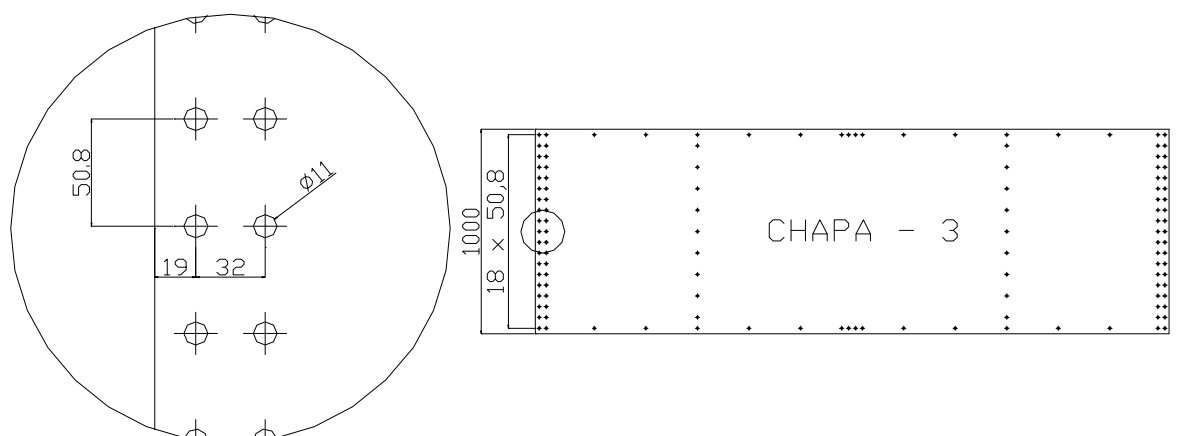


Figura 4.7 – Chapa Lateral com duas linhas de furo

Calculando C_t , verificando que na chapa da Figura 4.7 existem dois parafusos na direção solicitada:

$$C_t = 0,50 + 1,25 \cdot (d / g) = 0,50 + 1,25 \cdot (10 / 50,8) = 0,7461$$

Para **Chapa-3:**

$$A_n = 0,9 \cdot \left(A - n_f \cdot d_f \cdot t + \frac{\sum t \cdot s^2}{4 \cdot g} \right) = 0,9 \cdot (1000 \cdot 1,95 - 19 \cdot 11 \cdot 1,95) = 1.388,21 \text{ mm}^2$$

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t \cdot A_n \cdot f_u}{1,35} = \frac{0,7461 \cdot 1.388,21 \cdot 0,430}{1,35} = 329,89 \text{ kN}$$

$$N_{t,Rd} = \text{mínimo}(611,59; 329,89) = 329,89 \text{ kN}$$

Pode-se verificar que chapas com a mesma espessura, fabricadas com mesmo material e com praticamente a mesma quantidade de parafusos na união vertical (chapa-1 com 40 parafusos – chapa-2 com 44 parafusos e chapa-3 com 38 parafusos) tem força normal de tração resistente de cálculo $N_{t,Rd}$ muito diferentes. A chapa-1 é a mais resistente e cálculos no item 4.6 analisam os procedimentos para consideração do cisalhamento de parafusos, rasgamento e pressão de contato (esmagamento) na chapa devida à ação dos parafusos, para se obter um resultado conclusivo.

4.6 CÁLCULO DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS

A Norma NBR 14762 (ABNT, 2001) é aplicável para cálculo de ligações parafusadas, quando a espessura da parte mais fina não ultrapassa 4,75mm. Caso contrário, devem ser atendidas as exigências da NBR8800 (ABNT, 1986).

Salienta-se que a distância entre as bordas de dois furos adjacentes não deve ser inferior a duas vezes o diâmetro do parafuso e a distância da borda de um furo à extremidade do elemento não deve ser inferior ao diâmetro do parafuso.

4.6.1 Rasgamento entre Furos ou entre Furo e Borda

Um dos critérios de falha de um perfil ligado por parafuso é a possibilidade de rasgamento entre furos que estejam alinhados com a direção da força ou entre um furo e a borda.

Esta força resistente de cálculo ao rasgamento F_{Rd} pode ser calculada por:

$$F_{Rd} = t \cdot e \cdot f_u / 1,35 \quad (\text{Eq. 4-53})$$

onde f_u é a resistência à ruptura do aço, t é a espessura do elemento conectado analisado, e é a distância, tomada na direção da força, do centro do furo à borda mais próxima do furo adjacente ou à extremidade do elemento conectado.

Calculando F_{Rd} para as chapas-1, 2 e 3 da Figura 4.6 e Figura 4.7 tem-se:

Chapa-1 Figura 4.6:

Força de rasgamento entre furos

$$F_{Rd} = t \cdot e \cdot f_u / 1,35 = 1,95 \cdot (32 - 11 / 2) \cdot 0,43 / 1,35 = 16,459 \text{ kN}$$

Força de rasgamento entre furo e borda

$$F_{Rd} = t.e.fu / 1,35 = 1,95.(22).0,43 / 1,35 = 13,664kN$$

Tem-se nesta chapa, 30 parafusos com rasgamento entre furos e 10 com rasgamento entre furo e borda, assim:

$$F_{Rd} = 16,459.10.3 + 13,664.10 = 630,41kN$$

$$N_{t,Rd} = \text{mínimo}(611,59;403,73;630,4) = 403,73kN$$

Chapa-2 Figura 4.6:

Força de rasgamento entre furos

$$F_{Rd} = t.e.fu / 1,35 = 1,95.(32 - 11 / 2).0,43 / 1,35 = 16,459kN$$

Força de rasgamento entre furo e borda

$$F_{Rd} = t.e.fu / 1,35 = 1,95.(22).0,43 / 1,35 = 13,664kN$$

Tem-se nesta chapa 31 parafusos com rasgamento entre furos e 11 com rasgamento entre furo e borda, assim:

$$F_{Rd} = 16,459.11.3 + 13,664.11 = 693,451kN$$

$$N_{t,Rd} = \text{mínimo}(611,59;398,74;693,451) = 398,74kN$$

Chapa-3 Figura 4.7:

Força de rasgamento entre furos

$$F_{Rd} = t.e.fu / 1,35 = 1,95.(32 - 11 / 2).0,43 / 1,35 = 16,459kN$$

Força de rasgamento entre furo e borda

$$F_{Rd} = t.e.fu / 1,35 = 1,95.(19).0,43 / 1,35 = 11,801kN$$

Tem-se nesta chapa 19 parafusos com rasgamento entre furos e 19 com rasgamento entre furo e borda, assim:

$$F_{Rd} = 16,459.19 + 11,801.19 = 536,94kN$$

$$N_{t,Rd} = \text{mínimo}(611,59;329,89;536,94) = 329,89kN$$

Verifica-se que pelo critério de falha de todas as chapas considerando força normal de tração na região da área bruta, força normal de tração na área líquida e rasgamento entre furos e entre furos e borda, a chapa-1 é a mais resistente.

4.6.2 Pressão de Contato (Esmagamento)

Outro critério de falha que deve ser considerado é o esmagamento do furo devido à concentração de tensões cuja força resistente de cálculo ao esmagamento F_{Rd} deve ser calculado por:

$$F_{Rd} = 2,4 \cdot d \cdot t \cdot f_u / 1,35 \quad (\text{Eq. 4-54})$$

onde d é o diâmetro nominal do parafuso e as demais incógnitas são definidas como explicado em 4.6.1.

Calculando F_{Rd} para as chapas-1, 2 e 3 da Figura 4.6 e Figura 4.7 teremos:

Chapa-1:

Força de esmagamento entre furos

$$F_{Rd} = 2,4 \cdot d \cdot t \cdot f_u / 1,35 = 2,4 \cdot 10 \cdot 1,95 \cdot 0,43 / 1,35 = 14,907 \text{ kN}$$

Nesta chapa tem-se 40 parafusos fazendo a ligação, assim:

$$F_{Rd} = 40 \cdot 14,907 = 596,28 \text{ kN}$$

$$N_{t,Rd} = \text{mínimo}(611,59; 403,73; 630,4; 596,28) = 403,73 \text{ kN}$$

Chapa-2:

Força de esmagamento entre furos

$$F_{Rd} = 2,4 \cdot d \cdot t \cdot f_u / 1,35 = 2,4 \cdot 10 \cdot 1,95 \cdot 0,43 / 1,35 = 14,907 \text{ kN}$$

Nesta chapa tem-se 44 parafusos fazendo a ligação, assim:

$$F_{Rd} = 44 \cdot 14,907 = 655,908 \text{ kN}$$

$$N_{t,Rd} = \text{mínimo}(611,59; 398,74; 693,451; 655,908) = 398,74 \text{ kN}$$

Chapa-3:

Força de esmagamento entre furos

$$F_{Rd} = 2,4.d.t.f_u / 1,35 = 2,4.10.1,95.0,43 / 1,35 = 14,907kN$$

Nesta chapa tem-se 38 parafusos fazendo a ligação, assim:

$$F_{Rd} = 38.14,907 = 566,466kN$$

$$N_{t,Rd} = \text{mínimo}(611,59;329,89;536,94;566,466) = 329,89kN$$

Verifica-se que considerando mais este critério de falha, a chapa-1 continua sendo a mais resistente e mantendo o critério de falha na seção líquida.

4.6.3 Força Cortante no Parafuso

Os parafusos utilizados na união entre os perfis submetidos a esforços de cisalhamento constituem outra possibilidade de falha que deve ser analisada. A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} do parafuso, deve ser calculada por:

$$V_{Rd} = 0,45.A_p.F_{up} / \gamma, \text{ quando plano de corte passa pela rosca} \quad (\text{Eq. 4-55})$$

$$V_{Rd} = 0,60.A_p.F_{up} / \gamma, \text{ quando plano de corte não passa pela rosca} \quad (\text{Eq. 4-56})$$

onde A_p é a área bruta da seção transversal do parafuso, f_{up} é a resistência à ruptura do parafuso na tração, $\gamma = 1,55$ para parafusos de alta resistência, $\gamma = 1,65$ para parafusos comuns e parafusos de aço sem qualificação estrutural.

Calculando V_{Rd} para as chapas-1, 2 e 3 da figura 5 e 6 teremos:

Chapa-1, 2 e 3:

$$V_{Rd} = 0,45.A_p.f_{up} / \gamma = 0,45.(\pi.10^2 / 4).0,8 / 1,55 = 18,241$$

Chapa-1, com 40 parafusos:

$$V_{Rd} = 18,241.40 = 729,64kN$$

$$N_{t,Rd} = \text{mínimo}(611,59;403,73;630,4;596,28;729,64) = 403,73kN$$

Chapa-2, com 44 parafusos:

$$V_{Rd} = 18,241.44 = 802,604kN$$

$$N_{t,Rd} = \text{mínimo}(611,59;398,74;693,451;655,908;802,604) = 398,74kN$$

Chapa-3, com 38 parafusos:

$$V_{Rd} = 18,241.38 = 693,158kN$$

$$N_{t,Rd} = \text{mínimo}(611,59;329,89;536,94;566,466;693,58) = 329,89kN$$

Considerando as três chapas analisadas, verifica-se que o critério de falha por cisalhamento dos parafusos não foi mais crítico do que a falha na seção líquida das chapas analisadas.

Verifica-se que os engenheiros responsáveis pelo projeto elegeram números de parafusos e distâncias entre os mesmos e bordas de tal forma que a falha da chapa lateral do silo, caso venha a ocorrer, se dê por rasgamento da chapa na área de seção líquida, isto é, rasgamento em uma das linhas de parafusos da união vertical entre chapas.

4.6.4 Análise da Força de Tração Resistente Efetiva das Chapas das Figura 4.6 e Figura 4.7

Apresenta-se aqui um resumo dos cálculos para as diversas falhas que poderão ocorrer em chapas laterais de silos conforme apresentado anteriormente. Este resumo está sintetizado na Tabela 4-15 abaixo.

Tabela 4-15 – Planilha Eletrônica para cálculo da força resistente de tração para as chapas das Figura 4.6 e Figura 4.7

Chapa	Força normal de tração resistente de cálculo $N_{t,Rd}$		Rasgamento entre furos e entre furo e borda	Pressão de contato	Força cortante nos parafusos
	$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{1,1}$ (Eq. 4-46)	$N_{t,Rd} = \frac{C_t \cdot A_n \cdot f_u}{1,35}$ (Eq. 4-47)	$F_{Rd} = \frac{t \cdot e \cdot f_u}{1,35}$ (Eq. 4-53)	$F_{Rd} = \frac{2,4 \cdot d \cdot t \cdot f_u}{1,35}$ (Eq. 4-54)	$V_{Rd} = \frac{0,45 \cdot A_p \cdot f_{up}}{\gamma}$ (Eq. 4-55)
1	611,59	403,73	630,41	596,28	729,64
2	611,59	398,74	693,451	655,908	802,604
3	611,59	329,89	536,94	566,466	693,158

Chapa	Força resistente de tração para cada chapa (kN)
1	403,73
2	398,74
3	329,89

Verifica-se que a chapa-1 é a mais resistente, 403,73kN, o que mostra a importância de um bom trabalho de projeto e cálculo.

Para que haja uma ruptura da chapa com aviso, isto é, que a ruptura não seja brusca, procura-se projetar chapas laterais de modo que as forças para rasgamento entre furos e entre furo e borda, força devida a pressão de contato e principalmente, a força cortante nos parafusos, sejam maiores que as forças normais de tração resistente de cálculo.

4.7 FORMULAÇÃO DE FERRAMENTA PARA ANÁLISE DA FORÇA DE TRAÇÃO RESISTENTE DAS CHAPAS A SEREM EMPREGADAS EM MODELOS DE SILOS PADRONIZADOS

Um programa simples de cálculo pode auxiliar na definição do melhor projeto de chapas que resulte na maior resistência de tração possível para cada espessura utilizada. Deve-se definir o material a ser empregado e as espessuras a serem utilizadas para o aço da chapa lateral e na seqüência o material e diâmetros dos parafusos das ligações verticais e horizontais. Outro ponto importante é a quantidade de parafusos na união e sua distribuição

4.7.1 Resultados do Programa

Tendo como objetivo buscar o maior esforço de tração admissível nas chapas laterais dos silos (Tabela 3-18, coluna em vermelho), programou-se os formulários anteriores (4.5 e 4.6) numa planilha eletrônica, tendo como dados de entrada as colunas em amarelo. Na Tabela 4-17 é apresentado um resumo dos resultados com o objetivo de sintetizar e apresentar somente os dados de entrada e o resultado para cada espessura de chapa.

Tabela 4-16 – Planilha Eletrônica para cálculo das chapas laterais dos silos

Esp. (mm)	Largura da Chapa (mm)	LE MPa	LR MPa	Num. Col. Paraf.	Num. Paraf.	Diâm. do Furo mm	Diâm. do Paraf. mm	e= Espaço Centro a borda mm	s=Espaç Centro a Centro mm	Com Pescoço? (S/N)	Tensão Ruptura Paraf. MPa	Carga Cisalh. Paraf. kN	Ct	An	LE kN	LR kN	Rasgamento kN	Pressão de Contato kN	Cisalh. Paraf. kN	Mínimo
0,80	1.000	345	430	4	10,00	9,00	8,00	22,00	32,00	N	0,784800	10,77	0,7992	655,20	250,91	166,79	266,28	195,70	458,11	166,79
0,95	1.000	345	430	4	10,00	9,00	8,00	22,00	32,00	N	0,784800	10,77	0,7992	778,05	297,95	198,06	316,21	232,39	458,11	198,06
1,25	1.000	345	430	4	10,00	9,00	8,00	22,00	32,00	N	0,784800	10,77	0,7992	1.023,75	392,05	260,61	416,06	305,78	458,11	260,61
1,55	1.000	345	430	4	10,00	11,00	10,00	22,00	32,00	N	0,784800	16,83	0,8115	1.241,55	486,14	320,92	501,11	473,96	715,80	320,92
1,95	1.000	345	430	4	10,00	11,00	10,00	22,00	32,00	N	0,784800	16,83	0,8115	1.561,95	611,59	403,74	630,43	596,27	715,80	403,74
2,30	1.000	345	430	4	10,00	11,00	10,00	22,00	32,00	N	0,784800	16,83	0,8115	1.842,30	721,36	476,20	743,58	703,29	715,80	476,20
2,70	1.000	345	430	4	10,00	11,00	10,00	22,00	32,00	N	0,784800	16,83	0,8115	2.162,70	846,82	559,02	872,90	825,60	715,80	559,02
3,00	1.000	345	430	4	10,00	11,00	10,00	22,00	32,00	N	0,784800	16,83	0,8115	2.403,00	940,91	621,13	969,89	917,33	715,80	621,13
2x1,95	1.000	345	430	4	10,00	14,00	12,00	22,00	32,00	N	0,784800	24,23	0,8238	3.018,60	1.223,18	792,09	1.204,96	1.431,04	1.030,75	792,09
2x2,30	1.000	345	430	4	10,00	14,00	12,00	22,00	32,00	N	0,784800	24,23	0,8238	3.560,40	1.442,73	934,25	1.421,23	1.687,89	1.030,75	934,25
2x2,70	1.000	345	430	4	10,00	14,00	12,00	22,00	32,00	S	0,784800	34,62	0,8238	4.179,60	1.693,64	1.096,73	1.668,40	1.981,44	1.374,33	1.096,73
2x3,00	1.000	345	430	4	10,00	14,00	12,00	22,00	32,00	S	0,784800	34,62	0,8238	4.644,00	1.881,82	1.218,59	1.853,78	2.201,60	1.374,33	1.218,59

Tabela 4-17 – Resumo da Tabela 4-16

Esp. (mm)	Largura da Chapa (mm)	LE MPa	LR MPa	Num. Col. Paraf.	Num. Paraf.	Diâm. do Furo mm	Diâm. do Paraf. mm	e = Espaço Centro a borda mm	s=Espaço Centro a Centro mm	Com Pescoço? (S / N)	Mínimo kN
0,80	1.000	345	430	4	10,00	9,00	8,00	22,00	32,00	N	166,79
0,95	1.000	345	430	4	10,00	9,00	8,00	22,00	32,00	N	198,06
1,25	1.000	345	430	4	10,00	9,00	8,00	22,00	32,00	N	260,61
1,55	1.000	345	430	4	10,00	11,00	10,00	22,00	32,00	N	320,92
1,95	1.000	345	430	4	10,00	11,00	10,00	22,00	32,00	N	403,74
2,30	1.000	345	430	4	10,00	11,00	10,00	22,00	32,00	N	476,20
2,70	1.000	345	430	4	10,00	11,00	10,00	22,00	32,00	N	559,02
3,00	1.000	345	430	4	10,00	11,00	10,00	22,00	32,00	N	621,13
2x1,95	1.000	345	430	4	10,00	14,00	12,00	22,00	32,00	N	792,09
2x2,30	1.000	345	430	4	10,00	14,00	12,00	22,00	32,00	N	934,25
2x2,70	1.000	345	430	4	10,00	14,00	12,00	22,00	32,00	S	1.096,73
2x3,00	1.000	345	430	4	10,00	14,00	12,00	22,00	32,00	S	1.218,59

4.7.2 Comparação com dimensões de chapas padrão do principal fabricante brasileiro

As chapas laterais empregadas pelo principal fabricante de silos no Brasil tem dimensões e propriedades mecânicas do aço, além de dimensões, distribuição e propriedades mecânicas dos parafusos conforme apresentado na Tabela 4-18, onde também pode-se verificar os resultados preliminares e a força resistente de cálculo para cada uma delas com base nos resultados do programa. Na Tabela 3-21 apresenta-se um resumo dos dados e o resultado crítico para cada chapa com o objetivo de sintetizar as informações.

Tabela 4-18 – Planilha Eletrônica com resultados da carga de tração para as chapas laterais do principal fabricante de silos no Brasil

Esp. (mm)	Largura da Chapa (mm)	LE	LR	Num. Col. Paraf.	Num. Paraf.	Diâm. do Furo	Diâm. do Paraf.	e= Espaço Centro a borda	s=Espaço Centro a Centro	Com Pescoço? (S / N)	Tensão Ruptura Paraf.	Carga Cisalham/ Paraf.	Ct	An	LE	LR	Rasgamento	Pressão de Contato	Cisalh. Paraf.	Mínimo
0,80	1.000	345	430	2	19,00	9,00	8,00	19,00	32,00	N	0,784800	10,77	0,6969	596,88	250,91	132,48	225,13	185,91	435,20	132,48
0,95	1.000	345	430	2	19,00	9,00	8,00	19,00	32,00	N	0,784800	10,77	0,6969	708,80	297,95	157,32	267,34	220,77	435,20	157,32
1,25	1.000	345	430	2	19,00	9,00	8,00	19,00	32,00	N	0,784800	10,77	0,6969	932,63	392,05	207,01	351,76	290,49	435,20	207,01
1,55	1.000	345	430	2	19,00	11,00	10,00	19,00	32,00	N	0,784800	16,83	0,7461	1.103,45	486,14	262,22	426,81	450,26	680,01	262,22
1,95	1.000	345	430	2	19,00	11,00	10,00	19,00	32,00	N	0,784800	16,83	0,7461	1.388,21	611,59	329,89	536,95	566,45	680,01	329,89
2,30	1.000	345	430	2	19,00	11,00	10,00	19,00	32,00	N	0,784800	16,83	0,7461	1.637,37	721,36	389,10	633,33	668,12	680,01	389,10
2,70	1.000	345	430	3	19,00	11,00	10,00	19,00	32,00	N	0,784800	16,83	0,8334	1.922,13	846,82	510,23	1.176,48	1.176,48	1.020,01	510,23
3,00	1.000	345	430	3	19,00	11,00	10,00	19,00	32,00	N	0,784800	16,83	0,8334	2.135,70	940,91	566,92	1.307,20	1.307,20	1.020,01	566,92
3,90	1.000	345	430	3	19,00	14,00	12,00	19,00	32,00	N	0,784800	24,23	0,8661	2.576,34	1.223,18	710,70	1.628,55	2.039,23	1.468,81	710,70
4,60	1.000	345	430	3	19,00	14,00	12,00	19,00	32,00	N	0,784800	24,23	0,8661	3.038,76	1.442,73	838,26	1.920,86	2.405,25	1.468,81	838,26
5,40	1.000	345	430	3	19,00	14,00	12,00	19,00	32,00	N	0,784800	24,23	0,8661	3.567,24	1.693,64	984,05	2.254,92	2.823,55	1.468,81	984,05
6,00	1.000	345	430	3	19,00	14,00	12,00	19,00	32,00	N	0,784800	24,23	0,8661	3.963,60	1.881,82	1.093,39	2.505,47	3.137,28	1.468,81	1.093,39

Tabela 4-19 – Resumo da Tabela 4-18

Esp. (mm)	Largura da Chapa (mm)	LE	LR	Num. Col. Paraf.	Num. Paraf.	Diâm. do Furo	Diâm. do Paraf.	Espaço Centro a borda	Espaço Centro a Centro	Com Pescoço? (S / N)	Mínimo
0,80	1.000	345	430	2	19,00	9,00	8,00	19,00	32,00	N	132,48
0,95	1.000	345	430	2	19,00	9,00	8,00	19,00	32,00	N	157,32
1,25	1.000	345	430	2	19,00	9,00	8,00	19,00	32,00	N	207,01
1,55	1.000	345	430	2	19,00	11,00	10,00	19,00	32,00	N	262,22
1,95	1.000	345	430	2	19,00	11,00	10,00	19,00	32,00	N	329,89
2,30	1.000	345	430	2	19,00	11,00	10,00	19,00	32,00	N	389,10
2,70	1.000	345	430	3	19,00	11,00	10,00	19,00	32,00	N	510,23
3,00	1.000	345	430	3	19,00	11,00	10,00	19,00	32,00	N	566,92
3,90	1.000	345	430	3	19,00	14,00	12,00	19,00	32,00	N	710,70
4,60	1.000	345	430	3	19,00	14,00	12,00	19,00	32,00	N	838,26
5,40	1.000	345	430	3	19,00	14,00	12,00	19,00	32,00	N	984,05
6,00	1.000	345	430	3	19,00	14,00	12,00	19,00	32,00	N	1.093,39

Comparando a carga admissível conforme dissertação (Tabela 3-19) e a encontrada tomando como base a configuração do fabricante (Tabela 3-21), podemos ver que existe uma boa possibilidade de ganho de resistência modificando o projeto da chapa. Este ganho se situa entre 9,56 e 25,90%. A Tabela 4-20 sintetiza estes resultados.

Tabela 4-20 – Chapas laterais da dissertação x Chapa do principal fabricante de silos no Brasil

Esp. (mm)	Largura da Chapa (mm)	LE	LR	Carga Admissível		%
				Dissertação	Fabricante	
0,80	1.000,00	345,00	430,00	166,79	132,48	25,90%
0,95	1.000,00	345,00	430,00	198,06	157,32	25,90%
1,25	1.000,00	345,00	430,00	260,61	207,01	25,90%
1,55	1.000,00	345,00	430,00	320,92	262,22	22,39%
1,95	1.000,00	345,00	430,00	403,74	329,89	22,39%
2,30	1.000,00	345,00	430,00	476,20	389,10	22,39%
2,70	1.000,00	345,00	430,00	559,02	510,23	9,56%
3,00	1.000,00	345,00	430,00	621,13	566,92	9,56%
2x1,95	1.000,00	345,00	430,00	792,09	710,70	11,45%
2x2,30	1.000,00	345,00	430,00	934,25	838,26	11,45%
2x2,70	1.000,00	345,00	430,00	1.096,73	984,05	11,45%
2x3,00	1.000,00	345,00	430,00	1.218,59	1.093,39	11,45%

4.7.3 Aplicação do procedimento para cálculo das Chapas Laterais

Para ilustrar, se aplicou o procedimento para o silo do item 3.3.3.7. Para a determinação da chapa lateral a ser utilizada, considera-se a pior pressão horizontal de carregamento ou descarregamento, conforme Tabela 3-4, e calcula-se o esforço de tração que existirá em cada anel. Compara-se esta carga com aquela encontrada na Tabela 4-16 para a escolha da espessura da chapa a ser utilizada.

O esforço de tração em cada chapa, multiplicado pelo coeficiente de segurança para as cargas, será dado por:

$$T_{ch} = \frac{P_{he} \cdot h_{ch} \cdot D}{2} \cdot \gamma_q \quad (\text{Eq. 4-57})$$

sendo $\gamma_q = 1,4$, h_{ch} a altura útil da chapa lateral do silo e D o diâmetro do silo.

As espessuras a serem utilizadas neste silo estão apresentadas na Tabela 4-21, na qual a coluna “chapa” apresenta as informações de espessura, material, número de colunas de furos (4), número de furos em uma coluna (10), diâmetro do furo (9, 11 ou 14mm), diâmetro do parafuso (8, 10 e 12mm) e material do parafuso (8.8); z é a profundidade analisada e P_{he} é a pressão horizontal quando do esvaziamento do silo (pressão crítica para esta análise por ser maior que a pressão horizontal quando do carregamento do silo).

Tabela 4-21 – Chapas Laterais do silo do exemplo do item 3.3.3.7

Anel	$z(m)$	P_{he}	T_{ch}	Chapa
1	2,31	18,41	159,25	#1,25-ZAR345-4L10F-9mm-P-8mm-8.8
2	3,23	24,59	212,72	#1,25-ZAR345-4L10F-9mm-P-8mm-8.8
3	4,14	30,24	261,53	#1,55-ZAR345-4L10F-11mm-P-10mm-8.8
4	5,06	35,39	306,10	#1,95-ZAR345-4L10F-11mm-P-10mm-8.8
5	5,97	40,09	346,78	#1,95-ZAR345-4L10F-11mm-P-10mm-8.8
6	6,89	44,39	383,93	#2,3-ZAR345-4L10F-11mm-P-10mm-8.8
7	7,80	48,31	417,84	#2,3-ZAR345-4L10F-11mm-P-10mm-8.8
8	8,72	51,89	448,81	#2,7-ZAR345-4L10F-11mm-P-10mm-8.8
9	9,63	55,15	477,08	#2,7-ZAR345-4L10F-11mm-P-10mm-8.8
10	10,54	58,14	502,88	#2,7-ZAR345-4L10F-11mm-P-10mm-8.8
11	11,46	60,86	526,45	#3-ZAR345-4L10F-11mm-P-10mm-8.8
12	12,37	63,35	547,96	#3-ZAR345-4L10F-11mm-P-10mm-8.8
13	13,29	65,62	567,60	#3-ZAR345-4L10F-11mm-P-10mm-8.8
14	14,20	67,69	585,53	#3,9-ZAR345-4L10F-14mm-P-12mm-8.8
15	15,12	69,59	601,90	#3,9-ZAR345-4L10F-14mm-P-12mm-8.8
16	16,03	71,31	616,85	#3,9-ZAR345-4L10F-14mm-P-12mm-8.8
17	16,95	72,89	630,49	#3,9-ZAR345-4L10F-14mm-P-12mm-8.8
18	17,86	74,33	642,95	#3,9-ZAR345-4L10F-14mm-P-12mm-8.8
19	18,77	75,65	654,32	#3,9-ZAR345-4L10F-14mm-P-12mm-8.8
20	19,69	76,85	664,71	#3,9-ZAR345-4L10F-14mm-P-12mm-8.8
21	20,60	77,94	674,19	#3,9-ZAR345-4L10F-14mm-P-12mm-8.8
22	21,52	78,94	682,84	#3,9-ZAR345-4L10F-14mm-P-12mm-8.8

4.7.4 Cálculo dos Montantes do Silo do Item 3.3.3.7

O silo do exemplo do item 3.3.3.7 é constituído de 16 chapas laterais montados na circunferência e 22 chapas na altura. São 32 montantes pois se admitiu que cada chapa lateral teria 2 montantes.

Conforme 3.1.1, o peso próprio de telhados com diâmetro acima de 14,50m pode ser assumido como sendo de $0,35kN/m^2 \cdot (14,55^2 \cdot \pi / 4) = 58,22kN$. Considera-se que a estrutura do telhado deste silo está apoiada em 16 montantes. Então, a carga por montante será de $58,22/16=3,64kN$.

Pelo item 3.2.2, a carga no centro do telhado será de 2kN por chapa lateral. Neste silo, a carga admissível no centro do telhado será de $2 \cdot 16 = 32kN$. Como foi considerado acima que a estrutura do telhado deste silo está apoiada em 16 montantes, a carga admissível no centro do silo por montante será de 2kN.

Para o cálculo das reações dos cabos de termometria, considera-se as fórmulas do item 3.2.1 onde:

$$L_1 = \frac{D}{2 \cdot \tan(a_2) \cdot \tan^2(45^\circ - \frac{a_1}{D})} = \frac{14,55}{2 \cdot \tan(22,5^\circ) \cdot \tan^2(45^\circ - \frac{30^\circ}{14,55})} = 244,68m$$

$$L = 22 \cdot 0,9144 + 14,55 / 2 \cdot \tan(30^\circ) / 3 = 22,92m$$

$$L = 22,92m \leq L_1 = 244,68m$$

$$T = 1,4 \cdot d \cdot \gamma \cdot \tan(a_3) \cdot \left(0,84 \cdot L^2 \cdot \tan^2(45^\circ - \frac{a_1}{2}) + 0,27 \cdot \frac{D \cdot L}{\tan(a_2)} \right)$$

$$T = 1,4 \cdot 0,028 \cdot \tan(11^\circ) \cdot \left(0,84 \cdot 22,92^2 \cdot \tan^2(45^\circ - \frac{30^\circ}{2}) + 0,27 \cdot \frac{14,55 \cdot 22,92}{\tan(22,5^\circ)} \right) = 10,845kN$$

Nestes silos, a quantidade de cabos de termometria adotada é de 1 cabo no centro do silo e 4 cabos distribuídos ao redor do silo. Como considerado anteriormente, a estrutura do silo está apoiada em 16 montantes.

A carga nos montantes para os cabos de termometria é considerada como sendo:

$$T \cdot (1 + 4) / 16 = 3,39kN$$

Considerando-se a (Eq. 3-4) para o cálculo da força devida aos cabos de termometria, substituindo as equações (Eq. 3-25), (Eq. 3-26) e (Eq. 3-27) tem-se:

$$Z_0 = \frac{A}{K_s \cdot \mu \cdot U} = \frac{14,55^2 \cdot \pi / 4}{0,7 \cdot 0,5 \cdot \pi \cdot 14,55} = 10,39$$

$$T = d \cdot \pi \cdot \tan(a_3) \int_0^L P_h \cdot dl = d \cdot \pi \cdot \tan(a_3) \int_0^L \frac{\gamma \cdot A}{\mu \cdot U} \cdot C_z(z) \cdot dl = \frac{d \cdot \pi \cdot \tan(a_3) \cdot \gamma \cdot A}{\mu \cdot U} \int_0^L C_z(z) \cdot dl =$$

$$\frac{d \cdot \pi \cdot \tan(a_3) \cdot \gamma \cdot A}{\mu \cdot U} \int_0^L C_z(z) \cdot dl = \frac{d \cdot \pi \cdot \tan(a_3) \cdot \gamma \cdot A}{\mu \cdot U} \int_0^L 1 - e^{(-z/z_0)} \cdot dl =$$

$$\frac{0,02 \cdot \pi \cdot \tan(11^\circ) \cdot 8 \cdot 14,55^2 \cdot \pi / 4}{0,5 \cdot \pi \cdot 14,55} \int_0^{21,52} 1 - e^{(-z/10,39)} \cdot dl = 0,7108 \cdot 12,46 = 8,859 \text{ kN}$$

Este resultado é um pouco menor do que aquele encontrado pela norma IRAM 8 015 (1977) que se utilizará a favor da segurança.

Para o peso próprio do corpo do silo, como indicado em 3.1.2, calcula-se do primeiro anel ao último, considerando que todas as chapas laterais foram calculadas previamente para suportarem as cargas devidas a pressão horizontal do grão. Antes de calcular as cargas nos montantes para o anel posterior, o montante do anel anterior já está determinado. Para o peso próprio do montante do anel em análise, considera-se um peso igual ao da chapa lateral naquele anel.

$$(PS/Cl)_i = P_{chl,i} \cdot 2 + (PS/Cl)_{i-1} - P_{chl,i-1} / 2 + P_{mont,i-1} \quad (\text{Eq. 4-58})$$

onde, $(PS/Cl)_i$ é o peso do corpo do silo do anel 1 até o anel i dividido pelo número de montantes, $P_{chl,i}$ é o peso da chapa lateral no anel i, e $P_{mont,i}$ é o peso do montante no anel i. O número 2 está considerando que os pesos dos montantes e chapas laterais no anel em análise são iguais. Na Tabela 4-22 está apresentado parte da planilha eletrônica que apresenta o cálculo do peso próprio do silo considerando a (Eq. 4-58).

A força de compressão devida ao vento nos montantes está apresentada na Tabela 4-23 e segue o formulário apresentado em 3.4.1. Já a carga devida ao atrito do grão com a parede é a maior entre as cargas que ocorrem no carregamento ou descarregamento do silo, conforme Tabela 3-4, dividido pelo número de montantes.

Quando considera-se todas as cargas atuantes, o que supõem silo cheio, deve-se notar que não é necessário calcular o montante considerando flambagem global pois a chapa lateral e a carga devida ao grão armazenado impedem este efeito.

Tabela 4-22 – Cálculo do Peso Próprio do silo por montante para o exemplo do item 3.3.3.7

Anel	Peso Chapa Lateral (kN)	Peso Montante (kN)	Peso do silo por coluna PS/CI (kN)
1	0,2977	0,0359	0,60
2	0,2977	0,0359	1,08
3	0,3692	0,0359	1,70
4	0,4645	0,0359	2,48
5	0,4645	0,0359	3,22
6	0,5478	0,0475	4,12
7	0,5478	0,0475	4,98
8	0,6431	0,0673	6,04
9	0,6431	0,0673	7,08
10	0,6431	0,0673	8,11
11	0,7146	0,0673	9,28
12	0,7146	0,0852	10,42
13	0,7146	0,0852	11,58
14	0,9289	0,1130	13,17
15	0,9289	0,1130	14,67
16	0,9289	0,1435	16,18
17	0,9289	0,1435	17,72
18	0,9289	0,1435	19,25
19	0,9289	0,1435	20,79
20	0,9289	0,1435	22,33
21	0,9289	0,1435	23,86
22	0,9289	0,1704	25,40

Na Tabela 4-23 apresentam-se as diversas cargas que compõem a carga de compressão do montante. Comparando com a Tabela 4-14, escolher-se-á aquele montante que possua capacidade de suportar o esforço de compressão calculado, considerando $\phi_q=1,4$.

Tabela 4-23 – Planilha Eletrônica com as cargas para o cálculo dos montante para o exemplo do item 3.3.3.7

Anel	Telh (kN)	Cat (kN)	Term. (kN)	PS/cl (kN)	Vento (kN)	Produto (kN)	Carga Total (kN)	$(PS / Cl)_i \cdot \gamma_q$ (kN)	Montante	Área do Montante (mm ²)
1	3,64	2,00	3,39	0,60	0,40	14,11	24,14	33,79	250x2	500
2	3,64	2,00	3,39	1,08	0,62	26,48	37,20	52,08	250x2	500
3	3,64	2,00	3,39	1,70	0,87	42,06	53,66	75,13	250x2	500
4	3,64	2,00	3,39	2,48	1,17	60,51	73,19	102,46	250x2	500
5	3,64	2,00	3,39	3,22	1,50	81,51	95,25	133,36	250x2	500
6	3,64	2,00	3,39	4,12	1,88	104,77	119,80	167,72	250x2,65	250x2,65
7	3,64	2,00	3,39	4,98	2,30	130,06	146,38	204,93	250x2,65	250x2,65
8	3,64	2,00	3,39	6,04	2,77	157,15	174,99	244,98	250x3,75	250x3,75
9	3,64	2,00	3,39	7,08	3,27	185,84	205,21	287,29	250x3,75	250x3,75
10	3,64	2,00	3,39	8,11	3,81	215,95	236,90	331,66	250x3,75	250x3,75
11	3,64	2,00	3,39	9,28	4,40	247,33	270,04	378,05	250x3,75	250x3,75
12	3,64	2,00	3,39	10,42	5,03	279,84	304,32	426,04	250x4,75	250x4,75
13	3,64	2,00	3,39	11,58	5,69	313,36	339,66	475,52	250x4,75	250x4,75
14	3,64	2,00	3,39	13,17	6,40	347,77	376,36	526,91	250x6,3	250x6,3
15	3,64	2,00	3,39	14,67	7,16	382,97	413,83	579,36	250x6,3	250x6,3
16	3,64	2,00	3,39	16,18	7,95	418,89	452,05	632,86	250x6,3	250x6,3
17	3,64	2,00	3,39	17,72	8,78	455,44	490,96	687,35	250x6,3	250x6,3
18	3,64	2,00	3,39	19,25	9,66	492,55	530,49	742,68	250x8	250x8
19	3,64	2,00	3,39	20,79	10,58	530,16	570,55	798,77	250x8	250x8
20	3,64	2,00	3,39	22,33	11,53	568,22	611,10	855,54	250x8	250x8
21	3,64	2,00	3,39	23,86	12,53	606,67	652,09	912,93	250x8	250x8
22	3,64	2,00	3,39	25,40	13,57	645,47	693,47	970,86	250x9,5	250x9,5

5 CÁLCULO DE SILO VAZIO SUBMETIDO À CARGA DE VENTO

Como citado na introdução, a carga de vento atuando em silos vazios pode ocasionar flambagem do conjunto chapa lateral e montante. Apresenta-se na seqüência as teorias de alguns autores para o cálculo da carga crítica de flambagem.

5.1 TEORIA - BUTLER

A metodologia a seguir foi apresentada pela empresa Butler Manufacturing Company (1979) e é baseada no cálculo da carga crítica de flambagem para cascas submetidas à pressão uniforme externa conforme fórmula de von Mises (Troitsky, 1982):

$$\frac{q \cdot R}{E} = \frac{t}{(1 - \nu^2)} \cdot \left[\frac{t^2}{12 \cdot R^2} \cdot \left(n^2 - 1 + \frac{2 \cdot n^2 - 1 - \nu}{1 + \frac{n^2}{\lambda^2}} \right) + \frac{1 - \nu^2}{(n^2 - 1) \left(1 + \frac{n^2}{\lambda^2} \right)^2} \right] \quad (\text{Eq. 5-1})$$

em que q é a pressão lateral crítica, R é o raio do silo, E é o Módulo de Elasticidade, ν é o coeficiente de Poisson, t é a espessura da chapa do corpo, n é o número de ondas que ocorrerão em metade do silo ao longo do perímetro e $\lambda = \pi R / l$, sendo l a altura do silo.

De acordo com a (Eq. 5-1), podem ser verificados os resultados para a pressão lateral crítica mínima e que são apresentados na Tabela 5-1 com o valor de n que minimiza a (Eq. 5-1) para o silo do item 3.3.3.7. Considera-se que a espessura do silo seja constante e igual à espessura do anel analisado e que a altura l seja considerada igual à altura da base do silo até o anel analisado.

Verifica-se que a carga crítica calculada é muito inferior à carga atuante decorrente da ação do vento (1,43kN/m² para vento com velocidade de 48m/s), considerando que o silo seja constituído de chapas lisas não onduladas e que não existam montantes ou anéis de reforço.

Tabela 5-1 – Resultados para a Pressão Lateral Crítica considerando silo chapa lisa.

Anel	t(mm)	l(mm)	n	l(mm)	q (kN/m ²)
1	0,80	20.116,80	36	1,136244	0,049703218
2	0,80	19.202,40	37	1,190351	0,051245428
3	0,80	18.288,00	38	1,249869	0,052968662
4	0,80	17.373,60	38	1,315651	0,054798548
5	0,95	16.459,20	37	1,388743	0,084853724
6	0,95	15.544,80	37	1,470434	0,088201492
7	1,25	14.630,40	35	1,562336	0,174203818
8	1,25	13.716,00	36	1,666492	0,181960988
9	1,25	12.801,60	36	1,785527	0,190622235
10	1,25	11.887,20	37	1,922875	0,200276414
11	1,55	10.972,80	36	2,083115	0,349155104
12	1,55	10.058,40	37	2,272489	0,370135951
13	1,55	9.144,00	38	2,499738	0,394568666
14	1,55	8.229,60	39	2,777486	0,423659979
15	1,55	7.315,20	41	3,124672	0,458561719
16	1,55	6.400,80	43	3,571054	0,50188633
17	1,55	5.486,40	45	4,166229	0,556986277
18	1,55	4.572,00	48	4,999475	0,630487523
19	1,55	3.657,60	51	6,249344	0,734349516
20	1,55	2.743,20	56	8,332458	0,895400787
21	1,55	1.828,80	64	12,49869	1,189670891
22	1,55	914,40	80	24,99738	1,975148071

Conforme Butler (1979), verificou-se que a fórmula de von Mises pode ser simplificada. Além disso, os efeitos do corrugado da chapa do corpo (Figura 5.1), da distribuição e área dos montantes, distribuição e inércia dos anéis de reforço foram acrescentados resultando na (Eq. 5-2), sendo A_x definido pela (Eq. 5-3), sendo que o termo do lado direito, que era originalmente $t^3/[6.(1-\nu^2).(d/2)^2]$ foi substituído pela (Eq. 7-16).

$$\frac{q.R}{E} = \frac{I_{zt} \cdot (n^2 - 1)}{R^2} + \frac{A_x \cdot \lambda^4}{n^4 \cdot (n^2 - 1)} \quad (\text{Eq. 5-2})$$

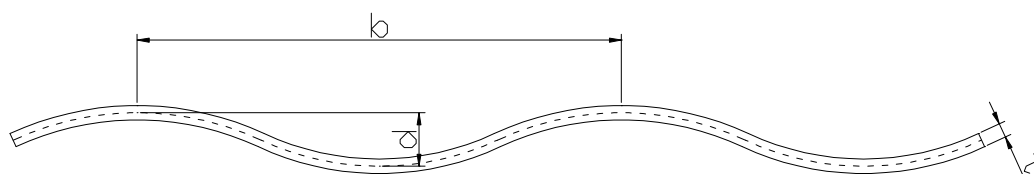


Figura 5.1 – Seção transversal de uma chapa lateral de silo

na qual,

$$A_x = \frac{t}{\{1 + [(d/2)^2/t^2] \cdot 6 \cdot (1 - \nu^2) \cdot (l^2/(b/2)^2 - [l/(\pi b)] \cdot \text{sen}(4 \cdot \pi \cdot l/b))\}} + \frac{A_s}{S_s} \quad (\text{Eq. 5-3})$$

$$I_z = (d^2 \cdot t/8) \cdot [1 + \pi^2 \cdot d^2/(8 \cdot b^2)] \quad (\text{Eq. 5-4})$$

$$I_{zT} = I_z + \frac{I_R \cdot N_R}{l} \quad (\text{Eq. 5-5})$$

em que A_x é a espessura equivalente levando em consideração o corrugado da chapa e a distribuição dos montantes, I_z é a inércia da chapa corrugada, I_{zT} é a inércia do conjunto chapa corrugada e anéis de reforço, I_R é a inércia do anel de reforço, N_R é o número de anéis de reforço, A_s é a área do montante e S_s é o espaçamento entre montantes.

Para obter-se a pressão lateral crítica deve-se derivar a (Eq. 5-2) em função de n e igualar a expressão a zero para obter-se o menor valor de q . Este procedimento resulta na (Eq. 5-6) que pode ser utilizada para determinar o valor de n através de procedimento numérico.

$$n = \sqrt[10]{\frac{4 \cdot A \cdot n^8 - 2 \cdot A \cdot n^6 + 6 \cdot B \cdot n^2 - 4 \cdot B}{2 \cdot A}} \quad (\text{Eq. 5-6})$$

definindo:

$$A = \frac{I_{zT}}{R^2} \quad (\text{Eq. 5-7})$$

$$B = A_x \cdot \lambda^4 \quad (\text{Eq. 5-8})$$

O valor da carga crítica q deverá ser maior que a pressão devida ao vento. Um silo econômico terá um número de anéis de reforço reduzido. Desta forma, calcula-se inicialmente a carga crítica sem anéis de reforço ($N_R = 0$) e compara-se com a carga de vento e procede-se ao aumento de N_R até que a resistência seja suficiente para absorver a carga de vento.

5.1.1 Distribuição dos Anéis de Reforço

Não há um procedimento normalizado para determinação da distribuição dos anéis de reforço. O autor, baseado na sua experiência profissional, adota o seguinte procedimento:

1. Considera-se o silo totalmente montado, e o cálculo inicia da base do silo para o telhado tendo como passo de cálculo a altura útil da chapa lateral (anel). Adota-se inicialmente que o número de anéis de reforço necessário para suportar as cargas de vento é zero ($N_R=0$).

2. Toma-se a primeira chapa lateral considerando-se esta com espessura constante (Anel de chapa lateral da base). Calcula-se n pela (Eq. 5-6) e q pela (Eq. 5-2).
3. Compara-se a carga q com a carga de vento. Caso q seja maior ou igual que a carga de vento, não é necessário anel de reforço. Caso contrário, faz-se $N_R=N_R+1$ e retorna-se ao passo 2.
4. Incrementa-se o número de chapas laterais (próximo anel), considerando-se a espessura constante. Adota-se o menor valor de espessura entre as espessuras dos anéis da etapa em análise. Retorna-se a etapa 2 com $N_R=0$.

A localização dos anéis de reforço é determinada de acordo com a etapa onde se verificou sua necessidade. Por exemplo, caso $N_R=2$ no anel 3 significa que o anel de reforço deve ser posicionado no centro da chapa lateral 3 conforme ilustrado na Figura 5.2. Por outro lado, se no anel 2 forem necessários 3 anéis de reforço, como um anel já está posicionado no anel 3 e outro no anel 5, adiciona-se apenas um anel no centro da chapa lateral 2.

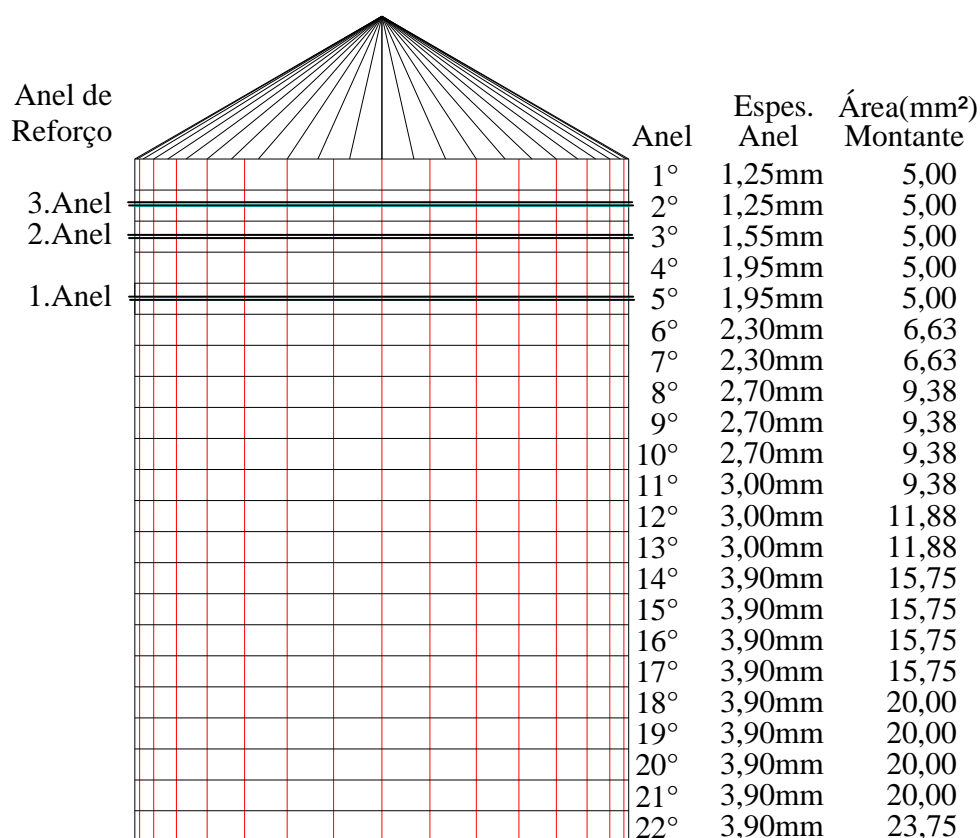


Figura 5.2 – Silo D14,55 com localização de anéis de reforço.

Este procedimento foi automatizado numa planilha de cálculo que está apresentada na Tabela 5-2. As cargas q são comparadas com a carga de vento, no caso deste exemplo, para

uma velocidade de 48 m/s, que resulta em 1,43 kN/m². Nota-se, examinando a coluna da carga q , que até o anel 6 não são necessários anéis de reforço. Nos anéis de 1 a 5 foram necessários anéis de reforço para garantir que a carga crítica de flambagem fosse superior à carga de vento.

Tabela 5-2 – Quantidade e posição dos anéis de reforço, conforme planilha eletrônica, para o silo do item 3.3.3.7

Anel	Espessura Ch Lateral t(mm)	Área Montante (cm ²)	n	q (kN/m ²)	Qtd de Anéis	Posição dos anéis
1	1,25	5,00	5,90286	1,59	3	
2	1,25	5,00	6,01563	1,71	3	X
3	1,55	5,00	6,30879	1,61	2	X
4	1,95	5,00	6,67381	1,49	1	
5	1,95	5,00	6,83773	1,60	1	X
6	2,30	6,63	7,61232	1,43	0	
7	2,30	6,63	7,84526	1,52	0	
8	2,70	9,38	8,31135	2,00	0	
9	2,70	9,38	8,60167	2,14	0	
10	2,70	9,38	8,92492	2,31	0	
11	3,00	9,38	9,22936	2,74	0	
12	3,00	11,88	9,87416	3,15	0	
13	3,00	11,88	10,35448	3,46	0	
14	3,90	15,75	11,07850	5,14	0	
15	3,90	15,75	11,74874	5,79	0	
16	3,90	15,75	12,55802	6,61	0	
17	3,90	15,75	13,56216	7,72	0	
18	3,90	20,00	15,20344	9,72	0	
19	3,90	20,00	16,99550	12,16	0	
20	3,90	20,00	19,62188	16,22	0	
21	3,90	20,00	24,02832	24,34	0	
22	3,90	23,75	34,57428	50,46	0	

5.2 TEORIA DE BECKER - GERARD

Becker & Gerard (1962), citados por Ansourian (1985), apresentam fórmula para o cálculo da carga crítica de flambagem considerando que o coeficiente de Poisson é nulo. Assim a carga crítica de flambagem é dada por:

$$P_c = \frac{E \cdot I_\theta}{R^3} \cdot \left(\frac{\pi \cdot R}{l} \right)^2 \cdot \left[\left(\frac{m \cdot l}{\pi \cdot R} \right)^2 \cdot \frac{I_z}{I_\theta} + \frac{I_{\theta z}}{2 \cdot I_\theta} + \left(\frac{\pi \cdot R}{m \cdot l} \right)^2 \right] + \dots \dots \dots$$

$$\dots \dots \dots + \frac{E}{r/t_\theta} \cdot \left(\frac{L}{\pi \cdot R} \right)^2 \cdot \frac{(\pi \cdot R / (m \cdot l))^4}{\left[\left(\frac{m \cdot l}{\pi \cdot R} \right)^2 \cdot \frac{t_\theta}{t_z} + 2 \cdot \frac{t_\theta}{t_{\theta z}} + \left(\frac{\pi \cdot R}{m \cdot l} \right)^2 \right]} \quad (\text{Eq. 5-9})$$

na qual R , l e t estão especificados no item 5.1, P_C é a pressão radial uniforme de flambagem e as demais variáveis estão especificadas na equações (Eq. 5-10) a (Eq. 5-15) conforme Esteves Jr. (1989).

$$t_{\theta} = 2.t^3 / (3.d^2) \text{ :espessura equivalente do cilindro no sentido longitudinal,} \quad (\text{Eq. 5-10})$$

inclusive colunas.

$$t_z = t.[1 + \pi^2 .d^2 / (4.b^2)] \text{ :espessura equivalente do cilindro no sentido} \quad (\text{Eq. 5-11})$$

circunferencial, inclusive anéis de reforço

$$t_{\theta z} = t / [1 + \pi^2 .d^2 / (4.b^2)] \text{ :espessura equivalente do cilindro para efeito de} \quad (\text{Eq. 5-12})$$

cisalhamento.

$$I_z = (d^2 .t / 8).[1 + \pi^2 .d^2 / (8.b^2)] \text{ :momento de inércia equivalente para flexão} \quad (\text{Eq. 5-13})$$

no sentido circunferencial, inclusive o momento de inércia dos anéis uniformemente distribuídos.

$$I_{\theta} = (t^3 / 12) / [1 + \pi^2 .d^2 / (4.b^2)] \text{ :momento de inércia equivalente para flexão} \quad (\text{Eq. 5-14})$$

no sentido longitudinal, inclusive o momento de inércia dos montantes uniformemente distribuídos.

$$I_{\theta z} = (t^3 / 3).[1 + \pi^2 .d^2 / (4.b^2)] \text{ :momento de inércia a torção da parede do silo,} \quad (\text{Eq. 5-15})$$

inclusive colunas e anéis.

na qual m é o número de meia ondas na flambagem para silos ortotrópicos submetidos à ação do vento e $E_{\theta} = E_z = 2G_{\theta z} = 205000 \text{MPa}$. Deve-se minimizar o valor de m para obter o valor de P_C que deverá ser maior que o valor da pressão devida ao vento na parede do silo.

5.3 TEORIA DE ANSOURIAN

De acordo com Ansourian (1985), uma solução mais geral para a obtenção da carga crítica de flambagem, não restrita a $v = 0$ e baseada na equação de Donnell, é dada pela (Eq. 5-16).

$$P_C = \frac{1}{a.n^2} \left(a_{33} + \frac{2.a_{12}.a_{23}.a_{13} - a_{22}.a_{13}^2 - a_{11}.a_{23}^2}{(a_{11}.a_{22} - a_{12}^2)} \right) \quad (\text{Eq. 5-16})$$

onde n é o número de ondas devidas a flambagem e,

$$a_{11} = C_{11} \cdot \left(\frac{\pi \cdot a}{L} \right)^2 + C_{33} \cdot n^2 \quad (\text{Eq. 5-17})$$

$$a_{12} = -n \cdot \left(\frac{\pi \cdot a}{L} \right) \cdot (C_{12} + C_{33}) \quad (\text{Eq. 5-18})$$

$$a_{13} = \frac{C_{14}}{a} \cdot \left(\frac{\pi \cdot a}{L} \right)^3 + C_{12} \cdot \left(\frac{\pi \cdot a}{L} \right) \quad (\text{Eq. 5-19})$$

$$a_{22} = C_{33} \cdot \left(\frac{\pi \cdot a}{L} \right)^2 + n^2 \cdot C_{22} \quad (\text{Eq. 5-20})$$

$$a_{23} = -n \cdot C_{22} - C_{25} \cdot \left(\frac{\pi}{L} \right)^3 \quad (\text{Eq. 5-21})$$

$$a_{33} = \frac{C_{44}}{a^2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot a}{L} \right)^4 + 2 \cdot (C_{45} + C_{66}) \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{L} \right)^2 + \frac{n^4 \cdot C_{55}}{a^2} + C_{22} + 2 \cdot n^2 \cdot C_{25} \quad (\text{Eq. 5-22})$$

nas (Eq. 5-23) a (Eq. 5-34), os termos C_{ij} representam parâmetros de rigidez. Considerando que os anéis de reforço, montantes e chapas laterais sejam feitos de mesmo material, estes coeficientes são dados por:

$C_{11} = C + \frac{E \cdot A_s}{d_s}$	(Eq. 5-23)
$C_{12} = \nu \cdot C$	(Eq. 5-24)
$C_{14} = e_s \cdot \left(\frac{E \cdot A_s}{d_s} \right)$	(Eq. 5-25)
$C_{25} = -e_r \cdot \left(\frac{E \cdot A_r}{d_r} \right)$	(Eq. 5-26)
$C_{45} = \nu \cdot D$	(Eq. 5-27)
$C = \frac{E \cdot h}{1 - \nu^2}$	(Eq. 5-28)
$C_{22} = C + \frac{E \cdot A_r}{d_r}$	(Eq. 5-29)

$C_{33} = \left(\frac{1-\nu}{2} \right) \cdot C$	(Eq. 5-30)
$C_{44} = D + \left(\frac{E \cdot I_s}{d_s} \right)$	(Eq. 5-31)
$C_{55} = D + \left(\frac{E \cdot I_r}{d_r} \right)$	(Eq. 5-32)
$C_{66} = (1-\nu) \cdot D + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{G \cdot J_s}{d_s} + \frac{G \cdot J_r}{d_r} \right)$	(Eq. 5-33)
$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1-\nu^2)}$	(Eq. 5-34)

onde, I_s, I_r são momentos de inércia dos montantes e anel de reforço respectivamente, relativo ao centro da parede do silo, d_s, d_r são as distâncias entre centros de montantes e centros de anéis de reforço, respectivamente, e_s, e_r são distâncias entre centros de montantes e centros de anéis de reforço, respectivamente, até o centro da chapa do corpo do silo conforme Figura 5.3, h é a espessura da chapa, A_s é a área da seção transversal dos anéis de reforço, A_r é a área da seção transversal dos montantes, a é o raio do cilindro, L é a altura do cilindro, E é o módulo de elasticidade do material, G é o módulo de elasticidade transversal, J_s e J_r momentos de torção.

Obtém-se a pressão crítica minimizando P_c com respeito à n .

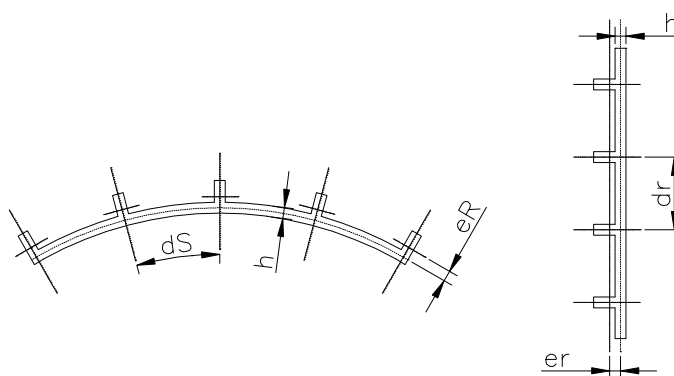


Figura 5.3 – Detalhamento da parede de silos enrijecidos.

6 ALGORITMO PARA CÁLCULO DE SILOS

A seqüência do trabalho apresentado até aqui, seguiu a metodologia de cálculo adotada para o dimensionamento de um silo. Todos os exemplos apresentados correspondem a um único modelo de silo.

O projeto de um silo metálico para armazenagem de grãos não é feito para um único diâmetro e altura. Os fabricantes sempre pensam em toda a linha de diâmetros e alturas que serão necessárias para atender as diferentes exigências de seus clientes. Para isso, os mesmos optam em padronizar alguns tipos de chapas laterais e montantes, buscando obter a maior carga admissível para cada tipo de peça, seja ela submetida à tração (chapas laterais-4.7.3) ou compressão (montantes-4.4.5).

Com base em peças pré-definidas, cada silo que formará o *portfolio* de silos da empresa tem suas cargas atuantes determinadas e as combinações destas levam a escolha de uma daquelas peças pré-definidas, que será economicamente a mais adequada para suportar tal combinação.

Para a determinação da linha de silos que se está projetando, o importante é:

1. Determinar o comprimento útil da chapa lateral do silo, pois os diâmetros que formarão a linha de silos surgem da combinação de diferentes quantidades destas chapas na circunferência.
2. Determinar a altura útil da chapa lateral do silo, que será função da largura da bobina ou chapa que se compre no mercado, além do tipo de ondulação utilizado. A linha de silos a ser oferecida ao mercado conterà alturas múltiplas da altura útil padronizada escolhida.
3. Determinar os perfis de montantes que serão combinados para formar a linha de silos, buscando verificar qual será a largura da bobina ou chapa que serão adquiridas pela empresa que fabricará os silos e adotando como *blanks* dos montantes, um valor cujo múltiplo seja igual à largura do *blank*. Isso é feito

para que todo o material adquirido seja utilizado e, conseqüentemente, não haja perda.

4. Escolhe-se o material a ser utilizado para a fabricação das chapas laterais e montantes em função da força admissível que estes elementos deverão suportar e o custo.
5. Da mesma forma, escolhe-se o material e dimensões dos parafusos utilizados para a ligação entre chapas laterais, ligação entre montantes, e ligação entre chapas laterais e montantes, em função da força admissível em cada parafuso e do custo dos mesmos, função da quantidade de parafusos necessários multiplicado pelo preço de cada um, objetivando sempre minimizá-la.
6. Busca-se então, interagir projeto e cálculo de chapas laterais e montantes com o preço de suas matérias primas para obter a melhor relação custo benefício.
7. De posse da padronização das chapas laterais e montantes, se calculará o silo propriamente dito, determinando as cargas atuantes e escolhendo-se, entre os elementos padronizados, aquele que melhor atenda às exigências, sempre buscando minimizar o custo e atender aos coeficientes de segurança adotados.

Para o cálculo de cada silo da linha pré-estabelecida, segue-se o seguinte procedimento:

A) Determinam-se as cargas atuantes na estrutura, quais sejam.

- Peso Próprio (conforme item 3.1)
- Acessórios (conforme item 3.2)
- Cargas devidas aos cabos de termometria (conforme item 3.2.1)
- Cargas no centro do telhado tais como: espalhadores de grãos, cargas devidas a passarelas, roscas mescladoras (conforme item 3.2.2)
- Cargas nos montantes devido a passarelas (conforme item 3.2.3)
- Cargas devidas aos grãos armazenados (conforme item 3.3.3)
- Cargas devidas ao vento (conforme item 3.4)

B) Aplicam-se as combinações de ações que agirão em cada peça do silo (conforme item 4.2.3).

C) Para as chapas laterais do corpo do silo, elegem-se aquelas que suportarão a combinação de cargas (conforme item 4.7.3).

D) Para os montantes do silo, combinam-se as cargas que atuarão em cada peça e elege-se aquele montante que melhor atenda as exigências (conforme item 4.7.4).

E) Faz-se a verificação do silo ao vento, quando o mesmo estiver vazio e tendo sido previamente selecionadas as chapas laterais e montantes, com posicionamento de anéis de reforço circunferencial, quando necessários (conforme item 5.1).

Para automatizar este processo de cálculo, foram programadas planilhas para a determinação das pressões devidas aos grãos armazenados nos silos (Tabela 3-4), determinação da força máxima de compressão admissível para cada montante que faz parte da linha de produto de um determinado fabricante (Tabela 4-8 a Tabela 4-14), determinação das forças de tração máxima admissíveis para as chapas laterais (Tabela 4-16 e Tabela 3-19), escolha da chapa lateral padrão que melhor suporta as cargas devidas aos grãos armazenados (Tabela 4-21), escolha do montante que melhor suporta as combinações de ações (Tabela 3-25) e determinação da carga crítica de flambagem em silos vazios submetidos a carga de vento e posicionamento de anéis de reforço quando necessário (Tabela 5-2).

A programação em planilhas é preferível ao desenvolvimento de um programa dedicado por ser mais simples e atender perfeitamente a todas as necessidades do problema. Além disso, os resultados intermediários são tabelados, facilitando a análise do processo de cálculo com um todo.

7 ANÁLISE DE SILOS VAZIOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O uso do método dos elementos finitos para realizar a análise completa de um silo e a partir dos resultados obtidos dimensionar cada um dos seus elementos estruturais é justificável? O procedimento de projeto ganha em confiabilidade empregando uma ferramenta mais moderna? As respostas a estas perguntas, se refeitas para outros tipos de problemas, nem sempre são simples. No caso da análise de um silo, há consenso que não se justifica desenvolver o projeto completo deste empregando-se o método dos elementos finitos. Nota-se que os resultados obtidos não são úteis para o dimensionamento da chapa do silo, mesmo empregando-se malhas mais refinadas. Isso ocorre devido ao comportamento das ligações aparafusadas, que empregam grande concentração de parafusos. A Figura 7.1 ilustra estas ligações.



Figura 7.1 – Detalhe das ligações parafusadas.

No entanto, o uso do método justifica-se como ferramenta auxiliar. Por exemplo, como alternativa ao uso de um túnel de vento, pode-se empregar o método dos elementos finitos para simular a interação vento-estrutura e construir ábacos que possam ser aplicados

em projeto. Pode-se também modelar o silo com elementos de casca e analisar a necessidade do uso de anéis de reforço, a quantidade destes e a sua distribuição. Pode-se também empregar o método dos elementos finitos para auxiliar no dimensionamento das passarelas.

7.1 O MODELO NUMÉRICO DA CHAPA CORRUGADA

O principal objetivo de analisar um silo pelo método dos elementos finitos é empregar esta ferramenta para obter melhores resultados para analisar o efeito da carga de vento quando comparado com o uso de fórmulas simplificadas que estão baseadas na solução de von Mises (1914) do problema de flambagem de cascas cilíndricas circulares submetidas à carga de pressão lateral uniforme e nas Equações de Donnell (BRUSH&ALMROTH, 1975). Estas soluções aplicam-se para cascas cilíndricas circulares e infinitas, ou seja, não levam em conta as condições de contorno reais do corpo cilíndrico do silo.

Os silos metálicos empregam chapas corrugadas, logo é fundamental considerar o efeito do corrugado na rigidez da chapa. As alternativas existentes para tal são modelar a estrutura junto com o corrugado e analisar o problema considerando o material ortotrópico. Modelar o silo considerando o corrugado da chapa leva ao uso de malhas refinadas e não se obtém maiores vantagens dessa solução a não ser, a priori, por uma melhor representação da rigidez do silo. Vale destacar que, mesmo com o modelo mais detalhado, o estado de tensões não é representado de modo adequado, já que o problema é dependente de fatores práticos, tais como detalhes das ligações parafusadas. Considerar o material ortotrópico é a solução mais econômica e empregada por vários pesquisadores (BRIASSOULIS, 1985). Neste estudo, consideram-se ambas as alternativas, sendo que destas apenas a última necessita de um maior desenvolvimento teórico.

7.1.1 Teoria de Placa

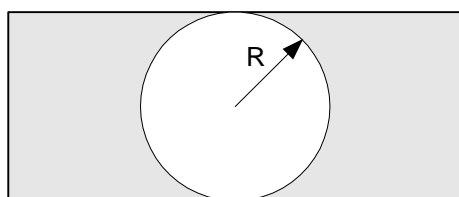
Há diversos textos sobre teoria de placas sendo uma referência clássica o escrito por Timoshenko (1959) e que serve como base para o resumo apresentado a seguir.

7.1.1.1 Teoria de Kirchoff

A teoria de Kirchoff pode ser aplicada a placas finas ou médias (ver Figura 7.2) e está baseada nas seguintes hipóteses:

- A espessura da placa é constante e pequena em relação às outras duas dimensões;

- O material da placa é elástico, obedece à lei de Hooke, e é homogêneo e contínuo, podendo ser isótropo ou ortótropo;



Placa fina ou média se:

$$R/t \geq 10$$

Figura 7.2 – Definição de placa fina ou média. (GROEHS, 2002).

- As deflexões da placa são pequenas, não causando alteração na geometria da mesma;
- A superfície média da placa é inicialmente plana e não sofre deformações específicas na flexão;
- Planos normais à superfície média, antes da flexão, permanecem planos após a flexão;
- As componentes de tensão transversais à superfície média da placa são pequenas e podem ser negligenciadas;
- Somente são consideradas cargas transversais à placa.

Segundo GROEHS (2002): “Para que essa teoria seja válida, o máximo deslocamento obtido no plano médio da placa na direção perpendicular ao mesmo não deve ultrapassar metade da espessura da placa. Caso isso não ocorra surgirão tensões de membrana que serão maiores do que as tensões de flexão obtidas a partir da equação geral das placas”.

Baseado nestas hipóteses a equação que governa o problema de flexão de placas finas/médias é dada por:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3} p(x, y) \quad (\text{Eq. 7-1})$$

onde: w é o deslocamento no plano médio da placa, na direção perpendicular ao mesmo; t é a espessura da placa; E é o módulo de elasticidade longitudinal; ν é o coeficiente de Poisson e $p(x, y)$ é a carga aplicada perpendicular ao plano médio da placa GROEHS (2002).

7.1.1.2 Teoria de Placa Ortorrópica

Considerando-se as hipóteses anteriores e levando em conta que o material da placa é ortorrópico, tem-se que a equação que governa o comportamento da placa é

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = p(x, y) \quad (\text{Eq. 7-2})$$

com

$$D_{11} = \frac{E_x t^3}{12(1 - \nu_{xy} \nu_{yx})} \quad (\text{Eq. 7-3})$$

$$D_{22} = \frac{E_y t^3}{12(1 - \nu_{xy} \nu_{yx})} \quad (\text{Eq. 7-4})$$

$$D_{12} = \frac{\nu_{yx} E_x t^3}{12(1 - \nu_{xy} \nu_{yx})} = \frac{\nu_{xy} E_y t^3}{12(1 - \nu_{xy} \nu_{yx})} \quad (\text{Eq. 7-5})$$

$$D_{66} = \frac{G t^3}{12} \quad (\text{Eq. 7-6})$$

representando os coeficientes de rigidez de flexão da placa ortotrópica. O termo $D_{12} + 2D_{66}$ é chamado de rigidez torcional total. Sendo E_x , E_y , G , ν_{xy} e ν_{yx} as constantes do material ortotrópico.

7.1.2 Modelando a chapa corrugada como material ortotrópico

Segundo LUO et.al. (1992), a aplicação da teoria de placas ortotrópicas para analisar lajes nervuradas foi proposta e desenvolvida por HUBER (1921). A idéia básica proposta para estimar o deslocamento por flexão na laje enrijecida é substituir essa laje por uma placa ortotrópica equivalente, com espessura constante, que apresente a mesma característica de rigidez. Essa mesma idéia pode ser aplicada em placas enrijecidas mais complexas desde que as seguintes condições sejam satisfeitas:

- As razões entre o comprimento periódico do corrugado e das dimensões da placa são suficientemente pequenas para garantir uma aproximação homogênea da rigidez;
- Os coeficientes de rigidez são uniformemente distribuídos nas duas direções;
- Os coeficientes de rigidez de flexão e torção não dependem das condições de contorno da placa ou da distribuição da carga;

A substituição de uma placa corrugada por uma placa equivalente com as mesmas características de rigidez é chamada de método da equivalência elástica.

No caso dos silos, a chapa corrugada é representada por uma casca ortotrópica equivalente com espessura uniforme (BRIASSOULIS, 1986). Essa é normalmente a abordagem usada em problemas que envolvam análise deste tipo de estrutura (FLORES & GODOY, 1999). Nesses casos, a determinação da matriz de elasticidade ortotrópica é crítica. Os principais procedimentos empregados para a determinação da rigidez de chapas corrugadas são ensaios experimentais, procedimentos analíticos aproximados e análise por elementos finitos.

É importante destacar que a representação da rigidez do silo por esse modelo macroscópico não é comprometida pelos detalhes das ligações parafusadas. Os parafusos empregados são de alta resistência e as ligações apresentam um número significativo de parafusos, logo, em princípio, não são verificados problemas de falha prematura das ligações (BRIASSOULIS, 1986).

Para se desenvolver o estudo da equivalência entre uma chapa corrugada e uma casca ortotrópica com espessura uniforme toma-se um pequeno elemento de chapa corrugada desprezando a curvatura desse elemento em função da estrutura do silo, ou seja, considera-se que o raio de curvatura do silo é muito maior que o raio de curvatura do corrugado, logo estados de deformações constantes podem ser aplicados ao elemento (BRIASSOULIS, 1986). As propriedades elásticas ortotrópicas equivalentes, que são empregadas nas relações constitutivas entre as tensões ortotrópicas equivalentes (nominais) e as deformações, correspondem a valores médios das propriedades da chapa corrugada. O termo médio significa que efeitos locais não são considerados, apenas as tensões globais resultantes do estado de deformação podem ser determinadas. A figura (6.3) ilustra esse procedimento.

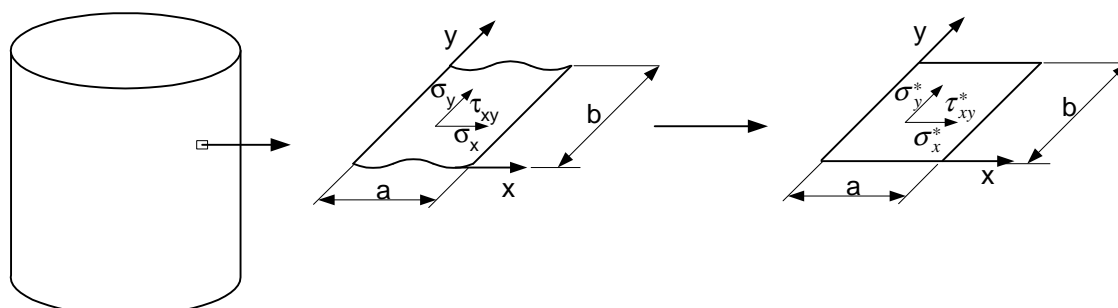


Figura 7.3 – Representação de um elemento representativo da chapa corrugada por uma casca ortotrópica equivalente.

As tensões marcadas com (*) representam as tensões nominais.

7.1.2.1 Determinação Analítica dos Coeficientes de Rigidez

As expressões analíticas dos coeficientes de rigidez ortotrópicas equivalentes a uma chapa corrugada, que são apresentadas na literatura, são obtidas na maioria dos casos aplicando-se métodos energéticos. A energia de deformação devido ao estado assumido de tensões que atuam na placa corrugada é determinada para um estado de deformações constantes dado, a partir da qual os coeficientes de rigidez são obtidos considerando uma chapa corrugada padrão com módulo de elasticidade longitudinal E , coeficiente de Poisson ν , espessura t , metade da altura da onda do corrugado f , comprimento da meia onda do corrugado l e comprimento projetado c . Portanto, a relação entre as tensões nominais e as deformações, para o caso das tensões no plano da casca ortotrópica, é dada por:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x^* \\ \sigma_y^* \\ \tau_{xy}^* \end{pmatrix} = \frac{1}{1-\nu_1\nu_2} \begin{pmatrix} E_x & E_\nu & 0 \\ E_\nu & E_y & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu_1\nu_2)E_{xy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x^* \\ \epsilon_y^* \\ \epsilon_{xy}^* \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 7-7})$$

em que E_x , E_y , E_ν e E_{xy} são as propriedades elásticas da placa ortotrópica equivalente e ν_1 e ν_2 são os coeficientes de Poisson nas direções x e y .

Os coeficientes de rigidez de membrana, coerentes com a Figura 7.3, são obtidos pelas expressões (Eq. 7-8) a (Eq. 7-11) aproximando-se o corrugado por uma função seno.

$$D_x = E_x t = \frac{Et}{6(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{f} \right)^2 \quad (\text{Eq. 7-8})$$

$$D_\nu = E_\nu t = \nu D_x \quad (\text{Eq. 7-9})$$

$$D_y = E_y t = Et \frac{l}{c} \quad (\text{Eq. 7-10})$$

$$D_{xy} = E_{xy} t = \rho \frac{Et}{2(1+\nu)} \frac{c}{l} \quad (\text{Eq. 7-11})$$

É importante notar que $E_\nu = \nu_1 E_y = \nu_2 E_x$ e $\nu_2 = \nu$, o que leva a $\nu_1 = \nu_2 E_x / E_y$, sendo estas considerações adotadas normalmente por vários autores. O fator ρ é um redutor da rigidez de corte. Este fator é função da deformação da chapa e do escorregamento nos parafusos. Segundo (BRIASSOULIS, 1986), adota-se $\rho = 1$ para silos devido ao uso de parafusos de alta resistência em arranjos densos, de modo a obter uma continuidade completa nas juntas.

Os coeficientes de rigidez de flexão são obtidos pelas equações (Eq. 7-12) a (Eq. 7-15)

$$B_x = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \frac{c}{l} \quad (\text{Eq. 7-12})$$

$$B_\nu = 0 \quad (\text{Eq. 7-13})$$

$$B_y = 0,522Et f^2 \quad (\text{Eq. 7-14})$$

$$B_{xy} = \frac{Et^3}{12(1+\nu)} \frac{l}{c} \quad (\text{Eq. 7-15})$$

que podem ser encontradas em TIMOSHENKO (1959). Notar que o fator 0,522 resulta de uma aproximação do cálculo do momento de inércia da chapa corrugada.

7.1.2.2 Determinação dos Coeficientes de Rigidez por Simulação

Esse estudo foi desenvolvido por (BRIASSOULIS, 1986), que simulou uma parte representativa da placa corrugada com elementos de casca Lagrangianos. As expressões de rigidez correspondentes de uma placa ortotrópica equivalente foram obtidas aplicando estados de deformação nominal constante e calculando as tensões resultantes. Esses valores foram comparados com os apresentados no item (7.1.1.2) e expressões que melhor representam os resultados obtidos nas simulações foram obtidas usando o segundo Teorema de Castiliano. As (Eq. 7-16) e (Eq. 7-17) representam os resultados obtidos para os coeficientes de rigidez de membrana.

$$D_x = \frac{Et}{\left[1 + \left(\frac{f}{t} \right)^2 6(1-\nu^2) \left(\frac{l^2}{c^2} - \frac{l}{2\pi c} \text{sen} \frac{2\pi l}{c} \right) \right]} \quad (\text{Eq. 7-16})$$

$$D_{xy} = \frac{Et}{2(1+\nu)} \quad (\text{Eq. 7-17})$$

É importante notar que as expressões (Eq. 7-9) e (Eq. 7-10) aproximam bem os resultados das simulações (BRIASSOULIS, 1986). Já a expressão (Eq. 7-17) é válida em regiões afastadas dos conectores, ou quando a continuidade das ligações é satisfatória, que é o caso dos silos.

As expressões (Eq. 7-18) a (Eq. 7-20) representam os resultados obtidos para os coeficientes de rigidez de flexão.

$$B_v = \nu B_x \quad (\text{Eq. 7-18})$$

$$B_y = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} + \frac{Etf^2}{2} \quad (\text{Eq. 7-19})$$

$$B_{xy} = \frac{Et^3}{12(1+\nu)} \quad (\text{Eq. 7-20})$$

É importante notar que a expressão (Eq. 7-12) fornece resultados de acordo com as simulações.

7.1.2.3 O Elemento Shell 181

Como não é objetivo deste trabalho o desenvolvimento de um programa de elementos finitos para analisar silos submetidos à carga de vento e tão pouco o desenvolvimento de um elemento de casca que considere o efeito do corrugado da chapa, optou-se pelo uso de um *software* comercial, mais especificamente o sistema Ansys. Neste sistema, escolheu-se modelar a chapa do silo com o elemento de casca ortotrópica *shell181*.

O *shell181* pode ser usado na análise de estruturas de casca fina até moderadamente espessa. Trata-se de um elemento de 4 nós com 6 graus de liberdade por nó (3 translações e 3 rotações). Esse elemento pode ser empregado em análises lineares e em problemas com grandes rotações e/ou grandes deformações. Este elemento está baseado na Teoria de Reissner-Mindlin e trabalha com esquema de integração completa e integração reduzida, tendo capacidade de modelar cascas compósitas laminadas. Para tratar a rotação Rz (grau de liberdade independente com relação à normal a superfície da casca) é empregado o método da Penalidade (BATHE, 1996), sendo que o valor da rigidez de penalidade adotado é escolhido de modo automático ou pode ser fornecido pelo usuário. O elemento trabalha com integração reduzida uniforme ou com integração completa empregando modos incompatíveis de deformação. O padrão é empregar a integração reduzida por uma questão de performance em problemas não lineares. Com o uso da integração reduzida é necessário o controle dos modos espúrios de energia (*hourglass*), que acarretam algumas limitações no uso do elemento. A malha deve ser mais refinada e em algumas aplicações é necessário o uso de mais de um elemento ao longo da espessura da placa. Este elemento emprega os modos incompatíveis (modos de deformação extra obtidos através do uso de funções bolha) para obter um melhor comportamento em problemas nos quais a flexão é dominante. Com essa opção é obrigatório o uso da integração completa. Nesse modo o elemento não apresenta mecanismos de energia

espúria, e obtêm-se bons resultados mesmo com malhas menos refinadas. (Fonte: Manual *online* do Ansys).

O *shell181* permite o uso de um processo de pré-integração da seção transversal da casca desde que o material tenha um comportamento elástico linear. Empregando esse procedimento não é realizada integração numérica ao longo da espessura do elemento. O comportamento deste é comandado pela relação tensão generalizada – deformação generalizada, conforme (Eq. 7-21) e (Eq. 7-22).

$$\begin{pmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C} & \mathbf{B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \\ \boldsymbol{\kappa} \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 7-21})$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{E}(\boldsymbol{\gamma}) \quad (\text{Eq. 7-22})$$

nas quais $\mathbf{N} = (\sigma_{xx}; \sigma_{yy}; \sigma_{xy})$ são as tensões de membrana por unidade de comprimento; $\mathbf{M} = (M_{xx}; M_{yy}; M_{xy})$ são os esforços de flexão por unidade de comprimento; $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_{xx}; \varepsilon_{yy}; \varepsilon_{xy})$ são as deformações de membrana, $\boldsymbol{\kappa} = (\kappa_{xx}; \kappa_{yy}; \kappa_{xy})$ são as curvaturas; $\mathbf{S} = (S_1; S_2)$ são as forças de corte por unidade de comprimento; $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_1; \gamma_2)$ são as deformações de corte transversais; \mathbf{D} , \mathbf{B} , \mathbf{C} e \mathbf{E} são as matrizes de rigidez da seção transversal da casca correspondente aos comportamentos de membrana, flexão, acoplamento membrana–flexão e corte, respectivamente. As matrizes \mathbf{D} , \mathbf{B} , \mathbf{C} são do tipo $\mathbf{D} = D_{ij}$, $\mathbf{B} = B_{ij}$ e $\mathbf{C} = C_{ij}$, nas quais $i, j = 1, 2, 3$. A matriz \mathbf{E} é do tipo $\mathbf{E} = E_{ij}$ em que $i, j = 1, 2$. Todas essas matrizes são simétricas. Logo, para se empregar esse tipo de elemento devem ser fornecidos todos os valores necessários para definir as matrizes \mathbf{D} , \mathbf{B} , \mathbf{C} e \mathbf{E} . Esses valores devem ser determinados à parte para cada conjunto de elementos que tenham as mesmas características. Para o correto preenchimento destas matrizes, é importante destacar que o corrugado é orientado de acordo com o sistema local de referência, o qual tem o eixo x_L definido pela primeira conectividade do elemento, a menos que um sistema local distinto seja definido pelo usuário.

Para que o recurso da pré-integração esteja disponível devem ser satisfeitas as seguintes condições:

- A espessura do elemento é considerada constante mesmo em análises com grandes deformações;

- Os componentes de rigidez pré-integrados devem definir uma matriz de rigidez do tipo positiva definida.

7.2 TESTE DO ELEMENTO DE CASCA

Como o elemento *shell181* não é convencional, efetuam-se alguns testes com o objetivo de avaliar quais os coeficientes de rigidez são adequados para a chapa corrugada. Para tanto, efetuaram-se algumas análises de exemplos básicos com objetivo de ganhar conhecimento sobre o funcionamento das ferramentas adotadas.

7.2.1 Exemplo 1

Considera-se uma placa quadrada, com dois lados engastados e dois lados livres, submetida a uma carga centrada de $0,001 \text{ N/mm}^2$, conforme ilustrado na Figura 7.4. A placa é feita de chapa de aço corrugada com espessura constante $t = 2,6 \text{ mm}$, $E = 2,1 \times 10^5 \text{ MPa}$ e $\nu = 0,3$. A geometria e orientação do corrugado estão definidas na Figura 7.4.

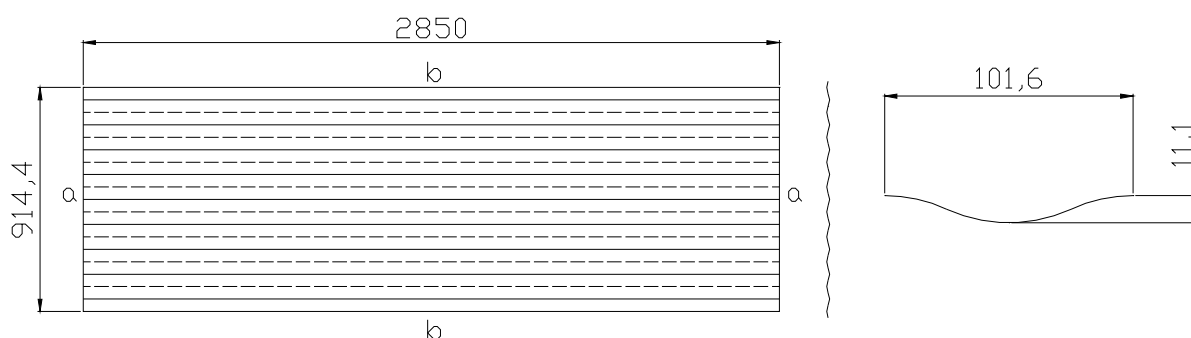


Figura 7.4 – Dados do exemplo 1.

7.2.1.1 Placa Lisa Isotrópica

Como primeiro passo, analisa-se o problema sem levar em conta o corrugamento da chapa. A placa é modelada com 1.008 elementos do tipo *shell63* (elemento de casca de 4 nós com 6 graus de liberdade por nó). Cabe destacar que, considerando-se que essa abordagem é correta, a placa pode ser classificada como fina (relação $R/t = 351$). A Figura 7.5 ilustra os deslocamentos ortogonais à placa [mm] obtidos com o sistema Ansys. Verifica-se que o valor máximo de deformação foi -545 mm quando a placa foi considerada engastada ao longo das arestas a , e de -6 mm quando engastada ao longo da aresta b .

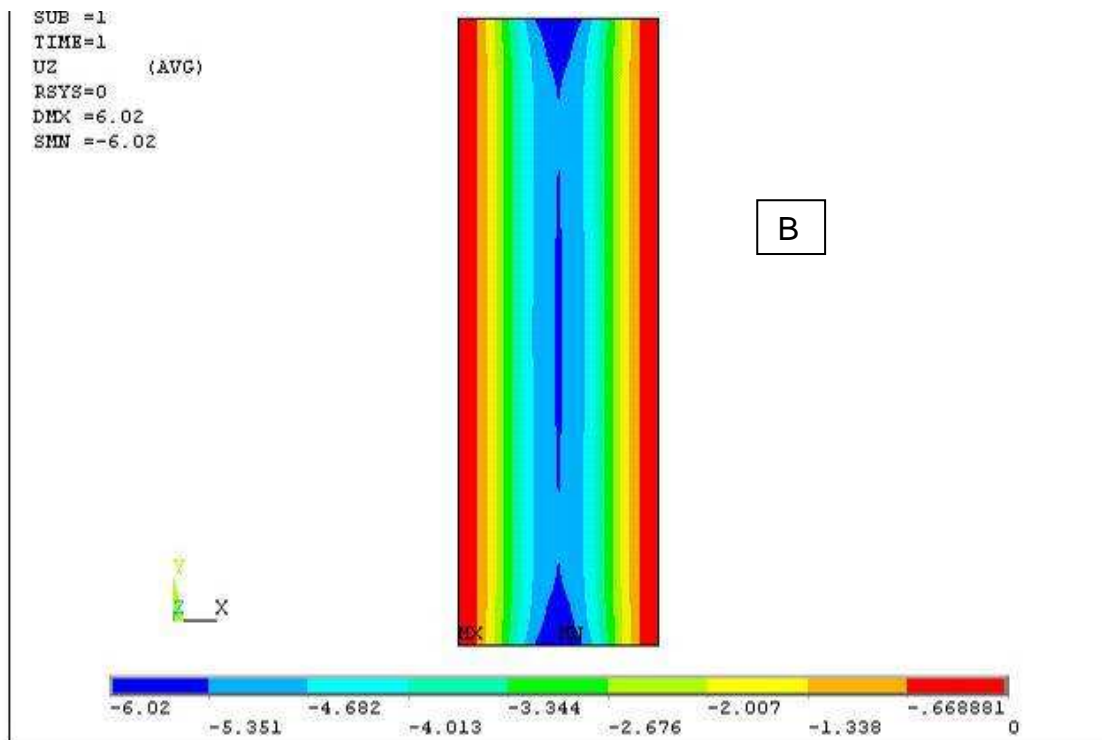
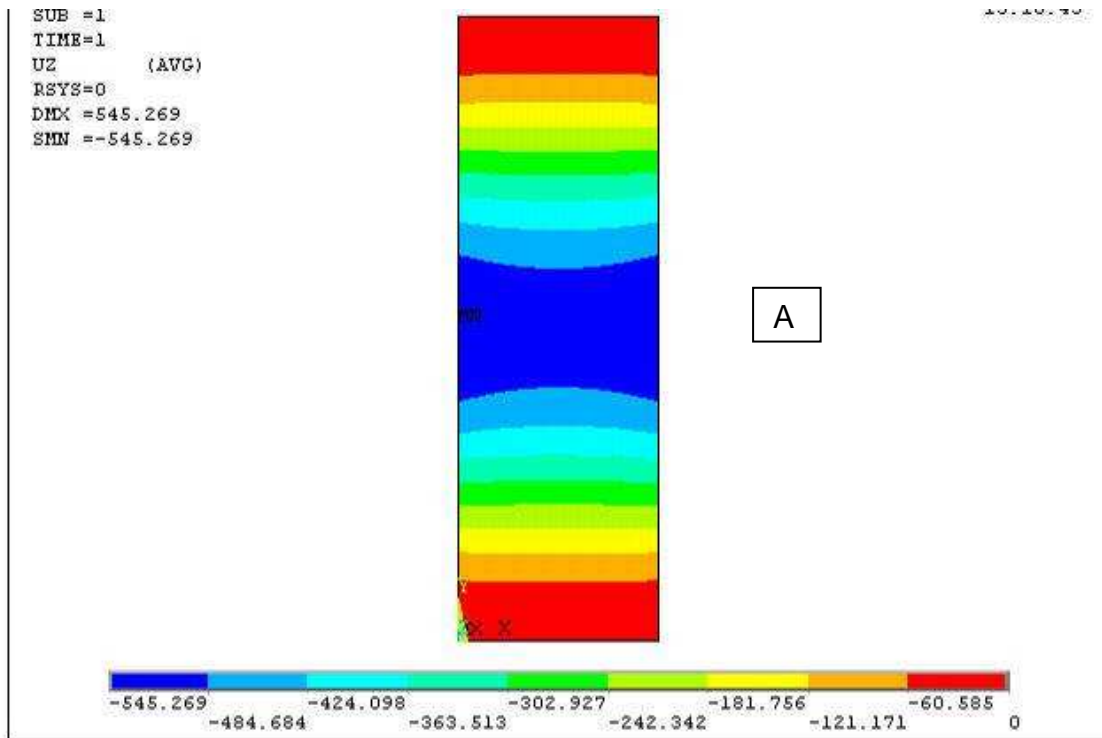


Figura 7.5 – Distribuição de deslocamentos [mm] ortogonais à placa lisa isotrópica. Fig.A corresponde aos lados a engastados e Fig. B corresponde aos lados b engastados.

7.2.1.2 Placa Isotrópica com Corrugado Simplificado

Neste modelo, o corrugado é representado de modo simplificado por segmentos de reta. A Figura 7.6 ilustra a geometria simplificada do corrugado e a malha de elementos casca. Foram usados 1.008 elementos do tipo *shell63*. A disposição da ondulação está apresentada na Figura 7.4. A Figura 7.7 ilustra os deslocamentos ortogonais ao plano xz , que nesse modelo corresponde à direção y . Observa-se que o deslocamento máximo atingido vale $-29,04$ mm quando a placa esta engastada ao longo das arestas a e $-6,02$ mm quando a placa esta engastada ao longo das arestas b . No caso em que os lados a se encontram engastados tem-se uma redução do deslocamento máximo de 95% em relação à análise de placa plana, resultado coerente com a prática. Já no caso em que os lados b estão engastados não há um ganho de rigidez. Em contraponto, na prática, observa-se um pequeno ganho de rigidez também neste caso.

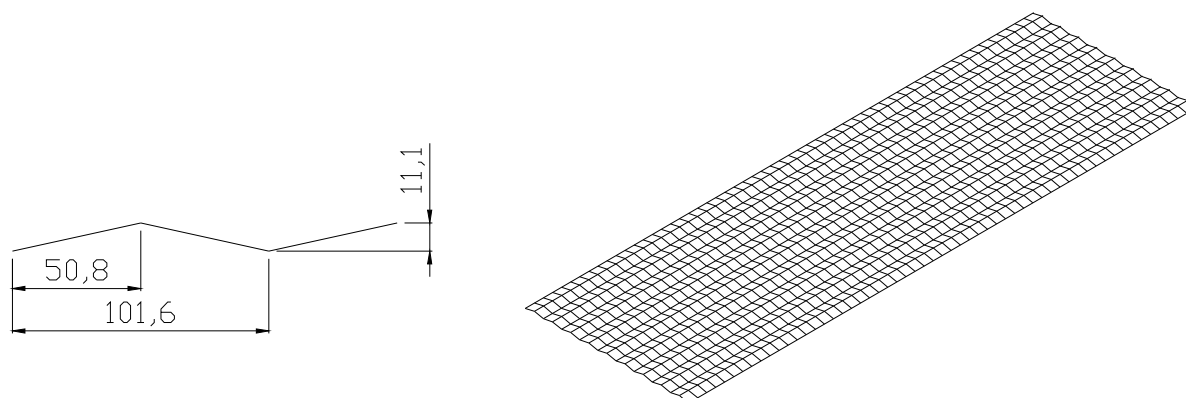


Figura 7.6 – Geometria simplificada do corrugado.

De acordo com o esperado, a consideração da chapa corrugada tornou a estrutura mais rígida com relação à flexão.

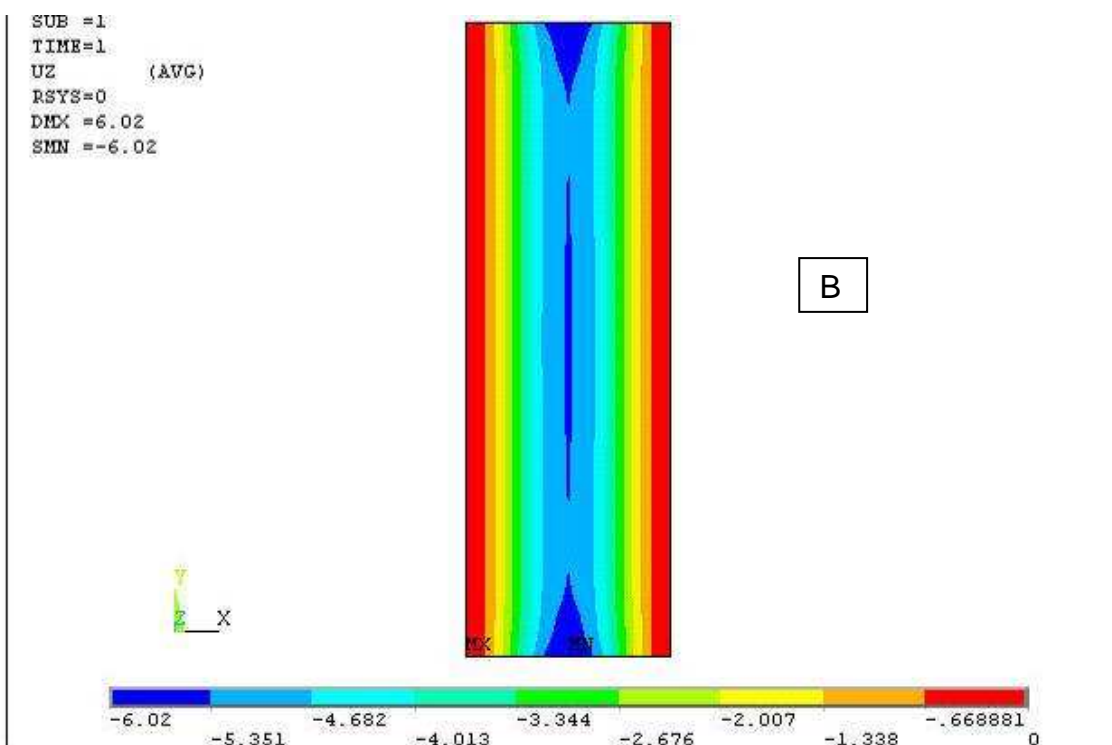
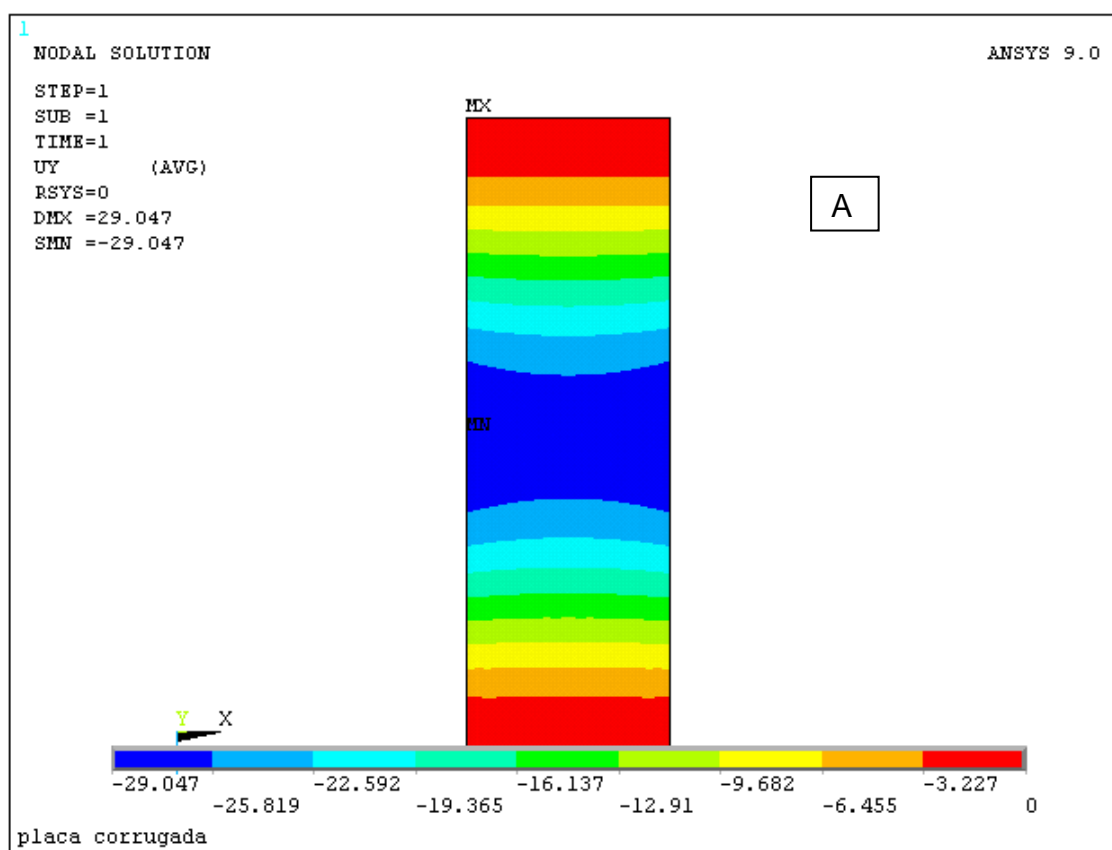


Figura 7.7 – Distribuição de deslocamentos [mm] na direção y para placa isotrópica com corrugado simplificado. Fig.A corresponde aos lados *a* engastados e Fig. B corresponde aos lados *b* engastados.

7.2.1.3 Placa Isotrópica com Corrugado Detalhado

Neste modelo, o corrugado é representado de modo exato com o objetivo de verificar a influência da geometria deste na rigidez da placa. Para esse modelo empregou-se o elemento *shell93*. Trata-se de um elemento de casca de 8 nós, que emprega funções quadráticas, tendo condições de modelar cascas curvas. Para se ter uma representação visual mais realística, deve-se usar a opção *power graphics* e o número de segmentos de reta por face de elemento deve ser superior a 1. Como o objetivo é fazer uma boa descrição da geometria do corrugado, cada onda foi modelada por 4 elementos (resultando em um total de 1.800 elementos para este exemplo). A geometria da onda foi construída pela composição de 4 arcos de circunferência definidos na Figura 7.8, que também ilustra a malha empregada. A Figura 7.9 ilustra a distribuição dos deslocamentos na direção *y*.

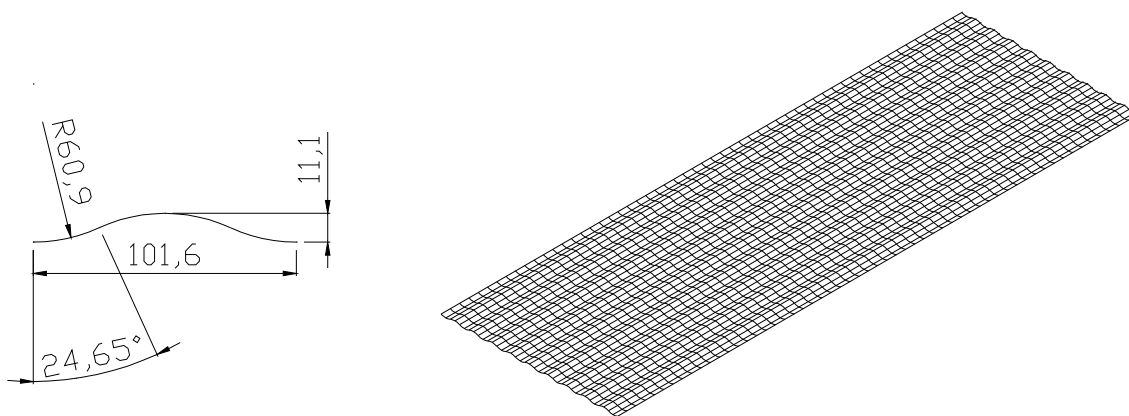


Figura 7.8 – Geometria detalhada do corrugado.

Para esta simulação, o deslocamento máximo obtido para a placa foi de 18,24 mm quando a placa está engastada nas arestas *a*, e de 5,9 mm quando a mesma se encontrava engastada nas arestas *b*. Observa-se que não há diferenças significativas na distribuição dos deslocamentos. Quando se engasta os lados *a* tem-se uma redução da flecha de 37%. Apesar do corrugado simplificado apresentar praticamente o mesmo comprimento da linha que descreve a onda, tem-se uma diferença significativa de momento de inércia. Quando se engasta o lado *b* nota-se um pequeno ganho na rigidez da placa quando se comparam os resultados com os obtidos para a placa lisa isotrópica. Esse resultado é coerente com o que se verifica na prática. Nota-se que a representação mais detalhada do corrugado altera de modo significativo a rigidez da placa devendo esse modelo ser comparado contra a solução com placa lisa ortotrópica.

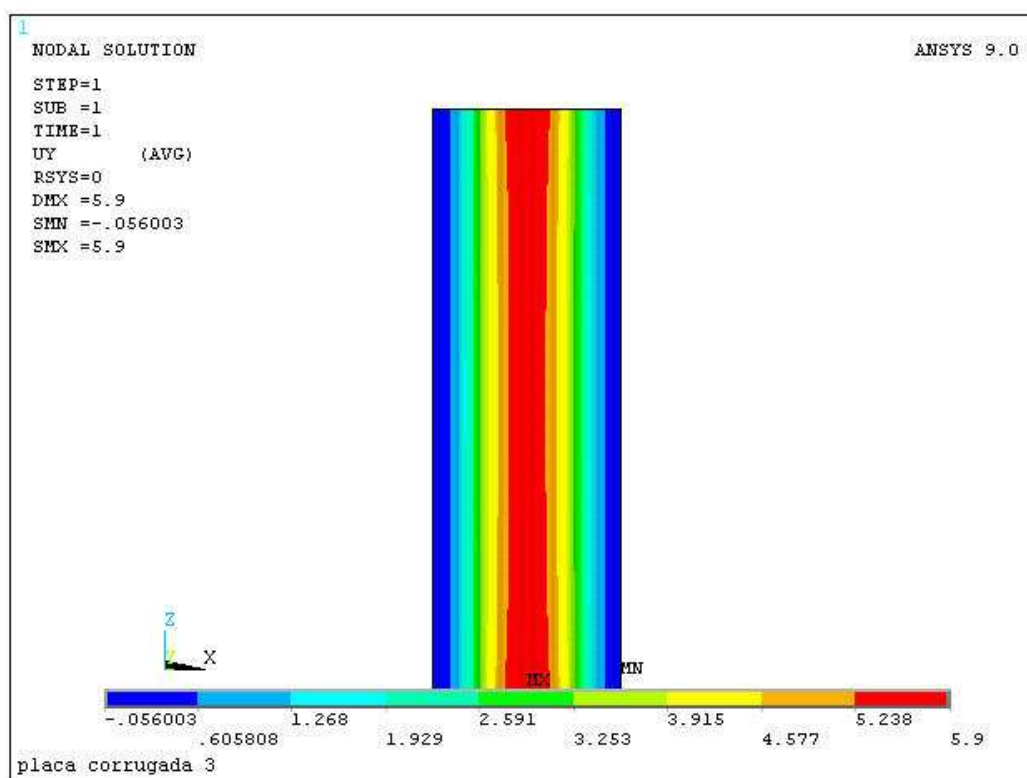
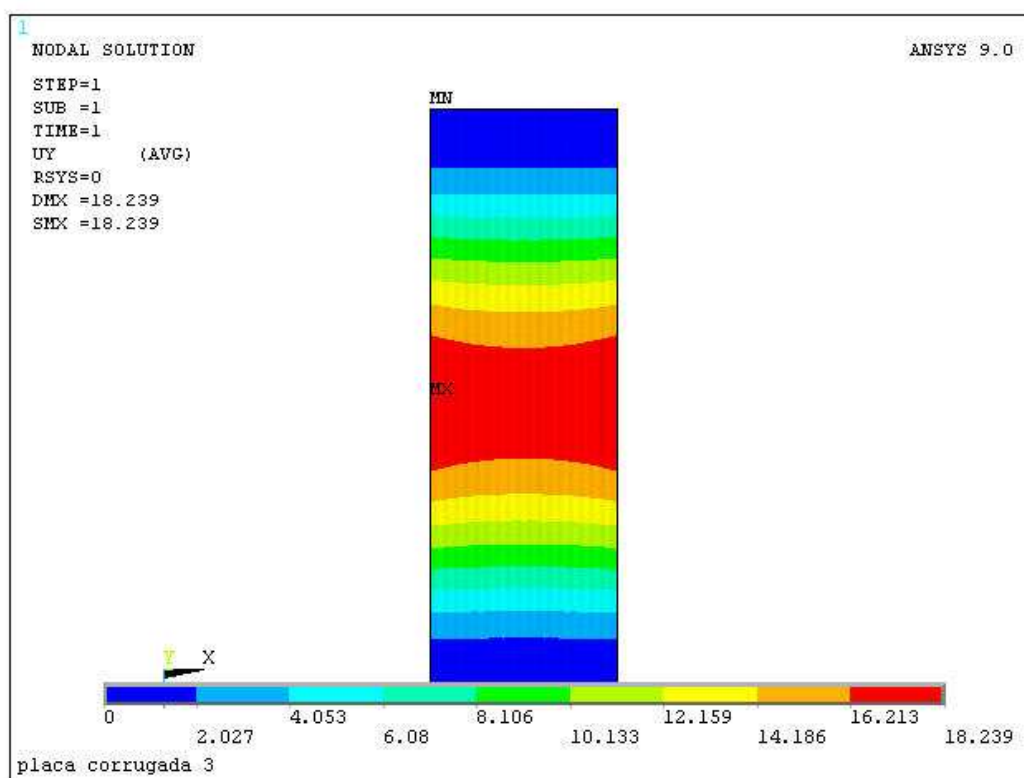


Figura 7.9 – Distribuição de deslocamentos [mm] na direção y para placa isotrópica com corrugado detalhado. Fig.A corresponde aos lados a engastados e Fig. B corresponde aos lados b engastados.

7.2.1.4 Placa Ortotrópica Lisa

Neste caso, a placa foi modelada com 1.008 elementos do tipo *shell181*. Os coeficientes de rigidez foram calculados conforme BRIASSOULIS (1986). Os dados básicos para o cálculo dos coeficientes de rigidez, além das constantes do material, são: $c = 50,8$ mm, $l = 52,71$ mm, $f = 5,55$ mm. A Figura 7.10 ilustra o sistema de coordenadas globais e o sistema de coordenadas local de todos os elementos, que em conjunto com a Figura 7.3, permite calcular os coeficientes de rigidez corretamente.

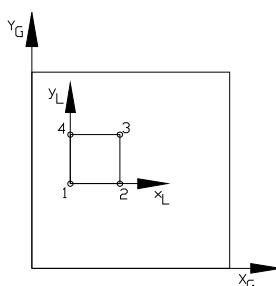


Figura 7.10 – Sistemas de referência global e local.

Adotando-se o procedimento indicado obtém-se:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 20355,4 & 6106,619 & 0 \\ 6106,619 & 566528,7 & 0 \\ 0 & 0 & 210000 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 325752,2 & 97725,67 & 0 \\ 97725,67 & 8747083 & 0 \\ 0 & 0 & 236600 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 175000 & 0 \\ 0 & 175000 \end{pmatrix}$$

É importante destacar que não há expressões propostas para determinar os coeficientes da matriz de rigidez correspondente ao corte. A não ser que estejam disponíveis melhores informações, recomenda-se considerar

$$E_{11} = E_{22} = \frac{5}{6}Gt \quad \text{e} \quad E_{12} = E_{21} = 0 \quad (\text{Eq. 7-23})$$

Os elementos foram selecionados com a opção de integração completa. A Figura 7.11 ilustra a distribuição do deslocamento na placa. Quando se engasta o lado a o deslocamento máximo obtido é de 20,049 mm, que corresponde a uma diferença de 9,9% quando se compara com o resultado obtido pelo modelo com o corrugado detalhado. Quando se engasta o lado b o deslocamento máximo obtido é de 5,67mm, que corresponde a uma diferença de 3,9% quando se compara com o resultado obtido pelo modelo com o corrugado detalhado. De modo geral, tratam-se de diferenças aceitáveis tendo em vista o ganho em termos de tempo de processamento e interpretação dos resultados. Nota-se que o elemento é menos rígido no eixo

de maior rigidez e mais rígido no eixo de menor rigidez, se comparado com o modelo com o corrugado completo.

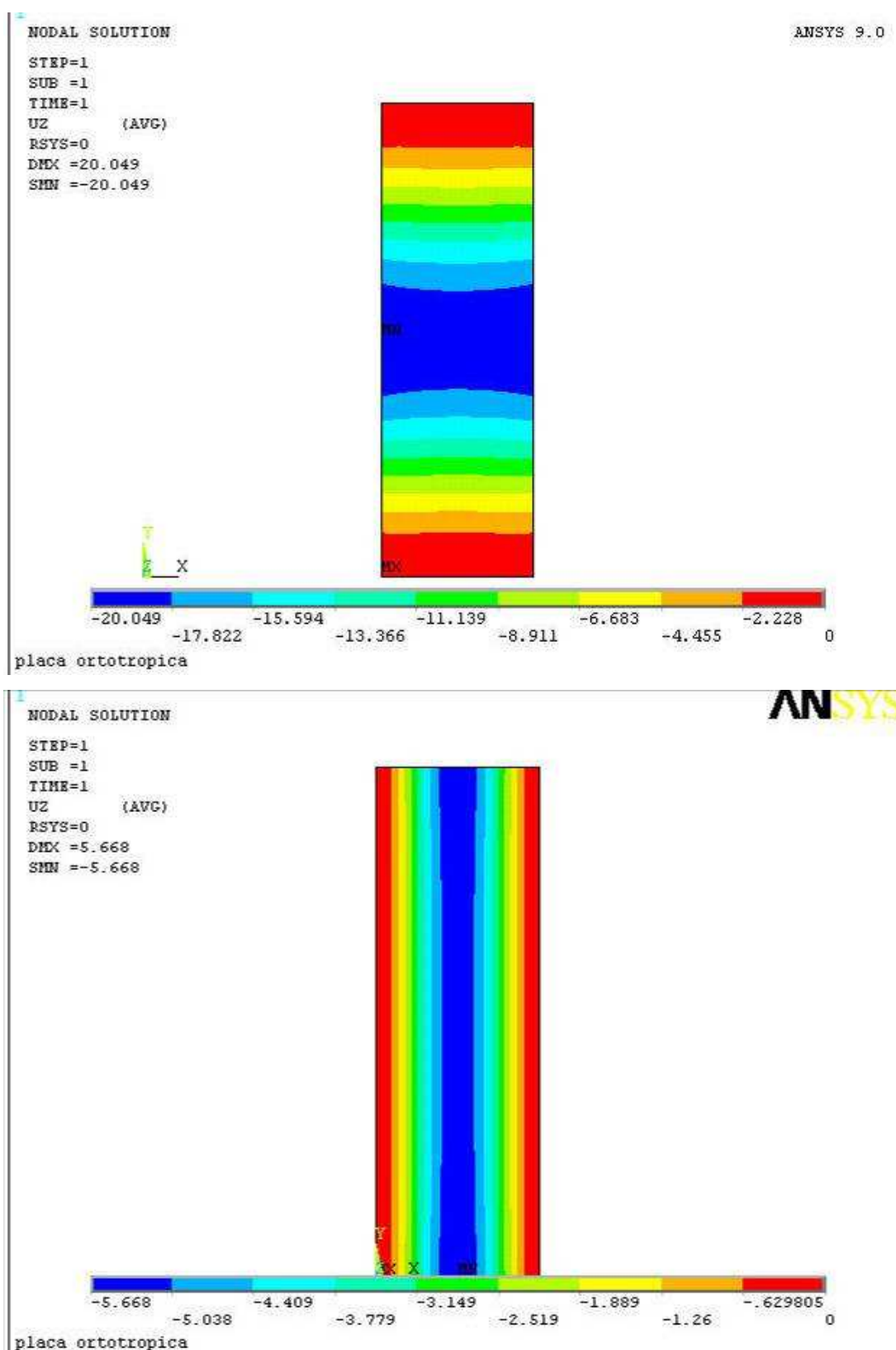


Figura 7.11 – Distribui o de deslocamentos [mm] ortogonais ao plano da placa ortotrópica e lisa. Fig.A corresponde aos lados a engastados e Fig. B corresponde aos lados b engastados.

7.3 ANÁLISE DE UM SILO VAZIO

Para se ter mais subsídios sobre a dificuldade desta análise, modelou-se o silo da Figura 5.2, conforme dados de chapas laterais e montantes constantes das tabelas Tabela 4-21 e Tabela 4-23. A forma dos montantes é apresentada na Figura 4.5.

Considerou-se o silo apoiado na base e com borda no topo livre. A carga considerada é aquela devida ao vento, com distribuição conforme Tabela 3-8, considerando vento com velocidade de 48m/s. Considerar a borda superior livre, a rigor, não é o correto, porque se está desprezando a rigidez do telhado. No entanto, as equações analíticas utilizadas para o mesmo fim consideram o cilindro como infinito, ou seja, também não levam em conta a rigidez do telhado. Portanto, essa hipótese fica justificada já que o maior objetivo é comparar os resultados obtidos.

O silo foi modelado considerando-se as chapas laterais como lisas e isotrópicas, corrugadas e isotrópicas, lisas e ortotrópicas. Optou-se por representar o corrugado de modo simplificado, conforme 7.2.1.2 e 7.2.1.3, apesar disto provocar uma redução na rigidez da chapa. Com isso consegue-se uma redução significativa na malha facilitando o manuseio dos arquivos. É importante destacar que a carga de vento foi trabalhada com fatores médios dos coeficientes de pressão externa que são fornecidos pela norma NBR6123 (1988). Essa foi a alternativa encontrada já que não foi possível representar a carga com variação contínua ao longo dos elementos. Considerando-se a discretização da malha (tomou-se o cuidado de não permitir elementos com razão de aspecto superior a 2), a representação da carga por patamares fornece bons resultados.

O modelo com chapa lisa e isotrópica é representado por 25.000 elementos. As chapas laterais são modeladas com o elemento *shell63* e os montantes são modelados com o elemento de barra *beam188* (elemento de pórtico espacial com capacidade de analisar problemas com empenamento restringido). A Figura 7.12 ilustra a distribuição de deslocamento x (direção que incide o vento, que está destacada pela seta vermelha). De acordo com o esperado, nota-se que a deformada é simétrica e que a região de deslocamentos máximos não ocorre no ponto de incidência do vento. A região de deslocamento máximo corresponde à zona em que ocorre inversão da carga de pressão para sucção. A Figura 7.13 apresenta a região, com deslocamento x máximo, em maior detalhe. Nota-se que o deslocamento máximo vale 5,6 cm e que o mesmo afeta uma região formada por três anéis. Considerando-se a forma de ligação do telhado com estrutura do silo, estes deslocamentos não representam uma situação real.

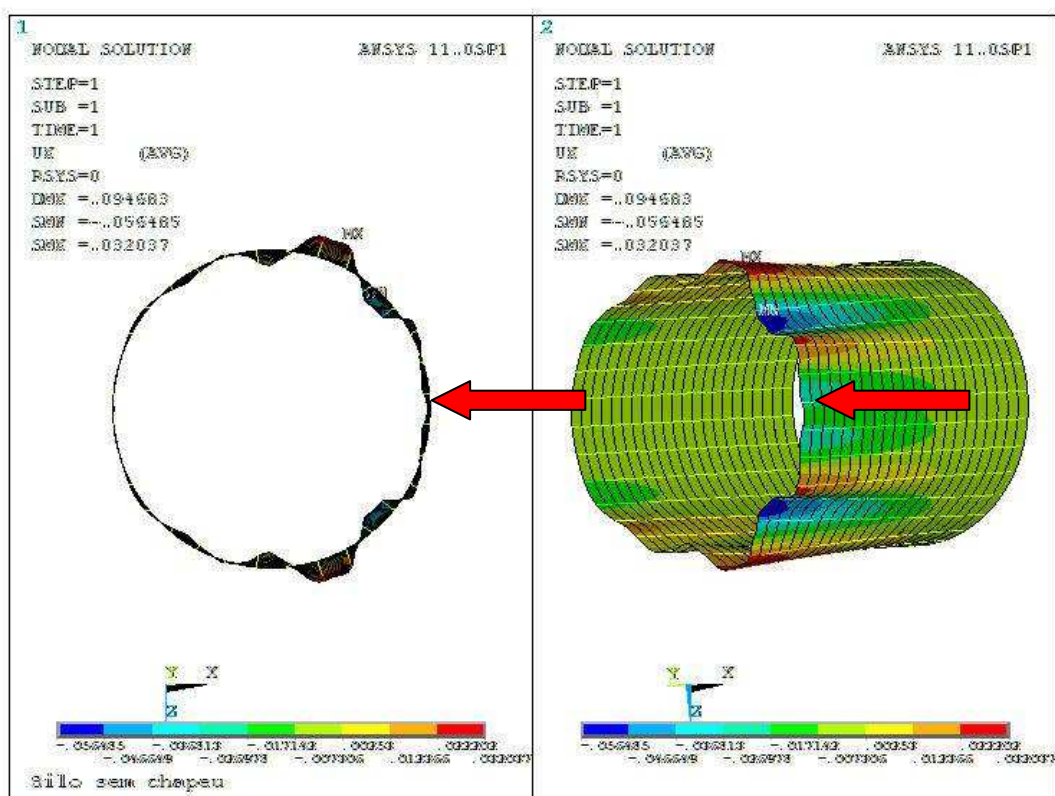


Figura 7.12 – Distribuição do deslocamento (m) na direção x – chapa lisa e isotrópica.

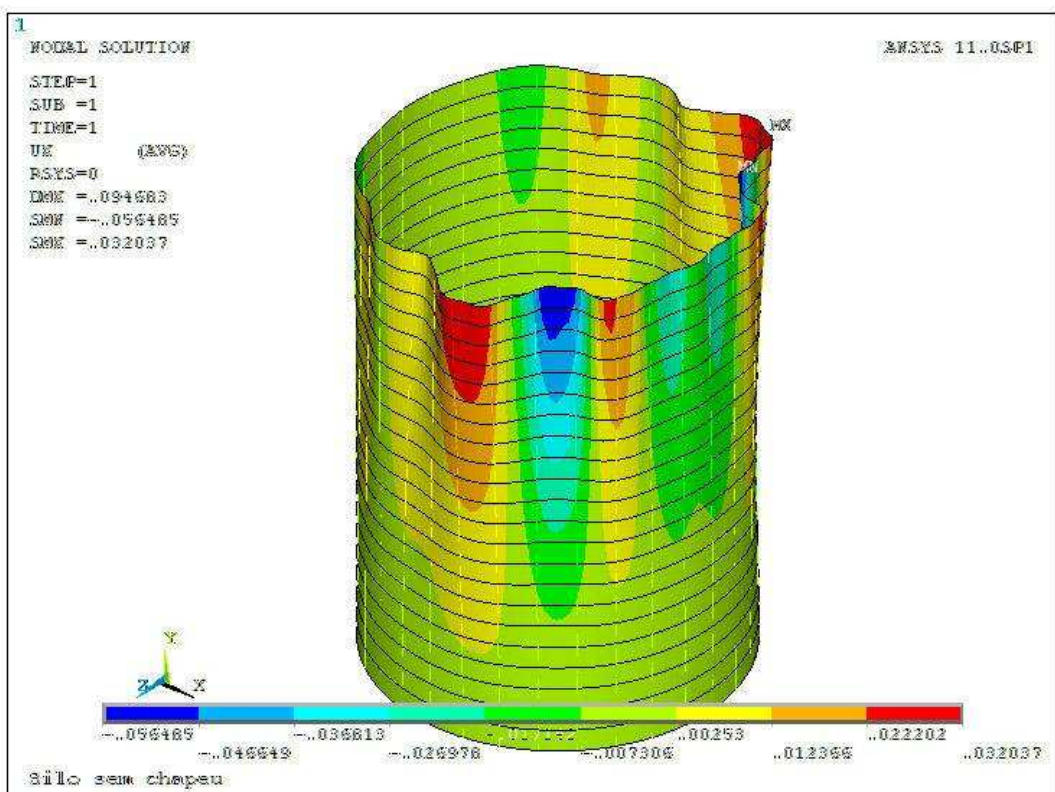


Figura 7.13 – Detalhe da distribuição de deslocamentos [m] na direção x na região de valor máximo – chapa lisa e isotrópica.

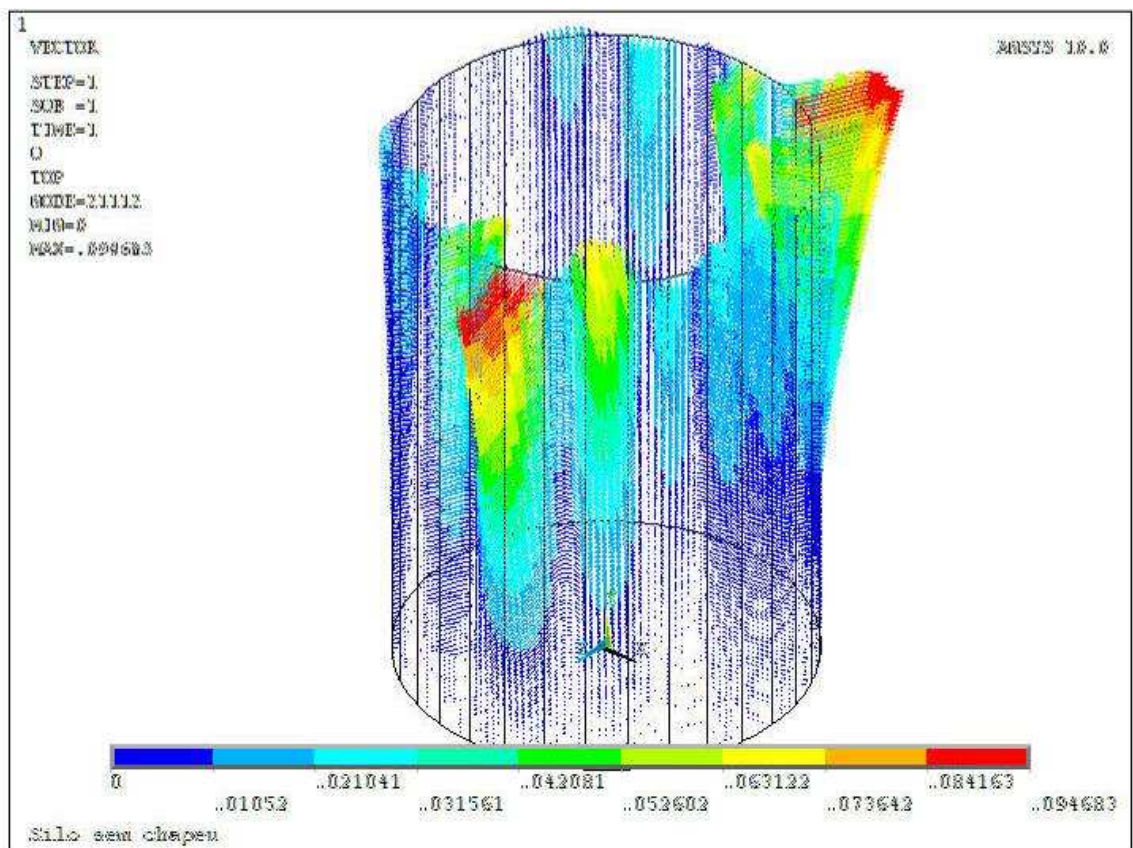
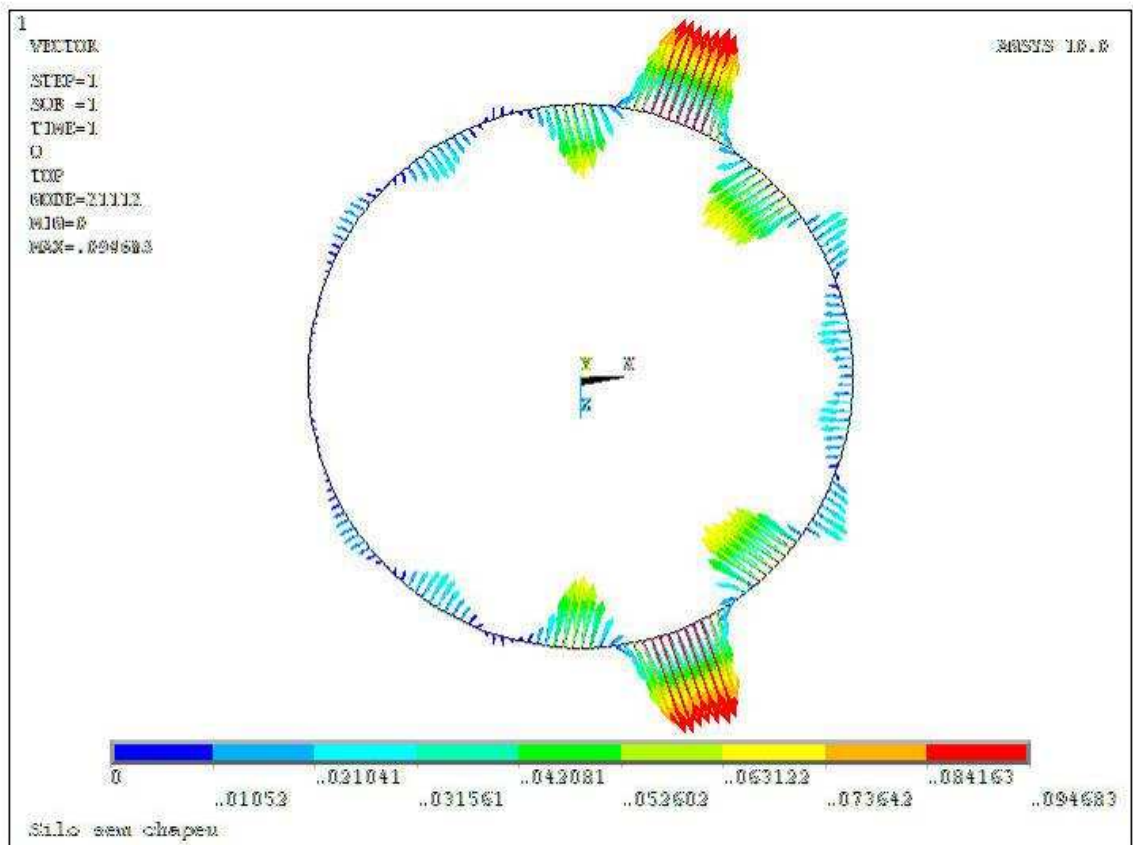


Figura 7.14 – Distribuição do vetor soma dos deslocamentos [m] – chapa lisa e isotrópica.

A Figura 7.14 representa o vetor deslocamento ($u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$). Trata-se de representações que ilustram melhor o que está acontecendo com o silo. Pode-se notar que os deslocamentos máximos são da ordem de 9,5 cm e caracterizam que a estrutura deve necessariamente ser reforçada. Observa-se que a necessidade de reforço se inicia aproximadamente a partir da metade da altura do silo. Deve-se destacar que, para obter-se resultados mais confiáveis, deve-se realizar uma análise não linear geométrica.

O modelo com chapa corrugada e isotrópica é representado por 95.000 elementos. As chapas laterais são modeladas com elemento *shell63* empregando-se a representação simplificada do corrugado. Os montantes são modelados com o elemento de barra *beam188*. A Figura 7.15 ilustra a distribuição de deslocamentos x (direção que incide o vento, que está destacada pela seta vermelha). De acordo com o esperado, nota-se que a deformada é simétrica e que a região de deslocamentos máximos não ocorre no ponto de incidência do vento. Nota-se que a região de deslocamento máximo ocorre mais próxima da região de incidência do vento.

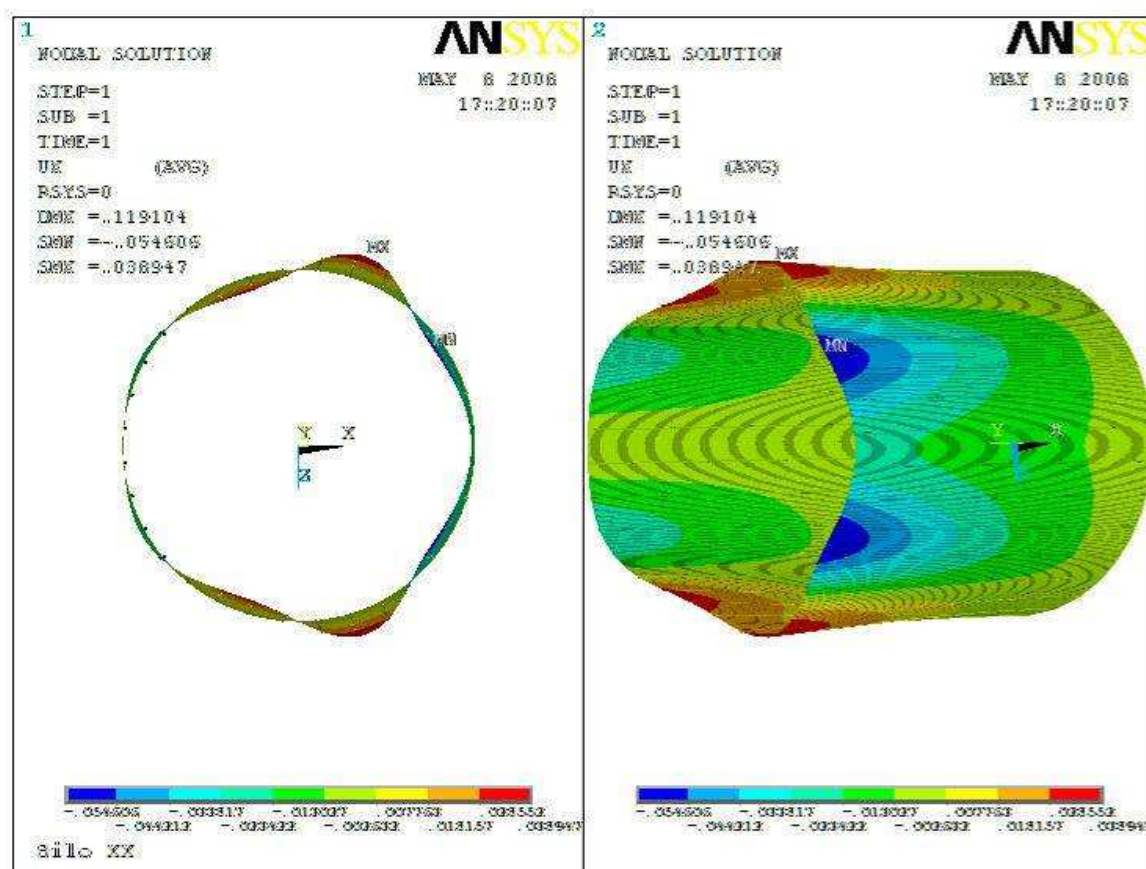


Figura 7.15 – Distribuição do deslocamento [m] na direção x –chapa corrugada e isotrópica.

As Figura 7.16 e Figura 7.17 representam o vetor deslocamento. Pode-se notar que os deslocamentos máximos são da ordem de 11,9cm e caracterizam que a estrutura deve necessariamente ser reforçada. Observa-se que a necessidade de reforço se inicia aproximadamente a partir da metade da altura do silo. Chama a atenção que o silo corrugado apresentou um deslocamento máximo superior ao do silo liso, o que a princípio é um forte indicativo que há um problema no modelo. Logo, até prova em contrário, os resultados obtidos modelando-se o corrugado do silo não devem ser considerados válidos.

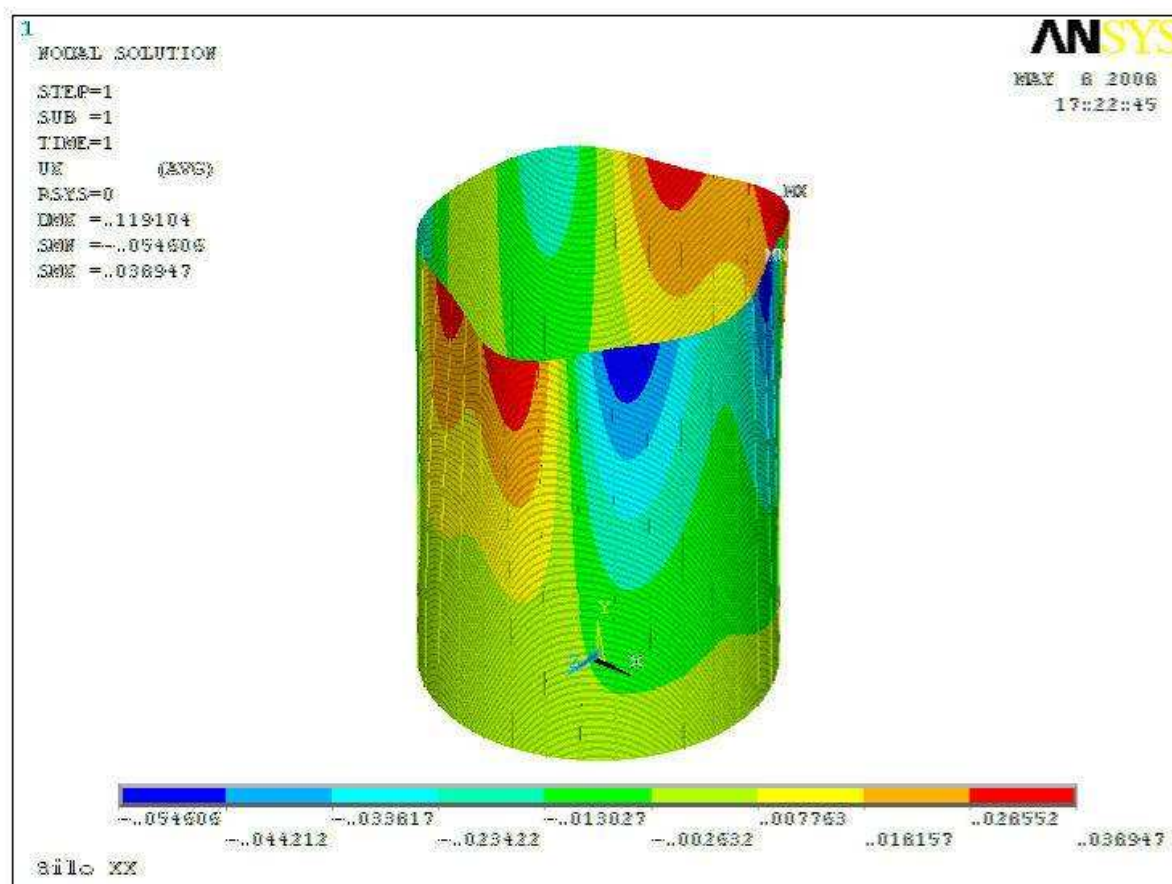


Figura 7.16 – Detalhe da distribuição de deslocamentos [m] na direção x na região de valor máximo – chapa corrugada e isotrópica.

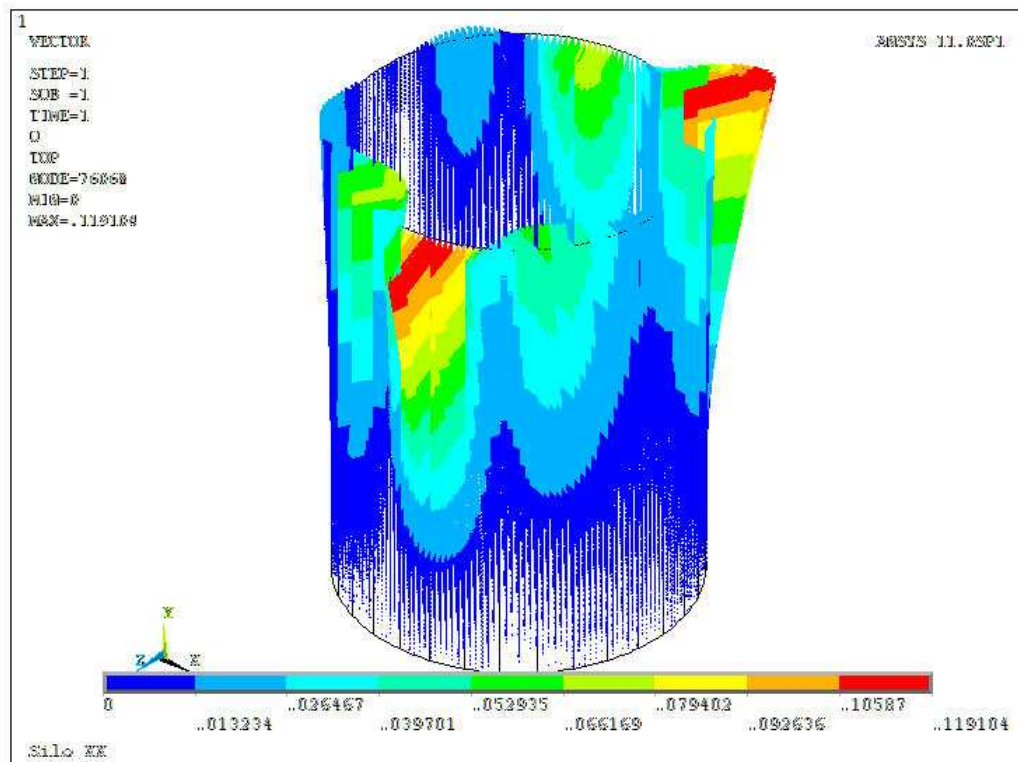
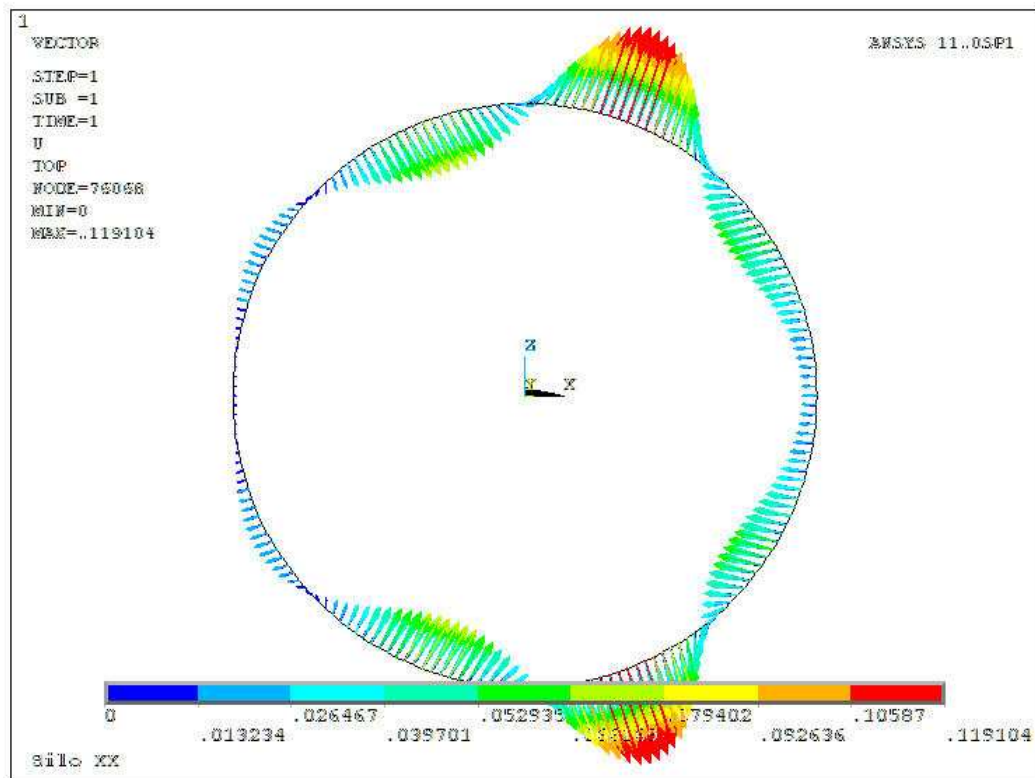


Figura 7.17 – Distribuição do vetor deslocamento [m] na direção x – chapa corrugada e isotrópica.

O modelo com chapa lisa e ortotrópica é representado por 25000 elementos. As chapas laterais são modeladas com o elemento shell181 e os montantes são modelados com o elemento de barra beam188. Os coeficientes de rigidez são determinados de acordo com a proposta de BRIASSOULIS (1986). A Figura 7.18 ilustra a distribuição de deslocamentos x (direção que incide o vento, que está destacada pela seta vermelha). De acordo com o esperado, nota-se que a deformada é simétrica. A região de deslocamentos ocorre adjacente à zona de incidência do vento.

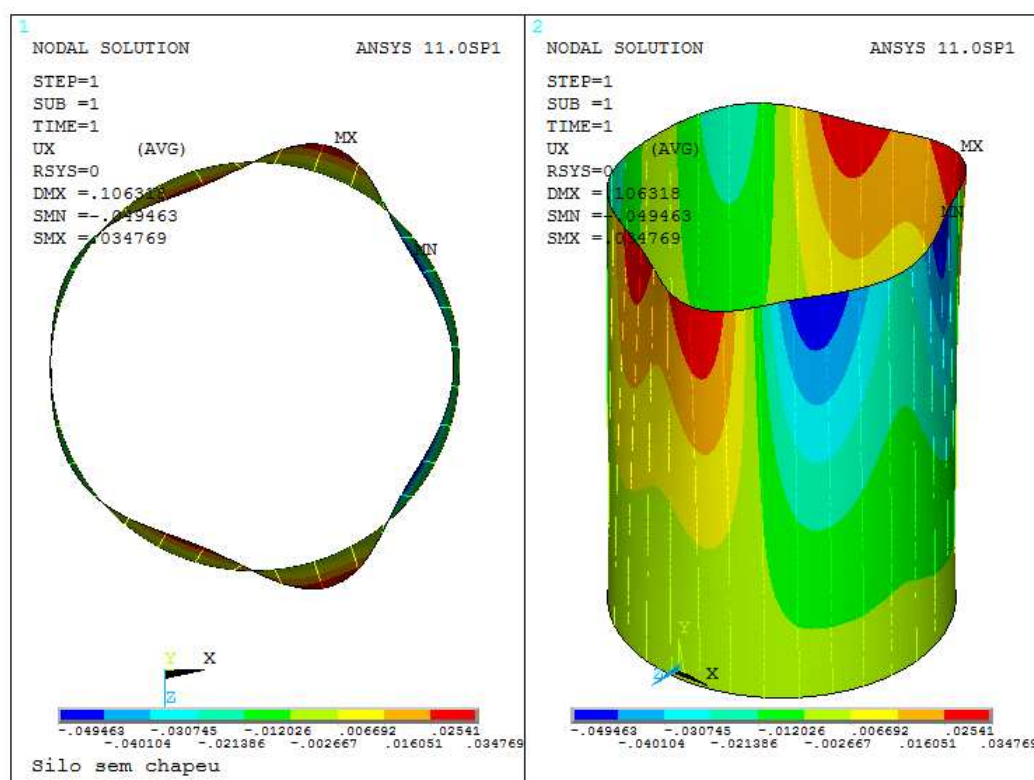


Figura 7.18 – Distribuição do vetor deslocamento [m] na direção x – chapa lisa e ortotrópica.

A Figura 7.19 apresenta a região, com deslocamento x máximo, em maior detalhe. Nota-se que o deslocamento máximo vale 4,7 cm. Considerando-se a forma de ligação do telhado com estrutura do silo, estes deslocamentos não são aceitáveis. As figuras (5) e (6) representam o vetor deslocamento. Pode-se notar que os deslocamentos máximos são da ordem de 8,4 cm e caracterizam que a estrutura deve necessariamente ser reforçada. Comparando-se com a chapa lisa isotrópica obteve-se uma redução no deslocamento máximo de 13,4%. Observa-se que a necessidade de reforço se inicia aproximadamente a partir da metade da altura do silo. Deve-se destacar que, para obter-se resultados mais confiáveis, deve-se realizar uma análise não linear geométrica. Embora exista um efeito de escala significativo, chama a atenção a

pequena diferença no valor do deslocamento máximo entre as soluções isotrópica e ortotrópica, principalmente considerando-se os resultados obtidos com os exemplos de teste.

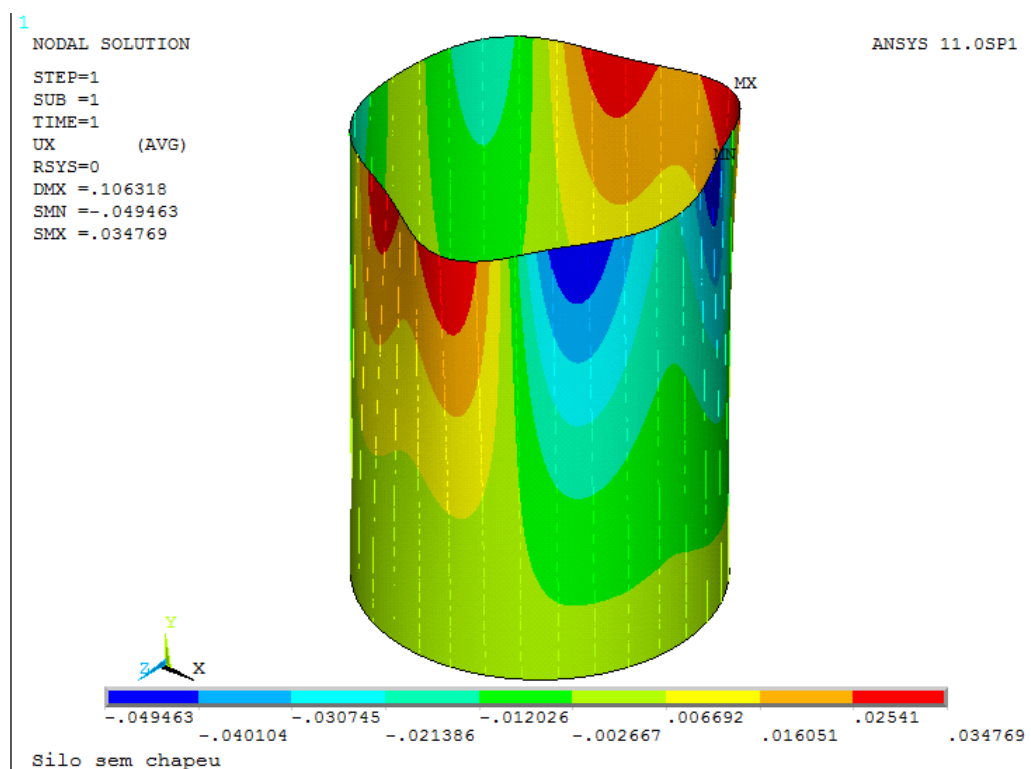


Figura 7.19 – Detalhe da distribuição de deslocamentos [m] na direção x na região de valor máximo – chapa lisa e ortotrópica.

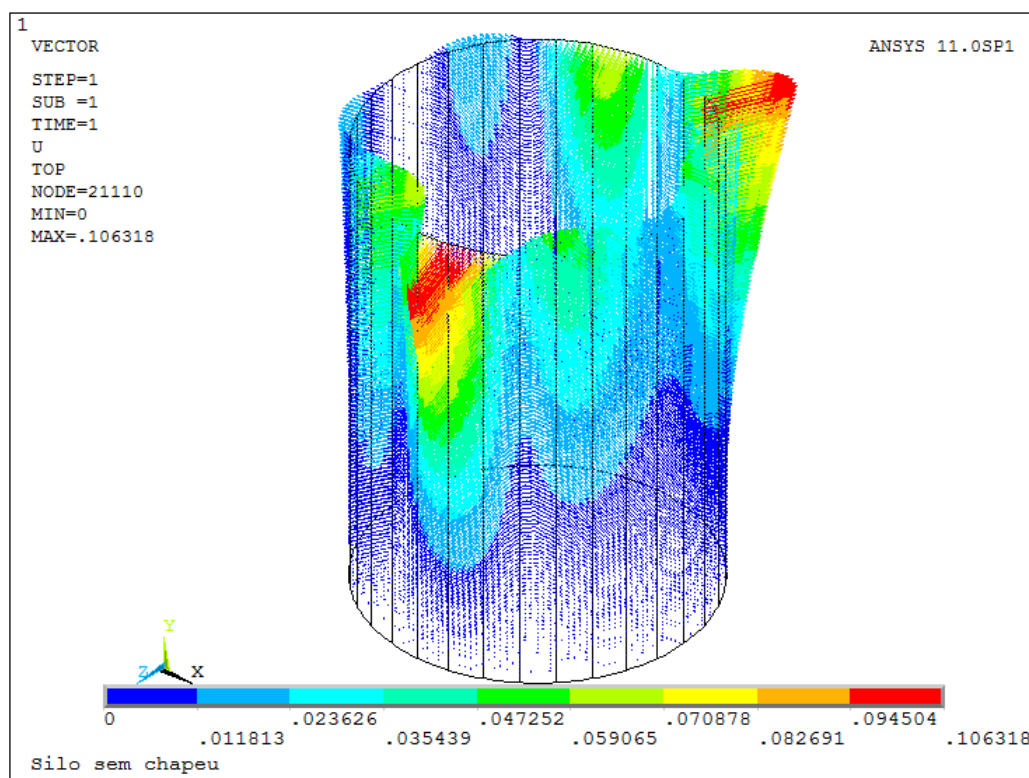


Figura 7.20 – Distribuição do vetor deslocamento [m] na direção x – chapa lisa e ortotrópica.

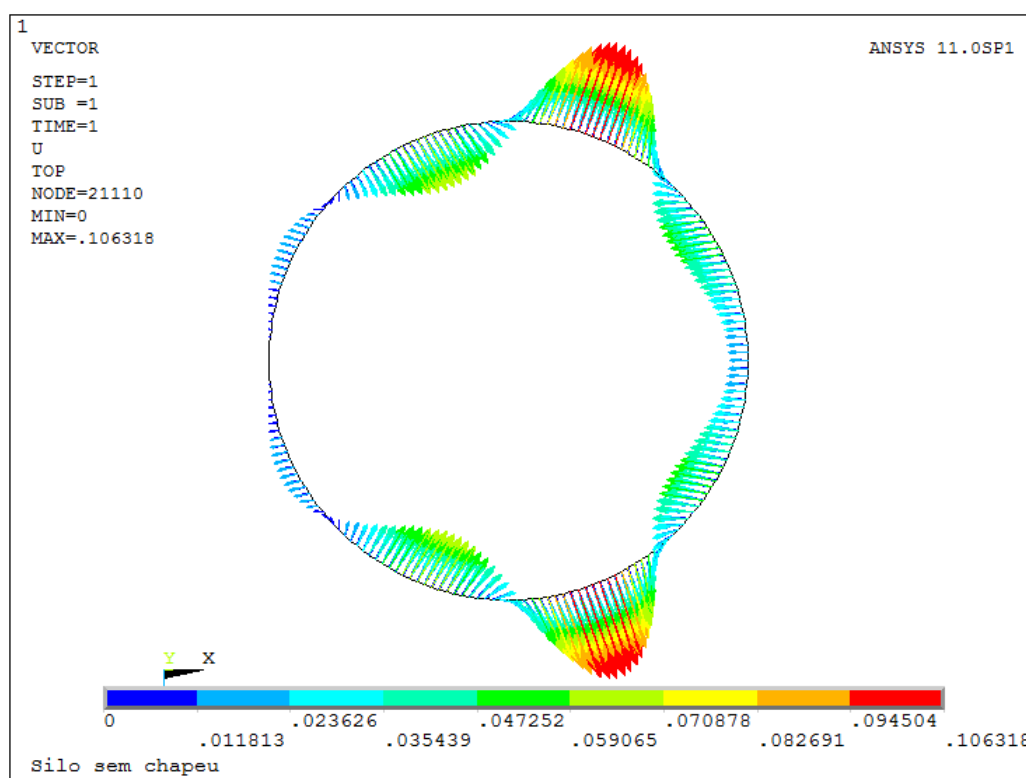


Figura 7.21 – Distribuição do vetor deslocamento [m] na direção x – chapa lisa e ortotrópica.

Considerando-se que o silo real necessita de anéis de reforço, pode-se dizer que os três modelos empregados fornecem resultados coerentes com essa realidade já que todos os modelos identificaram deslocamentos excessivos na região superior do silo. É claro que, em cada caso, deve ser realizada uma análise não linear geométrica para quantificar mais corretamente o valor destes deslocamentos, além da inserção do telhado do silo que afeta sua rigidez. No entanto, comparando-se os resultados obtidos pelos três modelos nota-se que o modelo com chapa lisa e isotrópica apresentou deslocamento máximo 15,2% inferior ao do modelo corrugado e 10,6% inferior ao modelo ortotrópico com chapa lisa. Tratam-se de resultados que, numa análise inicial, aparentemente são incoerentes.

Para se compreender melhor o comportamento do modelo, fez alguns testes a partir de um modelo mais simples. Tomou-se uma chapa lisa (2.857 x 914,4 x 2,6) mm de aço com $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ e $\nu = 0,3$. Essa chapa é engastada nos bordos “a” e livre nos bordos “b”, e está submetida a uma carga de pressão uniforme de $0,001 \text{ N/mm}^2$. A Figura 7.22 ilustra esses dados. Tomando como base essa chapa, foram analisados vários problemas alterando-se o raio de curvatura da chapa. Esses problemas foram analisados com elementos de casca e com elementos de pórtico plano. Também foram analisados casos com o deslocamento horizontal

liberado numa das bordas “a” da chapa e outros casos com as rotações liberadas nas duas bordas “a” da chapa.

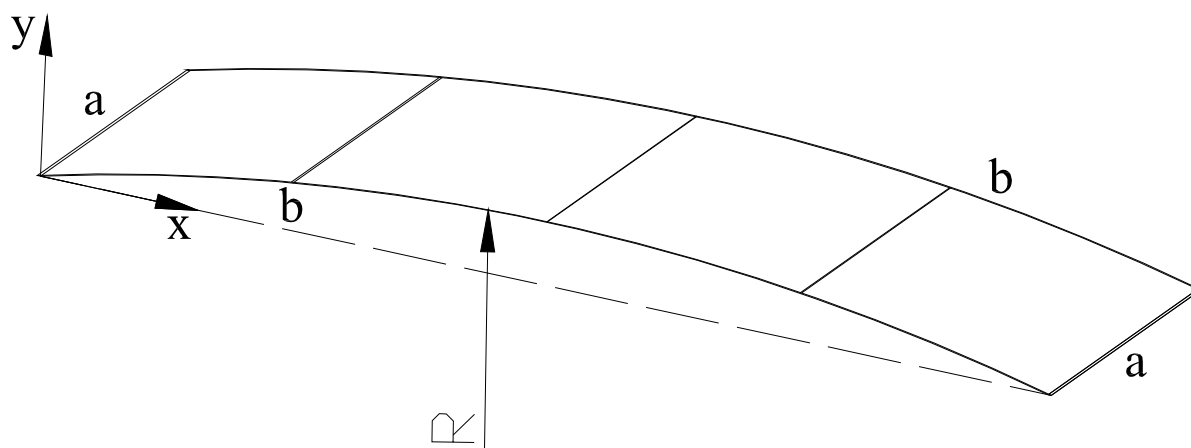


Figura 7.22 – Geometria da chapa analisada

Considerando-se o caso com raio de curvatura infinito, ou seja o de uma chapa plana e levando-se em conta as condições de contorno, nota-se que o deslocamento perpendicular ao plano médio da placa passa a ser uma função do tipo $y = y(x)$, o que resulta que a solução empregando elementos de barra vai diferir da solução de elementos de placa de um fator $(1 - \nu^2)$, GROEHS (2002).

A Tabela 7-1 apresenta os resultados obtidos para o modelo de barras. A primeira coluna desta tabela apresenta o raio de curvatura da chapa [mm]. A linha destacada em cor cinza corresponde ao raio de curvatura de 7.276 mm que é o raio de curvatura do silo anteriormente analisado. A coluna 2 apresenta o número de chapas utilizadas no perímetro do silo e que determina qual será o raio do silo (coluna 1). As colunas 3 e 4 correspondem ao deslocamento vertical máximo e a soma das reações verticais para os casos com os bordos engastados. A coluna 5 apresenta os deslocamentos verticais máximos para os casos de um bordo “a” com um dos deslocamentos horizontais livre e demais graus de liberdade restringidos e a coluna 6 com os dois bordos “a” com rotação livre e demais graus de liberdade restringidos. De acordo com os resultados obtidos para o caso de engaste, nota-se que o deslocamento máximo para o caso da chapa plana ($r = \infty$) vale 564,25 mm e para o caso de $r = 7276$ mm vale 0,18 mm. À medida que o raio de curvatura vai aumentando, o deslocamento máximo corretamente vai convergindo para a solução plana.

Analisando-se os resultados correspondentes ao caso com deslocamento livre em X num dos bordos “a”, nota-se que a uma redução drástica na rigidez da chapa independente do raio de curvatura desta. Analisando-se agora os resultados correspondentes ao caso com

rotações livres nos bordos “a”, nota-se que não houve redução de rigidez significativa. Logo, conclui-se que a rigidez de membrana é preponderante na chapa arqueada.

Tabela 7-1 Resultados da Chapa modelada com elemento de pórtico

raio [mm]	Nº de chapas	REAC Ry [N]	Engaste	Ux livre	Rot livre
			Y [mm]	Y [mm]	Y` [mm]
plana - ∞	∞	2.612,60	-564,25	-564,25	-1.169,60
4.547.509,15	10000	2.612,70	-559,87	-564,32	-1.149,30
454.750,92	1000	2.612,70	-314,45	-564,31	-420,44
45.475,09	100	2.612,30	-7,01	-563,91	-6,53
36.380,07	80	2.612,00	-4,51	-563,67	-4,20
29.558,81	65	2.611,70	-2,98	-563,35	-2,79
22.737,55	50	2.611,00	-1,77	-562,68	-1,72
18.190,04	40	2.610,00	-1,13	-561,76	-1,19
15.916,28	35	2.609,20	-0,87	-560,98	-0,98
13.642,53	30	2.607,90	-0,64	-559,77	-0,81
10.004,52	22	2.603,80	-0,34	-555,89	-0,61
8.185,52	18	2.599,50	-0,23	-551,76	-0,54
7.276,01	16	2.595,90	-0,18	-548,46	-0,52
5.457,01	12	2.583,00	-0,10	-536,33	-0,47
3.638,01	8	2.546,10	-0,05	-502,66	-0,43

Analisando-se o mesmo problema com elementos de casca e adotando as mesmas condições de contorno, verifica-se pela Tabela 7-2, que tem a mesma organização da tabela anterior, que as conclusões são as mesmas.

Tabela 7-2 Resultados da Chapa modelada com elemento de casca

raio [mm]	Nº de chapas	REAC Ry [N]	Engaste	Ux livre	Rot livre
			Y [mm]	Y [mm]	Y` [mm]
plana - ∞		2.612,60	-548,65	-548,65	-1.169,60
4.547.509,15	10000	2.612,70	-544,61	-548,72	-1.149,30
454.750,92	1000	2.612,70	-312,64	-548,54	-420,44
45.475,09	100	2.612,30	-7,10	-538,69	-6,53
36.380,07	80	2.612,00	-4,55	-535,87	-4,20
29.558,81	65	2.611,70	-3,00	-533,09	-2,79
22.737,55	50	2.611,00	-1,77	-529,49	-1,72
18.190,04	40	2.610,00	-1,13	-526,38	-1,19
15.916,28	35	2.609,20	-0,87	-524,44	-0,98
13.642,53	30	2.607,90	-0,64	-522,06	-0,81
10.004,52	22	2.603,80	-0,34	-516,29	-0,61
8.185,52	18	2.599,50	-0,23	-511,29	-0,54
7.276,01	16	2.595,90	-0,18	-507,61	-0,17
5.457,01	12	2.583,00	-0,10	-495,05	-0,09
3.638,01	8	2.546,10	-0,05	-462,53	-0,04

Os resultados obtidos demonstram que no caso de uma chapa arqueada a componente de rigidez que comanda o processo é a rigidez de membrana. Considerando-se o item 7.2.1.4, nota-se que não há uma diferença significativa de rigidez de membrana entre uma chapa lisa e uma chapa corrugada. Logo, estes resultados explicam, tendo em conta a limitação de uma análise linear, porque o silo construído com chapa lisa apresentou resultados da mesma ordem de grandeza do que os obtidos com a chapa corrugada.

Portanto, os resultados anteriormente obtidos na análise do silo são coerentes quando limitados a uma análise elástica linear. Porém, estes mesmos resultados obtidos indicam a necessidade de se realizar uma análise não-linear geométrica do silo para melhor avaliar o funcionamento deste.

8 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentaram-se falhas ou acidentes que costumam ocorrer durante a construção e uso de um silo. Observou-se que muitos destes ocorreram por falhas de projeto. Apresentaram-se os procedimentos indicados para o cálculo das pressões devidas aos grãos armazenados no interior de silos e planilhas eletrônicas foram programadas. Desenvolveram-se diversas planilhas eletrônicas com o objetivo de automatizar o processo de cálculo. Fez-se um estudo das formulações disponíveis para analisar silos vazios submetidos à carga de vento. Apresentou-se um procedimento para o cálculo do número de anéis de reforço, bem como para a distribuição destes. Apresentou-se um algoritmo com o procedimento de cálculo completo do corpo de um silo. Fez-se um levantamento dos dados necessários para modelar por elementos finitos a estrutura de um silo.

Concluiu-se que as normas analisadas para o cálculo das pressões devidas aos grãos armazenados apresentam grande variabilidade de resultados, principalmente referentes às cargas oriundas do descarregamento dos silos, o que indica que se trata de uma área ainda a ser mais bem estudada.

Muitos acidentes, então, podem ocorrer devido à não previsão da sobrecarga durante o descarregamento, principalmente aumento de pressão de atrito sobre as paredes, quando utilizada a norma ANSI/ASAE EPP433 e recomenda-se, desta forma, a utilização da norma UNE-ENV 1991-4.

Estudos para melhorias das peças que compõem um silo, chapa lateral e montante, puderam ser realizadas através das planilhas eletrônicas que foram programadas com o objetivo de calcular as cargas admissíveis e que resultaram em silos mais econômicos.

No caso de silos vazios submetidos à carga de vento, apresentou-se um procedimento para cálculo e distribuição dos anéis de reforço que foi desenvolvido pelo autor. Embora ainda com resultados iniciais, observou-se uma concordância aceitável, no exemplo analisado, entre este procedimento analítico e o obtido por análise utilizando o método dos elementos finitos. Ambos os procedimentos indicam a necessidade de anéis de reforço.

Com relação à análise de elementos finitos, os resultados interpretados dentro da limitação de uma análise elástica linear, são coerentes. No entanto, observa-se que estes resultados indicam que o uso de uma chapa lisa ou corrugada num silo é indiferente considerando-se este vazio e submetido a carga de vento.

Concluiu-se que a utilização de análise elástica linear para o cálculo de um silo vazio submetido a carga de vento não é adequado. Deve-se adotar análise não-linear geométrica e física para uma avaliação correta deste problema.

8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após revisão bibliográfica, verificou-se a inexistência de trabalhos que forneçam parâmetros para o cálculo das pressões originadas pelo vento nas passarelas instaladas sobre silos. Recomenda-se a construção de um modelo reduzido para ser ensaiado em túnel de vento de modo a obterem-se os coeficientes de pressão e arrasto necessários para o correto dimensionamento desta estrutura.

Devido à grande diferença existente entre as duas normas analisadas para o cálculo das pressões devidas aos grãos armazenados em silos, recomendam-se ensaios em modelos reduzidos e em silos reais para a determinação dos esforços que ocorrem nestas estruturas, além de ensaios de determinação dos coeficientes de atrito entre grãos e entre estes e a chapa lateral do silo.

Implementação de um elemento de casca com capacidade de analisar chapas corrugadas. Instrumentar um silo com o objetivo de calibrar o modelo numérico seria muito interessante.

Embora não haja constatação prática, em teoria, os silos submetidos a carregamentos com alto fluxo de carga e descarga em curtos períodos de tempo, como silos instalados em portos e fabricas de óleo, podem estar submetidos a efeitos de fadiga. A norma UNE ENV-1991-4 (1995) indica que silos submetidos a ciclo de carga e descarga maiores que uma vez ao dia necessitam ter os efeitos de fadiga analisados. No entanto, a norma não fornece o procedimento a ser adotado para tal prática. Logo, justifica-se o estudo deste tema.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE Jr., L.J. (2002), **A Ação do vento em silos cilíndricos de baixa relação altura x diâmetro**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos-USP. Orientador: Calil, C. São Carlos, SP. 172p.
- ANSI/ASAE D241.4, (1998) **Density, Specific Gravity, and Mass-Moisture Relationships of Grain for Storage**. USA. pp.508 – 510.
- ANSI/ASAE EP433, (2000) **Loads Exerted by Free-Flowing Grain on Bins**. American Society of Agricultural Engineers. 2950 Niles Rd., St. Joseph, USA. pp.720 – 724.
- ANSOURIAN, N.W. (1985), **Stability under Wind Loading**. Design of steel bins for the storage of bulk solids – The University of Sydney – School of Civil and Mining Engineering. Edited by Rotter, J.M. pp.138 – 143.
- BENINK, E.J. (1989), **Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes**. Tese (Doutorado) – Universiteit Twente, The Netherlands. 162p.
- BUTLER, MFG (1975). **Grain Bin Design – Specifications, design procedures, corrugated sheet properties, wall joint design, wind analysis**. Company Engineerin Data. 29p.
- CALIL, C.J. (1978). **Silos de Madeira. Dissertação de Mestrado**. Escola de Engenharia de São Carlos-USP. Orientador: Prof. João Cesar Hellmeister. São Carlos, SP. 106p.
- CALIL Jr., C. (1984), **Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos**. Tese de Doutorado. Escola Técnica Superior de Engenheiros Industriais de Barcelona. Universidade Politécnica de Barcelona. Orientador: Ravenet, J. Barcelona, Espanha. 318p.
- CALIL JR., C. (1990), **Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais** – Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Estruturas. 184p.
- CIENTEC (1979) Relatório número 37987 processo: 04829. 49p.
- CONAB (2006). www.conab.gov.br

DIN 1055-6, (2003) **Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter. Deutsches Institut für Normung.** Berlin. 120p.

ESTEVEZ, P.Jr. (1989). **Silos metálicos de chapa corrugada.** Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos-USP.Orientador: Carlito Calil Jr. São Carlos, SP. 118p.

GROEHS, A.G. (2002). Resistência dos Materiais e Vasos de Pressão. UNISINOS-São Leopoldo, 850 p.

IRAM 8 015 (1977) **Silos aéreos Metálicos para almacenamiento de granos – Cilíndricos y desarmables.** 40p.

MACDONALD, P.A.; KWOK, K.C.S.; HOLMES, J.D. (1988) **Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Amsterdam, v.31, n.1, p.165-87

MACDONALD, P.A., HOLMES, J.D., KWOK, K.C.S. (1989), **Wind Loads on Circular Storage Bins, Silos and Tanks: Part III Fluctuating and Peak Pressure Distributions –** The University of Sydney – School of Civil and Mining Engineering, Research Report n^o.600

NBR6123 (1988) **Forças devidas ao Vento em Edificações.** Rio de Janeiro-Brasil 84 p.

NBR7008 (2003) **Chapas e Bobinas de aço revestidas com zinco ou com liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente - Especificação.** Rio de Janeiro-Brasil. 7 p.

NBR8800 (1986) **Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites) - Procedimento.** Rio de Janeiro-Brasil. 200 p.

NBR14762 (2001) **Dimensionamento de estruturas de aço constituído por perfis formados a frio – Procedimento.** Rio de Janeiro-Brasil. 53 p.

RAVENET, Juan (1977) **Silos: Teoría, investigación, construcción.** Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona-España

RAVENET, Juan (1978) **Silos: Deformaciones, fallas, explosiones. Prevención de accidentes.** Editores Técnicos Asociado, S.A., Barcelona-España. 364p.

RAVENET, Juan (1983) **Silos: Flujo de vaciado de solidos. Formación de Bovedas. Efectos.** Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona-España. 335p.

REIMBERT, M. (1971). **Silos. Traite Theorique et pratique –** Editions Eyrolles – Paris. 5^a. Edição. 330p.

ROTTER, J.M., TENG, J.G. (1988-a). **Elastic Stability of Lap-Jointed Cylindrical Shells under axial Compression**. The University of Sydney – School of Civil and Mining Engineering, Research Report n°.562

ROTTER, J.M. (1988-b), **The Structural Design of Steel Silos of Agricultural Applications** – The University of Sydney – School of Civil and Mining Engineering, Research Report n°.569

ROTTER, J.M., TENG, J.G. (1988). **Plastic Collapse of Restrained Steel Silo Hoppers Compression** – The University of Sydney – School of Civil and Mining Engineering, Research Report n°.580

ROTTER, J.M. (1988), **The Structural Design of Light Gauge Silo Hoppers** - The University of Sydney – School of Civil and Mining Engineering, Research Report n°.571

ROTTER, J.M., Zhang, Q. (1989), **Elastic Buckling of Imperfect Cylindrical Shells Containing Granular Solids Compression** – The University of Sydney – School of Civil and Mining Engineering, Research Report n°.589

SHOWKATI, H., ANOSOURIAN, P. (1994), **Influence of Primary Boundary Conditions on the Buckling of Shallow Cylindrical Shells** – The University of Sydney – School of Civil and Mining Engineering, Research Report n°.684

TROITSKY, M.S. (1982) **Tubular Steel Structures – Theory and Design**. James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Montreal-Canada.

UNE-ENV 1991-4, (1998) **Eurocódigo 1 Bases de Proyecto y Acciones en Estructuras Parte4: Acciones en Silos y Depósitos**. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid-España.