



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA**



**CENTRO DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE ESTRUTURAL DE SILOS METÁLICOS PRISMÁTICOS

JOSÉ PINHEIRO LOPES NETO

Biblioteca UFCG
SMBC_CDSA
CAMPUS DE SUMÉ
Reg. 12452/13

**CAMPINA GRANDE
PARAÍBA**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE SILOS METÁLICOS
PRISMÁTICOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JOSÉ PINHEIRO LOPES NETO

**Campina Grande - Paraíba
Outubro - 2005**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE SILOS METÁLICOS
PRISMÁTICOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JOSÉ PINHEIRO LOPES NETO

ORIENTADOR

Prof. Dr. JOSÉ WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO

**Campina Grande - Paraíba
Outubro - 2005**

JOSÉ PINHEIRO LOPES NETO

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE SILOS METÁLICOS
PRISMÁTICOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola a Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de Concentração: Construções Rurais e Ambiente

**Campina Grande - Paraíba
Outubro – 2005**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L864a Lopes Neto, José Pinheiro
2005 Análise estrutural de silos metálicos prismáticos / José Pinheiro Lopes Neto. —
Campina Grande, 2005.
112f. : il.

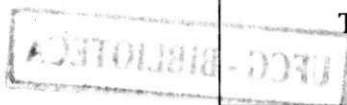
Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de
Campina Grande Centro de Ciências e Tecnologia.

Orientador: José Wallace Barbosa do Nascimento.

1— *Silos* 2— Prismáticos 3— Cálculo 4— Tensão 5— Soja em pelets I—
Título

CDU 631.24:582.757:631.53.027





UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



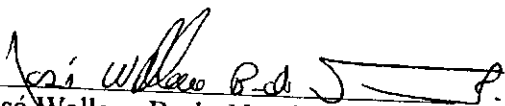
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

JOSÉ PINHEIRO LOPES NETO

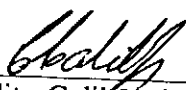
ANÁLISE ESTRUTURAL DE SILOS PRISMÁTICOS

BANCA EXAMINADORA

PARECER


Dr. José Wallace B. do Nascimento-Orientador

Aprovado


Dr. Carlito Calil Junior-Examinador

Aprovado


Dr. Alexandre José Soares Miná-Examinador

Aprovado.

OUTUBRO - 2005

UFCG - BIBLIOTECA

DEDICATÓRIA

À minha esposa Fernanda pelo
companheirismo em todos os momentos
e aos meus pais e avós pelo esforço que
sempre fizeram no desejo de me
promover uma boa formação moral,
dedico esta conquista como gratidão.

AGRADECIMENTOS

À Deus, criador e soberano;

À minha esposa, Fernanda, pela companhia e carinho em todos os momentos por nós já vividos.

Ao Prof. Dr. José Wallace B. do Nascimento, pela amizade, orientação e por confiar em um estranho dando-me a oportunidade de cursar uma pós-graduação;

À Comissão Examinadora;

A todos os professores que tive oportunidade de conhecer e admirar durante o decorrer do curso;

Aos amigos Valneide (pela realização dos ensaios laboratoriais), Marineide, Jair, Felipe, Ibireinaldo, Danilo, Rejane, Jofran (pela ajuda na parte experimental da pesquisa), Nilson (pela ajuda na montagem do silo) e aos demais companheiros de pós-graduação pelo apoio e incentivo;

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela Bolsa de Estudos concedida;

E a todos que por ventura não estejam nesta lista, mas que de uma forma ou outra contribuíram para a realização desse trabalho, meus sinceros agradecimentos.

UNIC - BIBLIOTECA

“Nós somos o que fazemos repetidamente, a excelência
não é um feito, e sim, um hábito”

Aristóteles

“Toda grande caminhada começa com um simples passo”

Dito popular

SUMÁRIO

RESUMO	<i>x</i>
ABSTRACT	<i>xi</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>xii</i>
LISTA DE TABELAS	<i>xv</i>
LISTA DE SÍMBOLOS	<i>xvi</i>
INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Silos: Definições e Conceitos.....	4
2.2 Classificação geométrica dos silos.....	5
2.3 Modelos de fluxo e sua variação com a geometria do silo.....	6
2.4 Propriedades de fluxo dos sólidos armazenáveis.....	10
2.4.1 Peso específico consolidado (γ).....	11
2.4.2 Ângulo de atrito interno (θ) e Ângulo efetivo de atrito interno (δ).....	12
2.4.3 Ângulo de atrito interno do produto com a parede (θ_w).....	13
2.4.4 Função Fluxo (FF).....	14
2.4.5 Fator fluxo da tremonha (ff).....	14
2.5 Projeto das ações em silos verticais.....	15
2.5.1 Combinação das ações.....	17
2.5.2 Fatores de ações.....	18
2.6 Pressões em silos verticais.....	19
2.6.1 Método de Janssen (TROITSKY, 1982).....	20
2.6.2 Método de Reimbert (TROITSKY, 1982).....	22
2.7 Principais normas de ações em silos.....	23
2.7.1 Norma DIN 1055 (1987).....	23
2.7.2 Norma ISO 11697 (1995).....	29
2.7.3 Norma EUROCODE 1991-4 (1995).....	32
2.7.4 Norma AS 3774 (1990).....	36
2.8 Análise e projeto das paredes de silos prismáticos.....	38
2.8.1 Análise dos esforços nas paredes de silos prismáticos multicelulares.....	42
2.8.2 Dimensionamento das paredes de silos prismáticos multicelulares.....	45

2.8.2.1 Teoria de Ravenet (1992).....	45
2.8.2.2 Teoria de Troitsky (1982).....	50
2.8.3 Determinação dos momentos fletores nas paredes pelo Método dos deslocamentos (GRAY & MANNING, 1973).....	54
2.8.3.1 Células quadradas isoladas.....	54
2.8.3.2 Células retangulares isoladas.....	54
2.8.3.3 Células múltiplas.....	55
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
3.1 Local e Data.....	62
3.2 Descrição do modelo ensaiado.....	62
3.3 Sensores e equipamentos utilizados.....	64
3.3.1 Extensômetros elétricos de resistência.....	64
3.3.2 Transdutores diferenciais de deslocamento.....	64
3.3.3 Sistema de aquisição de dados.....	64
3.3.4 Propriedades de fluxo dos produtos.....	65
3.4 Metodologias adotadas.....	65
3.4.1 Análise granulométrica.....	65
3.4.2 Teor de umidade do produto (w).....	66
3.4.3 Determinação das propriedades de fluxo.....	66
3.4.4 Pressões horizontais estáticas e dinâmicas.....	67
3.4.5 Tensões nas paredes do silo.....	67
3.5 Instrumentação do silo.....	68
3.6 Procedimento dos ensaios.....	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
4.1 Propriedades físicas da soja em pelets.....	70
4.1.1 Granulometria e teor de umidade (w).....	70
4.2 Propriedades de fluxo da soja em pelets.....	71
4.3 Pressões normais teóricas nas paredes do silo.....	72
4.4 Tensões experimentais nas paredes do silo.....	75
4.4.1 Tensões na Fase Instantânea.....	75
4.4.2 Tensões na Fase 24 horas.....	78
4.4.3 Tensões na Fase 48 horas.....	79
4.5 Comparação entre tensões teóricas e experimentais.....	80
4.5.1 Tensões na Fase Instantânea.....	81

4.5.2 Tensões na Fase 24 horas.....	84
4.5.3 Tensões na Fase 48 horas.....	86
4.6 Deslocamentos nas paredes do silo.....	88
4.6.1 Deslocamentos na Fase Instantânea.....	88
4.6.2 Deslocamentos na Fase 24 horas.....	89
4.6.3 Deslocamentos na Fase 48 horas.....	90
CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

RESUMO

LOPES NETO, José Pinheiro. Análise estrutural de silos metálicos prismáticos. 2005. 112f. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiente) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

Nos últimos anos, o crescimento da agricultura brasileira tem forçado vários setores a se adequarem aos padrões produtivos com o intuito de se manterem competitivos frente ao processo de globalização econômica. Neste contexto, as fábricas de produtos agroindustriais, em especial as de ração avícola, tendem a buscar novas alternativas que favoreçam a produção e reduzam custos sem afetar a qualidade do produto final. Entre estas alternativas, destaca-se o uso de silos verticais por facilitar o processo de confecção das rações e eliminar os grandes depósitos horizontais. Entretanto, a simples adoção de silos verticais sem um conhecimento prévio de algumas características como forma e dimensões mais apropriadas para cada situação pode não obter o resultado desejado além do fato de gerar problemas no fluxo dos produtos pelo dimensionamento inadequado das células armazenadoras. Diante desta insegurança, a presente pesquisa teve como objetivo estudar as tensões desenvolvidas nas paredes em conformação ziguezague de um silo metálico prismático 2m x 1m e comparar os resultados obtidos com teorias e estudos semelhantes. Para a caracterização das propriedades de fluxo da soja em pelets (produto utilizado nos ensaios), adotou-se a metodologia proposta pela BMBH. Para o cálculo das pressões, adotaram-se as normas DIN 1055, ISO 11697, EUROCODE 1 e AS 3774 enquanto que, para o cálculo das tensões, utilizaram-se os métodos simplificados de Ravenet e Troitsky. Para a obtenção dos esforços reais nas paredes, utilizou-se extensômetros elétricos e transdutores de deslocamentos. Com bases nos resultados obtidos, ressalta-se que a soja em pelets apresentou característica granular e que o esforço gerado nas paredes pelo seu descarregamento aumentou com o tempo de armazenagem estudado. Com relação às teorias estudadas, conclui-se que tanto a teoria de Ravenet quanto de Troitsky podem ser recomendadas para o dimensionamento de silos prismáticos por apresentarem boa aproximação com valores experimentais.

Palavras-chave: soja em pelets, tensão, conformação ziguezague.

ABSTRACT

LOPES NETO, José Pinheiro. Structural analysis of prismatic metallic silos. 2005. 112f. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiente) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

Last years in Brazil have shown an agricultural growth that has forced several sectors to fit in productive patterns to maintain competitiveness within the process of economic globalization. In this context, agroindustrial product factories, particularly the ones involved with rations, tend to search for new alternatives to favor production and reduce costs without affecting the quality of the final product. Among these alternatives there is the use of vertical silos due to their capacity to facilitate the process of rations production and remove the need for great horizontal warehouses. The mere use of vertical silos without a previous knowledge of some characteristics such as the most appropriate shape and dimensions for each situation, however, may not produce the desired outcome and can create problems with the flow of products due to inadequate dimensioning of storage cells. Aware of such an insecurity, the present research had the objective to study the tensions produced on the zigzag shaped walls of a 2m x 1m prismatic metallic silo, and to compare results found with theories and similar studies. The methodology proposed by BMBH was used to determine the flow properties of pelletized soybean (product used in the experiments). DIN 1055, ISO 11697, EUROCODE 1 and AS 3774 norms were used for the calculation of pressure whilst the simplified methods of Ravenet and Troitsky were used to calculate tension. Strain gauges and displacement transducers were used to obtain data concerning the real efforts on the walls. Based on results found it can be said that pelletized soybean presented granular characteristic and that the effort generated on the walls due to its unloading increased according to storage time studied. Concerning the theories studied, it was concluded that either Ravenet theory or Troitsky's can be recommended for the design of prismatic silos since they present great accuracy when contrasted with experimental values.

Key-words: pelletized soybean, tension, zigzag disposition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de silos prismáticos.....	02
Figura 2 - Classificação geométrica dos silos segundo plano de ruptura.....	06
Figura 3 - Zonas de fluxo de sólidos.....	07
Figura 4 - Modelos básicos de fluxo de produtos sólidos.....	08
Figura 5 - Determinação gráfica do tipo de fluxo.....	08
Figura 6 - Limites para o fluxo de massa e funil.....	09
Figura 7 - Variação geométrica dos silos e sua influência no fluxo.....	10
Figura 8 - Lugares geométricos e ângulos de atrito interno.....	13
Figura 9 - Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede.....	13
Figura 10 - Função Fluxo dos produtos.....	14
Figura 11 - Dimensão e forças atuantes no silo.....	20
Figura 12 - Formas equivalentes para silos.....	22
Figura 13 - Pressão adicional no fluxo de massa.....	27
Figura 14 - Pressão normal devido ao produto dentro da tremonha.....	28
Figura 15 - Pressões do produto sobre a tremonha.....	28
Figura 16 - Cargas atuantes na tremonha.....	31
Figura 17 - Formas das secções transversais dos silos.....	33
Figura 18 - Cargas atuantes na tremonha.....	35
Figura 19 - Distribuição da pressão na tremonha.....	38
Figura 20 - Silo com enrijecedores e seus esforços de tração.....	39
Figura 21 - Esforços de tração em um silo retangular.....	39
Figura 22 - Momentos fletores em silos retangulares.....	40
Figura 23 - Conformação das paredes de silos prismáticos.....	41
Figura 24 - Disposições construtivas dos silos multicelulares.....	41
Figura 25 - Deformações e diagrama de momentos em uma célula simples de um silo multicelular.....	43
Figura 26 - Silo multicelular.....	43
Figura 27 - Esquema de carregamento de silo com 9 células.....	44
Figura 28 - Onda trapezoidal segundo eixo y.....	45
Figura 29 - Onda trapezoidal segundo eixo inclinado z.....	46
Figura 30 - Onda zigzague segundo eixo y.....	48

Figura 31 - perfil da onda zigzague com o eixo z.....	49
Figura 32 - Paredes de silos prismáticos com enrijecedores.....	50
Figura 33 - Placas com extremidades fixas.....	51
Figura 34 - Placas com extremidades apoiadas.....	51
Figura 35 - Parede do silo flexo-tracionada.....	52
Figura 36 - Distribuição de momentos e rotações nos cantos.....	55
Figura 37 - Silo multicelular com diagrama dos esforços.....	56
Figura 38 - Silo multicelular em linha com diagrama dos esforços.....	57
Figura 39 - Silo multicelular com células carregadas alternadamente.....	58
Figura 40 - Proporção de momento devido à célula cheia no centro.....	59
Figura 41 - Silos multicelulares com células de dimensões diferentes.....	60
Figura 42 - Vista e dimensões do silo estudado.....	63
Figura 43 - Extensômetros elétricos utilizados.....	64
Figura 44 - Transdutores de deslocamento utilizados.....	64
Figura 45 - Sistema de aquisição de dados.....	65
Figura 46 - Aparelho de cisalhamento de Jenike.....	65
Figura 47 - Soja peletizada usada nos ensaios.....	66
Figura 48 - Pontos de coleta de dados.....	68
Figura 49 - Posicionamento dos extensômetros.....	68
Figura 50 - Curva granulométrica da soja em pelets.....	70
Figura 51 - Curvas de pressões normais estáticas para a Parede I.....	73
Figura 52 - Curvas de pressões normais dinâmicas para a Parede I.....	73
Figura 53 - Curvas de pressões normais estáticas para a Parede II.....	74
Figura 54 - Curvas de pressões normais dinâmicas para a Parede II.....	74
Figura 55 - Tensões nas Paredes I e II na Fase Instantânea.....	77
Figura 56 - Particularidades do fluxo em paredes zigzague.....	77
Figura 57 - Tensões nas Paredes I e II na Fase 24 horas.....	79
Figura 58 - Tensões nas Paredes I e II na Fase 48 horas.....	80
Figura 59 - Tensões no carregamento da Fase Instantânea na Parede I.....	82
Figura 60 - Tensões no descarregamento da Fase Instantânea na Parede I.....	82
Figura 61 - Tensões no carregamento da Fase Instantânea para a Parede II.....	83
Figura 62 - Tensões no descarregamento na Fase Instantânea para a Parede II.....	83
Figura 63 - Tensões no carregamento da Fase 24 horas para a Parede I.....	84

Figura 64 - Tensões no descarregamento da Fase 24 horas para a Parede I.....	84
Figura 65 - Tensões no carregamento da Fase 24 horas para a Parede II.....	85
Figura 66 - Tensões no descarregamento da Fase 24 horas para a Parede II.....	85
Figura 67 - Tensões no carregamento da Fase 48 horas para a Parede I.....	86
Figura 68 - Tensões no descarregamento da Fase 48 horas para a Parede I.....	86
Figura 69 - Tensões no carregamento da Fase 48 horas para a Parede II.....	87
Figura 70 - Tensões no descarregamento da Fase 48 horas para a Parede II.....	87
Figura 71 - Deslocamentos na Parede I na Fase Instantânea.....	88
Figura 72 - Deslocamentos na Parede II na Fase Instantânea.....	89
Figura 73 - Deslocamentos na Parede I na Fase 24 horas.....	90
Figura 74 - Deslocamentos na Parede II na Fase 24 horas.....	90
Figura 75 - Deslocamentos na Parede I na Fase 48 horas.....	91
Figura 76 - Deslocamentos na Parede II na Fase 48 horas.....	91



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação geométrica dos silos de acordo com a relação H/D_c	05
Tabela 2 - Propriedades de fluxo de produtos sólidos.....	15
Tabela 3 - Limites extremos das propriedades de fluxo para o cálculo das pressões....	17
Tabela 4 - Classificação e combinação das ações.....	17
Tabela 5 - Coeficientes de ponderação dos estados limites para o projeto de silos.....	19
Tabela 6 - Secção transversal e seus respectivos raios hidráulicos.....	23
Tabela 7 - Valores máximos para os cantos e momentos nos vãos para silos multicelulares.....	44
Tabela 8 - Coeficiente de proporcionalidade para placas com extremidades fixas.....	51
Tabela 9 - Coeficiente de proporcionalidade para placas com extremidades apoiadas.	52
Tabela 10 - Níveis de carga utilizados nos ensaios de pré-cisalhamento e cisalhamento.....	67
Tabela 11 - Propriedades de fluxo obtidas para a soja em pelets.....	71
Tabela 12 - Valores de K e C adotados para os cálculos.....	73
Tabela 13 - Coeficientes de sobretensão para o descarregamento.....	80

LISTA DE SÍMBOLOS

- H - altura efetiva do produto armazenado (m);
D_c - diâmetro do silo inscrito em uma circunferência (m);
Ø_r - ângulo de repouso (°);
γ - peso específico consolidado (kN/m³);
σ - tensão normal (kPa);
τ - tensão de cisalhamento (kPa);
Ø - ângulo de atrito interno (°);
Ø_i - limite inferior do ângulo de atrito interno (°);
Ø_s - limite superior do ângulo de atrito interno (°);
δ - ângulo efetivo de atrito interno (°);
δ_i - limite inferior do ângulo efetivo de atrito interno (°);
δ_s - limite superior do ângulo efetivo de atrito interno (°);
Ø_w - ângulo de atrito interno do produto com a parede (°);
Ø_{wi} - limite inferior do ângulo de atrito interno do produto com a parede (°);
Ø_{ws} - limite superior do ângulo de atrito interno do produto com a parede (°);
FF - função fluxo do produto;
ff - fator fluxo da tremonha;
YL - lugar geométrico de deslizamento;
EYL - lugar geométrico efetivo de deslizamento;
WYL - lugar geométrico de deslizamento da parede;
μ - coeficiente de atrito;
P_N - pressão normal à parede (kN);
P_h - pressão horizontal no silo (kPa);
P_{hc} - pressão horizontal de carregamento no silo (kPa);
P_{hd} - pressão horizontal de descarregamento no silo (kPa);
P_v - pressão vertical no silo (kPa);
P_{vc} - pressão vertical de carregamento no silo (kPa);
P_{vd} - pressão vertical de descarregamento no silo (kPa);
P_w - pressão de atrito no silo (kPa);
P_w - pressão de atrito de carregamento no silo (kPa);

- P_w - pressão de atrito de descarregamento no silo (kPa);
 R - raio hidráulico (m);
 P - perímetro da secção transversal do silo (m);
 z - profundidade da massa armazenada (m);
 k - coeficiente de pressão (P_h/P_v);
 a - lado menor do silo retangular (m);
 b - lado maior do silo retangular (m);
 R_a - raio hidráulico para o lado “a” em um silo retangular (m);
 R_b - raio hidráulico para o lado “b” em um silo retangular (m);
 T_a - força de tração na parede menor (N);
 T_b - força de tração na parede maior (N);
 P_a - pressão na parede menor (N);
 P_b - pressão na parede maior (N);
 C - coeficiente de sobrepressão no descarregamento;
 C_h - coeficiente de sobrepressão horizontal no descarregamento;
 C_v - coeficiente de sobrepressão vertical no descarregamento;
 C_w - coeficiente de sobrepressão de atrito no descarregamento;
 e - excentricidade do orifício de descarga;
 t - espessura da parede do silo (mm);
 Sup - parte superior da onda da parede;
 Inf - parte inferior da onda da parede;
 M - momento fletor nas paredes (Nm);
 M_c - momento fletor nos cantos (Nm);
 I - momento de inércia (m^4);
 L - comprimento do perfil da conformação da parede (m);
 L_c - comprimento do perfil reto da conformação da parede (m);
 L_i - comprimento do perfil inclinado da conformação da parede (m);
 W - momento resistente (m^3);
 A - área do perfil da conformação (m^2);
 ϵ - deformação ($\mu strain$);
 ν - coeficiente de Poisson;

INTRODUÇÃO

A cada dia o Brasil tende a se consolidar no mercado mundial como uma forte econômica devido à adoção de uma política agressiva de produção e exportação agrícola, tendo como principais produtos de comércio: grãos (a soja em destaque), carnes bovina, suína, avícola e seus subprodutos.

Em relação às carnes, para que o país possa manter-se economicamente competitivo, é necessário que ações visando uma melhoria na qualidade alimentar dos animais sejam implementadas não somente no que diz respeito as suas características nutricionais, mas também, aos métodos de elaboração, conservação e distribuição. Dificilmente, sem a industrialização destes processos o Brasil terá condições de concorrer em par de igualdade com países mais desenvolvidos.

Diante desta necessidade, surge a importância do país em dominar a tecnologia de construção de silos muitos deles utilizados em fábricas de rações espalhadas pelo território nacional, sendo estas mesmas fábricas as responsáveis por abastecer outras unidades agrícolas e, assim, dar seguimento ao restante da cadeia de produção animal.

Conforme Nascimento (1996), tais fábricas necessitam basicamente de dois tipos de silos: um para produtos granulares e outro para produtos pulverulentos. O primeiro normalmente não apresenta problemas com relação ao fluxo, enquanto que o segundo exige fluxo controlado.

Calil Junior (1999) cita que o primeiro objetivo em um projeto de células de armazenamento é assegurar que o produto armazenado fluirá devido à ação gravitacional sem a ocorrência de obstruções do fluxo.

Ao se armazenar um produto de característica pulverulenta, é possível que no carregamento do silo ocorra compactação e segregação do produto com posterior formação de abóbadas e arcos. Tais elementos, no processo de descarregamento, são responsáveis por gerar grandes pressões devido a seu desprendimento abrupto ocasionando, assim, avarias nas paredes e fundo do silo e danos aos equipamentos de carga e descarga (RAVENET, 1983).

Sabe-se, hoje, que as novas fábricas de ração possuem forte tendência à arquitetura vertical devido à valorização da ocupação espacial forçada pelo crescimento desordenado das cidades aliado a carência de maior facilidade e rapidez nas etapas de produção interna para atender a crescente demanda do mercado em expansão.

Contudo, pouco se conhece sobre a utilização de silos em fábricas de ração no Brasil sob o âmbito técnico dado a vasta complexidade do tema e a escassez de material bibliográfico acessível aos profissionais responsáveis por projetar e construir tais unidades.

Com isso, a adoção de silos verticais prismáticos de paredes conformadas desponta como grande alternativa de reformulação do conceito de fábricas de ração por atender tanto as exigências espaciais quanto ao que diz respeito aos processos produtivos. Troitsky (1982) cita que silos prismáticos (retangulares e quadrados) podem ser projetados como tendo uma única célula (Figura 1a), uma seqüência de células (Figura 1b) ou sendo multicelulares (Figura 1c). Podem, devido às exigências de projeto, também serem constituídos de uma combinação entre células retangulares e quadradas (Figura 1d).

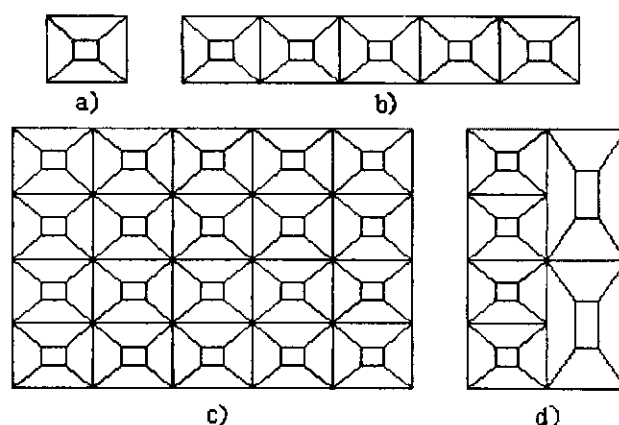


Figura 1 - Tipos de silos prismáticos (TROITSKY, 1982)

Estruturas com tais características geométricas podem ser mais vantajosas frente a outros modelos pelo fato de poderem ser multicelulares facilitando a transilagem, proporcionando maior facilidade de manejo dos equipamentos e precisão na confecção das rações.

Sabe-se, também, que silos prismáticos de paredes conformadas apresentam facilidade de construção já que suas paredes são dobradas e não curvadas como em outros modelos não exigindo, portanto, equipamentos industriais específicos para sua confecção.

Desta forma, podem-se reduzir os custos de instalação e produção de uma fábrica de alimentação animal uma vez que o silo poderia ser construído fora dos grandes centros industriais do país (Sul e Sudeste) e mais perto de outras fontes de consumo, como no caso da Região Nordeste. Brown & Nielsen (1998) confirmam que os custos de fabricação e transporte podem ser reduzidos pelo fato do processo de confecção das paredes ser mais simplificado.

Apesar das vantagens apresentadas, silos verticais prismáticos ainda são pouco utilizados, parte devido ao simples desconhecimento de suas vantagens, parte em razão da escassez de conhecimentos técnicos necessários ao seu projeto e construção.

O projeto e comportamento de silos retangulares ou quadrados são muito diferentes dos silos cilíndricos. A relação pressão-deslocamento, sua interação e importância no comportamento de silos prismáticos ainda são pouco compreendidas. Características as quais podem ser significantes para um projeto adequado de silos prismáticos são freqüentemente negligenciadas em favor de projetos mais conservadores (BROWN & NIELSEN, 1998).

Assim sendo, a presente pesquisa teve como objetivos estudar o comportamento estrutural das paredes de um silo metálico prismático de configuração zig-zague e comparar os resultados obtidos com teorias e pesquisas existentes contribuindo, assim, para um melhor entendimento de seu comportamento estrutural quando em situações de uso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Silos: Definições e Conceitos

Denomina-se Silo toda construção destinada ao armazenamento de produtos sólidos, entretanto, sua definição sempre esteve associada à idéia de depósito agrícola cuja única finalidade seria de estocar e conservar apenas cereais e forragens. Em seu livro "Abastecimento e Armazenagem de Grãos", Puzzi (2000) referencia que tais construções apresentam como objetivo armazenar grãos a granel.

Com o movimento crescente da industrialização mundial em termos de capacidade e diversidade de produção, viu-se a necessidade de importar a utilização dos silos dos campos para os pátios das indústrias englobando, a partir desse momento, a possibilidade de armazenamento de produtos oriundos de indústrias de fiação, de carburetos e aços, da construção civil e farmacêuticas, entre outras.

Em sua conceitualização, Freitas (2001) é mais detalhista ao enunciar que *silo* é um termo genérico indicado para designar toda e qualquer construção cuja finalidade seja de armazenar produtos granulares ou pulverulentos, podendo a mesma ser equipada com dispositivos de carregamento e que seja capaz de ser esvaziada por gravidade, preferencialmente, ou através de meios mecânicos ou pneumáticos.

Internacionalmente, tais estruturas recebem diversas denominações sendo as mais comuns *bins* e *bunkers* cujas definições se apresentam bastante confusas e variadas de acordo com o país ou autor que as utilize. Safarian & Harris (1985) afirmam que os termos *silo*, *bin* e *bunker* possuem diferentes significados em diferentes partes do mundo e variam de autor para autor. Nos Estados Unidos, por exemplo, o termo *bin* engloba ambas as denominações silo e bunker fazendo-se uma pequena subdivisão ao nomear silo àquele bin cuja relação altura/diâmetro seja elevada e bunker aquele de baixa relação altura/diâmetro.

2.2 Classificação geométrica dos silos

Entre grande parte dos pesquisadores não existe perfeita concordância sobre os parâmetros definidores de classificação podendo os mesmos serem discriminados de acordo com sua geometria, tipo de fluxo desenvolvido no processo de descarregamento, geometria do fluxo e tipo de fundo. Para a norma australiana AS 3774 (1990), os silos podem ainda ser classificados em função da rugosidade interna do material de composição das paredes, da flexibilidade circunferencial das paredes, da continuidade das paredes na direção vertical, da configuração do orifício de descarga e das razões de escolha de cada fluxo.

Sabe-se que os silos também são diferenciados conforme sua construção ao nível do solo sendo considerado silo elevado aquele cuja altura é maior que o diâmetro e silo horizontal (conhecido como armazém graneleiro) aquela construção cuja dimensão da altura seja menor que a base (PUZZI, 2000).

Calil Junior (1990) acrescenta que os silos podem ser distribuídos em função de seu material de construção (madeira, alvenaria armada, fibra de vidro, concreto armado ou protendido, argamassa armada, e chapas metálicas) e em razão de sua forma geométrica (circular, quadrada, retangular ou outras).

Dentre os diversos parâmetros de classificação dos silos, é aceito por grande maioria das normas existentes sua diferenciação conforme geometria espacial, sendo observado a relação entre a altura efetiva do produto armazenado (H) e o maior diâmetro inscrito em uma circunferência (D_c). Entretanto, observam-se grandes variações em seus valores conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação geométrica dos silos de acordo com a relação H/D_c (GOMES, 2000)

Norma	Classificação		
	Baixo	Medianamente esbelto	Esbelto
AS 3774(1990)	$H/D_c < 1$	$1 \leq H/D_c \leq 3$	$H/D_c > 3$
EUROCODE I (1995)	$H/D_c < 1,5$	---	$H/D_c \geq 1,5$
ISO 11697 (1995)	$H/D_c \leq 2$	----	$H/D_c > 2$
ACI (1991)*	$H/D_c < 2,5\mu$	$2,5\mu \leq H/D_c \leq 5\mu$	$H/D_c > 5\mu$
DIN 1055 (1987)*	$H/D_c \leq 1,5$	----	$H/D_c > 1,5$
BMHB (1985)	$H/D_c \leq 0,75$	---	$H/D_c > 0,75$
CFBC (1983)	$H/D_c < 2,5$	----	$H/D_c \geq 2,5$
SNBATI (1975)			

*Não possui esta classificação. No cálculo teórico das pressões há diferenciação quando o silo tem a relação geométrica indicada.

Nota-se que para a norma inglesa BMHB (1985), um silo cuja relação $H/D_c \leq 1,5$ é classificado com baixo enquanto que, para as normas ISO 11697 (1995) e EUROCODE 1 (1995), tal estrutura passa a ser denominada como esbelta. Segundo Safarian & Harris (1985), entre os pesquisadores também não há concordância em relação ao que seja um silo baixo, medianamente esbelto e esbelto.

Alguns fazem essa classificação em relação às proporções da construção e outros em relação à posição do plano de ruptura do produto. Esta classificação em relação ao plano de ruptura é dada pela teoria de Coulomb. Desconsiderando o atrito com a parede, para o caso de uma parede vertical e superfície de topo horizontal, o plano de ruptura de Coulomb define-se entre o ângulo de repouso (ϕ_r) e a parede vertical. Para Safarian & Harris (1985), o ângulo de ruptura deveria ser dado por $(45^\circ - \phi_r/3)$ em lugar da definição clássica $(45^\circ - \phi_r/2)$, como observado na Figura 2a. Se o plano de ruptura intercepta o topo da superfície do produto armazenado, o silo é considerado baixo, caso contrário é considerado esbelto. Todavia, muitos pesquisadores não concordam com o local do plano de ruptura. Alguns poderiam analisar o plano de ruptura partindo do fundo da tremonha (ponto C da Figura 2b), enquanto outros adotariam o ponto D, no fundo da parede vertical. Assim, de acordo com cada interpretação, o mesmo silo poderia ser considerado baixo por alguns autores e esbelto por outros.

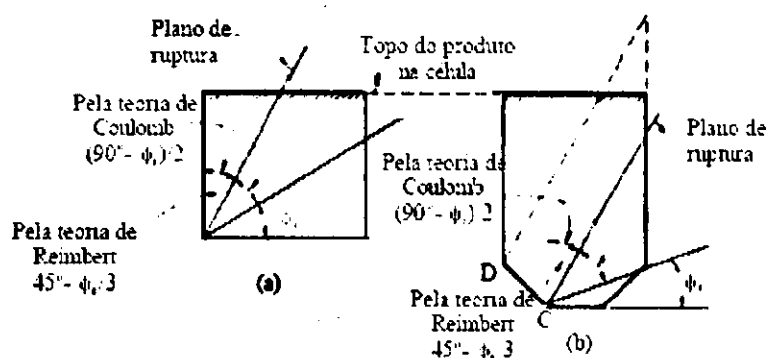


Figura 2 - Classificação geométrica dos silos segundo plano de ruptura (SAFARIAN & HARRIS, 1985)

2.3 Modelos de fluxo e sua variação com a geometria do silo

Sabe-se que o tipo de fluxo desenvolvido por um sólido está intimamente relacionado com as características geométricas do silo e pode, segundo Calil Junior (1990), caracterizar o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de estagnação de movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. A forma como um produto

escoa por gravidade em um silo é restringido, por um lado, pelas próprias propriedades físicas do produto e, por outro, pela geometria e estrutura da superfície de contato (atrato com a parede) da tremonha.

Durante o descarregamento de um silo, Brown & Nielsen (1998) citam que podem ser observados 5 zonas de fluxo definidas: ao longo da zona A, as partículas fluem livremente. Tal movimentação influencia a ocorrência de um escoamento desacelerado e na forma de blocos na zona B. Tão logo as partículas ou camadas em movimento alcancem o campo C, elas sofrem uma aceleração e, na zona D, perdem contato com a vizinhança caindo livremente. A zona E permanece quase que totalmente estática durante todo o processo (Figura 3).

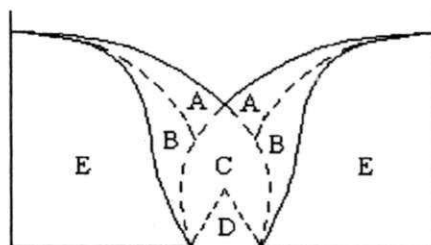


Figura 3 - Zonas de fluxo de sólidos (BROWN & NIELSEN, 1998)

Contudo, a Figura 3 é derivada de observações visuais não existindo, até o momento, modelos físicos capazes de prever com exatidão as características de fluxo assumidas pelo produto no processo de movimento em um silo. Ooi et al. (1998) citam que a caracterização do tipo de fluxo torna-se difícil já que o movimento não pode ser facilmente detectado do lado externo da estrutura em virtude da opacidade do material de construção do silo em escala real, e que em laboratório os modelos em escala reduzida muitas vezes não representam o verdadeiro fenômeno em um silo de escala industrial.

Segundo definições de Jenike (1964), existem dois modelos básicos de fluxo a serem considerados sendo conhecidos como:

- Fluxo de funil: aquele ao qual apenas parte do produto entra em movimento através de um canal vertical (efeito tubo) formado no interior do silo. O fluxo de funil tende a ocorrer quando as paredes da tremonha são rugosas e seu ângulo de inclinação com a vertical é elevado (Figura 4);
- Fluxo de massa: aquele ao qual o produto entra substancialmente em movimento em todas as partes do silo no momento do processo de descarregamento ocorrendo

quando as paredes da tremonha são suficientemente inclinadas e lisas e não existem abruptas transições (Figura 4).

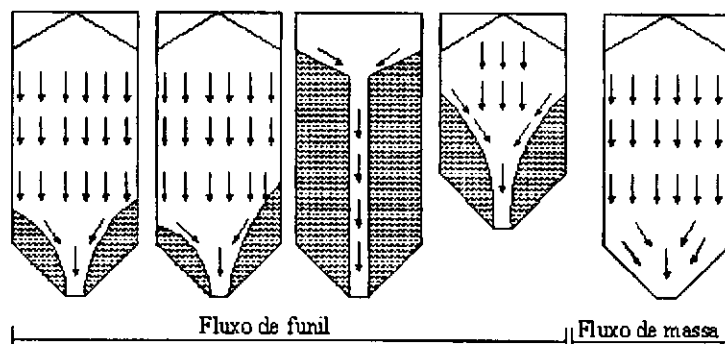


Figura 4 - Modelos básicos de fluxo de produtos sólidos (DIN 1055, 1987)

Algumas normas, a exemplo da DIN 1055 (1987), permitem a determinação do tipo de fluxo a ser desenvolvido em uma célula de armazenagem através da análise gráfico do coeficiente de atrito e ângulo de inclinação da tremonha fazendo ainda, distinção entre tremonhas cônicas e em forma de cunha (Figura 5).

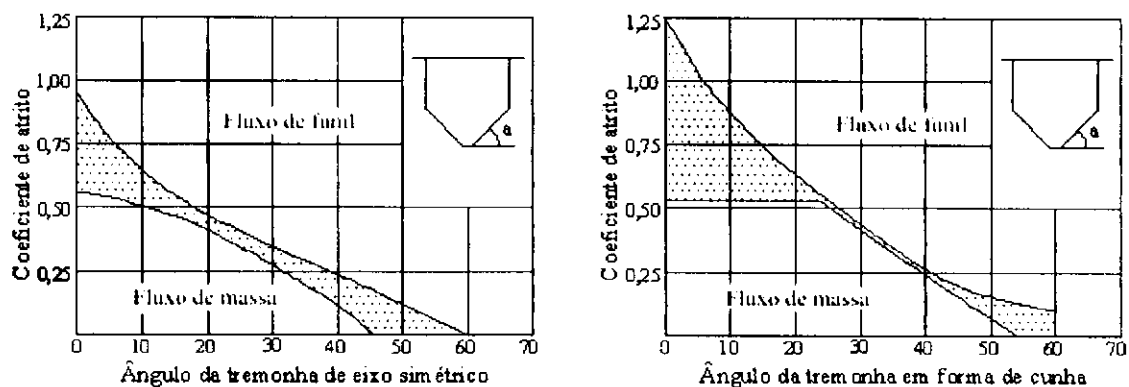


Figura 5 - Determinação gráfica do tipo de fluxo (DIN 1055, 1987)

Roberts (1987) acrescenta que os limites do fluxo de massa e fluxo de funil dependem do ângulo de atrito interno, do ângulo de inclinação da tremonha e do ângulo efetivo de atrito interno do produto a ser armazenado (Figura 6).

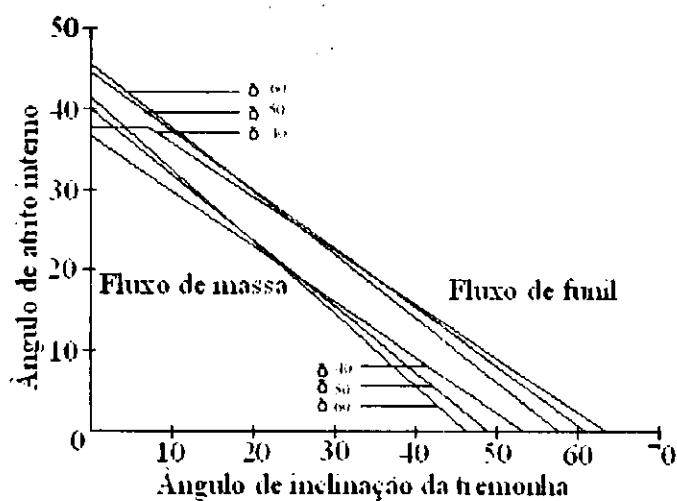


Figura 6 - Limites para o fluxo de massa e funil (ROBERTS, 1987)

De modo geral, Calil Junior (1990) cita que o fluxo de massa deve ser escolhido se: a vazão de descarga for controlada sem indevidas flutuações; a segregação nas partículas obtidas puder ser minimizada; o tempo de armazenamento no silo não for indevidamente prolongado ou se o local escolhido for adequado para tremonha cujos lados sejam muito inclinados. Para o fluxo de funil, faz-se recomendação se: as vantagens acima citadas não forem de particular importância; se as flutuações na vazão de descarga, segregação de partículas e prolongado tempo de armazenagem não forem consideradas desvantagens; se o local escolhido apresentar restrições espaciais; se forem necessárias saídas múltiplas ou se o material contiver partículas grandes que possam obstruir o fluxo.

De acordo com a variação geométrica do silo, o fluxo de um produto pode assumir diferentes trajetórias podendo-se destacar (AS 3774, 1990):

- Trajeto assimétrico: o centro de gravidade do produto fluindo coincide aproximadamente com o eixo vertical do silo, por exemplo, silo circular com abertura de descarga concêntrica (Figura 7a).
- Trajeto planar: é um fluxo uniforme que ocorre em silos de seção transversal retangular ou quadrada, com tremonhas em forma de cunha, onde uma das dimensões da boca de saída é paralela e de igual comprimento às paredes do silo. Neste caso, o canal do fluxo é simétrico em relação ao plano que passa pelo eixo longitudinal da abertura de saída (Figura 7b).

- Trajeto excêntrico: o canal do fluxo não é simétrico em relação ao eixo vertical do silo, ou em relação ao plano vertical que passa pelo eixo longitudinal do silo (Figura 7c).

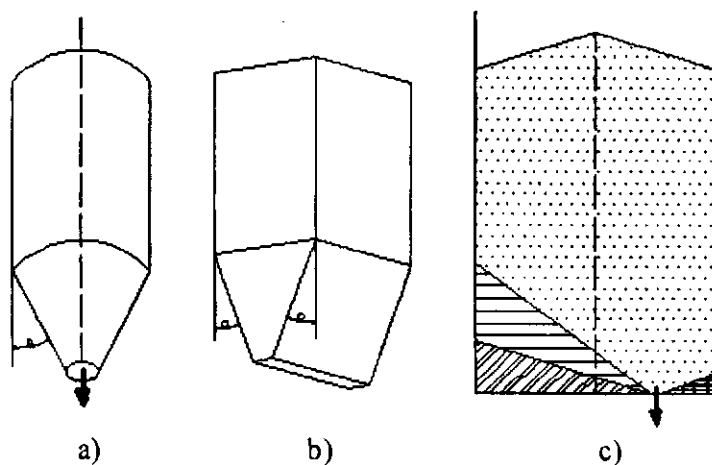


Figura 7 - Variação geométrica dos silos e sua influência no fluxo (AS 3774, 1990)

2.4 Propriedades de fluxo dos sólidos armazenáveis

As características dos sólidos apresentam grande influência nas pressões exercidas nas paredes e fundo de um silo assim como no modelo de fluxo ocorrente, entretanto, pouco se conhece sobre as reais propriedades influentes e seus valores.

Dentre os fatores que influenciam no tipo de fluxo a ser desenvolvidos por produtos sólidos em condição de armazenagem, destacam-se a dimensão das partículas, a temperatura, o teor de umidade do produto e o tempo de armazenamento (CALIL JUNIOR, 1984).

Conforme Calil Junior (1990), o fluxo de um sólido decresce com o aumento do teor de umidade, alcançando um valor máximo de aproximadamente 80 a 90% de saturação. Acima deste teor de umidade, o sólido adquire propriedades viscosas, e testes de cisalhamento podem ser inaplicáveis.

A determinação das propriedades de fluxo é importante por afetar intrinsecamente o comportamento do sólido durante a armazenagem, movimentação e processamento (FITZPATRICK et al., 2004).

Erroneamente, associam-se o comportamento dos sólidos nos silos aos de líquidos cujos mecanismos de fluxo diferem-se grandemente entre si. Roberts (1987) descreve que sólidos podem transferir esforços de cisalhamento quando em condição estática; que quando comprimidos, desenvolvem coesão conservando sua forma e que os esforços de cisalhamento

são dependentes das pressões atuantes no sólido enquanto que para líquidos, os esforços são dependentes da razão de cisalhamento e não das pressões.

A caracterização do produto a armazenar consiste em determinar suas propriedades físicas. É o primeiro passo para o projeto de fluxo do produto e cálculo estrutural dos silos, devendo ser realizado em condições mais severas daquelas que podem ocorrer no silo (FREITAS, 2001).

Quanto às suas determinações, Jenike (1980) deu grande contribuição científica ao desenvolver um aparelho de cisalhamento direto apropriado para produtos a serem armazenados denominado de “Jenike Shear Cell” sendo possível determinar as tensões sob as quais o produto estará sujeito durante o armazenamento e as condições de fluxo previstas para acontecer no silo.

Com o aparelho de Jenike, a determinação das propriedades de fluxo, de produtos coesivos ou não, e o desenvolvimento dos critérios de projeto dependem do conhecimento do lugar geométrico da tensão de cisalhamento versus a tensão normal para o produto deslizando sobre si mesmo e sobre a parede do silo. Por meio deste equipamento pode ser determinada a tensão sob as quais o produto estará sujeito durante o armazenamento e as condições de fluxo previstas para acontecer no silo (CALIL JUNIOR, 1990).

Desta forma, podem-se determinar os seguintes parâmetros:

- Peso específico consolidado (γ);
- Ângulo de atrito interno (θ);
- Ângulo efetivo de atrito interno (δ);
- Ângulo de atrito interno do produto com a parede (θ_w);
- Função Fluxo (FF) e;
- Fator fluxo da tremonha (ff).

2.4.1 Peso específico consolidado (γ)

Conforme Calil Junior (1984), a densidade do produto não pode ser usada como um fator de fluxo por não existir relação direta entre fluxo e densidade. Entretanto, a densidade de um produto precisa ser calculada, pois é um parâmetro importante para determinação do fluxo e das pressões em silos. Produtos pulverulentos de baixo peso específico têm a vantagem de fluir com menor resistência à compactação na tremonha, mas tem a desvantagem da inércia em repouso e uma alta resistência ao ar. Um produto pulverulento de alto peso específico pode compactar para uma maior resistência na tremonha, mas terá uma baixa inércia em

repouso. O produto granular não é tão compressível e então não ganha muita resistência em seu orifício de descarga do silo.

São definidos basicamente três diferentes valores de densidade, chamadas, “solta”, “compacta” e “acrada”, para os quais são usados os seguintes símbolos γ , γ_u e γ_a , respectivamente. O valor determinado na célula de cisalhamento corresponde à densidade compacta, (γ_u). Quando só um valor (γ) é disponível, então γ_a deverá ser tomado como $0,75\gamma$ e γ_u como $1,25\gamma$. O valor inferior, isto é, γ ou γ_a , deve ser na estimativa da capacidade de armazenamento do silo (CALIL JUNIOR, 1990).

2.4.2 Ângulo de atrito interno (θ) e Ângulo efetivo de atrito interno (δ)

Para uma dada condição de consolidação, o lugar geométrico de deslizamento de produtos granulares de fluxo livre sobre si mesmo é a reta obtida pelo cisalhamento de uma amostra do produto sob várias cargas normais. Com as tensões principais σ_1 e σ_2 atuantes em um elemento do produto armazenado para uma dada condição de consolidação, é construído o respectivo círculo de Mohr. A reta que tangencia todos os círculos é então chamada de lugar geométrico de deslizamento do produto (YL). O ângulo de inclinação dessa reta que, para produtos de fluxo livre passa pela origem, é então chamado de ângulo de atrito interno do produto (θ) (FREITAS, 2001).

Quando o produto não é de fluxo livre, a reta construída da forma acima indicada não passa pela origem. Nesse caso, a ordenada na qual essa reta corta o eixo vertical (eixo das ordenadas) é denominada de coesão (C). O ângulo de inclinação dessa reta é ainda o ângulo de atrito interno, mas a reta que passa pela origem e tangencia o círculo de Mohr definido pela maior e menor tensão principal é então denominada de lugar geométrico efetivo de deslizamento (EYL) e o respectivo ângulo de inclinação denominado ângulo efetivo de atrito interno (δ).

Segundo Nascimento & Calil Junior (1998), desde que as tangentes às curvas do YL ao círculo de Mohr tendam a ser incertas, o ângulo efetivo de atrito interno é na prática sempre construído com uma linha entre a origem e o ponto final do lugar efetivo de deslizamento (EYL).

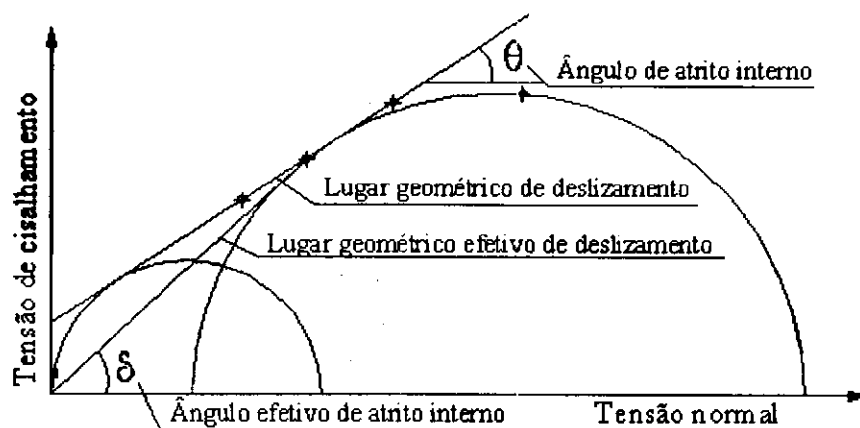


Figura 8 - Lugares geométricos e ângulos de atrito interno (CALIL JUNIOR 1990)

2.4.3 Ângulo de atrito interno do produto com a parede (θ_w)

O critério para condições de deslizamento do produto ao longo da parede pode ser expresso como a relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal à parede, chamada de lugar geométrico de deslizamento na parede (WYL).

O atrito entre o produto e a parede do silo ocorre quando este desliza ao longo da parede. A relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal à parede formará uma reta que definirá o lugar geométrico de deslizamento com a parede (WYL). A sua inclinação será o ângulo de atrito do produto com o material da parede do silo (BENINK, 1989).

O lugar geométrico de deslizamento na parede, WYL, para produtos de fluxo livre, pode ser obtido por uma linha direta que passa pela origem, como mostrado pela linha "a" na Figura 9. No caso de produtos coesivos, o WYL é uma linha direta com uma ordenada C_w , como ilustrado pela linha "b". Em alguns casos, a combinação entre a parede e o produto não segue exatamente este conceito ideal e um WYL um pouco curvado é obtido, como dado pela linha "c". O ângulo de inclinação da reta que define o lugar geométrico de deslizamento da parede é denominado ângulo de atrito do produto com a parede (θ_w).

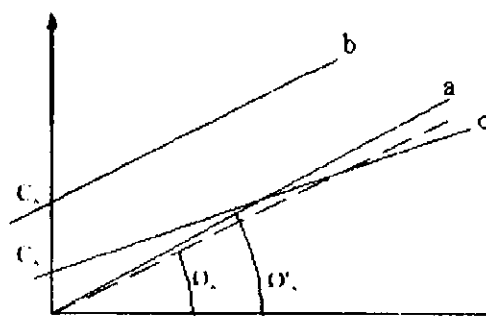


Figura 9 - Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede (ROBERTS, 1987)

2.4.4 Função Fluxo (FF)

A função Fluxo de um produto é um gráfico no qual é plotado a tensão incondfinada de deslizamento do produto versus o maior valor de tensão de consolidação e representa o esforço atuante no produto quando em situação de consolidação (FITZPATRICK et al., 2004). A reta mais próxima à condição horizontal representa um produto de fácil escoabilidade enquanto que, seguindo uma direção anti-horária, tal produto tende a apresentar maior resistência ao escoamento (Figura 10).

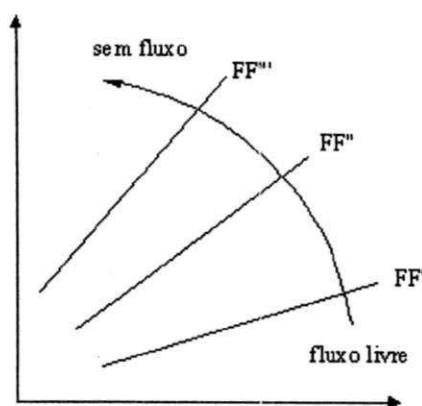


Figura 10 - Função Fluxo dos produtos (FITZPATRICK et al., 2004)

Calil Junior (1989) define Função Fluxo (FF) como sendo uma relação entre a resistência e pressões de consolidação atuantes em uma massa armazenada. A função fluxo é uma medida da escoabilidade do produto e pode ser utilizada para obtenção da abertura mínima de descarga em um silo para prevenir o arqueamento (BENINK, 1989).

2.4.5 Fator fluxo da tremonha (ff)

De acordo com Calil Junior (1990), o fator fluxo da tremonha (ff) é uma função da forma da tremonha e das propriedades do produto armazenado e pode ser determinado com boa aproximação pelas equações:

$$ff = \frac{Y(1 + \text{sen}\theta)}{2(X-1)F(\theta)\cos(\theta)} \quad (\text{Eq. 01})$$

$$Y = \left[\frac{(2 - 2\cos\alpha)^m (a^{1-m}) (\cos\theta) + (\text{sen}\beta)(\text{sen}\alpha)^{1+m}}{(1 - \text{sen}\theta)(\text{sen}\alpha)^{2+m}} \right] \quad (\text{Eq. 02})$$

$$X = \left[\frac{2^m \operatorname{sen} \theta}{1 - \operatorname{sen} \theta} \right] \left[\frac{\operatorname{sen}(\alpha + \beta) + \cos \theta}{\cos \theta} \right] \quad (\text{Eq. 03})$$

$$\alpha = \beta + 90 - \theta \quad (\text{Eq. 04})$$

$$F(\theta) = \left(\frac{65}{220 - \theta} \right)^m \left(\frac{200}{290 - \theta} \right)^{1-m} \quad (\text{Eq. 05})$$

$$m = 1 \text{ (eixo simétrico)}$$

$$m = 0 \text{ (retangular } L \geq 30)$$

Ainda conforme Calil Junior (1990), o f indica a escoabilidade do produto na tremonha; quanto menor este valor, melhor será a tremonha.

São apresentadas, em algumas normas, as propriedades de fluxo de certos produtos sólidos armazenáveis como descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades de fluxo de produtos sólidos (DIN 1055, 1987)

Produto	γ	\emptyset	Coeficiente de atrito interno		
			Canaletas	Rugosa	lisa
Cimento	16	27	0,5	0,45	0,4
Farinha	7	42	0,5	0,35	0,25
Milho	8	30	0,6	0,4	0,25
Trigo	9	30	0,6	0,4	0,25
Cevada	8	27	0,5	0,35	0,25
Açúcar	9	30	0,55	0,5	0,45
Clinker	18	36	0,6	0,55	0,45
Cal	6	25	0,5	0,4	0,35
Areia	16	36	0,6	0,5	0,4
Fosfatos	22	27	0,55	0,5	0,4
Carvão	10	30	0,6	0,5	0,45
Soja	8	25	0,5	0,4	0,45
Calcário	13	27	0,55	0,5	0,25
Beterraba	7	30	0,55	0,45	0,4
Batata	8	30	0,5	0,4	0,35
Carvão em pó	8	25	0,55	0,5	0,4

γ - Peso específico (kN/m³)

\emptyset - Ângulo de atrito interno (°)

2.5 Projeto das ações em silos verticais

Roberts (1987) recomenda quatro etapas distintas para o desenvolvimento de um projeto de silo:

- Determinação dos esforços atuantes no silo e das propriedades do sólido a ser armazenado para as piores condições prováveis de ocorrência em situações práticas;
- Determinação das dimensões do silo de acordo com a quantidade de produto a ser armazenado a fim de propiciar características de fluxo desejáveis assegurando desta forma, descargas seguras e controláveis;
- Avaliação das cargas exercidas nas paredes dos silos e dos carregadores em condições operacionais e;
- Projeto detalhado da estrutura do silo.

Para avaliação das ações, recomenda-se um estudo detalhado da norma NBR 8681 (1984) que as classifica da seguinte forma:

- Ações permanentes (A): consiste nas ações decorrentes do peso próprio da estrutura e dos equipamentos instalados na cobertura e/ou tremonha;
- Ações variáveis (B): são as cargas ocasionadas pelo carregamento e fluxo do produto armazenado; sobrecargas de serviço de pisos e cobertura; forças das correias transportadoras fixadas à estrutura do silo; pressão ou sucção interna dos gases; forças de contenção lateral; força de fixação de elementos externos na estrutura e ação do vento. Além disso, devem ser consideradas as ações variáveis especiais (C) como ação da temperatura (efeitos climáticos e armazenamento de produtos quentes); efeitos de recalques diferenciais da fundação; expansão do produto no descarregamento, vibração de equipamentos e;
- Ações excepcionais (D): devem ser consideradas como ações excepcionais o possível impacto de veículos e pressões devidas a explosões de pós.

Conforme Calil Junior (1990), as ações devidas ao produto armazenado apresentam-se variáveis espacial e temporariamente não podendo, portanto, serem determinadas com exatidão. Nota-se, assim, que as teorias existentes que regem as ações em silos possuem certa fragilidade já que tais parâmetros são muitas vezes tomados como invariáveis, fato este não confirmado experimentalmente.

Ensaio em silos reais mostram que as ações devido ao armazenamento podem ser distribuídas assimetricamente e que estão sujeitas a grandes flutuações. Nenhum desses fenômenos é adequadamente considerado nas teorias de ações em silo (NASCIMENTO, 1996). No intuito de minimizar tais falhas, para efeito de cálculo das ações, recomenda-se fixar uma faixa de variação das propriedades adotando-se os valores extremos a fim de se obter as combinações críticas para cada situação. A Tabela 3 apresenta o emprego adequado dos limites das principais propriedades de acordo com o objetivo.

Tabela 3 - Limites extremos das propriedades de fluxo para o cálculo das pressões (AS 377-1990)

Aplicação da propriedade	\varnothing_w	δ	K	
Tipo de fluxo	Funil	Superior	Inferior	---
	Massa	Inferior	Superior	---
Máxima pressão horizontal	Inferior	Inferior	Superior	
Máxima pressão vertical	Inferior	Superior	Inferior	
Máxima pressão de atrito	Superior	Inferior	Superior	
Máxima pressão vertical na tremonha	Inferior	Superior	Inferior	

δ - Ângulo efetivo de atrito interno; \varnothing_w - Ângulo de atrito com a parede e; K - Relação entre pressão horizontal e vertical.

2.5.1 Combinação das ações

Para a combinação das ações ocorrentes em uma estrutura, os valores característicos superior e inferior das cargas devem ser aplicados a cada elemento estrutural considerando o estado limite último e de utilização. Na Tabela 4 pode-se observar as combinações propostas pela norma AS 3774 (1990).

Tabela 4 - Classificação e combinação das ações (AS 3774, 1990)

Classificação das ações		Descrição da ação	Combinações			
Grupo de ações	Tipo de ação		1	2	3	4
A (ação permanente)	A 1	Peso próprio do silo, estrutura de sustentação, planta mecânica e equipamentos	X	X	X	X
	B 1	Ação gravitacional do produto armazenado	X	X	X	-
	B 2	Ações iniciais nas paredes do silo	X	-	-	-
	B 3	Ação induzida pelo fluxo do produto armazenado	-	X	-	-
B (ação variável normal)	B 4	Força das correias transportadoras e carregamento atuando sobre o silo	X	X	X	-
	B 5	Ação ativa da plataforma e cobertura	X	X	X	-
	B 6	Pressão interna do gás ou sucção	-	X	-	-
	B 7	Força de contenção lateral	X	X	X	-
	B 8	Impacto causado pelo descarregamento	-	-	X	-
	B 9	Forças de fixação da estrutura	-	-	X	-
C (ações variáveis especiais)	C 1	Ação do vento	-	-	(X)	(X)
	C 2	Ação devido ao recalque diferencial da fundação	-	-	(X)	-
	C 3	Ação devido ao diferencial de temperatura	-	-	(X)	-
	C 4	Ação sísmica	-	-	(X)	-
	C 5	Expansão do produto na descarga	-	-	(X)	-
D (ações excepcionais)	D 1	Impacto do veículo	-	-	(X)	-
	D 2	Pressão de explosão de pós	-	-	(X)	-

Notas:

1 - Para combinação 3 das ações, os componentes marcados com (X) serão considerados para combinar com aqueles marcados também com X e será adotado o efeito mais desfavorável.

2 - O peso próprio da estrutura, a fixação das instalações mecânicas e dos equipamentos. A ação identificada como tipo A 1 será usada para todas as combinações; os valores superior e inferior e a alternativa mais desfavorável será adotada. A plataforma mecânica e os equipamentos instalados na cobertura ou suspensos pela tremonha serão incluídos o limite superior para verificação da resistência e do cálculo da estabilidade da estrutura.

3 - Forças induzidas na estrutura do silo pelas correias transportadoras e no carregamento serão determinadas usando-se a condição de operação mais desfavorável que ocorra. As forças de atrito induzidas pelo carregamento serão calculadas com base na pressão vertical e será incluída na pressão horizontal na tremonha. Considerar-se-á no projeto, a força de arraste longitudinal das correias transportadoras suportadas pela estrutura. Onde a força inicial for pouco desfavorável, o valor será utilizado no projeto. Quanto às vibrações e impacto transmitido à estrutura do silo proveniente da plataforma, correias e outros equipamentos, deverão ser pesquisados.

4 - Forças devido às restrições laterais de modo que o braço de apoio (contraventamento de outra estrutura; mão francesa etc.) e vigas rígidas, necessárias para propiciar estabilidade à estrutura serão incluídas no projeto da estrutura do silo.

5 - Onde a estrutura do silo é usada para dar estabilidade às galerias para o transporte de produtos ou estruturas adjacentes, as ações transmitidas para essas estruturas serão incluídas no projeto da estrutura do silo.

6 - A colisão de veículo nas colunas ou nas paredes do silo não é prevista pela medida positiva; a força de impacto determinada por uma análise dinâmica será aplicada para os suportes.

2.5.2 Coeficientes de ponderação das ações

Dois conjuntos de fatores de cargas são especificados: um conjunto para estados limites últimos e outro para estados limites de utilização. Os valores dos fatores de carga no item 4.3 refletem o conceito probabilístico do código dos estados limites últimos os quais variam de acordo com as classes de carregamento, incluída em cada combinação particular de carga desde que seja impossível abordar toda combinação de carga existente numa grande variedade

de silos; o calculista deve cuidar somente de investigar todas as condições especiais que possam aparecer e aplicar os valores apropriados dos fatores de carga. Na Tabela 5 são apresentados os valores dos estados limites últimos e de utilização para cada tipo de ação.

Tabela 5 - Coeficientes de ponderação dos estados limites para o projeto de silos (AS 3774, 1990)

Grupo e tipos de ações	Descrição	Coeficiente de Ponderação	
		Estado limite último	Estado limite de utilização
A	Ações permanentes	1,4	1,0
A 1	Ação gravitacional pelo produto armazenado	1,25	1,0
B 2 e B 3	Ação induzida na parede pelo produto	1,5	1,1
B 2 e B 3	Ação devida ao produto aplicada à estrutura de suporte	1,5	1,0
B 4 a B 9	Outras ações normais de serviços	1,8	1,1
C	Ações prováveis para combinação com ações do grupo A e B	1,4	0,9
D	Ações acidentais para combinação com ações do grupo A e B	1,25	0,8

2.6 Pressões em silos verticais

Quando uma massa granular é depositada em um silo, a pressão vertical tende a ser a maior pressão; o estado correspondente de tensão é um estado ativo correspondendo ao que se denomina pressão estática ou inicial. Quando a saída é aberta e o fluxo começa, a massa em movimento tende a se expandir verticalmente e a pressão vertical tende a se tornar a menor pressão; o estado correspondente de tensão é um estado passivo, correspondendo à chamada pressão dinâmica ou de fluxo (GAYLORD & GAYLORD, 1984).

Apesar de objeto estudo por vários pesquisadores, tanto a predição das pressões estáticas quanto dinâmicas ainda não podem ser perfeitamente estimadas, entretanto, algumas metodologias de cálculos são aceitas por apresentarem boa aproximação, sendo as mais utilizadas as equações desenvolvidas por Janssen e Reimbert.

2.6.1 Método de Janssen (TROITSKY, 1982)

Quando uma massa é depositada em um silo, teorias já desenvolvidas para contêineres não pode ser diretamente aplicada e a teoria de Rankine não é considerada inteiramente satisfatória no que se refere ao cálculo das pressões verticais e horizontais.

A teoria mais aceita é a de Janssen para a solução de problemas de cálculo das pressões que se baseia nas forças que agem em uma fatia do sólido no silo (Figura 11).

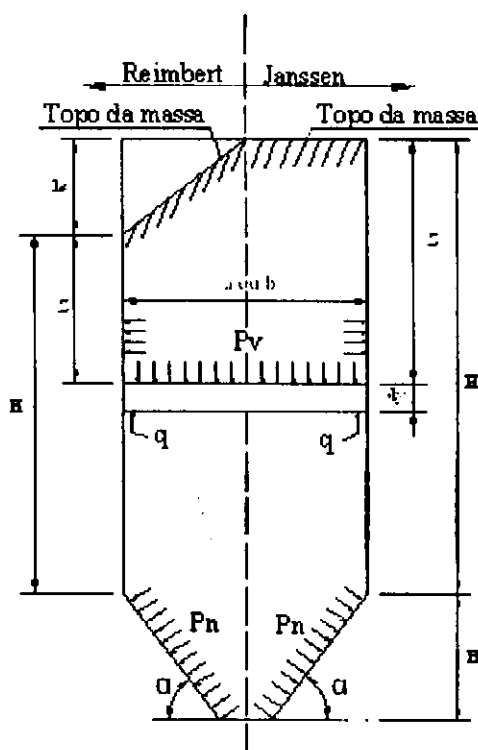


Figura 11 - Dimensão e forças atuantes no silo (TROITSKY, 1982)

Pela somatória das forças, obtêm-se:

$$dP_v A - \gamma A dz + q P dz = 0 \quad (\text{Eq. 06})$$

Onde:

P_v = pressão vertical no silo;

q = força de atrito na parede;

γ = peso específico do sólido;

A = área da secção transversal do silo;

P = perímetro da secção transversal do silo e;

z = profundidade da massa armazenada.

A relação entre o atrito e a pressão horizontal na parede é:

$$q = \mu P_h \quad (\text{Eq. 07})$$

Onde $\mu = \text{tg}\phi$ é o coeficiente de atrito do produto na parede. Além disso, assumindo a razão entre a pressão vertical e pressão horizontal como uma constante, tem-se:

$$P_h = KP_v \quad (\text{Eq. 08})$$

Onde K é o coeficiente de pressão. Através da substituição e integração das equações, tem-se:

$$P_v = \frac{\gamma R}{\mu K} \left(1 - e^{-\frac{\mu K y}{R}}\right) \quad (\text{Eq. 09})$$

$$P_h = \frac{\gamma R}{\mu} \left(1 - e^{-\frac{\mu K y}{R}}\right) \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

P_v = pressão vertical no silo;

P_h = pressão horizontal no silo;

γ = peso específico do sólido;

R = raio hidráulico do silo (A/P);

P = perímetro da secção transversal e;

e = base do log natural.

Para o valor K (coeficiente de empuxo), é tomado o método de Rankine ou

$$\frac{P_h}{P_v} = K = \frac{1 - \text{sen}\phi}{1 + \text{sen}\phi}. \text{ Segundo Buisman } \textit{apud} \text{ Troitsky (1982), o valor atribuído ao coeficiente}$$

de pressão K durante o carregamento deveria ser tomado a partir da expressão $K = \frac{1 - \text{sen}^2\phi}{1 + \text{sen}^2\phi}$

onde ϕ seria o ângulo de atrito interno.

Para silos quadrados ou para uma menor parede "a" de um silo retangular (Figura 12), o raio hidráulico é $R_a = \frac{a}{4}$. Para o maior lado, admite-se o raio hidráulico como sendo $R_b = \frac{a'}{4}$,

onde a' é o comprimento da parede de um silo imaginário e pode ser obtido através da

$$\text{equação } a' = \frac{2ab - a^2}{b}.$$

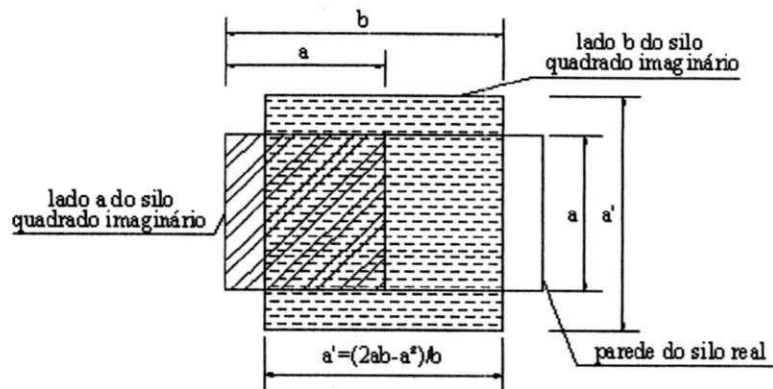


Figura 12 - Formas equivalentes para silos (TROITSKY, 1982)

2.6.2 Método de Reimbert (TROITSKY, 1982)

A pressão vertical a uma profundidade y abaixo da superfície é:

$$P_v = \gamma \left[y \left(\frac{y}{C} + 1 \right)^{-1} + \frac{h_s}{3} \right] \quad (\text{Eq. 11})$$

A pressão horizontal a uma profundidade y é:

$$P_h = (P_{\max}) h \left[1 - \frac{y}{C} + 1 \right]^{-2} = z (P_{\max}) h \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde P_{\max} é a máxima pressão horizontal e C é uma característica da abscissa e pode variar de acordo com a forma do silo, sendo obtida através das equações:

Para um silo retangular (menor parede a):

$$(P_{\max}) a = \frac{\gamma a}{4 \operatorname{tg} \theta} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$C_a = \frac{a}{\pi g \theta \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi - \theta}{4} - \frac{\theta}{2} \right)} - \frac{h_s}{3} \quad (\text{Eq. 14})$$

Para um silo retangular (maior parede b):

$$(P_{\max}) b = \frac{\gamma a'}{4 \operatorname{tg} \theta} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$C_b = \frac{a'}{\pi g \theta \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\theta}{2} \right)} - \frac{h_s}{3} \quad (\text{Eq. 16})$$

2.7 Principais normas de ações em silos

2.7.1 Norma DIN 1055 (1987)

Esta norma especifica métodos de determinação das cargas, predominantemente estáticas, produzidas no carregamento do silo e que atuam em sua estrutura. Não abrange cargas devidas a explosões de pós, sendo recomendado a consulta de normas específicas.

Campos de aplicação:

- Válida para qualquer material de construção do silo;
- Silos verticais e prismáticos;
- Dimensões do silo: $\frac{H}{D_c} > 0,8$, $\frac{P_{vc}}{\gamma} < 25m$ e;
- Não é válida para produtos fortemente coesivos e produtos granulares que incham.

Para o raio hidráulico (R), a Tabela 6 apresenta sua variação de acordo com a geometria do silo.

Tabela 6 - Secção transversal e seus respectivos raios hidráulicos

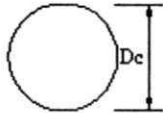
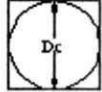
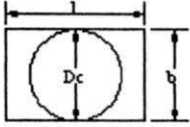
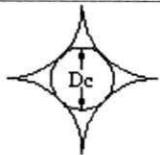
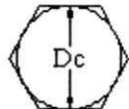
Secção Transversal	Raio Hidráulico (R)	Diagrama
Circular	$0,25D_c$	
Quadrada	$0,25D_c$	
Retangular		
Considerando o lado l		
Para $l/b = 1$	$0,25D_c$	
Para $l/b = 1,5$	$0,27D_c$	
Para $l/b = 2$	$0,30D_c$	
Para $l/b = 4$	$0,33D_c$	
Para $l/b = 5$	$0,35D_c$	
Considerando o lado b		
Para $l/b = 1$	$0,3D_c$	
Para $l/b = 2$	$0,33D_c$	
Para $l/b = 4$	$0,40D_c$	
Para $l/b = 5$	$0,5D_c$	

Tabela 6 - Secção transversal e seus respectivos raios hidráulicos Cont.

Secção Transversal	Raio Hidráulico (R)	Diagrama
Intercelular	$0,3D_c$	
Poligonal	$0,27D_c$	

O valor de K (relação entre pressão horizontal e vertical)

O valor de K é definido na norma alemã pela expressão $K = 1,2(1 - \text{sen}\delta)$, onde δ é o ângulo efetivo de atrito interno. O fator 1,2 foi escolhido para garantir que em pequenas alturas do material, ou seja, na parte superior do silo, resultem curvas de ações mais completas.

Pressões de carregamento

- Pressão horizontal de carregamento (P_{hc})

$$P_{hc} = \frac{R\gamma}{\mu} \left[1 - e^{\frac{-ZK\mu}{R}} \right] \quad (\text{Eq. 17})$$

- Pressão vertical de carregamento (P_{vc})

$$P_{vc} = \frac{R\gamma}{K\mu} \left[1 - e^{\frac{-ZK\mu}{R}} \right] \quad (\text{Eq. 18})$$

- Pressão de atrito de carregamento por 1m de superfície de parede (P_{wc})

$$P_{wc} = R\gamma \left[1 - e^{\frac{-ZK\mu}{R}} \right] \quad (\text{Eq. 19})$$

Pressões de descarregamento

- Pressão horizontal de descarregamento (P_{hd})

$$P_{hd} = P_{hc} C \quad (\text{Eq. 20})$$

O coeficiente de sobrepressão de descarregamento C é dado pela DIN 1055 para os seguintes produtos:

- Açúcar, calcário, cimento, cinzas, pó de carvão e cal hidratada = 1,2;

- Cascalho de concreto, fosfatos, beterraba, carvão, coque e ferro = 1,3;
- Trigo, cevada, farinha, areia, soja, batatas, escória de caldeira = 1,4;
- Cascas = 1,5;
- Milho = 1,6 e;
- Ração = 1,7.

- Pressão Vertical de Descarregamento (P_{vd})

$$P_{vd} < P_{vc} \quad (\text{Eq. 21})$$

- Pressão de atrito de descarregamento por 1m de superfície de parede (P_{wd})

$$P_{wd} = 1,1P_{wc} \quad (\text{Eq. 22})$$

Pressão não uniforme

Durante o descarregamento, pode ocorrer pressão não uniforme, a qual seria adicionada à pressão horizontal de descarregamento, determinada para a condição uniforme, como segue:

Para silos cilíndricos, a sobrepressão localizada será determinada de acordo com o item 1 (a seguir), com a seguinte exceção: se os silos são enrijecidos na base e no topo e, as paredes resistem às pressões horizontais (devido ao produto armazenado) então, em vez da hipótese de uma pressão adicional, o incremento da pressão horizontal será assumido, como mostra o item 2 (a seguir).

A pressão não uniforme causada por interconexões monolíticas entre silos em sistema multicelular, não deve ser considerada.

Item 1: Aplicação de distribuição da pressão parcial em adição à pressão horizontal de descarga, considera a sobrepressão $p_o = \beta \times P_{hd}$ para atuar em duas áreas diametralmente opostas. Assume-se que cada área tenha lado $l=0,2D_c$. A sobrepressão total em cada área é $P_o = p_o (0,04D_c^2)$. O fator β é determinado pela expressão dada abaixo; é necessário o cálculo dessa sobrepressão no meio do silo e o uso da meia altura do incremento de pressão para determinar o valor da sobrepressão em outra profundidade. A parede será verificada para a pressão não uniforme. Calculam-se as paredes submetidas a essa pressão; o suporte estático do produto armazenado pode não ser considerado. Devem se considerados somente o momento fletor circunferencial e forças normais.

O coeficiente β é determinado pela expressão:

$$\beta = \beta_h \times \beta_c \times \beta_r \times \beta_g \quad (\text{Eq. 23})$$

Sendo:

B_h = coeficiente de esbeltez do silo:

- Para $H/D_c < 1$ $B_h = 1$
- Para $1 \leq H/D_c \leq 4$ $B_h = 0,2H/D_c + 0,8$
- Para $1 \leq H/D_c > 4$ $B_h = 1,6$

B_e = coeficiente de excentricidade do silo:

- Para $e/R < 1/3$ $B_e = 1$
- Para $e/R \geq 1/3$ $B_e = 3(e/R)$

Sendo “e” a excentricidade do orifício de descarga.

B_r = coeficiente de rigidez do silo:

- Para $R/t \leq 70$ $B_r = 1$
- Para $R/t \geq 100$ $B_r = 0,05$
- Para $70 < R/t < 100$ Interpolação linear

B_g = função do tipo do produto:

- Açúcar, areia, cascalho para concreto = 0,4;
- Trigo, cevada, calcário, cimento, fosfato, soja, beterraba, batata, cinza = 0,5;
- Farinha, carvão, coque, escória de caldeira e cal hidratada = 0,6;
- Cascas = 0,7;
- Milho = 0,9 e;
- Ração = 1.

Item 2: incremento de pressão no descarregamento:

Em lugar do método do item 1, pode-se incrementar a pressão de descarga. Nesta aproximação, o incremento da pressão é feito pela multiplicação do coeficiente C_k pela pressão horizontal de descarga. O valor do coeficiente C_k é determinado por:

- Para silos cilíndricos:

$$R/t \leq 70 \quad C_k = 1 + b(0,5 + 0,02R/t) \quad (\text{Eq. 24})$$

$$R/t \geq 100 \quad C_k = 1 + 3\beta \sqrt{\frac{R}{D_c}} \quad (\text{Eq. 25})$$

$$70 < R/t < 100 \quad \text{Interpolação linear}$$

- Para silos poligonais e prismáticos

$$C_k = 1 + 0,8\beta \quad (\text{Eq. 26})$$

Pressões adicionais em silos com fluxo de massa

As pressões adicionais, devido ao fluxo de massa na transição do corpo do silo com a tremonha, são dadas pelo menor valor das seguintes equações:

$$P_s = \gamma z \quad \text{ou} \quad P_s = \gamma D_c \quad (\text{Eq. 27 e 28})$$

Considera-se que a pressão adicional varie linearmente de $0,3D_c$ acima e abaixo da transição (Figura 13).

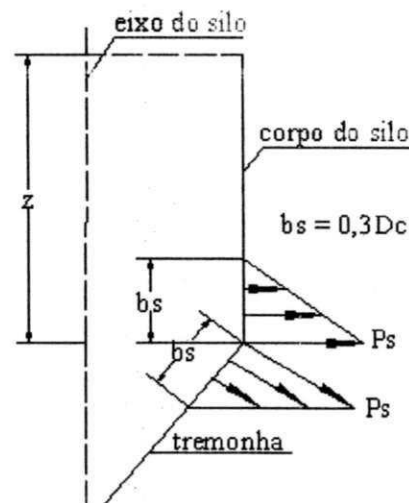


Figura 13 - Pressão adicional no fluxo de massa

Pressões sobre o fundo plano ($\alpha < 20^\circ$)

Para silos com a relação $H/D_c > 1,5$, a pressão vertical atuante no fundo do silo será assumida uniformemente distribuída e é dada pela expressão:

$$P_{vd}(z) = C_b \times P_{vc}(z) \leq \gamma \times H \quad (\text{Eq. 29})$$

Onde $C_b = 1,5$ para todos os casos, exceto para produtos que propiciem formação de abóbadas, onde $C_b = 1,8$.

Para silos com relação $H/D_c < 1,5$ com uma distribuição não uniforme de pressão, a pressão vertical pode ser assumida como:

$$P_{vd}(z) = C_b \times P_{vc}(z) \leq \gamma \times z^* \quad (\text{Eq. 30})$$

Neste caso, para a determinação da pressão vertical de carregamento, a profundidade z^* será igual à altura da parede do silo e, igual a $1,5D_c$ no centro do silo.

Pressão Normal devido ao produto dentro a tremonha (Figura 14)

A pressão do produto dentro da tremonha é dada pelas equações:

$$P_n = \frac{2,4R_h K(\text{sen}^2 a)\gamma}{\sqrt{\mu}} \quad \text{e} \quad P_w = \frac{P_n}{2} \quad (\text{Eq. 31 e 32})$$

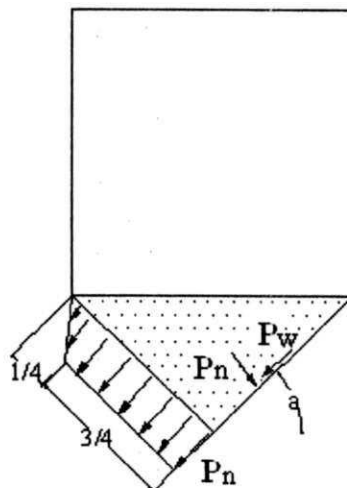


Figura 14 - Pressão normal devido ao produto dentro da tremonha

Pressões do produto sobre a tremonha

A pressão normal às paredes da tremonha, devido ao produto sobre a linha de transição do corpo do silo (Figura 15) é dada pelas equações abaixo.

$$P_{no} = \left(P_{vc} C_b \cos^2 \theta + P_{hc} \text{sen}^2 \theta \right) \left(1 + \frac{\text{sen} 2a}{4\mu} \right) \quad (\text{Eq. 33})$$

$$P_{nu} = P_{vc} C_b \cos^2 a \quad \text{e} \quad P_w = \frac{P_n}{2} \quad (\text{Eq. 34 e 35})$$

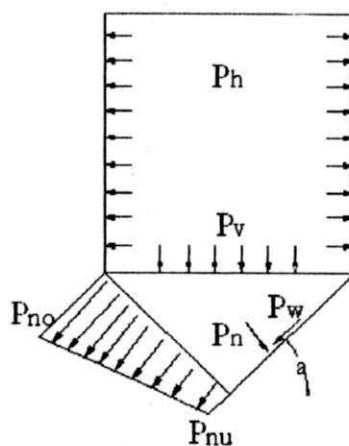


Figura 15 - Pressões do produto sobre a tremonha

2.7.2 Norma ISO 11697 (1995)

É recomendada para a determinação de cargas de uma gama de produtos sólidos em estruturas de armazenagem com as seguintes limitações:

- O carregamento deve ser contínuo envolvendo efeitos de pequena inércia e impacto mínimo de cargas;
- O máximo tamanho de partícula do produto sólido não deve ser maior que $0,1R$;
- Quando mecanismos auxiliares de descarga forem utilizados, o fluxo do produto é efetivamente contínuo e concêntrico;
- Quando da não utilização de mecanismos auxiliares de descarga, o produto deve ser de fluxo livre e possuir baixa coesão;
- A excentricidade “e” de carregamento ou descarregamento deve ser menor que $0,25D_c$ para silos cilíndricos e, menor que $0,25a$ em caso de silos retangulares e;
- A relação H/D_c não deve ser maior que 10 (a altura não deve exceder 100m enquanto que o diâmetro não deve ser superior a 50m).

As cargas determinadas através desta norma levam em consideração:

- Uma variação definida das propriedades de fluxo do produto;
- Variações nas condições de atrito na superfície;
- A geometria da estrutura e;
- Os métodos de carregamento de descarregamento do silo.

Nesta norma, o cálculo das pressões é baseado na teoria de Janssen com as seguintes condições:

- Equilíbrio vertical estático;
- A pressão vertical atua em qualquer secção horizontal;
- Em silos cilíndricos, as pressões horizontais são simetricamente distribuídas ao redor da parede;
- O atrito na parede depende exclusivamente da pressão horizontal e;
- Um coeficiente de atrito constante.

O valor de K (relação entre pressão horizontal e vertical)

O coeficiente K é assumido para representar o estado de tensão de carregamento e estático no silo o qual um estado de tensão confinado é desenvolvido lateralmente. O valor de K deve ser determinado através da equação $K = 1,1(1 - \text{sen}\delta)$, sendo δ o ângulo efetivo de atrito interno.

O valor de K pode ser assumido como o esforço último de uma amostra consolidada sujeita a pressões verticais representativas de condições desenvolvidas no interior da massa armazenada. O coeficiente K não deve ser menor que 1,15 para seu limite superior e menor que 0,9 para seu limite inferior.

Pressões de carregamento

- Pressão horizontal de carregamento (P_{hc})

$$P_{hc} = \frac{K\gamma}{\mu} [C_z(z)] \quad (\text{Eq. 36})$$

- Pressão vertical de carregamento (P_{vc})

$$P_{vc} = \frac{\bar{\lambda}\gamma}{K'\mu} [C_z(z)] \quad (\text{Eq. 37})$$

- Pressão de atrito de carregamento (P_{wc})

$$P_{wc} = R\gamma [C_z(z)] \quad (\text{Eq. 38})$$

O fator $C_z(z)$ é dado por:

$$C_z(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}} \quad (\text{Eq. 39})$$

A profundidade z_0 é dada por:

$$z_0 = \frac{R}{K\mu} \quad (\text{Eq. 40})$$

Pressões de descarregamento

Para o cálculo das pressões resultantes do processo de descarregamento do silo, a norma recomenda a utilização de coeficientes de sobrepressão C que devem ser determinados a partir da relação H/D_c como segue:

Para $H/D_c \leq 1$	$C = 1$
Para $1 < H/D_c < 5$	$C = 1 + 0,7(H/D_c - 1)$
Para $H/D_c \geq 5$	$C = 1,35$

Descargas excêntricas

Descargas através de orifícios de descarga excêntricos resultam em distribuições de pressão assimétricas ao redor da circunferência do silo, induzindo suas paredes a sofrerem momentos fletores podendo, desta forma, causar deformações em suas partes constituintes.

Para descargas excêntricas menores que $0,25D_c$, para silos circulares, e $0,25a$, para retangulares, o incremento de pressão deve ser considerado como sendo igual a $\beta' = 1,0 + 4,0 \frac{e}{D_c}$, não devendo ser aplicado a excentricidades que excedam $0,25D_c$.

Cargas atuantes na tremonha

Apesar de várias teorias serem desenvolvidas para o cálculo das pressões nas tremonhas, tal fenômeno ainda não é inteiramente compreendido e a aceitação entre os diferentes métodos de análise ainda é muito pobre. Entretanto, um simples e semi-empírico método é recomendado como será exposto a seguir.

A pressão normal à parede P_n em condições de carregamento e descarregamento em tremonhas com inclinação maior que 20° deve ser calculada através do somatório das cargas devido ao carregamento da tremonha e cargas resultantes da sobrecarga vertical diretamente acima da transição (Figura 16).

$$Pn_1 = 1,5P_h \left(\frac{\cos^2 a}{K} + \text{sen}^2 a \right) \quad (\text{Eq. 41})$$

$$Pn_2 = \frac{1,5P_h \cos^2 a}{K} \quad (\text{Eq. 42})$$

$$Pn_3 = \frac{3RK\gamma \text{sen}^2 a}{\sqrt{\mu}} \quad (\text{Eq. 43})$$

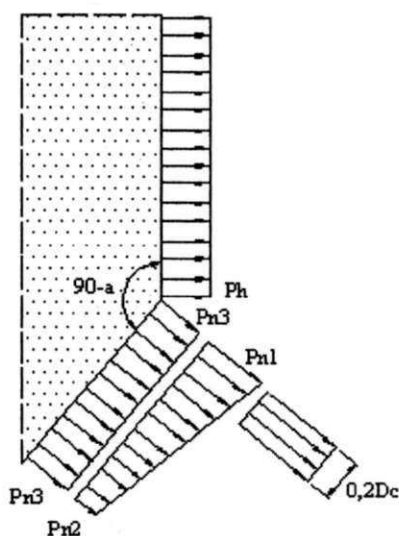


Figura 16 - Cargas atuantes na tremonha

2.7.3 Norma EUROCODE 1991-4 (1995)

Campos de aplicação:

- É recomendada para ações e projeto de silos incluindo alguns aspectos geotécnicos e deve ser usada em conjunto com a parte I da ENV 1991 “Base para projeto” e outras partes da ENV 1991 e ENV 1992-1999;
- Pode ser utilizada como base para análise de projetos de estruturas não cobertas pela ENV 1992-1999 e onde outros materiais ou outras estruturas estão envolvidos;
- Abrange projetos estruturais durante a execução e projetos estruturais para estruturas temporárias acima relacionadas.
- Não está diretamente direcionada para a avaliação estrutural de construções já existentes, em desenvolvimento de projetos de reparos e alterações ou mudanças em sua finalidade de uso.

A seguir, estão listadas algumas limitações quanto ao seu emprego e uso:

- A secção transversal do silo está limitada entre as apresentadas na Figura 17;
- O processo de carregamento envolve apenas os efeitos desprezíveis de inércia e impactos de cargas mínimos;
- O diâmetro máximo de partículas não deve ser maior que $0,03D_c$;
- O produto armazenado deve ser de fluxo livre;
- A excentricidade “e” do produto armazenado devido ao carregamento deve ser menor que $0,25D_c$;
- A excentricidade “e” do orifício de descarga deve ser menor que $0,25D_c$ e nenhuma parte deve estar a uma distância maior que $0,3D_c$ da linha mediana do silo;
- Os seguintes limites geométricos devem ser respeitados:

$$H/D_c < 10$$

$$H < 100\text{m}$$

$$D_c < 50\text{m}$$

- Cada silo deve ser projetado para uma faixa definida das propriedades de fluxo dos materiais a serem armazenados.

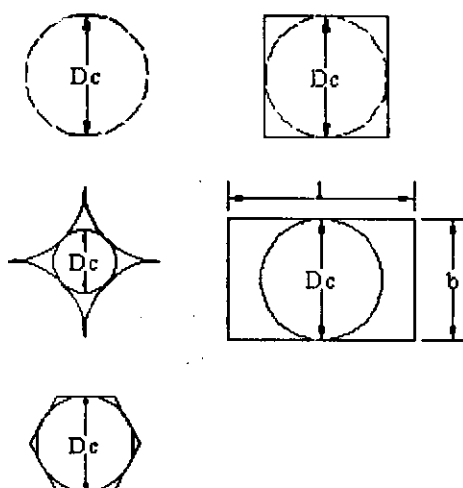


Figura 17 - Formas das secções transversais dos silos

Princípios gerais

A forma estrutural do silo deve ser seleccionada de modo a oferecer baixa sensibilidade a divergência de cargas. Cargas devidas às propriedades dos produtos sólidos devem ser calculadas tanto para o carregamento quanto para o descarregamento. A magnitude e distribuição das cargas de projeto dependem da estrutura do silo, do produto armazenado e do tipo de fluxo desenvolvido no processo de descarregamento.

Variáveis inerentes ao produto sólido e simplificações das ações na estrutura podem conduzir a diferenças entre as cargas reais e às analisadas nesta norma. Por exemplo, a distribuição das pressões de descarregamento varia em torno da parede como uma função variável com o tempo causando imprecisões em suas predições.

Normas simplificadas para a predição do tipo de fluxo podem ser utilizadas para o cálculo das ações em silos. As ações devidas a estruturas adicionais devem ser consideradas e as normas apresentadas para o projeto de tanques são aplicadas apenas a estruturas destinadas ao armazenamento de líquidos à pressão atmosférica.

Cargas devidas às particularidades dos produtos sólidos

- As cargas devidas às particularidades dos produtos sólidos dependem das propriedades dos produtos sólidos, da variação das condições de atrito da superfície, da geometria do silo e dos métodos de carregamento e descarregamento e devem ser consideradas como ações variáveis.
- Para os modelos de cargas tanto no carregamento quanto no descarregamento, devem ser utilizados os estados limites últimos e de serviço.

- Os valores característicos para as cargas de carregamento e descarregamento são descritos separadamente de acordo com o tipo de silo, sendo discriminados como altos e baixos.
- Qualquer alteração nas paredes do silo devido às particularidades do produto deve ser ignorada nos cálculos de cargas. A interação entre a deformação na parede e a carga produzida pelo produto armazenado não deve ser considerada.

Pressão de carregamento

- Pressão horizontal de carregamento (P_{hc})

$$P_{hc} = \frac{K\gamma}{\mu} [C_z(z)] \quad (\text{Eq. 44})$$

- Pressão vertical de carregamento (P_{vc})

$$P_{vc} = \frac{R\gamma}{K\mu} [C_z(z)] \quad (\text{Eq. 45})$$

- Pressão de atrito de carregamento (P_{wc})

$$P_{wc} = R\gamma [C_z(z)] \quad (\text{Eq. 46})$$

O fator $C_z(z)$ é dado por:

$$C_z(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_o}} \quad (\text{Eq. 47})$$

A profundidade z_o é dada por:

$$z_o = \frac{R}{K\mu} \quad (\text{Eq. 48})$$

Pressão de descarregamento

As pressões de descarregamento devem ser obtidas pela multiplicação de suas cargas correspondentes de carregamento por coeficientes de sobrepressão C , como segue:

$$P_{hd} = P_{hc} \times C_h \text{ e } P_{wd} = P_{wc} \times C_w \quad (\text{Eq. 49 e 50})$$

Onde C_w e C_h são tomados como 1,1 e C_o , respectivamente. Para o cálculo de C_o , utiliza-se a equação $C_o = 1,35 + 0,02(\delta - 30)$.

Para silos que sejam descarregados pelo topo de suas estrutura, tais coeficientes devem ser considerados iguais a 1.

Para silos baixos, os coeficientes de sobrepressão devem ser calculados de acordo com a relação H/D_c sendo:

$$\text{Para } H/D_c \leq 1 \quad C_w = C_h = 1 \quad (\text{Eq. 51})$$

$$\text{Para } 1 < H/D_c < 1,5 \quad C_w = 1 + 0,2(H/D_c - 1) \quad (\text{Eq. 52})$$

$$C_h = 1 + 2(C_w - 1)(H/D_c - 1) \quad (\text{Eq. 53})$$

E, para este caso, deve-se, ainda, calcular acréscimos de pressão $P_{p,sq}$ como segue:

$$P_{p,sq} = 2P_p(H/D_c - 1) \quad (\text{Eq. 54})$$

Onde P_p é determinado usando a orientação para silos esbeltos.

Cargas na tremonha

Deve ser calculada pelo somatório das pressões devidas ao carregamento da tremonha P_{n1} , P_{n2} e da pressão devida à pressão vertical causada pelo produto localizado imediatamente acima da transição (Figura 18).

$$P_n P_{n3} + P_{n2} + (P_{n1} - P_{n2}) \frac{x}{I_h} \quad (\text{Eq. 55})$$

Onde x é um comprimento entre 0 e I_h e P_{n1} , P_{n2} e P_{n3} são calculados através das equações:

$$P_{n1} = 1,5P_h \left(\frac{\cos^2 a}{K} + \text{sen}^2 a \right) \quad (\text{Eq. 56})$$

$$P_{n2} = \frac{1,5P_h \cos^2 a}{K} \quad (\text{Eq. 57})$$

$$P_{n3} = \frac{3RK\gamma \text{sen}^2 a}{\sqrt{\mu}} \quad (\text{Eq. 58})$$

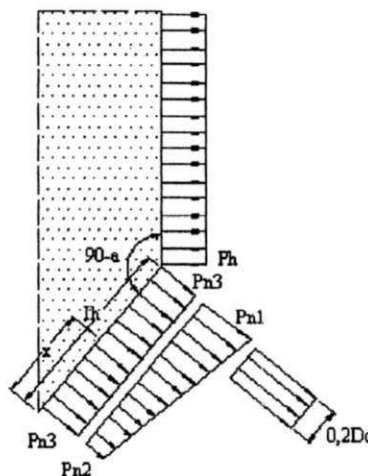


Figura 18 - Cargas atuantes na tremonha

2.7.4 Norma AS 3774 (1990)

Esta norma é recomendada para a determinação de cargas para o projeto de estruturas (silos, bunkers e suas partes constituintes) destinadas à armazenagem de produtos sólidos não se aplicando à armazenagem de líquidos.

Para o estudo de silos, esta norma é mais rigorosa ao apresentar um maior número de requisitos para sua classificação como rugosidade interna da parede e flexibilidade das paredes da tremonha, além do fato de recomendar o uso dos valores máximos e mínimos das propriedades dos sólidos armazenáveis para a aplicação do método dos estados limites no cálculo das cargas.

Pressão de carregamento

- Pressão horizontal de carregamento (P_{hc})

$$P_{hc} = \frac{R\gamma}{\mu} [C_z(z)] \quad (\text{Eq. 59})$$

Para silos baixos ($H/D_c < 1$), a pressão horizontal de carregamento (P_{hcs}) deve ser calculada pela equação:

$$\text{Para } h_0 < z < 1,5h_0, \text{ tem-se } P_{hcs} = \left(\frac{z - h_0}{0,5h_0} \right) P_{cl}. \quad (\text{Eq. 60})$$

Onde h_0 é a diferença entre z e a altura máxima do corpo do silo e

$$P_{cl} = \frac{\gamma R}{\mu} \left(1 - e^{\frac{-1,5h_0\mu K}{R}} \right). \quad (\text{Eq. 61})$$

- Pressão vertical de carregamento (P_{vc})

$$P_{vc} = \frac{R\gamma}{K\mu} [C_z(z)] \quad (\text{Eq. 62})$$

- Pressão de atrito de carregamento (P_{wc})

$$P_{wc} = R\gamma [C_z(z)] \quad (\text{Eq. 63})$$

Para silos baixos, a pressão de atrito de carregamento (P_{wcs}) entre o sólido armazenado e a parede do silo deve ser determinada pela equação a seguir:

$$\text{Para } h_0 < z < 2h_0, \text{ tem-se } P_{wcs} = \left(\frac{z}{h_0} - 1 \right) P_{wl}. \quad (\text{Eq. 64})$$

Onde h_0 é a diferença entre z e a altura máxima do corpo do silo e $P_1 = \gamma R \left(1 - e^{-\frac{h_0 \mu K}{R}} \right)$.

O fator $C_z(z)$ é dado por:

$$C_z(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}} \quad (\text{Eq. 65})$$

A profundidade z_0 é dada por:

$$z_0 = \frac{R}{K\mu} \quad (\text{Eq. 66})$$

Para esta norma, o coeficiente K deve ser calculado a partir da equação:

$$K = \frac{1 + \text{sen}^2 \delta - 2\sqrt{(\text{sen}^2 \delta - \mu^2 \cos^2 \delta)}}{4\mu^2 + \cos^2 \delta} \geq 0,35 \quad (\text{Eq. 67})$$

Pressão de descarregamento

Devem ser obtidas pela multiplicação de suas cargas correspondentes de carregamento por coeficientes de sobrepressão C .

Para a pressão horizontal de descarregamento (P_{hd}), deve ser escolhido o maior valor entre os coeficientes de sobrepressão C_h , sendo eles:

$$C_h = \left[7,6 \left(\frac{h_b}{D_c} \right)^{0,06} - 6,4 \right] C_c \quad \text{ou} \quad C_h = 1,2 C_c \quad (\text{Eq. 68 e 69})$$

Sendo h_b a somatória entre z e a altura da tremonha e C_c um coeficiente variante entre 1 (para fluxo assimétrico) e 2 (para fluxo tipo planar).

Para a pressão vertical de descarregamento (P_{vd}), o coeficiente de sobrepressão C_v pode ser obtido através das equações $C_v = 1 + \text{tg} \delta$ (para grãos agrícolas) e $C_v = 1 + 0,4 \text{tg} \delta$ (para outros produtos).

Para a pressão de atrito de descarregamento (P_{wd}), o coeficiente C_w deve ser o maior valor entre 1,2 (para fluxo assimétrico) e 1,4 (para fluxo tipo planar).

Cargas na tremonha

As pressões normais às paredes da tremonha (P_{nh}) são não uniformes e sua distribuição deve ser determinada pela equação $P_{nh} = K_{nh} P_{vh}$, onde $K_{nh} = \frac{1 + \text{sen} \delta \cos 2n}{1 - \text{sen} \delta \cos 2(a+n)}$ e

$$P_{vh} = \frac{\gamma(h_h - z_h)}{j-1} + \left[P_{vc} - \frac{\gamma h_h}{j-1} \right] \left[\frac{h_h - z_h}{h_h} \right], \quad \text{sendo } n = 0,5 \left[\phi_w + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen} \phi_w}{\text{sen} \delta} \right) \right] \leq 90^\circ,$$

$j = C_h [K_{nh} (\mu \cot a + 1) - 1]$ e C_h uma variante entre 2 (para tremonhas cônicas ou piramidais) e 1 (para tremonhas em forma de cunha) (Figura 19).

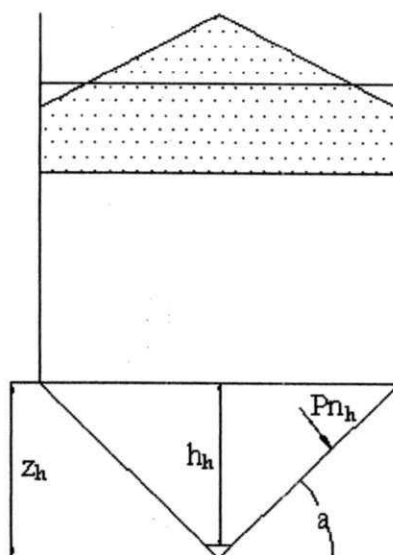


Figura 19 - Distribuição da pressão na tremonha

Recomenda-se, ainda, o estudo de outras normas como a americana ACI 313 (1991), a francesa SNBATI (1975), a canadense CFBC (1983) e a britânica BMHB (1985).

2.8 Análise e projeto das paredes de silos prismáticos

Os silos metálicos apresentam certas vantagens frente aos outros materiais de construção como: são silos que podem ser pré-fabricados e, portanto, seu tempo de instalação é bem reduzido; são relativamente fáceis de desmontar, mover e reconstruir em outros locais e uma vez que seu próprio peso é menor que dos outros materiais, o custo da fundação é consideravelmente menor (SAFARIAN & HARRIS, 1985), contudo, são silos que requerem manutenção constante a fim de se evitar possíveis corrosões do material.

Ao estudar os esforços em silos prismáticos, Troitsky (1982) definiu que tais construções são compostas de armação rígida fechada por uma chapa reforçada por enrijecedores verticais e/ou horizontais devendo-se considerar a ocorrência de forças de tração e momentos que conduzem a esforços em várias partes do silo (Figura 20).

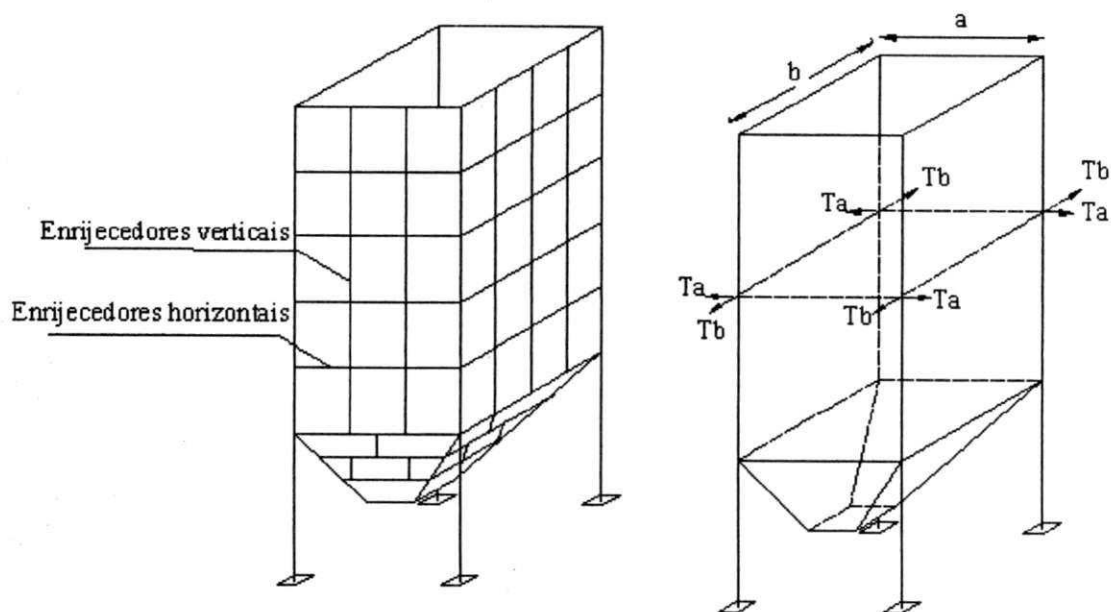


Figura 20 - Silo com enrijecedores e seus esforços de tração (TROITSKY, 1982)

Na Figura 21 apresenta-se um detalhe dos esforços de tração nas paredes de um silo retangular e suas pressões em cada parede. As forças de tração atuando nas paredes são $T_a = 0,5P_b b$ para o lado a e $T_b = 0,5P_a a$ para o lado b.

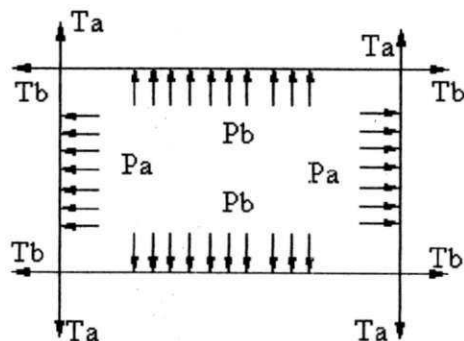


Figura 21 - Esforços de tração em um silo retangular (TROITSKY, 1982)

Para os momentos fletores nas paredes a, b e nos cantos "c" (Figura 22), as equações são dadas por:

$$K = \frac{I_b b}{I_a a} \quad (\text{Eq. 70})$$

$$M_c = \frac{-P_a a^2 K + P_b b^2}{12 + 12K} \quad (\text{Eq. 71})$$

$$M_a = \frac{P_a a^2}{8} + M_c \quad (\text{Eq. 72})$$

$$M_b = \frac{P_b b^2}{8} + M_c \quad (\text{Eq. 73})$$

Em casos particulares aonde $I_a = I_b$, os momentos nos cantos passam a ser $M_c = \frac{-P_a a^3 + P_b b^3}{a + b}$. Para silos quadrados quando $a = b$, $I_a = I_b$, $K = 1$, $P_a = P_b$, tem-se:

$$M_c = \frac{-P_a a^2}{12} \quad (\text{Eq. 74})$$

$$M_a = M_b = \frac{P_a a^2}{24} \quad (\text{Eq. 75})$$

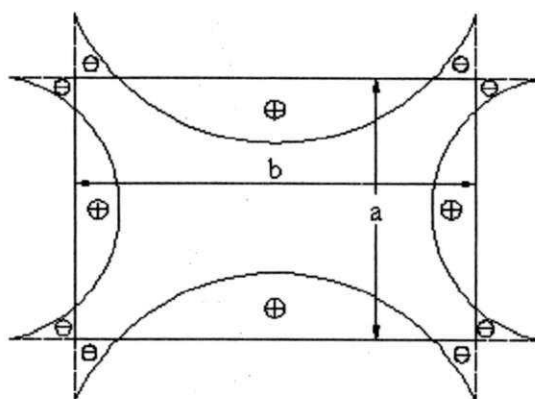


Figura 22 - Momentos fletores em silos retangulares (TROITSKY, 1982)

De acordo com Calil Junior et al. (1997), silos reforçados com enrijecedores caíram em desuso industrial, pois silos com paredes conformadas são mais eficientes e econômicos.

Conforme Ravenet (1992) existem duas conformações de paredes que são, atualmente, mais usadas nas indústrias sendo elas:

- Conformação trapezoidal: o ângulo da parede varia de 45 a 60° com a horizontal. Para manter a rigidez das chapas, recomenda-se soldar reforços em suas extremidades (platibandas). Esta geometria de parede é indicada para silos destinados ao armazenamento de produtos granulares de fácil descarga (Figura 23a).
- Conformação ziguezague: o ângulo da parede varia de 70 a 72° com a horizontal. Também para esta parede recomenda-se o uso de platibandas. Este tipo de conformação é utilizado para armazenamento de produtos pulverulentos coesivos (Figura 23b).

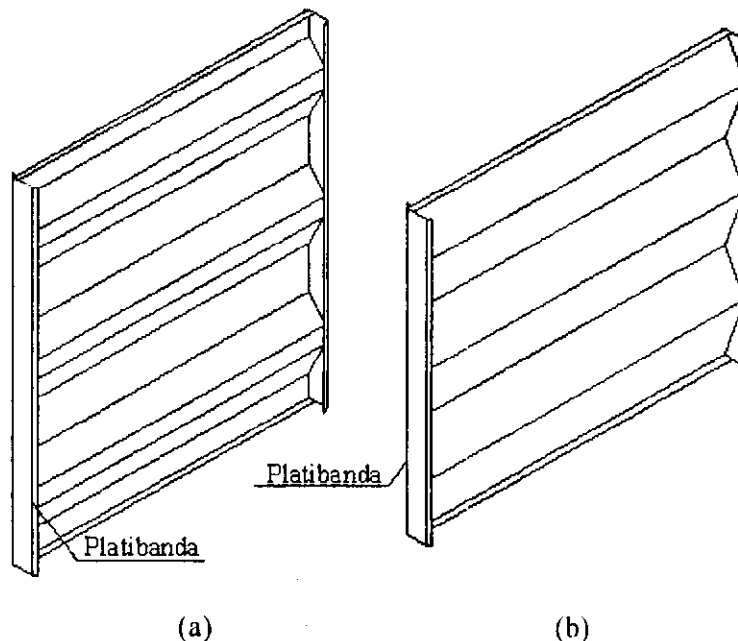


Figura 23 - Conformação das paredes de silos prismáticos (Ravenet, 1992)

Estes silos são construídos mediante a pré-fabricação de painéis que são transportados até a localização da obra e, posteriormente, montados. Antigamente, a união dos painéis era realizada através de soldagem das peças passando, com o decorrer do tempo, a ser substituída pela utilização de parafusos que acabam por reduzir o tempo de montagem em cerca de 100% (RAVENET, 1977). Com a vantagem de silos com tais conformações, surge a possibilidade de associação entre células tornando-os multicelulares como mostrado na Figura 24.




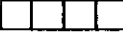






Tipo	1	2	3	4
1	 C=4	 C=3,5	 C=3,33	 C=3,25
2		 C=3	 C=2,83	 C=2,75
3			 C=2,67	 C=2,58
4				 C=2,50

Figura 24 - Disposições construtivas dos silos multicelulares (RAVENET, 1977)

Em referência à figura anterior, pode-se construir desde uma célula: silo tipo 1, a partir de uma célula e continuar com uma linha de células até chegar ao tipo 1-n. Na segunda linha, formam-se silos do tipo 2, desde o 2-2 até o 2-n. O tipo 3 começa por 3-3 (com nove células) e segue até 3-n. Para os três tipos de silos, o sistema de carga e descarga é idêntico à série do tipo 1, adicionando-se unicamente diversos tubos de carga. O fator C significa a razão entre o número de paredes e o número de células para um silo multicelular.

Para os silos do tipo 4 (como são células múltiplas de quatro), são necessários dois sistemas de carga e descarga.

As vantagens de um silo multicelular prismático com relação a um silo cilíndrico são:

- Devido a existência de muitas células, pode-se realizar uma transilagem do produto armazenado no caso de existir problemas de aquecimento do produto;
- Pode-se seleccionar o produto a armazenar em célula específica em função das suas propriedades;
- A descarga de um silo multicelular efetua-se por gravidade, enquanto que no silo cilíndrico unicelular a descarga realiza-se por meio de transportadores helicoidais, devido ao alto custo de elevação do silo com o correspondente gasto de energia.

Nessas instalações, aparecem, outros fatores que influenciam no custo final, sendo eles:

- Construção de um recinto superior para colocação e inspeção da maquinaria;
- Elevar o corpo do silo sobre pilares e suspender as tremonhas para se conseguir descarga por gravidade, encontrando-se toda instalação na cota 0.

2.8.1 Análise dos esforços nas paredes de silos prismáticos multicelulares

A análise elástica mostra que para silos multicelulares com paredes contínuas e enrijecedores, os momentos no centro das paredes e nos enrijecedores serão maiores quando as células forem cheias alternadamente do que quando todas as células forem cheias simultaneamente (GAYLORD & GAYLORD, 1984).

De acordo com Troitsky (1982), para uma simplificação da análise estrutural, um silo multicelular é, geralmente, dividido em unidades secundárias tomando-se certas suposições. No caso de células retangulares, cuja forma não se difere muito da quadrada, uma simples célula pode ser analisada sem levar em consideração a influência das células adjacentes. Entretanto, a influência das conexões intermediárias considerando os momentos fletores produzidos pelo carregamento em células adjacentes aumenta com a diferença de uma célula retangular para uma quadrada.

Todas as paredes de uma célula quadrada intermediária (A) indicam deflexões iguais no meio de seus vãos (Figura 25). Neste caso, as extremidades das paredes (cantos) não sofrem nenhuma deformação e não influenciam as células vizinhas. Os valores nos cantos e no meio dos vãos são $M = \frac{-P_h l^2}{12}$ e $M = \frac{P_h l^2}{24}$, respectivamente.

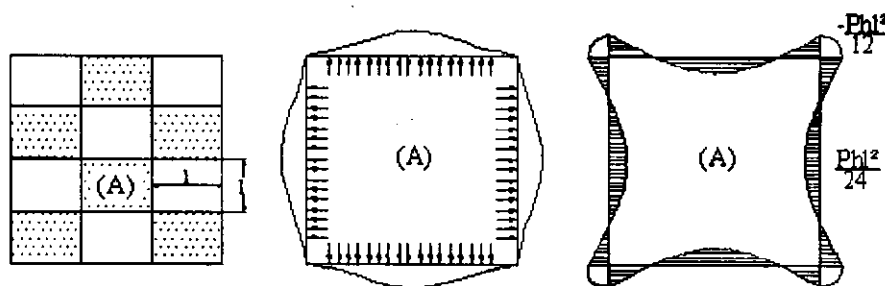


Figura 25 - Deformações e diagrama de momentos em uma célula simples de um silo multicelular (TROITSKY, 1982)

O método usado por Cross em comparação a outros métodos é mais prático para a análise de um silo multicelular. Entretanto, para este caso é necessário realizar novas interações para cada condição de carregamento. Nestes cálculos, é necessário introduzir na análise os enrijecedores das células vizinhas.

Devido a conhecimentos práticos, sabe-se que em silos multicelulares com mais de três células, a influência das células carregadas nas células vazias em sua vizinhança é relativamente pequena.

Consideremos um silo multicelular com 9 células com a seguinte denominação: N - células dos cantos; K - células das bordas e S - células do interior (Figura 26). Podem-se obter máximos valores de momentos pela resolução de um esquema de um sistema de nove células carregadas (Figura 27).

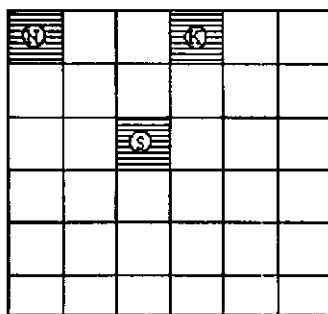


Figura 26 - Silo multicelular (TROITSKY, 1982)

3.3 Sensores e equipamentos utilizados

3.3.1 Extensômetros elétricos de resistência

Para a medição das deformações, foram utilizados extensômetros elétricos do tipo KFC-10-120-C1-11N15C2, comprimento de 10mm, resistência de $119,6 \pm 0,4\Omega$, fator gauge $2,11 \pm 1\%$, fabricado pela KYOWA (Figura 43).

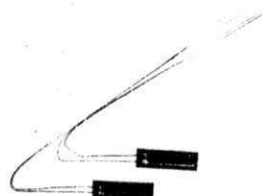


Figura 43 - Extensômetros elétricos utilizados

3.3.2 Transdutores diferenciais de deslocamento

Para a medição dos deslocamentos, foram utilizados transdutores diferenciais da marca GEFRAM, modelo PZ12-S com curso de deslocamento máximo de 50mm, resistência de $2k\Omega$ e voltagem de excitação máxima de 24 volts (Figura 44).



Figura 44 - Transdutores de deslocamento utilizados

3.3.3 Sistema de aquisição de dados

Para o armazenamento e visualização dos dados, foi utilizado o sistema elétrico de medição de variáveis mecânicas com 4 amplificadores digitais completos com tecnologia de frequência-portadora de 4,8kHz para transdutores, denominado SPIDER 8, fabricado pela Empresa HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik) e o software Catman versão 3.0 (Figura 45).

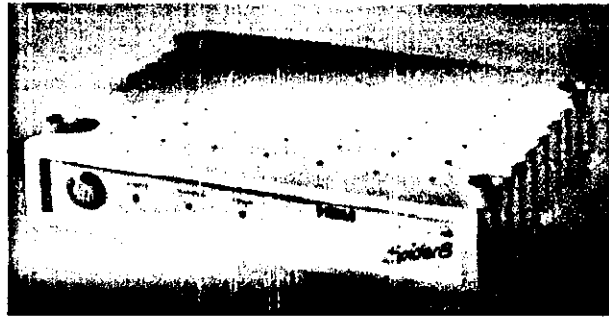


Figura 45 - Sistema de aquisição de dados

3.3.4 Propriedades de fluxo dos produtos

Para a determinação das propriedades de fluxo do produto empregado nos ensaios, utilizou-se o aparelho de cisalhamento direto de translação (TSG 70-140) fabricado pela Empresa AVT (Anlagen-und Verfahrenstechnik-GmbH) com base no aparelho de cisalhamento de Jenike (Jenike Shear Cell) (Figura 46).

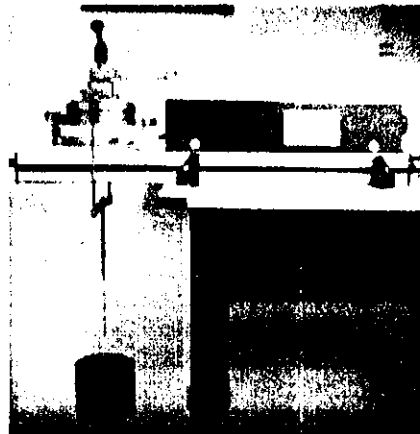


Figura 46 - Aparelho de cisalhamento de Jenike

3.4 Metodologias adotadas

3.4.1 Análise granulométrica

A determinação da granulometria foi realizada utilizando-se o método de peneiramento, com amostra previamente pesada (500g) e peneirada em jogo de peneiras padrão ABNT durante 10 minutos. Ao término do peneiramento, pesou-se a quantidade de produto retido em cada peneira determinando-se, assim, a percentagem final retida.

3.4.2 Teor de umidade do produto (w)

O teste do teor de umidade foi efetuado com 3 repetições, utilizando 10g do produto para cada repetição. As amostras foram colocadas em recipientes de alumínio. Em seguida, foram pesados em balança com precisão de 0,001g para se obter o peso úmido (Pu) do produto e levado a estufa com circulação forçada de ar a temperatura de 105° C, com uma tolerância de ± 5° C por 24h. Em seguida, os recipientes foram resfriados em dessecador, novamente pesados obtendo-se o peso seco (Ps). O teor de umidade foi calculado com uso da seguinte expressão:

$$w = \frac{Pu - Ps}{Pu} 100 \text{ b.u. (base úmida)}$$

3.4.3 Determinação das propriedades de fluxo

Como o produto utilizado no carregamento e descarregamento do silo foi soja peletizada em virtude de ser um dos componentes básicos para a composição de ração avícola (produto o qual o silo foi projetado para armazenar) e pela disponibilidade e quantidade suficiente, se utilizou este mesmo produto para a determinação das propriedades de fluxo (Figura 47). Desta forma, seguiu-se metodologia proposta pela BMHB (1985) combinada com metodologia proposta por Milani (1993).

A partir dos resultados obtidos através dos ensaios de cisalhamento direto, plotou-se os gráficos de tensão normal (σ) versus tensão cisalhante (τ) para a obtenção dos ângulos de atrito interno (θ), ângulo efetivo de atrito interno (δ), tensões máximas de consolidação (σ_M) e tensões inconfínadas (σ_c). Os níveis de cargas normais utilizados nos testes de cisalhamento são indicados na Tabela 10.

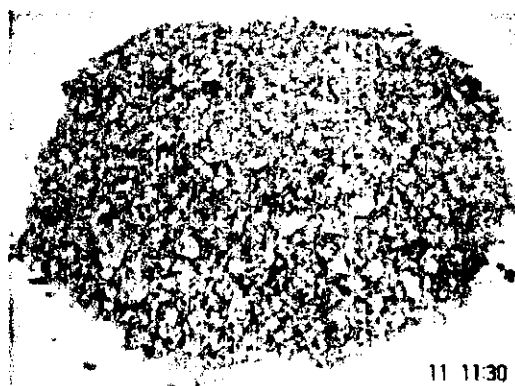


Figura 47 - Soja peletizada usada nos ensaios

Tabela 10 - Níveis de carga utilizados nos ensaios de pré-cisalhamento e cisalhamento.

Pré-cisalhamento (N)		Cisalhamento (N)	
200	140	100	70
140	100	70	40
100	70	40	20
70	40	20	15

Para o ensaio de atrito do produto com a parede (aço rugoso), utilizou-se um conjunto de cargas decrescentes de 50N a 4,389N nos possibilitando construir gráficos de tensão normal (σ) versus cisalhamento (τ) para a obtenção do ângulo de atrito interno do produto com a parede (ϕ_w).

A célula utilizada nos ensaios de cisalhamento do produto foi de alumínio com área de seção transversal igual 136 cm² enquanto que, para o ensaio de cisalhamento do produto com a parede, utilizou-se uma célula de área 68cm².

3.4.4 Pressões horizontais estáticas e dinâmicas

Para o cálculo das pressões horizontais atuantes nas paredes do silo, optou-se por usar quatro normas internacionais sendo elas: DIN 1055 (1987), ISO 11697 (1995), EUROCODE 1 Part 4 (1995) e AS 3774 (1990), por serem largamente recomendadas para dimensionamento e pesquisas em função de sua eficácia.

3.4.5 Tensões nas paredes do silo

Para o cálculo das tensões nas paredes do silo, foram adotadas as teorias simplificadas propostas por Ravenet (1992) (viga bi-engastada) e Troitsky (1982) (viga bi-apoiada).

Para o cálculo das tensões experimentais a partir dos dados de deformações, adotou-se a expressão derivada da equação clássica de Hooke e apresentada por Hoffmann (1989) sendo:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y)$$

Onde:

σ_x = tensão ao longo do eixo x;

E = módulo de elasticidade do material;

ε_x = deformação longitudinal;

ε_y = deformação transversal e;

ν = coeficiente de Poisson.

3.5 Instrumentação do silo

Foram instrumentadas apenas duas paredes do silo sendo denominadas, para facilidade de entendimento, de Parede I àquela cujo comprimento do vão é igual a um metro e de Parede II àquela cujo comprimento do vão é igual a dois metros.

Foram escolhidos dois pontos para a instalação dos sensores e coleta de dados em cada parede sendo eles, unicamente, no centro do vão das partes superior e inferior da onda central na tentativa de se minimizar as influências das bordas enrijecidas pela união tremonha-onda inferior e das bordas livres da onda superior (Figura 48).

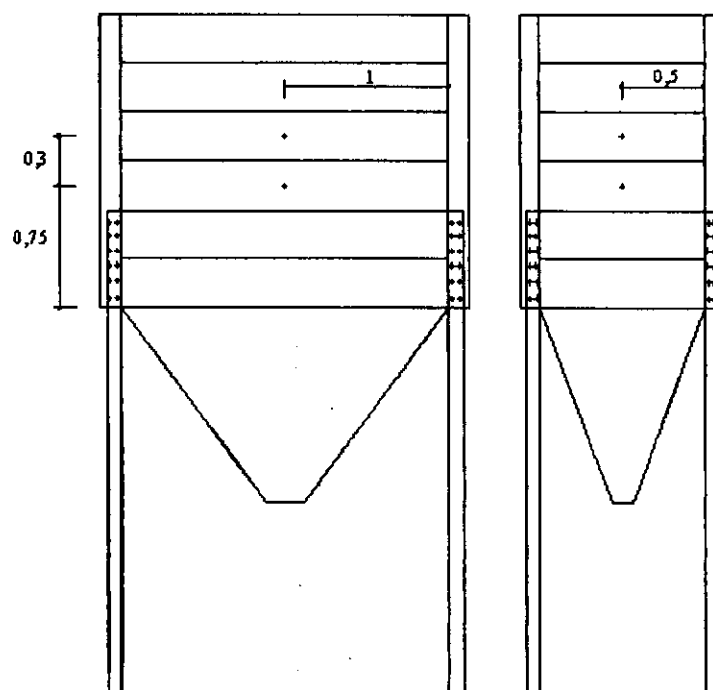


Figura 48 - Pontos de coleta de dados

Os extensômetros elétricos foram instalados na superfície externa da onda central das paredes nos sentido transversal e longitudinal (Figura 49) a fim de se determinar as deformações no estado duplo de tensão.



Figura 49 - Posicionamento dos extensômetros

Para o posicionamento dos transdutores diferenciais, foram adotados os mesmos procedimentos descritos para os extensômetros elétricos.

3.6 Procedimento dos ensaios

O sistema de aquisição de dados foi configurado para operar a uma frequência de 1Hz coletando e armazenando, desta forma, uma informação por segundo durante toda a execução dos ensaios.

Tanto para o carregamento quanto para o descarregamento do silo, se utilizou o equipamento de transporte horizontal e/ou inclinado de materiais sólidos com fluxo constante denominado de correia transportadora por ser um dos equipamentos mais adequados para se assegurar a concentricidade dos processos de carga e descarga.

A coleta dos dados realizou-se durante os processos de carregamento e descarregamento do silo sendo os mesmos divididos em três etapas consistindo, cada etapa, de três repetições a fim de se minimizar os erros devido à dispersão de dados. Para a obtenção dos resultados, utilizou-se a média aritmética das três repetições de cada fase.

Na primeira etapa do estudo, ocorreu o carregamento do silo com soja peletizada e após 30min, efetuou-se seu descarregamento completo. Esta etapa foi denominada de Fase Instantânea.

Na segunda etapa, o silo foi carregado e somente descarregado depois de completadas 24h do início do processo. A esta etapa, referiu-se como Fase 24 horas.

Na terceira etapa, o silo foi carregado e somente descarregado 48h após o início do processo. Esta etapa foi denominada de Fase 48 horas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Propriedades físicas da soja em pelets

4.1.1 Granulometria e teor de umidade (w)

Através dos ensaios de granulometria, observou-se que o maior valor de percentual retido acumulado para a soja em pelets foi de 32,16% para a peneira de malha 4mm (Figura 50).

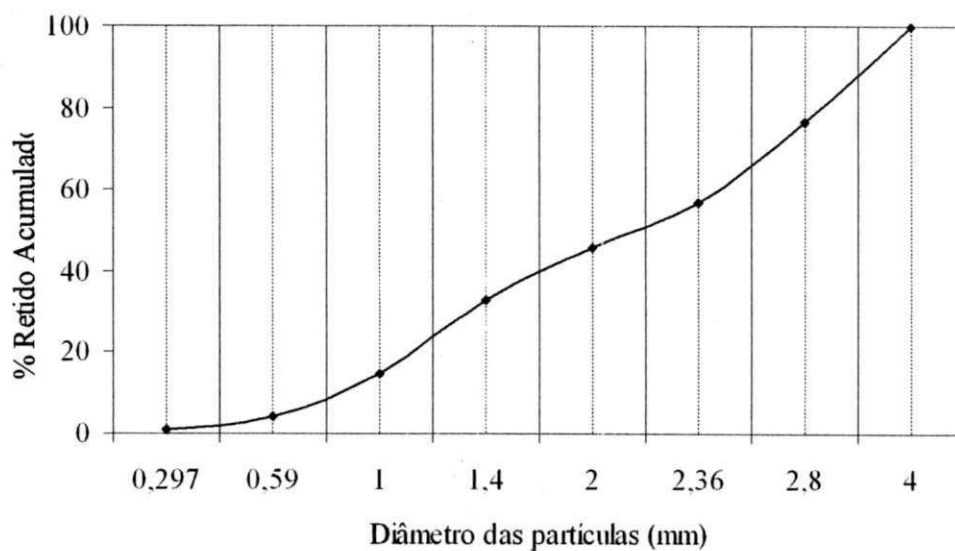


Figura 50 - Curva granulométrica da soja em pelets

Conforme classificação dos produtos sólidos em função das dimensões do diâmetro das partículas proposta por Calil Junior (1984), pode-se considerar a soja em pelets como um produto de característica granular, pois sua granulometria resultou em valor superior a 1mm. De acordo com os testes para a determinação do teor de umidade (w), a soja em pelets

utilizada na determinação das propriedades de fluxo encontrava-se com teor de umidade de 11,01%b.u.

4.2 Propriedades de fluxo da soja em pelets

Para a determinação das propriedades de fluxo, optou-se por apresentar o peso específico consolidado (γ), ângulo de atrito interno (\emptyset), efetivo ângulo de atrito interno (δ) e ângulo de atrito interno do produto com a parede (\emptyset_w) em dois valores: limite inferior e limite superior como recomendado pela norma AS 3774 (1990) possibilitando, assim, calcular as pressões máximas pelo método dos estados limites através da combinação de valores indicada para cada aplicação (vide Tabela 3).

A seguir, são apresentados os valores encontrados para as propriedades de fluxo da soja em pelets (Tabela 11).

Tabela 11 - Propriedades de fluxo obtidas para a soja em pelets

Propriedades de fluxo da soja em pelets		
	γ_i (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)
Peso específico consolidado (γ)	5,1	5,7
Ângulo de atrito interno (\emptyset)	\emptyset_i (°) 28,0	\emptyset_s (°) 38,3
Ângulo efetivo de atrito interno (δ)	δ_i (°) 33,8	δ_s (°) 40,3
Ângulo de atrito com aço rugoso (\emptyset_w)	\emptyset_{wi} (°) 16,3	\emptyset_{ws} (°) 20,8

Os índices "i" e "s" indicam os limites inferior e superior, respectivamente.

É importante salientar que os valores acima apresentados foram determinados através do ensaio de cisalhamento instantâneo podendo os mesmos ser diferentes dos encontrados em ensaios de consolidação os quais não foram possíveis de ser realizados devido as tensões de cisalhamento após consolidação do produto serem maiores que as de pré-cisalhamento, o que contraria as recomendações das metodologias adotadas para a determinação das propriedades de fluxo.

Apesar de não haver registros científicos conhecidos a cerca das propriedades de fluxo da soja em pelets, pode-se destacar que os resultados de ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno encontram-se próximos aos obtidos por Bandeira et al. (1999) ao estudar as propriedades de fluxo de ração avícola. Para o peso específico consolidado, o valor superior ficou próximo ao encontrado para farinha (6kN/m³) segundo a norma EUROCODE 1

(1995). Para o ângulo de atrito entre o produto e a parede, seu limite superior é cerca de 10% menor que o limite inferior de grãos de trigo pela norma ISO 11697 (1995) para paredes rugosas.

4.3 Pressões normais teóricas nas paredes do silo

Foram calculadas as pressões horizontais através de quatro normas internacionais: DIN 1055 (1987), ISO 11697 (1995), EUROCODE 1 Part 4 (1995) e AS 3774 (1990) para as Paredes I e II nas situações estática e dinâmica. Referencia-se como situação estática àquela correspondente ao carregamento do silo e situação dinâmica àquela correspondente ao descarregamento do silo. A partir dos valores teóricos de pressão horizontal (P_h), determinou-se, em função do ângulo de inclinação da conformação das paredes, a pressão normal nas ondas (P_N).

Observa-se na Figura 51, que os valores de pressão normal estática na Parede I na profundidade de 0,9m (profundidade a qual foi realizada a coleta de dados) variaram de 1,2kPa a 1,9kPa para as normas AS 3774 (1990) e DIN 1055 (1987), respectivamente.

Os valores máximos e mínimos obtidos na condição dinâmica (Figura 52) foram 2,9kPa e 2,1kPa, também para as normas DIN 1055 (1987) e AS 3774 (1990), respectivamente, para a profundidade de 0,9m. Tal comportamento deve-se ao fato da norma DIN 1055 (1987) ser largamente reconhecida como uma norma conservadora, enquanto que a AS 3447 (1990) apresenta maior arrojo de cálculo na condição de descarga.

Em análise as pressões estáticas e dinâmicas calculadas pela norma DIN 1055 (1987), norma que apresentou maiores valores, foi possível calcular um coeficiente de sobrepressão para o descarregamento na parede de 1m de 1,5.

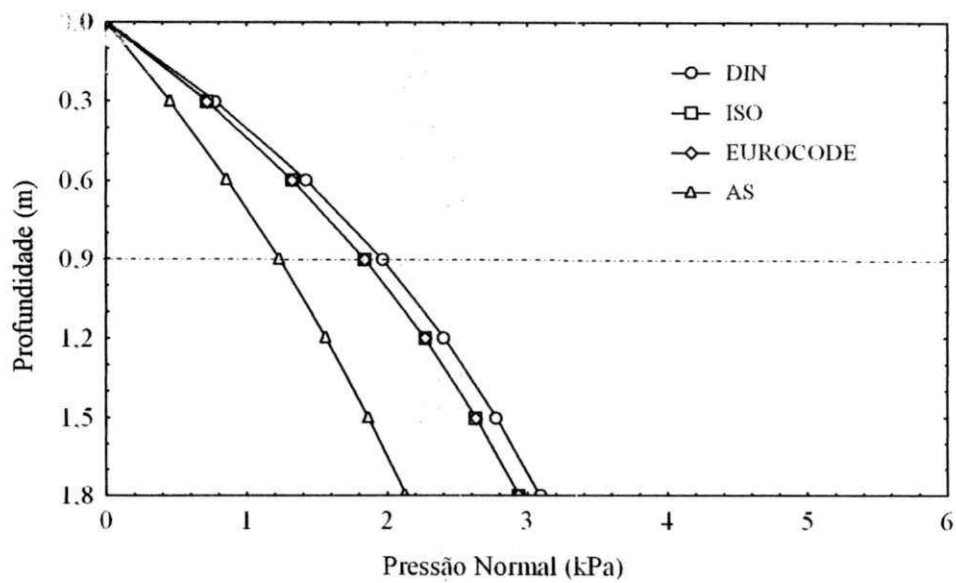


Figura 51 - Curvas de pressões normais estáticas para a Parede I

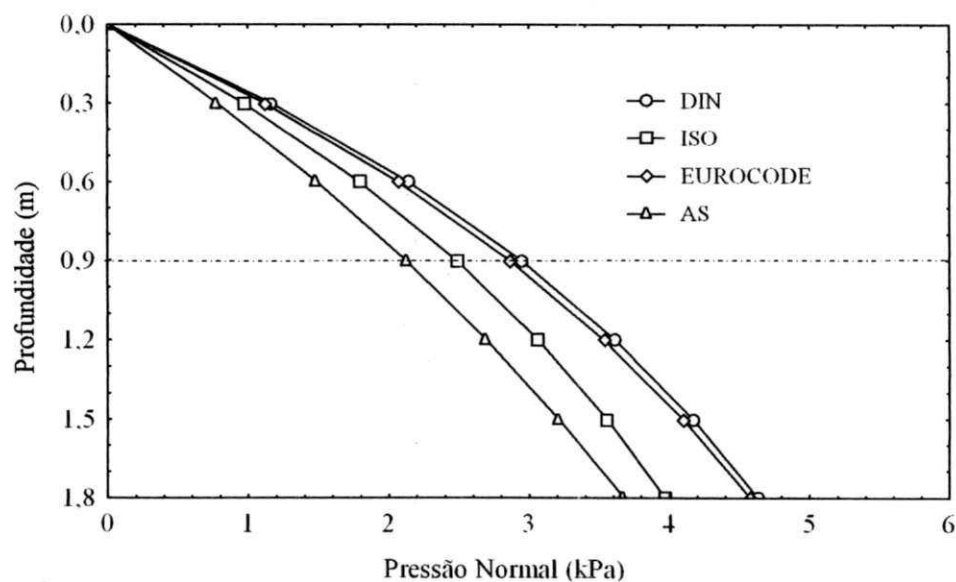


Figura 52 - Curvas de pressões normais dinâmicas para a Parede I

Na Tabela 12, a seguir, encontram-se os valores de K e C adotados para cada norma.

Tabela 12 - Valores de K e C adotados para os cálculos

Norma	K $\left(K = \frac{P_h}{P_v} \right)$	C (coeficiente de sobrepressão)
DIN 1055 (1987)	0,53	1,50
ISO 11697 (1995)	0,49	1,35
EUROCODE 1 (1995)	0,49	1,55
AS 3774 (1990)	0,35	1,72

Na Figura 53, observa-se que os valores extremos na situação estática para a Parede II foram 1,29kPa e 2,14kPa para as normas AS 3774 (1990) e DIN 1055 (1987), respectivamente, na profundidade de 0,9m, sendo estes 64% inferiores ao valor obtido por Jarret et al. (1995) na profundidade de 1m ao utilizar areia em um silo metálico quadrado (2m x 2m) de paredes planas de espessura igual a 10mm, o que pode ser explicado pelo fato da areia possuir peso específico duas vezes superior ao da soja em pelets. Na Figura 54, destaca-se o maior valor obtido para a norma DIN 1055 (1987) igual a 3,21kPa. Para esta parede, o coeficiente de sobrepressão calculado para o descarregamento foi de 1,5.

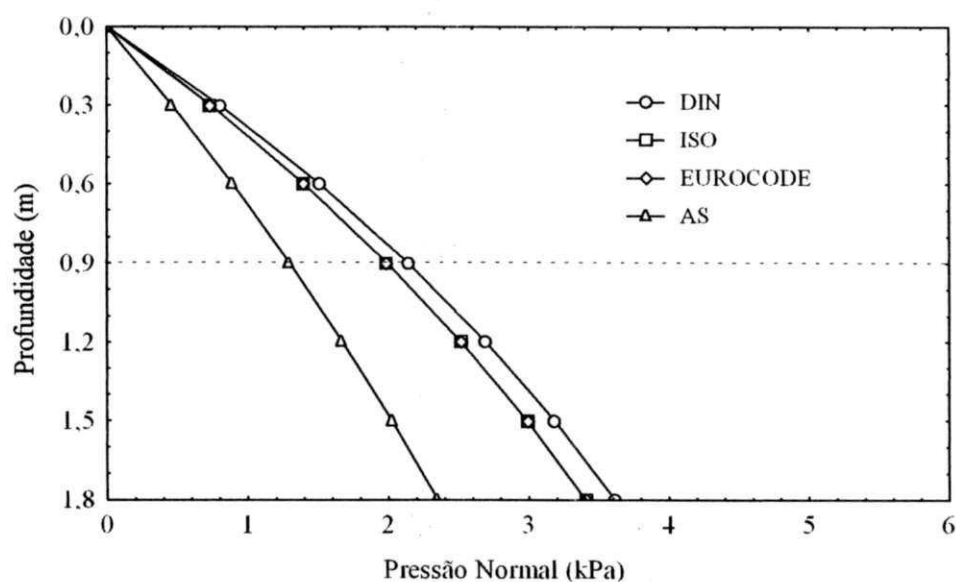


Figura 53 - Curvas de pressões normais estáticas para a Parede II

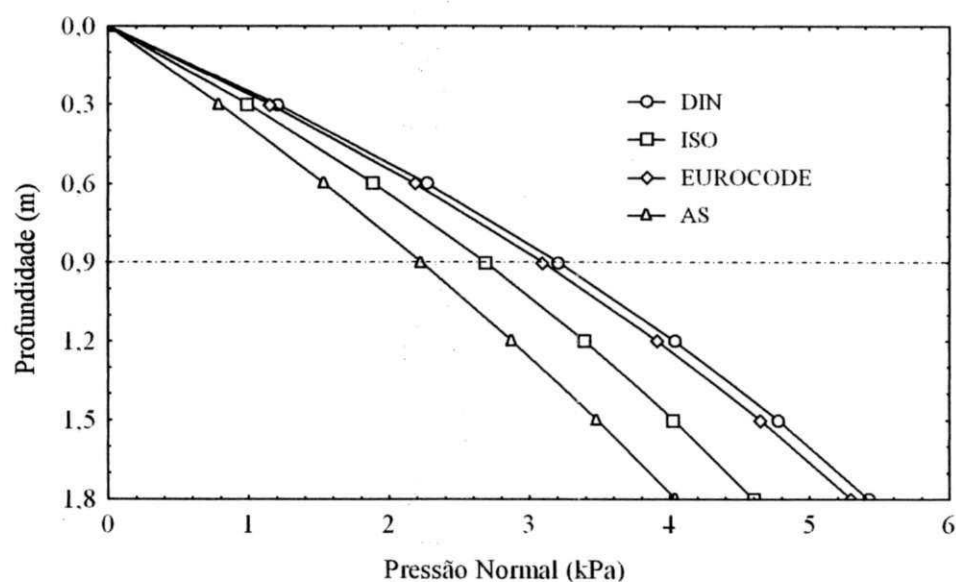


Figura 54 - Curvas de pressões normais dinâmicas para a Parede II

Novamente, o comportamento das curvas obtidas para as duas situações (estática e dinâmica) foi semelhante aos resultados da Parede I devido, em grande parte, aos fatores K e C adotados. Com relação ao valor máximo obtido para o descarregamento (3,21kPa para norma DIN1055), este se encontra cerca de 40% abaixo do registrado por Hotter et al. (2002) ao medir a pressão horizontal provocada por areia a uma altura de 1m em um silo quadrado 1,5m x 1,5m de paredes planas de 6mm de espessura, enquanto Ravenet (1992), ao usar a teoria de Janssen para grãos de trigo em um silo quadrado (3m x 3m) de concreto armado, determinou valor mais compatível igual a 2,56kPa, evidenciando a forte influência das diferenças entre as propriedades de fluxo de cada produto nas pressões normais à parede.

4.4 Tensões experimentais nas paredes do silo

Apesar do sistema de aquisição de dados ter sido configurado para a captura de uma informação por segundo (frequência de 1Hz), optou-se por analisar os dados armazenados a cada minuto de ensaio em função do alto número de informações coletadas.

A escolha dos pontos de análise das tensões deu-se ao fato de admitir que no meio dos vãos das paredes ocorressem os maiores valores de flexões correspondendo, portanto, às máximas tensões. Para a comparação dos resultados obtidos com o estudo de painéis prismáticos de conformação zigzague, utilizou-se a pesquisa desenvolvida por Nascimento (1996).

A seguir, são apresentados valores de tensões a partir das deformações captadas pelos extensômetros elétricos para as Fases Instantâneas, 24 horas e 48 horas para as situações estática e dinâmica nas Paredes I e II. Os valores negativos foram dispostos nos gráficos em valor absoluto para melhor efeito de visualização.

4.4.1 Tensões na Fase Instantânea

Paredes I e II

Através da Figura 55, observam-se os valores máximos de tensão para as duas partes que compõem a onda principal das paredes I e II (aqui denominadas de Superior, a parte superior da onda e Inferior, a parte inferior da onda central) para as condições estática e dinâmica. Em análise a condição estática na Parede I, a parte inferior (INF) assumiu um valor máximo igual a 30MPa enquanto que a metade superior (SUP) alcançou cerca de -12MPa. O valor negativo determinado para a parte superior da onda significa um esforço de compressão

de suas fibras externas influenciada pelo comportamento da parte inferior em razão da própria conformação zigzague que pode proporcionar zonas afetadas e não afetadas por pressões (Figura 56).

O que também pode ter contribuído é o fato da relação altura do corpo do silo/lado maior ser igual a 0,9 e altura do corpo do silo/lado menor ser igual a 1,8. Como se sabe que esta relação possui estreita relação com as pressões desenvolvidas no silo haja vista que grande parte das normas internacionais determinam seus coeficientes de sobrepressão no descarregamento a partir das propriedades de fluxos e da relação altura/diâmetro ou lado.

Segundo Troitsky (1982), as ações de carregamentos estáticos e dinâmicos originam, nas paredes de silos prismáticos, complexos esforços de tração, compressão, flexão e torção e que a escassez de documentos científicos para silos prismáticos dificulta um melhor entendimento do comportamento estrutural das paredes no processo de descarregamento expondo a necessidade de confirmação dos dados em trabalhos futuros.

Na situação dinâmica, os valores máximos de tensão registrados para o descarregamento foram 31MPa e -15MPa para a metade inferior e superior, respectivamente, ficando cerca de 35% abaixo do valor máximo obtido por Nascimento (1996) ao determinar as tensões em um painel metálico de 1m de vão em conformação zigzague.

A diferença entre os valores das duas pesquisas pode ser explicada pelas singularidades de carregamento de cada uma, já que na pesquisa de Nascimento (1996), procedeu-se carregamento normal ao plano do painel utilizado, o que ocasionou uma distribuição de cargas diferente da ocorrida neste experimento.

Para a Parede II, ainda na Figura 55, pode-se observar que a tensão na situação estática na metade inferior da onda atingiu um valor de 51MPa enquanto que, para a metade superior, o valor máximo foi de -12MPa. Tal variação pode ser explicada, novamente, pela influência da metade inferior sobre a superior em razão da conformação das paredes já que, com o decorrer do carregamento do silo, a carga crescente na metade inferior fez com que a superior sofresse uma inversão de comportamento ocasionando compressão de suas fibras externas.

Para a condição dinâmica na mesma Parede II, ocorreu uma elevação da tensão na parte inferior atingindo um valor de 58MPa enquanto que o máximo valor na parte superior foi de -13MPa. Destaca-se para esta parede a ocorrência de um valor de tensão no descarregamento superior ao máximo registrado no carregamento, podendo-se calcular um coeficiente de acréscimo de tensão no descarregamento igual a 1,14.

Nesta parede, o valor máximo de tensão (61MPa no descarregamento) ficou cerca de 13% acima do obtido no ensaio realizado por Nascimento (1996) em painéis de 2m de vão,

evidenciando que tanto para a Parede I quanto para a Parede II, o estudo de painéis não conseguiu reproduzir com fidelidade os esforços nas paredes do silo em escala real, possivelmente em função da forma de carregamento e arranjo experimental utilizadas aliada a influência de momentos nos cantos e engastamento das extremidades.

É importante salientar que a tensão no descarregamento na parte inferior (parte que ocorreu os maiores esforços) da onda central da parede II para esta fase foi 1,8 vezes maior que na parede de 1m de vão, fato este não compartilhado pelo estudo de Nascimento (1996) (diferença de 10% para os dois painéis) significando, novamente, que as condições de contorno adotadas para o estudo de painéis prismáticos podem ter sido responsáveis por não refletir com exatidão os esforços nas paredes de um silo real.

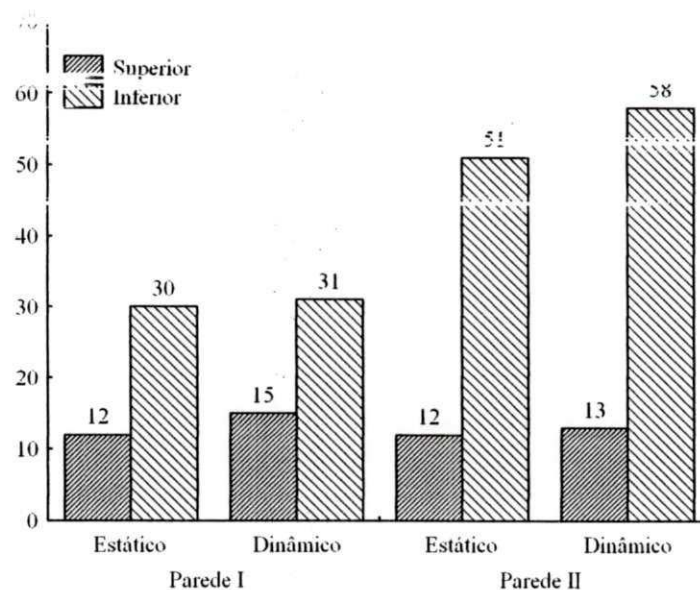


Figura 55 - Tensões nas Paredes I e II na Fase Instantânea

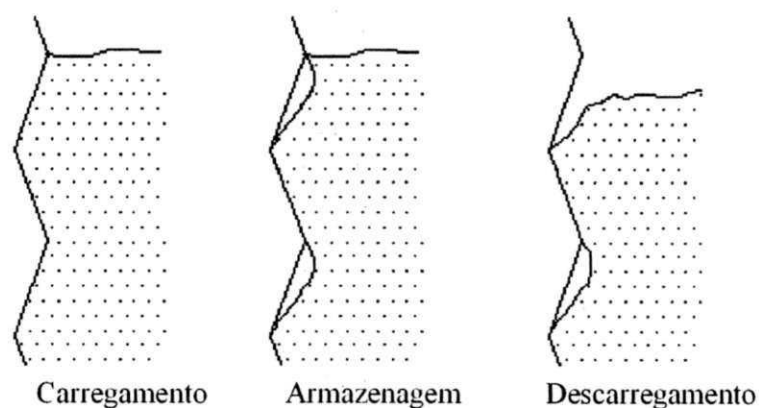


Figura 56 - Particularidades do fluxo em paredes ziguezague (RAVENET, 1974)

4.4.2 Tensões na Fase 24 horas

Paredes I e II

Na Figura 57 são apresentadas tensões para as situações estática e dinâmica para as duas paredes na Fase 24 horas. Para a condição estática na Parede I, destacam-se o máximo valor obtido pela parte inferior da onda, responsável por suportar maiores esforços durante o carregamento do silo, igual a 30MPa enquanto que para a parte superior, o valor extremo foi de -11MPa. Para a condição dinâmica na mesma parede, os valores máximos registrados para a parte inferior e superior foram 32 e -17MPa, respectivamente.

Para esta parede, a tensão máxima registrada no descarregamento do silo foi superior a obtida no carregamento, permitindo calcular um coeficiente de acréscimo de tensão para o descarregamento de 1,1. Já em comparação ao estudo de painéis prismáticos, a tensão obtida por Nascimento (1996) para o painel de 1m de vão foi 10% superior à máxima registrada para o descarregamento nesta parede e fase.

Em comparação à Fase Instantânea, as tensões na parte inferior da onda no descarregamento na parede de 1m de vão na Fase 24 horas foram 3% superiores representando, assim, um leve acréscimo na tensão com o aumento do período de armazenagem do produto no silo.

Ainda na Figura 57, observa-se que para a condição estática na Parede II, novamente ocorreu obtenção do valor máximo para a parte inferior (52MPa). Para a situação de descarregamento, os valores extremos para a parte inferior e superior iguais a 62MPa e -18MPa, respectivamente o qual permitiu determinar um coeficiente de sobretensão para o descarregamento de 1,2.

Nascimento (1996) encontrou em seu estudo, para o painel de 2m de vão, uma tensão longitudinal de 52MPa a uma pressão de 3,2kPa o que representa uma diferença de quase 20% quando comparada à tensão máxima obtida nesta parede e fase (62MPa).

Analisando-se os máximos valores obtidos no descarregamento para as Paredes I e II, pode-se destacar uma diferença de 1,93 vezes a favor da parede de 2m de vão. Em comparação aos valores de tensão obtidos na parte inferior da onda central da parede de 2m de vão na Fase Instantânea, as tensões na Parede II na Fase 24 Horas foram cerca de 6% superiores indicando aumento dos esforços de acordo com o aumento do período de armazenagem do produto no silo.

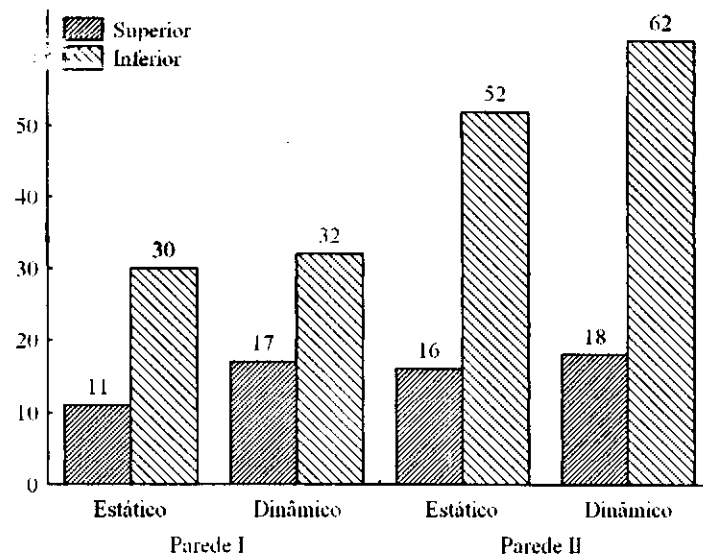


Figura 57 - Tensões nas Paredes I e II na Fase 24 horas

4.4.3 Tensões na Fase 48 horas

Paredes I e II

Na condição estática da Parede I, Figura 58, os maiores valores de tensão foram de 29MPa e -12MPa para as partes inferior e superior da onda central, respectivamente. Para a condição dinâmica, a parte superior da onda atingiu tensão máxima igual a -18MPa e a inferior igual a 33MPa.

Analisando-se os valores extremos da parte inferior da onda no carregamento e descarregamento para esta parede, pode-se calcular um coeficiente de acréscimo de tensões para o descarregamento igual a 1,14 sendo o valor no descarregamento (33MPa) cerca de 30% inferior à tensão descrita por Nascimento (1996) para uma pressão de 3kPa (pressão teórica admitida como máxima ocorrente na parede de 1m do silo). Em comparação aos resultados na Fase Instantânea, pode-se ressaltar que a tensão na Parede I na Fase 48 horas foi 6% superior.

Ainda Figura 58, na condição de carregamento para a Parede II, valores máximos iguais a 51MPa e -23MPa para as partes inferior e superior da onda central, respectivamente. Para o descarregamento, os valores foram iguais a 65MPa e -24MPa.

O valor de 65MPa encontrado na fase 48 horas para a parede II foi a maior tensão registrada neste estudo, o que pode ser justificado pelo aumento das pressões no descarregamento em função do aumento no período de consolidação do produto (AYUGA,

1995). Em comparação aos esforços de carregamento na parte inferior da onda, a tensão máxima na condição dinâmica apresentou um coeficiente de acréscimo igual a 1,3.

Em análise a tensão referente aos períodos de consolidação Instantânea e 48 horas, pode-se relatar um coeficiente de acréscimo para o descarregamento na Fase 48 horas igual a 1,12. Entre as duas paredes, a diferença aumentou de 1,8 para a Fase Instantânea, para 1,96 nesta fase, confirmando o acréscimo na diferença de tensão entre paredes à medida que aumenta o período de armazenagem.

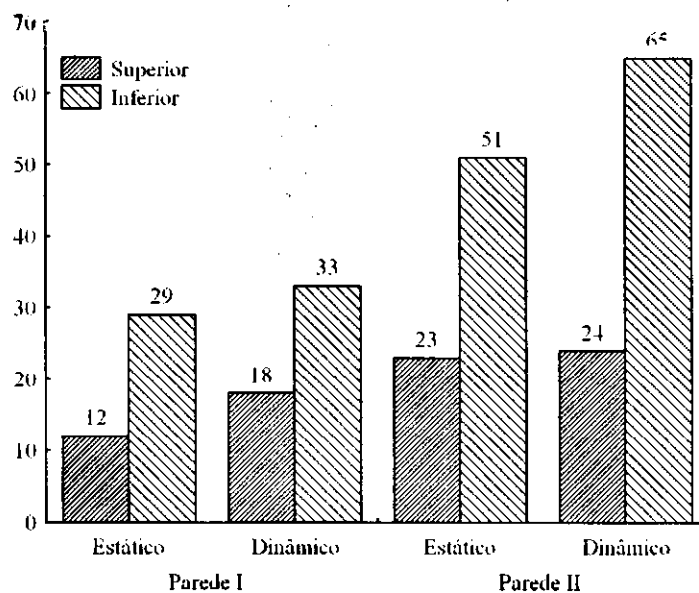


Figura 58 - Tensões nas Paredes I e II na Fase 48 horas

Na Tabela 13 são apresentados os coeficientes de acréscimo de tensão para o descarregamento para as duas paredes nas fases estudadas.

Tabela 13 - Coeficientes de sobretensão para o descarregamento

	Fases		
	Instantânea	24 horas	48 horas
Parede I	1,0	1,1	1,5
Parede II	1,1	1,2	1,3
Entre paredes I e II	1,8	1,9	2,0

4.5 Comparação entre tensões teóricas e experimentais

A seguir, são apresentados gráficos comparativos entre as tensões calculadas a partir das teorias de Ravenet (1992) e Troitsky (1982) utilizando as quatro normas e as tensões

calculadas através das deformações medidas nas paredes do silo para as Fases Instantânea, 24 e 48 horas de armazenamento. Os valores experimentais a serem destacados a seguir foram os máximos obtidos para parte superior e inferior da onda central das duas paredes e seus valores, quando negativos (compressão), foram apresentados em módulo.

Para a discussão dos resultados, optou-se por adotar a pesquisa proposta por Nascimento (1996) a fim de verificar sua viabilidade além do fato de ser o único documento científico conhecido específico sobre o tema abordado nesse trabalho.

Vale ressaltar que os dados obtidos através dos cálculos pelas teorias de Ravenet e Troitsky correspondem apenas às tensões desenvolvidas nas paredes do silo na fase instantânea sem levar em consideração possíveis alterações nas propriedades de fluxo do produto devido ao tempo de armazenagem, alterações estas que podem influenciar de maneira significativa os esforços atuantes nas paredes vindo por apresentar valores maiores ou menores dos que aqui relatados para as duas teorias.

4.5.1 Tensões na Fase Instantânea

Parede I

Tomando-se como base os valores máximos de tensão obtidos para a parte inferior da onda central na Figura 59, nota-se que a teoria associada à norma de pressão que melhor representou a tensão na Parede I para o carregamento foi a teoria de Troitsky combinada à norma AS 3774 (1990), sendo a mesma 10% superior ao valor máximo obtido através das deformações o qual permite calcular um coeficiente de diferença entre a teoria e experimental de 1,1. Tal resultado foi confirmando por Nascimento (1996) ao concluir que a teoria simplificada de Troitsky foi a que melhor se comportou para o painel com 1m de vão. Já para a condição dinâmica (Figura 60), a teoria de Ravenet em associação à mesma norma AS 3774 (1990) foi a que apresentou uma tensão mais compatível com o valor experimental, superestimando-o em 32% contra 50% da teoria de Troitsky para mesma norma.

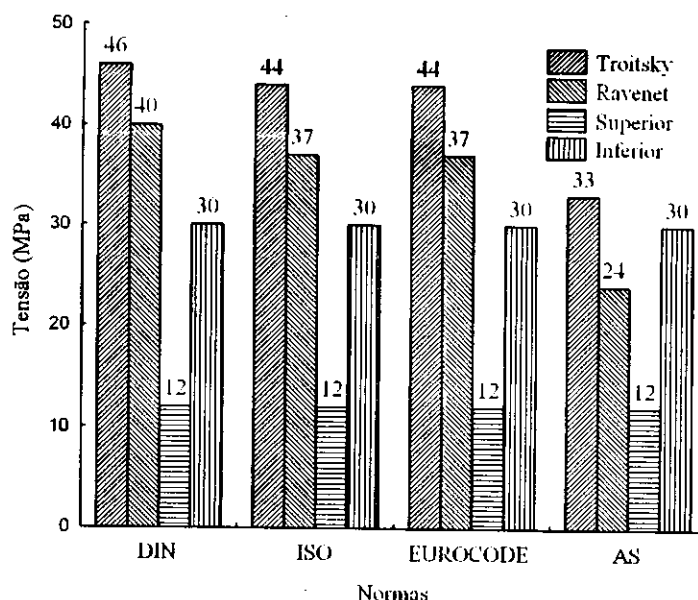


Figura 59 - Tensões no carregamento da Fase Instantânea na Parede I

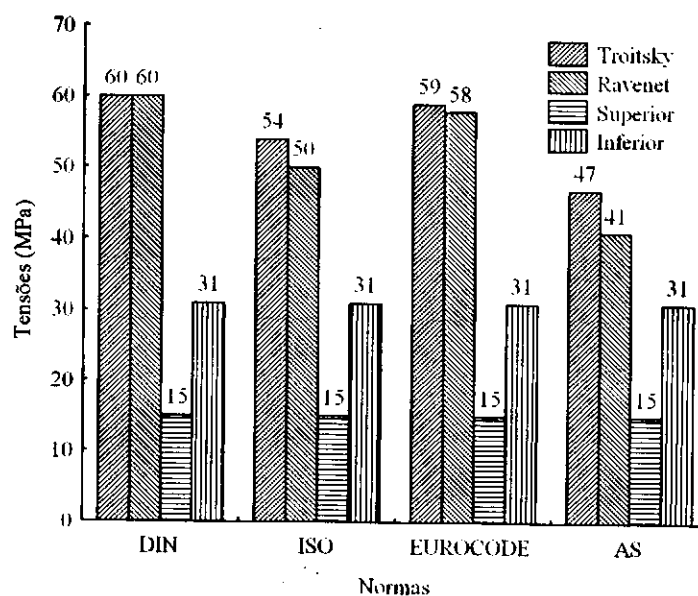


Figura 60 - Tensões no descarregamento da Fase Instantânea na Parede I

Parede II

Em análise aos dados encontrados para a parede de 2m na Fase Instantânea na Figura 61, observa-se que a teoria que melhor representou os esforços na parede foi a proposta por Troitsky em conjunto com as normas ISO 11697 (1995) e EUROCODE 1 (1995) sendo 2% maior que a tensão no silo para o carregamento.

Para o descarregamento mostrado na Figura 62, novamente a teoria de Troitsky em conjunto com a norma AS 3774 (1990) demonstrou-se mais adequada ao se igualar à máxima

tensão experimental. Já a teoria de vigas bi-engastadas proposta Ravenet para mesma norma, demonstrou-se mais conservadora alcançando valor 36% superior ao experimental contrariando o estudo de painéis de Nascimento (1996) ao determinar superestimação de valores por parte da teoria Troitsky e melhor adequação por parte da teoria de Ravenet o que pode ser explicado pelo fato de que, no estudo de painéis, a tração na parede provocada pela reação nos apoios é independente do carregamento utilizado.

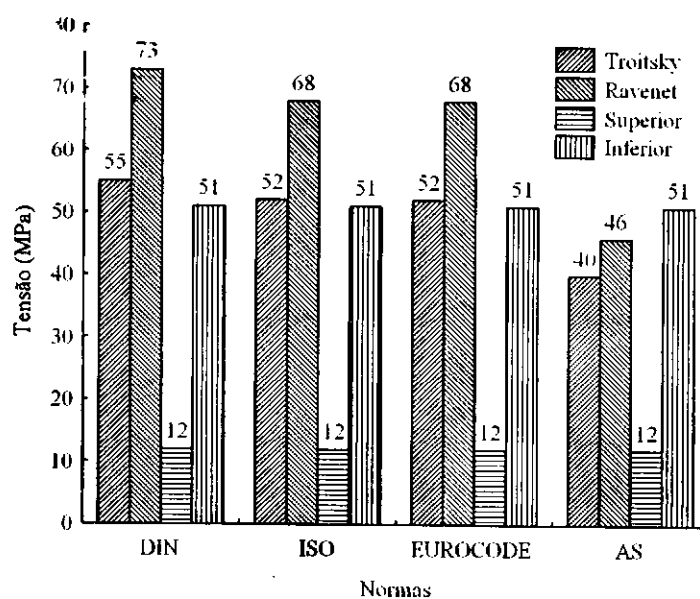


Figura 61 - Tensões no carregamento da Fase Instantânea para a Parede II

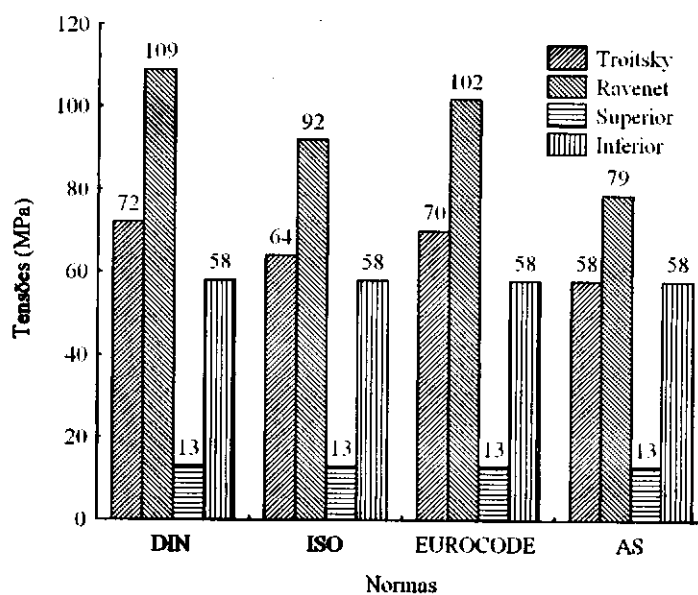


Figura 62 - Tensões no descarregamento na Fase Instantânea para a Parede II

4.5.2 Tensões na Fase 24 horas

Parede I

Através da Figura 63, observa-se que a teoria de Troitsky em combinação à norma AS 3774 (1990) foi a que mais se aproximou dos valores de tensão experimentais para a condição estática superestimando-os em 10%. Para as tensões no descarregamento observado na Figura 64, a teoria de vigas bi-engastadas de Ravenet em conjunto a norma AS (1990) foi a mais aproximada dentre as demais ficando cerca a diferença notada foi 28% acima das tensões práticas.

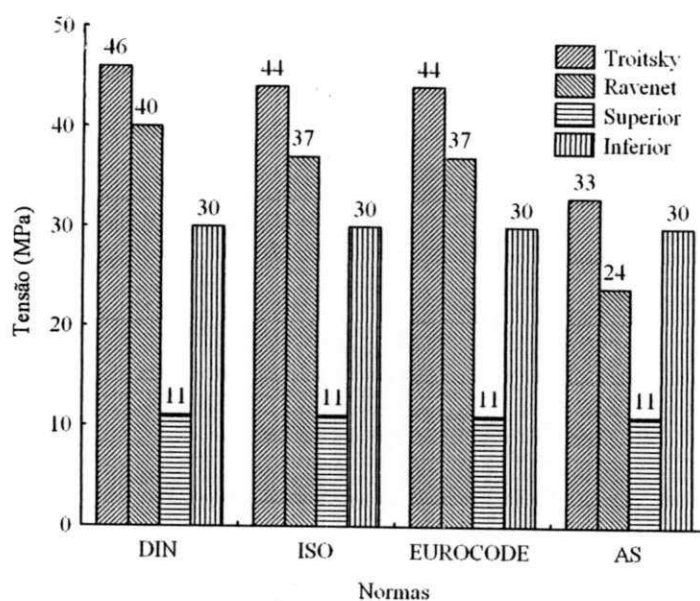


Figura 63 - Tensões no carregamento da Fase 24 horas para a Parede I

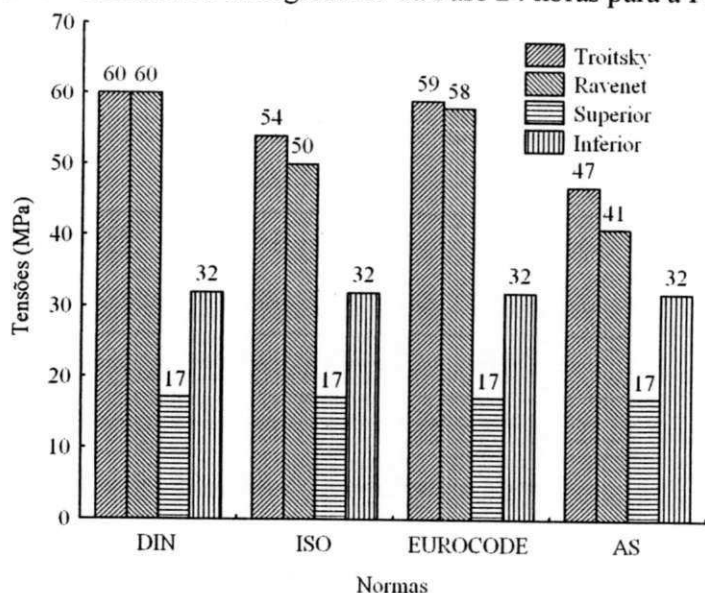


Figura 64 - Tensões no descarregamento da Fase 24 horas para a Parede I

Parede II

Para as tensões na condição de carregamento (Figura 65), o resultado obtido pela teoria de Troitsky em combinação as normas ISO 11697 (1995) e EUROCODE 1 (1995) foi a que melhor representou as tensões no silo igualando-as as da parte inferior da onda central. Já para a teoria de Ravenet, a menor diferença foi obtida através da norma AS 3774 (1990) sendo 13% inferior a experimental. Para o descarregamento (Figura 66), a teoria de Troitsky em conjunto à norma ISO 11697 (1995) obtiveram as menores diferenças ficando cerca de 3% acima dos valores experimentais. Em análise à teoria de Ravenet, a menor diferença de tensão foi obtida com uso da norma AS 3774 (1990) sendo 27% superior à experimental.

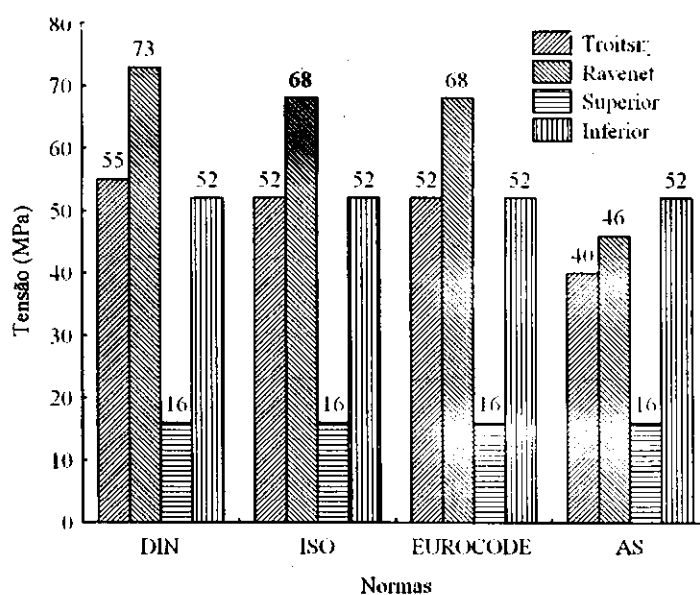


Figura 65 - Tensões no carregamento da Fase 24 horas para a Parede II

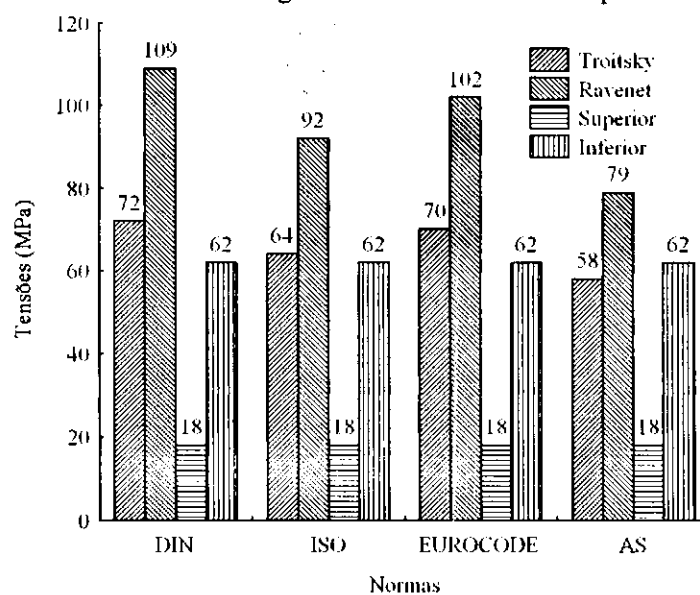


Figura 66 - Tensões no descarregamento da Fase 24 horas para a Parede II

4.5.3 Tensões na Fase 48 horas

Parede I

A combinação Troitsky e AS 3774 (1990) obteve melhor comportamento para o carregamento ficando 14% acima das tensões experimentais, Figura 67, o que é confirmado por Nascimento (1996) ao determinar que a hipótese de viga flexo-tracionada proporciona melhor representação dos esforços em painéis de 1m de vão. Entretanto, em análise ao descarregamento (Figura 68), a teoria de Ravenet em conjunto a norma AS 3774 (1990) foi a que melhor representou os esforços na parede do silo.

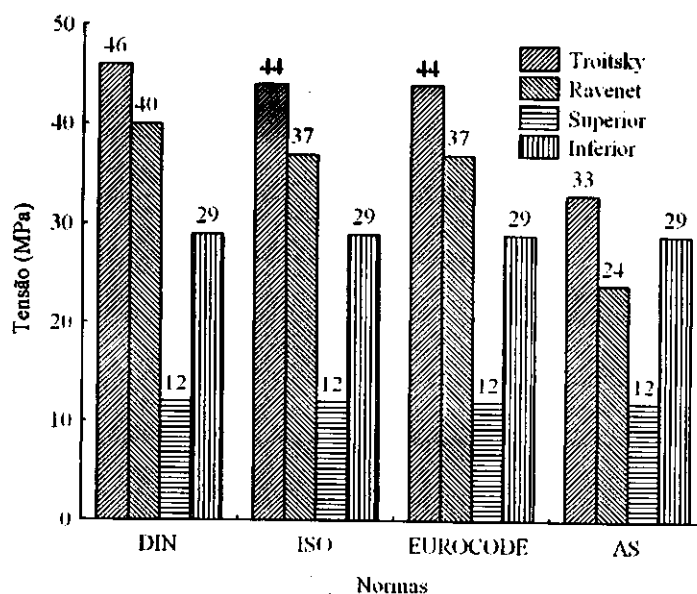


Figura 67 - Tensões no carregamento da Fase 48 horas para a Parede I

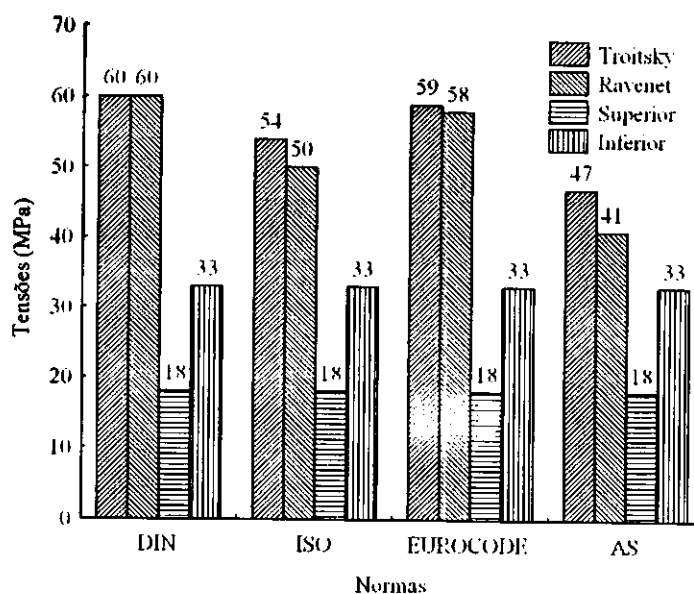


Figura 68 - Tensões no descarregamento da Fase 48 horas para a Parede I

Parede II

Conforme Figura 69, para a parede de 2m de vão, a combinação da teoria proposta por Troitsky e as normas ISO 11697 (1995) e EUROCODE 1 (1995) obtiveram os valores mais aproximados para o carregamento sendo superior à tensão na parede cerca de 2%. Para condição dinâmica apresentada na Figura 70, a melhor representação das tensões experimentais foi obtida pela teoria de viga bi-apoiada proposta por Troitsky em conjunto às pressões calculadas pela norma EUROCODE 1 (1995) sendo 1% inferior às tensões práticas.

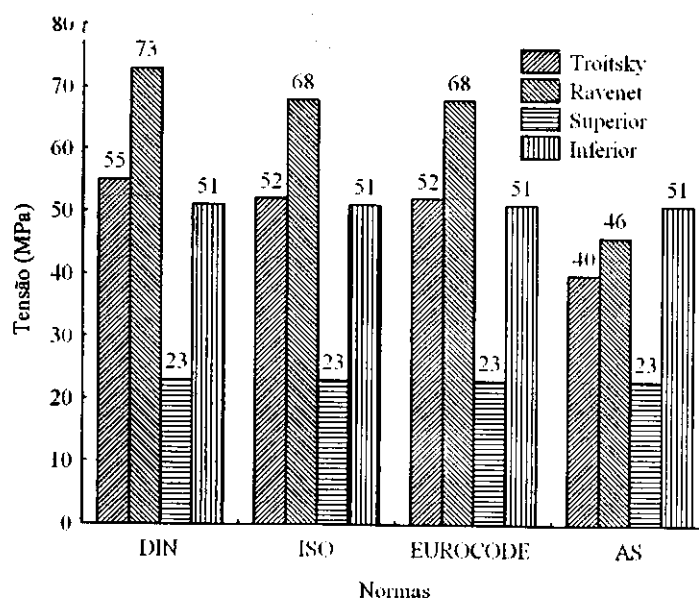


Figura 69 - Tensões no carregamento da Fase 48 horas para a Parede II

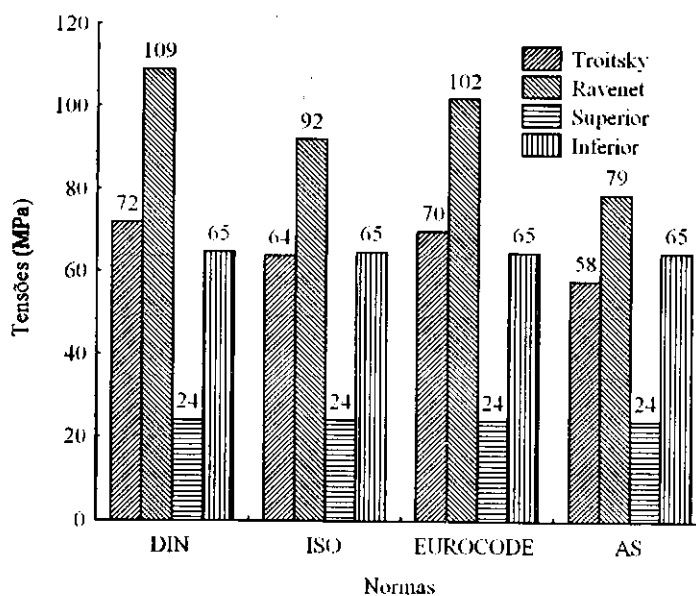


Figura 70 - Tensões no descarregamento da Fase 48 horas para a Parede II

4.6 Deslocamentos nas paredes do silo

A seguir, são apresentadas as curvas de deslocamentos da onda central (metade superior - Sup e metade inferior - Inf) das Paredes I e II para as Fases Instantâneo, 24 horas e 48 horas destacando seus extremos. Devido aos transdutores potenciométricos ter sido posicionados para a medição de deslocamentos sob flexão a partir da posição inicial com seu posterior retorno, no momento e que ocorreu deflexão da metade da onda a partir do ponto inicial, não houve a coleta de dados. A exemplo das curvas de tensões, tal fenômeno foi notado para o descarregamento nas fases 24 e 48 horas.

4.6.1 Deslocamentos na Fase Instantânea

Paredes I e II

Através da Figura 71, pode-se observar que a curva de deslocamento do ponto central da parte inferior da onda da Parede I cresce até um valor próximo de 2,9mm com posterior estabilização até o início do descarregamento no qual vem a assumir seu valor máximo (3,2mm). Para o estudo de Nascimento (1996), a máxima flexão sofrida pelo painel de vão igual a 1m foi 3,67mm representando uma diferença de 14%. Para a metade superior, não foram registrados deslocamentos em vista do ocorrido no posicionamento dos transdutores.

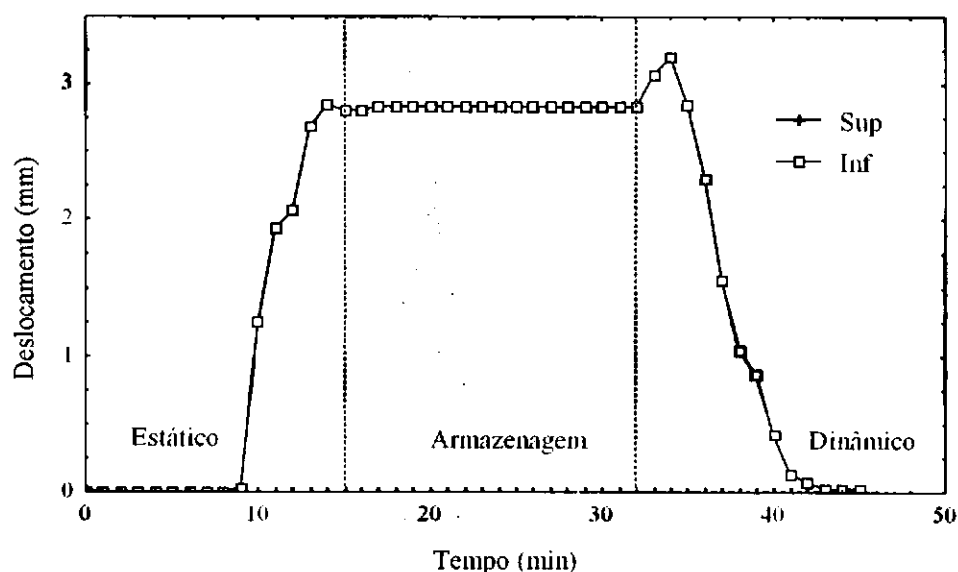


Figura 71 - Deslocamentos na Parede I na Fase Instantânea

Para a Parede II (Figura 72), o maior deslocamento registrado para a condição estática foi de 3,91mm enquanto que, para o descarregamento, foi de 5,6mm, ficando este valor cerca de 45% baixo do obtido por Nascimento (1996) para o painel de 2m.

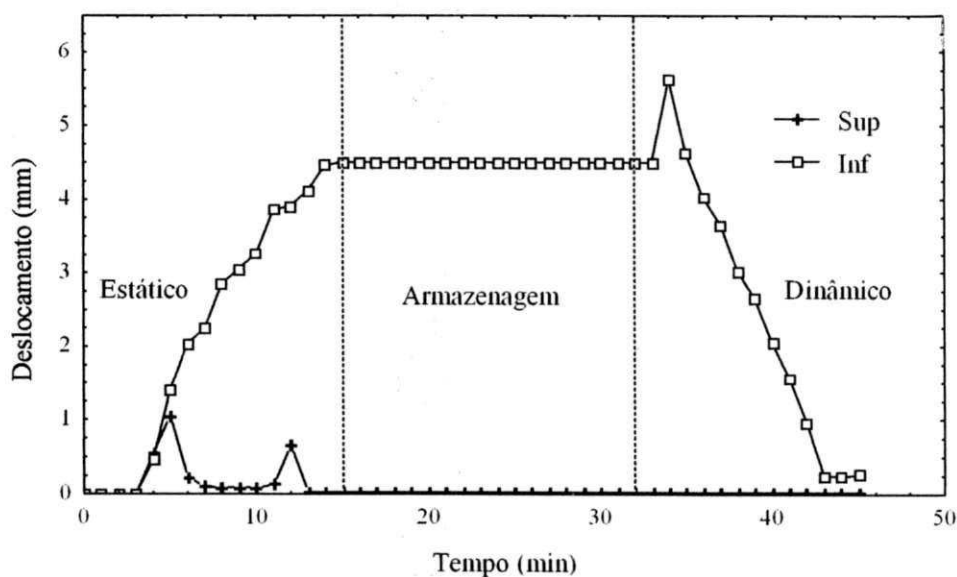


Figura 72 - Deslocamentos na Parede II na Fase Instantânea

4.6.2 Deslocamentos na Fase 24 horas

Paredes I e II

Na Figura 73, pode-se comentar que a maior flexão sofrida pela linha elástica da metade inferior da onda foi de 2,5mm antes de ocorrer uma mudança de comportamento da onda. É possível, analisando-se a tensão a partir deste ponto, que tenham ocorridos deslocamentos maiores que o aqui comentado. Para a parte superior, os transdutores só captaram deslocamentos cerca de 3min após o início do descarregamento. Para a Parede II, (Figura 74), o maior valor foi de 4,8mm registrado para a metade inferior.

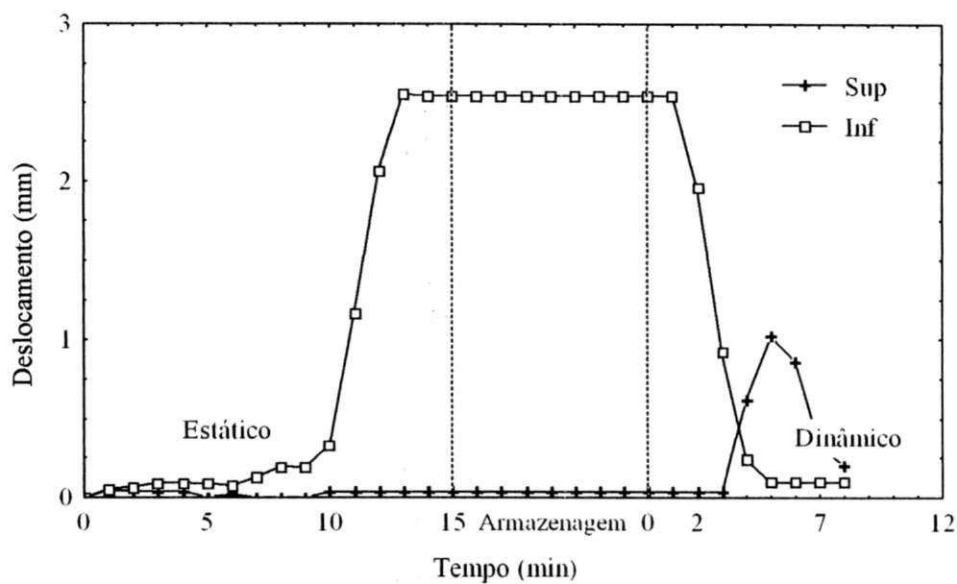


Figura 73 - Deslocamentos na Parede I na Fase 24 horas

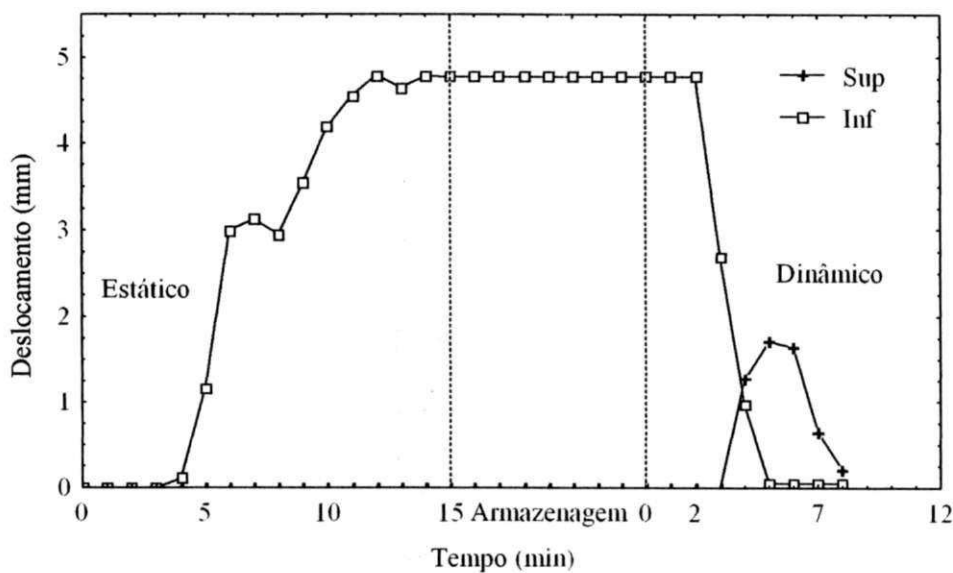


Figura 74 - Deslocamentos na Parede II na Fase 24 horas

4.6.3 Deslocamentos na Fase 48 horas

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos estudos teóricos e experimentais realizados para esta pesquisa a fim de contribuir para melhor entendimento estrutural de silos metálicos prismáticos de paredes conformadas em ziguezague, pode-se concluir que:

- A soja em pelets é classificada como produto granular sem característica coesiva.
- Os maiores esforços nas paredes do silo ocorreram na parte inferior da onda central em virtude da conformação ziguezague devendo-se tomá-la como base para o dimensionamento de silos prismáticos.
- As tensões nas paredes do silo na condição dinâmica foram superiores às estáticas nas duas paredes em todas as fases estudadas e não foi observado acréscimo da tensão durante os períodos de armazenagem estudados.
- Os esforços no descarregamento aumentaram de acordo com o aumento do período de armazenagem do produto no silo.
- A tensão no descarregamento atuante na parede de vão de 2m foi 1,8 vezes superior a da parede de 1m para a Fase Instantânea e tal diferença aumentou para 1,9 e 2,0 para os períodos de 24 horas e 48 horas, respectivamente.
- De acordo com as análises teórica e experimental, as teorias simplificadas de Troitsky e Ravenet podem ser recomendadas ao dimensionamento de silos metálicos prismáticos.

Para futuros estudos que possam complementar ou ampliar esta pesquisa visando à continuação da atividade acadêmica, sugerem-se os seguintes procedimentos:

- A verificação dos esforços teóricos através das propriedades de fluxo do produto sob estado de consolidação a fim de validar por completo as normas de pressão e teorias de tensões mais apropriadas ao estudo de silos prismáticos de paredes em conformação ziguezague.
- A análise da tensão nas paredes ao longo de todo comprimento das três ondas que formam as paredes do silo no intuito de investigar a influência dos esforços entre as ondas.
- A realização de ensaio de carga e descarga do silo com outros produtos de propriedades diferentes da soja em pelets a fim de se obter amplo comportamento estrutural das paredes e das teorias existentes.
- Análise estrutural através de um modelamento numérico com o intuito de se desenvolver elementos que possam auxiliar no melhor entendimento das ações em silos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 313**. Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos and bunkers for storing granular materials. EUA: 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro: 1984.
- AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3774**: Loads on bulk containers. Sydney: 1990.
- AYUGA, F. Los empujes del material almacenado en silos. **Informes de la construcción**. Madrid, v.46, n.436, p. 27-33, 1995.
- BANDEIRA, I. S. A. et al. Análise de fluxo de ração e farelo de trigo em silos prismáticos industriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.2, p.233-238, 1999.
- BENINK, E.J. **Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes**. Netherlands: Universiteit Tweste, 1989. 162p. Thesis, Universiteit Tweste, 1989.
- BRITISH MATERIALS HANDLING BOARD. **BMHB**. Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers. Berkshire: 1985.
- BROWN, C. J. et al. **Experiments on a square planform steel silo**. **Chemical Engineering Science**, Elsevier Science, n.55, p.4399-4413, 2000.
- BROWN, C. J.; NIELSEN, J. **Silos: fundamentals of theory, behaviour and design**. London: E & FN SPON, 1998. 836p.
- CALIL JUNIOR, C. **Sobrepeções em las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulents cohesivos**. São Carlos: USP, 1984. Tese de Livre Docência, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1984.
- CALIL JUNIOR, C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. São Carlos: USP, 1990. 197p.
- CALIL JUNIOR, C. et al. **Silos metálicos multicelulares**. São Carlos: Serviço Gráfico EESC/USP, 1997. 178p.
- CANADIAN FARM BUILDING CODE. **CFBC**. Structural design, Part II. Ottawa: 1983.

DEUTSCHE NORM. **DIN 1055**: Design loads for buildings: loads in silo bins. Berlin: 1987.

EUROCODE 1. ENV 4: Actions on silos and tanks. Bruxelas: 1995.

FITZPATRICK, J. J. et al. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values. **Journal of Food Engineering**, Elsevier Science, n.61, p.399-405, 2004.

FREITAS, E. G. A. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. São Carlos: USP, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.

GAYLORD JR., E.H.; GAYLORD, C.N. **Design of steel bins for storage of bulk solids**. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1984. 359p.

GOMES, F.C. **Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais**. São Carlos: USP, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

GRAY, W. S.; MANNING, G. P. **Concrete water towers, bunkers, silos and other elevated structures**. 5.ed. London: Cement and Concrete Association, 1973. 372p.

INTERNATIONAL STANDART. **ISO 11697**. Bases for design of structures: loads due to bulk materials. Switzerland: 1995.

JARRET, N. D. et al. Pressure measurements in a rectangular silo. **Geotechnique**, v.45, n.1, p.95-104, 1995.

JENIKE, A.W. **Storage and flow of silos**. University of Utah. Bulletin. Utah (Engineering Experiment Station, n.123). Salt Lake City.

JENIKE, A.W. **Storage and flow of solids**. Utah: University of Utah, 1980. 197p.

MILANI, A. P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para o projeto de pressões e fluxo em silos**. São Carlos: USP, 1993. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1993.

NASCIMENTO, J. W. B. **Estudos de silos metálicos prismáticos para fábricas de ração**. São Carlos: USP, 1996. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1996.

NASCIMENTO, J. W. B; CALIL JUNIOR, C. Painéis estruturais para paredes de silos verticais prismáticos. **Caderno de Engenharia da Estruturas**, São Carlos, n.6, p.1-21, 1998.

OOI, J. Y. et al. Measurement of a solids flow patterns in a gypsum silo. **Powder Technology**, Elsevier Science, n.99, p.272-284, 1998.

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 2000. 666p.

- RAVENET, J. **Silos: teoría, investigación, construcción**. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1977. 381p.
- RAVENET, J. **Silos**. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1992. 508p.
- ROBERTS, A. W. **Storage, flow and handling of bulk solids**. Newcastle: Department of Mechanical Engineering, University of Newcastle, 1987. 612p.
- ROTTER, J. M. et al. Patterns of wall pressure on filling a square planform steel silo. **Engineering Structures**, Elsevier Science, n.24, p.135-150, 2002.
- SAFARIAN, S.S.; HARRIS, E.C. **Design and construction of silos and bunkers**. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1985. 468p.
- SNBATI. Reglas para proyecto y calculo de silos de hormigón. **Sindicato Nacional del Hormigón Armado y Técnicas Industrializadas**. França: 1975.
- TROITSKY, M. S. **Tubular steel structures**. Montreal: Concordia University, 1982. p.7.1-7.72. cap.VII.