

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DAS FORÇAS
VERTICAIS E DE ATRITO EM SILOS CILÍNDRICOS**

Campina Grande - PB

Outubro - 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

José Pinheiro Lopes Neto

ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DAS FORÇAS
VERTICAIS E DE ATRITO EM SILOS CILÍNDRICOS

Parte integrante dos requisitos básicos do
Programa de Pós-Graduação Nível Doutorado
em Engenharia de Processos para a obtenção
do Título de Doutor

Orientador: Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

Campina Grande - PB

Outubro - 2009

**DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L864a

Lopes Neto, José Pinheiro

Análise teórico-experimental das forças verticais e de atrito em silos cilíndricos / José Pinheiro Lopes Neto. — Campina Grande, 2009.

116 f. : il. color

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos)- Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientador: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento.

1. Células de Carga 2. Carregamento 3. Descarregamento 4. Fundo Plano I. Título.

CDU 631.24(043)

Folha de Julgamento

Acadêmico: José Pinheiro Lopes Neto

Tese defendida e julgada em 02 /10/2009 perante a comissão:

Prof. Dr. **José Wallace Barbosa do Nascimento (Orientador)** _____

UAEAg/CTRN/UFCG

Prof. Titular. **Carlito Calil Júnior (Examinador)** _____

EESC/USP

Prof. Dr. **Milton Bezerra das Chagas Filho (Examinador)** _____

UAEC/CTRN/UFCG

Prof. Dr. **Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia (Examinadora)** _____

UAEAg/CTRN/UFCG

Prof. Dr. **Alexandre Soares Miná (Examinador)** _____

CCHSA/DGTA/UFPB

Outubro de 2009

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 APLICAÇÃO E CENÁRIO MUNDIAL	1
1.2 JUSTIFICATIVA	2
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 Objetivo Geral	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS	6
2. EMBASAMENTO TEÓRICO	7
2.1 CONCEITUAÇÃO	7
2.2 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA ARMAZENAGEM NO BRASIL	7
2.3 CLASSIFICAÇÃO E PARTES CONSTITUINTES DOS SILOS	10
2.3.1. Classificação dos silos	10
2.3.2 Partes constituintes dos silos	12

2.4 PROJETO DE FLUXO DE PRODUTOS SÓLIDOS	15
2.5 PROBLEMAS RELACIONADOS AO PROJETO DE FLUXO	19
2.5.1 Arqueamento	21
2.5.2 Efeito tubo	22
2.5.3 Descarga incompleta	23
2.6 INFORMAÇÕES REQUERIDAS DOS PRODUTOS SÓLIDOS ARMAZENÁVEIS	23
2.6.1 Peso específico consolidado (γ)	24
2.6.2 Ângulo de atrito interno (θ) e Ângulo efetivo de atrito interno (δ)	24
2.6.3 Ângulo de atrito interno do produto com a parede (θ_w)	25
2.6.4 Função Fluxo (FF)	28
2.6.5 Fator fluxo da tremonha (ff)	29
2.7 AÇÕES EM SILOS VERTICAIS	31
2.7.1 Representação das ações em silos	31
2.7.2 Pressões em silos verticais	35
2.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 IDEALIZAÇÃO DO SILO-PILOTO	44
3.1.1 Corpo do silo	44
3.1.2. Fundo do silo	47
3.2 SENSORES E AQUISIÇÃO DE DADOS	47

3.2.1 Calibração dos sensores e aquisição dos dados	47
3.3 INSTRUMENTAÇÃO DO SILO-PILOTO	50
3.3.1 Instrumentação do corpo do silo	50
3.3.2 Instrumentação do fundo do silo	509
3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	52
3.4.1 Propriedades físicas da areia	53
3.4.2 Propriedades de fluxo da areia	54
3.4.3 Aquisição dos dados	57
3.4.4 Execução dos ensaios	58
3.5 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	59
3.5.1 Momento fletor nas paredes (M)	59
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E DE FLUXO DA AREIA	62
4.1.1 Propriedades físicas da areia	62
4.1.2 Propriedades de fluxo da areia	65
4.2 FATOR K	68
4.3 FORÇAS ATUANTES NO SILO-PILOTO	73
4.3.1 Considerações sobre o silo-piloto e seus ensaios	73
4.3.2 Forças de atrito nas paredes do silo	74
4.3.3 Forças verticais no fundo plano	101
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	106

5.1 PROPRIEDADES DA AREIA	106
5.2 FATOR K	106
5.3 FORÇAS ATUANTES NO SILO-PILOTO	107
5.3.1 Sobre o modelo de silo-piloto	107
5.3.2 Distribuição e intensidade das forças de atrito	108
5.3.3 Intensidade das forças verticais no fundo plano	109
5.3.4 Comparação com normas internacionais	109
5.3.5 Coeficientes de sobrecarga e momento fletor	109
5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação geométrica dos silos de acordo com as normas	11
Tabela 2. Principais vantagens e desvantagens dos fluxos de massa e funil	19
Tabela 3. Classificação do tipo de fluxo de produtos sólidos	29
Tabela 4. Classes de Ações em silos (EUROCODE 1, 2006)	32
Tabela 5. Limites extremos das propriedades de fluxo para o cálculo das pressões	32
Tabela 6. Designação da rugosidade da parede	33
Tabela 7. Valores característicos das propriedades de fluxo de produtos sólidos	34
Tabela 8. Fatores que interferem na variabilidade das pressões. Fonte: Calil Junior et al. (2007)	35
Tabela 9. Equações propostas por pesquisadores para o coeficiente k	41
Tabela 10. Equação do coeficiente k adotado por algumas normas internacionais	42
Tabela 11. Fatores de calibração das células de pressão utilizadas	49
Tabela 12. Resultados da análise granulométrica	63
Tabela 13. Variações das principais propriedades de fluxo obtidas para a areia	67
Tabela 14. Estatística básica do fator k para as condições de ensaio	69
Tabela 15. Fatores de conversão encontrados para a areia	72
Tabela 16. Classificação do silo-piloto em função da relação H/D .	74

Tabela 17. Análise de variância para o tempo de 1h de armazenagem	76
Tabela 18. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Descarregamento (F2)	77
Tabela 19. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Relação H_c/D_c (F3)	78
Tabela 20. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Células de carga (F4)	78
Tabela 21. Média de interação entre os fatores Descarregamento (F2) e Relação H_c/D_c (F3)	79
Tabela 22. Média de interação entre os fatores Descarregamento (F2) e Células de carga (F4)	81
Tabela 23. Média de interação entre os fatores Relação H_c/D_c (F3) e Células de carga (F4)	82
Tabela 24. Análise de variância para o tempo de 12h de armazenagem	83
Tabela 25. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Descarregamento (F2)	84
Tabela 26. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Relação H_c/D_c (F3)	85
Tabela 27. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Células de carga (F4)	85
Tabela 28. Média de interação entre os fatores Descarregamento (F2) e Relação H_c/D_c (F3)	86
Tabela 29. Média de interação entre os fatores Descarregamento (F2) e Células de carga (F4)	86
Tabela 30. Média de interação entre os fatores Relação H_c/D_c (F3) e Células	87

de carga (F4)

Tabela 31. Análise de variância dos resultados para o tempo de 24h de armazenagem	88
Tabela 32. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Descarregamento (F2)	89
Tabela 33. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Relação H_c/D_c (F3)	90
Tabela 34. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Células de carga (F4)	90
Tabela 35. Média de interação entre os fatores Descarregamento (F2) e Relação H_c/D_c (F3)	90
Tabela 36. Média de interação entre os fatores Descarregamento (F2) e Células de carga (F4)	91
Tabela 37 Média de interação entre os fatores Relação H_c/D_c (F3) e Células de carga (F4)	91
Tabela 38. Coeficientes de sobrecarga para o carregamento concêntrico	99
Tabela 39. Coeficientes de sobrecarga para o carregamento excêntrico	99
Tabela 40. Valores de momento fletor durante o descarregamento do silo-piloto	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição por região da produção nacional. Fonte: IBGE (2007)	8
Figura 2. Armazenagem no próprio local de produção. Fonte: CONAB (2006)	8
Figura 3. Distribuição das unidades de armazenagem agrícola. Fonte: CONAB (2006)	9
Figura 4. Principais partes constituintes dos silos elevados	12
Figura 5. Silos equipados com tremonha	14
Figura 6. Silos formados por fundo plano	14
Figura 7. Formas usuais das tremonhas	15
Figura 8. Tipos básicos de fluxo	16
Figura 9. Variações do tubo no fluxo de funil	16
Figura 10. Determinação gráfica do tipo de fluxo	17
Figura 11. Variações do fluxo misto	17
Figura 12. Variações do fluxo em função da esbeltez dos silos	18
Figura 13. Problemas funcionais em silos e seus precedentes	20
Figura 14. Arco mecânico	21
Figura 15. Arcos coesivos	22
Figura 16. Formação do efeito tubo	22
Figura 17. Silo com descarga incompleta	23
Figura 18. Aparelho de cisalhamento direto de Jenike	24

Figura 19. Lugares geométricos e ângulos de atrito interno	25
Figura 20. Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede	26
Figura 21. Deslizamento nas chapas trapezoidal e ondulada	27
Figura 22. Limites das propriedades dos produtos	22
Figura 23. Função Fluxo dos produtos	28
Figura 24. Pressões atuantes no corpo e tremonha dos silos	36
Figura 25. Pressões simétricas de carregamento	37
Figura 26. Excentricidades nos silos	39
Figura 27. Detalhes construtivos do silo-piloto	45
Figura 28. Independência de trabalho entre os anéis	46
Figura 29. Independência de trabalho entre o Anel I e fundo plano	46
Figura 30. Fixação da fita plástica adesiva para a contenção da areia	46
Figura 31. Fundo plano e denominação dos orifícios	47
Figura 32. Sistema de aquisição de dados utilizado	48
Figura 33. Calibração das células de carga usando o sistema Spider8	48
Figura 34. Página de reconhecimento e configuração dos sensores	49
Figura 35. Posicionamento das células de carga	50
Figura 36. Célula de pressão utilizada	51
Figura 37. Instalação das células de pressão	51
Figura 38. Silo-piloto ensaiado	61
Figura 39. Amostra da areia utilizada nos ensaios	53

Figura 40. Ensaio para determinação do ângulo de repouso	53
Figura 41. Agitador de peneiras	54
Figura 42. Gráficos de cisalhamento pelo ensaio de Jenike	55
Figura 43. Tensões de consolidação e não confinadas	55
Figura 44. Ensaio para determinação das propriedades de fluxo	56
Figura 45. Bancada de consolidação	56
Figura 46. Ensaio de cisalhamento da areia com a parede	57
Figura 47. Exemplo das páginas de trabalho do Catman 4.5	57
Figura 48. Disposição das células de carga e momentos fletores	60
Figura 49. Determinação do ângulo de repouso da areia	62
Figura 50. Curva granulométrica da areia	64
Figura 51. Limites da distribuição granulométrica da areia	64
Figura 52. Ensaio de cisalhamento no aparelho de Jenike (pré-carga 10kg)	65
Figura 53. Ensaio de cisalhamento no aparelho de Jenike (pré-carga 7kg)	66
Figura 54. Ensaio de cisalhamento no aparelho de Jenike (pré-carga 5kg)	66
Figura 55. Ensaio de cisalhamento no aparelho de Jenike (pré-carga 3,5kg)	66
Figura 56. Variabilidade do fator k	70
Figura 57. Comportamento do k em relação aos movimentos de contenção	71
Figura 58. Variabilidade do fator k frente aos preconizados pelas normas	72
Figura 59. Representação dos carregamentos obtidos	75
Figura 60. Representação dos canais de fluxo em descarga combinada	76

Figura 61. Aumento de carga entre os anéis do silo	80
Figura 62. Distribuição exponencial das cargas nas paredes dos silos	80
Figura 63. Média das forças nas células de carga para os descarregamentos	81
Figura 64. Configuração do carregamento excêntrico	84
Figura 65. Média das células de carga para os descarregamentos	87
Figura 66. Forças de atrito para o carregamento concêntrico	92
Figura 67. Forças de atrito para o carregamento excêntrico	93
Figura 68. Forças de atrito para a descarga concêntrica	94
Figura 69. Forças de atrito para a descarga excêntrica a 75%	95
Figura 70. Forças de atrito para a descarga combinada 50-50%	95
Figura 71. Forças de atrito para a descarga combinada 75-75%	96
Figura 72. Forças de atrito para a descarga concêntrica	97
Figura 73. Forças de atrito para a descarga excêntrica a 75%	97
Figura 74. Forças de atrito para a descarga combinada 50-50%	98
Figura 75. Forças de atrito para a descarga combinada 75-75%	98
Figura 76. Forças verticais para a descarga concêntrica	102
Figura 77. Forças verticais para a descarga excêntrica a 75%	102
Figura 78. Forças verticais para a descarga combinada 50-50%	103
Figura 79. Forças verticais para a descarga combinada 75-75%	103
Figura 80. Forças verticais para a descarga concêntrica	104
Figura 81. Forças verticais para a descarga excêntrica a 75%	104

Figura 82. Forças verticais para a descarga combinada 50-50%	104
Figura 83. Forças verticais para a descarga combinada 75-75%	105

LISTA DE SÍMBOLOS

H _ altura efetiva do produto armazenado (m);

D _ diâmetro do silo inscrito em uma circunferência (m);

\emptyset_r _ ângulo de repouso ($^{\circ}$);

γ _ peso específico consolidado (kN/m^3);

σ _ tensão normal (kPa);

τ _ tensão de cisalhamento (kPa);

\emptyset _ ângulo de atrito interno ($^{\circ}$);

\emptyset_l _ limite inferior do ângulo de atrito interno ($^{\circ}$);

\emptyset_u _ limite superior do ângulo de atrito interno ($^{\circ}$);

δ _ ângulo efetivo de atrito interno ($^{\circ}$);

δ_l _ limite inferior do ângulo efetivo de atrito interno ($^{\circ}$);

δ_u _ limite superior do ângulo efetivo de atrito interno ($^{\circ}$);

\emptyset_w _ ângulo de atrito interno do produto com a parede ($^{\circ}$);

\emptyset_{wi} _ limite inferior do ângulo de atrito interno do produto com a parede ($^{\circ}$);

\emptyset_{ws} _ limite superior do ângulo de atrito interno do produto com a parede ($^{\circ}$);

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_h _ pressão horizontal no silo (kPa);

P_v _ pressão vertical no silo (kPa);

P_w _ pressão de atrito no silo (kPa);

k _ coeficiente de pressão (P_h/P_v);

RESUMO

Para que um projeto econômico e seguro de silos verticais seja desenvolvido, é necessário que fatores como fluxo e cargas sejam criteriosamente avaliados. Portanto, como objetivo principal desta pesquisa destaca-se a mensuração e análise das forças de atrito nas paredes de um silo cilíndrico de fundo plano. Para a medição das forças de atrito foram utilizados dois conjuntos de três células de carga e um sistema de aquisição de dados. O silo foi carregado concêntrica e excentricamente com areia seca para duas diferentes relações H_0/D_0 (0,8 e 1,6) e descarregado concentricamente e a partir de seis excentricidades através de orifícios de 80 mm de diâmetro. Os resultados evidenciam que o modelo de silo-piloto é adequado para a medição das forças de atrito nas paredes e que a sua distribuição é mais regular quando descarregado através das descargas combinadas 50-50% e 75-75%. Entretanto, estas descargas produziram elevados valores de força de atrito nas paredes.

Palavras-chave: células de carga, carregamento, descarregamento, fundo plano.

ABSTRACT

For economic e safe design of vertical silos, factors such as flow and loads conditions must be carefully analyzed. The aim of this research were to measure and analyze the friction forces in cylindrical silo wall with flat bottom. For friction load measurement two set of three load cells and a data logger were used. The silo was centric and eccentric filled with dry sand to two different H_0/D_0 rations (0,8 e 1,6) and was unloaded either centrically or at six different eccentric locations through circular orifices with a diameter of 80 mm. The results showed that the model of the cylindrical silo can be used to evaluate the friction forces in silo walls and a regular friction load distribution occurred when the silo was emptied either 50-50% or 75-75% discharge conditions. However, these discharge conditions produced high values of friction force in silo walls.

Keywords: load cells, filling, emptying, flat bottom.

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por intenção relatar de forma sucinta o tema escolhido, sua problemática e motivações que levaram à sua escolha. Serão apresentados, também, os objetivos a serem alcançados e as repercussões esperadas após sua finalização.

1.1 Aplicação e cenário mundial

Silos são estruturas destinadas ao armazenamento de produtos sólidos, sendo seu uso largamente empregado em estabelecimentos agrícolas e portos marítimos e fluviais para conservação e comercialização de cereais.

Seu uso precede a indústria moderna com relatos de armazenagem das colheitas obtidas nas várzeas do rio Nilo pelos antigos egípcios em tulhas construídas de argila e fibras naturais. Do ponto de vista do armazenamento, atualmente os silos podem ser classificados como coletores construídos nos locais de produção; reguladores, na recepção e distribuição de produtos; terminais, para a conservação de estoques anuais; e estratégicos, para a conservação de estoques reguladores (GOMES, 2000). Atualmente, sua aplicação estende-se tanto às indústrias agrícola, química, farmacêutica, alimentícia, siderúrgica e de mineração quanto a da construção civil para armazenagem de produtos sólidos como argilas, cimentos, bentonitas, pozolanas e agregados devendo-se este fato ao elevado nível industrial alcançado nos últimos anos bem como ao desenvolvimento de novos materiais armazenáveis como fibras e polímeros; dessa forma, os silos passam a não somente desempenhar a função de unidades armazenadoras, mas também devem apresentar desejável versatilidade no que diz respeito aos processos de carregamento, descarregamento e opção de transporte de seu conteúdo.

Devido à expansão dos grandes centros industriais, uma forte concorrência por espaço físico tomou conta do cenário obrigando as empresas a repensarem seus métodos de ocupação espacial através da adaptação ou completa modificação de sua estrutura operacional. Com isso, equipamentos

mais modernos, compactos e multifuncionais adquiriram considerável importância ao tempo que as indústrias verticalizaram-se.

Com isso, os silos se consolidaram como um importante componente da cadeia produtiva tendo, a partir de então, a função de atender a todas as demandas referentes à sua utilização tanto em maximização de espaço físico em razão da exigência mercantil, quanto em razão do surgimento de uma gama de novos produtos armazenáveis.

Perante esta nova realidade, os grandes armazéns horizontais vem sendo gradativamente substituídos por silos verticais capazes de serem carregados e descarregados concêntrica e excentricamente sendo esta ação uma alternativa eficiente para o adequado funcionamento da moderna conceituação industrial.

Entretanto, em virtude desse novo panorama e pelo não acompanhamento por parte do conhecimento científico de todas as evoluções sofridas por estas estruturas, tornou-se inevitável o surgimento de problemas relacionados ao movimento do sólido armazenado como compactação e segregação de partículas e à sua própria integridade estrutural como deformações e rupturas.

Grande parte desses problemas tem sido alvo de inúmeras investigações e hoje se sabe que as propriedades de fluxo dos produtos sólidos e a própria geometria dos silos exercem grande influência no sucesso de sua utilização. Knowlton, Carson, Klinzing et al. (1994) afirmam que a determinação dessas propriedades é importante por proporcionar conhecimento adequado às operações industriais como fluxo em tremoças e silos, dosagem, transporte e empacotamento.

Sabe-se, ainda, que as propriedades de fluxo dos produtos sólidos são grandemente influenciadas pelas características do ambiente ao entorno do silo como, por exemplo, tempo de armazenagem e que, segundo Teunou & Fitzpatrick (2000), quando um produto é submetido a esforços de compressão por determinado tempo, o mesmo pode adquirir resistência e desenvolver problemas de fluxo.

1.2 Justificativa

Conforme Calil Junior (1990), silos são uma das construções com maior número de desastres registrados no mundo. Prova disto foi a reformulação sofrida pela norma DIN 1055 (1987) após a

ocorrência de uma série de falhas e colapsos ao redor do mundo resultando, inclusive, em perdas humanas.

Ravenet (1983) já preconizava que para se efetuar o projeto de um silo com a máxima garantia de funcionabilidade, é necessário que fatores como tipo de produto a se armazenar e características geométricas do silo exigido para o processo industrial sejam levados em consideração.

Aliado aos problemas de fluxo, as ações exercidas pelo produto armazenado nas paredes e base dos silos e sua enorme variabilidade complementam a complexidade desse tema. Diante dessa problemática, diversos estudos têm sido realizados sobre o comportamento dos sólidos no interior do silo no que se refere às condições de carregamento, estocagem e descarregamento e seus efeitos nas partes dos silos; provavelmente, os desastres acima citados tenham sido causados, em sua maioria, pela imperfeita compreensão ou total falta de conhecimento a respeito do comportamento dos produtos no silo, das forças que agem sobre este tipo de construção, de seus agentes causais e formas de prevenção.

Sabe-se que ao carregar ou descarregar um silo, uma fração da força vertical que atua perpendicularmente ao fundo do silo é absorvida pelas paredes por atrito e que esse esforço é responsável por gerar tensões de compressão adicionais à estrutura e, por conseguinte, possíveis deformações locais (BROWN, LAHLOUH e ROTTER, 2000); no entanto, as forças de atrito que ocorrem paralelamente às paredes dos silos têm sido, de certa forma, negligenciadas pelos estudiosos uma vez que o estudo das forças horizontais e verticais nos silos são mais atraentes devido a suas intensidades e seus efeitos à estrutura dos silos serem significativamente maiores e mais imediatos.

As forças de atrito em silos são, em magnitude, inferiores às forças horizontais e verticais, mas não devem ser negligenciadas. Elas podem, em alguns casos, não serem consideradas como as principais causas de falhas estruturais nas paredes dos silos, fato este atribuído às forças horizontais, mas são responsáveis por gerar deformações e flambagens localizadas, o que determina o enfraquecimento das paredes tomando-as sem condições de suportar os demais esforços.

Uma parede de um silo projetada para suportar forças horizontais, não necessariamente, pode suportar forças de atrito significativamente menores que as horizontais, pois são dois tipos de esforços diferentes em sua concepção. As forças de atrito solicitam as secções longitudinais das paredes dos silos com cargas de compressão, enquanto que as forças horizontais geram reações de

tração nas secções longitudinais das paredes (MOLEND, HORABIK, THOMPSON e ROSS, 2002).

Como agravante, Brown, Lahlouh e Rotter (2000) ainda completam que as imperfeições das paredes e excentricidade de carga e descarga contribuem para o desenvolvimento de ações não uniformes ao longo da profundidade dos silos o que, para o caso das forças de atrito, podem ocasionar no surgimento de momentos fletores diametrais. Para o caso das forças verticais não uniformes, podem surgir momentos fletores no fundo do silo, o que aumentaria os riscos de fraturas e tombamentos.

Esse cenário reflete a necessidade de realização de uma análise minuciosa da distribuição e intensidade da interação entre forças de atrito nas paredes – forças verticais no fundo dos silos. Desta forma, silos corretamente projetados para suportar essas ações estariam, também, menos susceptíveis a sofrer colapso parcial ou total.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo principal da tese foi:

- ✓ Realizar um estudo sobre a variabilidade das propriedades de fluxo de materiais sólidos, do parâmetro k , das forças de atrito desenvolvidas paralelamente às paredes de um silo-piloto cilíndrico e das forças verticais no fundo plano mediante diferentes relações altura/diâmetro (H_c/D_c) e condições de carregamento e descarregamento.

1.3.2. Objetivos específicos

- ✓ Realizar a caracterização das propriedades físicas e de fluxo de areia seca como material armazenável através do Aparelho de Cisalhamento Direto conhecido como “Jenike shear cell” e comparar os resultados aos recomendados pelas normas internacionais de produtos sólidos armazenáveis.
- ✓ Construir e avaliar um modelo proposto de silo-piloto para a mensuração das forças de atrito atuantes paralelamente às suas paredes e das forças verticais no fundo plano, analisar sua distribuição e intensidade para diferentes relações H_c/D_c sob condições distintas de carregamento e descarregamento, além de comparar os resultados obtidos com os recomendados pelas principais normas vigentes de silos.
- ✓ Determinar os efeitos da distribuição irregular das forças de atrito nas paredes na forma de momento fletor resultante e identificar as condições mais críticas para seu surgimento.

1.4 Contribuições esperadas

Espera-se que a realização deste estudo possa servir como auxílio a pesquisadores e engenheiros no campo de Projeto de Silos, uma vez que foi executado um mapeamento da distribuição das forças em silos verticais cilíndricos esbeltos através de ensaios experimentais de carregamento e descarregamento.

Por meio da monitoração e análise das forças verticais e de atrito, acredita-se que os resultados expostos por esta pesquisa poderão ser úteis para uma melhor compreensão do comportamento das ações em um silo cilíndrico em situação de operação norteando as ações de projetistas quanto à sua construção além de estimular e contribuir como documento científico na elaboração de uma norma brasileira específica de ações em silos verticais.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

O objetivo deste capítulo foi agrupar de forma seqüencial e organizada as idéias, estudos, conceitos e procedimentos referentes ao uso racional de silos de forma a justificar os objetivos desta pesquisa e embasar os resultados obtidos.

2.1 Conceituação

A palavra “*silo*”, segundo a gramática portuguesa significa tulha subterrânea e não por acaso ela deriva da primitiva *sirus* cujo significado remete a local subterrâneo profundo. Muito embora o significado original da palavra silo tenha caído em desuso, sua função apresenta, até os dias atuais, importante papel para o desenvolvimento econômico de uma região.

Rotter (2001) refere-se ao termo silo como toda construção destinada a armazenagem de produtos sólidos enquanto Freitas (2001) o conceitua de modo mais completo como sendo 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 preferencialmente por gravidade 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.

2.2 Importância econômica da armazenagem no Brasil

O Brasil atualmente é um dos maiores produtores agrícolas do mundo ocupando posição de destaque na produção de grãos sendo os principais: soja, milho, feijão, arroz e trigo. Em abril de 2007, a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas (caroço de algodão, amendoim, arroz, feijão, mamona, milho, soja, aveia, centeio, cevada, girassol, sorgo, trigo e triticales) foi da ordem de 132,3 milhões de toneladas, 8% superior à de abril de 2006 (122 milhões de toneladas) e 15% superior ao mesmo período de 2005 (IBGE, 2007).

Em termos absolutos, a produção nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas está assim distribuída pelas grandes regiões: Sul: 58,6 milhões de toneladas; Centro-Oeste: 43,0 milhões de toneladas; Sudeste: 15,8 milhões de toneladas; Nordeste: 11,4 milhões de toneladas e Norte: 3,4 milhões de toneladas. Em termos percentuais, a divisão está apresentada no gráfico abaixo.

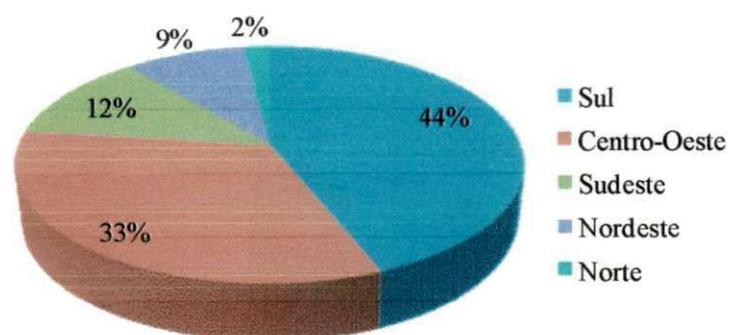


Figura 1. Distribuição por região da produção nacional. Fonte: IBGE (2007)

Mesmo sob esta condição privilegiada, o país possui uma estrutura de armazenagem deficiente, ou seja, o índice de armazenamento de produtos agrícolas nas fazendas e locais de distribuição é insatisfatório frente ao seu potencial produtivo.

Quando essa análise é focalizada apenas para o potencial de estocagem no próprio local de produção, os números nacionais são ainda mais alarmantes. Em países desenvolvidos como alguns da União Européia, Estados Unidos e Canadá, a capacidade de armazenagem dos produtos agrícolas em suas próprias fazendas chega a ser de 5 a 7 vezes maior que a capacidade instalada nacional. Já em comparação a dados referentes a Argentina, essa diferença cai para 4 vezes.

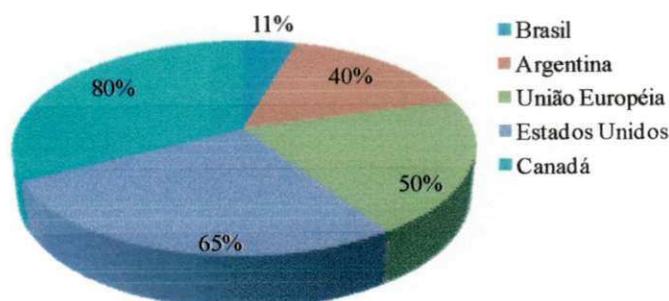


Figura 2. Armazenagem no próprio local de produção. Fonte: CONAB (2006)

Esse percentual de 11% reflete a má distribuição geográfica das unidades armazenadoras no Brasil, ou seja, não apenas faltam silos, como os que existem estão, em sua enorme maioria, longe dos locais de produção. Embora esse índice esteja em crescimento, em 2002 somente 5% dos silos encontravam-se nas fazendas, ainda está muito longe do ideal, que é de pelo menos 25%.

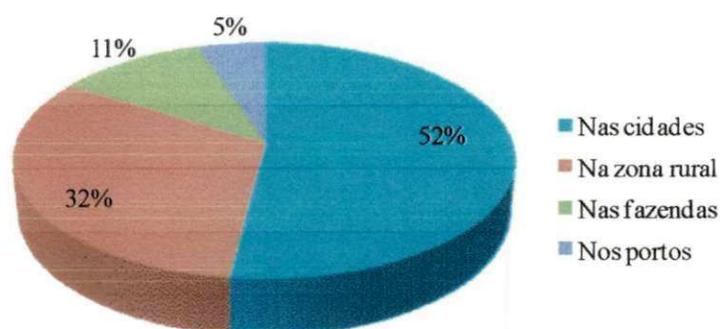


Figura 3. Distribuição das unidades de armazenagem agrícola. Fonte: CONAB (2006).

Como agravante a este panorama nacional, estimam-se que as perdas pós-colheita possam chegar até 20% do total colhido onde um dos grandes responsáveis por este desperdício é a necessidade de se transportar a produção agrícola até as unidades de distribuição como cooperativas agrícolas localizadas muitas vezes a longas distâncias do ponto de colheita e, por conseguinte, um novo transporte até os portos marítimos.

Segundo Calil Junior & Cheung (2007), uma unidade armazenadora, tecnicamente projetada e bem conduzida, apresenta vantagens como:

- ✓ obtenção de um produto melhor conservado, longe do ataque de insetos e ratos.
- ✓ estocagem racional, segura e principalmente econômica tendo em vista que o produtor que armazena a granel comercializa também a granel, economizando, com isso, gastos significantes com sacaria e mão-de-obra ocupada para o ensacamento.
- ✓ economia do transporte, uma vez que os preços dos fretes aumentam durante o período da safra.
- ✓ diminuição do custo do transporte, pela eliminação de impurezas e excesso de água pela secagem.

- ✓ formação de um estoque regulador do preço de mercado.
- ✓ concentração de grandes quantidades de produto em áreas relativamente pequenas.
- ✓ proteção da indústria contra as flutuações no preço das matérias-primas.

2.3 Classificação e partes constituintes dos silos

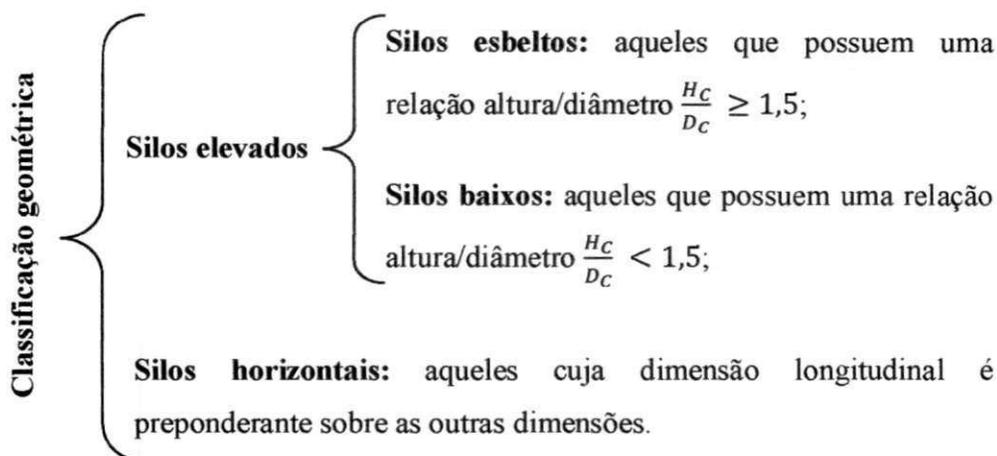
2.3.1. Classificação dos silos

Os silos possuem sua classificação comumente dividida quanto ao material empregado em sua construção, nível em relação ao solo e geometria. Em função do material de construção empregado, os silos podem ser de concreto (armado ou protendido), alvenaria, chapas metálicas (lisas, corrugadas ou conformadas), madeira (chapas de compensado) ou até mesmo de materiais ditos como ecológicos (compósitos com fibras e matrizes alternativas).

Quanto à construção em relação ao solo, Calil Junior & Cheung (2007) citam que se podem dividir os silos em três grupos sendo eles:

- ✓ **Silos elevados ou aéreos:** são caracterizados por serem construídos acima do nível do solo;
- ✓ **Silos subterrâneos:** são aqueles em que os compartimentos para estocagem se localizam abaixo do nível do solo. São construções mais simples que os silos elevados, porém são mais susceptíveis à infiltração de água e têm um esvaziamento mais difícil;
- ✓ **Silos semi-subterrâneos:** são silos de um tipo intermediário entre os dois anteriores.

Quanto à classificação em função de sua geometria, não existe um consenso entre autores e normas sendo prática comum cada autor lançar sua própria teoria classificatória. Enquanto Puzzi (2000) limita-se a considerar silo elevado aquele cuja altura do silo (H_c) é maior que o diâmetro do silo (D_c) e silo horizontal (conhecido como armazém graneleiro) aquela construção cuja dimensão da altura seja menor que a base, Calil Junior & Cheung (2007) são um pouco mais detalhistas ao subdividirem os silos elevados em esbeltos e baixos em função da relação das dimensões altura e diâmetro resultando em uma classificação da forma:



Apesar da concordância entre estudiosos de que a classificação dos silos quanto à relação $\frac{H_c}{D_c}$ ofereça boa representação dessas estruturas, não existe um perfeito entendimento entre seus limites resultando na adoção por parte das principais normas internacionais de valores diferenciados para cada definição geométrica, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação geométrica dos silos de acordo com as normas.

Norma	Classificação		
	Baixo	Medianamente esbelto	Esbelto
AS 3774(1996)	$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) < 1$	$1 \leq \left(\frac{H_c}{D_c}\right) \leq 3$	$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) > 3$
EUROCODE 1 (2006)	$0,4 \leq \left(\frac{H_c}{D_c}\right) < 1,0$	$1,0 \leq \left(\frac{H_c}{D_c}\right) < 2,0$	$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) \geq 2,0$
ISO 11697 (1995)	$1,5 < \left(\frac{H_c}{D_c}\right)$	---	$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) \geq 1,5$
ACI (1991) EP 433 (2000)	$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) \leq 2$	---	$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) > 2$
DIN 1055 (1987)	$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) < 2,5\mu$	$2,5\mu \leq \left(\frac{H_c}{D_c}\right) \leq 5\mu$	$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) > 5\mu$
BMHB (1985)	$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) \leq 1,5$	---	$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) > 1,5$
CFBC (1983)	$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) \leq 1$ ou $\left(\frac{H_c}{D_c}\right) < \operatorname{tg}^2\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4}\right)$	---	$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) > 1$ ou $\left(\frac{H_c}{D_c}\right) \geq \operatorname{tg}^2\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4}\right)$
SNIBATI (1975)	$2,5 > \left(\frac{H_c}{D_c}\right)$	---	$\left(\frac{H_c}{D_c}\right) \geq 2,5$

---Não possui esta classificação.

Nota-se que para a norma inglesa BMHB (1985), um silo cuja relação $H_e/D_e \leq 1,5$ pode ser classificado com baixo enquanto que, para as normas AS 3774 (1996) e EUROCODE 1 (2006), tal estrutura passa a ser classificada como medianamente esbelta.

Para a norma australiana AS 3774 (1996), os silos podem também ser classificados em função da rugosidade interna 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.

2.3.2 Partes constituintes dos silos

Quanto aos silos elevados, sejam baixos, medianamente esbeltos ou esbeltos, a diferenciação de suas partes constituintes se dá, basicamente, em razão do tipo de fundo empregado podendo ser com tremonha ou fundo plano. As principais partes são apresentadas na Figura 4.

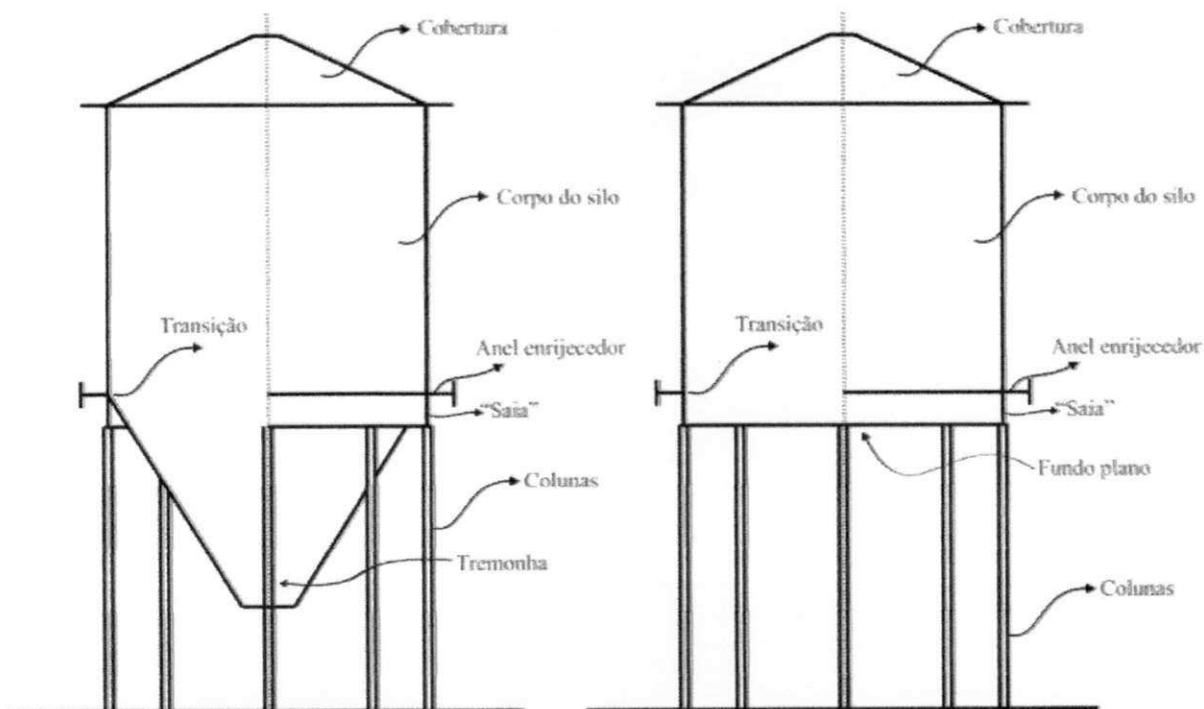


Figura 4. Principais partes constituintes dos silos elevados

Cobertura: Sua função é, basicamente, promover a segurança do silo contra as intempéries da natureza e da entrada de corpos estranhos por meio da extremidade superior. Em complemento, deve apresentar inclinação suficiente para a drenagem.

Corpo do silo: O corpo do silo é a parte onde basicamente todo material será armazenado. Possui a função de contenção lateral do produto em seu interior devendo, o máximo possível, reduzir as trocas térmicas e de umidade entre o produto armazenado e o ambiente externo. Sua geometria transversal é importante para a escolha da forma da cobertura tanto quanto para outros componentes como tremonhas/fundo plano e colunas.

Anel enrijecedor: O anel enrijecedor tem a função de adicionar rigidez às paredes em pontos estratégicos onde, comumente as forças horizontais são maiores (normalmente na maior profundidade do corpo do silo), sendo comum, também, encontrá-los instalados na parte superior do corpo do silo, próximos à cobertura. Assim, é possível evitar ovalizações da estrutura do silo em função de cargas variadas.

“Saia”: O elemento opcional e popularmente conhecido como saia é um prolongamento inferior das paredes que formam o corpo do silo. Em alguns casos, a saia serve de elemento de ligação entre as colunas e o corpo do silo.

Transição: A transição é a superfície formada pela união do corpo do silo e tremonha ou fundo plano. Por não ser um elemento único, a transição, em geral, se caracteriza como um local de fragilidade da estrutura do silo justificando, assim, a instalação de enrijecedores.

Colunas: As colunas, quando presentes, são os elementos que formam a base de sustentação do silo. Têm a função de suportar toda a vertical proveniente do peso próprio do silo mais a massa do produto ensilado. As colunas também devem ser projetadas para suportar efeitos de flambagem, tração, compressão e vibrações geradas por cargas devidas à ação do vento, devidas ao fluxo do produto em seu interior, terremotos e à instalação de dispositivos de carregamento e descarregamento.

Os silos com tremonha são normalmente suportados por colunas e têm suas paredes constituídas por chapas metálicas conforme Figura 5. Rotter (2001) cita que esse tipo de configuração é bastante usual nas indústrias e indicado para um vasto número de produtos sólidos.



a) silo alto

b) silo baixo

Figura 5. Silos equipados com tremonha

Já os silos compostos por fundo plano apresentam sua estrutura geralmente suportada pelo próprio terreno enquanto que suas paredes podem ser compostas tanto por chapas metálicas quanto por concreto (Figura 6).



Figura 6. Silos formados por fundo plano

Tremonha: Elemento localizado abaixo do corpo do silo. Sua função é possibilitar um melhor escoamento do produto ensilado. Sua altura exerce forte influência no dimensionamento do comprimento das colunas enquanto que sua forma determina a geometria do orifício de descarga. A escolha do modelo de tremonha adequado a cada necessidade, a combinação de informações como seu ângulo de inclinação, características do produto a se armazenar, o espaço físico disponível e o tipo de fluxo desejado não devem ser negligenciadas. Sabe-se que o fluxo massa tende a ocorrer em tremonhas suficientemente inclinadas de superfície lisa e sem transição

abrupta. Já o fluxo tipo funil tende a se desenvolver quando as tremonhas são rugosas e pouco inclinadas.

Normalmente, os silos equipados com tremonha possuem a vantagem de poder ser descarregados por gravidade enquanto que os silos com fundo plano necessitam de equipamentos especiais para fazê-lo. Em contrapartida, os silos com fundo plano podem ser mais vantajosos financeiramente uma vez que a carga vertical pode ser suportada pelo próprio terreno reduzindo custos com fundação e sapatas para as colunas. Quanto à sua geometria, existem várias opções de escolha para o sistema de armazenamento, conforme Figura 7.

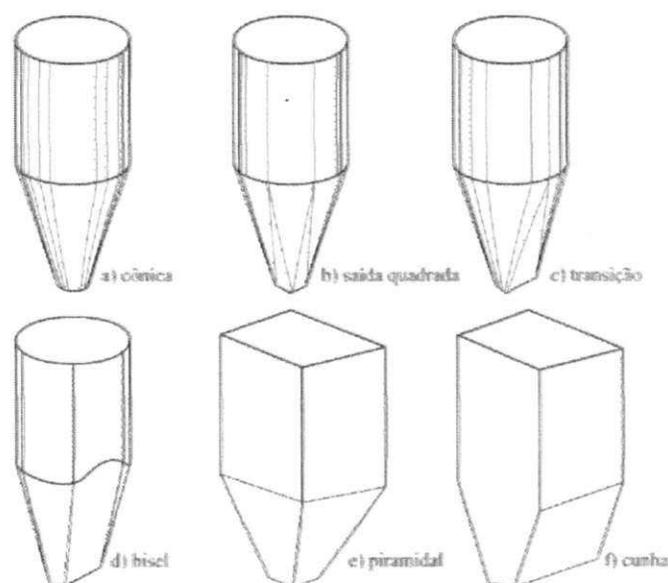


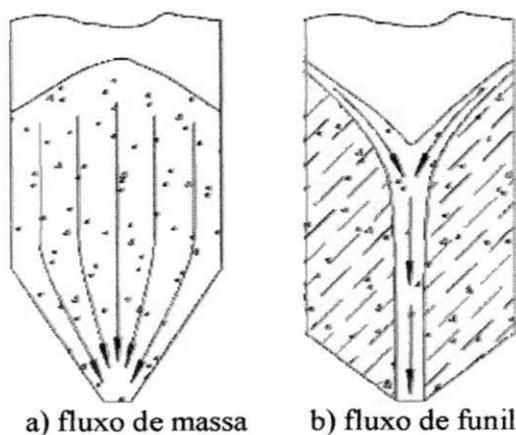
Figura 7. Formas usuais das tremonhas

2.4 Projeto de fluxo de produtos sólidos

O fluxo de produtos sólidos pode ser descrito como o movimento sucessivo entre partículas em contato uma com as outras e com a superfície das paredes dos silos. Contudo, a possibilidade de ocorrência de fluxo é fortemente regida, dentre outros fatores, pela capacidade de dilatação do produto armazenado por acreditar que, durante a fase de armazenamento, o produto esteja sujeito a cargas constantes de consolidação responsáveis pelo aumento de sua densidade. No momento do fluxo, portanto, o sólido armazenado deve ser suficientemente capaz de se expandir e fluir por pequenos canais.

Calil Junior (1990) destaca que o tipo de fluxo caracteriza o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser descarregado completamente. Determina, também, a distribuição das pressões nas paredes do silo e fundação e a integridade e custo da construção.

Jenike (1964), pioneiro no estudo do comportamento de sólidos sob condições de armazenagem, definiu dois tipos básicos de fluxo: massa e funil. Define-se fluxo de massa aquele onde o produto entra substancialmente em movimento em todas as partes do silo no momento do processo de descarregamento (ocorre quando as paredes da tremonha são suficientemente inclinadas e lisas e não existem abruptas transições) (Figura 8a). Com relação ao fluxo de funil, conceitua-se como sendo o tipo de fluxo onde apenas parte do produto entra em movimento através de um canal vertical formado no centro do silo (Figura 8b).



a) fluxo de massa b) fluxo de funil
Figura 8. Tipos básicos de fluxo

Para o fluxo de funil, o tubo formado no seu interior no processo de descarregamento pode, ainda, assumir diferentes configurações como visto na Figura 9.

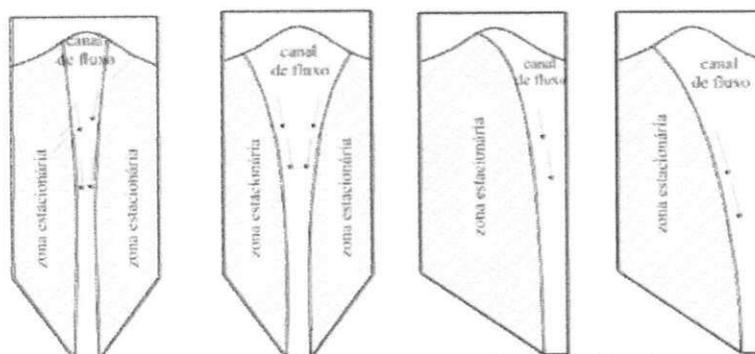


Figura 9. Variações do tubo no fluxo de funil.

Segundo algumas normas internacionais, o tipo de fluxo pode ser pré-definido com base no coeficiente de atrito do produto com a parede e na inclinação da tremonha. Para a escolha do ângulo de inclinação da tremonha, Calil Junior & Cheung (2007) recomendam que seja sempre diminuído de 3° para se obter um padrão de fluxo seguro, devido às incertezas embutidas no processo, conforme observado na Figura 10.

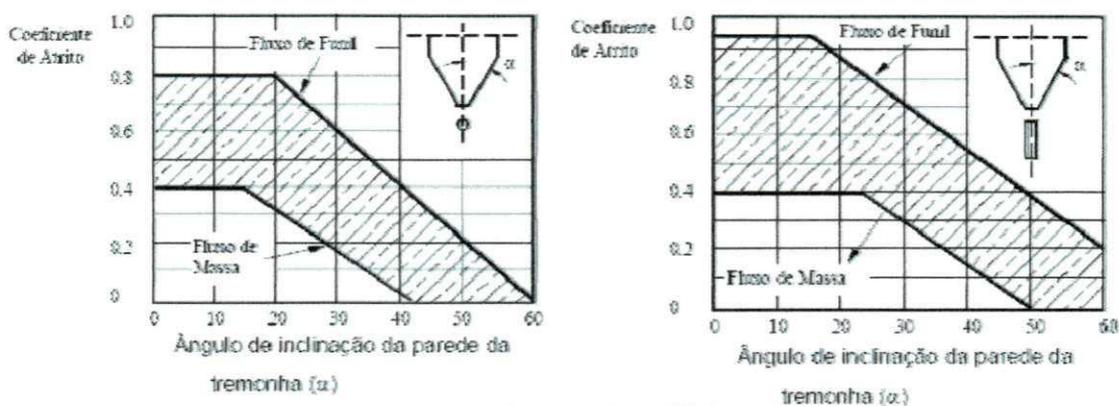


Figura 10. Determinação gráfica do tipo de fluxo.

Além dos fluxos de massa e funil, um tipo intermediário de fluxo pode surgir sendo caracterizado pelo movimento de todas as partículas da massa ensilada em uma parte do silo juntamente com a formação do efeito tubo em outra parte. Esse tipo intermediário é denominado de fluxo misto conforme Figura 11.

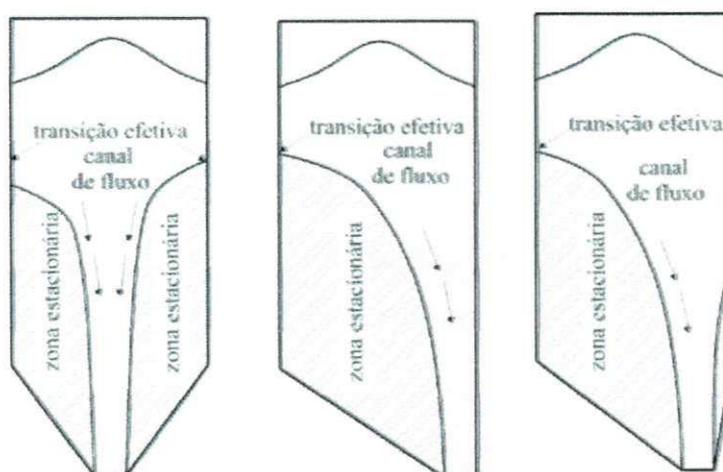


Figura 11. Variações do fluxo misto.

É importante salientar que a saída excêntrica em silos com fluxo misto e em tubo provoca carregamentos assimétricos que são muito problemáticos para silos metálicos devido à pequena

espessura das paredes e que, mesmo para saídas concêntricas, a transição efetiva pode não ocorrer na mesma altura em todo o perímetro (CALIL JUNIOR et al., 2007).

Além da configuração da descarga do silo, outro fator que contribui para a variação do fluxo no interior dos silos é sua esbeltez, relação definida entre a razão da altura do corpo do silo H_c e seu diâmetro interno D_c (H_c/D_c). Quanto maior for esta relação, mais esbelto será considerado o silo. Na Figura 12 são apresentadas as possíveis configurações do canal de fluxo em função da esbeltez do silo.

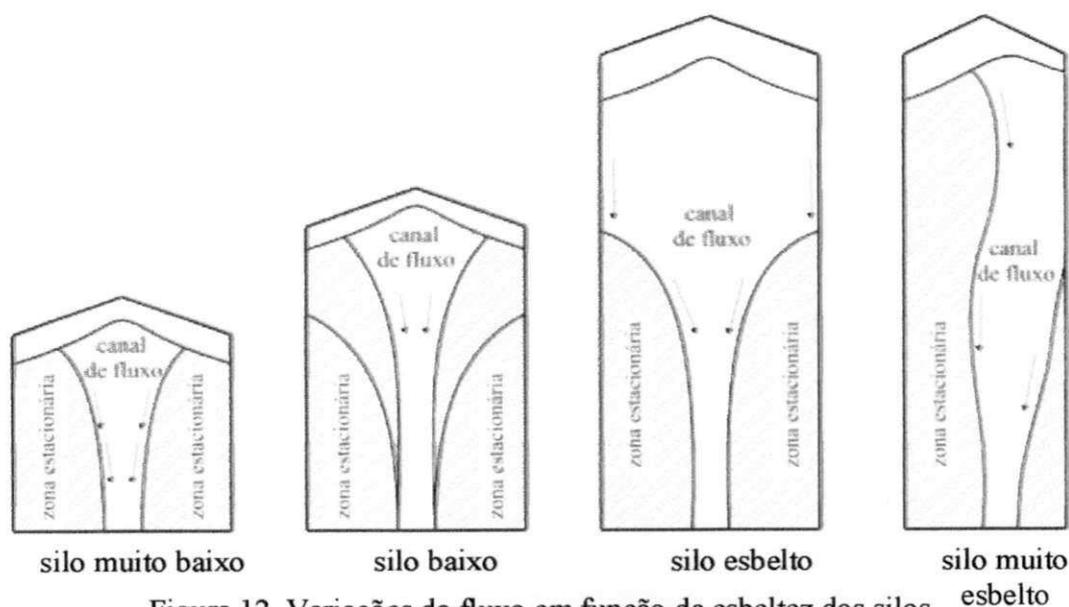


Figura 12. Variações do fluxo em função da esbeltez dos silos.

Carson & Jenkyn (1993) afirmam que é possível e até mesmo provável que a geometria do canal de fluxo dependa de propriedades que ainda não são habitualmente medidas como no caso da dilatação sofrida pela massa armazenada durante o fluxo. Desta forma, a correlação somente entre as variáveis conhecidas para uma grande faixa de produtos e experimentos ainda é insuficiente.

Como resultado, as avaliações de fluxo em silos empregam basicamente:

- ✓ Conhecimento relativo ao contorno entre fluxo de massa e funil;
- ✓ Observações experimentais de fluxo de funil em modelos e silos reais;
- ✓ Correlações entre observações-padrões de fluxo com propriedades simples dos produtos;

- ✓ Conceitos mecânicos simples relativos a orientações dos contornos do fluxo interno e;
- ✓ Empirismo, simplicidade e conservadorismo.

Para os dois tipos básicos de fluxo, Calil Junior et al. (2007) elencaram na Tabela 2 as principais vantagens e desvantagens de forma a permitir uma escolha coerente do sistema desejado de armazenamento e beneficiamento.

Tabela 2. Principais vantagens e desvantagens dos fluxos de massa e funil.

FLUXO DE MASSA		FLUXO DE FUNIL	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Vazão regular	Altas tensões na transição da tremonha	Menor altura da tremonha	Flutuações na vazão
Efeito de segregação radial é reduzido com a melhora da homogeneidade	Desgaste superficial da parede	Diminuição das pressões dinâmicas na região da tremonha	Efeitos de consolidação com o tempo podem causar obstruções no fluxo
Campo de tensões mais previsível	São necessárias tremonhas mais profundas	Menor desgaste superficial da parede	Grande favorecimento ao colapso
Toda capacidade é utilizada	Maior energia de elevação		Redução da capacidade de armazenagem
	As partículas devem resistir à queda de alturas maiores		Formação de tubos
	Maior capacidade de armazenagem, não possui regiões com produto estagnado		Picos de pressões na região da transição efetiva

2.5 Problemas relacionados ao projeto de fluxo

De acordo com Rotter (2001), quatro problemas regularmente aparecem no projeto e funcionamento dos silos sendo:

- ✓ A integridade estrutural do silo pode ser comprometida pelas pressões as quais podem ser muito altas, muito baixas ou muito assimétricas;
- ✓ O produto armazenado pode permanecer estagnado ou ocorrer fluxo com configuração irregular;

- ✓ O processo de carregamento ou tipo de fluxo pode causar segregação da massa ensilada e;
- ✓ A descarga do silo pode gerar ruídos ou vibrações indesejáveis.

Todos os quatro problemas acima são inerentes à geometria do silo, às propriedades do produto armazenado, ao modo o qual o produto é depositado no silo, o tipo de fluxo desenvolvido durante a descarga e outros fatores que afetam o estado das partículas armazenadas. A seguir é apresentada a Figura 13 a qual representa os principais problemas funcionais dos silos e os parâmetros que os precedem.



Figura 13. Problemas funcionais em silos e seus precedentes.

Através da figura anterior pode-se notar que a redução da vida útil dos silos é influenciada diretamente pelas cargas que a estrutura terá que suportar; e estas, por sua vez, estão ligadas às propriedades dos sólidos, às características das paredes e aos métodos de carregamento. Isto só

reforça a idéia de que uma eficiente análise estrutural deve iniciar pela completa investigação das propriedades do que será armazenado, da forma de carregamento e do correto projeto das paredes. Rotter (2001) cita que fenômenos conhecidos como arqueamento sobre o orifício de descarga da tremonha, efeito tubo e a descarga incompleta são os mais observados e geralmente responsáveis por irregularidades no fluxo.

2.5.1 Arqueamento

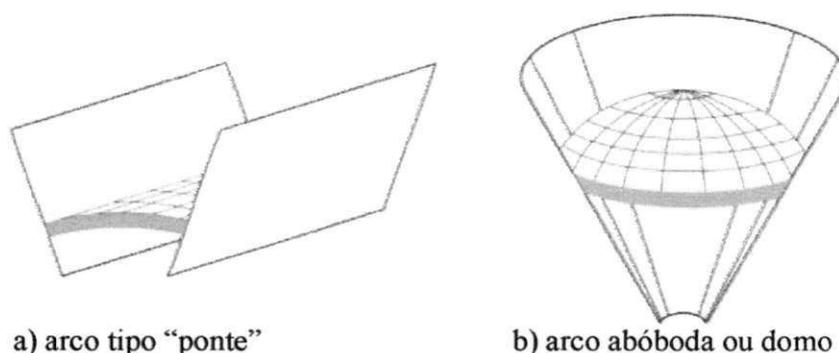
Diz-se do arqueamento quando ocorre a formação, por parte de uma determinada porção da massa ensilada, de um elemento obstrutor, na forma de um arco, estável logo acima do orifício de descarga. Usualmente, isso ocorre quando o silo é dotado de tremonha o que pode resultar em um fluxo irregular ou até mesmo em seu total impedimento.

O efeito de arqueamento pode ser dividido em arcos mecânicos e coesivos. Ravenet (1983) cita que os arcos mecânicos são geralmente formados por partículas grossas que, quando iniciado o fluxo, são impedidas de se movimentar no sentido axial e de rotação entre si, principalmente quando os espaços vazios entre essas partículas são preenchidas por partículas de tamanhos menores, conforme Figura 14.



Figura 14. Arco mecânico.

Já os arcos coesivos são substancialmente formados por partículas finas que, sob ação de forças de coesão, se agrupam e adquirem resistência prejudicando o processo de descarregamento. Os arcos coesivos podem assumir diferentes configurações em função da forma da tremonha utilizada, sendo comum o surgimento de arcos coesivos denominados de “ponte” em tremonhas na forma de cunha (Figura 15a) e de arcos conhecidos como abóboda ou domo em tremonhas de eixo simétrico (Figura 15b).



a) arco tipo “ponte”

b) arco abóboda ou domo

Figura 15. Arcos coesivos.

Além de serem prejudiciais ao processo de descarga, tanto os arcos mecânicos quanto os coesivos representam grande perigo à integridade estrutural do silo uma vez que seu desprendimento tende a gerar um efeito de sucção do ar na parte superior do corpo do silo simultaneamente a um acréscimo abrupto de pressão nos elementos logo abaixo de sua localização. Obviamente, essas conseqüências se manifestam de forma mais indesejada em silos de paredes delgadas.

2.5.2 Efeito tubo

O efeito tubo ocorre substancialmente no fluxo de funil sendo caracterizado pela estagnação e conservação de toda a massa ensilada adjacente ao canal de fluxo e ao longo de toda a altura do silo mesmo após o término do esvaziamento (Figura 16).

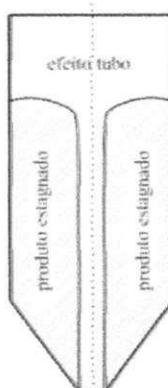


Figura 16. Formação do efeito tubo

Assim como a formação de arcos, o efeito tubo pode ser extremamente danoso à estrutura do silo se o produto, a princípio na condição estagnada, começar a se mover no sentido axial.

Desta forma, as primeiras camadas movidas provocarão uma sucção do ar na parte superior do corpo do silo e uma abrupta expulsão do ar contido no tubo pelo orifício de descarga podendo causar deformações e ruptura das paredes, na união tremonha-corpo do silo, no orifício de descarga e nos dispositivos de descarregamento.

2.5.3 Descarga incompleta

Ocorre devido a permanência de parte da massa armazenada no interior do silo. Suas conseqüências, assim como no efeito tubo, vão desde a perda de capacidade efetiva de armazenagem até possíveis contaminações uma vez que uma mesma quantidade de produto pode permanecer no interior do silo por um período superior ao desejado como no caso de perecíveis como leites em pó, farinhas e outros compostos alimentícios, conforme Figura 17.



Figura 17. Silo com descarga incompleta.

2.6 Informações requeridas dos produtos sólidos armazenáveis

As características dos sólidos a serem contidos 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; contudo, quando se trata de armazenagem de modo geral, erroneamente o comportamento dos sólidos nos silos é associado aos de líquidos cujos mecanismos de fluxo apresentam diferentes significativas.

Quanto às suas determinações, Jenike (1964) deu grande contribuição científica ao desenvolver um aparelho de cisalhamento direto apropriado para produtos sólidos denominado de “Jenike shear cell”. Com ele, é possível determinar os esforços sobre os quais o produto estará

sujeito durante o armazenamento e nas condições de fluxo previstas para acontecer no silo conforme Figura 18.

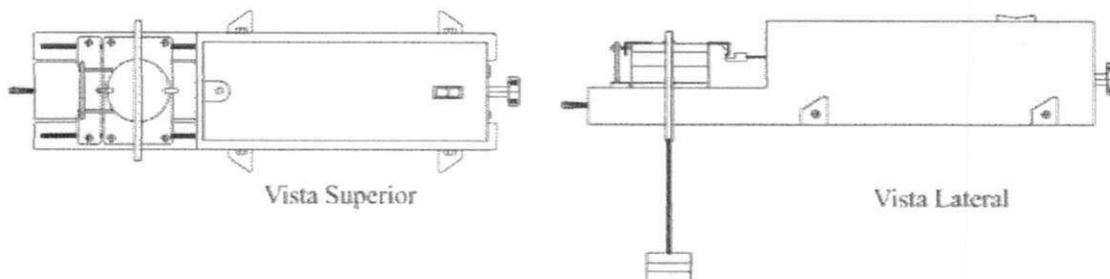


Figura 18. Aparelho de cisalhamento direto de Jenike.

Com este aparelho é possível determinar as principais propriedades de fluxo de produtos sólidos armazenáveis, sendo elas:

- 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).

2.6.1 Peso específico consolidado (γ)

Conforme Calil Junior (1989), não existe relação direta entre a razão peso e volume de uma amostra do produto com a previsão do fluxo. Entretanto, esta variável precisa ser calculada, pois é um parâmetro importante para determinação das pressões em silos.

2.6.2 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 é a reta obtida pelo cisalhamento de uma amostra do produto sob várias

cargas normais. Com as tensões principais σ_M e σ_c 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) enquanto que seu ângulo de inclinação é chamado de ângulo de atrito interno do produto (ϕ), conforme Figura 19.

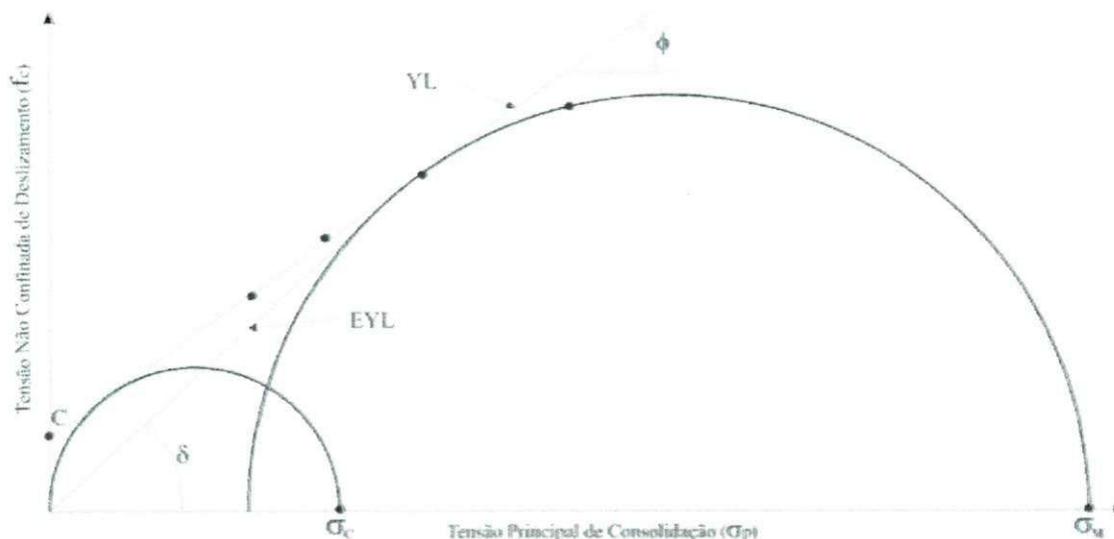


Figura 19. Lugares geométricos e ângulos de atrito interno.

Quando o produto não é de fluxo livre, a reta construída da forma acima indicada não passa pela origem. Nesse caso, a coordenada na qual essa reta corta a origem 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 passa a ser denominado ângulo efetivo de atrito interno (δ).

2.6.3 Ângulo de atrito interno do produto com a parede (ϕ_w)

O critério para condições de deslizamento do produto ao longo da parede pode ser expresso como a relação entre a tensão de cisalhamento (τ_w) e a tensão normal à parede (σ_w), 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 20. 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 com pouca curvatura 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 (ϕ_w) cujo valor de sua tangente expressa o coeficiente de atrito produto-parede (μ).

$$\phi_w = \tan^{-1} \frac{\tau_w}{\sigma_w} \quad \dots(1)$$

$$\mu = \tan \phi_w \quad \dots(2)$$

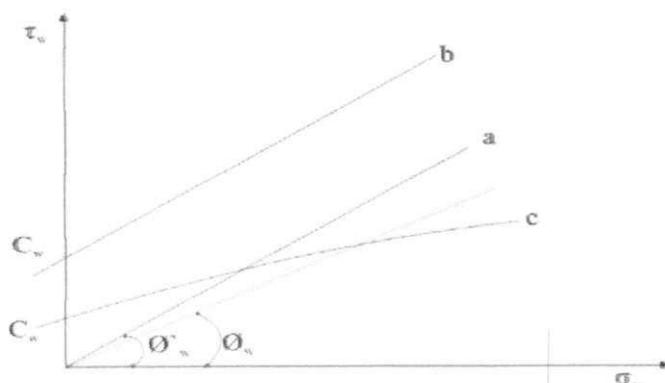


Figura 20. Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede.

Para o caso de paredes de chapa ondulada ou trapezoidal, o coeficiente de atrito efetivo (μ_{ef}) pode ser um modelo com superfícies de deslizamento ponderadas expresso pela equação a seguir:

$$\mu_{ef} = \frac{b_e}{b_e+b_w} \tan \delta + \frac{b_w}{b_e+b_w} \mu_c \quad \dots(3)$$

Sendo $\frac{b_e}{b_e+b_w} + \frac{b_w}{b_e+b_w} = 1$

Onde μ_c é o coeficiente de atrito com a parte da parede considerada plana, b_e e b_w representam os comprimentos relativos dentro de uma onda completa da parede e estão indicados na Figura 21. É importante observar que a proporção de deslizamento entre o produto em relação à parede e o comprimento do produto parado deve ser obtida experimentalmente.

Para chapas onduladas, a EUROCODE 1 (2006) recomenda um valor de $\frac{b_w}{b_e+b_w} = 0,2$, o que indica que 20% do atrito são mobilizados entre os grãos e a chapa ondulada e os 80% restantes são mobilizados entre grãos, conforme Figura 21.

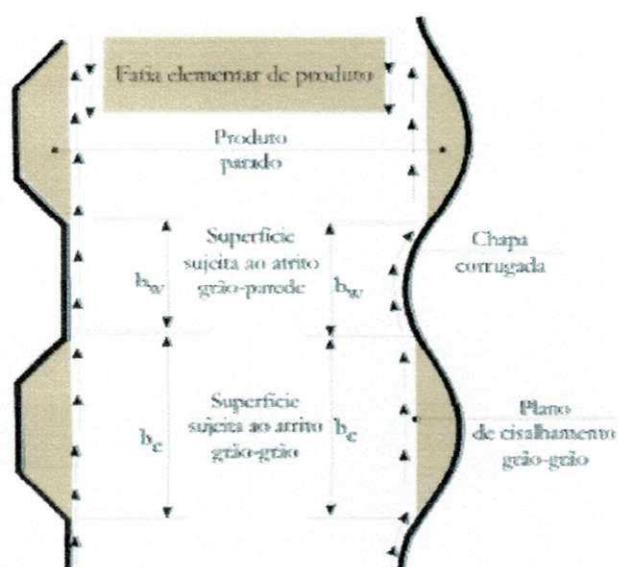


Figura 21. Deslizamento nas chapas trapezoidal e ondulada.

Rotter (2001) comenta que devido ao tipo de silo e às diversas variações sofridas pelos sólidos, a identificação de apenas um limite de sua propriedade não seria suficiente para sua completa representação sendo necessário ter conhecimento dos prováveis valores máximos e mínimos.

Desta forma, se recomenda que as determinações sejam feitas não somente em função de um valor médio, mas também, de seus limites máximos e mínimos com uma probabilidade de ocorrência de 5%, conforme Figura 22.

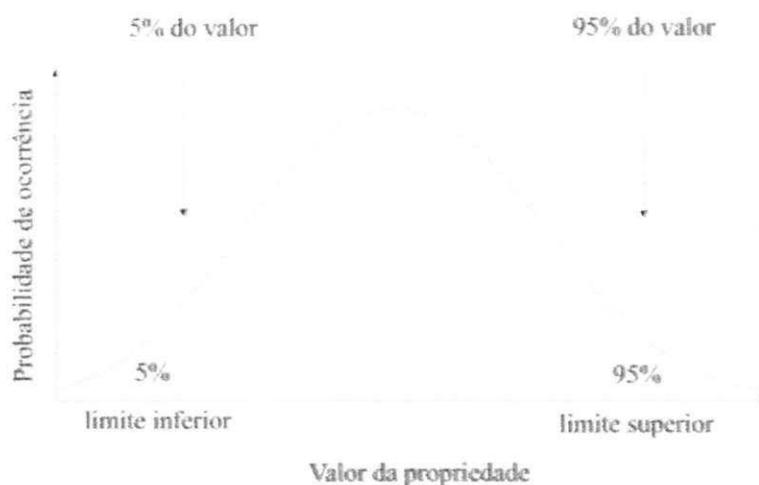


Figura 22. Limites das propriedades dos produtos.

2.6.4 Função Fluxo (FF)

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 ou fluidez de um produto e pode ser utilizada para obtenção da abertura mínima de descarga em um silo para prevenir o arqueamento (BENINK, 1989) devendo ser conhecida sob as mais severas condições de aplicação.

A função Fluxo de um produto é um gráfico no qual é plotado a tensão inconfínada de deslizamento do produto versus o maior valor de tensão de consolidação e representa o esforço atuante no produto quando em situação de consolidação, conforme Figura 23.

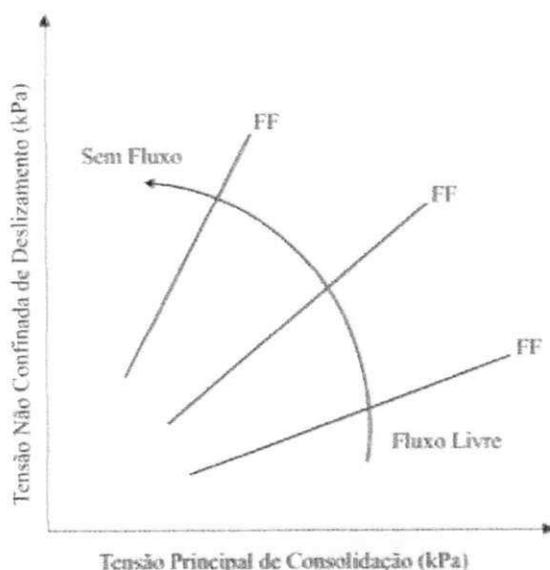


Figura 23. Função Fluxo dos produtos.

Observa-se que a escoabilidade do produto é inversamente proporcional ao ângulo que a reta FF forma com a horizontal. Outro parâmetro importante é o Índice de fluxo (ff_c) o qual é definido como o inverso da inclinação de FF (JENIKE, 1964) e pode variar de uma condição de ausência de fluxo até outra caracterizada como de fluxo livre. Jenike usou o ff_c para classificar os produtos armazenáveis quanto à sua escoabilidade com altos valores representando uma condição de fluxo fácil.

Tabela 3. Classificação do tipo de fluxo de produtos sólidos

Tipo de fluxo	Índice de fluxo (ff_c)
Sem fluxo	$ff_c < 1$
Muito coesivo	$1 < ff_c < 2$
Coesivo	$2 < ff_c < 4$
Fácil	$4 < ff_c < 10$
Livre	$ff_c > 10$

Segundo Prescott (2000) apud Calil Junior & Cheung (2007), a fluidez de um produto não pode ser expressa por um valor único ou por um índice. A fluidez é um resultado da combinação das propriedades físicas do produto, as quais afetam o fluxo e o equipamento utilizado para sua manipulação, armazenagem ou processamento.

2.6.5 Fator fluxo da tremonha (ff)

Consiste em importante parâmetro para o estudo da fluidez dos produtos armazenáveis que, diferentemente da Função Fluxo, é uma propriedade do conjunto silo (geometria e ângulo de atrito com a parede) e do produto. De acordo com Calil Junior (1990), o fator fluxo da tremonha é uma função da forma da tremonha e das propriedades do produto armazenado e indica a escoabilidade do produto na tremonha; quanto menor este valor, melhor será a tremonha.

Jenike lançou mão de uma teoria para o cálculo do fator fluxo da tremonha denominada Teoria dos Campos de Tensões Radiais a qual determina as tensões durante o esvaziamento perto da saída da tremonha, no entanto é comum a utilização da Teoria de Enstad para seu cálculo, conforme equações abaixo:

$$ff = \frac{Y(1+\sin \delta)}{2(X-1)F(\theta) \cos \theta} \quad \dots(4)$$

$$Y = \frac{(2+2 \cos \alpha)^2 (\alpha^{1+m}) \cos \theta + \sin \beta (\sin \alpha)^{1+m}}{(1-\sin \delta)(\sin \alpha)^{2+m}} \quad \dots(5)$$

$$X = \frac{2^m \sin \delta \left[\frac{\sin(\alpha+\beta)+\cos \theta}{\cos \theta} \right]}{1-\sin \delta} \quad \dots(6)$$

$$\alpha = \beta + 90 - \theta \quad \dots(7)$$

$$F(\theta) = \left[\frac{65}{220-\theta} \right]^m \left[\frac{200}{290-\theta} \right]^{1-m} \quad \dots(8)$$

Onde: $m = 1$ (eixo simétrico) e $m = 0$ (retangular $L \geq 30$)

Outra teoria de grande aceitação para a determinação do fator fluxo (ff) foi proposta por Walker (1966) cujas expressões são:

$$ff = \frac{1+\sin \delta}{\Delta}; \quad \text{sendo } \alpha + \phi_w \geq 45^\circ \quad \dots(9)$$

$$ff = \frac{1+\sin \delta}{\Delta} \sin 2(\alpha + \phi_w), \quad \text{sendo } \alpha + \phi_w < 45^\circ \quad \dots(10)$$

Onde:

$$\Delta = 2 \sin \delta \sin 2(\alpha + \varepsilon) - \tan \alpha [1 - \sin \delta \cos 2(\alpha + \varepsilon)] \quad \dots(11)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left[\phi_w + \arcsen \frac{\sin \phi_w}{\sin \delta} \right] \quad \dots(12)$$

Outra propriedade igualmente importante, mas pouco comentada pelas referências científicas é o módulo efetivo de elasticidade do produto armazenado (E_f). A norma AS 3774 (1996) cita que o limite superior do módulo efetivo de elasticidade de um sólido depende da tensão vertical atuante sobre ele e que, a certa profundidade z , ele pode ser expresso pela seguinte equação:

$$E_f = x P_{vc} \quad \dots(13)$$

Onde:

E_f = módulo efetivo de elasticidade (kPa);

x = coeficiente de aproximação do módulo de elasticidade (adimensional) e;

P_{vc} = pressão vertical de carregamento (kPa).

Na ausência de dados experimentais, o valor de x deve ser tomado da seguinte equação:

$$x = 3\gamma^{3/2} \quad \dots(14)$$

Sendo γ o peso específico consolidado do produto dado em kN/m^3 . Alternativamente, o valor de x pode ser aplicado como igual a 70 para grãos agrícolas secos, igual a 100 para minerais com baixa granulometria e igual a 150 para minerais com grandes dimensões de partículas.

2.7 Ações em silos verticais

2.7.1 Representação das ações em silos

Para a determinação das ações em silos, recomenda-se que sejam levadas em consideração a própria estrutura do silo, as propriedades do material a se armazenar e o modelo de fluxo desenvolvido na descarga. Incertezas quanto ao tipo de fluxo e sua geometria, excentricidades de carga e descarga e tempo de armazenagem também devem ser variáveis considerados no projeto.

De acordo com a EUROCODE 1 (2006), as ações em silos podem ser classificadas como:

- ✓ Cargas devidas ao produto armazenado devem ser classificadas como ações variáveis;
- ✓ Cargas simétricas devem ser classificadas como ações variáveis fixas;
- ✓ Cargas adicionais (patch load) associadas como processos de carregamento e descarregamento dos silos devem ser classificadas como ações variáveis livres;
- ✓ Cargas excêntricas associadas como carregamentos e descarregamentos excêntricos devem ser classificadas como ações variáveis fixas;
- ✓ Cargas devidas a pressões de gás atribuídas à sistemas pneumáticos de transporte devem ser classificadas como ações variáveis fixas;
- ✓ Cargas devidas à explosão devem ser classificadas como cargas acidentais.

Diferentes níveis de exigências devem ser utilizados no projeto estrutural de silos, o qual é dependente da segurança do arranjo estrutural e da susceptibilidade de diferentes modelos de falhas. Desta forma, o projeto de silos deve ser executado de acordo com as exigências de três Classes de Avaliação das Ações (CAA), Tabela 4, as quais produzem projetos com riscos essencialmente iguais no projeto de avaliação das ações considerando as despesas e procedimentos necessários para a redução do risco de falhas para diferentes estruturas.

Tabela 4. Classes de Ações em silos (EUROCODE 1, 2006).

Classe de Avaliação das Ações (CAA)	Descrição
Classe de Avaliação das Ações 3	Silos com capacidade excedente a 10000 ton; Silos com capacidade excedente a 1000 ton com a ocorrência de qualquer situação a seguir: a) excentricidade de descarga com $e_0/D_c > 0,25$ b) silos baixos com o topo da superfície com excentricidade $e_t/D_c > 0,25$
Classe de Avaliação das Ações 2	Todos os silos cobertos pela EUROCODE 1 que não se encaixem em outra classe
Classe de Avaliação das Ações 1	Silos com capacidade abaixo de 100 ton

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 5 apresenta o emprego adequado dos limites das principais propriedades de acordo com o objetivo.

Tabela 5. Limites extremos das propriedades de fluxo para o cálculo das pressões.

Aplicação das propriedades		Peso específico	Ângulo efetivo de atrito interno	Ângulo de atrito com a parede	Relação entre pressão horizontal e vertical
		γ	δ	θ_w	K
Tipo de fluxo	Massa	Inferior	Superior	Inferior	--
	Funil	Inferior	Inferior	Superior	--
Máxima pressão horizontal		Superior	Inferior	Inferior	Superior
Máxima pressão vertical		Superior	Inferior	Superior	Inferior
Máxima pressão de atrito		Superior	Superior	Inferior	Superior
Máxima pressão vertical na tremonha		Superior	Inferior	Superior	Inferior

A norma AS 3774 (1996) reuniu os valores característicos de diversos produtos armazenáveis de acordo com a rugosidade das paredes, conforme ilustrados na Tabela 6, que devem ser utilizados para produzir as máximas solicitações de cálculo para dimensionamento de silos em função do produto armazenado, conforme Tabela 7.

Tabela 6. Designação da rugosidade da parede.

Tipo	Descrição da superfície	Rugosidade (μm)	Típicos materiais
1	Polido	0,01 a 1	Aço inoxidável polido, plástico de polietileno extrusado de alto peso específico, aço-carbono galvanizado, alumínio.
2	Liso	1 a 10	Aço inoxidável decapado, plástico de polietileno moldado no local de alto peso específico, aço carbono pintado, aço carbono com leve ferrugem de superfície, azulejos cerâmicos lisos, concreto liso.
3	Rugoso	10 a 1000	Concreto aparente áspero, aço-carbono corroído, azulejos cerâmicos grosseiros.
4	Corrugado	> 1000	Paredes com corrugação horizontal, chapas com nervuras horizontais, paredes não-padronizadas com grandes saliências

Tabela 7. Valores característicos das propriedades de fluxo de produtos sólidos.

Produto	γ (kN/m ³)		Θ_r (°)	δ (°)		Θ_w (°)						Fator K
						Rugosidade						
			Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3					
	Mínimo	Superior	Mínimo	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	
Alumina	10,0	12,0	27	25	40	20	25	25	30	30	35	1,2
Cimento	13,0	16,0	28	40	50	20	25	23	28	28	33	1,2
Clínquer	15,0	18,0	33	42	52	20	25	25	30	30	35	1,2
Carvão negro	8,5	11,0	35	40	60	15	25	25	35	25	40	1,4
Carvão marrom	7,0	9,0	33	45	65	18	25	25	35	35	45	1,4
Carvão em pó	6,0	9,0	38	40	50	20	24	24	28	27	32	1,2
Agreg. 0 a 28mm	17,0	19,0	34	30	40	15	25	18	30	25	35	1,3
Farinha de trigo	6,5	7,5	40	23	30	15	23	25	28	25	35	1,4
Cinza volante	8,0	11,5	22	30	35	18	25	25	35	30	40	1,2
Min. de ferro, pellet	19,0	22,0	35	35	45	20	25	26	33	28	35	1,3
Cal hidratada	6,0	8,0	40	35	45	18	25	25	33	30	40	1,2
Pedra calcária (pó)	11,0	13,0	30	40	60	15	25	23	30	28	40	1,3
Milho	7,0	8,5	30	28	33	15	25	20	30	25	32	1,6
Rocha fosfática	16,0	19,0	27	35	55	19	25	22	30	25	32	1,3
Areia grossa seca	14,0	17,0	30	30	40	15	25	22	28	25	35	1,3
Areia fina	15,0	17,0	30	35	40	15	22	15	22	20	26	1,4
Esc. de alto-forno	10,5	12,0	40	35	38	16	22	20	25	24	28	1,4
Soja	7,0	8,0	23	25	32	10	15	12	18	14	20	1,4
Açúcar	8,0	10,0	29	33	38	15	25	20	35	25	40	1,2
Trigo	7,5	9,0	20	26	32	15	25	18	30	25	32	1,4

γ = peso específico consolidado; Θ_r = ângulo de repouso; δ = ângulo efetivo de atrito interno; Θ_w = ângulo de atrito do produto com a parede e; K = relação entre pressão vertical e horizontal; Para rugosidade do Tipo 4, consultar Apêndice B da norma AS 3774 (1996).

2.7.2 Pressões em silos verticais

As pressões atuantes nas paredes e no fundo de silos tem sido alvo de estudos de vários pesquisadores a mais de 100 anos, entretanto certas lacunas ainda permanecem, devido à complexidade do tema e variabilidade de características geométricas e construtivas dos silos, propriedades físicas e de fluxo dos produtos a serem armazenados, formas de carregamento e descarregamento, ações na estrutura, período de armazenagem e tipo de fluxo.

Calil Junior et al. (2007) citam que as pressões nas paredes geralmente são dependentes das propriedades dos sólidos armazenáveis, da geometria e das propriedades estruturais dos silos e dos diferentes modos de operação. Na Tabela 8 são elencados alguns dos principais fatores influentes nas pressões exercidas pelo produto nas paredes dos silos.

Tabela 8. Fatores que interferem na variabilidade das pressões (Calil Junior et al., 2007).

Propriedades dos produtos	Propriedades dos silos	Operação
Densidade do produto	Altura do enchimento	Velocidade de enchimento
Ângulo de atrito interno	Forma da secção transversal	Velocidade de esvaziamento
Ângulo de atrito com a parede	Geometria do esvaziamento	Método de intervenção no fluxo
Tamanho e distribuição das partículas	Obstrução interna	Método de enchimento
Propriedades elásticas	Rigidez das paredes	Método de esvaziamento
Resistência ao cisalhamento	Rugosidade das paredes	Excentricidade do enchimento
Coesão		Excentricidade do esvaziamento
Consolidação		
Umidade		
Temperatura		

Existe grande dificuldade de obtenção das ações exercidas pelo produto armazenado nas paredes e fundo do silo e esta dificuldade deve-se a fatores como o comportamento dos produtos granulares não serem completamente entendidos nem quantitativamente preditos, a complexa

interação entre o produto e a estrutura de contenção não é quantificada convenientemente, heterogeneidade e variação das propriedades físicas dos produtos (McLEAN, 1985).

Segundo EUROCODE 1 (2006), as pressões em silos são compostas de uma carga fixa, conhecida como simétrica (symmetrical load) e uma carga variável conhecida como adicional (patch load) as quais devem ser tomadas como atuando simultaneamente. Entretanto, em situações onde grandes excentricidades de carregamento e descarregamento ocorrerem, este panorama deve ser alterado passando-se, então, a considerar cada tipo de carga, simétrica e adicional (assimétrica), como dois casos distintos de ações em silos os quais devem ser analisados separadamente. As pressões simétricas devem ser expressas em termos de pressões horizontais P_h na superfície interna da parede do silo, pressões normais à parede da tremonha P_n , pressões de atrito tangenciais às paredes do corpo e tremonha do silo, P_a e P_t , respectivamente, e pressões verticais aplicadas no fundo dos silos, P_v , conforme Figura 24.



Figura 24. Pressões atuantes no corpo e tremonha dos silos

2.7.2.1 Pressões de carregamento em silos verticais (EUROCODE 1, 2006)

Pressões simétricas de carregamento

Para os silos esbeltos, Figura 25, os valores simétricos das pressões de carregamento horizontais (P_{hc}) e de atrito nas paredes (P_{ac}) e verticais no fundo dos silos (P_{vc}) devem ser calculados por meio das seguintes expressões:

$$P_{hc} = P_{ho} Y_j(z) \quad \dots(15)$$

$$P_{ac} = \mu P_{ho} Y_j(z) \quad \dots(16)$$

$$P_{vc} = \frac{P_{ho}}{K} Y_j(z) \quad \dots(17)$$

$$P_{ho} = \gamma k z_o \quad \dots(18)$$

$$z_o = \frac{A}{K\mu U} \quad \dots(19)$$

$$Y_j(z) = 1 - e^{\frac{-z}{z_o}} \quad \dots(20)$$

γ = valor do peso unitário (N/m^3);

μ = valor adimensional do coeficiente de atrito do sólido ao deslizar pela parede do silo;

k = valor adimensional da razão entre pressão lateral e vertical;

$$k = 1,1(1 - \sin \delta_m) \quad \dots(21)$$

Onde δ_m é o valor mínimo do ângulo efetivo de atrito interno do produto.

z = profundidade abaixo da superfície equivalente da massa ensilada (m);

A = área da secção transversal do silo (m^2);

U = perímetro interno da secção transversal do silo (m);

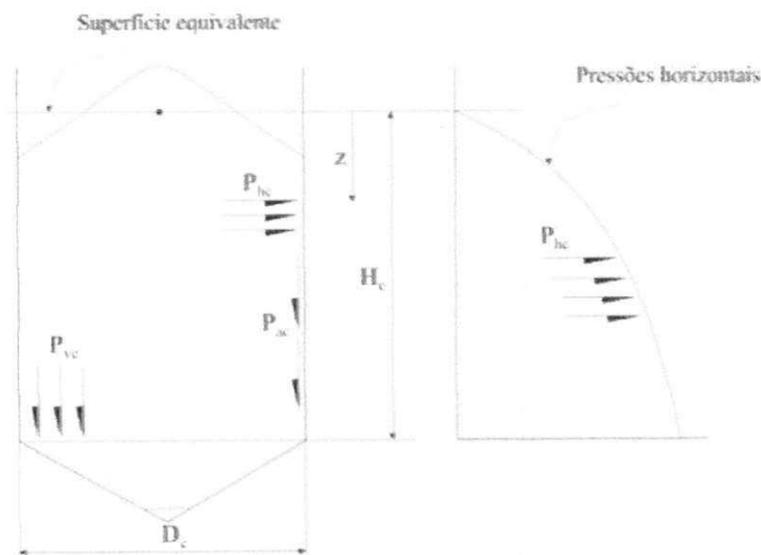


Figura 25. Pressões simétricas de carregamento

Reagrupando as equações acima, tem-se para a pressão horizontal (P_{hc}), pressão de atrito (P_{ac}) e pressão vertical de carregamento (P_{vc}) as seguintes equações:

$$P_{hc}(z) = \frac{\gamma A}{\mu U} \left(1 - e^{-zK\mu\frac{U}{A}}\right) \quad \dots(22)$$

$$P_{ac}(z) = \frac{\gamma A}{U} \left(1 - e^{-zK\mu\frac{U}{A}}\right) \quad \dots(23)$$

$$P_{vc}(z) = \frac{\gamma A}{K\mu U} \left(1 - e^{-zK\mu\frac{U}{A}}\right) \quad \dots(24)$$

O valor resultante característico da força vertical de atrito na parede ($N_z S_k$) por unidade de comprimento de perímetro em qualquer profundidade z após o carregamento deve ser determinado pela equação:

$$N_z S_k = \int_0^z P_{ac}(z) = \mu P_{ho} [z - z_0 Y_j(z)] \quad \dots(25)$$

Resolvendo a equação, tem-se;

$$P_{ac} = \mu \gamma K z_0 \left[z - z_0 \left(1 - e^{-zK\mu\frac{U}{A}}\right) \right] \quad \dots(26)$$

Substituindo z_0 pelo seu valor na equação 1.1, tem-se:

$$P_{ac} = \gamma \frac{A}{U} \left[z - \frac{A}{UK\mu} \left(1 - e^{-zK\mu\frac{U}{A}}\right) \right] \quad \dots(27)$$

Pressões assimétricas de carregamento: requisitos gerais

As pressões adicionais devem ser usadas para representar assimetrias acidentais de ações associadas às excentricidades e imperfeições no processo de carregamento. A magnitude das pressões adicionais de carregamento (P_{plc}) deve ser tomada a partir da máxima excentricidade do topo da massa ensilada durante o processo de carregamento, Figura 26, podendo ser expressa pela equação a seguir:

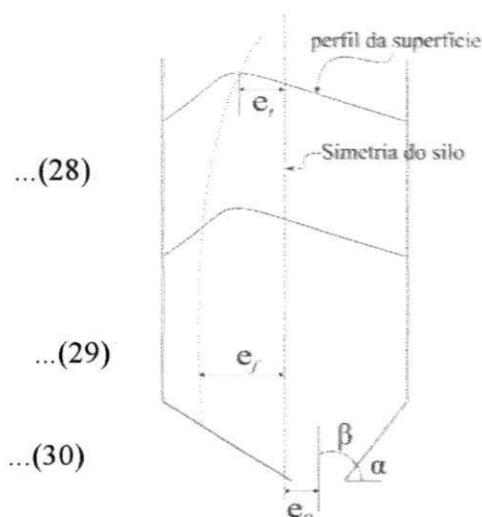


Figura 26. Excentricidades nos silos

Entretanto, a equação 29 resulta em um valor negativo de C_{plc} devendo o mesmo ser tomado como valor igual a $C_{plc} = 0$, onde:

e_f = excentricidade máxima do topo da massa ensilada durante o carregamento;

P_{hc} = valor local da pressão de carregamento no nível de aplicação da carga adicional (Pa);

C_{op} = fator de acréscimo adimensional para as cargas adicionais provocadas pelos sólidos armazenáveis;

A altura de zona na qual a carga adicional é aplicada deve ser tomada como:

$$\text{---} \quad \dots(31)$$

Onde D_c é o diâmetro interno do silo (m)

2.7.2.2 Pressões de descarregamento em silos verticais (EUROCODE 1, 2006)

Pressões simétricas de descarregamento

Para o descarregamento, recomenda-se um valor adicional às cargas de carregamento o qual representa um possível aumento transitório na pressão que ocorre nas paredes do silo durante o processo de descarregamento. Para silos enquadrados em todas as três Classes de Avaliação das Ações, as pressões simétricas horizontais P_{hd} e de atrito P_{ad} de descarregamento devem ser determinadas pelas equações:

$$\dots(32)$$

$$P_{ad} = C_a P_{ac} \quad \dots(33)$$

Onde:

C_h = o fator de descarga adimensional para pressões horizontais;

C_a = o fator de descarga adimensional para pressões de atrito;

Para silos esbeltos enquadrados nas Classes de Avaliação de Ações 2 e 3, o fator de descarga deve ser tomado como se segue:

$$C_h = C_o = 1,15 \quad \dots(34)$$

$$C_a = 1,1 \quad \dots(35)$$

Onde C_o é um fator constante para todos os sólidos igual a 1,15.

Para silos esbeltos na Classe de Avaliação das Ações 1, ilustrado na Tabela 4 onde o valor médio das propriedades k e μ são usados, o fator de descarga deve ser igual a:

$$C_h = 1,15 + 1,5 \left(1 + 0,4 \frac{e}{D_c} \right) C_{op} \quad \dots(36)$$

$$C_a = 1,4 \left(1 + 0,4 \frac{e}{D_c} \right) \quad \dots(37)$$

Onde $e = \max(e_f, e_0)$

Pressões assimétricas de descarregamento: requisitos gerais

As cargas assimétricas de descarregamento devem ser adotadas para representar desigualdades no descarregamento bem como influência de excentricidades de carregamento e descarregamento. A magnitude das cargas adicionais de descarregamento P_{pld} deve ser tomada através da expressão 38:

$$P_{pld} = C_{pld} P_{hd} \quad \dots(38)$$

Onde:

$$H_c/D_c > 1,2; \quad C_{pld} = 0,42 C_{op} [1 + 2E^2] \left(1 - \exp \left\{ -1,5 \left[\left(\frac{H_c}{D_c} \right) - 1 \right] \right\} \right) \quad \dots(39)$$

$H_c/D_c \leq 1,2$; C_{pld} é dado pelo maior valor entre a equação 40 e o valor "0".

$$C_{pld} = 0,272C_{op} \left\{ \left(\frac{H_c}{D_c} - 1 + E \right) \right\} \quad \dots(40)$$

$$\text{Sendo: } E = 2 \frac{e}{D_c}, \text{ em que } e = \max(e_f, e_0) \quad \dots(41)$$

Onde e_0 = a excentricidade a partir do centro do orifício de descarga (decimal);

Basicamente, todas as normas internacionais de ações em silos utilizam as equações propostas por Janssen (1895) para prever as pressões de carregamento. O diferencial entre elas recai no fator de cargas horizontais e verticais (k) e no coeficiente adotado para os adicionais de descarregamento.

Quanto ao fator k , são sugeridas diferentes recomendações para calcular a relação entre as pressões. Na maioria dessas recomendações, o parâmetro k é determinado somente com o conhecimento do efetivo ângulo de atrito interno, sendo que, em algumas formulações, o ângulo de atrito com a parede é levado também em conta. Na maioria das recomendações existentes, pode ser visto que ainda há muita incerteza para o cálculo deste parâmetro. Na Tabela 9 estão resumidas algumas formulações para o parâmetro k propostas.

Tabela 9. Equações propostas por pesquisadores para o coeficiente k .

Autor	Equação proposta
Rankine-Koenen	$k = \frac{1 - \sin \delta}{1 + \sin \delta}$
Jaky	$k = \frac{(1 - \sin \delta) \left(1 + \frac{2}{3} \sin \delta \right)}{1 + \sin \delta}$
Walker	$k = \frac{1 + (\sin^2 \delta) - 2\sqrt{\sin^2 \delta - \mu^2 \cos^2 \delta}}{4\mu^2 + \cos^2 \delta}$
Hartmann	$k = \frac{1 - \sin^2 \delta}{1 + \sin^2 \delta}$
Frazer	$k = \frac{1}{\frac{1 + \sin^2 \delta}{\cos^2 \delta} + \frac{2 \sin \delta}{\cos^2 \delta} \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2 \phi_w}{\text{tg}^2 \delta}}}$

$$\text{Aoki} \quad k = \left[1 + 2 \operatorname{tg}^2 \delta + \frac{4\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}{3\mu^2} \left\{ \operatorname{tg}^3 \delta - (\operatorname{tg}^2 \delta - \mu^2)^{\frac{3}{2}} \right\} \right]^{-1}$$

Segundo Benink (1989), o método das características fornece os limites do parâmetro k para a formulação de Janssen. Estes limites estão expressos nas expressões a seguir:

$$k_{\text{centro}} = \frac{1 - \sin \delta}{1 + \sin \delta} \quad (\text{centro do silo}) \quad \dots(46)$$

$$k_{\text{parede}} = \frac{1 + \sin \delta \cos(2\beta_a)}{1 - \sin \delta \cos(2\beta_a)} \quad (\text{parede do silo}) \quad \dots(47)$$

Onde β_a para o estado ativo é dado pela equação a seguir.

$$\beta_a = 0,5 \left[\frac{\pi}{2} + \phi_w + \operatorname{arc} \cos \left(\frac{\sin \phi_w}{\sin \delta} \right) \right] \quad \dots(48)$$

Algumas dessas formulações são hoje adotadas por normas internacionais sendo as principais agrupadas na Tabela 10.

Tabela 10. Equação do coeficiente k adotado por algumas normas internacionais.

Norma	Equação adotada
AS 3774 (1996)	$k = \frac{1 + (\sin^2 \delta) - 2\sqrt{\sin^2 \delta - \mu^2 \cos^2 \delta}}{4\mu^2 + \cos^2 \delta} \leq 0,35$
EUROCODE 1 (2006)	$k = 1,1(1 - \sin \delta)$
ISO 11697 (1997)	$k = 1,1(1 - \sin \delta)$
ACI 313 (1991)	$k = \frac{1 - \sin \delta}{1 + \sin \delta}$
EP 433 (2000)	Constante igual a 0,5
DIN 1055 (1987)	$k = 1,2(1 - \sin \delta)$
SNIBATI (1975)	$k = \frac{1 - m \sin \delta}{1 + m \sin \delta} \cos^2 \phi_w, \quad m = \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \phi_w}{\tan \delta} \right)^2}$

Freitas (2001), após analisar diferentes formulações para o parâmetro k , concluiu que seus resultados são bastante dispersos entre si, o que resulta em projetos totalmente diferentes. Ayuga (1995) propõe que o parâmetro k seja obtido de forma indireta em função do tipo de parede utilizada, como a seguir:

- ✓ para paredes absolutamente lisas, $\Theta_w = 0$, adotar fórmula de Rankine-Koenen;
- ✓ para parede muito rugosas, $\Theta_w = \delta$, adotar a fórmula de Hartmann;
- ✓ para os casos intermediários, adotar a norma SNIBATI (1975).

2.8 Considerações sobre o capítulo

Este capítulo tratou, de modo geral, dos principais elementos que devem ser abordados quanto ao tema escolhido. Foi observado que a literatura apresenta grande variação quanto aos valores para a classificação dos silos em função da relação H_o/D_o , quanto aos valores das propriedades de fluxo dos produtos armazenáveis e quanto às formulações para o parâmetro k . Estas variações implicam, inevitavelmente, em diferentes expressões e resultados de ações na parede e fundo dos silos, o que pode resultar em projetos super ou subdimensionados. Desta forma, acredita-se que a determinação experimental das propriedades de fluxo dos produtos bem como do fator k sejam primordiais para o desenvolvimento de um projeto de silo vertical confiável no campo estrutural e funcional, sem que o aspecto econômico seja negligenciado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa avaliou a ocorrência das forças de atrito nas paredes e das forças verticais no fundo plano de um silo vertical para três relações H_0/D_0 . Para isso, foi projetado, construído, instrumentado e ensaiado um silo cilíndrico metálico de paredes lisas com fundo plano dotado de orifícios de descarga. Todas as principais informações acerca do modelo de silo proposto para o experimento, seus detalhes construtivos, sua instrumentação, os procedimentos adotados para execução dos ensaios e as formas de análise dos dados estão apresentados neste capítulo.

3.1 Idealização do silo-piloto

3.1.1 Corpo do silo

O silo-piloto construído tem escala geométrica de 1:4 - 1:7, ou seja, superior a 1:10. Se forem consideradas as dimensões usuais de protótipos de células verticais, e respeitado o limite mínimo sugerido por Pieper & Schutz (1980) de $40 d_m$ (d_m é o diâmetro máximo do grão), os resultados obtidos no modelo podem ser extrapolados para escala real. O silo-piloto construído foi um silo vertical circular de paredes em perfil plano confeccionadas em chapa metálica n.14 (espessura nominal 1,98 mm). A escolha dessa espessura baseou-se na necessidade de se obter um silo com paredes suficientemente rígidas de modo que as deformações pudessem ser consideradas desprezíveis.

O corpo do silo foi dividido em dois anéis sendo denominado de anel I o anel inferior e de anel II o superior. O Anel I foi obtido pela união de duas chapas metálicas de dimensões 2 m x 1 m (largura x altura) resultando em um cilindro de 1 m de profundidade, 1,24 m de diâmetro e 1,2 m³ de volume. Para o anel II foram utilizadas quatro chapas metálicas resultando em um cilindro de 2m de profundidade, 1,24m de diâmetro e 2,4 m³ de volume. Desta forma, foram obtidos dois anéis com as relações H_0/D_0 de 0,8 e 1,6 para os anéis I e II, respectivamente. Posicionando-se o anel II sobre o anel I, obteve-se um silo cilíndrico de 3,6 m³ de volume, profundidade (z) igual a 3 m e relação H_0/D_0 igual a 2,4. Maiores detalhes são mostrados na Figura 27.

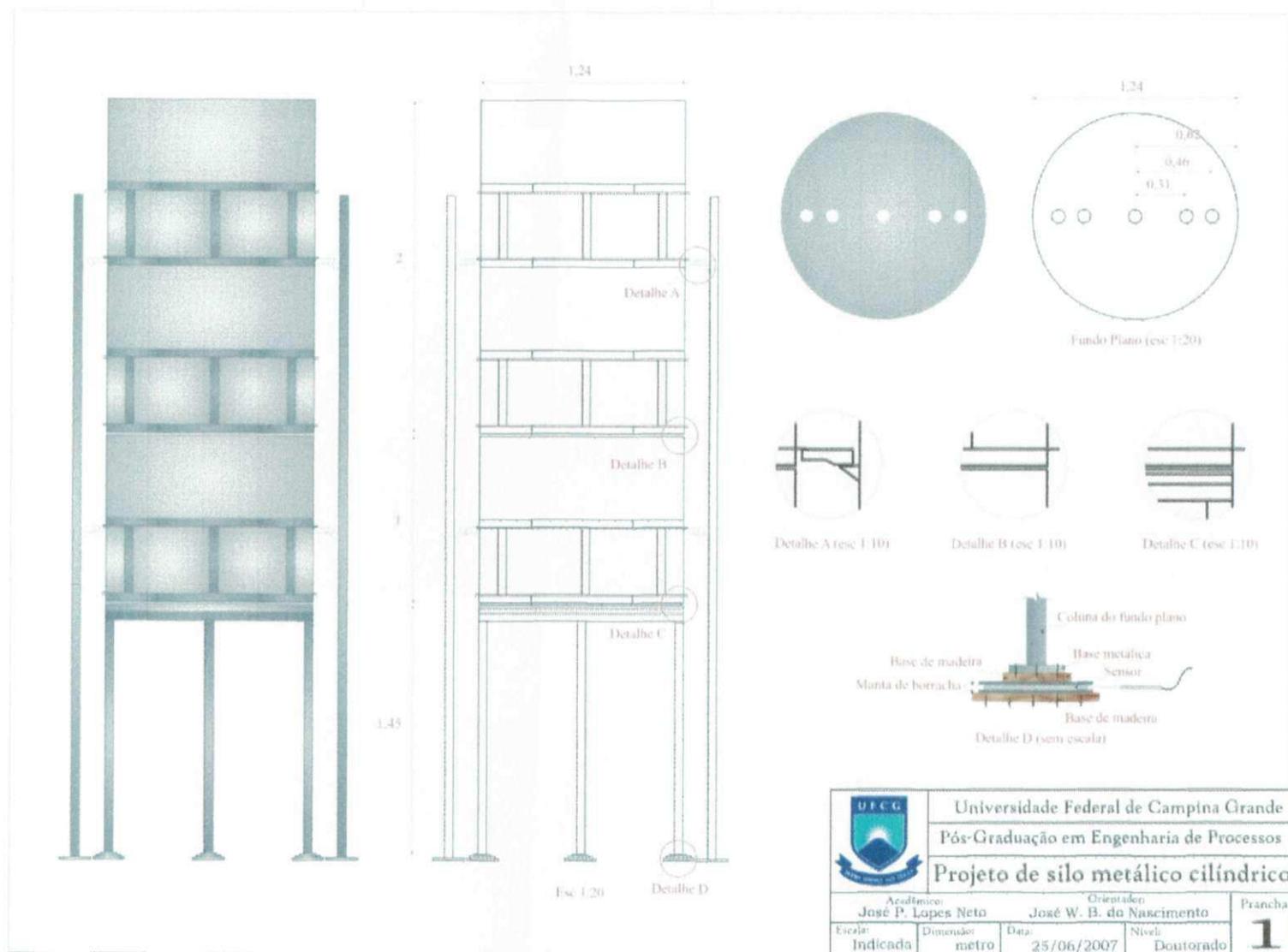


Figura 27. Detalhes construtivos do silo-piloto

É importante ressaltar que no momento da montagem do silo, houve a preocupação de estabelecer uma distância livre de, aproximadamente, 10mm entre os dois anéis, como ilustrado na Figura 28 e entre o anel I e o fundo plano, Figura 29, sendo estes vãos, posteriormente, selados com fita plástica adesiva, Figura 30.



Figura 28. Independência de trabalho entre os anéis



Figura 29. Independência de trabalho entre o Anel I e fundo plano



Figura 30. Fixação da fita plástica adesiva para a contenção da areia

Esta folga de 10mm permitiu que as três principais partes constituintes do silo (anel I, anel II e fundo plano) trabalhassem independentemente uma das outras evitando, assim, medições errôneas

em razão de possíveis interferências, transferências de cargas ou mesmo interações entre cargas verticais e de atrito simultaneamente entre os dois anéis e entre o Anel I – fundo do silo.

3.1.2. Fundo do silo

O fundo plano foi construído com chapas de madeira compensada n.12 de espessura 15mm, revestido com folhas de alumínio e reforçado por uma estrutura metálica de perfil retangular 10mm x 30mm (largura x altura) na forma hexagonal. A Figura 31 apresenta a disposição dos orifícios no fundo plano. Identifica-se D1 como descarga concêntrica, D2 e D3 como descargas excêntricas a 50 e 75% de distância do centro, respectivamente e -D2 e -D3 estão em posição simétrica relativas a estes. É importante salientar que os orifícios D4 e -D4 não foram ensaiados neste experimento.

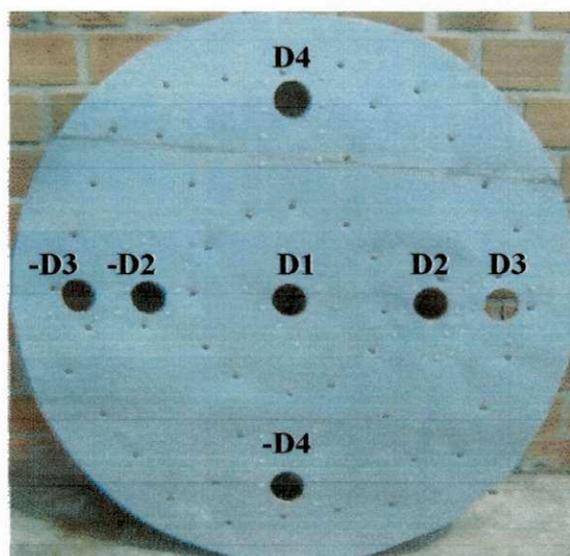


Figura 31. Fundo plano e denominação dos orifícios

3.2 Sensores e aquisição de dados

3.2.1 Calibração dos sensores e aquisição dos dados

Previamente à instrumentação do silo, cada sensor foi instalado a um sistema de aquisição de dados para sua posterior calibração. O sistema de aquisição de dados utilizado foi um sistema de medição de variáveis mecânicas a partir de variações elétricas de Modelo Spider8 600Hz de fabricação da HBM. Foi necessária a utilização de dois módulos do Spider8 uma vez que cada

módulo possuía apenas oito canais de entrada e o experimento exigia a coleta simultânea de dados de nove sensores diferentes, conforme Figura 32.



Figura 32. Sistema de aquisição de dados utilizado

Após a conexão de cada sensor ao sistema de aquisição de dados, seguiu-se com a calibração dos mesmos. Para o seu funcionamento, o sistema Spider8 requer o estabelecimento de uma relação entre variáveis mecânicas impostas e variações elétricas captadas. Logo, as células de carga foram calibradas a partir de volumes de água previamente definidos. A cada acréscimo de volume, o sistema registrava uma variação de potencial elétrico até a obtenção de um quadro que expressasse uma relação confiável entre carga/variação elétrica para aquele sensor.

A Figura 33 apresenta uma das etapas de calibração das células de carga com o estabelecimento de relações entre cargas e valores elétricos reconhecidos pelo sistema Spider8.

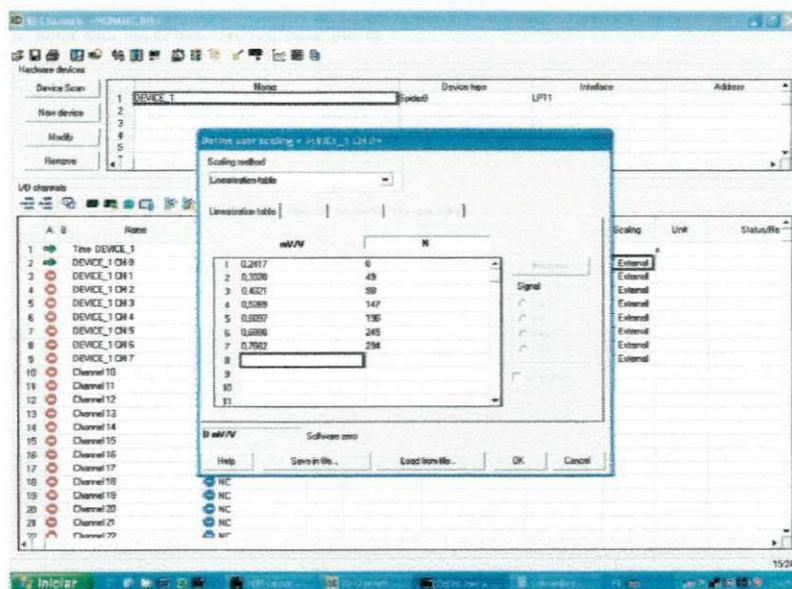


Figura 33. Calibração das células de carga usando o sistema Spider8

Para as células de pressão, o procedimento adotado foi ligeiramente diferente. As células de pressão utilizadas nesta pesquisa foram às mesmas empregadas na tese de doutorado de Gomes (2000) em silos horizontais na EESC/USP. No referido estudo, o autor realizou uma calibração e conferiu os dados obtidos com os recomendados pelo fabricante. Desta forma, ele conseguiu reunir os fatores de conversão entre pressões e variações elétricas na Tabela 11. Para a presente pesquisa, esses fatores foram conferidos e inseridos na configuração básica do sistema de aquisição de dados.

Tabela 11. Fatores de calibração das células de pressão utilizadas.

Célula n.	Fator de Calibração (Pa/mV/V)
47850	6905,15
47890	6915,49
47893	6906,66

Após a calibração dos sensores procedeu-se com a configuração do sistema por meio do software Catman versão 4.5. Primeiramente, os sensores foram reconhecidos pelo software; em seguida suas configurações foram adicionadas a uma única página de trabalho do programa, como exemplificado na Figura 34.

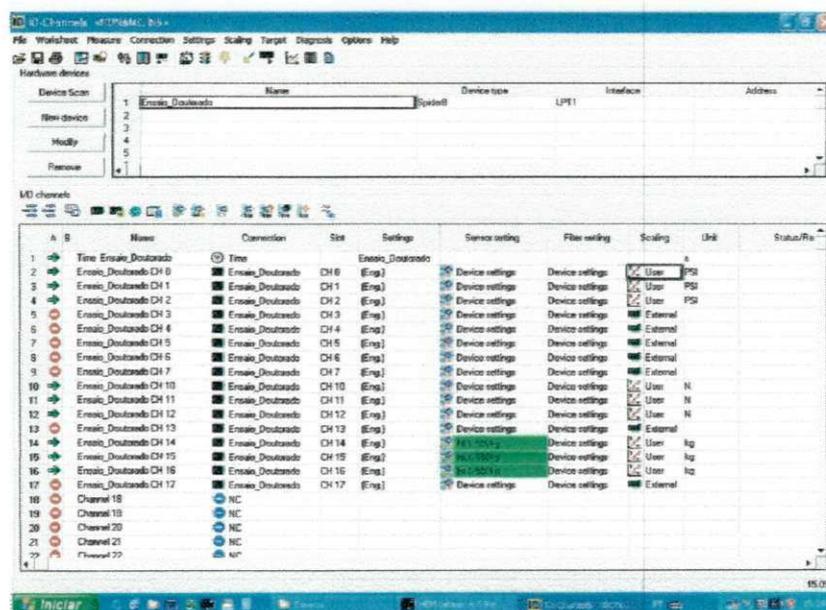


Figura 34. Página de reconhecimento e configuração dos sensores

3.3 Instrumentação do silo-piloto

3.3.1 Instrumentação do corpo do silo

Como um dos objetivos foi medir a força de atrito no corpo do silo em duas profundidades diferentes, foram utilizadas células de carga de 5,4kN de capacidade fixadas aos anéis e conectadas às colunas do corpo. Cada anel foi instrumentado com três células de carga distanciadas de 120° uma das outras, Figura 35. Deste modo, cada sensor registraria a força de atrito na superfície lateral limitada pelo stor circular correspondente para as duas relações H/D_c .

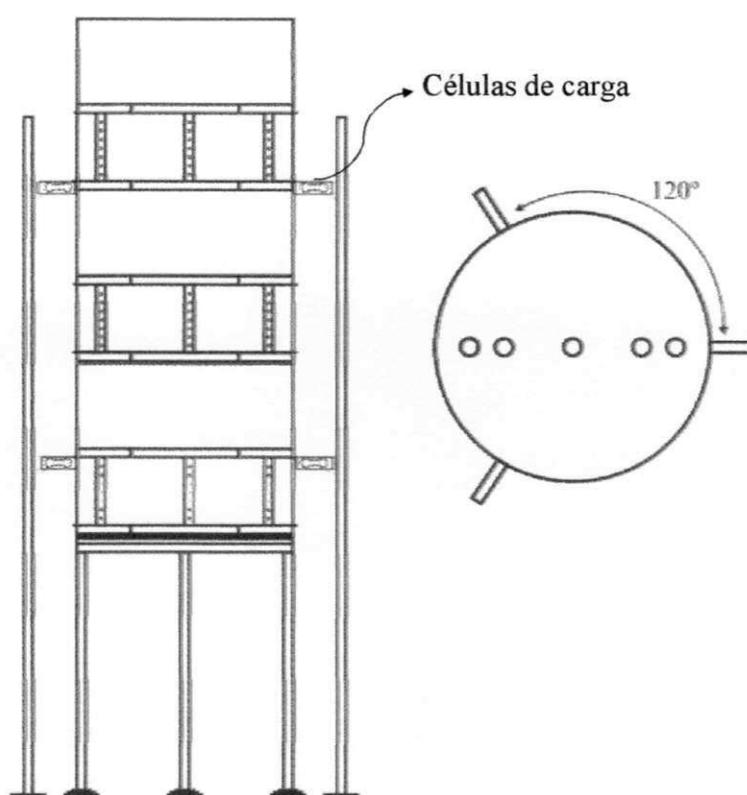


Figura 35. Posicionamento das células de carga

3.3.2 Instrumentação do fundo do silo

Diferentemente da instrumentação da parede do silo, a força vertical no fundo plano foi obtida de forma indireta pela medição da pressão vertical. Isto foi possível devido à instalação de células de pressão tipo “hidráulica” Geokon Modelo 3510 na base de cada coluna do fundo plano (Figura 36). Cada célula de carga possui capacidade de 100MPa e diâmetro externo de 230 mm.

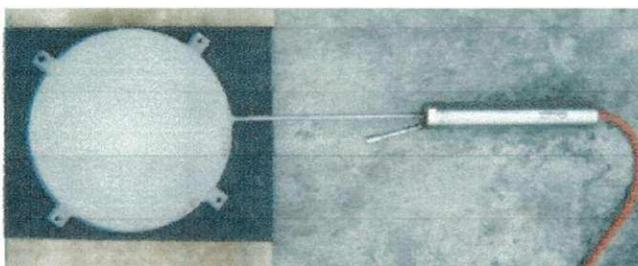


Figura 36. Célula de pressão utilizada

Para o acoplamento das células de pressão às bases das colunas do fundo plano, seguindo-se as seguintes etapas: na base de cada coluna foi soldado um disco de metal de espessura de 12,7mm e diâmetro de 150 mm. Sob cada disco metálico foi parafusado um disco de madeira com espessura 12,7mm e diâmetro de 220 mm. Sob cada disco de madeira foi colocada uma manta de borracha e, sob cada manta, a referida célula de pressão. Inferior à célula de pressão, novamente foi colocada uma manta de borracha e sob esta segunda manta foi colocada uma placa quadrada de madeira com espessura 12,7 mm e lado igual a 300 mm.

Por fim, esta placa quadrada de madeira foi fixada ao solo por meio de parafusos sextavados e buchas de nylon n.10. Todo esse procedimento teve por objetivo proporcionar uma melhor acomodação da estrutura no solo e distribuição das cargas evitando, assim, possíveis excentricidades. A Figura 37 ilustra a disposição das células de pressão.



Figura 37. Instalação das células de pressão

Na Figura 38 pode-se observar o silo-piloto utilizado nos testes.



Figura 38. Silo-piloto ensaiado

3.4 Procedimento experimental

Objetivou-se, após a construção do silo, realizar ensaios de preenchimento e esvaziamento utilizando-se areia, Figura 39 como produto armazenável devido ao seu elevado peso específico aparente (≈ 14 a 17 kN/m^3), uniformidade de partículas e facilidade de aquisição. Este material foi utilizado por proporcionar elevadas cargas na estrutura assegurando, dessa forma, que os dados obtidos possam ser considerados como quantitativamente representativos dos esforços desenvolvidos além do fato de ser um produto que, quando seco, possui um fluxo do tipo livre sem

obstruções, segregação de produto, compactação e outros problemas funcionais que poderiam impedir uma coleta eficiente das informações.



Figura 39. Amostra da areia utilizada nos ensaios

3.4.1 Propriedades físicas da areia

3.4.1.1 Teor de umidade (U) e ângulo de repouso (θ_r)

O teor de umidade (U) da areia foi determinado pelo método Gravimétrico. O ângulo de repouso (θ_r) foi determinado através da queda livre de uma determinada porção do produto em uma superfície rugosa. Com sua queda, um volume foi formado. Dessa forma, mediu-se o ângulo que as paredes deste volume formavam com o plano horizontal.

A altura de queda livre (h) e a rugosidade da superfície influenciam na determinação do valor do ângulo. É recomendado que a superfície seja bem rugosa e que a altura de queda livre (h) esteja entre o diâmetro médio das partículas e 10 cm, conforme Figura 40.

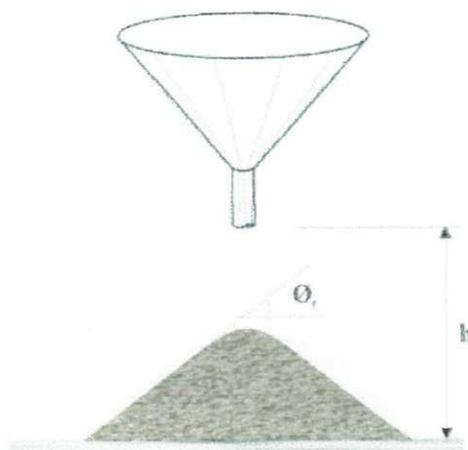


Figura 40. Ensaio para determinação do ângulo de repouso

3.4.1.2 Peso específico (γ) e Compressibilidade (C_c)

O peso específico de um produto é afetado pelo nível de tensão atuante no ponto considerado e pode ser dividido em dois tipos, os quais foram determinados:

- Peso específico aerado (γ_a)
- Peso específico consolidado (γ_c ou γ)

A compressibilidade (C_c) de um sólido representa o quanto aquele produto é susceptível a se comprimir, em volume, e pode ser dado pela equação a seguir:

$$C_c = 1 - \frac{\gamma_a}{\gamma} \quad \dots 49$$

3.4.1.3 Granulometria da areia, dimensão máxima das partículas (d_m) e módulo de finura (M_f)

Estas três propriedades físicas foram determinadas conforme recomendações das normas NBR 7211 (2005) e NBR 7217 (1987) utilizando-se um conjunto de peneiras e agitador elétrico, conforme Figura 41.



Figura 41. Agitador de peneiras

3.4.2 Propriedades de fluxo da areia

A determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados é o primeiro passo para o projeto estrutural e de fluxo dos silos e deve ser conduzida nas condições mais severas daquelas esperadas que ocorram em um silo. O equipamento mais utilizado para essas determinações é o

aparelho de cisalhamento de translação conhecido internacionalmente por “Jenike Shear Cell”. Todas as propriedades foram determinadas através dos ensaios em laboratórios, a saber:

- ✓ peso específico em função da consolidação (γ);
- ✓ ângulo de atrito interno (\emptyset);
- ✓ efetivo ângulo de atrito interno (δ);
- ✓ ângulo de atrito entre o produto armazenado e o material da parede do silo (\emptyset_w);

O fator k foi determinado de forma indireta através da análise das forças cisalhantes, Figura 42, e das tensões de Mohr, Figura 43, obtidos nos ensaios de cisalhamento com o aparelho de Jenike. Ele representa uma relação entre as tensões de consolidação (σ_M) e tensões não confinadas de deslizamento (σ_C). Maiores detalhes dessa metodologia encontram-se na Eurocode 1 (2006), páginas 88 a 90.

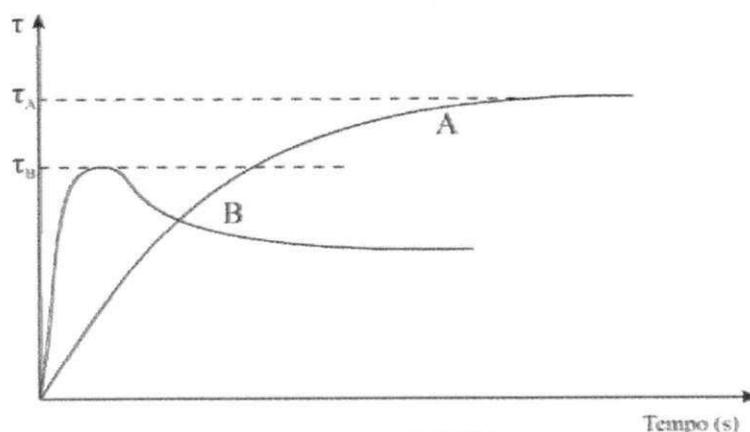


Figura 42. Gráficos de cisalhamento pelo ensaio de Jenike

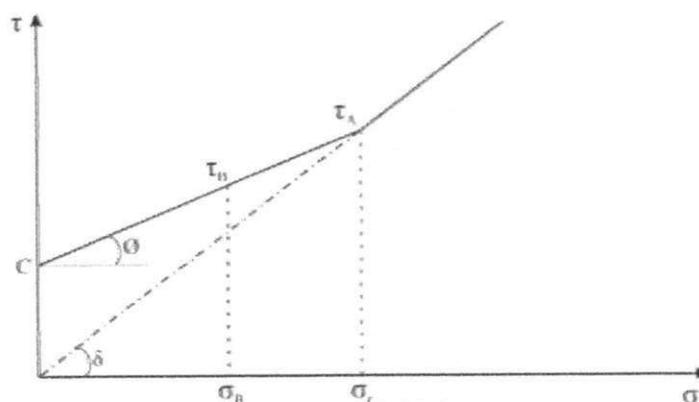


Figura 43. Tensões de consolidação e não confinadas

Resumidamente, o fator k pode ser estimado pela equação:

$$k = \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_M} \right) (1 + \sin \delta) \quad \dots 50$$

O procedimento adotado para a determinação das propriedades de fluxo instantânea e de consolidação (12 e 24 h) da areia foi o recomendado pela BMHB (1985) utilizando o Aparelho de Cisalhamento Direto (Jenike Shear Cell), conforme Figura 44.



Figura 44. Ensaio para determinação das propriedades de fluxo

Para a determinação das propriedades de fluxo em função do tempo de armazenagem (temporal), após a fase de pré-cisalhamento, cada amostra foi transferida para a bancada de consolidação, Figura 45, onde permaneceram durante 12 e 24 h sob a ação de cargas normais pré-definidas; decorrido este período, as células foram transferidas para o aparelho de cisalhamento direto e determinada a tensão de cisalhamento, em função do tempo. A bancada de consolidação tem capacidade para seis amostras inseridas em uma cápsula de acrílico para evitar que a umidade do ar externo interfira nos testes.



Figura 45. Bancada de consolidação

Para a determinação do ângulo de atrito com a parede (θ_w), foram adotados os mesmos equipamentos descritos acima, mas com a substituição do anel inferior da célula de Jenike pela amostra do material da parede, bem como outros níveis de carga (50, 40, 30, 20, 10 e 4,4 N). A

superfície utilizada no ensaio de atrito com a parede foi uma amostra de aço liso por este ser o material utilizado na construção da parede do silo-piloto, segundo Figura 46.



Figura 46. Ensaio de cisalhamento da areia com a parede

3.4.3 Aquisição dos dados

O sistema de aquisição de dados foi programado para atuar a uma frequência de 0,1 Hz, ou seja, foi coletada uma informação a cada 10 segundos de ensaio com o término da aquisição programado em função do período necessário para cada ensaio.

Para a aquisição dos dados, ensaios de carregamento e descarregamento do silo foram repetidamente executados com auxílio de um elevador de canecas com velocidade de trabalho e capacidade volumétrica constantes. Como exemplo, a Figura 47 mostra a aquisição de dados no início de um dos ensaios. Vale salientar que antes do início de cada ensaio, os sensores eram zerados de forma que fossem coletadas apenas informações de atrito nas paredes e pressão no fundo do silo.

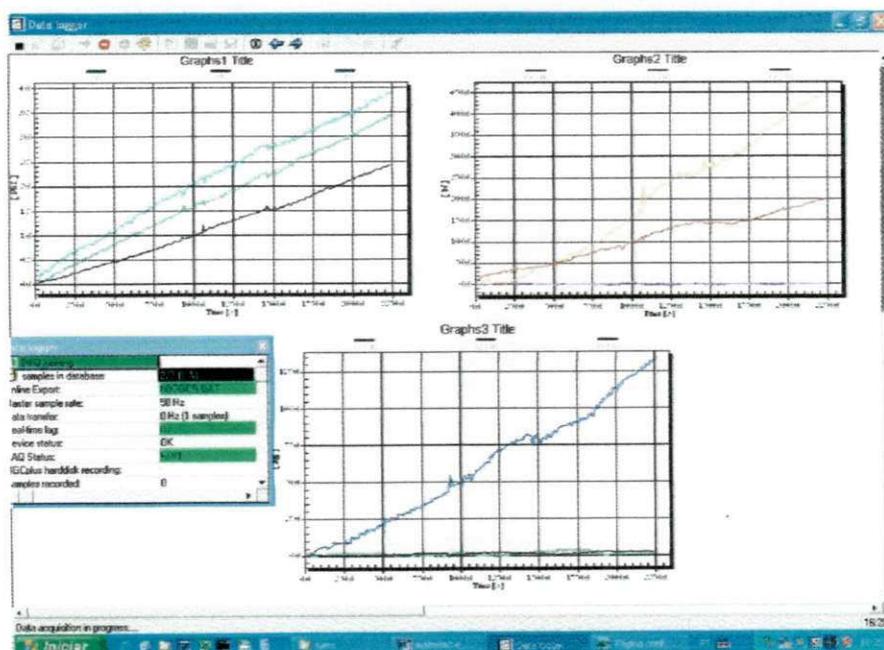


Figura 47. Exemplo das páginas de trabalho do Catman 4.5

3.4.4 Execução dos ensaios

Um roteiro de execução dos ensaios foi previamente planejado conforme instruções abaixo:

- ✓ O silo foi carregado concentricamente e, após um período de descanso de 1h para permitir que tanto a massa ensilada quanto a estrutura se acomodassem, efetuou-se o descarregamento pelo orifício de descarga central denominado de D1;
- ✓ Em um segundo estágio, o silo foi novamente preenchido concentricamente e, após o período de descanso pré-definido, ocorreu seu completo descarregamento pelo orifício de descarga D2 situado à meia distância entre o centro do fundo e sua extremidade, ou seja, pelo orifício com 50 % de excentricidade;
- ✓ Em um terceiro estágio, após o carregamento concêntrico foi posto em ação o orifício de descarga denominado de D3 situado mais próximo à extremidade do fundo plano;

Todos esses ensaios foram repetidos por quatro vezes. Após o término dessa etapa, estes três procedimentos foram novamente realizados com a diferença do silo ser, a partir de então, carregado excentricamente a 75%.

Em um segundo momento da pesquisa, realizou-se a descarga por meio das combinações dos orifícios de descarga conforme planejamento a seguir:

- ✓ Em uma nova etapa, o carregamento foi concêntrico com uma descarga executada através da combinação dos orifícios D1 e D2. Ou seja, nesse momento ocorreu a descarga por dois orifícios ao mesmo tempo, um central e outro excêntrico, de modo que fossem formados, simultaneamente, dois canais de fluxo;
- ✓ Dando continuidade aos ensaios, o descarregamento ocorreu simultaneamente por meio dos orifícios D1 e D3 após o silo ter sido carregado concentricamente.
- ✓ Para um novo ensaio, escolheu-se o descarregamento através das combinações dos orifícios D2 e -D2 e;
- ✓ Como última etapa do experimento, optou-se por realizar medições quando o silo fosse descarregado simultaneamente pelos orifícios D3 e -D3

Novamente, todos estes ensaios foram repetidos por quatro vezes. Após o término desta etapa, estes três procedimentos foram igualmente realizados para os dois anéis com a diferença do silo ser, a partir de então, carregado excentricamente.

Por fim, para avaliar o efeito do tempo de armazenagem nos esforços desenvolvidos na parede do silo durante o descarregamento, foram executados ensaios de descarga após um período de armazenagem de 12 e 24 h. De maneira semelhante ao anterior, esse procedimento foi executado com quatro repetições.

3.5 Análise e comparação dos resultados

Basicamente, esta etapa abrangeu a análise da força de atrito em duas relações H_0/D_0 em três pontos em cada anel e da força vertical em três pontos fixados no fundo do silo. Os dados foram tabulados e os resultados apresentados são referentes à força de atrito entre as células de carga para um mesmo anel e entre anéis de forma que as informações expressassem o quanto é absorvido pelas paredes por atrito nas diferentes condições de carregamento e descarregamento.

Os dados obtidos de força de atrito nos dois anéis foram analisados segundo um esquema fatorial $2 \times 7 \times 2 \times 3$, sendo dois tipos de carregamento, sete opções de descarga, duas relações H_0/D_0 e três sensores em cada anel distanciados a 120° totalizando 84 tratamentos em quatro repetições.

Além disso, foi analisado o somatório da força de atrito entre os dois anéis com posterior comparação dos dados aos obtidos teoricamente pelas normas internacionais AS 3774 (1996), DIN 1055 (1987), ISO 11697 (1995) e EUROCODE 1 (2006).

3.5.1 Momento fletor nas paredes (M)

O momento longitudinal resultante M para cada anel (Anel I e Anel II) foi obtido através dos momentos secundários em cada eixo ilustrados na Figura 48 e calculados pelas equações abaixo:

$$M_{x \text{ Anel I}} = R_w (F_{1I} \sin \alpha_1 + F_{2I} \sin \alpha_2 + F_{3I} \sin \alpha_3) \quad \dots 52$$

$$M_{x \text{ Anel II}} = R_w (F_{1II} \sin \alpha_1 + F_{2II} \sin \alpha_2 + F_{3II} \sin \alpha_3) \quad \dots 53$$

$$M_{y \text{ Anel I}} = -R_w (F_{1I} \sin \alpha_1 + F_{2I} \sin \alpha_2 + F_{3I} \sin \alpha_3) \quad \dots 54$$

$$M_{y \text{ Anel II}} = -R_w (F_{1II} \sin \alpha_1 + F_{2II} \sin \alpha_2 + F_{3II} \sin \alpha_3) \quad \dots 55$$

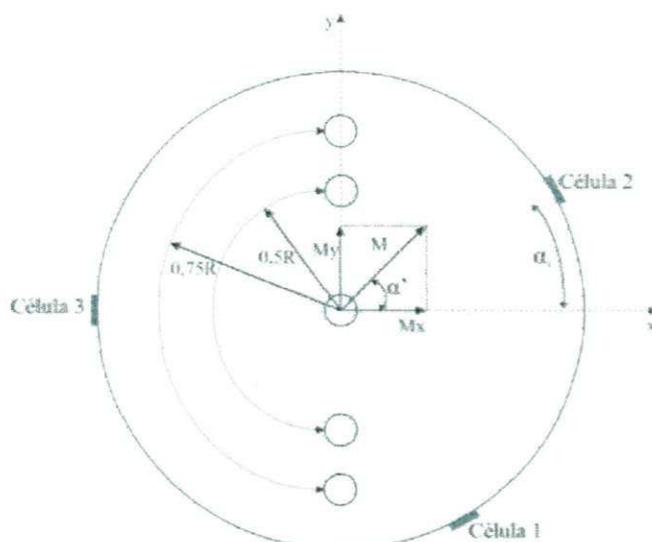


Figura 48. Disposição das células de carga e momentos fletores

Onde:

$M_{x \text{ Anel I}}$ = momento fletor no eixo x no Anel I;

$M_{x \text{ Anel II}}$ = momento fletor no eixo x no Anel I;

$M_{y \text{ Anel I}}$ = momento fletor no eixo y no Anel I;

$M_{y \text{ Anel II}}$ = momento fletor no eixo y no Anel I;

R_w = distância do eixo do silo até a célula de carga;

F_{1I} = força coletada pela célula n.1 do Anel I;

F_{2I} = força coletada pela célula n.2 do Anel I;

F_{3I} = força coletada pela célula n.3 do Anel I;

F_{1II} = força coletada pela célula n.1 do Anel II;

F_{2II} = força coletada pela célula n.2 do Anel II;

F_{3II} = força coletada pela célula n.3 do Anel II;

α_i = coordenada angular da célula de carga n.i em relação ao eixo x ;

Os valores do momento resultante M e do ângulo de mudança de fase α' foram calculados usando as equações:

$$M = (M_x^2 + M_y^2)^{0,5} \quad \dots 56$$

$$\alpha' = \arcsin\left(\frac{M_y}{M}\right) \quad \dots 57$$

O ângulo de mudança de fase α' é o ângulo entre o eixo x e o vetor do momento resultante. O momento assume um valor positivo quando atuando no sentido anti-horário.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As principais informações obtidas nos ensaios foram analisadas e discutidas de forma sucinta com auxílio de outras pesquisas e normas internacionais e encontram-se apresentadas neste capítulo. Primeiramente, deu-se destaque as propriedades físicas e de fluxo da areia com análise de sua variabilidade e predição do tipo de fluxo a ocorrer. Em um segundo momento, foram analisadas a intensidade e distribuição das forças de atrito em cada um dos seis sensores. Foi realizado, ainda, tratamento estatístico com comparação dos resultados aos valores teóricos preditos por normas internacionais. Por fim, identificou-se o percentual de força vertical no fundo plano em cada uma das situações estudadas.

4.1 Propriedades físicas e de fluxo da areia

4.1.1 Propriedades físicas da areia

4.1.1.1 Teor de umidade (U) e ângulo de repouso (θ_r)

Durante os ensaios, a areia encontrava-se com teor de umidade igual a 10,7% expresso em base úmida. Quanto ao ângulo de repouso (θ_r), seu valor médio após três repetições foi de 32° (Figura 49) o que condiz com os valores normatizados pelas AS 3774 (1996) e BMHB (1985), ambos iguais a 30°.

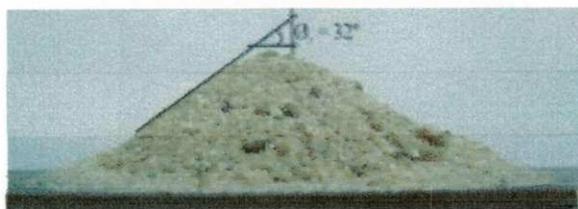


Figura 49. Determinação do ângulo de repouso da areia

Segundo Gaylord & Gaylord (1984), produtos que apresentam ângulo de repouso (θ_r °) entre 30 e 38° são produtos capazes de desenvolver um fluxo do tipo fácil. Entretanto, a utilização do

ângulo de repouso para a classificação do tipo de fluxo caiu em desuso sendo, atualmente, apenas utilizado para o dimensionamento da cobertura do silo pela formação do talude de carregamento.

4.1.1.2 Peso específico (γ) e Compressibilidade (C_c)

O peso específico aerado encontrado para a areia foi de $16,4\text{kN/m}^3$. Quanto à sua compressibilidade, que é a medição da mudança de volume do sólido causado pela mudança nas componentes de tensões do silo, o valor encontrado foi de 0,03.

4.1.1.3 Distribuição granulométrica da areia

Conforme NBR 7211 (2005), agregados miúdos são aqueles agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μm em ensaio granulométrico. Para o caso da areia, aplica-se, ainda, a subdivisão granulométrica a seguir:

- Fina: diâmetro de 0,05 mm a 0,3 mm;
- **Média: diâmetro de 0,3 mm a 1,2 mm e;**
- Grossa: diâmetro de 1,2 mm a 4,8 mm.

Conforme Tabela 12 conclui-se que a areia usada é uma areia de granulometria média, pois o maior percentual retido ocorreu na peneira de abertura 0,59 mm (29,57%) estando seus valores, ainda, dentro dos limites estabelecidos pela norma para uma areia com esta característica.

Tabela 12. Resultados da análise granulométrica.

Peneira (mm)	Massa retida (g)	Porcentagens		MF	Limites da NBR 7211		
		Retida	Acumulada		Fina	Média	Grossa
4,67	44,3	4,43	4,43	4,43	0-10	0-11	0-12
2,36	27,4	2,74	7,17	7,17	0-15	0-25	0-40
1,18	136,4	13,64	20,81	20,81	0-25	10-45	30-70
0,59	295,7	29,57	50,38	50,38	21-40	41-65	66-85
0,297	238,9	23,89	74,28	74,28	60-88	70-92	80-95
0,15	212,8	21,28	95,57	95,57	90-100	90-100	90-100
Fundo	44,2	4,42	100	100	100	100	100
Total	1000	100		252,7			
				MF = 2,5			

Outra classificação bastante utilizada é a proposta por Calil Junior (1984) que caracteriza o tipo de produto a se armazenar em função de faixas de variação do diâmetro médio das partículas. Desta forma, a areia utilizada pode ser considerada como sendo um material granular sem característica coesiva.

A seguir, encontram-se as Figuras 50 e 51 que representam a distribuição granulométrica e a zona em que a areia se encontra, respectivamente. Observa-se que a areia encontra-se variando entre os limites inferior e superior da zona ótima.

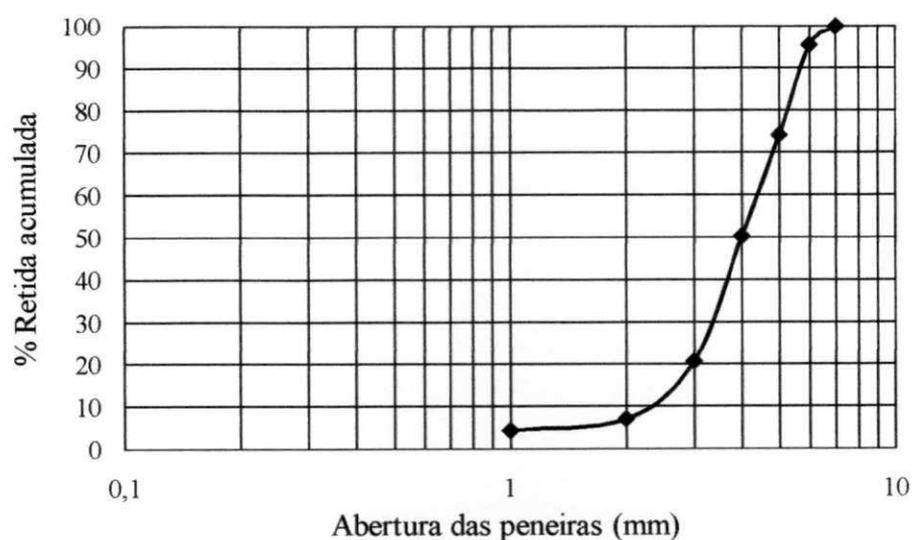


Figura 50. Curva granulométrica da areia

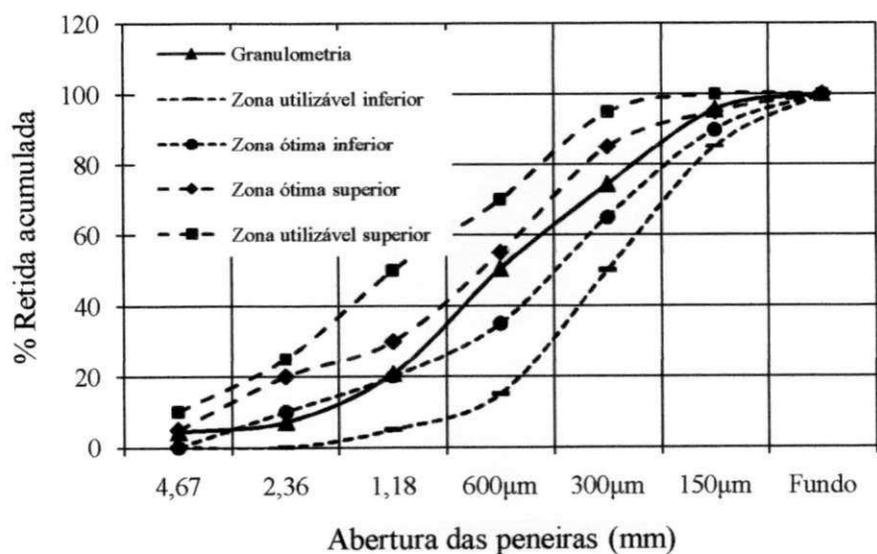


Figura 51. Limites da distribuição granulométrica da areia

4.1.1.4 Dimensão máxima das partículas (d_m) e Módulo de finura (M_f)

Conforme a NBR 7211 (2005), a dimensão máxima característica de agregados (d_m) é definida como grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. Com base nos ensaios granulométricos, a areia utilizada apresenta dimensão máxima de partículas, d_m , igual a 4,7 mm.

Quanto ao Módulo de finura (M_f), definido como a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100, o valor encontrado após o ensaio granulométrico foi de 2,5. Esse parâmetro serve para quantificar se o agregado é mais grosso ou mais fino dentro de uma faixa de distribuição granulométrica, sendo que quanto maior o módulo de finura mais grosso será o agregado. Para a zona ótima, a norma NBR 7211 (2005) estabelece uma faixa de variação de 2,2 a 2,9.

4.1.2 Propriedades de fluxo da areia

Conforme descrito no item 3.5.2, as Figuras 52, 53, 54 e 55 representam as forças cisalhantes ocorridas nas amostras pré-cisalhamento e de cisalhamento para os quatro níveis de cargas definidos para o tempo igual a zero.

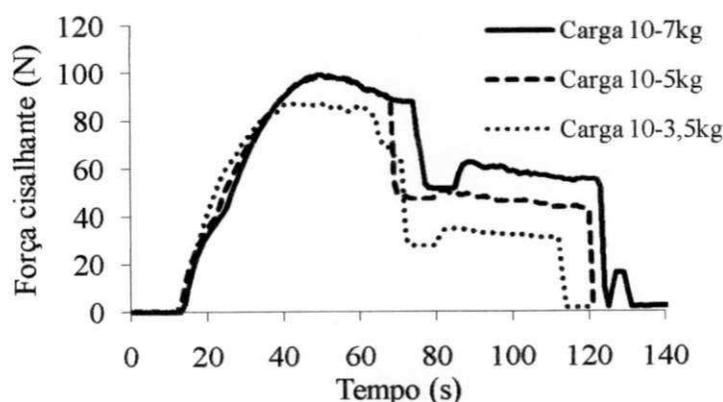


Figura 52. Ensaio de cisalhamento no aparelho de Jenike (pré-carga 10kg)

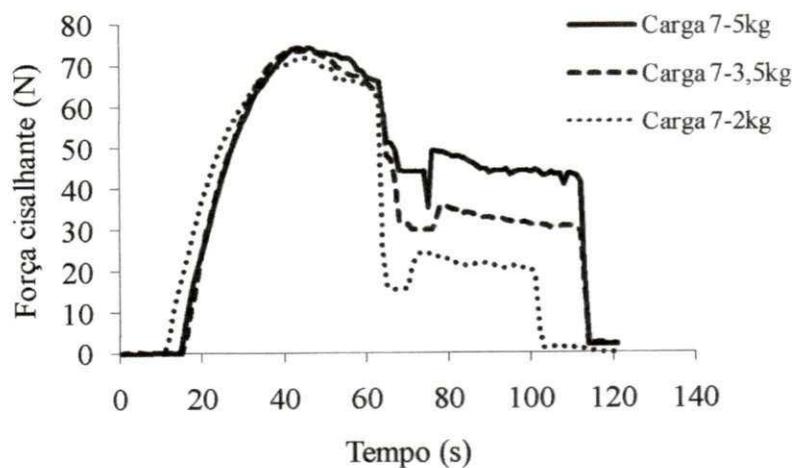


Figura 53. Ensaio de cisalhamento no aparelho de Jenike (pré-carga 7kg)

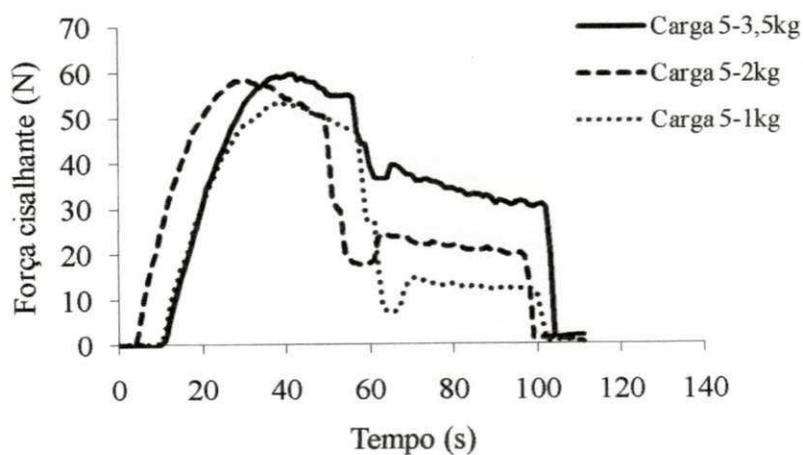


Figura 54. Ensaio de cisalhamento no aparelho de Jenike (pré-carga 5kg)

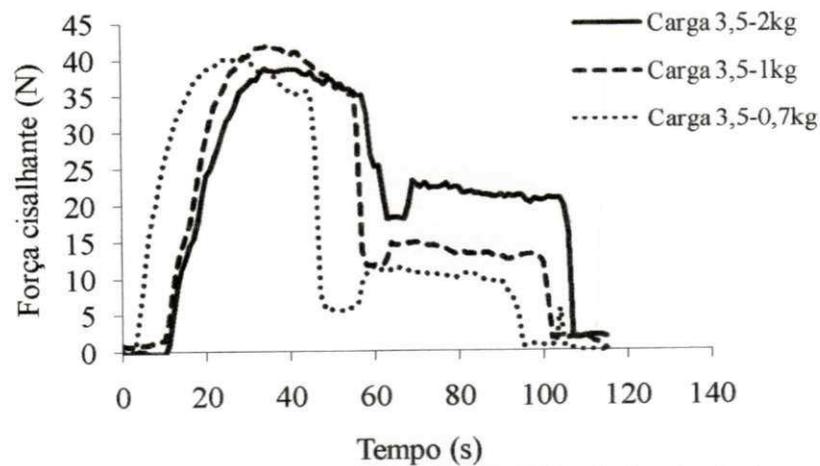


Figura 55. Ensaio de cisalhamento no aparelho de Jenike (pré-carga 3,5kg)

Para entender as propriedades de produtos armazenados, é necessário estudar o critério de resistência com algumas particularidades sobre o estado de tensão. Os produtos armazenados podem seguir o critério de ruptura ao deslizamento de Mohr-Coulomb, o qual assume a relação linear entre a tensão normal e a tensão de cisalhamento.

Segundo esse critério, admite-se que a ruptura ocorra localmente, uma vez que um valor-limite da tensão de cisalhamento seja atingido. Esse valor é influenciado pela tensão normal atuante no mesmo plano. A expressão matemática que exprime a condição da ruptura por deslizamento é:

$$|\tau| = f(\sigma) \quad \dots 58$$

$$f(\sigma) = C + \sigma \tan \emptyset \quad \dots 59$$

Onde C é a coesão e \emptyset é o ângulo de atrito interno.

Encontram-se na Tabela 13 os valores do ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e ângulo de atrito com a parede comparados aos preconizados por algumas normas internacionais juntamente com os valores de peso específico consolidado. Os valores expressos das propriedades de fluxo são referentes aos ensaios de cisalhamento instantâneo e de consolidação (12 e 24h), com exceção do ângulo de atrito com a parede uma vez que a bancada de consolidação não permitia a instalação da amostra de parede utilizada.

Tabela 13. Variações das principais propriedades de fluxo obtidas para a areia.

Estatística básica	Peso específico consolidado $\gamma - \text{kN/m}^3$		Ângulo de atrito interno $\emptyset - ^\circ$		Efetivo ângulo de atrito interno $\delta - ^\circ$		Ângulo de atrito com a parede $\emptyset_w - ^\circ$	
	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup
Areia	16,5	17,0	32,2°	39,5°	36,7°	40,9°	26,2°	27,3°
Média (α)	16,8		36,2°		39,3°		26,8°	
Desvio (s)	0,08		2,9		1,6		0,4	
CV (%)	0,5		8,3		4,0		1,7	
Consolidação (12h)								
Areia	16,4	17,2	36,3°	40,3°	38,9°	41,2°	*	
Média (α)	17,0		38,0°		40,0°			
Desvio (s)	0,08		1,4		0,8			
CV (%)	0,5		3,7		2,1			
Consolidação (24h)								

Areia	16,7	17,5	39,0°	41,6°	37,6°	41,3°	*	
Média (α)	17,4		40,5°		41,2°			
Desvio (s)	0,07		1,0		0,2			
CV (%)	0,4		2,5		5,3			
Normas								
AS 3774	15,0	17,0	**	**	35°	40°	30°	35°
Eurocode 1	14,0	16,0	33°	39,2°	**	**	26,2°	33,5°
DIN 1055		16,0	**	**	36°			21,8°
BMHB	14,0	17	**	**	33°	40°	21,8°	33,0°

Inf; Sup: correspondem aos limites inferiores e superiores das propriedades, respectivamente.

* Não ensaiado. ** Valores não informados pelas normas.

Dentre as variáveis instantâneas analisadas, a que apresenta menor grau de variação na frequência dos dados em relação ao seu valor médio é o peso específico consolidado ($s = 0,08$) seguido do ângulo de atrito com a parede ($s = 0,4$). No entanto, todas as quatro propriedades apresentam baixo índice de dispersão ($CV < 10\%$) o que representa elevada confiabilidade estatística nos dados obtidos. Quanto aos valores normatizados, observa-se grande consonância com os dados experimentais instantâneos o que confirma a credibilidade das propriedades descritas anteriormente.

Em relação aos tempos de consolidação, foi observado que os dois períodos de repouso das amostras na bancada de consolidação provocaram variação tanto nos valores de peso específico quanto no ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito, sendo a maior diferença igual a 11% registrada para \emptyset .

4.2 fator k

A relação entre a pressão horizontal e a vertical em qualquer ponto de uma massa granular é definida como a relação k , também conhecido como coeficiente de pressão lateral. Este é um importante parâmetro requerido no cálculo das pressões exercidas por produtos armazenados nas paredes e fundo do silo, pois define a porcentagem da distribuição das pressões em função da relação H/D_0 .

Várias recomendações de determinação direta e indireta do valor de k são realizadas por pesquisadores enquanto que as normas especializadas propõem valores empíricos e teóricos para este parâmetro e ainda recomendam a utilização de equipamentos especiais para sua medição.

Nesta pesquisa, uma das propostas foi determinar indiretamente o fator k através do critério de ruptura Coulomb-Mohr expresso por meio dos círculos de Mohr e analisar sua variabilidade frente às teorias de Rankine-Koenen (1895), Jaky (1948), Walker (1966), Hartmann (1966) *apud* Lohnes (1993), Frazer (1993), Aoki (1978) e Bischara et al. (1983).

Assim, na Tabela 14 encontram-se agrupados os valores encontrados pela aproximação do fator k para as três condições de ensaio (instantâneo e consolidação 12 e 24h) juntamente com os parâmetros estatísticos $\bar{\alpha}$, s e CV. Foi observada variação nos valores médios das três condições de ensaio enquanto que a maior distribuição das frequências dos dados foi encontrada para o ensaio instantâneo. No entanto, esta dispersão dos valores experimentais ainda é estatisticamente aceitável.

Tabela 14. Estatística básica do fator k para as condições de ensaio.

Estatística básica	Instantâneo		Consolidação 12h		Consolidação 24h	
	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup
Areia	0,28	0,34	0,29	0,33	0,3	0,35
Média ($\bar{\alpha}$)	0,31		0,32		0,33	
Desvio (s)	0,03		0,02		0,02	
CV (%)	9,8		6,1		5,5	

Inf; Sup: correspondem aos limites inferiores e superiores das propriedades, respectivamente.

A Figura 56 corresponde à variação da aproximação do fator k frente às teorias de especialistas. Pode-se observar que a teoria de Hartmann (1966) foi a única teoria que superestimou a aproximação obtida. Uma das explicações para esse acontecimento seria sua aplicabilidade apenas para silos com paredes tão rugosas ao ponto de permitirem que os grãos do produto armazenado deslizassem uns sobre os outros em lugar de deslizar sobre a parede da célula, como é o caso dos silos metálicos com perfis planos e corrugados.

Já a teoria de Rankine-Koenen (1895) resultou nos menores valores comparados aos de referência, fato esse explicado pela hipótese desta teoria se aplicar a ângulos de atrito produto-parede iguais a zero, enquanto que os mais próximos foram obtidos, seqüencialmente, para as teorias Jaky (1948), Frazer (1993), Aoki (1978) e Walker (1966).

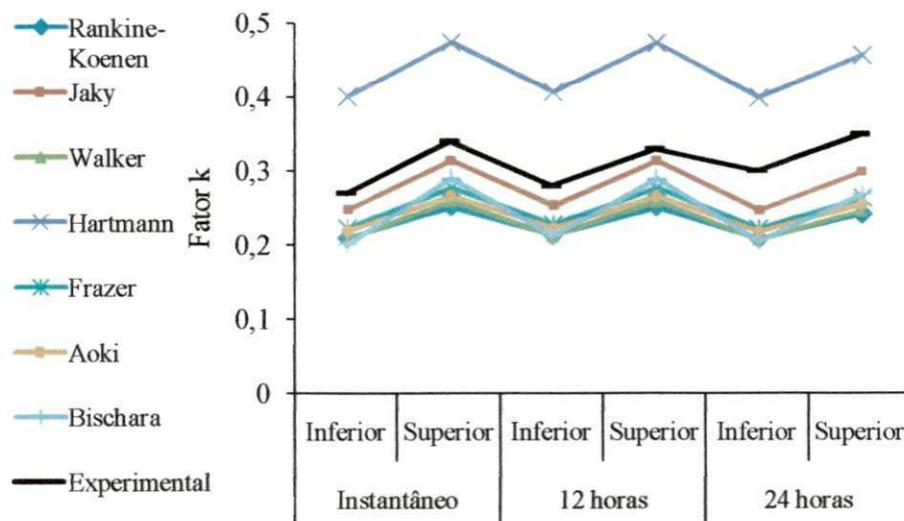


Figura 56. Variabilidade do fator k

Pela equação de Jaky (1948), os valores preconizados foram até 17% inferiores para ambos os limites (inferiores e superiores) e períodos de ensaio (instantâneo e consolidação), no entanto, foram os mais aproximados dentre todas as equações de previsão. Ao estudar um silo de paredes lisas usando grãos de soja, Cheung (2007) obteve através da formulação de Jaky (1948) valores mais próximos aos determinados experimentalmente. O uso desta teoria torna-se ainda mais indicada pelo fato de ser dependente apenas do ângulo efetivo de atrito interno e da grande dificuldade para determinação experimental do fator k . A teoria de Frazer (1993) foi obtida por meio da consideração do equilíbrio das forças no contorno (na superfície da parede) para o estado de ruptura incipiente, enquanto que a de Walker (1966) assume que o produto ensilado já se encontra em ruptura e, simultaneamente, deslizando ao longo de uma parede rugosa.

O fato da teoria de Jaky (1948) produzir valores mais próximos aos experimentais e basear-se na hipótese da existência de uma relação para o parâmetro k para o caso do produto em repouso (estado elástico) e parede lisa e rígida, o que é inverso nas teorias de Frazer (1993) e Walker (1966), reforça a idéia da existência de três estados de tensão associados ao fator k : estado ativo (k_a), estado passivo (k_p) e estado em repouso (k_o), conforme Figura 57.

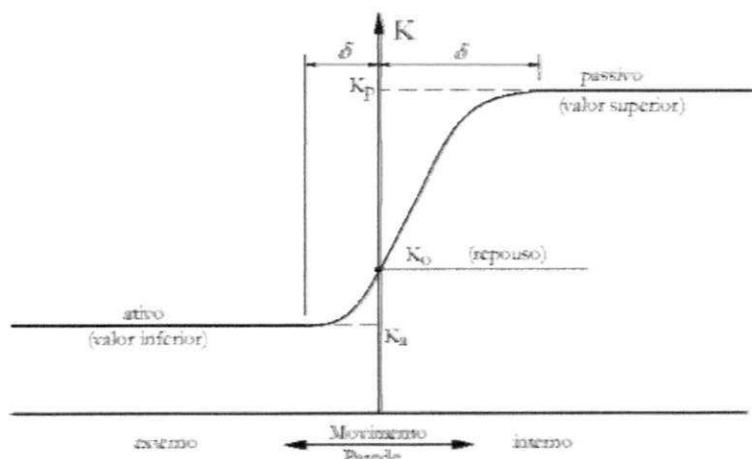


Figura 57. Comportamento do k em relação aos movimentos de contenção

Os dois primeiros estados resultam do movimento da parede, respectivamente, para fora e em direção ao produto armazenado, enquanto o terceiro aconteceria quando uma estrutura de retenção inflexível não permitisse a deformação lateral na periferia do produto.

Para a teoria de Bischara et al. (1983), os resultados não se comportaram de forma adequada subestimando, principalmente, os valores inferiores. Esta teoria foi obtida através de uma fórmula não linear do método dos elementos finitos na qual afirma que a relação entre pressões, k , é um parâmetro constante para um determinado tipo de silo e um dado produto. Ela propõe diferentes fórmulas para o parâmetro k em função da granulometria do produto.

Na maioria das teorias sobre as relações das pressões laterais, o fator k é determinado somente com o conhecimento do efetivo ângulo de atrito interno, sendo que, em algumas formulações, o ângulo de atrito com a parede é levado também em conta. Na maioria das recomendações existentes, pode ser visto que ainda há muita incerteza para o cálculo desse parâmetro.

Na Figura 58 são comparadas as variações do fator k com os valores preditos por algumas normas especializadas. Pode-se observar que os valores da aproximação encontram-se entre a faixa de variação das normas EUROCODE 1 (2006) e SNIBATI (1975) para as três condições de ensaio, enquanto que os resultados da DIN 1055 (1985) e EP 433 (2000) foram os maiores resultados encontrados superestimando os experimentais em cerca de 45%, em média.

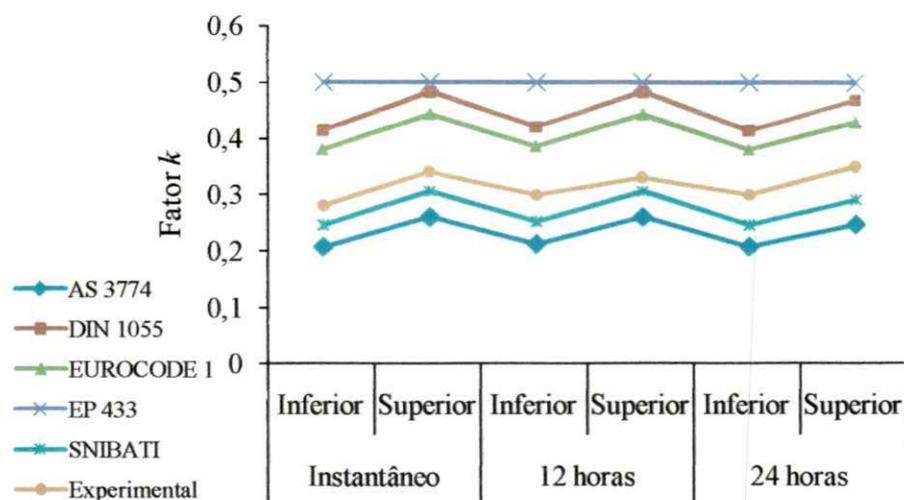


Figura 58. Variabilidade do fator k frente aos preconizados pelas normas

Para o cálculo das ações em silos pelo método dos Estados Limites onde se assume que as cargas devem ser majoradas com conseqüente diminuição da resistência, as normas ISO 11697 (1995) e EUROCODE 1 (2006) recomendam um método simplificado para determinação dos valores de k pela divisão/multiplicação do valor médio k_m por um fator de conversão a_k .

Na Tabela 15 encontram-se os fatores de conversão, a_k , encontrados para a areia nos três tempos analisados. Pode-se ressaltar que não houve variação observada entre os períodos de consolidação e o ensaio instantâneo uma vez que a proporcionalidade entre os limites e a média foi preservada. Quanto aos valores normalizados, observa-se concordância entre a faixa de variação obtida e as recomendadas, o que é desejável uma vez que as predições das ações em silos dependem, também, de uma correta obtenção do fator k .

Tabela 15. Fatores de conversão encontrados para a areia.

Aproximação			ISO 11697		AS 3774		EUROCODE 1
1h	12h	24h					
a_{km}	a_{km}	a_{km}	a_{kinf}	a_{ksup}	a_{kinf}	a_{ksup}	a_{km}
1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,09	1,13	1,1

a_{km} , a_{kinf} , a_{ksup} : coeficientes de conversão para k médio, inferior e superior, respectivamente.

Freitas (2001), ao ensaiar um silo-piloto de relação $H/D = 1,49$ de paredes corrugadas, obteve para a areia grossa um valor de k_m igual a 0,47, enquanto que o fator de conversão a_x situou-se entre 1,19 e 1,12 para os limites inferiores e superiores, respectivamente. Isso significa uma diferença máxima de 10% nos valores característicos entre as duas pesquisas e pode ser resultante tanto da variação entre os ângulos de atrito interno e efetivo, ângulos de atrito com a parede, granulometria da areia, bem como das condições específicas de cada ensaio.

4.3 Forças atuantes no silo-piloto

4.3.1 Considerações sobre o silo-piloto e seus ensaios

O silo-piloto utilizado foi um silo metálico cilíndrico de chapas rígidas construído com dimensões do corpo iguais a $H_c = 3\text{m}$ e $D_c = 1,24\text{m}$. Utilizou-se o modelo proposto por Horabik, Molenda e Ross, (1995) o qual permitiu a instrumentação do silo-piloto nas profundidades de 1 e 2m por três células de carga, previamente calibradas, distanciadas uma das outras por um ângulo de 120° . Isto proporcionou a coleta de dados de força de atrito absorvida pelas paredes durante cada ciclo de trabalho (carregamento, armazenagem e descarregamento) permitindo, após cada ciclo, a comparação dos dados a fim de se verificar a magnitude das forças e compreender sua distribuição ao longo de um mesmo perímetro.

O procedimento experimental deu-se através do carregamento concêntrico e excêntrico do silo com a ajuda de um elevador de canecas de baixa rotação. Após o carregamento, como relatado no item 3.5.4, aguardaram-se períodos de 1, 12 e 24h para, a partir de então, realizar o descarregamento.

Para o carregamento, procurou-se manter uma vazão mássica média de 25,4kg/min. Já para o descarregamento, os orifícios de 80 mm de diâmetro produziram uma vazão de descarga de, aproximadamente, 338,1kg/min quando aberto apenas um único orifício. Quando da utilização de qualquer combinação de descarga, a vazão média registrada foi de 639,2kg/min. Isso produziu uma velocidade de deslizamento da areia na parede do silo para um orifício e para as combinações de descarga de, aproximadamente, 17 e 30cm/min, respectivamente. Todos os descarregamentos foram executados com o silo-piloto nas duas relações H_c/D_c mencionadas anteriormente.

Na Tabela 16 observa-se que não existe perfeita concordância entre as diversas normas de silos no que se refere aos seus valores classificatórios de esbeltez para a relação H_c/D_c 1,6, podendo o silo-piloto ser classificado como esbelto, medianamente esbelto ou até mesmo baixo em função da norma adotada.

Tabela 16. Classificação do silo-piloto em função da relação H_c/D_c .

Relação H_c/D_c	AS 3774	Eurocode 1 ISO 11697	EP 433	DIN	BMHB	SNIBATI
0,8	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
1,6	Med. esbelto	Esbelto	Baixo	Med. esbelto	Esbelto	Baixo
2,4	Med. esbelto	Esbelto	Esbelto	Esbelto	Esbelto	Baixo

4.3.2 Forças de atrito nas paredes do silo

4.3.2.1 Carregamentos: concêntrico e excêntrico

A seguir, serão apresentados os dados obtidos durante o carregamento concêntrico e excêntrico para os dois anéis instrumentados. A Figura 59a representa o carregamento concêntrico obtido e o talude superior formado. Visualmente, o talude alcançou uma altura média de 0,35m. Esta altura do talude foi mantida, aproximadamente, constante em todos os carregamentos concêntricos de forma a permitir que o centro de massa do talude coincidissem com a profundidade $z = 0$ m.

Esse procedimento foi necessário uma vez que as normas adotadas para comparação dos resultados consideram que a profundidade efetiva do produto armazenado passe a ser contabilizada a partir do centro de massa do talude formado após o carregamento.

A excentricidade escolhida para o carregamento foi de 75% o que representa um afastamento do centro de massa do talude em relação ao eixo de simetria do silo de 75% do valor correspondente ao raio do silo (0,46m). Esta excentricidade foi escolhida por ser a maior excentricidade de carregamento comparada à maior excentricidade de descarregamento de 75% ensaiada.

A Figura 59b ilustra o talude formado no final do carregamento excêntrico do silo. Através de observações *in loco*, constatou-se que o talude de carregamento atingia a parede do silo nas profundidades 0,1 e 0,6m.

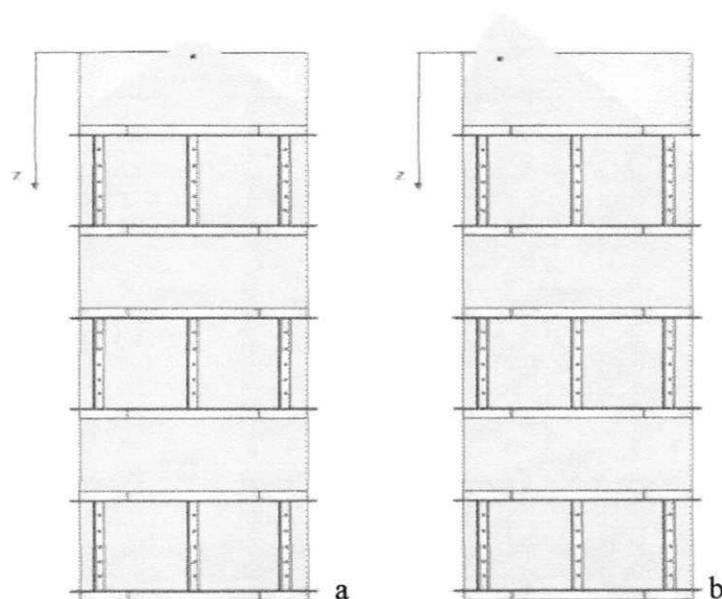


Figura 59. Representação dos carregamentos obtidos

4.3.2.2 Descarregamentos concêntrico e excêntricos. Tempo de armazenagem: 1h

A seguir é apresentada a análise estatística da força de atrito no silo no período de armazenagem de 1h para os fatores Carregamento (F1), Descarregamento (F2), Relação H_c/D_c (F3) e Células de carga (F4), bem como a interação entre os mesmos. O esquema fatorial adotado foi o $2 \times 7 \times 2 \times 3$, conforme metodologia descrita no capítulo Materiais e Métodos.

Na Tabela 17, a análise de variância demonstra que tanto separadamente quanto em conjunto, todos os fatores apresentam diferença ao nível de 1% de significância. Apesar da tendencialidade dos dados em função da especificidade de cada etapa do experimento, a realização da análise estatística foi necessária para uma comprovação científica destas diferenças.

Tabela 17. Análise de variância para o tempo de 1h de armazenagem.

F. V.	G. L.	S. Q.	Q. M.	F
Carregamento (F1)	1	2827184,6	2827184,6	3331,1 **
Descarregamento (F2)	6	4922300,7	820383,4	966,6 **
Relação H_c/D_c (F3)	1	314869104,6	314869104,6	370990,6 **
Célula (F4)	2	2171273,3	1085636,6	1279,1 **
Interação F1 x F2	6	2778685,2	463114,2	545,6 **
Interação F1 x F3	1	4307350,7	4307350,7	5075,1 **

Interação F1 x F4	2	23851,3	11925,6	14,0 **
Interação F2 x F3	6	2758565,2	459760,8	541,7 **
Interação F2 x F4	12	4292976,1	357748,0	421,5 **
Interação F3 x F4	2	32862,4	16431,2	19,4 **
Interação F1 x F2 x F3	6	5033954,2	838992,3	988,5 **
Interação F1 x F2 x F4	12	1480617,2	123384,7	145,3 **
Interação F1 x F3 x F4	2	381790,0	190895,0	224,9 **
Interação F2 x F3 x F4	12	344445,8	28703,8	33,8 **
Interação F1 x F2 x F3 x F4	12	554220,6	46185,0	54,4 **
Tratamentos	83	346779182,5	4178062,4	4922,7 **
Resíduo	252	213878,7	848,7	
Total	335	346993061,2		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

Na Tabela 18 encontra-se a análise da interação entre os fatores Carregamento e Descarregamento. Ponderando todas as descargas estudadas para o carregamento concêntrico, pode-se ressaltar que os maiores valores de força de atrito foram registrados para as descargas combinadas 50-50% e 75-75%. Esta evidência estatística de maior força de atrito para estas formas de descarga pode ser corroborada pela idéia de, no início de descarregamento do silo, ocorrer a formação simultânea de dois canais distintos de fluxo permitindo, desta forma, que uma maior quantidade possível de produto armazenado se movimente ao mesmo tempo (fluxo mais contínuo), não necessariamente ocorrendo o fluxo de massa durante todo o processo, conforme Figura 60.

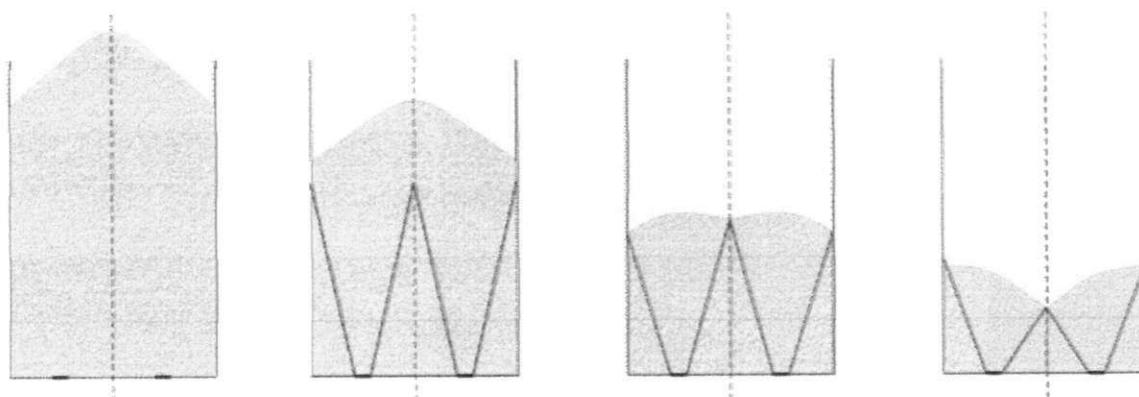


Figura 60. Representação dos canais de fluxo em descarga combinada

Entre as descargas com 50 e 75% de excentricidade, destaca-se a não existência de diferença estatisticamente significativa, uma vez que as duas descargas estão sinalizadas com a mesma letra maiúscula (letra F) e que os valores observados ainda foram inferiores aos obtidos para a descarga concêntrica (letra E).

Tabela 18. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Descarregamento (F2).

Carregamentos	Descarregamentos						
	0%	50%	75%	0-50%	0-75%	50-50%	75-75%
Concêntrico	1994,5 bE	1924,0 bF	1942,0 bF	2111,4 bD	2231,9 aC	2306,3 bB	2438,4 bA
Excêntrico	2432,7 aB	2307,2 aD	2291,1 aD	2131,8 aF	2218,5 aE	2369,3 aC	2482,1 aA

DMS para colunas = 16,5
Classificados com letras minúsculas

DMS para linhas = 24,9
Classificados com letras maiúsculas

Para os resultados de descarga obtidos a partir do carregamento excêntrico de 75%, o maior valor de força de atrito foi registrado para a descarga combinada 75-75%, seguido da descarga concêntrica e da combinada 50-50%, enquanto que, novamente, as descargas de 50 e 75% de excentricidade não apresentaram diferenças estatisticamente significantes (letra D). O fato dos maiores valores serem registrados, em geral, para as descargas combinadas 50-50% e 75-75% está embasado na teoria de que o fluxo formado no interior do silo durante o descarregamento se aproxima de um fluxo de massa já que dois canais de fluxo são formados simultaneamente com maior abrangência possível de produto armazenado.

Confrontando os dados de descarga obtidos a partir dos carregamentos concêntrico e excêntrico (75%), nota-se superioridade de valores para todas as descargas realizadas quando o silo é carregado excentricamente, com exceção da combinação 0-75%. Isto indica que em comparação a carregamentos concêntricos, as excentricidades de carga podem alterar significativamente as forças de atrito durante o esvaziamento do silo, independentemente da localização do orifício de saída do produto.

Na tabela seguinte, Tabela 19, encontra-se a análise estatística da interação Carregamento x Relação H_c/D_c , onde é possível perceber que o carregamento concêntrico produziu maiores forças de atrito para a relação H_c/D_c igual a 0,8 e menores para a relação 1,6 em comparação ao excêntrico. Pode ser que a desuniformidade na distribuição das cargas de atrito durante o carregamento excêntrico aliada a maior altura de parede tenha ocasionado uma compensação das forças na média

final, o que não ocorreria de forma expressiva para a menor parede. Isso viria a explicar a inversão de comportamento entre as duas relações H_c/D_c para os dois tipos de carregamento.

Tabela 19. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Relação H_c/D_c (F3).

Carregamentos	Relação H_c/D_c	
	$H_c/D_c = 0,8$	$H_c/D_c = 1,6$
Concêntrico	1280,7 aB	2990,3 bA
Excêntrico	1237,7 bB	3400,3 aA
DMS para colunas = 8,8 Classificados com letras minúsculas		DMS para linhas = 8,8 Classificados com letras maiúsculas

Na Tabela 20, encontram-se os valores da interação Carregamento e Célula de carga. Pode-se observar que, independentemente da forma de carregamento, todos os maiores valores de força de atrito foram registrados para a célula n.2 seguida das células n.3 e n.1 sendo esse desequilíbrio estatisticamente significativo (letras maiúsculas diferentes para as duas formas de carregamento).

Tabela 20. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Células de carga (F4).

Carregamentos	Células de carga		
	n.1	n.2	n.3
Concêntrico	2016,5 bC	2219,2 bA	2170,9 bB
Excêntrico	2220,8 aC	2402,2 aA	2333,9 aB
DMS para colunas = 10,8 Classificação com letras minúsculas		DMS para linhas = 12,9 Classificação com letras maiúsculas	

O fato da célula n.2 ser a mais solicitada durante os ensaios está relacionado ao seu posicionamento na mesma linha dos orifícios de descarga. Com isso, a área de abrangência desta célula estaria sempre inserida na área de atrito mais intenso do produto com a parede do silo durante as descargas, o que provocaria uma coleta de dados com magnitude superior aos das outras duas células.

Em comparação às duas formas de carregamento do silo, pode-se notar que a forma excêntrica produziu forças de atrito nas paredes superiores a concêntrica durante os descarregamentos. Isso indica que o desequilíbrio das forças ao longo de um mesmo perímetro provocado pela excentricidade de carga pode ser substancialmente mais perigoso para a integridade estrutural de um

silos que o desequilíbrio de uma carga concêntrica, uma vez que esta forma de carga pode conduzir a maiores intensidades de força nas paredes.

Na próxima tabela, Tabela 21, encontram-se os valores médios da análise da interação Descarregamento e Relação H_c/D_c estudada. Para a relação H_c/D_c 0,8, a análise estatística demonstra não haver diferença significativa entre as formas de descarga concêntrica e combinada 75-75% e entre a combinação 50-50% e 75-75%. Para estas três condições de descarga também foram registrados os maiores valores. Já para a relação H_c/D_c 1,6, os maiores resultados foram obtidos decrescentemente quando o silo era descarregado pelas combinações 75-75%, 50-50%, 0-75% e 0-50% a uma taxa de 6,4, 2,5 e 4,5%, respectivamente.

Tabela 21. Média de interação entre os fatores Descarregamento (F2) e Relação H_c/D_c (F3).

Descarregamentos	Relação H_c/D_c	
	$H_c/D_c = 0,8$	$H_c/D_c = 1,6$
Descarga 0%	1368,5 aB	3058,7 eA
Descarga 50%	1196,3 dB	3035,0 eA
Descarga 75%	1256,30 cB	2976,9 fA
Descarga 0-50%	1128,80 eB	3114,5 dA
Descarga 0-75%	1188,5 dB	3261,9 cA
Descarga 50-50%	1330,6 bB	3345,0 bA
Descarga 75-75%	1345,5 abB	3575,0 aA

DMS para colunas = 24,9
Classificação com letras minúsculas

DMS para linhas = 16,5
Classificação com letras maiúsculas

Esse resultado reforça a tese de que descargas combinadas tendem a produzir forças de atrito nas paredes superiores àquelas oriundas de descargas por um único orifício em razão da ação simultânea de dois canais de fluxo. Quanto aos dados dos anéis para uma mesma descarga, os resultados coletados para o anel II foram, previsivelmente, superiores aos do anel I em função da sua maior área de contato (Figura 61).

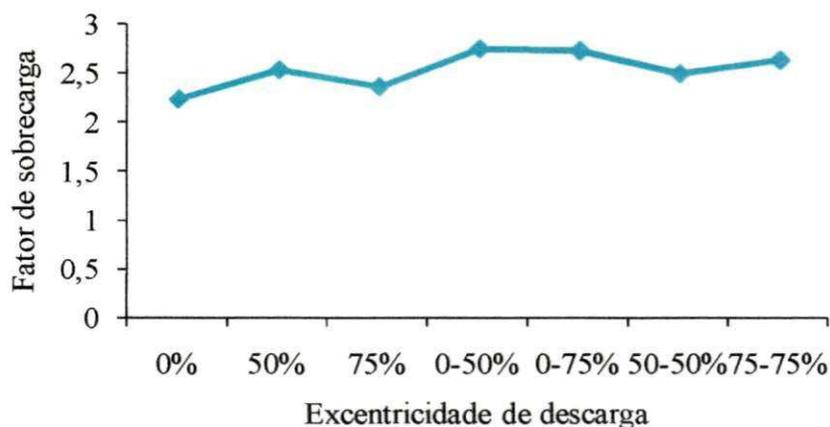


Figura 61. Aumento de carga entre os anéis do silo

No entanto, apesar do anel II propiciar uma área de atrito 2 vezes maior que o anel I, no caso da armazenagem de produtos sólidos em silo, esta razão geométrica não segue um padrão linear (pressão/força hidrostática) já que, de acordo com a equação de pressões de Janssen (1895), sua distribuição se dá na forma exponencial, conforme Figura 62.

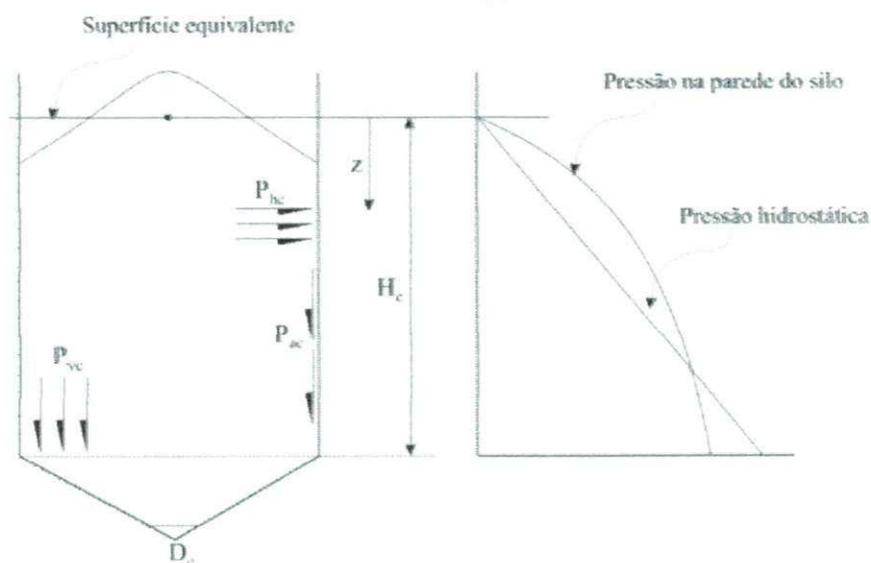


Figura 62. Distribuição exponencial das cargas nas paredes dos silos

Para a Tabela 22, é importante destacar que apesar de serem registradas algumas das maiores intensidades de força de atrito para as descargas combinadas 50-50% e 75-75%, estas forças se apresentaram com maior igualdade de distribuição entre as células (mesma letra maiúscula nas linhas). Isso indica que a desuniformidade na distribuição das forças causadas pelo carregamento ou descarregamento excêntricos foram minimizados através do acionamento simultâneo de dois

orifícios de descarga. Isto, de certa forma, melhorou sua distribuição, contudo, aumentou de 5 a 17% a média final das forças para estas condições de descarga em virtude de uma maior quantidade de produto em movimento, conforme Figura 63.

Tabela 22. Média de interação entre os fatores Descarregamento (F2) e Células de carga (F4).

Descarregamentos	Células de carga		
	n.1	n.2	n.3
Descarga 0%	2299,1 bA	2025,3 fB	2316,5 bA
Descarga 50%	1919,8 eC	2306,2 dA	2121,0 eB
Descarga 75%	1850,4 fC	2426,1 bA	2073,3 fB
Descarga 0-50%	1976,2 dB	2192,2 eA	2196,5 dA
Descarga 0-75%	2011,7 cC	2380,0 cA	2283,9 cB
Descarga 50-50%	2308,6 bB	2362,1 cA	2342,6 bA
Descarga 75-75%	2464,7 aA	2482,9 aA	2433,1 aB

DMS para columnas = 30,5
Classificação com letras minúsculas

DMS para linhas = 24,2
Classificação com letras maiúsculas

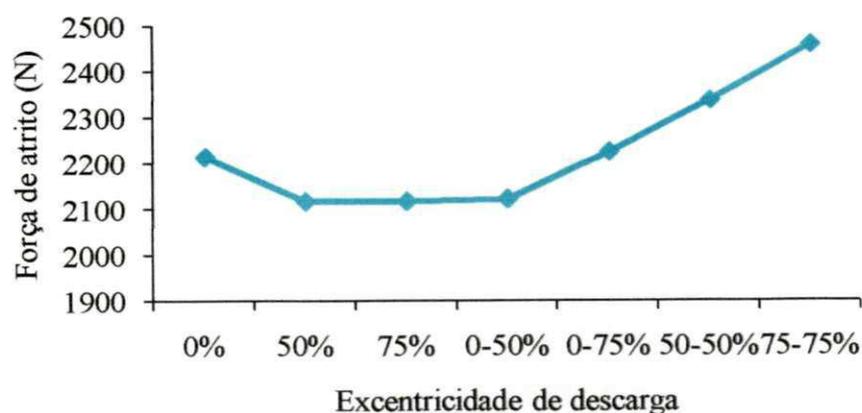


Figura 63. Média das forças nas células de carga para os descarregamentos

Outra condição de descarga que alcançou elevados valores de força de atrito, mas baixa irregularidade de distribuição entre as células foi a descarga concêntrica. Como o orifício era central, supõe-se que a geometria do fluxo se manteve praticamente estável durante todo o processo de descarga influenciando, assim, sua distribuição e intensidade.

Na Tabela 23, relacionam-se as médias das interações entre os fatores Relação H_c/D_c e Células de carga. Observa-se que os maiores valores serem registrados em ordem decrescente para as células n.2, n.3 e n.1, bem como as maiores forças de atrito serem registradas para o Anel II (H_c/D_c igual a 1,6) por ser o anel com maior comprimento vertical de parede (letra minúscula “a”). O coeficiente de variação (CV) obtido estatisticamente para os dados após 1h de armazenagem do produto no silo foi igual a $CV\% = 1,3$, o que representa elevada confiabilidade.

Tabela 23. Média de interação entre os fatores Relação H_c/D_c (F3) e Células de carga (F4).

Relação H_c/D_c	Células de carga		
	n.1	n.2	n.3
$H_c/D_c = 0,8$	1140,3 bC	1355,9 bA	1281,4 bB
$H_c/D_c = 1,6$	3097,0 aC	3265,4 aA	3223,5 aB
DMS para colunas = 10,8 Classificação com letras minúsculas		DMS para linhas = 12,9 Classificação com letras maiúsculas	

4.3.2.3 Descarregamentos concêntrico e excêntricos. Tempo de armazenagem: 12h

A seguir, serão apresentados os resultados de força de atrito registrados nas células instaladas nos anéis I e II durante as fases de carregamento e descarregamento após o produto ter permanecido no silo por um período de 12h. Objetivou-se investigar se o período de armazenagem interferiu na distribuição e intensidade das forças durante o descarregamento.

A análise estatística da força de atrito no silo no período de armazenagem de 12h seguiu o esquema fatorial $2 \times 4 \times 2 \times 3$, sendo dois tipos de carregamento (F1), quatro opções de descarga (F2), duas relações H_c/D_c (F3) e três sensores (F4).

Na Tabela 24 encontra-se a análise de variância dos fatores estudados e suas interações onde pode-se notar que, tanto para os quatro fatores envolvidos quanto suas interações, existe diferença estatística significativa a 1%. Isto representa um elevado grau de influência de um fator sobre os demais e o quanto esta ação interfere na composição das forças atuantes em estruturas de armazenagem de produtos sólidos.

Tabela 24. Análise de variância para o tempo de 12h de armazenagem.

F. V.	G. L.	S. Q.	Q. M.	F
Carregamento (F1)	1	2606338,0	2606338,0	1544,9 **
Descarregamento (F2)	3	3465563,3	1155187,7	684,7 **
Relação H ₀ /D ₀ (F3)	1	174574408,3	174574408,3	103484,7 **
Célula (F4)	2	240523,4	120261,7	71,3 **
Interação F1xF2	3	1506171,3	502057,1	297,6 **
Interação F1xF3	1	2347463,0	2347463,0	1391,5 **
Interação F1xF4	2	163384,1	81692,0	48,4 **
Interação F2xF3	3	2533942,9	844647,6	500,7 **
Interação F2xF4	6	2897147,4	482857,9	286,2 **
Interação F3xF4	2	45974,0	22987,0	13,6 **
Interação F1xF2xF3	3	1791168,7	597056,2	353,9 **
Interação F1xF2xF4	6	1115431,8	185905,3	110,2 **
Interação F1xF3xF4	2	347542,2	173771,1	103,0 **
Interação F2xF3xF4	6	194640,1	32440,0	19,2 **
Interação F1xF2xF3xF4	6	332057,6	55342,9	32,8 **
Tratamentos	47	194161756,6	4131101,2	2448,8 **
Resíduo	144	242922,0	1686,2	
Total	191	194404678,6		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

Na Tabela 25 encontram-se as médias obtidas para a interação Carregamento e Descarregamento. Para esta etapa, optou-se por realizar o esvaziamento do silo nas formas concêntrica, excêntrica a 75% e através das combinações 50-50% e 75-75%. As duas primeiras formas de descarga foram escolhidas por serem as que forneceram as maiores e menores forças de atrito dentre as descargas por um único orifício para o período de 1h de armazenagem, enquanto que as duas restantes foram as que mais solicitaram as paredes do silo dentre todas as combinações de descarga testadas.

Pode-se observar que as maiores e menores médias de força de atrito foram registradas para o descarregamento combinado 75-75% e excêntrico a 75%, respectivamente, independentemente da

forma o qual o silo era carregado. Já para o fator carregamento, observa-se que os maiores valores surgiram durante as descargas executadas a partir de um carregamento excêntrico. Vale ressaltar que a descarga excêntrica a 75% ocorrida a partir de um carregamento concêntrico foi a forma de descarregamento que produziu o menor valor de força de atrito dentre todas as analisadas, sendo sua diferença para a combinada de até 26%. Já para o carregamento excêntrico, esse descompasso foi de apenas 8%.

Tabela 25 Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Descarregamento (F2).

Carregamentos	Descarregamentos			
	0%	75%	50-50%	75-75%
Concêntrico	1971,2 bC	1934,3 bD	2315,8 bB	2435,9 bA
Excêntrico	2424,7 aB	2294,9 aD	2379,2 aC	2490,5 aA

DMS para colunas = 23,4
Classificados com letras minúsculas

DMS para colunas = 30,8
Classificados com letras maiúsculas

A dispersão destes valores entre os dois carregamentos para a mesma forma a qual o silo foi esvaziado pode residir no tipo de carregamento. Como um dos objetivos era investigar sobre quais condições ocorreriam as maiores e menores forças de atrito nas paredes do silo, optou-se por realizar seu carregamento excêntrico no ponto diametralmente oposto ao qual ele seria descarregado (Figura 64).

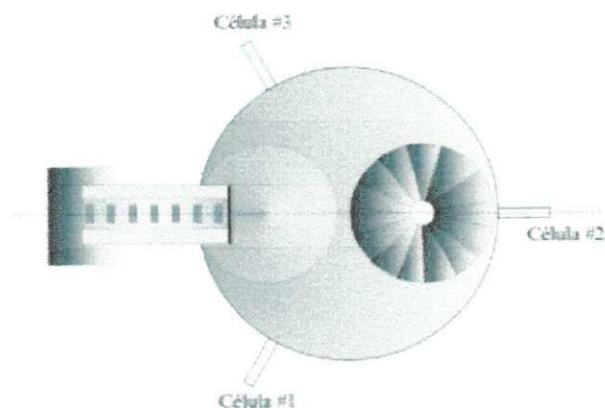


Figura 64. Configuração do carregamento excêntrico

Assim, durante o carregamento, a parte da parede diametralmente oposta ao orifício de descarga era mais solicitada enquanto que, durante o descarregamento, ocorria um redirecionamento das cargas para a parede próxima ao ponto de descarga devido ao movimento mais intenso da massa armazenada naquele local. Isso teria ocasionado maiores médias de forças de atrito para o

carregamento excêntrico reduzindo, portanto, a diferença entre as duas descargas, fato este não ocorrido no carregamento concêntrico. Na Tabela 26 pode-se notar os maiores valores para a relação H_c/D_c igual a 1,6 em função da maior área disponível para o atrito, independentemente da forma de carregamento, sendo a diferença entre os anéis de 25 e 50% para o carregamento concêntrico e excêntrico, respectivamente.

Tabela 26. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Relação H_c/D_c (F3).

Carregamentos	Relação H_c/D_c	
	$H_c/D_c = 0,8$	$H_c/D_c = 1,6$
Concêntrico	1321,3 aB	3007,3 bA
Excêntrico	1333,2 aB	3361,4 aA
DMS para colunas = 16,5 Classificados com letras minúsculas		DMS para linhas = 16,5 Classificados com letras maiúsculas

Na Tabela 27 constam as médias da interação Carregamento e Células de carga. Diferentemente do ocorrido durante as descargas para uma armazenagem de 1h onde a célula n.2 foi a que obteve maiores registros de força de atrito nos dois carregamentos, para o período de 12h, o período de 12h de armazenagem ocasionou maior solicitação da célula de n.3 durante as descargas a partir de uma carga excêntrica. Entretanto, estatisticamente, os valores encontrados na presente tabela não demonstram diferença significativa entre as células n.3 e n.2 e entre as células n.2 e n.1.

Isto indica que, apesar de maiores cargas de atrito nas paredes, as descargas precedidas de um carregamento excêntrico produziram uma distribuição de forças mais uniforme do que aquelas oriundas de um carregamento concêntrico pelo fato de ocorrer um melhor equilíbrio na média entre as cargas de carregamento e descarregamento devido a diferença entre o ponto de enchimento e esvaziamento do silo. Numericamente, a diferença entre as células para o carregamento excêntrico foi inferiores a 1%, enquanto que para o concêntrico, esta diferença chegou a 8%, aproximadamente.

Tabela 27. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Células de carga (F4).

Carregamentos	Células de carga		
	n.1	n.2	n.3
Concêntrico	2078,8 bC	2232,8 bA	2181,3 bB
Excêntrico	2385,0 aB	2396,2 aAB	2410,8 aA

DMS para colunas = 20,3
Classificação com letras minúsculas

DMS para linhas = 24,3
Classificação com letras maiúsculas

Na Tabela 28 pode-se notar que as descargas combinadas 50-50% e 75-75% foram as mais severas para a parede do silo tanto para relação H_c/D_c igual a 0,8 quanto para 1,6, seguidas da descarga concêntrica. Na Tabela 29 são apresentadas as médias entre a interação Descarregamento e Célula de carga onde é importante destacar que a melhor distribuição e maiores intensidades de força de atrito foi obtida para a combinação 75-75%.

Tabela 28. Média de interação entre os fatores Descarregamento (F2) e Relação H_c/D_c (F3).

Descarregamentos	Relação H_c/D_c	
	$H_c/D_c = 0,8$	$H_c/D_c = 1,6$
Descarga 0%	1356,6 aB	3039,3 cA
Descarga 75%	1264,0 bB	2965,3 dA
Descarga 50-50%	1343,4 aB	3351,6 bA
Descarga 75-75%	1345,2 aB	3581,3 aA

DMS para colunas = 30,8
Classificação com letras minúsculas

DMS para linhas = 23,4
Classificação com letras maiúsculas

Tabela 29. Média de interação entre os fatores Descarregamento (F2) e Células de carga (F4).

Descarregamentos	Células de carga		
	n.1	n.2	n.3
Descarga 0%	2273,7 cB	2005,3 cC	2314,7 cA
Descarga 75%	1872,25dC	2391,1 bA	2080,5 dB
Descarga 50-50%	2314,3 bB	2374,1 bA	2353,9 bA
Descarga 75-75%	2467,3 aAB	2487,2 aA	2435,1 aB

DMS para colunas = 37,7
Classificação com letras minúsculas

DMS para linhas = 34,4
Classificação com letras maiúsculas

Para segunda combinação, ainda na Tabela 29, a não existência de diferença significativa entre as células n.2 e n.3 demonstra melhor uniformidade de distribuição, o que só reforça a idéia de que dois canais de fluxo simultâneos tendem a provocar um fluxo mais estável e simétrico culminando

em redução na variação das forças durante o descarregamento. Entretanto, isso resultou em um aumento de até 17% das duas combinações em relação à descarga de 75%, conforme Figura 65.

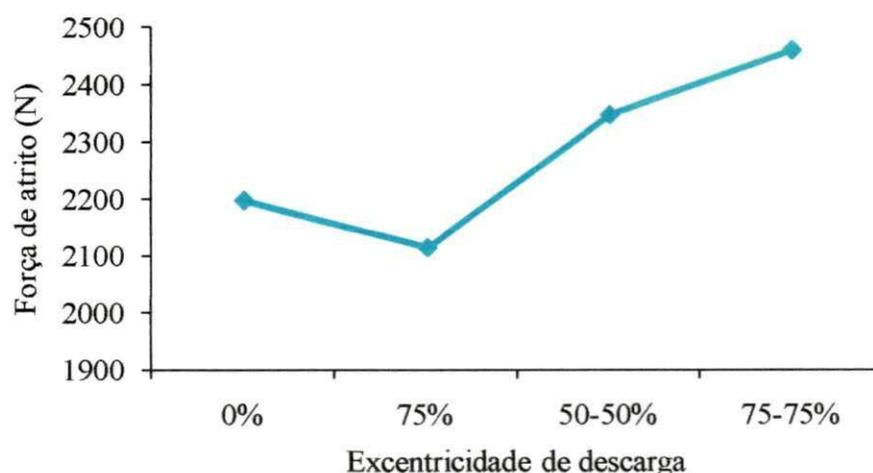


Figura 65. Média das células de carga para os descarregamentos

Contudo, a idéia de que canais simultâneos de fluxo auxiliam na obtenção de forças mais equilibradas em torno de um mesmo perímetro carece de maiores estudos, principalmente no que se refere ao modelo de fluxo e suas possíveis variações produzidas durante este tipo de descarga.

Na Tabela 30 encontram-se as médias da interação Relação H_c/D_c e Células de carga. Para H_c/D_c 1,6, nota-se que as células n.2 e n.3 obtiveram valores estatisticamente iguais enquanto que, para H_c/D_c 0,8, a distribuição foi, estatisticamente, menos uniforme já que todas as células obtiveram letras maiúsculas diferentes.

Como esperado, a relação H_c/D_c igual a 1,6 foi a que gerou maiores forças de atrito devido ao maior comprimento vertical de parede. Em média, as forças aplicadas ao anel II foram 2,4 vezes maiores que aquelas absorvidas pelo anel I.

Tabela 30. Média de interação entre os fatores Relação H_c/D_c (F3) e Células de carga (F4).

Relação H_c/D_c	Células de carga		
	n.1	n.2	n.3
$H_c/D_c = 0,8$	1266,4 bC	1382,8 bA	1332,5 bB
$H_c/D_c = 1,6$	3197,37aB	3246,1 aA	3259,5 aA
DMS para colunas = 20,2 Classificação com letras minúsculas		DMS para linhas = 24,3 Classificação com letras maiúsculas	

O coeficiente de variação (CV) obtido estatisticamente para os dados após 12h de armazenagem do produto no silo foi igual a $CV\% = 1,8$, o que representa elevada confiabilidade estatística.

4.3.2.3 Descarregamentos concêntrico e excêntricos. Tempo de armazenagem: 24h

Nesta etapa, a análise estatística da força de atrito no silo seguiu o esquema fatorial $2 \times 4 \times 2 \times 3$, sendo dois tipos de carregamento (F1), quatro opções de descarga (F2), duas relações H_c/D_c (F3) e três sensores (F4).

Para esta etapa da pesquisa, o silo-piloto foi carregado com areia seca e descarregado após um período de estocagem de 24h. Acredita-se que, em função do tempo de armazenagem, variações nas propriedades de fluxo dos produtos sólidos como peso específico e ângulos de atrito possam ocorrer e vir a interferir de maneira significativa nas ações exercidas pelo produto na estrutura.

Estas variações seriam causadas pela ação de acomodação de camadas do produto armazenado vindo a compactar as camadas mais inferiores e ocasionar, em casos extremos, interferências no processo de descarga.

Na Tabela 31 pode-se encontrar a análise de variância dos fatores analisados para um período de armazenagem em questão. Semelhante ao ocorrido para os dois primeiros períodos de armazenagem, foi observada diferença estatística para todos os fatores estudados, bem como para as interações entre si o que demonstra que o período de permanência do produto no interior do silo não interferiu na significância dos fatores e nem na influência de um sobre o outro.

Tabela 31. Análise de variância para o tempo de 24h de armazenagem.

F. V.	G. L.	S. Q.	Q. M.	F
Carregamento (F1)	1	2794881,3	2794881,3	3385,8 **
Descarregamento (F2)	3	3408749,6	1136249,8	1376,5 **
Relação H_c/D_c (F3)	1	173597445,2	173597445,2	210304,7 **
Célula (F4)	2	157994,5	78997,2	95,7013 **
Interação F1xF2	3	1380706,6	460235,5	557,5527 **
Interação F1xF3	1	2124577,1	2124577,1	2573,8 **
Interação F1xF4	2	194417,1	97208,5	117,7 **
Interação F2xF3	3	2796233,1	932077,7	1129,1 **

Interação F2xF4	6	2617383,6	436230,6	528,4 **
Interação F3xF4	2	56413,1	28206,5	34,1 **
Interação F1xF2xF3	3	1665483,9	555161,3	672,5 **
Interação F1xF2xF4	6	985911,3	164318,5	199,0 **
Interação F1xF3xF4	2	336010,7	168005,3	203,5 **
Interação F2xF3xF4	6	214614,0	35769,0	43,3 **
Interação F1xF2xF3xF4	6	383407,7	63901,2	77,4 **
Tratamentos	47	192714229,4	4100302,7	4967,3 **
Resíduo	144	118865,7	825,4	
Total	191	192833095,2		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

Semelhante ao ocorrido anteriormente, observa-se na Tabela 32 que a descarga 75-75% foi a que produziu as maiores forças de atrito sendo seguida da alternância entre as descargas 50-50% e concêntrica.

Novamente, os menores resultados foram obtidos para a descarga com 75% de excentricidade, independentemente da forma de carregamento. Entretanto, ao analisar os valores para esta descarga, pode-se perceber que, numericamente, as forças de atrito para a descarga de 75% a partir de um carregamento concêntrico são cerca de 20% inferiores que quando de um carregamento excêntrico. Essa informação fortalece a tese de que as forças exercidas pelo produto armazenado são influenciadas tanto pelo método de carregamento quanto de descarregamento.

Tabela 32. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Descarregamento (F2).

Carregamentos	Descarregamentos			
	0%	75%	50-50%	75-75%
Concêntrico	1998,7 bC	1963,0 bD	2331,0 bB	2459,0 bA
Excêntrico	2441,9 aB	2338,2 aD	2406,4 aC	2530,5 aA
DMS para colunas = 16,4		DMS para colunas = 21,5		
Classificados com letras minúsculas		Classificados com letras maiúsculas		

Comparando os valores desta tabela com os constantes na Tabela 20 (1h), observa-se que a diferença registrada flutuou entre 1,5 e 2% para as duas formas de carregamento e nas quatro descargas analisadas o que reflete uma não influência do fator Tempo na intensidade das forças na parede do silo quando carregado com areia seca.

Na Tabela 33, observa-se diferença significativa no que se refere às forças desenvolvidas por atrito entre as duas formas de carregamento para os anéis I e II (letras minúsculas diferentes), mesmo sendo a diferença, numericamente, de 2 e 15%, respectivamente. O coeficiente de variação para esta etapa da pesquisa foi calculado em 1,2%, o que representa elevado grau de confiança e repetitividade nos dados e ainda justifica o fato da pequena diferença numérica de 2% ainda assim ser considerada estatisticamente significativa.

Tabela 33. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Relação H_c/D_c (F3).

Carregamentos	Relação H_c/D_c	
	$H_c/D_c = 0,8$	$H_c/D_c = 1,6$
Concêntrico	1342,2 bB	3033,6 bA
Excêntrico	1373,2 aB	3485,3 aA
DMS para colunas = 11,5 Classificados com letras minúsculas		DMS para linhas = 11,5 Classificados com letras maiúsculas

Nas Tabelas 34 e 35 encontram-se os dados referentes às forças de atrito em função do tipo de carregamento e do tipo de descarga realizado. Não são observadas alterações na forma como as forças são distribuídas em comparação às duas outras etapas da pesquisa, com predominância das maiores intensidades para o carregamento excêntrico e para as descargas combinadas 75-75% e 50-50%.

Tabela 34. Média de interação entre os fatores Carregamento (F1) e Células de carga (F4).

Carregamentos	Células de carga		
	n.1	n.2	n.3
Concêntrico	2108,5 bC	2253,4 bA	2201,9 bB
Excêntrico	2429,5 aAB	2418,8 aB	2439,4 aA
DMS para colunas = 14,1 Classificação com letras minúsculas		DMS para linhas = 17,0 Classificação com letras maiúsculas	

Tabela 35. Média de interação entre os fatores Descarregamento (F2) e Relação H_c/D_c (F3).

Descarregamentos	Relação H_c/D_c	
	$H_c/D_c = 0,8$	$H_c/D_c = 1,6$
Descarga 0%	1381,3 aB	3059,3 cA
Descarga 75%	1312,9 bB	2988,3 dA

Descarga 50-50%	1367,0 aB	3370,4 bA
Descarga 75-75%	1369,7 aB	3619,8 aA

DMS para columnas = 21,5
Classificação com letras minúsculas

DMS para linhas = 16,3
Classificação com letras maiúsculas

Analisando-se as forças em função do tempo de armazenagem, pode-se perceber que o maior incremento de carga de atrito foi de apenas 4,5% para a descarga com 75% de excentricidade para a relação H_c/D_c 0,8. Para as demais descargas no mesmo anel, a diferença não ultrapassou 2,4%. Para a relação H_c/D_c 1,6, o acréscimo de força de atrito em função do tempo foi ainda menor não ultrapassando 1,2%, independentemente do tipo de descarregamento.

Nas Tabelas 36 e 37 nota-se que o comportamento das forças nas paredes do silo se difere aos obtidos anteriormente (1 e 12h de armazenagem) no que diz respeito à sua distribuição (maiores forças para a célula n.2 nas descargas combinadas). Vale ressaltar que os valores obtidos nesta etapa são, em geral, 1% superiores aos obtidos na etapa inicial da pesquisa o que indica que o tempo de armazenagem pouco influenciou na distribuição das cargas nas paredes bem como em suas intensidades.

Tabela 36. Média de interação entre os fatores Descarregamento (F2) e Células de carga (F4).

Descarregamentos	Células de carga		
	n.1	n.2	n.3
Descarga 0%	2302,3 cB	2025,0 cC	2333,6 cA
Descarga 75%	1936,5 dC	2407,0 bA	2108,4 dB
Descarga 50-50%	2341,8 bB	2399,8 bA	2364,4 bB
Descarga 75-75%	2495,5 aAB	2512,6 aA	2476,1 aB

DMS para columnas = 26,4
Classificação com letras minúsculas

DMS para linhas = 24,0
Classificação com letras maiúsculas

Tabela 37. Média de interação entre os fatores Relação H_c/D_c (F3) e Células de carga (F4).

Relação H_c/D_c	Células de carga		
	n.1	n.2	n.3
$H_c/D_c = 0,8$	1301,5 bC	1408,8 bA	1362,7 bB
$H_c/D_c = 1,6$	3236,5 aB	3263,4 aA	3278,5 aA

DMS para colunas = 14,2
Classificação com letras minúsculas

DMS para linhas = 17,0
Classificação com letras maiúsculas

4.3.2.3 Comparativo entre as forças de atrito teóricas e experimentais

A seguir, são apresentados os valores médios de força de atrito nas paredes do silo correspondentes ao anel I (profundidade de 1 m), anel II (profundidade de 2 m) e o somatório dos dois anéis (profundidade de 3 m). Como parâmetros de comparação são apresentados, também, dados teóricos de força de atrito obtidos pelas normas internacionais Eurocode 1 (2006), ISO 11697 (1995), AS 3774 (1996) e DIN 1055 (1987).

Nas Figuras 66 e 67 encontram-se os dados teóricos e experimentais para o carregamento concêntrico e excêntrico, respectivamente. Pode-se notar na Figura 66 que os valores teóricos tendem a superestimar os dados experimentais à medida que a profundidade do silo aumenta, sobretudo as normas Eurocode 1 (2006), ISO 11697 (1995) e DIN 1055 (1987). Para a profundidade de 2 m, com exceção da norma AS 3774 (1996), todas as outras normas produziram valores compatíveis aos experimentais. Já para a maior profundidade (3 m), todas as normas se adequaram aos valores reais, sobretudo a AS 3774 (1996) como uma diferença mínima de 14%.

Na Figura 67 nota-se que, basicamente, as normas apenas se adequaram à maior profundidade de 3 m, enquanto que os valores de força de atrito para a profundidade intermediária e inicial (2 e 1 m) foram 15 e 64% superiores aos normatizados.

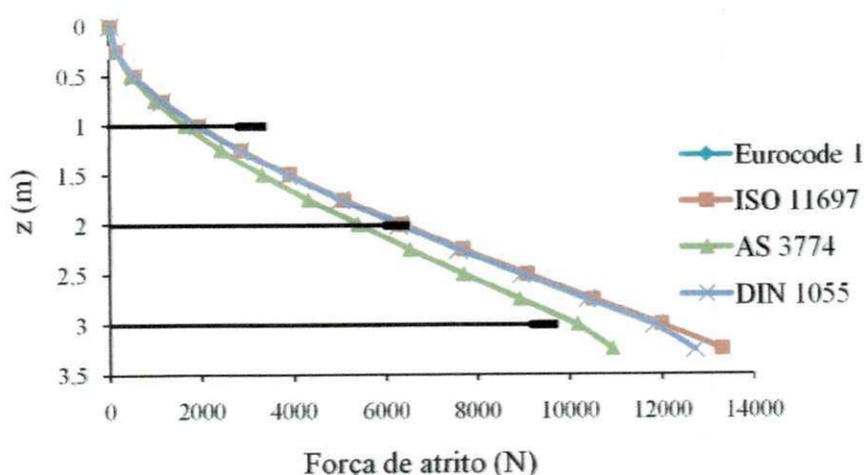


Figura 66. Força de atrito para o carregamento concêntrico

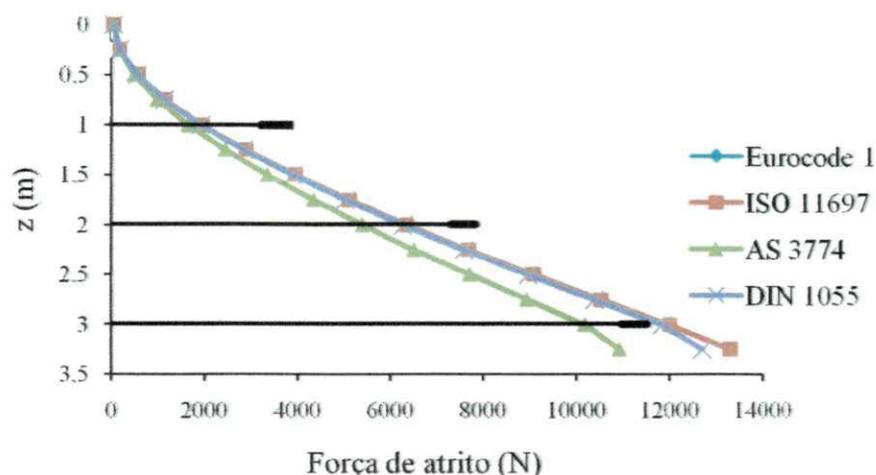


Figura 67. Força de atrito para o carregamento excêntrico

Cheung (2007), ao medir as forças de atrito no carregamento concêntrico em um silo esbelto cilíndrico, encontrou valores da ordem de 2850, 4641 e 6586 N para as profundidades de 1, 2 e 3 m, respectivamente. Esses resultados representam uma diferença de 9,1, 25,6 e 29,8% para as profundidades de 1, 2 e 3 m, respectivamente. Quando comparados aos resultados do carregamento excêntrico, esse descompasso aumenta para 20,5, 39,7 e 41,2% para as profundidades de 1, 2 e 3 m, respectivamente.

A diferença entre os resultados das normas para a força de atrito de carregamento reside, basicamente, na formulação proposta para o fator k . A norma AS 3774 (1996), cuja formulação adotada para o fator k é a proposta por Walker (1966), é a norma que adota os menores valores para k , o que explica seus reduzidos valores quando comparados aos experimentais.

A seguir, encontram-se os gráficos relativos às forças de atrito no descarregamento em comparação aos valores preditos pelas normas internacionais Eurocode 1 (2006), ISO 11697 (1995), AS 3774 (1996) e DIN 1055 (1987). Optou-se por analisar apenas os dados experimentais correspondentes ao período de armazenagem de 24h uma vez que, apesar do mínimo acréscimo das forças em função dos tempos de armazenagem, esses foram, ainda, os mais elevados. É importante salientar que os gráficos teóricos foram construídos com base nos valores das propriedades de fluxo da areia obtidos experimentalmente e não com base nas propriedades preditas pelas normas. Isso foi executado no sentido de obter valores mais próximos aos experimentais.

Todas as quatro normas utilizadas como comparativo baseiam-se nas deduções de Janssen (1895) para a predição da pressão estática em silos. Como ponto de diferenciação, cada norma costuma adotar diferentes coeficientes de multiplicação às pressões de carregamento para a obtenção dos valores de descarga o que, inevitavelmente, tende a gerar diferentes resultados de pressão para o mesmo silo.

Nas Figuras 68, 69, 70 e 71 encontram-se as curvas de força de atrito teóricas e as médias referentes às forças de atrito nas profundidades de 1, 2 e 3 m quando o silo foi carregado concêntricamente. Para a Figura 68, destaca-se a boa aproximação das normas Eurocode 1 (2006) e ISO 11697 (1995) para a profundidade de 2 m e das normas DIN 1055 (1987) AS 3774 (1996) para a profundidade 3 m. Para a profundidade de 1 m, nenhuma das normas estudadas produziram valores próximos aos experimentais.

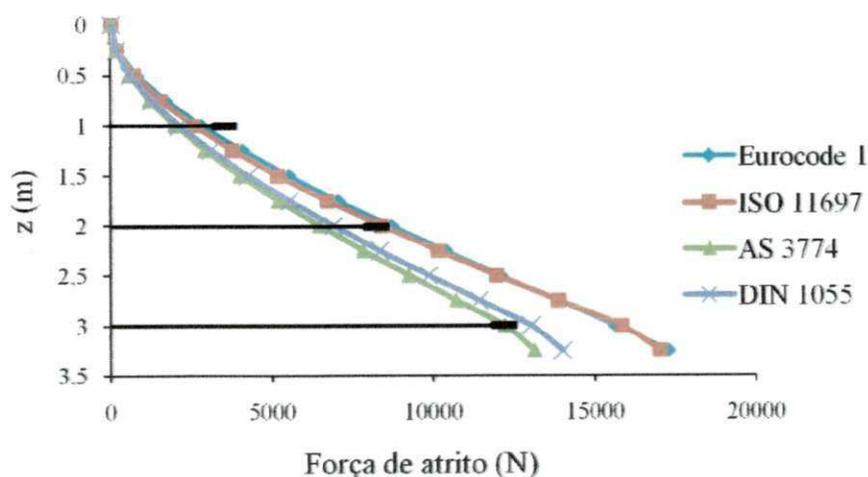


Figura 68. Forças de atrito para a descarga concêntrica

Ao mensurar as pressões em um silo cilíndrico esbelto de paredes lisas, Cheung (2007) concluiu que as forças de descarga podem perfeitamente ser representadas por meio de coeficientes de sobrecarga adicionados às forças de carregamento. Para esta pesquisa, foi notada uma variação de 15% em relação estudo de Cheung (2007) o que pode ser justificado pela particularidade de cada ensaio como dimensões do silo e tipo variados de produto.

Na Figura 69, observa-se que todas as normas subestimaram os valores experimentais na profundidade de 1 m com uma diferença de até 48,8%, como no caso da AS 3774 (1996) e DIN

1055 (1987). Já para a profundidade seguinte, esta diferença é reduzida para 9,8% chegando estas mesmas normas a superestimar os dados experimentais para a maior profundidade estudada.

Com exceção da profundidade de 1 m, a ISO 11697 (1995) resultou em valores superestimados, principalmente para a maior profundidade do silo (38% superior ao experimental), fato este explicado pelo maior coeficiente de sobrecarga adotado (1,2). Para as demais normas, os resultados quase não apresentam variação frente aos dados reais uma vez que os coeficientes de sobrecarga adotados pouco diferem entre si. Para as normas Eurocode 1 (2006), AS 3774 (1996) e DIN 1055 (1987), os coeficientes recomendados são iguais a 1,15; 1,2 e 1,1, respectivamente.

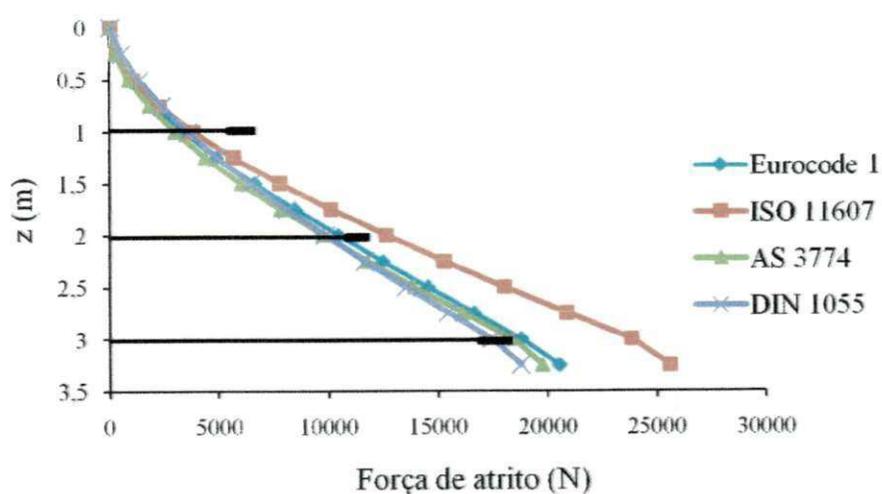


Figura 69. Forças de atrito para a descarga excêntrica a 75%

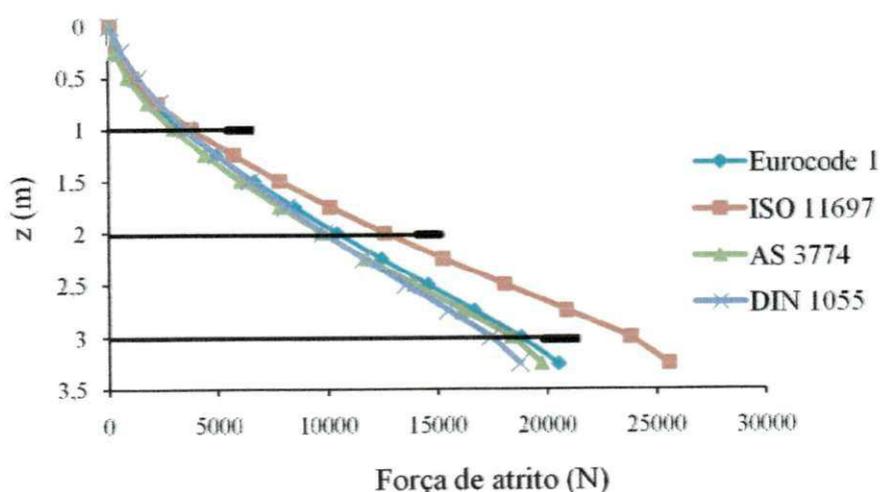


Figura 70. Forças de atrito para a descarga combinada 50-50%

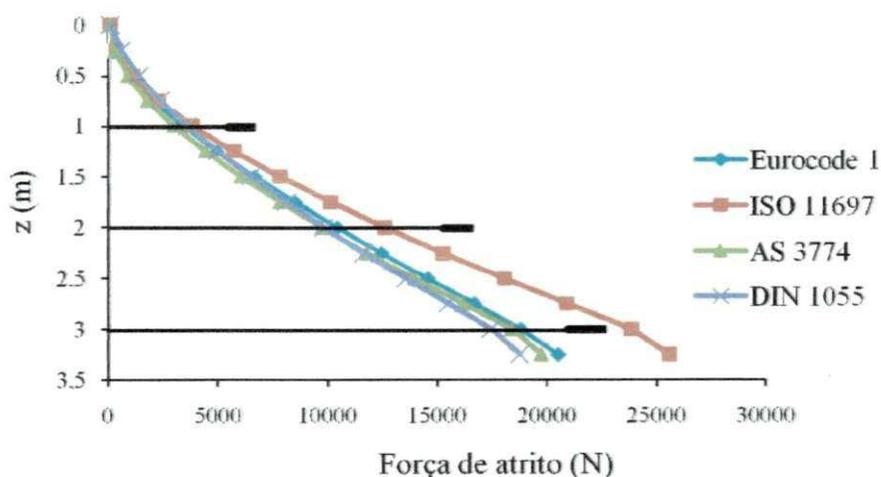


Figura 71. Forças de atrito para a descarga combinada 75-75%

Para as descargas combinadas 50-50% e 75-75%, os valores experimentais foram comparados aos teóricos com excentricidade de 75%. Nas Figuras 70 e 71 encontram-se os resultados das teorias e dos ensaios no silo-piloto para essas duas combinações de descarga. É importante destacar que os valores experimentais se adequam com a predição das normas apenas para a maior profundidade de 3 m.

Em geral, as normas Eurocode 1 (2006) e ISO 11697 (1995), sobretudo esta última para descargas excêntricas, foram as que se apresentaram mais adequadas para aplicação em projeto de silos esbeltos já que suas diferenças frente aos valores experimentais foram as menos significativas.

A seguir são apresentados os gráficos comparativos das descargas teóricas e experimentais a partir de um carregamento excêntrico a 75%. Na Figura 72, pode-se observar que a força de atrito a uma profundidade de 1m foi ligeiramente superior aos valores preditos enquanto que, para a profundidade de 2m, as melhores normas foram DIN 1055 (1987) e AS 3774 (1996) com um valor 3,2% superior. Para a profundidade seguinte, estas duas normas ainda foram as mais próximas, mesmo superestimando o experimento em 24,7%.

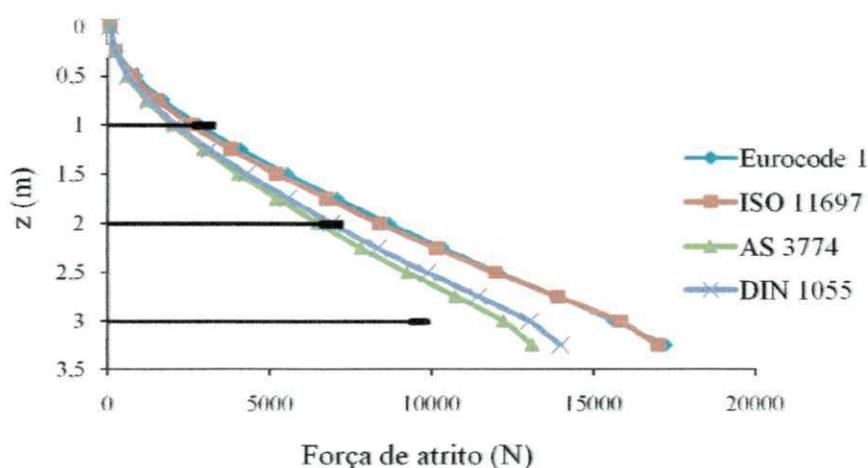


Figura 72. Forças de atrito para a descarga concêntrica

Para a figura seguinte, Figura 73, observa-se que apesar da igualdade das forças teóricas à experimental para a profundidade de 1 e 2 m, existe uma discrepância de até 24% à 3 m de profundidade para as normas Eurocode 1 (2006), AS 3774 (1996) e DIN 1055 (1987). Para a ISO 11697 (1995), esta variação aumenta cerca de 64%. Acredita-se que os maiores valores do fator k e do coeficiente de sobrecarga tenham sido os responsáveis pelo distanciamento entre os valores teóricos e experimentais. Para as Figuras 74 e 75, com exceção da ISO 11697 (1995), todas as demais normas se adequaram aos valores experimentais, sobretudo para as maiores profundidades. Novamente, acredita-se que os valores de k e de sobrecarga influenciaram significativamente para uma variação excessiva dos resultados teóricos da ISO 11697 (1995).

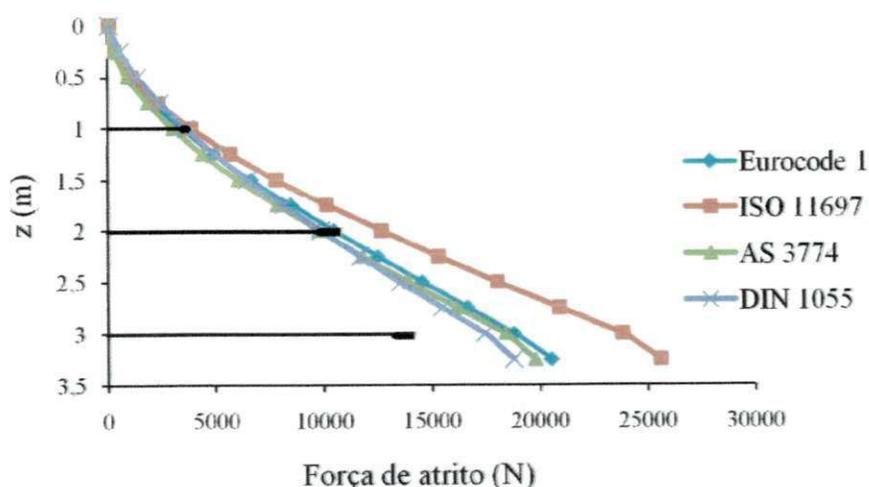


Figura 73. Forças de atrito para a descarga excêntrica a 75%

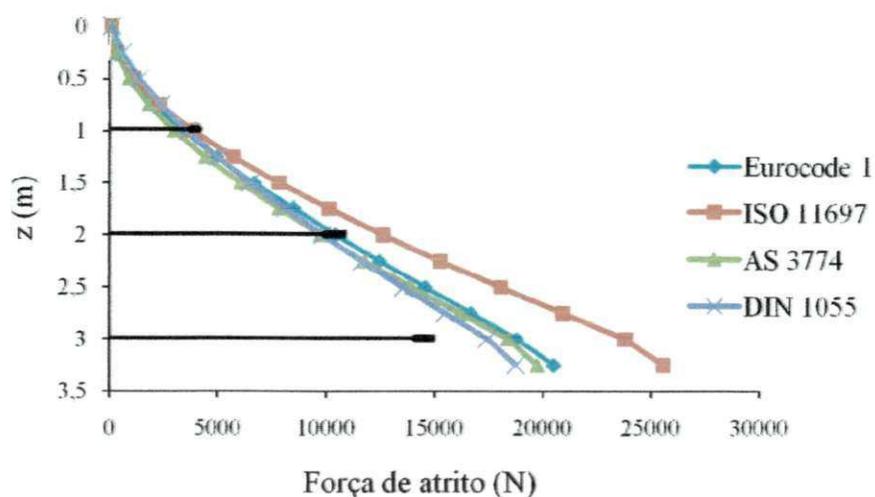


Figura 74. Forças de atrito para a descarga combinada 50-50%

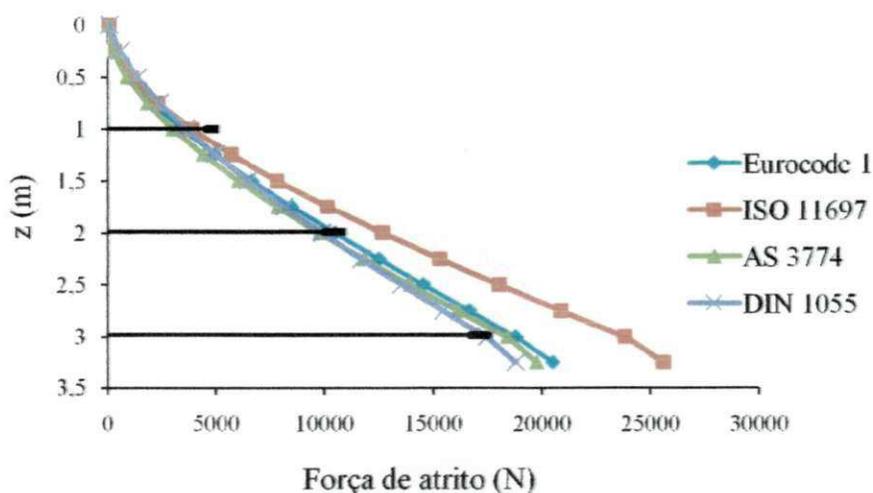


Figura 75. Forças de atrito para a descarga combinada 75-75%

Nas Tabelas 38 e 39 encontram-se os coeficientes de sobrecarga para os carregamentos concêntrico e excêntrico. No carregamento excêntrico não foi observada variação superior a 37% para as descargas combinadas muito provavelmente em razão de o carregamento ter sido realizado no lado oposto ao do descarregamento. Isto pode ter ocasionado um redirecionamento das cargas de carregamento durante a descarga do silo, o que provocou uma compensação de forças e interferiu na razão entre as cargas dinâmicas e estáticas.

Tabela 38. Coeficientes de sobrecarga para o carregamento concêntrico.

Profundidade	Descarregamento			
	Concêntrica	75%	50-50%	75-75%
1 m	1,23	1,27	1,27	1,28
2 m	1,30	1,27	1,70	1,70
3 m	1,32	1,30	1,73	1,75
Média	1,28	1,28	1,56	1,57

Tabela 39. Coeficientes de sobrecarga para o carregamento excêntrico.

Profundidade	Descarregamento			
	Concêntrica	75%	50-50%	75-75%
1 m	1,23	1,15	1,15	1,15
2 m	1,30	1,33	1,33	1,35
3 m	1,32	1,31	1,35	1,37
Média	1,28	1,26	1,28	1,29

4.3.2.4 Momento fletor nas paredes do silo-piloto

Sabe-se que as paredes dos silos estão sujeitas à ocorrência de momentos fletores diametrais causados pela não uniformidade das pressões laterais exercidas pelo contato do produto ao longo da circunferência da parede, enquanto que momentos fletores longitudinais são causados, geralmente, quando há um desequilíbrio das forças verticais de atrito.

Esta desuniformidade nas ações pode ser gerada pelo carregamento/descarregamento excêntrico, variações nas propriedades dos produtos sólidos armazenáveis, variação no coeficiente de atrito com a parede e/ou devido à anisotropia do ângulo de atrito interno nas camadas dos grãos.

Molenda, Horabik, Thompson e Ross (2002) citam que tanto os momentos transversais quanto longitudinais são responsáveis por produzir tensões de tração e compressão nas paredes dos silos os quais podem conduzir a estrutura às falhas e rupturas.

Na Tabela 40 encontram-se os valores de máximos momentos fletores para o descarregamento a partir das duas condições de enchimento do silo-piloto. Os valores abaixo relacionados correspondem às forças de atrito para um período de armazenagem de 24h.

Tabela 40. Valores de momento fletor durante o descarregamento do silo-piloto.

Descarregamento	Carregamento			
	Concêntrico		Excêntrico	
	$H_c/D_c = 0,8$	$H_c/D_c = 1,6$	$H_c/D_c = 0,8$	$H_c/D_c = 1,6$
Descarga 0%	140,8	294,2	106,7	137,8
Descarga 75%	176,9	426,3	146,1	244,5
Descarga 50-50%	5,3	57,7	23,2	50,8
Descarga 75-75%	39,1	4,9	18,9	170,8

Observa-se que a descarga a 0% de excentricidade produziu momentos variando de 140,85Nm a 294,24Nm o que representa uma variação de 200% entre as duas relações H_c/D_c para o carregamento concêntrico. Para o excêntrico, essa variação foi de 29%. Teoricamente, momentos durante cargas e descargas concêntricas deveriam ser iguais a zero. Entretanto, deficiências no processo de carga/descarga do silo causadas por imperfeições geométricas nas paredes do silo e não uniformidades do atrito ao longo da superfície da parede podem resultar em carência na simetria do carregamento ou descarregamento de silos (MOLEND, HORABIK, THOMPSON e ROSS, 2002).

Para a descarga excêntrica 75%, esta variação se elevou para 242% para o carregamento concêntrico e decresceu para 67% no excêntrico. Essa discrepância resulta do fato das descargas a 75% produzirem as menores forças de atrito nas paredes, mas em contrapartida, as maiores irregularidades entre as células. Molenda, Horabik, Thompson e Ross (2002) determinaram uma variação de 350% entre os momentos fletores produzidos para uma mesma excentricidade de descarga (75%) a partir de um carregamento concêntrico e excêntrico a 75%.

Neste referido descarregamento, vale ressaltar que ocorria uma sobrecarga nas paredes no ponto oposto à localização deste orifício, o que certamente resultou em desuniformidades na distribuição das cargas de atrito ao longo de um mesmo perímetro.

Curioso destacar que os menores resultados foram obtidos para as condições de descarga combinada para ambas as condições de enchimento do silo. O fato das descargas combinadas produzirem os menores valores de momento fletor pode residir na baixa desuniformidade de distribuição das forças de atrito uma vez que a ocorrência de dois canais de fluxo pode ter contribuído para uma estabilidade maior do fluxo durante a descarga.

4.3.3 Forças verticais no fundo plano

Conforme previsto anteriormente, neste item são apresentadas as forças verticais no fundo plano para as profundidades de 1 e 3 m em conjunto com as predições das normas Eurocode 1 (2006), ISO 11697 (1995), AS 3774 (1996) e DIN 1055 (1987). Os dados de força vertical foram tomados a partir dos resultados coletados nas células de pressão instaladas na base do fundo plano. Os valores de pressão vertical foram, a partir de então, convertidos em força vertical pela multiplicação da área útil da célula de pressão ($0,045\text{m}^2$).

Optou-se por analisar apenas os dados obtidos para o período de 24h de armazenagem por serem os maiores valores encontrados. As figuras seguintes representam as forças verticais experimentais e teóricas para as descargas concêntrica, excêntrica a 75%, combinada 50-50% e 75-75% quando o silo foi carregado concentricamente.

Na Figura 76 pode-se notar que os valores preditos pela DIN 1055 (1987) encaixam-se perfeitamente aos experimentais para a profundidade de 1 m, contudo sua predição passa a ser insatisfatória quando comparada à maior profundidade do silo. De forma geral, os valores recomendados pela AS 3774 (1996) e ISO 11697 (1995) foram os mais adequados para o descarregamento concêntrico por ficarem, em média, 15% acima dos encontrados no silo-piloto. Na Figura 77 observa-se um aumento na tendência de afastamento entre os valores experimentais e os recomendados pela DIN 1055 (1987) à medida que a profundidade passa de 1 para 3 m. Pela análise das curvas é possível entender que os coeficientes de sobrecarga adotados entre as demais normas aproximam-se entre si, o que resultou em valores semelhantes de força vertical.

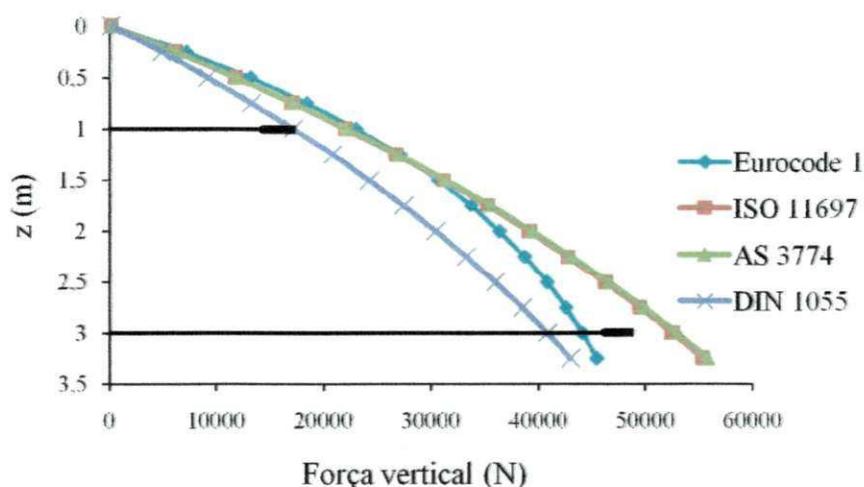


Figura 76. Forças verticais para a descarga concêntrica

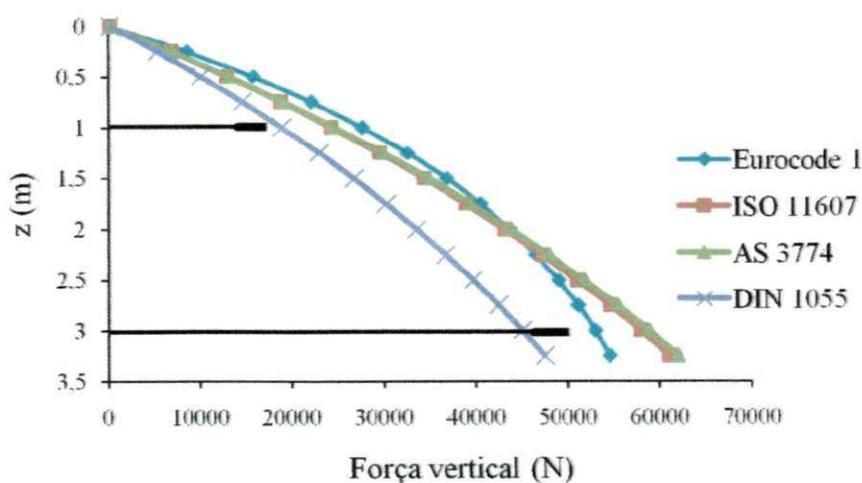


Figura 77. Forças verticais para a descarga excêntrica a 75%

Nas Figuras 78 e 79, descargas combinadas 50-50% e 75-75%, respectivamente, a norma DIN 1055 (1987) apresentou-se adequada por igualar-se, em intensidade, aos valores encontrados nos ensaios. Esse resultado deve-se ao fato do coeficiente de sobrecarga adotado por essa norma diferir em apenas 2% do encontrado experimentalmente. Para as demais normas, os valores preditos ficaram 34 e 23% acima dos experimentais para as descargas combinadas 50-50% e 75-75%, respectivamente.

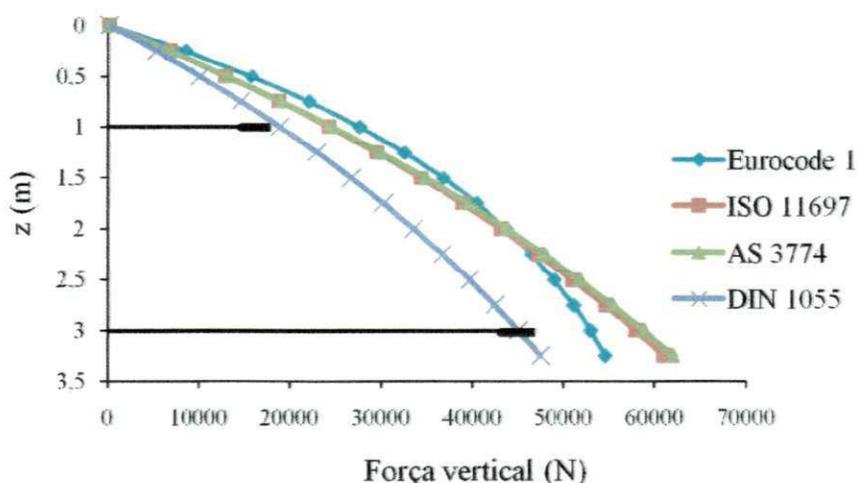


Figura 78. Forças verticais para a descarga combinada 50-50%

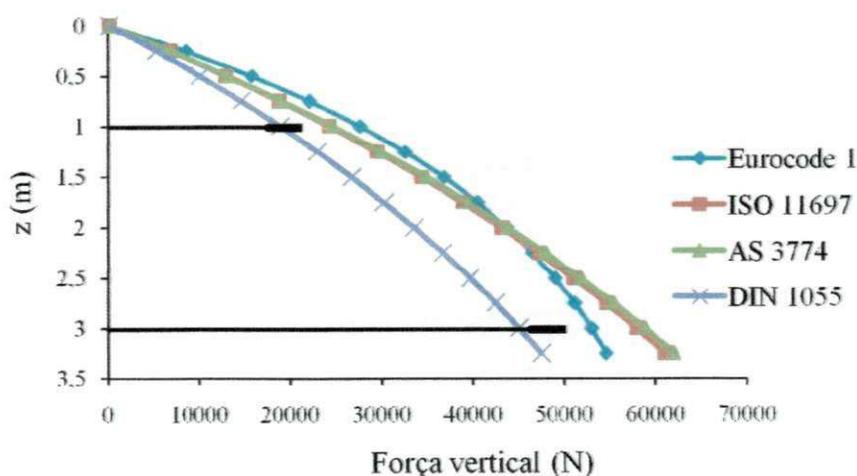


Figura 79. Forças verticais para a descarga combinada 75-75%

As figuras 80, 81, 82 e 83 representam os dados experimentais e teóricos das forças verticais no descarregamento quando o silo era preenchido excentricamente a 75%. Para a descarga concêntrica (Figura 80), os valores preditos pelas normas DIN 1055 (1987) e Eurocode 1 (2006) ajustaram-se perfeitamente aos valores experimentais para as profundidades de 1 e 3 m, respectivamente. As demais normas apresentaram valores superestimados em até 30%. Nas Figuras seguintes pode-se destacar a concordância entre os valores experimentais e os preditos pela DIN 1055 (1987), enquanto que as demais normas atingiram valores entre 23 e 35% superiores aos experimentais.

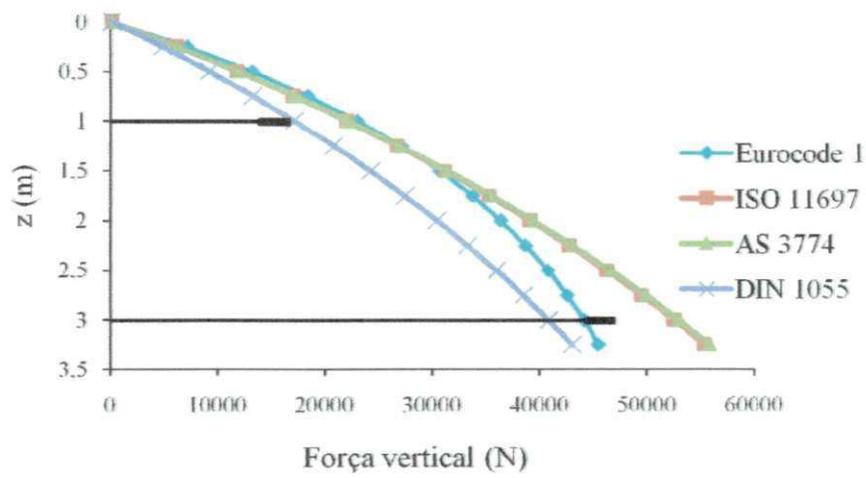


Figura 80. Forças verticais para a descarga concêntrica

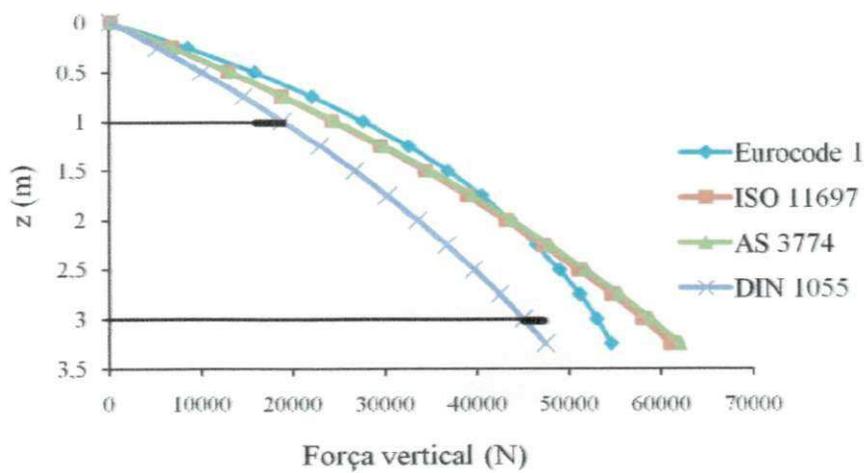


Figura 81. Forças verticais para a descarga excêntrica a 75%

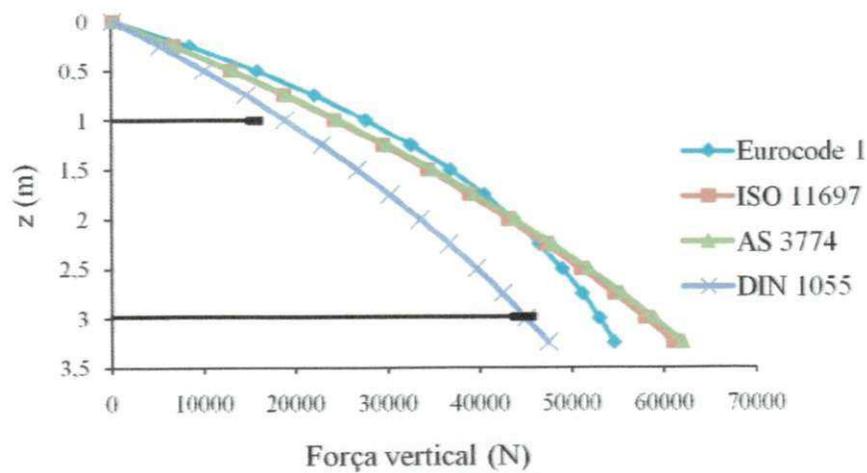


Figura 82. Forças verticais para a descarga combinada 50-50%

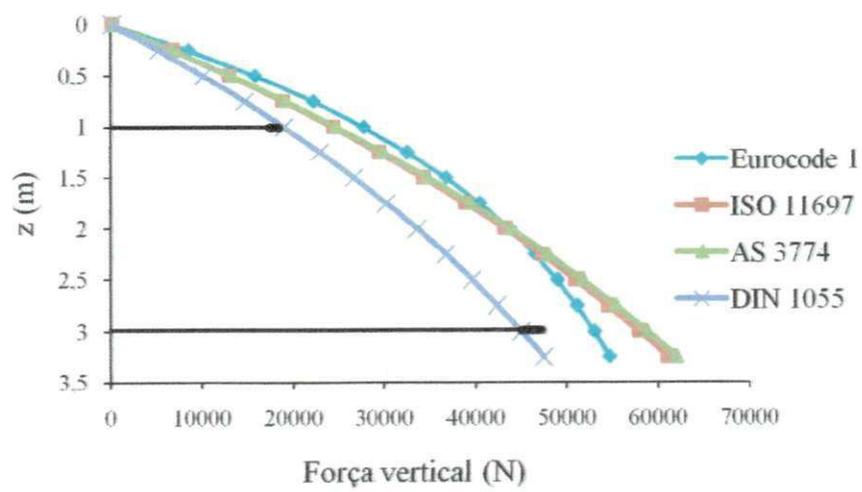


Figura 83. Forças verticais para a descarga combinada 75-75%

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo final estão reunidas as principais conclusões alcançadas bem como as sugestões para futuras pesquisas.

5.1 Propriedades da areia

As propriedades determinadas apresentaram baixa variação na frequência de distribuição dos dados (Coeficiente de variação CV abaixo de 10), o que indica tratar-se de um produto com propriedades bem definidas. O peso específico consolidado (γ) apresentou variação de 3 a 4% entre seus limites máximos e mínimos para os tempos estudados, enquanto que os ângulos de atrito interno (\emptyset) e efetivo ângulo (δ) apresentaram redução na variação entre seus limites com o aumento do período de armazenagem, passando de 22 para 6% para \emptyset entre a análise instantânea e consolidada a 24h e de 11 para 9% para δ , para as mesmas análises.

Para o ângulo de atrito com a parede (\emptyset_w), a variação detectada entre os extremos foi de apenas 4%. Todas as propriedades encontram-se dentro dos limites recomendados pela maioria das normas internacionais testadas.

5.2 Fator k

De grande importância para a predição das ações em silos, o fator k representa a relação entre a pressão horizontal e a vertical em qualquer ponto de uma massa granular e define a porcentagem da distribuição das pressões em função da relação H_c/D_c . Semelhante ao ocorrido para as propriedades de fluxo, os valores encontrados para o fator k apresentaram baixa variação na frequência de distribuição dos dados com relativa redução dessa variação em função do aumento no período de consolidação.

No entanto, apesar do fato da aproximação dos dados a um valor médio ser mais intensa com o aumento do período de consolidação, a diferença observada entre os tempos estudados não atingiu 4%, indicando que, a princípio, os períodos analisados foram insuficientes para provocar uma variação expressiva neste parâmetro.

Dentre as diversas formulações propostas, a que mais se aproximou dos valores obtidos em laboratório foi a teoria de Jaky (1948) com diferença de 17%. A respeito das recomendações das normas, a proposta oferecida pela SNIBATI (1975) foi a mais próxima aos valores encontrados em laboratório. Esta norma recomenda a determinação do fator k através do uso do ângulo efetivo de atrito interno (δ) e do ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) e sua faixa de variação frente aos valores de laboratório foi, em média, igual à variação obtida pela equação de Jaky (1948).

Portanto, recomenda-se estas duas formulações para determinação do fator k para o projeto de silos verticais.

5.3 Forças atuantes no silo-piloto

5.3.1 Sobre o modelo de silo-piloto

O modelo de silo-piloto proposto por Horabik, Molenda e Ross, (1995) demonstrou-se adequado para a medição das forças de atrito nas paredes uma vez que permitiu a instrumentação do corpo do silo por células de carga distanciadas uma das outras em 120° . Desta forma, quando ocorria um deslocamento vertical das paredes provocado pela força de arrasto das partículas, as células eram acionadas.

Quanto à sua classificação geométrica, notou-se extrema variação para a relação H_c/D_c igual a 1,6 onde duas normas o classificaram como um silo esbelto, duas como medianamente esbelto e duas como silo baixo. Esta incerteza denota fragilidade neste método classificatório e representa riscos ao projeto de silos por não apresentar coerência entre seus limites requerendo, desta forma, especial atenção por parte dos engenheiros de projeto.

5.3.2 Distribuição e intensidade das forças de atrito

Ao final do trabalho experimental, uma grande quantidade de dados de força de atrito foi analisada e discutida possibilitando, a partir de então, tecer as principais conclusões dispostas a seguir.

Em geral, o atrito nas paredes do silo obteve igual comportamento para as relações H_c/D_c estudadas no que se refere a sua distribuição, sendo esta mais regular quando o silo era descarregado pelas combinações 50-50% e 75-75%, haja vista que a possível formação de dois canais de fluxo de eixos simétricos e equidistantes no momento da descarga tenha contribuído para uma regularização no fluxo da areia.

É provável que a simetria e equidistância dos canais de fluxo tenham sido determinantes para a obtenção de forças de atrito igualmente distribuídas ao longo de um perímetro haja vista que para as outras descargas combinadas, onde também ocorria a formação de dois canais de fluxo, foram notadas irregularidades na distribuição diametral das forças.

Esta hipótese pode, ainda, ser corroborada pelo fato das maiores irregularidades de distribuição de forças em todo o experimento terem sido notadas para a descarga excêntrica a 75% a qual produzia um único canal de fluxo extremamente distante de um lado e igualmente próximo ao outro lado do silo.

Conclui-se, ainda, que a excentricidade de carregamento influenciou de forma significativa as forças de atrito durante a descarga sendo essas forças ainda maiores quando o silo era carregado excentricamente.

Apesar dos benefícios de uma melhor distribuição das cargas de atrito causada pela formação de dois canais simétricos de fluxo durante as descargas combinadas, em especial as descargas 50-50% e 75-75%, sob estas mesmas condições foram observadas as maiores intensidades. O fato de uma maior quantidade possível de areia entrar em movimento ao mesmo tempo teria provocado um contato mais intenso com a parede culminando em maiores forças de arrasto vertical.

No tocante aos tempos de armazenagem, conclui-se que os períodos de armazenagem foram insuficientes para ocasionar uma variação significativa nas forças de atrito para uma mesma descarga com médias de variação inferiores a 2%.

5.3.3 Intensidade das forças verticais no fundo plano

Para as forças verticais no fundo plano, pode-se concluir que seus valores acompanharam, em comportamento, as variações sofridas pelas forças nas paredes do silo sendo maiores para as situações de menor força de atrito. Ao comparar os dados de força vertical total aos dados de força de atrito, conclui-se que cerca de 23 a 28% da força vertical é absorvida por atrito nas paredes.

5.3.4 Comparação com normas internacionais

O silo-piloto apresentou-se adequado para as medidas experimentais de força de atrito para a areia, com boas respostas para a avaliação de suas intensidades e distribuição por meio do sistema de instrumentação utilizado. Os resultados obtidos nos ensaios indicam relativa equivalência com as forças de atrito representadas pela teoria de Janssen (1895) para o carregamento e de uma associação com coeficientes de sobrecarga para o descarregamento.

Curiosamente, nenhuma das metodologias adotadas pelas normas atingiu bons resultados quando comparados aos experimentais para a relação $H_0/D_0 = 0,8$ (silo baixo) em quaisquer das situações de carregamento ou descarregamento. Para a $H_0/D_0 = 1,6$, os valores experimentais de descarga foram, de modo geral, superiores aos teóricos para um carregamento concêntrico. No descarregamento a partir de um preenchimento excêntrico, com exceção da ISO 11697 (1995), todas as outras normas apresentaram valores próximos aos experimentais.

Para a relação $H_0/D_0 = 2,4$ (3 m de profundidade), os resultados teóricos foram inferiores aos experimentais quando em uma descarga a partir de um carregamento concêntrico e, considerados adequados para o silo carregado excentricamente. Em geral, as normas AS 3774 (1996), DIN 1055 (1985) e Eurocode 1 (2006) foram as que mais se encaixaram na maioria das situações estudadas.

5.3.5 Coeficientes de sobrecarga e momento fletor

Com relação às diferenças entre carregamento e descarregamento (coeficientes de sobrecarga), destaca-se as maiores diferenças encontradas para as descargas combinadas para a relação $H_0/D_0 = 1,6$. Para o carregamento excêntrico, os coeficientes de sobrecarga encontrados foram inferiores a 30% muito provavelmente em razão de um redirecionamento das cargas.

Inversamente ao ocorrido na intensidade das cargas de atrito, a descarga de 75% foi a forma de carregamento que produziu os maiores valores de momento fletor resultante, seguido da descarga concêntrica, especial quando de um carregamento excêntrico a 75%. Para as descargas combinadas 50-50% e 75-75% (maiores intensidades de força), os momentos diametrais gerados da ordem de 57 e 178 Nm, respectivamente, ambos para a relação $H_c/D_c = 1,6$.

5.4 Sugestões para trabalhos futuros

As investigações realizadas neste e outros trabalhos de pesquisa sugerem alguns estudos para melhor compreensão do comportamento destas estruturas. Assim, recomenda-se que:

- ✓ Seja realizada uma análise minuciosa das distribuições de força de atrito para relações H_c/D_c diferentes das aqui estudadas.
- ✓ Uma comparação com valores obtidos para silos de paredes corrugadas bem como para outros silos de diferentes formatos de secção transversal (quadrados e retangulares)
- ✓ Avaliação das forças de atrito produzidas por outros materiais armazenáveis, preferencialmente pulverulentos.
- ✓ Medição das forças de atrito tanto nas paredes quanto em tremonhas cônicas e prismáticas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 313. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos and bunkers for storing granular materials.** EUA: 1991.

AOKI, R. Stresses of powders and granular materials in bins and hoppers. **Theory and Applied Mechanics**, v. 26, p. 9-24, 1978.

AS 3774. AUSTRALIAN STANDARD. Loads on bulk containers. Sydney: 1996.

AYUGA, F. Los empujes del material almacenado en silos. **Informes de la construcción. Madrid**, v. 46, n. 436, p. 27-33, 1995.

BENINK, E.J. **Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes.** 1989. 162p. Thesis - Universiteit Twente, Netherlands, 1989.

BISCHARA, A.G.; AYOUB, S. F.; MAHDY, A. S. Static pressure in concrete circular silos storing granular materials. **ACI Structural Journal**, Detroit, n. 80-21, p. 210-216, Maio/Jun., 1983.

BRITISH MATERIALS HANDLING BOARD. BMHB. **Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers.** Berkshire: 1985.

BROWN, C. J., LAHLOUH, E. H. and ROTTER, J. M. **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. **Sobrepecciones em las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos**. 1984. Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 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: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo**. São Carlos, EESC. 232p. 2007.

CANADIAN FARM BUILDING CODE. CFBC. **Structural design, Part II**. Ottawa: 1983.

CARSON, J. W. & JENKYN, R. T. Load development and structural considerations in silo design. In: **Reliable Flow of Particulate Solids II**, Oslo, Norway, August 1993.

CHEUNG, A. B. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. São Carlos: USP, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB 2006). **Anuário da produção agrícola nacional Ano 2006**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 17 de abril de 2007.

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

DRESCHER, A.; WATERS, A. J.; RHOADES, C. A. Arching in hoppers: II. Arching theories and critical outlet size. **Powder Technology**, Elsevier Science, n. 84, p. 177-183, 1995.

EP 433 - American Society of Agricultural Engineers. **Loads exerted by free-flowing grain on bins**. St. Joseph: 2000.

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

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

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.

HORABIK, J.; MOLEND, M.; ROSS, I. J. **Comparison of load distribution in two similar grain bins**. Transactions of the ASAE, vol. 6, p. 1875-1879, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE 2005).

Levantamento sistemático da produção agrícola. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home.htm>. Acesso em: 04 mar de 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE 2007).

Levantamento sistemático da produção agrícola. Disponível em:

http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_impresao.htm. Acesso em: 12 set de 2007

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

JAKY, J. **Pressure in silos**. In:...Proceedings of 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1. p. 103-107, 1948.

JANSSEN, H. A. Versuche über getriededruck in silozellen. **Z. Verein Deutcher Ingenieure**, v. 39, p. 1045-1049, 1895.

JENIKE, A.W. **Storage and flow of silos**. Salt Lake City. University of Utah. Bulletin 123. Engineering Experiment Station (1964).

LOHNES R. A. Lateral stress ratios for particulate materials. **Powder Handling & Processing**. v. 5, n. 4, p 331-336, 1993.

KAMINSKI, M.; WIRSKA, E. Variation of pressures in flexible walled silo model. **Powder Handling & Processing**. v. 10 n. 4, p. 349-355. October/December, 1998.

KNOWTON, T. M.; CARSON, J. W.; KLINZING et al. The importance of storage, transfer and collection. **Chemical Engineering Progress**, Elsevier Science, n.90, p.44-54, 1994.

McLEAN, A.G. Contend generated loads on bins and silos. **Design of steel bins for storage of bulk solids**. p. 15-26. 1985.

MOLEND, M.; HORABIK, J.; THOMPSON, S. A. and ROSS, I. J. Bin loads induced by eccentric filling and discharge of grain. **American Society of Agricultural Engineers**, n. 3, p. 781-785, 2002.

MOORE, D. W., WHITE, G. M., ROSS, I. J. Friction of wheat on Corrugated Metal Surfaces. **Transactions of the ASAE**, v.84, n.1, p. 1842-1847, 1984.

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

NBR 7211. **Agregado para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2005.

NBR 7217. **Agregados. Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 1987.

PIEPER, K. & SCHÜTZ, M. Bericht über das forschungsvorhaben - norm-mess-silo für schüttguteigenschaften. **Technische Universität Braunschweig** - Lehrstuhl für Hochbaustatik, Deutschland, 1980, 109p.

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

RANKINE, W. J. M. & KOENEN, M. Calculation of side and floor pressure in silo walls. **Zentralblatt der bauverwaltung**, p. 446-449, 1895.

RAVENET, J. **Silos. Flujo de vaciado de solidos. Formacion de bovedas. Efectos.** Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 335 p., 1983.

RAVENET, J. **Silos.** Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 508 p., 1992.

ROBERTS, A. W. **Storage, flow and handling of bulk solids.** Newcastle: Department of Mechanical Engineering, University of Newcastle, 1987. 612p.

ROTTER, J. M. **Guide for the economic design of circular metal silos.** London: Spon Press, 28p. 2001.

SAFARIAN, S. S. & HARRIS, E. C. **Design and construction of silos and bunkers.** Van Nostrand Reinhold Company Inc. New York, 468p. 1985.

SNBATI. Reglas para proyecto y calculo de silos de hormigón. **Sindicato Nacinal del Hormigón Armado y Técnicas Industrializadas.** França: 1975.

TEUNOU, E.; FITZPATRICK, J. J.; SYNNOTT, E. C. Characterisation of food powder flowability. **Journal of Food Engineering**, n. 39, p. 31-37, 1999.

TEUNOU, E. & FITZPATRICK, J. J. Effect of time and consolidation on food powder flowability. *Journal of Food Engineering*, n. 43, p. 97-101, 2000.

WALKER, D. M. An approximate theory for pressures and arching in hoppers. **Chemical Engineering Science**, v. 21, p. 975-997, 1966.