

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DAS PRESSÕES EM SILOS CILÍNDRICOS DE BAIXA RELAÇÃO ALTURA/DIÂMETRO E FUNDO PLANO

EDNA DAS GRAÇAS ASSUNÇÃO FREITAS

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Estruturas.

ORIENTADOR: Prof Titular Carlito Calil Júnior

São Carlos, 2001

*Se pedirdes DEUS te dará. Se buscares DEUS te fará encontrar.
Se bateres Deus te abrirá a porta. Pois tudo que pedes recebes de
DEUS. O que buscas encontras em DEUS e a quem bate DEUS abrirá
as portas.*

DEDICATÓRIA

*A meus filhos José Fernando e Leonardo que sempre me apoiaram e
incentivaram na realização desse trabalho.*

*À minha mãe que com seu exemplo me ensinou que Deus está acima de tudo
e a meu pai “in memoriam” pela força de vontade.*

*A meus irmãos Ewerton, Eliana, Eduardo, Edson Luis, Eneida e Edivaldo pela
grande família que somos.*

AGRADECIMENTOS

O meu agradecimento especial ao professor Carlito Calil Júnior, por sua experiência transmitida, dedicação, orientação e acima de tudo pela confiança e amizade demonstrada.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, na pessoa do Magnífico Reitor José Antônio de Souza Veiga, pelo apoio e incentivo sempre demonstrado.

A todos os companheiros de trabalho no Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFRRJ, em especial, a professora Regina Célia Lopes Araújo, pela qual tenho grande carinho e admiração.

A todos os professores do Departamento de Estruturas da EESC/USP, que direta ou indiretamente contribuíram grandemente para a concretização desse trabalho, em especial aos professores Antonio Alves Dias e Francisco Antônio Rocco Lahr.

À equipe de funcionários do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras da EESC/USP: Aparecido Galindo, Arnaldo Floro de Souza, Jaime Galindo, José Francisco do Nascimento Filho, Luís E. Bragatto, Sílvio A. Ferro, Roberto Galindo e Tânia Maria Ferreira, pelo convívio e a amizade que tornaram menos dolorida esta etapa de minha vida.

À toda equipe de funcionários do Departamento de Estruturas da EESC/USP pelo carinho e atenção que me foram dispensados.

À KEPLER WEBER INDUSTRIAL S/A, na pessoa do Eng. José Floriano Xavier, Gerente industrial, pelo interesse e atenção durante os contatos iniciais de parceria e do Eng. Jeferson Sarreta que com presteza e dedicação se empenhou para que um silo modelo, granja KW 1823 plano, doado por essa conceituada empresa para a realização da presente pesquisa, pudesse ser instalado no LaMEM em menor tempo possível, bem como pelo interesse demonstrado no decorrer dos ensaios.

À Cooperativa Agrícola Mista do Vale do Mogi-Guaçu através do Dr. Abílio Paludetti Júnior e dos senhores Luiz Antônio de Paula e Francisco José Vicentim pelo apoio na instalação dos sensores e realização dos ensaios em um dos silos dessa cooperativa.

À instituição de fomento CAPES/PICDT, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos companheiros de pós-graduação, pela troca de conhecimentos e amizade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
RESUMO	xiv
<i>ABSTRACT</i>	xv

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 O desenvolvimento da pesquisa em silos	03
1.2 Pesquisas realizadas em silos no Departamento de Estruturas da EESC-USP	05

CAPÍTULO 2

DEFINIÇÕES E CONCEITOS

2.1 Silos	08
2.2 Classificação dos silos	08
2.3 Propriedades físicas dos produtos armazenados	12
2.3.1 Limite inferior e superior das propriedades físicas dos produtos	18
2.3.2 Propriedades físicas dos produtos segundo às normas	20
2.3.3 O parâmetro K	25

CAPÍTULO 3

AS PRESSÕES EXERCIDAS PELOS PRODUTOS ARMAZENADOS

INTRODUÇÃO	30
3.1 Pressões em uma massa granular	31
3.2. As pressões nas paredes e fundo de silos devidas ao produto armazenado	32

3.2.1 Pressões estáticas ou iniciais	33
3.2.2 Pressões dinâmicas ou de fluxo	41
3.2.2.1 Fundamentação teórica	41
3.2.2.2 Métodos para obtenção das pressões dinâmicas	43
3.3 Silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro	48
3.3.1 Pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro	50
3.3.1.1 Teorias para silos de baixa relação altura/diâmetro	51
3.3.1.2 Pressões em silos de baixa relação altura/diâmetro segundo as principais normas estrangeiras	53
3.3.1.3 Análise comparativa e discussão das principais normas estrangeiras em relação às pressões dinâmicas e adicionais	73
3.4 Considerações finais	77

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização das propriedades físicas dos produtos armazenados	80
4.2 Ensaio com o silo protótipo	81
4.3 Ensaio com o silo piloto	86
4.4 Considerações finais	97

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades físicas dos produtos armazenados	98
5.2 Cálculo teórico das pressões	100
5.2.1 Silo protótipo	102
5.2.1.1 Pressão horizontal – situação de carregamento e descarregamento	102
5.2.1.2 Pressão vertical no fundo do silo – situação de carregamento e descarregamento	105
5.2.2 Silo Piloto	108
5.2.2.1 Pressão horizontal – situação de carregamento e descarregamento	108
5.2.2.2 Pressão vertical no fundo do silo – situação de carregamento e descarregamento	112

5.2.3 Conclusões da análise dos resultados do cálculo teórico das pressões	116
5.3 Ensaaios	118
5.3.1 Silo protótipo	118
5.3.1.1 Análise e discussão das pressões horizontais obtidas experimentalmente	122
5.3.1.2 Análise e discussão das pressões verticais obtidas experimentalmente no fundo do silo	126
5.3.2 Silo piloto	129
5.3.2.1 Análise e discussão das pressões horizontais obtidas experimentalmente	133
5.3.2.2 Análise e discussão das pressões verticais obtidas experimentalmente no fundo do silo	154
5.3.2.3 Determinação experimental da relação entre a pressão horizontal e vertical, K, no silo piloto	159
5.4 Avaliação da força de compressão devida ao atrito por metro de parede na base do silo	160

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES	162
------------	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	166
-----------------------------------	-----

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – Notação dos parâmetro geométricos de um silo e pressões	09
FIGURA 02 – Classificação das células segundo o plano de ruptura	10
FIGURA 03 – Tipos básicos de fluxo durante o descarregamento	11
FIGURA 04 – Exemplos de silos quanto ao trajeto do fluxo	12
FIGURA 05 – Silos de fundo plano	12
FIGURA 06 – Formas mais comuns de silos com fundo tremonhado	13
FIGURA 07 – Lugar geométrico de deslizamento do produto	16
FIGURA 08 – Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede	17
FIGURA 09 – Dimensões do perfil da chapa de aço	24
FIGURA 10 – Pressões em uma massa granular	31
FIGURA 11 – Pressões no material granular em um silo	32
FIGURA 12 – Estado ativo x estado passivo	33
FIGURA 13 – Fatia elementar adotada por Janssen	34
FIGURA 14 – Modelo de Airy para pressões em silos	36
FIGURA 15 – Modelo de A & M Reimbert para obtenção das pressões	38
FIGURA 16 – Modelo de Bischara x Janssen e Reimbert – Pressões horizontais e verticais	41
FIGURA 17 – Pressão vertical no fundo plano segundo Bichara, 1985	41
FIGURA 18 – Pressões dinâmicas em fluxo de funil	42
FIGURA 19 – Modelo de Platnov e Kovtun para obtenção das pressões dinâmicas	44
FIGURA 20 – Modelo de Jenike para obtenção das pressões dinâmicas	46
FIGURA 21 – $p_{he}/\gamma d$ para silos cilíndricos, $h/d=2$	47
FIGURA 22 – Formas de um silo – Pieper, 1977	49
FIGURA 23 – Pressões exercidas pelo produto em silos de fundo plano de acordo com a teoria de Rankine	51
FIGURA 24 – Pressões exercidas pelo produto em silos de fundo plano de acordo coma teoria de Rankine-Calil	52
FIGURA 25 – Pressões no fundo de silos baixos de fundo plano segundo a norma ENV	55

FIGURA 26 – Distribuição da pressão horizontal ou de atrito em silos baixos segundo as normas ISO e ENV	55
FIGURA 27 – Linearização da pressão horizontal na parede de silo baixo segundo as normas ISO e ENV	56
FIGURA 28 – Distribuição da pressão horizontal e de atrito em silos baixos segundo a norma australiana AS	57
FIGURA 29 – Distribuição das pressões no fundo plano segundo a norma AS	58
FIGURA 30 – Parâmetros geométricos para a obtenção das pressões segundo a ANSI	60
FIGURA 31 – Parâmetros geométricos para o cálculo das pressões segundo a norma DIN	60
FIGURA 32 – Parâmetro geométricos segundo a norma inglesa BMHB	62
FIGURA 33(a) – Parâmetros geométricos para a obtenção das pressões segundo a norma francesa SNBATI – Superfície livre do produto plana	63
FIGURA 33(b) – Parâmetros geométricos para a obtenção das pressões segundo a norma francesa SNBATI – Superfície livre do produto em cone	63
FIGURA 34 – Coeficiente de sobrepressão de acordo com a norma ACI	67
FIGURA 35 – Pressão adicional segundo a norma ISO	68
FIGURA 36 – Aplicação da pressão adicional segundo a norma ENV em silos de parede espessa	69
FIGURA 37 – Aplicação da pressão adicional segundo a norma ENV em silos de parede fina	70
FIGURA 38 – Aplicação da pressão adicional segundo a norma DIN	71
FIGURA 39 – Parâmetros geométricos para aplicação da pressão adicional segundo a norma BMHB	73
FIGURA 40 – Características geométricas do silo para análise comparativa entre as normas	74
FIGURA 41 – Pressão horizontal dinâmica segundo as principais normas	75
FIGURA 42 – Características geométricas do silo protótipo	79
FIGURA 43 – Características geométricas do silo piloto	79
FIGURA 44 – Célula de pressão utilizada para medição direta das pressões	81
FIGURA 45 – Calibração das células de pressão	82
FIGURA 46 – (a) vista superior - (b) Vista frontal do silo protótipo ensaiado	83

FIGURA 47 – Posicionamento das células de pressão na parede e fundo do silo protótipo	83
FIGURA 48 – Instalação das células de pressão no silo piloto	84
FIGURA 49 – Etapas do ensaio no silo protótipo	85
FIGURA 50 – Execução da base da plataforma de madeira	86
FIGURA 51 – Plataforma do silo piloto	87
FIGURA 52 – Detalhe do registro para descarga no silo piloto	87
FIGURA 53 – Montagem da primeira parte do corpo do silo piloto	88
FIGURA 54 – Montagem da segunda parte do corpo do silo piloto	89
FIGURA 55 – Posicionamento das células de pressão na parede e no fundo do silo piloto para $h/d=0,98$	89
FIGURA 56 – Instalação das células de pressão para $h/d=0,98$	90
FIGURA 57 – Conexão das células de pressão ao sistema de aquisição de dados	91
FIGURA 58 – Etapas do carregamento e descarregamento do silo piloto para $h/d=0,98$	92
FIGURA 59 – Montagem do silo piloto para a realização dos ensaios com relação $h/d=1,25$ e $1,49$	93
FIGURA 60 – Posicionamento das células de pressão na parede e no fundo do silo piloto com $h/d=1,25$	94
FIGURA 61 – Posicionamento das células de pressão na parede e no fundo do silo piloto com $h/d=1,25$	94
FIGURA 62 – Detalhes da cobertura do silo piloto	95
FIGURA 63 – Etapas dos ensaios com $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$ no silo piloto	96
FIGURA 64 – Pressões horizontais teóricas para o silo protótipo - Carregamento	103
FIGURA 65 – Pressões verticais teóricas no fundo do silo protótipo - Carregamento	106
FIGURA 66 – Pressões horizontais teóricas para o silo piloto - Carregamento	108
FIGURA 67 – Pressões verticais teóricas no fundo do silo piloto – $h/d=0,98$	112
FIGURA 68 – Pressões verticais teóricas no fundo do silo piloto – $h/d=1,25$	113
FIGURA 69 – Pressões verticais teóricas no fundo do silo piloto – $h/d=1,49$	114
FIGURA 70 – Posicionamento das células de pressão no fundo do silo	118

protótipo

FIGURA 71 – Silo protótipo - Pressões dinâmicas nas células 1 e 6	118
FIGURA 72 – Silo protótipo - Pressões dinâmicas nas células 2 e 5	119
FIGURA 73 – Silo protótipo - Pressões dinâmicas nas células 3 e 4	120
FIGURA 74 – Silo protótipo - Pressões dinâmicas nas células da parede	121
FIGURA 75 – Pressões horizontais teóricas e experimentais para o silo protótipo – Carregamento	123
FIGURA 76 – Regressão linear x Modelo Rankine-Calil – Silo protótipo	124
FIGURA 77 – Ângulo de inclinação do funil desenvolvido no descarregamento – Silo protótipo	126
FIGURA 78 – Pressões verticais teóricas e experimentais para o silo protótipo - Carregamento	127
FIGURA 79 – Posicionamento das células de pressão no fundo do silo piloto	129
FIGURA 80 – Posicionamento das células de pressão na parede em cada relação h/d no silo piloto	130
FIGURA 81 – Ângulo de inclinação do funil desenvolvido no descarregamento – Silo piloto	132
FIGURA 82 – Pressões horizontais teóricas e experimentais – h/d=0,98 - Carregamento	133
FIGURA 83 – Pressões horizontais teóricas e experimentais – h/d=1,25 - Carregamento	134
FIGURA 84 – Pressões horizontais teóricas e experimentais – h/d=1,49 - Carregamento	135
FIGURA 85 – Ajuste linear x Modelo Rankine-Calil e Bischara – h/d=0,98	138
FIGURA 86 – Ajustes Estatísticos x Modelo Rankine-Calil e Bischara – h/d=1,25	138
FIGURA 87 – Ajustes Estatísticos x Modelo Rankine-Calil e Bischara – h/d=1,49	139
FIGURA 88 – Formulação proposta x Modelo Rankine-Calil e Bischara – h/d=1,25	140
FIGURA 89 – Formulação proposta x Modelo Rankine-Calil e Bischara – h/d=1,49	141
FIGURA 90 – Formulação proposta x pressões horizontais teóricas e experimentais para o silo protótipo – h/d=0,98	143

FIGURA 91 – Formulação proposta x pressões horizontais teóricas e experimentais para o silo piloto – $h/d=0,98$	143
FIGURA 92 – Formulação proposta x pressões horizontais teóricas e experimentais para o silo piloto – $h/d=1,25$	144
FIGURA 93 – Formulação proposta x pressões horizontais teóricas e experimentais para o silo piloto – $h/d=1,49$	144
FIGURA 94 – Valores experimentais x Normas, modelo Rankine-Calil e formulação proposta para o silo protótipo – $h/d=0,98$	148
FIGURA 95 – Valores experimentais x Normas, modelo Rankine-Calil e formulação proposta para o silo piloto – $h/d=0,98$	148
FIGURA 96 – Valores experimentais x Normas, modelo Rankine-Calil e formulação proposta para o silo piloto – $h/d=1,25$	149
FIGURA 97 – Valores experimentais x Normas, modelo Rankine-Calil e formulação proposta para o silo piloto – $h/d=1,49$.	149
FIGURA 98 – Pressões verticais teóricas e experimentais no fundo do silo piloto – $h/d=0,98$	154
FIGURA 99 – Pressões verticais teóricas e experimentais no fundo do silo piloto – $h/d=1,25$	155
FIGURA 100 – Pressões verticais teóricas e experimentais no fundo do silo piloto – $h/d=1,49$	155
FIGURA 101 – Pressão vertical: Formulação empírica x teóricas e experimentais – $h/d=0,98$	157
FIGURA 102 – Pressão vertical: Formulação empírica x teóricas e experimentais – $h/d=1,25$	157
FIGURA 103 – Pressão vertical: Formulação empírica x teóricas e experimentais – $h/d=1,49$	157
FIGURA 104 – Pressões verticais: Modelo empírico x pressões verticais teóricas e experiemntais para o silo protótipo	158

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – Classificação dos silos segundo a relação h/d	09
TABELA 02 – Emprego do limite inferior e superior das propriedades físicas dos produtos	15
TABELA 03 – Valores típicos do coeficiente de variação dos produtos segundo a norma australiana AS	19
TABELA 04 – Designação da superfície da parede do silo segundo a norma australiana AS	19
TABELA 05 – Densidade dos produtos comuns às normas ENV, ISO, AS, BMHB e DIN	21
TABELA 06 – Relação entre as pressões, K, dos produtos comuns às normas ENV, ISO, AS, BMHB e DIN	21
TABELA 07 – Coeficiente de atrito para parede lisa dos produtos comuns às normas ENV, ISO, AS, BMHB e DIN	22
TABELA 08 – Coeficiente de atrito para parede rugosa dos produtos comuns às normas ENV, ISO, AS, BMHB e DIN	23
TABELA 09 – Propriedades físicas do milho e da areia obtidos por Bischara, 1983	40
TABELA 10 – Coeficiente α para a determinação da altura total equivalente do produto, h, para armazenamento onde a superfície livre do produto forma um prisma trapesoidal segundo a ANSI	60
TABELA 11 – Coeficientes de sobrepressão indicados pelas principais normas estrangeiras para silos de baixa relação altura/diâmetro	65
TABELA 12 – Propriedades físicas do milho utilizado na análise comparativa entre as normas	75
TABELA 13 – Valores do parâmetro K e μ segundo as principais normas para análise das pressões	75
TABELA 14 – Valores do coeficiente de sobrepressão obtidos para cada uma das normas analisadas para o silo em questão, tendo como milho o produto armazenado	76
TABELA 15 – Valores das propriedades físicas do milho e da areia obtidos no ensaio de cisalhamento	99
TABELA 16 – Valores das propriedades físicas do milho e da areia fornecidos pelas principais normas estrangeiras	99

TABELA 17 – Percentagem que os valores obtidos experimentalmente para o ângulo de atrito interno do milho e da areia são maiores ou menores que os fornecidos pelas normas australiana, inglesa e alemã	99
TABELA 18 – Valores da relação entre pressões, K, fornecidos pelas normas estrangeiras para a areia e o milho	100
TABELA 19 – Valores de K em função do ângulo de atrito interno determinado experimentalmente	101
TABELA 20 – Percentagem que os valores de K obtidos experimentalmente a partir do ângulo de atrito interno do milho e da areia são maiores ou menores que os fornecidos pelas normas	101
TABELA 21 – Valores obtidos para a pressão horizontal no cálculo teórico das pressões do silo protótipo - kPa	104
TABELA 22 – Diferença percentual entre os valores teóricos das pressões horizontais obtidas com o modelo de Rankine-Calil e os modelos de Airy, Janssen, Reimbert e Bischara – Silo Protótipo	105
TABELA 23 – Coeficiente de sobrepressão para a pressão horizontal – Silo Protótipo	105
TABELA 24 – Valores obtidos para a pressão vertical no fundo plano na situação de carregamento no cálculo teórico das pressões do silo protótipo - kPa	106
TABELA 25 – Coeficiente de sobrepressão para a pressão vertical – Silo protótipo	107
TABELA 26 – Valores obtidos para a pressão horizontal no cálculo teórico das pressões do silo piloto com $h/d=0,98$ - kPa	109
TABELA 27 – Valores obtidos para a pressão horizontal no cálculo teórico das pressões do silo piloto com $h/d=1,25$ - kPa	109
TABELA 28 – Valores obtidos para a pressão horizontal no cálculo teórico das pressões do silo piloto com $h/d=1,49$ - kPa	109
TABELA 29 – Diferença percentual entre os valores das pressões horizontais obtidas com o modelo de Rankine-Calil e os modelos de Airy, Janssen, Reimbert e Bischara – $h/d=0,98$	110
TABELA 30 – Diferença percentual entre os valores das pressões horizontais obtidas com o modelo de Rankine-Calil e os modelos de Airy, Janssen, Reimbert e Bischara – $h/d=1,25$	110

TABELA 31 – Diferença percentual entre os valores das pressões horizontais obtidas com o modelo de Rankine-Calil e os modelos de Airy, Janssen, Reimbert e Bischara – $h/d=1,49$	111
TABELA 32 – Coeficiente de sobrepressão para a pressão horizontal para cada relação h/d instrumentada no silo piloto	111
TABELA 33 – Valores obtidos na situação de carregamento para a pressão vertical máxima no fundo plano no cálculo teórico das pressões do silo piloto com $h/d=0,98$ - kPa	112
TABELA 34 – Valores obtidos na situação de carregamento para a pressão vertical máxima no fundo plano no cálculo teórico das pressões do silo piloto com $h/d=1,25$ - kPa	113
TABELA 35 – Valores obtidos na situação de carregamento para a pressão vertical máxima no fundo plano no cálculo teórico das pressões do silo piloto com $h/d=1,49$ - kPa	114
TABELA 36 – Diferença percentual entre os valores obtidos no centro do silo e junto à parede com a formulação da norma australiana e os demais modelos analisados para a relação $h/d=0,98$	115
TABELA 37 – Diferença percentual entre os valores para a pressão vertical no centro do silo (c) e junto à parede (p) com a formulação $\gamma_u h$ e os demais modelos analisados em cada relação h/d instrumentada no silo piloto	116
TABELA 38 – Valores médios das pressões horizontais obtidas experimentalmente na parede do silo protótipo - Carregamento	122
TABELA 39 – Diferença percentual entre os valores obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil e os obtidos experimentalmente – Silo protótipo	124
TABELA 40 – Pressões obtidas experimentalmente – Carregamento Descarregamento – Silo protótipo	125
TABELA 41 – Variação percentual das pressões obtidas experimentalmente na fase de descarregamento – Silo protótipo	125
TABELA 42 – Pressões verticais obtidas experimentalmente no fundo do silo protótipo	126
TABELA 43 – Diferença percentual entre os valores das pressões verticais obtidos experimentalmente e os modelos teóricos – Silo protótipo	128
TABELA 44 – Pressões verticais e horizontais obtidas experimentalmente com o silo piloto em cada relação h/d ensaiada – Carregamento (kPa)	130

TABELA 45 – Valores médios das pressões obtidas experimentalmente na parede (P) e no fundo (F) em cada relação h/d ensaiada no silo piloto – Carregamento (kPa)	131
TABELA 46 – Pressões obtidas experimentalmente: Carregamento (C) e Descarregamento (D) – Silo piloto	132
TABELA 47 – Diferença percentual entre os valores obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil e Bischara e os obtidos experimentalmente – h/d=0,98	136
TABELA 48 – Diferença percentual entre os valores obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil e Bischara e os obtidos experimentalmente – h/d=1,25	136
TABELA 49 – Diferença percentual entre os valores obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil e Bischara e os obtidos experimentalmente – h/d=1,49	136
TABELA 50 – Diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente para a pressão horizontal e os obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil (R-C), Bischara e o modelo proposto com h/d=1,25 e 1,49	142
TABELA 51 – Diferença percentual entre os valores das pressões horizontais obtidas teoricamente e as obtidas experimentalmente – Silo protótipo – h/d=0,98	146
TABELA 52 – Diferença percentual entre os valores das pressões horizontais obtidas teoricamente e as obtidas experimentalmente – Silo piloto – h/d=0,98	146
TABELA 53 – Diferença percentual entre os valores das pressões horizontais obtidas teoricamente e as obtidas experimentalmente – Silo piloto – h/d=1,25	147
TABELA 54 – Diferença percentual entre os valores das pressões horizontais obtidas teoricamente e as obtidas experimentalmente – Silo piloto – h/d=1,25	147
TABELA 55 – Valores obtidos para a pressão horizontal no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo de Rankine-Calil e o modelo proposto – Silo protótipo - kPa	151

TABELA 56 – Valores obtidos para a pressão horizontal no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo de Rankine-Calil e o modelo proposto – Silo piloto – $h/d=0,98$ (kPa)	151
TABELA 57 – Valores obtidos para a pressão horizontal no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo de Rankine-Calil e o modelo proposto – Silo piloto – $h/d=1,25$ (kPa)	152
TABELA 58 – Valores obtidos para a pressão horizontal no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo de Rankine-Calil e o modelo proposto – Silo piloto – $h/d=1,25$ (kPa)	152
TABELA 59 – Diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente e os valores das pressões horizontais obtidas no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo de Rankine-Calil e o modelo proposto – Silo protótipo – kPa	153
TABELA 60 – Diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente e os valores das pressões horizontais obtidas no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo de Rankine-Calil e o modelo proposto – Silo piloto – $h/d=0,98$ (kPa)	153
TABELA 61 – Diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente e os valores das pressões horizontais obtidas no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo de Rankine-Calil e o modelo proposto – Silo piloto – $h/d=1,25$ (kPa)	153
TABELA 62 – Diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente e os valores das pressões horizontais obtidas no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo de Rankine-Calil e o modelo proposto – Silo piloto – $h/d=1,49$ (kPa))	154
TABELA 63 – Diferença percentual entre os valores das pressões verticais obtidas experimentalmente e as teóricas para cada relação h/d ensaiada no silo piloto	156
TABELA 64 – Diferença percentual entre os valores das pressões verticais obtidos experimentalmente e as teóricas para cada relação h/d ensaiada no silo piloto	158
TABELA 65 – Diferença percentual entre os valores das pressões verticais obtidos experimentalmente e os modelos teóricos e o empírico – Silo protótipo	159

TABELA 66 – Valores da relação entre pressões, K, obtidos experimentalmente	159
TABELA 67 – Valor teórico da relação entre pressões K, obtidos através das principais formulações e a respectiva diferença percentual em relação ao valor obtido experimentalmente	160
TABELA 68 – Valores médios da pressão vertical no fundo do silo para cada relação h/d ensaiada no silo piloto	160
TABELA 69 – Estimativa dos valores da força de compressão por metro de parede na base do silo piloto para cada relação h/d ensaiada	161
TABELA 70 – Valores da força de compressão por metro de parede na base do silo obtidos com a formulação de Janssen para cada relação h/d ensaiada no silo piloto e a respectiva diferença percentual entre essa formulação e a estimada	161

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS MINÚSCULAS

α	Ângulo de inclinação da parede da tremonha com a horizontal	[1]
α_s	Ângulo de inclinação com o eixo central do cone formado no fluxo de funil	[1]
d	Diâmetro do silo	[L]
dy	Incremento infinitesimal da ordenada y	[L]
dz	Incremento infinitesimal da ordenada z	[L]
ϕ_e	Efetivo ângulo de atrito interno do produto	[1]
$\phi_{e,l}$	Valor inferior do efetivo ângulo de atrito interno do produto	[1]
$\phi_{e,u}$	Valor superior do efetivo ângulo de atrito interno do produto	[1]
ϕ_i	Ângulo de atrito interno	[1]
$\phi_{i,l}$	Valor inferior do ângulo de atrito interno do produto	[1]
$\phi_{i,u}$	Valor superior do ângulo de atrito interno do produto	[1]
ϕ_r	Ângulo de repouso do produto	[1]
ϕ_w	Ângulo de atrito do produto com a parede	[1]
$\phi_{w,l}$	Valor inferior do ângulo de atrito do produto com a parede	[1]
$\phi_{w,u}$	Valor superior do ângulo de atrito do produto com a parede	[1]
γ	Peso específico do produto	[FL ⁻³]
γ_m	Valor médio da densidade do produto	[FL ⁻³]
γ_u	Valor superior da densidade do produto	[FL ⁻³]
h	Altura efetiva do silo	[L]
h_s	Altura do cone formado pela superfície livre do produto	[L]
h_t	Altura da transição	[L]
μ	Coefficiente de atrito do produto com a parede	[1]
μ_l	Valor inferior do coeficiente de atrito do produto com a parede	[1]
μ_u	Valor superior do coeficiente de atrito do produto com a parede	[1]
p_h	Pressão horizontal (normal) à parede do corpo do silo	[FL ⁻²]
p_v	Pressão vertical atuando sobre a seção transversal da massa	[FL ⁻²]
p_{vf}	Pressão vertical atuando no fundo plano	[FL ⁻²]
p_w	Pressão de atrito na parede	[FL ⁻²]
z	Ordenada a partir do nível de referência	[L]

LETRAS MAIÚSCULAS

A	Área da sessão transversal de um silo	[L ²]
EYL	Efetivo lugar geométrico de deslizamento do produto	[1]
IYL	Lugar geométrico de deslizamento do produto	[1]
K	Razão entre as pressões horizontal e vertical	[1]
K _a	Coeficiente de empuxo ativo	[1]
K _p	Coeficiente de empuxo passivo	[1]
K ₀	Coeficiente de empuxo em repouso	[1]
K _u	Valor superior de K	[1]
K _l	Valor inferior de K	[1]
P _{v,w}	Força de compressão devida ao atrito na base da parede	[FL ⁻¹]
U	Perímetro da seção A	[L]
W	Peso da cunha do produto	[F]
WYL	Lugar geométrico de deslizamento do produto na parede	[1]

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANSI	American National Standard Institute
AS	Australian Standard
BMHB	British Materials Handling Board
CFBC	Canadian Farm Building Code
DIN	Deutsche Norm
ENV	EUROCODE - European Committee for Standardization
ISO	International Organization for Standardization
SNBATI	Syndicat National du Béton Armé et des Techniques Industrialisées

RESUMO

FREITAS, Edna G.A. (2001). *Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano*. São Carlos, 2001. 175p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A armazenagem em fazenda necessita ser expandida de modo a propiciar um melhor equilíbrio de fluxos e funções entre as etapas da rede armazenadora. No Brasil, embora não se disponha de números exatos, sabe-se que armazenagem na fazenda é mínima, sendo estimada em torno de 4% a 7%, dependendo da região. Em geral, os silos utilizados para a armazenagem em fazenda apresentam baixa relação entre a altura do silo e o seu diâmetro ou lado (0,75 a 1,5) e fundo plano. Podem ser construídos com os mais diversos materiais, como concreto, madeira, argamassa armada etc., mas a predominância é a utilização de silos metálicos em chapa de aço ondulada. Apesar da intensa utilização destas unidades em todo o mundo, e serem as mais produzidas pela indústria, a previsão das pressões devidas ao produto armazenado é ainda divergente entre os pesquisadores e normas existentes. Este trabalho foi realizado em duas etapas: teórica e experimental. Na parte teórica, deu-se ênfase à análise comparativa das principais teorias e normas estrangeiras. Na parte experimental, foram feitos ensaios diretos em um silo protótipo com relação $h/d=0,98$ e um silo piloto para relações $h/d=0,98$, 1,25 e 1,49, ambos de chapa de aço ondulada, para obtenção das pressões horizontais na parede e verticais no fundo plano. Com base nos resultados experimentais propõe-se modelos empíricos para a determinação das pressões horizontais e verticais no fundo plano do silo para esse tipo de unidade armazenadora. Também determinou-se experimentalmente o valor do parâmetro K, concluindo-se que a formulação de Hartmann é a mais indicada para silos metálicos de chapa de aço ondulada.

Palavras-chave: Silos de baixa relação altura/diâmetro, parâmetro K, pressões.

ABSTRACT

FREITAS, Edna G.A. ***THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF LOADS IN SQUAT SILOS AND FLAT BOTTOM.*** SÃO CARLOS, 2001. 175P. TESE (DOUTORADO) – ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.

The farm storage must be expanded in order to offer a better balance of flows and functions among the stages of the storage system. In Brazil, it is known that storage in the farms is only about 4% to 7%, depending on the region. In general, the silos used for farm storage presents low ratio between the height of the silo and its diameter or side (0,75 to 1,5) and flat bottom. They can be built with different structural materials, as concrete, wood, ferrocement, etc., but the material predominance is corrugated steel. In spite of the intense use of these units all over the world, and its industry production, the pressures due the stored product is still divergent between the researchers and existent codes. This work was accomplished in two stages: theoretical and experimental. The theoretical part corresponds to the comparative analysis of the main theories and foreign codes. The experimental part corresponds to load tests using pressure cells in a silo prototype of relationship $h/d=0,98$ and a pilot silo for relationships $h/d=0,98$, 1,25 and 1,49, both of corrugated steel, for obtaining of the horizontal wall pressures and vertical pressures in the flat bottom. Based in the experimental results empiric models for the determination of the horizontal and vertical pressures in the bottom are proposed. The value of the parameter K, was also experimentally determined and the results showed that the formulation of Hartmann is the most suitable for metallic silos of corrugated steel plates.

Keywords: Silos of low relationship height/diameter, parameter K, pressures.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O Brasil conta com uma produção rural ainda pequena para as suas necessidades e para o potencial agrícola de que dispõe.

Mesmo havendo um expressivo déficit de produção e conseqüente importação de alimentos, é significativa a atividade rural brasileira e espera-se que a expansão se dê não só na abertura de novas fronteiras agrícolas, mas na busca também da eficácia, da qualidade, da produtividade e no combate intransigente ao elevado desperdício estimado em 10%, só no que diz respeito à armazenagem, isto como conseqüência, principalmente, dos métodos de manejo e do armazenamento inadequados e das condições construtivas dos silos.

Produzir grãos cada vez mais difere do simples "lançar" a semente ao solo e colher. Diz respeito a toda uma estrutura de recursos financeiros, produtos, tecnologia, correção do solo e clima.

Para a produção agrícola a ser atingida nos próximos anos, são necessários investimentos em armazenagem de boa qualidade, localizada de forma estratégica, com prioridade para o produtor rural.

A armazenagem em fazenda necessita ser expandida de modo a propiciar um melhor equilíbrio de fluxos e funções entre as etapas da rede armazenadora. No Brasil, embora não se disponha de números exatos, sabe-se que armazenagem na fazenda é mínima, sendo estimada em torno de 4% a 7%, dependendo da região, enquanto, na Europa e nos Estados Unidos, é em torno de 40% a 60% e, no Canadá, a estimativa é que 80% da produção são armazenados na propriedade rural privada, ficando o restante distribuído pelos sistemas reguladores e terminais, isto é, os que são localizados em centros polarizadores de distribuição, com o objetivo de regular e escalonar os fluxos em direção aos centros de consumo e aos

terminais portuários e os que efetuam a movimentação da produção agrícola para fins de exportação e importação.

O armazenamento em fazenda constitui prática de suma importância, tanto para complementar a estrutura armazenadora quanto para minimizar as perdas em quantidade e qualidade a que estão sujeitos os produtos colhidos.

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.

Em geral, os silos utilizados para a armazenagem em fazenda apresentam baixa relação entre a altura do silo e o seu diâmetro ou lado (0,75 a 1,5) e fundo plano. Isto se justifica pelo grande aumento da capacidade do silo com o aumento do seu diâmetro e também porque a manipulação de silos baixos é mais fácil e de menor custo (CALIL JR., 1987).

Podem ser construídos com os mais diversos materiais, como concreto, madeira, argamassa armada, etc., mas a predominância é a utilização de silos metálicos em chapa galvanizada corrugada. Segundo HAYNAL (1989), o silo fabricado em concreto armado torna-se muito oneroso para o agricultor, principalmente para o de porte médio. Segundo ele, o concreto armado é mais apropriado para armazéns graneleiros e só é viável economicamente a partir de uma capacidade de cinco mil toneladas. Com esse tamanho ou mais, seu custo passa a ser equivalente ao do silo metálico. O silo metálico serve a qualquer tipo de grão, tendo como vantagem mais destacada a possibilidade de se conseguir uma armazenagem livre de ratos e pragas, o que não ocorre com os armazéns convencionais que precisam de desinfecção tanto do ambiente quanto da sacaria.

Apesar da intensa utilização destas unidades em todo o mundo, e de serem as mais produzidas pela indústria, a previsão das pressões exercidas pelo

produto armazenado é ainda divergente entre os pesquisadores e normas existentes.

1.1 O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA EM SILOS

Segundo AYUGA (1995), o interesse mundial em estruturas de armazenagem está baseado em três razões principais. Estas razões são:

- Interesse econômico. O armazenamento de produtos a granel é fundamental no mundo industrial e são realizados grandes investimentos públicos e privados em estruturas de armazenamento em todos os países do mundo.
- Interesse científico. Os silos são estruturas complexas onde se combinam comportamentos estruturais de produtos diferentes e com situações muito diversas. É por isso que, ainda hoje, depois de um século de pesquisa, existem grandes lacunas de conhecimento que encorajam numerosos pesquisadores do mundo todo.
- Interesse social. Durante muitos anos os silos foram personagens principais de um grande número de ruínas, afundamentos, explosões, combustão etc. Seguramente é o tipo de estrutura com mais porcentagem de sinistros.

As diferentes contribuições em pesquisa e tecnologia, que todos os países têm realizado, geralmente chegaram ao conhecimento comum dos técnicos pelas diferentes normas de cálculo de silos elaboradas. Neste sentido é lamentável que o Brasil não disponha de norma própria, com exceção de duas referências a terminologias para silos de grãos vegetais TB-374 e TB-377.

As recomendações das normas estrangeiras para a previsão das pressões devidas ao produto armazenado, de um modo geral, são baseadas em duas fontes: experimentos nos quais as pressões são medidas em silos reais ou em modelos de silos, e em modelos teóricos. Uma dificuldade imediata aparece devido ao limitado campo de aplicação dos experimentos disponíveis. Em particular, muito poucas observações experimentais são avaliáveis para silos de baixa relação altura/diâmetro ou lado (CALIL JR., 1990), o que, de acordo com BROWNC.J & NIELSEN J. (1998), atualmente é o tipo de unidade armazenadora que mais necessita de pesquisas tendo em vista sua tendência mundial de popularização.

RAVENET (1992) também observa que cada tipo de instalação requer um tratamento específico de projeto e, geralmente, não é considerada a relação altura/diâmetro ou lado, mas que somente especialistas como Airy e Safarian levaram em conta isto.

Muitos resultados importantes têm sido obtidos de experimentos. É largamente aceito que devem ser esperadas sobrepressões durante a descarga. Entretanto são verificadas grandes diferenças entre as grandezas das pressões observadas e na posição e dimensão das zonas da parede exposta à sobrepressão em ensaios diferenciados em silos semelhantes. Segundo CALIL JR. (1990), estas diferenças podem se atribuídas, principalmente, a dois fatores: técnica experimental mal utilizada e a variabilidade das propriedades do produto e tipo de fluxo.

Segundo ASKEGAARD et al, (1971) citado por CALIL JR.(1990), muitas das observações que formam a base de recomendações correntes, para previsão das pressões devidas ao produto armazenado, podem ter sido feitas com a instalação insatisfatória de células de pressão.

Também, em muitos experimentos, na determinação de pressões em silos, é assumido que somente uma variação limitada de controle de medidas é necessária para o produto armazenado, como: densidade, ângulo de atrito interno e ângulo de atrito com a parede. Segundo ele, não existe certeza de que estes parâmetros são suficientes ou mesmo os melhores parâmetros para as medidas. Outro fator citado por CALIL JR. (1990) é que muitos pesquisadores dedicam pouca atenção ao tipo de fluxo do produto durante a descarga. Há uma evidência incontestável de que as pressões no descarregamento são fortemente influenciadas pelo tipo de fluxo e que as observações feitas em um silo apresentando um determinado tipo de fluxo não podem ser usadas no cálculo de silos com outro tipo de fluxo.

Segundo CALIL JR. (1997), atualmente coexistem três grupos de pesquisa claramente definidos: os que estudam as ações e deformações em silos reais e modelos reduzidos, os que se dedicam a melhorar os modelos do comportamento dos produtos (leis constitutivas dos produtos armazenados) e os que estudam os esforços nas estruturas tanto estáticos como dinâmicos, normalmente com base no método dos elementos finitos.

Para uma estrutura ser segura e econômica, é importante que as cargas não sejam subestimadas nem especificadas como maiores que as estritamente necessárias. Segundo MCLEAN (1985), existe uma grande dificuldade de obtenção

das ações reais exercidas pelo produto armazenado nas paredes e fundo do silo e esta dificuldade deve-se às seguintes razões:

1. comportamento de produtos granulares não está completamente entendido nem quantitativamente predito,
2. a interação complexa entre o produto e a estrutura de contenção não é quantificada convenientemente,
3. a heterogeneidade do produto armazenado,
4. a variação das propriedades físicas dos produtos armazenados, e
5. as variadas situações de armazenamento e arranjos.

Um exame dos códigos normativos e regulamentações de cálculo por todo o mundo indica que grandes diferenças existem entre as recomendações para as ações em silos. Além disso, as ações têm sido progressivamente aumentadas, em anos recentes, em consequência das rupturas e acidentes ocorridos em silos em todos os lugares.

1.2 PESQUISAS REALIZADAS EM SILOS NO DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS DA EESC-USP

Com o objetivo de contribuir tanto para a racionalização do projeto e construção de silos como para a comprovação das teorias existentes na área, o Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo possui uma linha de pesquisa para a investigação da estrutura de silos. Até o momento foram desenvolvidos diversos trabalhos de Mestrado e Doutorado. CALIL (1978), em sua dissertação de Mestrado "Silos de Madeira", propõe projeto de silo de madeira para pequeno produtor. CALIL (1982), em sua tese de Doutorado "Sobrepresiones en las Paredes de los Silos para Almacenamiento de Productos Pulverulentos Cohesivos", realiza estudo das pressões em silos verticais para armazenamento de produtos pulverulentos coesivos. FORTES FILHO (1985), em sua dissertação de Mestrado "Uma Introdução ao Estudo dos Silos" aborda a problemática dos silos de maneira ampla e suficientemente profunda para as aplicações correntes, apoiando-se em uma análise de estudos teóricos e experimentais realizados por diversos autores. VAZ (1987), em sua dissertação de Mestrado "Silos Verticais de Madeira Compensada", apresenta uma proposta de silos de madeira prismático de seção hexagonal para o pequeno produtor. COUTO (1989), em sua dissertação de Mestrado "Contribuição ao Estudo dos Silos de Argamassa Armada para Armazenamento de Cereais",

realiza estudo teórico e experimental sobre as argamassas e suas dosagens para um silo cilíndrico. ESTEVES (1989), em sua dissertação de Mestrado "Silos Metálicos de Chapa Corrugada", apresenta estudo teórico e experimental de um protótipo de silo metálico cilíndrico de chapas corrugadas enfatizando o estudo das ligações. CALIL (1990), em sua tese de Livre - Docência "Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais", realiza estudo teórico experimental das principais normas estrangeiras para o projeto e construção de silos, propondo recomendações para o projeto e dimensionamento de silos com ênfase à normalização destas estruturas. SILVA (1993), em sua tese de Doutorado "Estudo da Variabilidade de Pressões em Silos" realiza estudo das pressões em silos sob o ponto de vista probabilístico, com ênfase na análise da variabilidade das propriedades dos produtos armazenados e sua influência nas pressões. MILANI (1993), em sua tese de Doutorado "Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados para o Projeto de Pressões e Fluxo em Silos", apresenta proposta de metodologia de ensaio para produtos granulares e pulverulentos utilizando o equipamento de translação "Jenike Shear Cell". FASSONI (1994), em sua dissertação de Mestrado "Sistema Construtivo Modular em Madeira para Silos Horizontais", apresenta proposta de projeto de silo horizontal de madeira para pequeno produtor, usando peças maciças e chapas de compensado e geometria retangular. GOMES (1994), em sua dissertação de Mestrado "Silos de Madeira para Armazenamento de Laranjas", propõe o projeto de silo prismático de madeira de reflorestamento, formulando uma proposta de protótipo com os detalhes construtivos de projeto utilizando peças de pinus e eucalipto. MANFRIN (1994), em sua dissertação de Mestrado "Um Estudo dos Silos para Açúcar: Propriedades Físicas do Material Armazenado, Recomendações Construtivas e Análise Estrutural", analisa as condições ideais que o açúcar deve apresentar para uma adequada armazenagem, bem como avalia a distribuição dos esforços solicitantes em um silo de açúcar a partir do confronto entre uma análise discreta e outra contínua. NASCIMENTO (1996), em sua tese de Doutorado "Estudo de Silos Prismáticos para a Fábrica de Ração", realiza estudo teórico e experimental dos painéis de chapas conformadas horizontalmente para a construção de silos multicelulares para fábricas verticais de ração. ARAÚJO (1997), em sua tese de Doutorado "Estudo Teórico Experimental de Tremonhas Piramidais para Silos Metálicos Elevados", realiza estudos para a determinação dos esforços em tremonhas enrijecidas e não enrijecidas por análise numérica e experimental

confrontando os métodos utilizados. ANDRADE Jr. (1998), em sua dissertação de Mestrado “Análise Estrutural das Chapas Metálicas de Silos e de Reservatórios Cilíndricos”, procura dispor conceitos claros e distintos do comportamento e dos fenômenos de perda de estabilidade do equilíbrio de reservatórios e silos, bem como estabelece configurações estruturais que apresentam maiores riscos à flambagem e fornece relações de diâmetro/espessura e de diâmetro/altura em que é possível evitar os problemas advindos da perda de estabilidade do equilíbrio. GOMES (2000), em sua tese de doutorado “Estudo Teórico e Experimental das Ações em Silos Horizontais”, compara resultados teóricos com os obtidos através de medições diretas das pressões em modelo piloto e silo horizontal real e também a relação entre as pressões horizontais e verticais, K . Com base nos resultados obtidos, propõe um novo método de cálculo com base em um modelo empírico para a determinação das pressões horizontais nessas unidades.

Dando continuidade nesta linha de pesquisa, este trabalho tem por objetivo o estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano para armazenamento de produtos de fluxo livre bem como a determinação experimental da relação entre a pressão horizontal e a vertical, K , com a finalidade de propor um modelo empírico para a previsão das pressões devidas ao produto armazenado nestas unidades.

CAPÍTULO 2

DEFINIÇÕES E CONCEITOS

2.1 SILOS

Silo é o nome genérico para todos os tipos de construção para armazenamento de produtos granulares ou pulverulentos; geralmente é equipado com dispositivos de descarga e capaz de ser esvaziado por gravidade, preferencialmente, ou através de meios mecânicos ou pneumáticos.

Denomina-se célula o compartimento onde fica armazenado o produto. Um silo pode ter uma célula (silo unicelular) ou mais células (silo multicelular). A seção transversal da célula poderá ser circular, quadrada, retangular ou mesmo poligonal, de acordo com a necessidade.

Os silos podem ser construídos com os mais variados materiais como concreto armado, fibra de vidro, chapas de aço lisas ou onduladas, madeira, alvenaria de blocos cerâmicos ou de concreto.

A figura 1 apresenta os principais parâmetros geométricos de um silo e a notação das pressões devidas ao produto armazenado.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SILOS

Segundo as normas estrangeiras, os silos podem ser classificados de acordo com as seguintes características:

- geometria do silo
- tipo de fluxo durante o descarregamento
- geometria do fluxo
- tipo de fundo

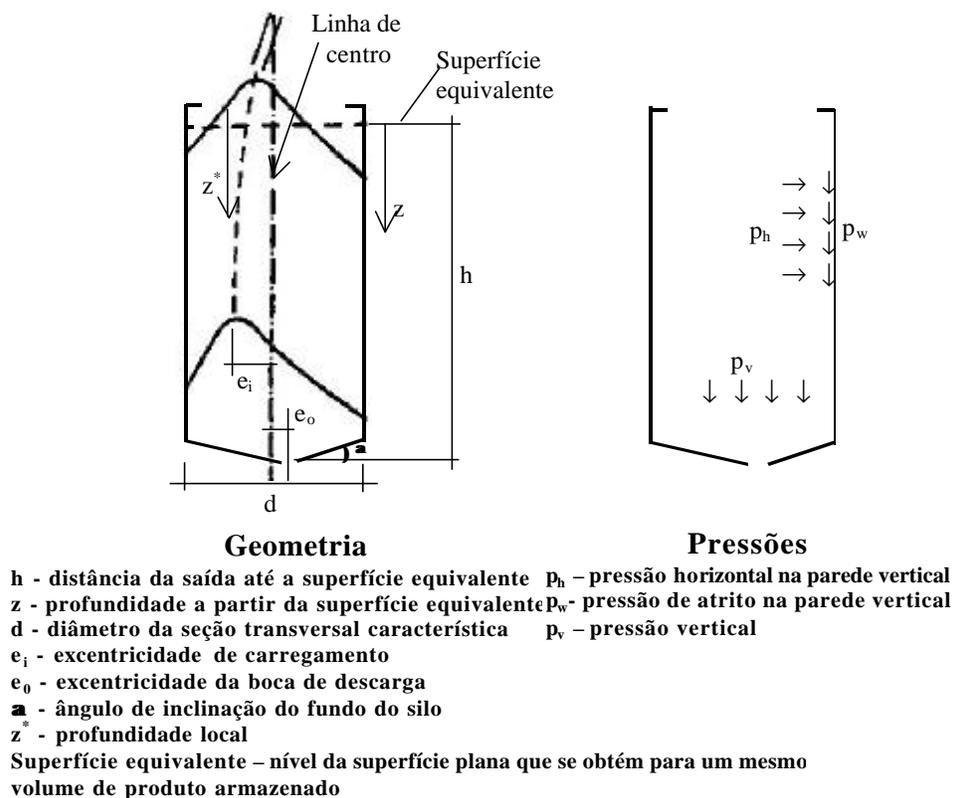


FIGURA 1 – Notação dos parâmetros geométricos de um silo e das pressões

Em relação à geometria, os silos são classificados segundo a relação entre a altura efetiva do produto armazenado (h) e o maior diâmetro inscrito (d). No entanto, as normas estrangeiras não são unânimes em relação a essa classificação, como indica a tabela 1.

TABELA 1 – Classificação dos silos segundo a relação h/d

Norma	Classificação		
	Baixo	Medianamente esbelto	Esbelto
Australiana AS-1996	$h/d < 1$	$1 \leq h/d \leq 3$	$h/d > 3$
Eurocode(ENV)-1995			
ISO-1997	$h/d < 1,5$	---	$h/d \geq 1,5$
Americana ACI-1991*	$h/d \leq 2$	---	$h/d > 2$
Alemã DIN-1987*	$h/d < 2,5\mu$	$2,5\mu \leq h/d \leq 5\mu$	$h/d > 5\mu$
Inglesa BMHB-1985	$h/d \leq 1,5$	---	$h/d > 1,5$
Canadense CFBC-1983	$h/d \leq 0,75$	---	$h/d > 0,75$
Francesa SNABTII-1975	$h/d < 2,5$	---	$h/d \geq 2,5$

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

Segundo SAFARIAN e HARRIS (1985), entre os pesquisadores também não há consenso em relação ao que seja uma célula alta ou baixa. Alguns fazem essa classificação em relação às proporções da célula e outros em relação à posição do plano de ruptura do produto. Em geral a relação $h/d < 1,5$, onde h é a altura como indicado na figura 1 e d o diâmetro ou lado da célula, classifica a célula como baixa e, caso contrário, como alta.

A classificação em relação ao plano de ruptura é dada pela teoria de Coulomb. Não levando em conta o atrito com a parede, para o caso de uma parede vertical e superfície de topo horizontal, o plano de ruptura de Coulomb está entre o ângulo de repouso (ϕ_r) e a parede vertical. De acordo com A. Reimbert, apud Safarian e Harris (1985), o ângulo de ruptura deveria ser dado por $(45^\circ - \phi_r/3)$ em lugar da definição clássica $(45^\circ - \phi_r/2)$, ambos mostrados de figura 2. Se o plano de ruptura intercepta o topo da superfície do produto armazenado, a célula é considerada baixa, caso contrário é considerada alta.

Porém, muitos projetistas não concordam com o local do plano de ruptura. Alguns começariam o plano no fundo da tremonha, ponto C da figura 2(b), enquanto outros passariam isto para o ponto D, no fundo da parede vertical. Assim, através de uma interpretação, a célula seria considerada alta e, pela outra, baixa. Felizmente, para tais casos incertos, classificação exata não é crítica (SAFARIAN e HARRIS, 1985).

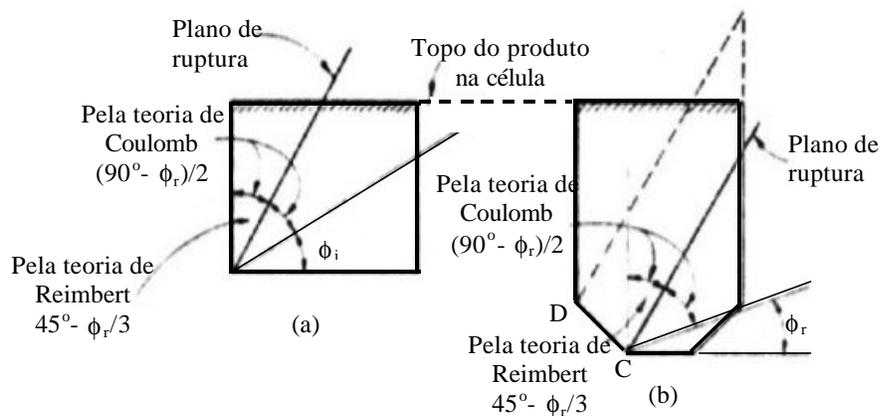


FIGURA 2 – Classificação das células segundo o plano de ruptura

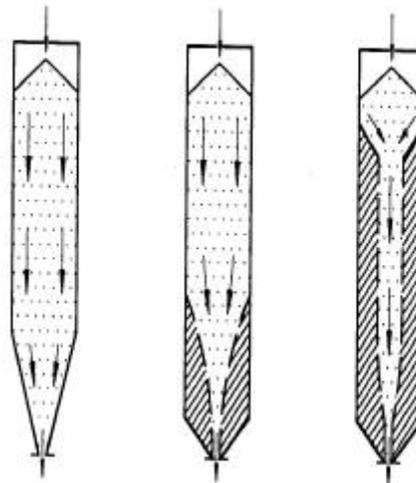
As estruturas baixas para armazenamento de produtos a granel, coesivos ou não, são denominadas na língua inglesa, de squats. A denominação silos, em geral, se refere a células altas.

O tipo de fluxo caracteriza o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. Determina também a distribuição das pressões nas paredes do silo e fundação, e a integridade e custo da construção (CALIL, 1997).

O modo como um produto fluirá por gravidade em um silo é governado, por um lado, pelas próprias propriedades físicas do produto e, por outro, pela geometria e estrutura da superfície (atrito com a parede) da tremonha. Em geral podem ser distinguidos dois tipos principais de fluxo: fluxo de massa e fluxo de funil.

- (a) Fluxo de massa: fluxo no qual todas as partículas armazenadas estão em movimento do começo até o fim do descarregamento.
- (b) Fluxo de funil: caracterizado pela formação de um canal de partículas em movimento dentro de uma zona limitada, enquanto o produto adjacente à parede permanece estacionário.

A figura 3 ilustra os tipos de fluxo durante o descarregamento.



(a) Fluxo de massa

(b) Fluxo de funil

FIGURA 3 - Tipos básicos de fluxo durante o descarregamento

Quanto à geometria, o fluxo pode ter:

- (a) Trajeto axissimétrico: o centro de gravidade do produto fluindo coincide aproximadamente com o eixo vertical do silo, por exemplo, silo circular com abertura de descarga concêntrica (figura 4(a)).

- (b) Trajeto planar: É um fluxo uniforme que ocorre em silos de seção transversal retangular ou quadrada, com tremonhas em forma de cunha, onde uma das dimensões da boca de saída é paralela e de igual comprimento às paredes do silo. Neste caso, o canal do fluxo é simétrico em relação ao plano que passa pelo eixo longitudinal da abertura de saída (figura 4(b)).
- (c) Trajeto excêntrico: o canal do fluxo não é simétrico em relação ao eixo vertical do silo, ou em relação ao plano vertical que passa pelo eixo longitudinal do silo (figura 4(c)).

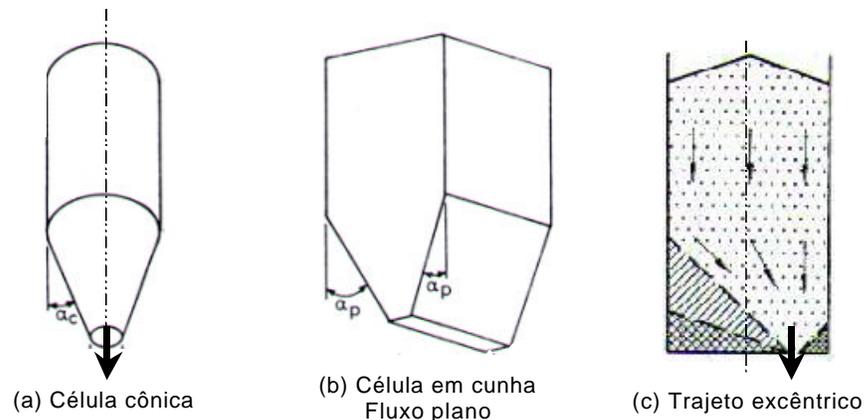


FIGURA 4 – Exemplos de silos quanto ao trajeto do fluxo

Quanto ao tipo de fundo, os silos podem ter:

- (a) fundo plano: silo de fundo horizontal ou um fundo com paredes inclinadas de um ângulo $\alpha \leq 20^\circ$ com relação a horizontal.

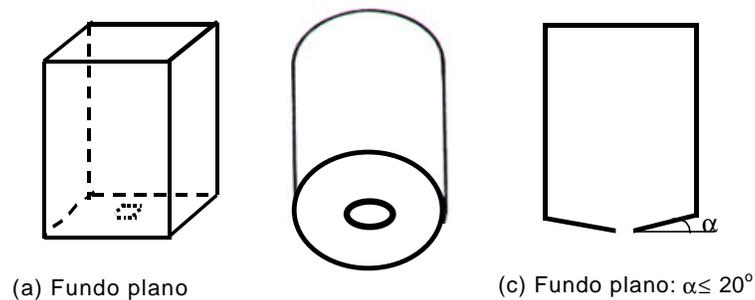
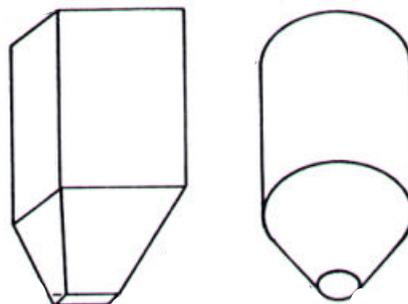


FIGURA 5 – Silos de fundo plano

- (b) fundo com tremonha: fundo em forma de funil, cujas formas mais comuns são as tronco-piramidais (figura 6(a)) e as tronco-cônicas (figura 6(b))



(a) Tremonha piramidal (b) Tremonha cônica

FIGURA 6 – Formas mais comuns de silos com fundo tremonhado

2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PRODUTOS ARMAZENADOS

Os produtos armazenados nos silos possuem propriedades físicas que têm um importante papel no comportamento de pressões que o produto exerce sobre as paredes verticais e fundo. Apesar disso, não há ainda consenso sobre suas formas de determinação, e seus valores variam significativamente entre as normas existentes.

Diversos autores vêm estudando o comportamento dessas propriedades nas fases de operação de um silo (carregamento, armazenamento e descarga) e, também, procedimentos para a sua determinação que traduzam, de forma realística, esse comportamento.

JENIKE (1964), em busca de uma forma adequada de medir tais propriedades, analisou inicialmente a aplicabilidade de equipamentos de teste utilizados em solos. Diante de resultados considerados não satisfatórios, decidiu desenvolver um aparelho de cisalhamento direto apropriado para produtos a serem armazenados. O aparelho denominado "Jenike Shear Cell" tem sido usado, desde então, por diversos pesquisadores, embora algumas limitações tenham sido mencionadas (BENINKE, 1989), tais como a baixa velocidade de cisalhamento e o limitado deslocamento.

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

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

- granulometria, ρ
- peso específico, γ
- ângulo de atrito interno, ϕ_i
- ângulo de atrito efetivo, ϕ_e
- ângulo de atrito com a parede, ϕ_w

Segundo ROTTER et al. (1998), uma descrição completa de todas as propriedades pertinentes a um produto granular é atualmente impossível, pois ainda não são conhecidos todos os parâmetros que deveriam ser medidos, nem como algumas das propriedades conhecidas deveriam ser medidas. Também segundo eles, os ensaios para a obtenção das propriedades físicas dos produtos com o objetivo de projeto de silos, não são iguais aos ensaios para caracterização do produto de silo para pesquisa científica. Os ensaios com os produtos para objetivos de projeto devem identificar as piores condições que podem acontecer durante a vida operacional do silo e os ensaios para caracterização de produtos usados em pesquisa devem ser os mais representativos possíveis das condições reais.

ROTTER et al. (1998) também definem comparativamente os termos 'propriedade' e 'parâmetro'. Segundo eles, uma propriedade de um produto é um comportamento com respeito a influências externas (pressão, adensamento, etc.), enquanto um 'parâmetro' é uma constante matemática que aparece em um modelo matemático e tenta descrever a propriedade ou uma parte dela.

Os parâmetros mais comuns para os quais deverão ser obtidas as propriedades são os que aparecem nas equações de Janssen e de Jenike, conforme será visto mais adiante.

Tendo em vista que as propriedades dos produtos armazenados em silos podem variar durante a vida útil do silo, CALIL JR (1997) propõe, de acordo com a

norma australiana AS (1996), que, em termos de projeto, deverão ser determinados dois limites para cada parâmetro, de modo a delimitar a sua faixa de variação e, com isso, obter-se as combinações mais desfavoráveis para cada caso. Estes limites são o menor valor possível (limite inferior) e o maior valor possível (limite superior) para o parâmetro considerado durante a vida útil do silo. A tabela 2 apresenta o emprego adequado dos limites das principais propriedades de acordo com o objetivo.

TABELA 2 - Emprego do limite inferior e superior das propriedades físicas dos produtos

APLICAÇÃO DA PROPRIEDADE		Peso específico do produto (ρ)	Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w)	Ângulo de atrito interno (ϕ_i)	Relação entre a pressão horizontal e vertical (K)
Tipo de fluxo	Funil	Inferior	Superior	Inferior	–
	Massa	Inferior	Inferior	Superior	–
Cálculo da máxima pressão horizontal na parede do silo, p_h		Superior	Inferior	Inferior	Superior
Cálculo da máxima pressão vertical, p_v		Superior	Inferior	Superior	Inferior
Força máxima de atrito na parede do silo, p_w		Superior	Superior	Inferior	Superior
Carga vertical máxima na tremonha		Superior	Inferior	Superior	Inferior

CALIL JR (1997) também alerta que, para qualquer das propriedades físicas, se deve verificar a consistência dos resultados, como, por exemplo, o fato que o ângulo de atrito do produto com a parede, ϕ_w , é menor ou igual ao ângulo de atrito interno, ϕ_i , e o ângulo efetivo de atrito interno, ϕ_e , é sempre maior que ϕ_i .

A seguir serão feitas algumas considerações sobre a obtenção das principais propriedades físicas dos produtos através da teoria de Jenike, ou seja, através da obtenção dos lugares geométricos de deslizamento do produto com ele mesmo e com a parede.

Ângulo de atrito interno - Efetivo ângulo de atrito interno

Para uma dada condição de consolidação, o lugar geométrico de deslizamento de produtos granulares de fluxo livre sobre si mesmo é a reta obtida no plano σ - τ , pelo cisalhamento de uma amostra do produto sob várias cargas normais. Com as tensões principais σ_1 e σ_2 atuantes em um elemento do produto armazenado para uma dada condição de consolidação, é construído o respectivo círculo de Mohr. A reta que tangencia todos os círculos é então chamada de lugar geométrico de deslizamento do produto (IYL). O ângulo de inclinação dessa reta

que, para produtos de fluxo livre passa pela origem, é então chamado de ângulo de atrito interno do produto, ϕ_i (Figura 7(a)). 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 efetivo lugar geométrico de deslizamento (EYL) e o respectivo ângulo de inclinação denominado efetivo ângulo de atrito interno, ϕ_e (Figura 7(b)). Das definições de IYL e EYL, pode-se concluir que, para produtos de fluxo livre, $\phi_i = \phi_e$.

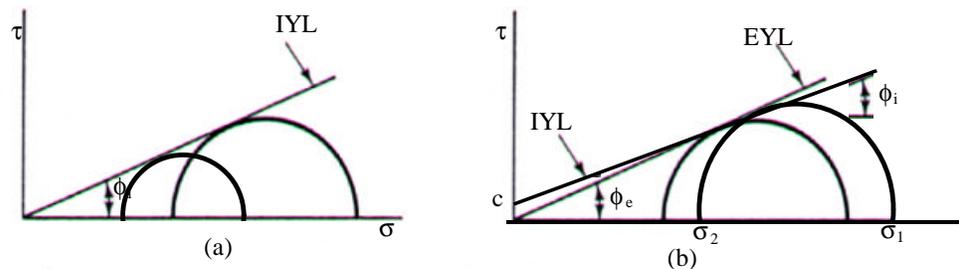


FIGURA 7 – Lugar geométrico de deslizamento do produto

Ângulo de atrito do produto com a parede

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

O 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 8(a). 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 da parede e o produto não segue exatamente este conceito ideal e um WYL um pouco curvado é obtido, como dado pela linha c. O ângulo de inclinação da reta que define o lugar geométrico de deslizamento da parede é denominado ângulo de atrito do produto com a parede, ϕ_w .

No caso das linhas a e b, um valor constante pode ser obtido do ângulo entre o WYL e o eixo das pressões normais σ . Para materiais correspondentes à linha c, em que a relação $\tau_w/\sigma_w = \tan\phi_w$ não é uma constante, mas depende do nível de tensão normal, pode-se definir como ângulo de atrito aquele da inclinação da linha que passa pela origem e pelo ponto de interesse no WYL para uma dada condição de consolidação, ϕ'_w , indicado na figura 8(b). Esta definição tem a vantagem principal que, em todos os casos, a real relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal ao longo da parede é obtida.

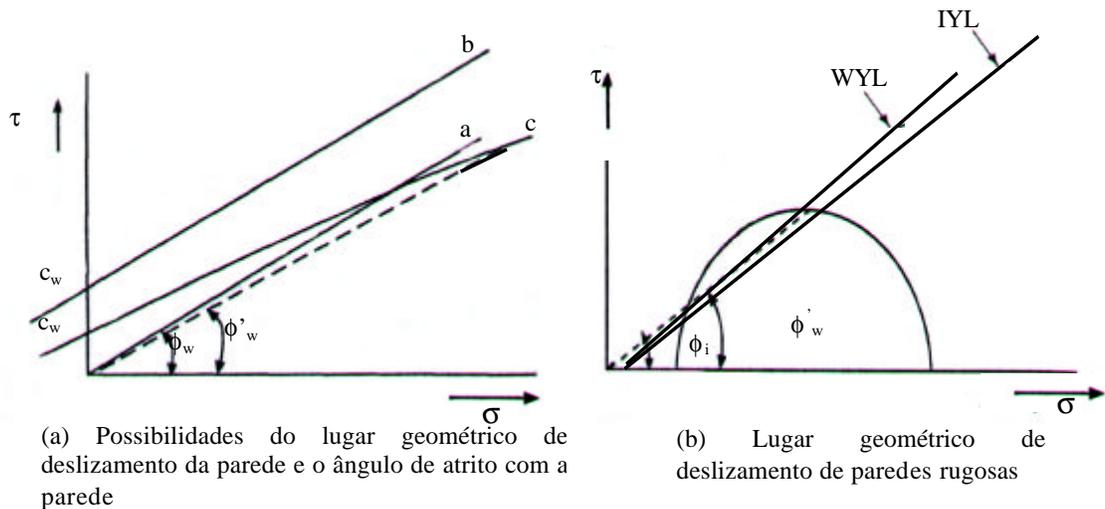


FIGURA 8 – Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede

Em alguns casos é possível que, devido à coesão, o ângulo de atrito com a parede seja maior que o do ângulo de atrito interno ϕ_i , como definido anteriormente. Isto acontece quando uma fina camada de material gruda na parede e o deslizamento acontece ao longo desta camada. Esta situação é chamada de superfície rugosa. Para estes casos, Jenike (1970), citado por HAAKER (1998), sugere tomar o ângulo de atrito com a parede um pouco menor que o ângulo de atrito interno, devido ao alisamento da camada estática aderida (figura 8(b)). Isto implica que $\tan\phi_w = \sin\phi_i$, e a situação de tensão como determinada para o ponto de topo do círculo de Mohr é correspondente a um plano de deformação máxima.

Peso específico do produto

A peso específico do produto é muito simples de ser obtida com o aparelho de Jenike: após o ensaio, pesa-se toda a célula, isto é, a célula mais o produto,

subtrai-se o peso próprio da célula e divide-se a diferença pelo volume conhecido da célula.

2.3.1 Limite inferior e superior das propriedades físicas dos produtos

Vários pesquisadores e normas estrangeiras propõem diferentes formas de obtenção do limite superior e inferior das propriedades físicas dos produtos.

McLEAN (1985), citando PHAN (1983), sugere que o valor médio obtido para o ângulo de atrito interno seja somado e subtraído de 10° e o ângulo de atrito do produto com a parede, de 5° , para a obtenção dos respectivos limites superiores e inferiores. Ele alerta também que o limite superior do ângulo de atrito com a parede seja menor ou igual ao ângulo de atrito interno. Quanto ao peso específico, ele indica que deverá ser adotado um valor conservativo para o cálculo das pressões em termos de projeto.

As normas europeias ISO-1997 e ENV-1995 propõem que, para a obtenção do limite superior e inferior das propriedades físicas dos produtos, o valor médio seja multiplicado respectivamente por 1,15 e 0,9, tanto os valores fornecidos em tabelas pela própria norma, como para valores obtidos experimentalmente. A exceção é para o peso específico cujo limite inferior a ser considerado é o próprio valor médio.

A norma inglesa BMHB propõe que o limite superior e inferior do efetivo ângulo de atrito interno e do ângulo de atrito com a parede sejam obtidos somando-se ou subtraindo-se 5° , respectivamente, ao valor médio obtido no ensaio de cisalhamento. Quanto ao peso específico, o limite superior, é o valor médio obtido no ensaio de cisalhamento.

A norma alemã DIN-1987 não faz referência ao limite superior e inferior das propriedades dos produtos.

A norma australiana AS-1996 propõe que, se o produto não está listado em uma tabela fornecida pela norma e valores experimentais estão disponíveis, poderão ser utilizadas técnicas estatísticas para a obtenção do limite superior e inferior ou a adoção do procedimento seguinte, a partir dos valores médios obtidos (\bar{x}) e de um coeficiente de variação (δ) transcrito na tabela 3. O limite superior da propriedade, x_u , é obtido pela expressão:

$$x_u = \bar{x} (1,0 + 1,89\delta) \quad (1)$$

e o limite inferior, x_i , pela expressão:

$$x_i = \bar{x} (0,2 - 0,3 \log_c \delta) \quad (2)$$

TABELA 3 - Valores típicos do coeficiente de variação das propriedades dos produtos segundo a norma australiana AS

Tipo de produto	Coeficiente de variação			
	Ângulo efetivo de atrito interno (f_i)	Ângulo de atrito na parede (f_w)		
		Rugosidade		
		Tipo D1	Tipo D2	Tipo D3
Alumina	0,20	0,10	0,10	0,10
Cevada	0,10	0,20	0,10	0,10
Cimento	0,15	0,10	0,10	0,10
Carvão negro	0,25	0,20	0,15	0,20
Carvão marrom	0,25	0,15	0,10	0,20
Areia seca	0,15	0,20	0,10	0,15
Farinha (de trigo)	0,20	0,10	0,10	0,15
Cinza volante	0,15	0,15	0,15	0,15
Cal hidratada	0,15	0,15	0,15	0,15
Calcário em pó	0,25	0,20	0,10	0,15
Milho	0,10	0,20	0,15	0,10
Açúcar	0,15	0,20	0,20	0,20
Trigo	0,10	0,20	0,15	0,10

A norma também informa que, em geral, o coeficiente de variação para o peso específico é aproximadamente 0,10; para o ângulo efetivo de atrito interno é entre 0,10 e 0,25, e, para ângulo de atrito com a parede, é de 0,10 a 0,20.

Os tipos de rugosidade da parede D1, D2 e D3, constantes na tabela 3 estão indicados na tabela 4, de acordo com a referida norma australiana.

TABELA 4 - Designação da superfície da parede do silo segundo a norma australiana AS

Tipo	Descrição da superfície	Rugosidade média da linha central, mm	Materiais típicos
D1	Polido	0,01 a 1	Aço inoxidável polido, plástico de polivinilo extrusado de alta peso específico, aço carbono galvanizado, alumínio.
D2	Liso	1 a 10	Aço inoxidável decapado, plástico de polivinilo fundido de alta peso específico, aço carbono pintado, aço carbono com leve ferrugem de superfície, azulejos cerâmicos lisos, concreto liso, metal laminado perfilado com nervura vertical - produto móvel ¹
D3	Rugoso	10 a 1000	concreto aparente áspero, aço carbono corroído, azulejos cerâmicos grosseiros, metal laminado perfilado com nervura vertical - produto imóvel ²
D4	Corrugado	> 1000	metal laminado perfilado com nervura horizontal.

¹ - expansão do produto por deformação da estrutura

² - imobilidade do produto devido à rigidez da estrutura

2.3.2 Propriedades físicas dos produtos segundo às normas

De um modo geral, as principais normas estrangeiras fornecem, em tabelas próprias os valores das propriedades ou parâmetros necessários para a previsão das pressões exercidas pelo produto armazenado nas paredes e fundo dos silos. Em termos de propriedades, as normas européias ISO, ENV e a alemã DIN não apresentam nem o ângulo de atrito interno ϕ_i , nem o ângulo de atrito com a parede ϕ_w . Elas apresentam, em tabelas próprias, os valores da relação entre pressões, K, e do coeficiente de atrito com a parede μ . Já as normas AS e BMHB apresentam os valores do ângulo de atrito interno e do ângulo de atrito com a parede e os valores a serem adotados para o parâmetro K, como no caso da norma inglesa ou uma fórmula matemática, como no caso da norma australiana. O parâmetro μ é considerado como igual a $\tan\phi_w$. Em relação ao tipo de parede, a maioria das normas refere-se apenas paredes lisas e paredes rugosas, não considerando a parede de chapa de aço corrugada. Apenas a norma alemã DIN e a norma australiana AS tratam de paredes de chapa de aço corrugada. As tabelas 5, 6, 7 e 8 a seguir apresentam respectivamente o peso específico; a relação entre a pressão horizontal e vertical, K, que será vista de forma mais detalhada mais adiante, o coeficiente de atrito com a parede lisa e o coeficiente de atrito com a parede rugosa para 10 produtos comuns às citadas normas. As normas européias ENV e ISO somente apresentam valores médios para o peso específico, para a relação K e para o coeficiente de atrito com a parede, mas orientam que o limite superior deverá ser maior ou igual a 1,15 vezes o valor médio, e o inferior, 0,9 vezes o valor médio. Portanto, o valor superior e o inferior foram obtidos multiplicando o valor médio por 1,15 ou 0,9 respectivamente. Conforme poderá ser constatado, com exceção do peso específico, existe uma grande variação entre os valores fornecidos pelas normas para as propriedades físicas e parâmetros necessários à determinação das pressões exercidas pelos produtos armazenados.

TABELA 5 - Peso específico dos produtos comuns às normas ENV, ISO, AS, BMHB e DIN

Produto	ENV		ISO		AS		BMHM		DIN*
	ξ_m	ξ_u	ξ_m	ξ_u	ξ_m	ξ_u	ξ_m	ξ_u	ξ_m
Cevada	7,5	8,5	7,5	8,5	7,0	8,5	7,5	8,5	8,0
Cimento	14,0	16,0	14,0	16,0	13,0	16,0	13,0	16,0	16,0
Clínquer	16,0	18,0	14,0	16,0	15,0	18,0	--	--	18,0
Areia Seca	14,0	16,0	14,0	16,0	14,0	17,0	15,0	17,0	16,0
Farinha	6,0	7,0	6,5	7,5	6,5	7,5	7,0	7,5	7,0
Cinzas	12,0	14,0	11,0	13,0	8,0	11,5	8,0	10,0	12,0
Milho	7,5	8,5	7,5	8,5	7,0	8,5	7,5	8,5	8,0
Açúcar	8,0	9,5	9,0	10,0	8,0	10,0	9,0	10,0	9,5
Trigo	8,0	9,0	7,5	8,5	7,5	9,0	8,0	9,0	9,0
Carvão	9,0	10,0	9,0	10,0	8,5	11,0	--	--	10,0

Observa-se, na tabela 5, que para o peso específico não há uma variação muito grande, pois a maior diferença encontrada para o valor médio não ultrapassou 15% e, para o limite superior, 7%.

TABELA 6 – Relação entre as pressões, K, dos produtos comuns às normas ENV, ISO, AS, BMHB e DIN (parede lisa),

Produto	ENV		ISO		AS		BMHM		DIN*
	K_l	K_u	K_l	K_u	K_l	K_u	K_l	K_u	K_m
Cevada	0,50	0,63	0,54	0,69	0,36	0,44	0,25	0,60	0,65
Cimento	0,45	0,58	0,54	0,69	0,35	0,35	0,25	0,60	0,65
Clínquer	0,41	0,52	0,45	0,58	0,35	0,35	0,25	0,60	0,50
Areia Seca	0,41	0,52	0,45	0,58	0,35	0,38	0,25	0,60	0,50
Farinha	0,36	0,46	0,36	0,46	#	0,46	0,25	0,60	0,40
Cinzas	0,41	0,52	0,45	0,58	0,41	0,50	0,25	0,60	0,55
Milho	0,45	0,58	0,54	0,69	0,39	0,41	0,25	0,60	0,60
Açúcar	0,45	0,58	0,54	0,69	0,35	0,35	0,25	0,60	0,65
Trigo	0,50	0,63	0,54	0,69	0,43	0,44	0,25	0,60	0,60
Carvão	0,41	0,52	0,45	0,58	0,35	0,35	0,25	0,60	0,60

- raiz negativa

Na tabela 6, pode-se observar que os valores da relação K adotados pela norma australiana, seja no limite inferior, seja no limite superior, são sempre menores que os das normas europeias, chegando a diferenças de até 50%, como no caso da cevada para o limite inferior e a 80%, para o limite superior do açúcar. Chama atenção o fato de, para os produtos agrícolas, com exceção da farinha, os valores médios adotados pela norma DIN serem superiores em até 86% (milho) ao respectivo limite superior da norma AS. O limite inferior constante para todos os produtos adotado pela norma inglesa BHMB comparativamente aos propostos pela outras normas é muito baixo, chegando a diferenças de até 116%.

Como poderá ser visto mais adiante, a norma australiana não fornece diretamente o valor da relação K. Ele é obtido através da fórmula proposta por

Walker, onde os parâmetros envolvidos são dados em tabela própria da norma, isto é, o ângulo de atrito interno e o ângulo de atrito do produto com a parede. Para haver consistência com a definição desses parâmetros, o ângulo de atrito do produto com a parede ϕ_w não pode ser maior que o ângulo de atrito interno ϕ_i (CALIL, 1997). No entanto, constata-se na tabela fornecida pela norma que, além de produtos não agrícolas, como no caso da alumina e da cinza volante, essa inconsistência aparece nos valores fornecidos para a farinha (limite inferior das superfícies do tipo D2 e D3 e limite superior da superfície do tipo D3) e para o açúcar (limite superior da superfície do tipo D3). Essa inconsistência de valores entre ϕ_w e ϕ_i é a responsável pela raiz negativa encontrada para farinha. Também, tendo em vista que, na fórmula para obtenção teórica do parâmetro K proposta pela norma australiana, é levado em conta o ângulo de atrito com a parede, para cada tipo de parede deverá ser obtido um valor para o parâmetro K.

TABELA 7 – Coeficiente de atrito para parede lisa dos produtos comuns às normas ENV, ISO, AS, BMHB e DIN

Produto	ENV		ISO		AS		BMHB		DIN*
	μ_i	μ_s	μ_i	μ_s	μ_i	μ_s	μ_i	μ_s	μ_s
Cevada	0,32	0,40	0,27	0,35	0,32	0,51	0,27	0,36	0,25
Cimento	0,36	0,48	0,36	0,46	0,42	0,53	0,40	0,51	0,40
Clínquer	0,40	0,52	0,36	0,46	0,47	0,58	---	---	0,45
Areia Seca	0,36	0,48	0,36	0,46	0,40	0,53	0,27	0,40	0,40
Farinha	0,27	0,35	0,27	0,35	0,47	0,53	0,25	0,36	0,25
Cinzas	0,40	0,52	0,45	0,58	0,47	0,70	0,25	0,36	0,50
Milho	0,27	0,35	0,27	0,35	0,36	0,58	0,25	0,44	0,25
Açúcar	0,41	0,52	0,45	0,58	0,36	0,70	0,42	0,51	0,45
Trigo	0,27	0,35	0,27	0,35	0,32	0,58	0,25	0,44	0,25
Carvão	0,40	0,52	0,45	0,58	0,47	0,70	---	---	0,45

Em relação ao coeficiente de atrito com a parede, para o caso da parede ser lisa, constata-se, na tabela 7, diferenças de até 74% no valor do limite inferior do coeficiente de atrito e de até 65% no limite superior. Observa-se também que os valores médios do coeficiente de atrito para parede lisa de alguns produtos fornecidos pela norma DIN são menores ou iguais aos respectivos valores fornecidos pelas outras normas quer em relação ao limite inferior, quer em relação ao limite superior.

TABELA 8 – Coeficiente de atrito para parede rugosa dos produtos comuns às normas ENV, ISO, AS, BMHB e DIN

Produto	ENV		ISO		AS		BMHB		DIN*
	μ_i	μ_s	μ_i	μ_s	μ_i	μ_s	μ_i	μ_s	μ_s
Cevada	0,40	0,52	0,37	0,45	0,47	0,62	0,32	0,47	0,35
Cimento	0,45	0,58	0,46	0,56	0,53	0,65	0,45	0,58	0,45
Clínquer	0,50	0,63	0,46	0,56	0,58	0,70	---	---	0,55
Areia Seca	0,45	0,58	0,46	0,56	0,47	0,70	0,36	0,49	0,50
Farinha	0,36	0,46	0,37	0,45	0,47	0,70	0,34	0,47	0,35
Cinzas	0,50	0,63	0,55	0,68	0,58	0,84	0,32	0,47	0,60
Milho	0,36	0,46	0,37	0,45	0,47	0,62	0,40	0,58	0,40
Açúcar	0,50	0,63	0,55	0,68	0,47	0,84	0,47	0,58	0,50
Trigo	0,36	0,46	0,37	0,45	0,47	0,62	0,40	0,58	0,40
Carvão	0,45	0,52	0,55	0,68	0,47	0,84	---	---	0,50

Para paredes rugosas, pode-se constatar, na tabela 9, diferenças de até 81% no valor do limite inferior do coeficiente de atrito e de até 78% no limite superior. . Analogamente a paredes lisas, para paredes rugosas também os valores médios do coeficiente de atrito para parede de alguns produtos fornecidos pela norma DIN são menores ou iguais aos respectivos valores fornecidos pelas outras normas, quer em relação ao limite inferior, quer em relação ao limite superior.

Para o caso de paredes de chapa de aço corrugada, o coeficiente de atrito com a parede pela norma australiana é obtido pela seguinte expressão:

$$\mu = u_2\mu_i + u_3\mu_w \quad (3)$$

onde:

$$\mu_i = \text{tg}\phi_i$$

$$\mu_w = \text{tg}\phi_w$$

onde ϕ_w é o ângulo de atrito com a parede considerada plana e u_2 e u_3 representam a proporção do produto movimentando-se sobre ele mesmo e sobre a parede. Esses valores são determinados pelas seguintes fórmulas :

$$u_2 = \frac{y_1}{x_2 + y_1} \quad (4)$$

$$u_3 = \frac{x_2}{x_2 + y_1} \quad (5)$$

onde y_1 e x_2 estão indicados na figura 9

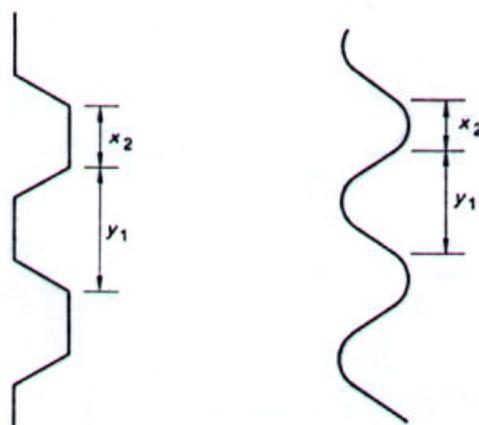


FIGURA 9 – Dimensões do perfil da chapa de aço

A norma inglesa propõe que, se $\phi_w \geq \phi_i - 3^\circ$, então o valor a adotar para o coeficiente de atrito interno é $\mu = \text{sen} \phi_i$, que é o valor proposto por Jenike.

A norma alemã DIN 1055, Parte 6 (1987), propõe três tipos de paredes distintos para a obtenção do coeficiente de atrito com a parede: lisas, intermediárias e rugosas, neste caso incluindo as paredes de chapa de aço corrugada. Nesta norma, os produtos listados têm um valor do coeficiente de atrito especificado para cada um dos três tipos de parede.

As normas européias ENV e ISO também propõem a realização de ensaios para obtenção das propriedades físicas dos produtos ou de parâmetros se o produto considerado não fizer parte das tabelas por elas fornecidas ou no caso do projeto necessitar de valores mais precisos. O método proposto é bastante semelhante ao da célula de Jenike e a norma inglesa propõe a obtenção das propriedades dos produtos exatamente pelo método de Jenike. A norma australiana não propõe nenhum método para determinação das propriedades, mas faz uma série de recomendações para o caso de serem realizados ensaios para produtos não listados na tabela fornecida pela norma. Já a norma DIN somente recomenda medir o atrito com a parede com, por exemplo, ensaios de cisalhamento pertinentes à combinação parede-produto, no caso de serem necessários valores mais precisos.

2.3.3 O parâmetro K

A relação entre a pressão horizontal e a vertical em qualquer ponto da massa granular é definida como a relação de pressão K. Este é um dos parâmetros requeridos para o cálculo das pressões que um produto exerce nas paredes e fundo do silo. Os três estados de tensão associados a K são denominados estados ativo K_a , passivo, K_p e em repouso K_0 . Os dois primeiros são o resultado do movimento da parede, respectivamente para fora e em direção ao produto armazenado, enquanto o terceiro acontece quando uma estrutura de retenção inflexível não permite a deformação lateral na periferia do produto (BLIGHT 1988).

Janssen não definiu teoricamente o valor da relação entre a pressão horizontal e a vertical, K, mas mediu indiretamente a pressão σ_{fundo} na base plana de um modelo de silo alto. Assumindo que a pressão vertical p_{vf} alcançou o valor assintótico, então a relação K pode ser determinada da expressão:

$$K = \frac{\gamma d}{\sigma_{\text{fundo}} \operatorname{tg} \phi_w} \quad (6)$$

O valor empírico para K de:

$$K = \frac{1 - \operatorname{sen} \phi_i}{1 + \operatorname{sen} \phi_i} = \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_i}{2} \right) \quad (7)$$

sempre assumido como sendo parte da equação de Janssen, foi de fato introduzido por Koenen em 1896, sendo determinado baseado no coeficiente de pressão ativa, K_a , da teoria de Rankine para empuxos de terra (CALIL, 1997).

Em vários trabalhos de pesquisa e normas são sugeridas diferentes recomendações para calcular a relação de pressão. Na maioria destas recomendações o parâmetro K é determinado somente com o conhecimento do ângulo de atrito interno. Em algumas relações, o ângulo de atrito com a parede é levado também em conta. Na maioria das muitas diferentes recomendações existentes, pode ser visto que ainda há muita incerteza para calcular a relação de pressão. Ao lado do ângulo de atrito interno e o ângulo de atrito com a parede, experiências mostraram que os valores das pressões e do parâmetro K relacionado a elas dependem de quase quarenta fatores que podem se agrupar em seis grupos primários (KAMINSKI e WIRSKA, 1998):

- as propriedades físico-químicas do produto granular,
- a forma e dimensões do silo,
- o tipo de fluxo do produto durante o descarregamento do silo,

- as características das operações tecnológicas,
- o efeito de tempo e parâmetros térmicos e de umidade,
- a interação entre a estrutura de silo e o produto granular.

Segundo HAAKER (1999) o problema com todas as propostas para o parâmetro K é que elas foram obtidas somente das hipóteses que o material está em um estado de deslizamento e o atrito com a parede é mobilizado completamente. Estas hipóteses, segundo ele, não são necessariamente cumpridas na parede vertical da célula.

A seguir, serão apresentadas as principais fórmulas propostas por pesquisadores e normas após Koenen.

Em 1948, JAKY (apud LOHNES,1993) obteve uma relação para o parâmetro K para o caso do produto em repouso e parede lisa inflexível:

$$K_0 = \frac{(1 - \text{sen } \phi_i) \left(1 + \frac{2}{3} (\text{sen } \phi_i)\right)}{(1 + \text{sen } \phi_i)} \quad (8)$$

que foi simplificada para a forma geralmente usada:

$$K_0 = 1 - \text{sen } \phi_i \quad (9)$$

WALKER, em 1966 (Apud LOHNES,1993), assumindo que o produto ensilado está em ruptura e, simultaneamente, está deslizando ao longo de uma parede rugosa, usou a geometria do círculo de MOHR para incluir o coeficiente de atrito com a parede, μ , na equação de relação de pressão obtendo:

$$K = \frac{1 + \text{sen}^2 \phi_i - 2\sqrt{(\text{sen}^2 \phi_i - \mu^2 \cos^2 \phi_i)}}{4\mu^2 + \cos^2 \phi_i} \quad (10)$$

HARTMANN, em 1966 (apud LOHNES,1993), usando teoria elástica para calcular K_a para silos de paredes rugosas, obteve:

$$K_a = \frac{1 - \text{sen}^2 \phi_i}{1 + \text{sen}^2 \phi_i} \quad (11)$$

Segundo ROTTER (1988), citado por Lohnes, esta equação é válida para paredes que sejam tão rugosas que os grãos do produto armazenado deslizem uns sobre os outros em lugar de deslizar sobre a parede da célula, como é o caso dos silos metálicos de paredes de chapa de aço corrugado.

BISCHARA et al., em 1983, através de uma fórmula não linear do método dos elementos finitos, afirmam que a relação entre pressões, K, é um parâmetro constante para um determinado tipo de silo e um dado produto e propõem diferentes fórmulas para o parâmetro K em função da granulometria do produto como a seguir:

- (a) Para produtos cujo diâmetro máximo é menor ou igual a 2,5mm

$$K = 0,16 \frac{\cot^2 \phi_i \gamma^{0,15}}{\mu^{0,08} d^{0,17}} \quad (12)$$

- (b) Para produtos cujo diâmetro máximo é maior que 2,5mm

$$K = 0,16 \frac{\cos^2 \phi_i}{\sqrt{\sin \phi_i} \gamma^{0,04} \mu^{0,05} d^{0,11}} \quad (13)$$

STOFFERS (1972), citado por KAMINSK e WIRSKA (1998), vê a causa das discrepâncias na determinação dos valores do parâmetro K, no caráter estocástico das pressões, na falta de bons equipamentos de medição e vê dificuldades no desenvolvimento de um modelo numérico que incorpore o caráter estocástico do fenômeno das pressões.

Como foi visto anteriormente, as normas estrangeiras propõem, em tabelas próprias, valores para o parâmetro K para alguns produtos listados ou indicam fórmulas matemáticas para a sua obtenção, fornecendo os valores dos parâmetros envolvidos, ou para o caso dos parâmetros envolvidos serem obtidos experimentalmente.

Norma australiana AS3774: 1997 - adota a fórmula de Walker para a determinação do valor de K, limitando K como maior ou igual a 0,35, ou seja:

$$K = \frac{1 + \sin^2 \phi_i - 2\sqrt{(\sin^2 \phi_i - \mu^2 \cos^2 \phi_i)}}{4\mu^2 + \cos^2 \phi_i} \geq 0,35 \quad \text{com } \mu = \text{tg} \phi_w \quad (14)$$

A norma australiana fornece, em tabela própria, os valores do limite inferior e superior para ϕ_i para 23 produtos e o respectivo ϕ_w em função da rugosidade da parede (paredes polidas, lisas e rugosas) e propõe em anexo a obtenção de μ para o caso de silos de parede de chapa de aço corrugada, como visto no item 3.2.1.

Norma européia, ENV 1991-4: 1995 - fornece o valor de K em uma tabela para dez produtos para paredes lisas e rugosas, excluindo o de chapa corrugada. Os valores fornecidos na tabela variam de 0,40 a 0,55. Para os produtos que não constam nesta tabela, o valor de K pode ser determinado, experimentalmente, por metodologia definida em anexo da norma, (obtenção direta com a determinação da pressão horizontal e vertical) ou de forma indireta, pela expressão de Jaky considerando um coeficiente de segurança igual a 1,1, como a seguir:

$$K = 1,1(1 - \text{sen}\phi_i) \quad (15)$$

Norma européia ISO 11697:1997 - fornece o valor de K em uma tabela para 5 classes de produtos, apenas para paredes lisas. Os valores fornecidos na tabela variam de 0,30 a 0,75. Para os produtos que não constam nesta tabela, o valor de K pode ser determinado, experimentalmente, semelhantemente ao proposto pela norma ENV, ou de forma indireta pela fórmula (15).

Norma americana.ACI 313-91 - 1991 – propõe, para o valor de K, a fórmula de Koenen, equação 7, substituindo o ângulo de atrito interno ϕ_i pelo ângulo de repouso ϕ_r , que, de um modo geral é menor que ϕ_i e sugere valores para o limite inferior e superior de ϕ_r , para 8 produtos.

Norma britânica BMHB: 1985 - define dois valores para K, sendo um valor inferior $K_i = 0,25$, para cálculo das pressões verticais, e um valor superior $K_u = 0,60$, para cálculo das pressões horizontais. Especifica que, se a parede é muito rugosa, o valor superior de K_u deve ser tomado igual a 0,75.

Norma alemã, DIN 1055:1987 - fornece o valor de K em duas tabelas para 24 produtos, variando entre 0,4 e 0,65. Para os produtos não listados, propõe a forma indireta pela expressão de Jaky, considerando um coeficiente de segurança igual a 1,2, onde ϕ_i deverá ser obtido em ensaio de cisalhamento direto, como o tipo Jenike:

$$K = 1,2 (1 - \text{sin}\phi_i) \quad (16)$$

Segundo a norma, o fator 1,2 foi escolhido para garantir que em pequenas alturas do produto armazenado, ou seja, na parte superior do silo, resultem curvas de pressões mais completas.

Norma canadense, CFBC:1983 - Somente fornece o valor de K em uma tabela para oito produtos, em função da rugosidade da parede. Para produtos granulares apresenta o valor de 0,4 para paredes lisas e 0,6 para paredes rugosas.

Norma francesa SNBATI: 1975 - define dois valores para K, em função dos estados de carregamento e descarregamento central.

Para o carregamento do silo, adota a seguinte expressão:

$$K_a = \frac{1 - m \operatorname{sen} \phi_i}{1 + m \operatorname{sen} \phi_i} \cos^2 \phi_w \quad (17)$$

sendo: $m = \sqrt{1 - (\operatorname{tg} \phi_w / \operatorname{tg} \phi_i)^2}$ (18)

Para o descarregamento do silo, adota a seguinte expressão

$$K = \cos^2 \phi_w \quad (19)$$

AYUGA (1995) propõe que, para a obtenção de K de forma indireta, o valor de K seja em função do tipo de parede:

- Para paredes absolutamente lisas, $\phi_w = 0$, adotar a fórmula de Rankine-Koenen, equação (7).
- Para paredes muito rugosas, onde $\phi_i = \phi_w$, adotar a fórmula de Hartmann, equação (11).
- Para os casos intermediários adotar a fórmula francesa, equações (17) e (18).

Segundo LOHNES (1993), claramente, não existe nenhum acordo completo sobre o que constitui um valor apropriado para o parâmetro K e poucos dados experimentais estão disponíveis para comparação com cálculos teóricos. Também segundo ele, a hipótese do produto armazenado estar em ruptura parece irracional para cargas estáticas e sugere $K=K_0$ (equação (9)) para produtos que estão confinados mas não em ruptura.

CAPÍTULO 3

AS PRESSÕES EXERCIDAS PELOS PRODUTOS ARMAZENADOS

INTRODUÇÃO

No projeto de silos é condição fundamental o perfeito conhecimento das ações atuantes sobre sua estrutura. Além de outras que possam surgir em casos especiais (NBR 8681, 1984), as ações a considerar no cálculo estrutural de silos são (CALIL Jr., 1997):

Ações Permanentes - as decorrentes do peso próprio da estrutura e dos equipamentos mecânicos instalados na cobertura e/ou tremonha.

Ações Variáveis - as cargas devidas ao carregamento do produto no silo; cargas induzidas pelo fluxo do produto armazenado durante o descarregamento; sobrecargas de serviço de pisos e cobertura; forças das correias transportadoras presas à estrutura do silo; pressão ou sucção interna dos gases; forças de contenção lateral; força de fixação de elementos externos na estrutura; ação do vento; ação da temperatura (efeitos climáticos e armazenamento de produtos quentes); efeitos de recalques diferenciais da fundação; expansão do produto no descarregamento, vibração de equipamentos.

Ações Excepcionais – as decorrentes de impacto de veículos e pressões devidas à explosões de pós.

Este trabalho tratará das pressões exercidas pelo produto armazenado nas paredes verticais e fundo do silo. De um modo geral, existem forças perpendiculares à parede, denominadas de pressão horizontal ou lateral, forças paralelas à parede devidas ao atrito do produto com a parede denominadas de pressão de atrito e forças verticais atuando na seção transversal da massa ensilada

denominadas de pressão vertical (ver figura 1).

3.1 PRESSÕES EM UMA MASSA GRANULAR

Rankine definiu dois estados limites no equilíbrio de uma massa granular que está à beira da ruptura onde atua somente a gravidade. A linha AB da figura 10 representa o traço da superfície horizontal de uma massa de peso específico γ . Por causa da simetria, não existe cisalhamento nas superfícies dos elementos da massa abaixo de AB. Então, a pressão horizontal p_h e vertical p_v são pressões principais e qualquer uma delas pode ser a maior pressão. Quando p_v é a maior pressão, é dito que a massa está em um estado ativo. Isto é representado pelo círculo de Mohr C na figura 10. Quando p_v é a menor pressão, é dito que a massa está em um estado passivo, representado pelo círculo de Mohr D.

A linha tangente aos dois círculos de Mohr, na figura 10, é chamada linha de ruptura ou lugar geométrico de deslizamento do produto e o ângulo ϕ_i , de inclinação dessa linha com a horizontal, é denominado ângulo de atrito interno. Se a massa não tiver coesão, a linha de ruptura cruza a origem. Se a massa tiver coesão, a linha de ruptura intercepta o eixo das pressões de cisalhamento na ordenada c , denominada de coesão.

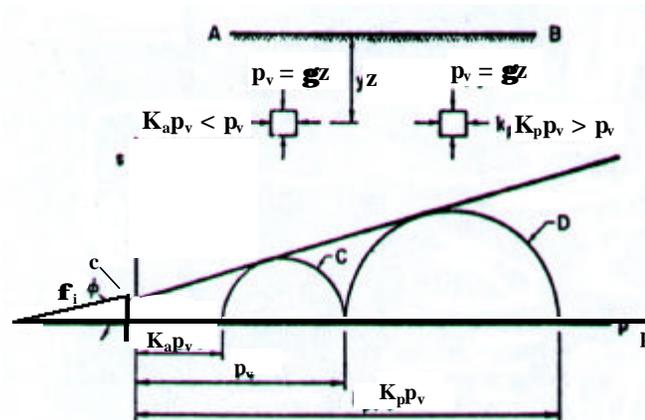


FIGURA 10 – Pressões em uma massa granular

A pressão p_h usualmente é escrita na forma $p_h = K_a p_v$ ou $p_h = K_p p_v$, onde K_a e K_p são os coeficientes de pressão ativos e passivos de Rankine. Para uma massa sem coesão:

$$K_a = \frac{1 - \text{sen } \phi_i}{1 + \text{sen } \phi_i} \quad (20)$$

$$K_p = \frac{1 + \text{sen } \phi_i}{1 - \text{sen } \phi_i} \quad (21)$$

Para uma massa com coesão:

$$K_a = \frac{1 - \text{sen } \phi_i}{1 + \text{sen } \phi_i} - \frac{2c}{\gamma z} \frac{1 - \text{sen } \phi_i}{\cos \phi_i} \quad (22)$$

$$K_p = \frac{1 + \text{sen } \phi_i}{1 - \text{sen } \phi_i} + \frac{2c}{\gamma z} \frac{\cos \phi_i}{1 - \text{sen } \phi_i} \quad (23)$$

Por causa do atrito com as paredes, as pressões em uma massa granular em um silo (Figura 11) não serão tão simples quanto as descritas por Rankine. Porém, tem-se ainda estados onde $p_h < p_v$ e $p_h > p_v$. Uma massa granular em um silo normalmente estará em um estado intermediário de equilíbrio entre os estados extremos, de forma que $p_h = K p_v$ onde $K_a < K < K_p$. Este valor de K não pode mudar, a menos que a massa se expanda ou contraia lateralmente. Tal movimento não muda p_v em nenhum ponto, porque o peso da massa acima dele não é mudado, mas p_h diminui se a massa se expandir lateralmente e aumenta se se contrair (GAYLORD & GAYLORD, 1977).

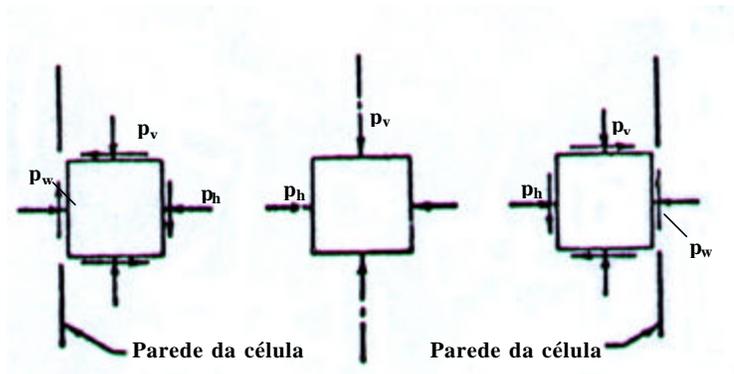


FIGURA 11 - Pressões no material granular em um silo

3.2 AS PRESSÕES NAS PAREDES E FUNDO DE SILOS DEVIDAS AO PRODUTO ARMAZENADO

Quando uma massa granular é depositada em um silo, a pressão vertical tende a ser a maior pressão; o estado correspondente de tensão é um estado ativo correspondendo ao que se denomina pressões estáticas ou iniciais. Quando a saída é aberta e o fluxo começa, a massa em movimento tende a se expandir

verticalmente e a pressão vertical tende a se tornar a menor pressão; o estado correspondente de tensão é um estado passivo, correspondendo às chamadas pressões dinâmicas ou de fluxo. Estas condições são mostradas na figura 12. O plano entre o campo inicial ativo e o passivo desenvolvido é chamado plano de mudança (switch). Esse plano se origina acima da abertura de saída do produto e desloca-se para cima no silo, pelo menos até a transição da tremonha com o cilindro, em um silo de fluxo de massa, e em um silo de fluxo de funil, até interseção do funil com a parede de silo.

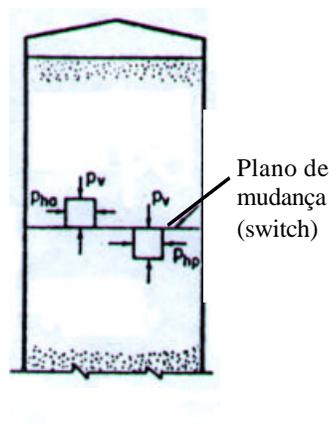


FIGURA 12 – Estado ativo x estado passivo

3.2.1 Pressões estáticas ou iniciais

Teoria de Janssen (Apud AYUGA, 1995)

A teoria de JANSSEN (1895) foi desenvolvida somente para as condições estáticas. Sua contribuição para a teoria de pressões em silos de grãos e para o conhecimento do atrito interno no comportamento de produtos granulares é de grande significação. Até hoje, é a fórmula que é usada na maioria das normas sobre projeto de silos para o cálculo da pressão estática ou inicial no carregamento em silos de seções cilíndricas, se não em todas. Até mesmo para o cálculo das pressões durante o fluxo, um dos métodos é aplicar fatores de multiplicação aos valores computados pela equação de JANSSEN para obter os valores da pressão dinâmica.

As hipóteses em que esta teoria é baseada são:

- As pressões horizontais são constantes em superfícies horizontais.
- O valor de ϕ_w (ângulo de atrito do produto com a parede) é constante.

- O peso específico do produto é uniforme.
- As paredes do silo são totalmente rígidas.
- A relação entre as pressões horizontais e verticais, $K = p_h/p_v$, é constante em toda a altura do silo.

Segundo AYUGA (1995), nenhuma dessas hipóteses é correta para silos, mas o resultado obtido é suficientemente preciso para silos altos em estado estático e produtos pouco compressíveis como os grãos.

Na formulação de Janssen, o equilíbrio de um elemento de altura dz do produto de peso específico γ fica estabelecido pelas pressões verticais p_v e $p_v + dp_v$ e as devidas ao atrito produzido pela força horizontal p_h sobre as paredes (figura 13). Se A é a área da seção transversal do silo e U é o perímetro, então:

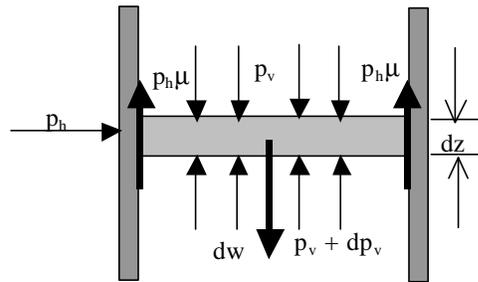


FIGURA 13 – Fatia elementar adotada por Janssen

$$p_h \cdot \mu \cdot dz \cdot U + (p_v + dp_v - p_v) \cdot A - \gamma \cdot A \cdot dz = 0$$

Fazendo $Kdp_v = dp_h$ e separando as variáveis:

$$\frac{A}{K} \cdot dp_h = (\gamma \cdot A - p_h \cdot \mu \cdot U) dz, \text{ ou seja,}$$

$$\frac{A}{U} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{dp_h}{\frac{\tilde{a}}{\mu} \cdot \frac{A}{U} - p_h} = dz$$

Integrando, temos que:

$$\frac{-A}{U} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \ln\left(\frac{\tilde{a}}{\mu} \cdot \frac{A}{U} - p_h\right) = z - \text{cte}$$

Das condições de contorno, em $z = 0 \rightarrow p_h = 0$, então:

$$\text{cte} = \frac{A}{U} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \ln\left(\frac{\tilde{a}}{\mu} \cdot \frac{A}{U}\right)$$

Logo:

$$\frac{A}{U} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \ln\left(\frac{\tilde{a}}{\mu} \cdot \frac{A}{U} - p_h\right) = \frac{A}{U} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \ln\left(\frac{\tilde{a}}{\mu} \cdot \frac{A}{U}\right) - z$$

O que se conclui que: $1 - \frac{p_h}{\frac{\tilde{a}}{i} \cdot \frac{A}{U}} = e^{-zK\mu \frac{U}{A}}$

Resultando finalmente:

$$p_h(z) = \frac{\tilde{a}}{i} \cdot \frac{A}{U} \left(1 - e^{-zK\mu \frac{U}{A}}\right), \quad (24)$$

conhecida como fórmula de Janssen para o cálculo teórico da pressão horizontal, a partir da qual é obtida a pressão vertical:

$$p_v = \frac{p_h}{K} \quad (25)$$

e a pressão de atrito na parede:

$$p_w = \mu p_h \quad (26)$$

A pressão de atrito na parede na profundidade z , p_w , provoca força de compressão na parede. Integrando do topo do produto armazenado à profundidade z , a força de compressão na parede (por unidade de perímetro de parede) na profundidade z é:

$$P_w(z) = \mu \int p_h dz = \gamma A / U \left[z - \frac{A}{\mu K U} \left(1 - e^{-\mu K z U / A}\right) \right] = A/U(\gamma z - p_v) \quad (27)$$

ou seja, é igual ao peso total do produto menos a força total devida à pressão vertical p_v .

O parâmetro μ constante da formulação de Janssen é obtido através do ângulo de atrito com a parede ϕ_w e $\mu = \text{tg}\phi_w$.

Os experimentos de Janssen para comparação com a sua formulação teórica foram realizados em silos quadrados, com relações altura/lado que variavam entre 5 e 15 que, em termos de classificação geométrica, são considerados altos ou esbeltos.

Teoria de Airy (Apud ROBERTS, 1995)

Em 1897, Airy realizou um estudo das pressões exercidas por produtos granulares nas paredes e no fundo de um silo, onde fazia distinção entre silos altos e baixos. Esse pesquisador foi o primeiro a diferenciar as pressões exercidas pelo produto armazenado em silos altos e baixos. Para cada um destes tipos determinou expressões para a pressão horizontal sobre as paredes da célula, em função do

peso específico do produto armazenado, do ângulo de atrito interno do produto que supôs igual ao do talude natural e do ângulo de atrito do produto com a parede.

Seu modelo, mostrado na figura 14, estabelece o equilíbrio de uma cunha de espessura unitária, limitada por um plano de ruptura de inclinação θ , de tal forma que produza a máxima pressão contra o lado esquerdo da parede, onde o ponto 'O' é o centro de gravidade. Ele considerou dois casos, um para silos baixos onde o plano de ruptura não intercepta a parede e, outro, onde o plano intercepta a parede do silo no lado oposto.

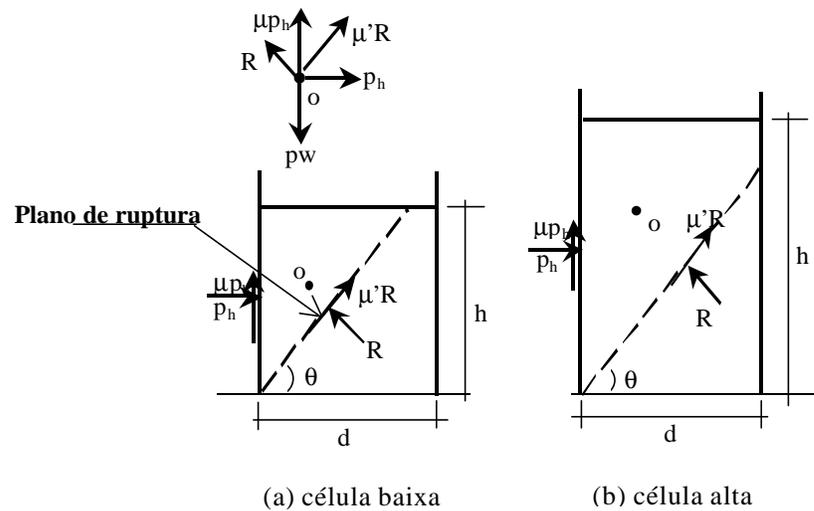


FIGURA 14 - Modelo de Airy para pressões em silos

A condição limitante para cada caso é:

$$h_L = d \left[\mu' + \sqrt{\mu' \left(\frac{1 + (\mu')^2}{\mu + \mu'} \right)} \right] \quad (28)$$

A análise do equilíbrio usada por Airy para determinar a força p_h é uma função da profundidade h . Ele diferenciou p_h em função de h para encontrar a pressão horizontal p_h :

$$p_h = dp_h/dh$$

(a) Caso 1 - Silos baixos - para $h < h_L$

A pressão normal à parede a uma profundidade z é determinada por:

$$p_h(z) = \tilde{a}z \left[\frac{1}{\sqrt{\hat{i}'(\hat{i}' + \hat{i})} + \sqrt{1 + (\hat{i}')^2}} \right]^2 \quad (29)$$

E a pressão vertical $p_v = \frac{P_h}{K}$

onde: μ = coeficiente de atrito do produto com a parede

γ = peso específico do produto

μ' = coeficiente de atrito no plano de ruptura

z = profundidade abaixo da superfície

(b) Caso.2 - silos altos - para $h \geq h_L$

A pressão normal à parede a uma profundidade z é determinada por:

$$p_h(z) = \frac{\gamma d}{\mu' + \mu} \left[1 - \frac{\sqrt{1 + (\mu')^2}}{\sqrt{\frac{2z}{d}(\mu' + \mu) + 1 - \mu\mu'}} \right] \quad (30)$$

E novamente a pressão vertical é determinada por: $p_v = \frac{p_h}{K}$

Teoria de M & A Reimbert, 1979

Em 1953, Marcel e André Reimbert apresentaram um método para calcular as pressões estáticas devidas ao produto armazenado. A formulação obtida tem, como hipótese, que, a grandes profundidades z , a curva da pressão horizontal fica assintótica ao eixo vertical. Àquela profundidade, a pressão horizontal alcança um máximo, como mostrado na figura 15(a). Uma lâmina do produto nesta profundidade é mostrada na figura 15(b). O equilíbrio é obtido considerando que a pressão vertical acima e abaixo da lâmina são iguais. Por conseguinte, o peso da lâmina, P_w , é equilibrado pelo atrito com a parede, ou seja:

$$\gamma A dz = \mu p_{h,\max} U dz$$

Assim:

$$p_{h,\max} = \frac{\tilde{a}}{i} \cdot \frac{A}{U}$$

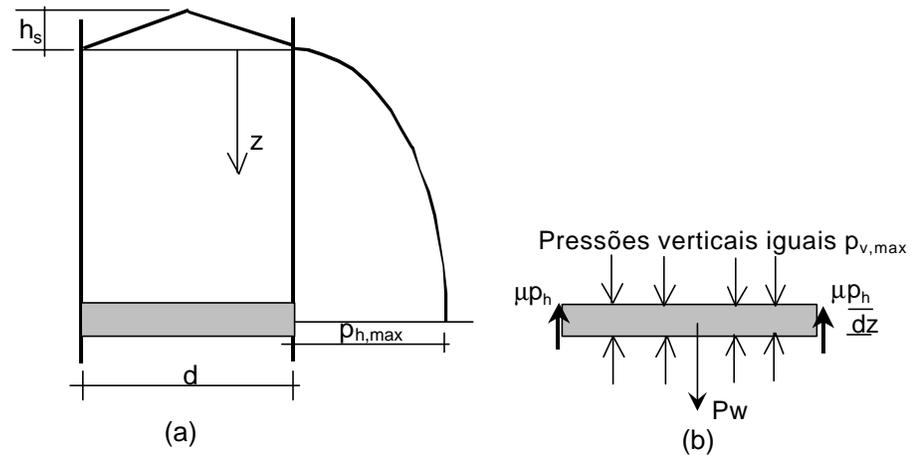


FIGURA 15 – Modelo de A & M Reimbert para obtenção das pressões

A pressão vertical neste local é:

$$p_{v,max} = p_{h,max}/K = \frac{\tilde{a}}{iK} \cdot \frac{A}{U}$$

Havendo um cone de produto no topo do silo de altura h_s , o peso total do produto acima da profundidade z é:

$$\gamma Az + \gamma Ah_s/3$$

As equações de M & A Reimbert para as pressões estáticas são, como segue:

Pressão vertical à profundidade z , abaixo da superfície do produto armazenado:

$$p_v(z) = \tilde{a} \left[z \left(\frac{z}{C} + 1 \right)^{-1} + h_s/3 \right] \quad (31)$$

Pressão horizontal à profundidade z :

$$p_h(z) = \frac{\gamma}{\mu} \frac{A}{U} \left[1 - \left(\frac{z}{C} + 1 \right)^{-2} \right] \quad (32)$$

Pressão de atrito na parede à profundidade z :

$$p_w = \mu p_h \quad (33)$$

Para silos circulares, C (abscissa característica), nas equações anteriores é:

$$C = \frac{d}{4\mu K} - h_s/3 \quad (34)$$

A força de atrito por unidade de perímetro é determinada analogamente ao que foi feito na teoria de Janssen, usando a equação (27).

A diferença fundamental entre a formulação de A & M Reimbert e a fórmula de Janssen é que a forma da pressão horizontal p_h é hiperbólica em vez de exponencial, como a de Janssen.

BISCHARA, 1983, 1985

O autor analisou os resultados experimentais das pressões horizontais e verticais estáticas obtidos com células de cargas elétricas desenvolvidas especialmente para esse fim, em silos cilíndricos de concreto armado de fundo plano com $h/d = 2,92$, com produtos de fluxo livre, utilizando uma fórmula não linear de elementos finitos onde foram consideradas as propriedades físicas do produto, as condições de contorno e a interação produto/parede. Foram ensaiados areia, trigo, soja, milho e pedregulho. Os produtos de fluxo livre foram considerados isotrópicos, no método adotado. A pesquisa foi realizada em:

- Silos com diâmetro entre 4 e 12m
- Altura média de produto entre 12 e 30m
- Produtos com ângulo de atrito interno entre 25 e 40 graus
- peso específico s do produto armazenado entre 4,7 e 18,8 kN/m³
- Coeficiente de atrito do produto com a parede entre 0,25 e 0,70

Da análise dos resultados, o autor obteve fórmulas matemáticas para as pressões horizontais e para a pressão média vertical na seção considerada, levando em conta diferentes tipos de produto: produtos granulares finos, onde diâmetro máximo da partícula é menor ou igual a 2,5mm (equações (35) e (36)) e para produtos de granulação grossa, no caso contrário (equações (37) e (38)). O autor comparou seus resultados com a fórmula de Janssen e de A & M Reimbert para o milho e para a areia, encontrando diferenças, a maior variando de 20 a 25% em relação à fórmula de Janssen e, de 10 a 20%, em relação à fórmula de A & M Reimbert, dependendo do produto armazenado. As figuras 16(a) e 16(b) apresentam respectivamente esta análise.

O autor também apresenta a distribuição da pressão vertical obtida com o

método dos elementos finitos no fundo plano do silo para areia e para o milho, constantes das figuras 17(a) e 17(b), respectivamente. A tabela 9 apresenta os valores das propriedades físicas da areia e do milho obtidas pelo autor em ensaio de compressão onde a amostra é parcialmente confinada.

TABELA 9 - Propriedades físicas do milho e da areia obtidos por_Bischara, 1983

Produto	peso específico do produto (kN/m ³)	Ângulo de atrito interno ϕ_i [°]	μ
Milho	7,77	33	0,4
Areia de rio	15,23	32	0,4

$$p_h = 0,329 \frac{\cos^2 \phi_i \gamma^{1,18} d^{0,83}}{\mu^{1,08}} \left(1 - e^{-\frac{2z\mu}{d}}\right) \quad (35)$$

$$p_v = 2,06 \frac{\sin^2 \phi_i \gamma^{1,03} d}{\mu} \left(1 - e^{-\frac{2z\mu}{d}}\right) \quad (36)$$

$$p_h = 0,526 \frac{\cos^2 \phi_i \gamma^{1,08} d^{0,80}}{\mu^{0,96}} \left(1 - e^{-\frac{2z\mu}{d}}\right) \quad (37)$$

$$p_v = 0,746 \frac{\sqrt{\sin \phi_i} \gamma^{1,12} d^{0,91}}{\mu^{0,91}} \left(1 - e^{-\frac{2z\mu}{d}}\right) \quad (38)$$

Segundo o autor, as fórmulas acima, para a pressão vertical a uma profundidade z , representam a pressão vertical média naquela posição. No fundo, para o caso de silos de fundo plano, a pressão vertical varia aproximadamente segundo uma parábola onde a relação entre a maior e a menor pressão, λ , respectivamente no centro e junto à parede do silo, é dada pelas seguintes expressões, em função do diâmetro máximo das partículas do produto ensilado:

(a) produto cujo diâmetro máximo das partículas é menor ou igual a 2,5mm

$$\lambda = 0,44 \frac{d^{0,35} \mu^{0,326}}{(\sin \phi_i)^{1,4}} \geq 1 \quad (39)$$

(b) produto cujo diâmetro máximo das partículas é maior que 2,5mm

$$\lambda = 1,185d^{0,32} \mu^{0,35} \geq 1 \quad (40)$$

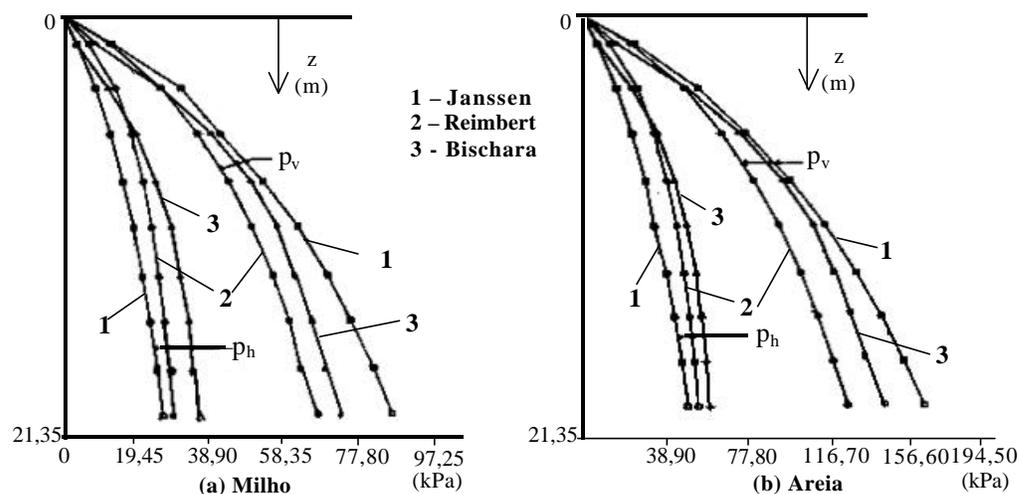


Figura 16 – Modelo de Bischara x Janssen e Reimbert – Pressões horizontais e verticais

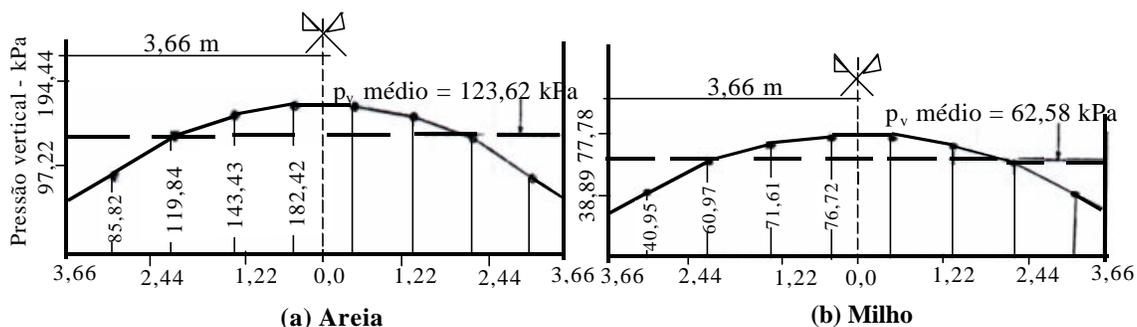


Figura 17 – Pressão vertical no fundo plano do silo, segundo Bischara, 1985

3.2.2 Pressões dinâmicas ou de fluxo

3.2.2.1 Fundamentação teórica

NANNINGA (1956), apud GAYLORD & GAYLORD (1977), mostrou que a igualdade das pressões verticais nas seções horizontais imediatamente acima e abaixo do plano de mudança somente existe se houver um pico na pressão horizontal (Figura 18(b)). Em um cilindro com paredes sem atrito, o valor máximo possível da relação entre a pressão horizontal e a vertical é a relação K_p/K_a dos coeficientes de pressão correspondentes. Nanninga desenvolveu fórmulas para K_a e K_p , assumindo que o cisalhamento aumenta linearmente de zero, no centro do silo, até $p_h \tan \phi_w$, na parede. Ele também mostrou que a pressão de pico cai

rapidamente abaixo do plano de mudança e se aproxima da pressão de Janssen assintoticamente (Figura 18(b)). Nanninga conclui que a distribuição de pressão real deve ser parecida como mostrado pela linha pontilhada da figura 18(b).

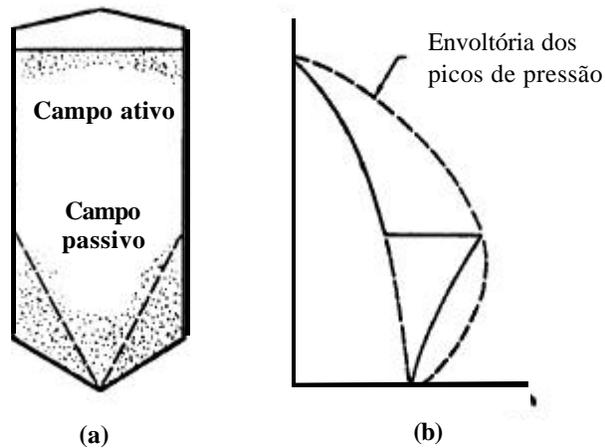


FIGURA 18 – Pressões dinâmicas em fluxo de funil

A distribuição da pressão de pico mostrada na figura 18(b) é instantânea, visto que o plano de mudança se movimenta para cima na medida que o fluxo se desenvolve. Então, o projeto deve estar baseado na envoltória dos picos de pressão, como mostrado na figura 18(b).

Também a pressão de pico se desenvolve em silos de fluxo de funil, pela mesma razão que em silos de fluxo de massa. Porém, o campo passivo que se desenvolve no funil é cônico em um silo cilíndrico e tende a cônico em silos de outras formas. Visto que o plano de mudança também pode se movimentar para cima além do funil, picos de pressão podem se desenvolver em silos de fluxo de funil, como em um silo de fluxo de massa.

Os picos de pressão atuam diretamente na parede em fluxo de massa, mas quando o plano de mudança está no funil, devido ao produto estagnado que está abaixo do funil, o pico de pressão no funil tende a ser amortecido e distribuído sobre uma área mais larga da parede que aquele que atua diretamente na parede.

Tendo em vista os objetivos deste trabalho, será dada ênfase às pressões dinâmicas ou de fluxo advindas de fluxo de funil e pesquisas realizadas.

3.2.2.2 Métodos para obtenção das pressões dinâmicas

De um modo geral, existem dois métodos para determinar as pressões dinâmicas: calcular diretamente as pressões através de formulações matemáticas obtidas teoricamente ou indiretamente, modificando a pressão estática calculada usando coeficientes de sobrepressão. No presente estágio de desenvolvimento, nenhuma das aproximações é completamente satisfatória (AYUGA, 1995)

Métodos diretos

Método de Caquot (Apud SAFARIAN, 1985; RAVENET, 1992)

Desenvolvido em 1956 por CAQUOT E KERISEL, este é um dos dois métodos aprovados pela norma francesa de projeto de silo - (o método de Reimbert é o outro). O método de Caquot provê fórmulas separadas para as pressões durante carregamento e durante o descarregamento. Está baseado na relação entre as pressões horizontais e verticais em um prisma elementar no interior do produto armazenado não coesivo, assumindo a forma da equação de pressão ativa de Rankine, durante o carregamento, e a forma da equação de pressão passiva de Rankine, durante o esvaziamento, ou seja, a relação entre as pressões horizontais

e verticais podem variar entre $\frac{1 - \text{sen } \phi_i}{1 + \text{sen } \phi_i}$ e $\frac{1 + \text{sen } \phi_i}{1 - \text{sen } \phi_i}$.

As equações finais do método de Caquot são as seguintes, para o caso de silo cilíndrico:

Pressão dinâmica horizontal, p_{he} , na profundidade z é:

$$p_{he}(z) = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{1}{\cos \phi_w} \cdot \frac{d}{2} \left(1 - e^{-\frac{z K_0 \mu \cos^2 \phi_w}{d}} \right) \quad (41)$$

onde:

$$K_0 = \frac{\cos \phi_w - \sqrt{\cos^2 \phi_w - \cos^2 \phi_i}}{\cos \phi_i + \sqrt{\cos^2 \phi_w - \cos^2 \phi_i}} \quad (42)$$

Método de Platnov e Kovtun (Apud SAFARIAN, 1985; RAVENET, 1992)

Da análise de resultados experimentais, PLATNOV E KOVTUN (1959) concluíram que, com a finalidade de obter as reais pressões horizontais e verticais em silos durante esvaziamento, a altura de armazenamento de silo deveria ser dividida nas três regiões como as mostradas na figura 19. A altura e as equações para cada região são determinadas abaixo e valem somente para produtos granulares constituídos de partículas esféricas:

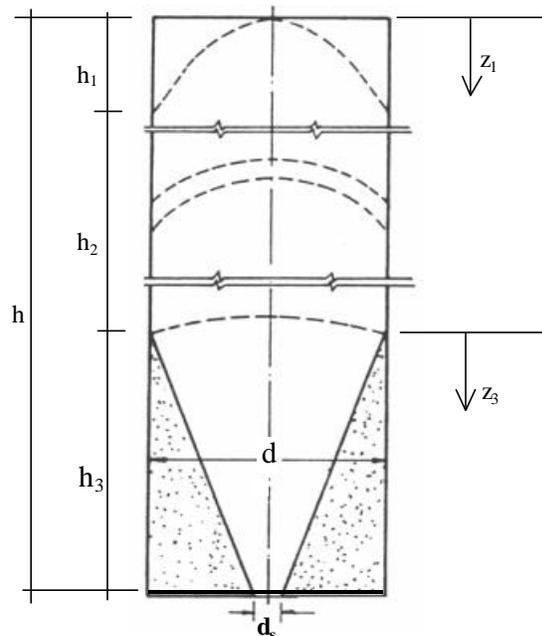


FIGURA 19– Modelo de Platnov e Kovtun para obtenção das pressões dinâmicas

Região superior: Na região superior, de altura h_1 , não ocorre arqueamento e a pressão durante esvaziamento segue a teoria de Rankine para pressões em um maciço de terra majorada pelo coeficiente ξ , como a seguir:

$$h_1 = dtg\phi_r \quad (43)$$

$$p_{he,1}(z_1) = \xi z_1 tg^2(45^\circ - \phi_r/2) \quad (44)$$

$$p_{ve,1} = \gamma z_1 \quad (45)$$

Região mediana: Na região mediana da altura de silo, classificada como região de formação de arco ou cúpula, a pressão horizontal e a vertical são obtidas considerando que a transferência das forças e o equilíbrio durante o fluxo é semelhante ao que ocorre em uma estrutura em forma de arco. Dessa forma, foram

obtidas as seguintes expressões para pressão vertical e horizontal, para a fase de descarregamento nessa região:

$$h_2 = h - (h_1 + h_3) \quad (46)$$

$$p_{he,2}(z_2) = 0,5\gamma dtg \phi_{i,z_2} \quad (47)$$

$$p_{ve,2}(z_2) = \gamma z_2 \left(1 - 4\eta \mu tg \phi_{i,z_2} \right) \quad (48)$$

Região inferior: Na região inferior de altura h_3 , o comportamento da massa de grão muda por causa do fluxo de funil que forma na abertura de descarga, levando a uma mudança na mecânica da transferência das forças devidas ao produto fluindo. Eles indicam que o cálculo das pressões nesta região seja feito com as mesmas equações da região superior, mas substituindo z_1 por z_3 pois, segundo eles, o comportamento nesta região é bastante semelhante ao da região superior. Desta forma:

$$h_3 = 0,5(d - d_s)tg \phi_{i,h} \quad (49)$$

$$p_{he,3}(z_3) = \xi z_3 tg^2(45^\circ - \phi_r/2) \quad (50)$$

$$p_{ve,3}(z_3) = \gamma z_3 \quad (51)$$

Nas formulações acima, além dos símbolos já definidos no início deste trabalho, as seguintes notações representam:

h_i , $i = 1,2,3$ = altura da região i

z_i , $i = 1,2,3$ = coordenada vertical com início na região h

$p_{he,i}$, $i = 1,2,3$ = pressão horizontal atuante na parede da região i

$p_{ve,i}$, $i = 1,2,3$ = pressão vertical na seção transversal da região i

$\xi = 1,65$ para silos cilíndricos com diâmetro entre 3,7 e 6,0m.

$\phi_{i,z}$ = ângulo de atrito interno do produto na profundidade z

$$tg \phi_{i,z_2} = tg \phi_r + 1,1 \frac{C - 0,5236}{0,7405 - C} \quad (52)$$

$$C = 0,7405(1 - e^{-(1,6 + 0,14h)}) \quad (53)$$

$$\eta = 0,15 + 0,05 \frac{C z_2}{d} \quad (54)$$

$\phi_{i,h}$ = ângulo de atrito interno do produto na profundidade h

MÉTODO DE JENIKE

Segundo JENIKE (1973), em fluxo de funil, quando o fluxo começa, o produto no espaço sobre a saída se expande verticalmente. Esse espaço se propaga para cima formando um canal de fluxo dentro da massa estagnada do produto. O canal de fluxo normalmente assume a forma cônica, alargando acima da saída. O ângulo do cone varia em função do produto que, por sua vez, depende de seu teor de umidade, temperatura, tempo de armazenamento, como também da seqüência e taxa de carga e descarga. Se o silo for suficientemente alto, o cone se expande nas paredes cilíndricas do silo. Acima daquele nível, chamado "transição efetiva", o fluxo ocorre com pequena ou nenhuma deformação dentro da massa e todo o produto flui para baixo sempre que algum produto é retirado do silo.

No nível da transição efetiva, ocorre uma mudança do campo de tensão, antes ativo, para um campo de pressão passivo e um pico de pressão se desenvolve nesse nível. Como o local da transição varia, é necessário projetar o cilindro para a envoltória dos picos de pressão (figura 20). A mais baixa posição da transição efetiva geralmente pode ser predita. Nessa posição, o lugar dos picos de pressão determina a pressão crítica. Abaixo daquela posição, uma distribuição linear de pressão pode ser assumida até o valor de Janssen, na saída.

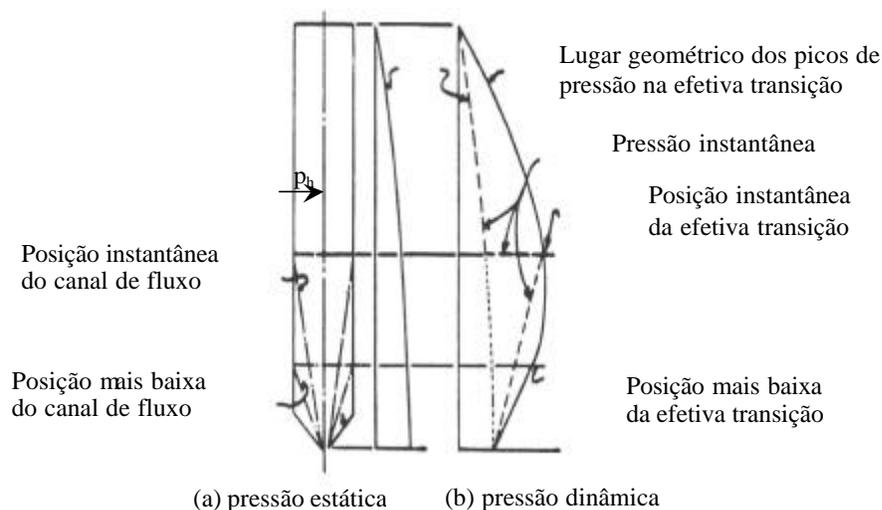


FIGURA 20 – Modelo de Jenike para obtenção das pressões dinâmicas

No Apêndice A da parte 4, Jenike apresenta a formulação usada para obtenção das curvas adimensionais $p_{ne}/\gamma d \times h/d$ mostradas na figura 21, para $h/d=2$

como função de μK , na qual o valor da relação entre a pressão horizontal e vertical, K , é sugerido ser adotado como 0,4 para qualquer relação h/d e qualquer para produto. Também na parte 4 do trabalho de Jenike são apresentadas as curvas para $h/d=3, 4$ e 5 . Segundo Jenike, em relações $h/d < 2$, o canal de fluxo não corta a parede e portanto as pressões dinâmicas serão iguais à estáticas que deverão ser calculadas segundo a teoria de Janssen. A pressão de atrito na situação de descarregamento p_{we} acompanha a pressão horizontal p_{he} , isto é:

$$p_{we} = \mu p_{he} \quad (55)$$

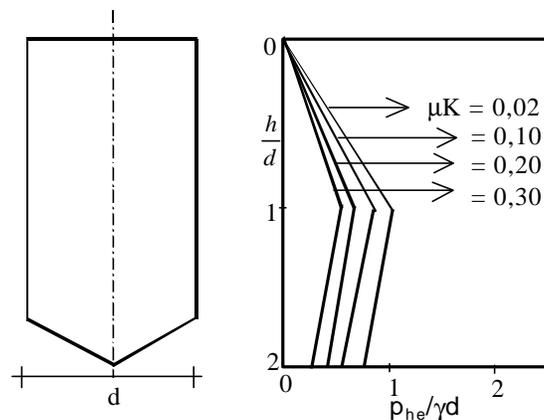


FIGURA 21 - $p_{he}/\gamma d$ para silos cilíndricos, $h/d=2$

Método de Vivancos (Apud CALIL JR., 1984; RAVENET, 1992)

A partir da teoria de A & M Reimbert, VIVANCOS (1978) apresenta um método para o cálculo das pressões horizontais, verticais e de atrito durante o descarregamento, simplesmente mudando o sinal do ângulo de atrito interno e do ângulo de repouso, na formulação dos irmãos Reimbert para o cálculo das pressões estáticas. A formulação proposta por Vivancos tem como consequência que:

- a pressão horizontal máxima é mesma durante o carregamento e descarregamento;
- a pressão vertical máxima durante o carregamento é maior que no descarregamento;
- a pressão horizontal durante o carregamento, a uma altura z , é menor que no descarregamento;
- a pressão vertical sobre o fundo é maior durante o carregamento do que

no descarregamento.

Método dos coeficientes de sobrepressão

O método de obtenção das pressões dinâmicas através de coeficientes de sobrepressão aplicados às pressões estáticas é um dos mais utilizados por pesquisadores e pela maioria das normas. Tomando-se como base as principais normas estrangeiras, observa-se uma grande variação entre os coeficientes propostos por cada uma delas, o mesmo acontecendo entre os valores propostos por pesquisadores como Ravenet, Safarian, A & M Reimbert, Calil e Haaker, entre outros. Um estudo comparativo entre os coeficientes de sobrepressão e os métodos para obtenção direta das pressões dinâmicas propostos pelas principais normas estrangeiras para silos de baixa relação altura/diâmetro será visto mais adiante.

3.3 SILOS CILÍNDRICOS DE BAIXA RELAÇÃO ALTURA/DIÂMETRO

Além da classificação “silos baixos” para estruturas de armazenamento de produtos a granel vista no capítulo 2, PIEPER (1977), apud GAYLORD & GAYLORD (1977), classifica os silos como baixos, intermediários e altos como a seguir, em função das dimensões do silo e do produto armazenado. Se a altura h do produto armazenado é menor que a altura de funil h_1 (figura. 22(a)), o silo é considerado baixo. Se $h > 2h_2$ (figura. 22(b)), é considerado que o silo é alto. Silos para qual $h_1 < h < 2h_2$ são classificados como intermediários em relação à altura. As alturas críticas h_1 e h_2 são determinadas por:

$$h_{f1} = \frac{d - d_s}{2} \operatorname{tg} \alpha_1 \quad (56)$$

$$\text{onde } \alpha_1 = 29 \sqrt[4]{\phi_1 c} \quad (57)$$

$$h_{f2} = \frac{d - d_s}{2} \operatorname{tg} \alpha_2 \quad (58)$$

$$\text{onde } \alpha_2 = 32 \sqrt[4]{\phi_1 c} \quad (59)$$

O fator c nas fórmulas de Pieper, denominado coeficiente de rugosidade, depende da rugosidade da parede e do tamanho da partícula do produto armazenado. Para paredes lisas, c é igual a 0.75 para produtos finamente

granulados (diâmetro máximo $< 1\text{cm}$), tal como areia, grãos e soja, e 0,85 para pós (diâmetro máximo $\leq 0,1\text{mm}$), como farinhas e cimento. Para aço rebitado ou soldado e concreto sem acabamento, c é igual a 0.80 para produtos de granulação grossa, como pedregulho e minério, 0.85 para produtos finamente granulados e 0.95 para produtos em pó.

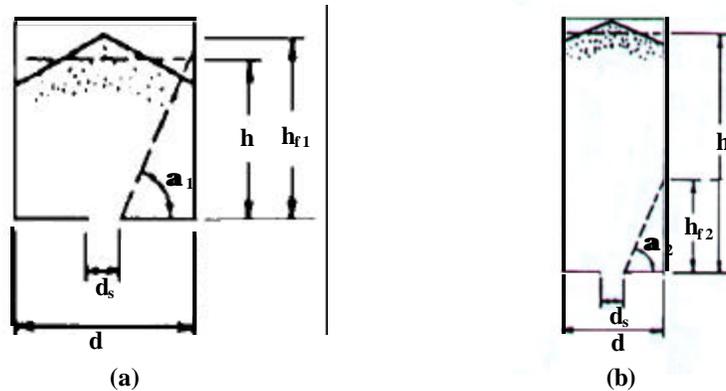


FIGURA 22 - Formas de um silo – Pieper, 1977

A importância da classificação das estruturas de armazenamento de produtos a granel, segundo as suas dimensões, está no fato que, de um modo geral, a previsão das pressões estáticas ou dinâmicas está baseada segundo essa classificação. Embora algumas normas não façam essa classificação, na maioria das vezes prevêm pressões diferenciadas em função da relação h/d .

Analogamente aos silos altos, os silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro podem ser construídos com os mais diversos materiais, mas a grande maioria deste tipo de silo, mesmo em termos mundiais, são metálicos, de chapa lisa ou corrugada. Podem ser descarregados através de fluxo por gravidade ou através de meios mecânicos. O fundo pode ser em forma de funil ou plano. A célula de fundo plano requer menos altura para um determinado volume de material armazenado. O seu custo inicial é baixo, comparado a outros tipos, e uma das razões pela qual a construção pode ser econômica é que o produto repousa sobre o solo, do qual ele é isolado apenas por uma laje impermeável. Isso significa que a fundação é limitada a um anel de concreto sob as paredes. O recalque do fundo plano resultante das pressões verticais exercidas pelo produto não é considerado problemático.

3.3.1 Pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro

Como foi visto anteriormente, AIRY (1897) foi o primeiro pesquisador a diferenciar as pressões exercidas pelo produto armazenado, em estruturas altas e baixas, mas de um modo geral as normas estrangeiras adotam a teoria de Janssen e/ou de A & M Reimbert para a previsão das pressões estáticas, considerando coeficientes de sobrepressão para a obtenção das pressões dinâmicas, analogamente aos silos altos, como também apresentam algumas simplificações para o cálculo das pressões diferentemente dos silos altos, como será visto mais adiante.

Na verdade, pouco é conhecido sobre a magnitude e a distribuição da pressão normal à parede em silos baixos. Do ponto de vista técnico, os silos de baixa relação altura/diâmetro apresentam menos problemas de estabilidade geral, mas maiores problemas de estabilidade local (CALIL, 1990). Os silos de baixa relação altura/diâmetro descarregados centralmente não estão sujeitos a grande redistribuição de pressões durante o descarregamento. As pressões em silos de baixa relação altura/diâmetro são muito afetadas pela forma da superfície livre do produto armazenado, o que não tem a mesma influência em silos altos. De um modo geral, as normas não levam em conta as implicações desse fato, de modo a obter-se formulações mais precisas e econômicas (Brown & Nielsen, 1998).

Para silos de baixa relação altura/diâmetro, muitos pesquisadores questionam a validade da solução de Janssen ou de Reimbert e propõem a solução de Rankine, desenvolvida para uma parede de contenção de terra de extensão ilimitada (CALIL JR, 1987), ou a solução de Coulomb (WIJK, 1993). Isto é também reconhecido pela norma alemã DIN 1055-1987, que indica que as pressões na parede sejam obtidas pela teoria das pressões de terra para relações altura/diâmetro menores que 0,8.

A seguir, serão apresentadas as teorias de Rankine e Coulomb que são as mais utilizadas e indicadas por pesquisadores para silos de baixa relação altura/diâmetro.

3.3.1.1 Teorias para silos de baixa relação altura/diâmetro

Teoria de Rankine (Apud SAFARIAN e HARRIS, 1985; GOMES, 2000)

Nesta teoria, publicada em 1857, o pesquisador analisa o estado de tensão em um maciço granular, fofo, não coesivo e semi-infinito. Ela foi desenvolvida com a hipótese que a deformação no maciço produz um estado ativo ou passivo de pressões, conforme a pressão vertical seja a maior ou a menor pressão principal. Segundo Safarian e Harris (1985), este método não é muito preciso para silos de baixa relação altura/diâmetro, tendo em vista que ignora as condições de contorno deste tipo de unidade armazenadora e a força de atrito nas paredes é considerada nula. A figura 23 apresenta as pressões exercidas pelo produto e parâmetros envolvidos para silos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano, de acordo com a teoria de Rankine.

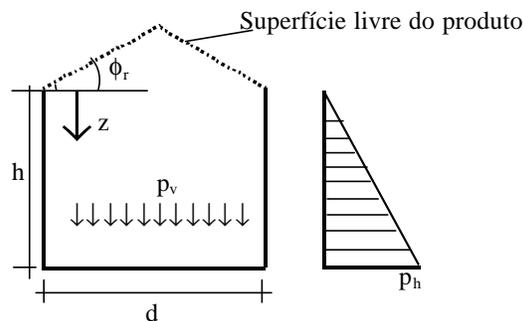


FIGURA 23 – Pressões exercidas pelo produto em silos de fundo plano, de acordo com a teoria de Rankine

De acordo com as seguintes situações em relação à superfície livre do produto, as formulações para as pressões horizontais e verticais são:

(a) Superfície de topo do produto armazenado é horizontal

- Pressão horizontal estática na profundidade z:

$$p_h = K\gamma z \quad (60)$$

onde
$$K = \frac{1 - \text{sen } \phi_r}{1 + \text{sen } \phi_r} \quad (61)$$

- Pressão vertical estática na profundidade z, abaixo da superfície, é:

$$p_v = \gamma z \quad (62)$$

(b) Superfície do produto armazenado com inclinação igual ao ângulo de repouso

- Pressão horizontal estática na profundidade z é:

$$p_h = \gamma z \cos^2 \phi_r \quad (63)$$

- Pressão estática vertical na profundidade z é:

$$p_v = \gamma(z + a_0 \operatorname{tg} \phi_r) \quad (64)$$

CALIL JR. (1987), com base em experimentação em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro ou lado, propõe a modificação do valor de K da teoria de Rankine para a formulação de Hartmann, equação (11), para o caso de silos de chapa de aço corrugada. Esta proposta será denominada de teoria de Rankine-Calil e é válida para silos onde a superfície livre do produto é plana ou não. Nesse caso, a profundidade z é obtida a partir da superfície de referência, conforme a figura 24.

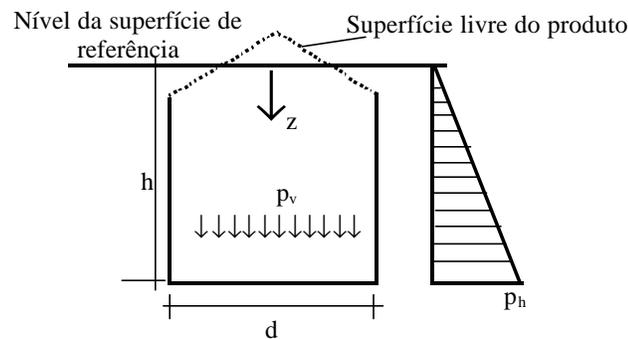


FIGURA 24 – Pressões exercidas pelo produto em silos de fundo plano, de acordo com a teoria de Rankine-Calil

Teoria de Coulomb (Apud WIJK, 1993; GOMES, 2000)

Na sua teoria publicada em 1776, Coulomb considerou a existência de atrito entre o material e a parede de contenção e, como na solução de Rankine e Janssen, é assumido que o maciço está em um estado ativo. Segundo WIJK (1993), para uma parede de contenção, isto é aceitável: se a pressão horizontal do maciço é mais alta do que a parede pode suportar, a parede se desloca. Como resultado, o maciço se deforma na direção lateral, o que diminui a pressão horizontal. A menor pressão horizontal possível é aquela do estado ativo e, nesse caso, as formulações obtidas para a pressão horizontal, de atrito, e a vertical são:

$$p_h = \gamma z \frac{\cos^2 \phi_i}{[1 + \text{sen} \phi_i \sqrt{1 + E}]^2} \quad (65)$$

$$p_w = \gamma z \frac{E \text{sen} \phi_i \cos \phi_i}{[1 + \text{sen} \phi_i \sqrt{1 + E}]^2} \quad (66)$$

$$p_v = \gamma z \frac{1 + \text{sen}^2 \phi_i + 2 \text{sen} \phi_i \sqrt{1 - E^2}}{[1 + \text{sen} \phi_i \sqrt{1 + E}]^2} \quad (67)$$

$$E = \frac{\tan \phi_u}{\tan \phi_i} \quad (68)$$

3.3.1.2 Pressões para silos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano segundo as principais normas estrangeiras

As normas de um modo geral propõem formulações para as pressões exercidas pelos produtos armazenados nas paredes e fundo de silos de baixa relação altura/diâmetro diferenciada dos silos altos, bem como pressões adicionais para levar em conta o efeito de pressões assimétricas, inevitáveis mesmo em silos com carregamento concêntrico e de eixo simétrico, e que são dependentes das características do produto e imperfeições na geometria do silo construído.

De um modo geral, a formulação básica para a previsão das pressões é obtida da teoria de Janssen, mas algumas normas propõem alterações na formulação original, como no caso da norma inglesa BMHB-1985 e da francesa SNBATI -1975 e/ou propõem configuração de carregamento diferentemente de Janssen, considerando uma região linearizada na parte superior do carregamento, como no caso das normas européias ENV-1995 e ISO-1997, da australiana AS-1996 e da francesa SNBATI -1975. A norma canadense CFBC-1983 adota a teoria de Rankine e a norma DIN-1987 e a americana ACI-1991, para o caso das pressões horizontais e de atrito, não alteram a formulação de Janssen.

Conforme foi visto anteriormente, as normas estrangeiras de um modo geral apresentam, em tabela própria, os valores de γ , μ e K . que estão transcritos no item 2.3.2 para os 10 produtos comuns à normas analisadas. Para o caso do produto não constar da tabela da norma considerada ou as propriedades físicas do

produto terem sido obtidas experimentalmente, o valor do parâmetro K é obtido conforme item 2.3.3.

A seguir, serão apresentadas as formulações propostas pelas normas acima citadas para a pressões exercidas pelos armazenados nas paredes e fundo para este tipo de unidade armazenadora, bem como as pressões adicionais propostas para o caso de carregamento e descarregamento central e fundo plano. Neste trabalho serão considerados silos de baixa relação altura/diâmetro, aqueles em que $h/d < 1,5$.

Pressões iniciais ou de carregamento

- **Norma ISO-1997**

A norma ISO-1997 adota a formulação de Janssen sem nenhuma alteração para o cálculo das pressões horizontais e de atrito na parede (equações (24) e (26)). A pressão vertical na base plana para silos de baixa relação altura/diâmetro, embora obtida também com a formulação de Janssen (equação (25)), prevê pressões verticais diferenciadas junto à parede e no centro do silo, mas limitadas por γz , como a seguir:

- junto à parede usar $z = h$;
- no centro do silo usar $z = 1,5d$

- **ENV-1995**

A norma ENV-1995 também adota a formulação de Janssen sem nenhuma alteração para o cálculo das pressões horizontais e de atrito na parede. A pressão vertical (p_{vf}) na base plana de silos de baixa relação altura/diâmetro é dada pela formulação:

$$p_{vf} = 1,2 \left\{ p_{v1} + (p_{v2} - p_{v3}) \frac{1,5d - h}{1,5d - h_1} \right\} \quad (69)$$

$$p_{v1} = \text{equação (25)} \quad \text{com } z = h$$

$$p_{v2} = \gamma h_2 \quad (\text{ver figura 25}) \quad (70)$$

$$p_{v3} = \text{equação (25)} \quad \text{com } z = h_1 \quad (\text{ver figura 25}).$$

h_1 = distância da superfície equivalente até o ponto de contato mais alto entre o produto e parede.

h_2 = distância do ponto mais alto de contato entre o produto e a parede e a superfície livre do produto.

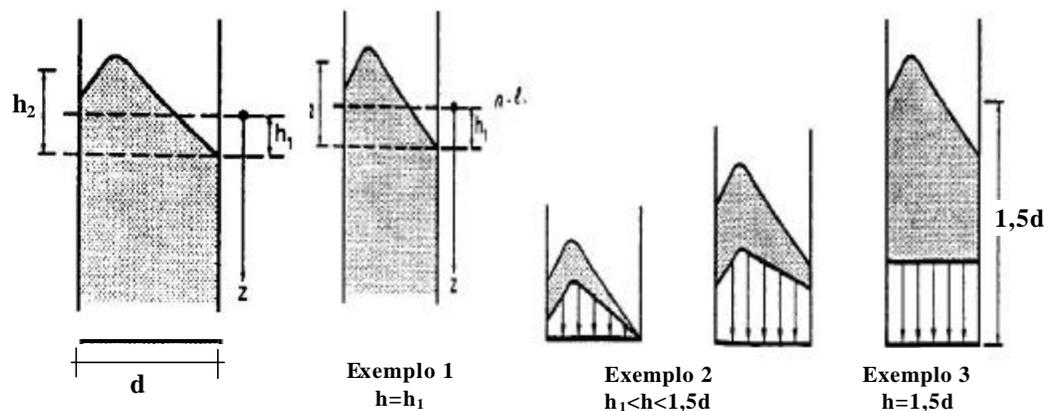


FIGURA 25- pressões no fundo de silos baixos de fundo plano, segundo a norma ENV

As normas europeias ISO e ENV permitem linearizar a pressão horizontal p_h e a pressão de atrito p_w na parte superior do perfil do carregamento quando $h/d < 1,5$, da seguinte forma: no ponto onde a superfície superior do produto armazenado encontra a parede do silo, pode ser reduzida a zero. Abaixo deste ponto, a pressão varia linearmente como na figura 26, calculada usando $K= 1,0$, até que esta pressão linear alcance a pressão obtida da equação (24) ou (26) .

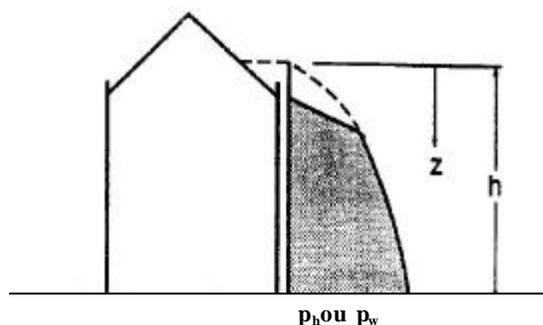


Figura 26 – Distribuição da pressão horizontal ou de atrito em silos baixos, segundo as normas ISO e ENV

De modo a facilitar a obtenção do ponto de interseção entre a parte linear e a exponencial, a autora deste trabalho apresenta a fórmula para obtenção desse ponto para silos cilíndricos como a seguir, em função da figura 27:

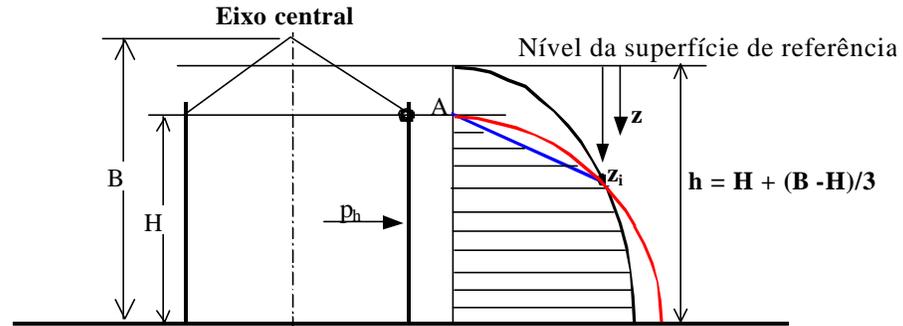


FIGURA 27 – Linearização da pressão horizontal na parede de silo baixo segundo as normas ISO e ENV

1. A linearização é feita para $K = 1,0$. Analisando-se a condição imposta, tem-se que:

$$z_0 = \frac{d}{4K\mu}, \quad K = 1,0 \Rightarrow z_0 = \frac{d}{4\mu}, \quad \text{ou seja, } z_0 \text{ diminui, pois } K \text{ é sempre menor}$$

que 1,0. Como z_0 diminui, então $p_h(z)$ aumenta (verifica-se na equação (24)).

2. Equaciona-se a curva correspondente a $p_h(z)$, com $0 < z < h$;

3. Equaciona-se outra curva para $p_h(z)$ com $K = 1,0$, para $(B-H)/3 < z < h$, e acha-se a cota de z_i de interseção desta curva com a curva traçada no item 2,

$$\text{obtendo-se } z_i = \frac{1}{3} \frac{B-H}{(1-K)} \quad (71)$$

4. A partir do ponto z_i de interseção, traça-se uma linha até o ponto onde o produto encontra a parede vertical do silo. Esta linearização em p_h poderá ser adotada nos valores de $p_w = \mu \cdot p_h$.

- **AS 3774-1996**

A norma australiana somente considera silo de baixa relação altura/diâmetro aquele em que $h/d < 1$ e as pressões horizontais e de atrito têm as mesmas expressões que as de Janssen.

Nesse caso ($h/d < 1$), a norma australiana permite linearizar a pressão horizontal p_h e a pressão de atrito p_w na parte superior do perfil do carregamento, da seguinte forma: no ponto onde a superfície superior do produto armazenado encontra a parede do silo, a pressão pode ser reduzida a zero. Abaixo deste ponto,

a pressão varia linearmente, como na figura 28, até a profundidade $z = 1,5h_0$, cuja pressão tem o mesmo valor, como dado pela equação (24) ou (26).

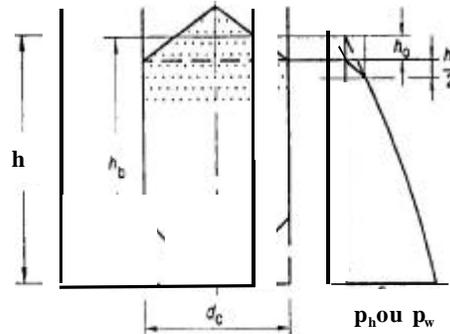


FIGURA 28 - Distribuição da pressão horizontal e de atrito em silos baixos, segundo a norma australiana AS

A pressão vertical na base, segundo a norma australiana para $h/d < 1$ e para silos cilíndricos, tem uma configuração parabólica (figura 29(b)) e é dada pela seguinte formulação:

$$p_{vf}(x) = 1,25p_{vi} \left[1 - 1,6 \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right] \quad (72)$$

$$p_{vi} = \gamma h \quad (73)$$

x = coordenada radial no silo circular, d = diâmetro do silo

Independentemente da relação h/d , a base também deve ser projetada para suportar trações devidas ao cisalhamento horizontal (figura 29(c)) que age do centro do silo para as extremidades. Este cisalhamento é decorrente do atrito do produto com o material do fundo do silo e será determinado pela seguinte equação:

$$p_{Sf}(x) = 0,3p_{vi} \left[\left(\frac{2x}{d_c} \right) - \left(\frac{2x}{d_c} \right)^2 \right] \quad (74)$$

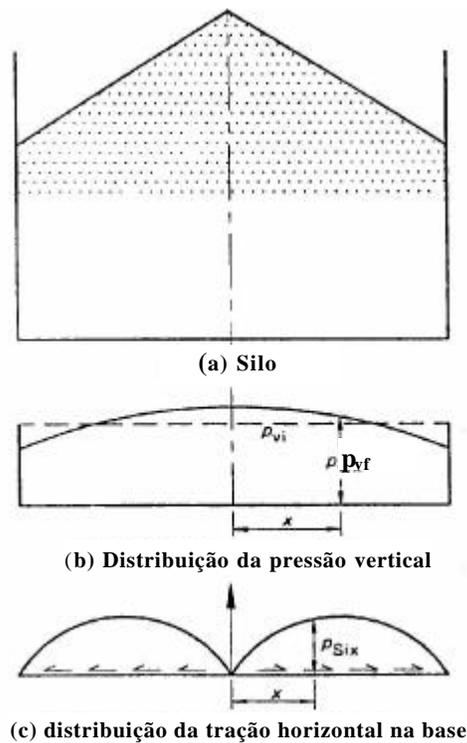


FIGURA 29- Distribuição das pressões no fundo plano, segundo a norma australiana AS

A norma australiana é a única, entre as analisadas, que propõe o dimensionamento da base também para tensões de cisalhamento decorrentes do atrito entre o produto e o material da base.

Para o caso de $h/d \geq 1$, as formulações para as pressões horizontais e de atrito permanecem as mesmas, mas a pressão vertical na base é modificada, substituindo $p_v = \gamma h$, por $p_v =$ equação (25), que é a formulação de Janssen para as pressões verticais.

- **ACI-1991**

A norma americana ACI é a única entre as analisadas que, para silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro, adota integralmente a formulação de Janssen para as pressões horizontais, verticais e de atrito (equações (24), (25) e (26)). Ela também permite o cálculo das pressões pela formulação de A & M Reimbert (equações (31), (32) e (33)).

A ANSI (American National Standard Institute), da qual a ACI faz parte, em 1996 apresentou recomendações para a obtenção das pressões estáticas

exercidas por produtos de fluxo livre em estruturas baixas de armazenamento, adotando parte da teoria de Coulomb e parte da teoria de Rankine. Nestas recomendações, além do ângulo de atrito interno e do peso específico, ela apresenta os valores a adotar para o coeficiente de atrito μ para alguns produtos em função da rugosidade da parede, inclusive para silos de chapa de aço corrugada e fixa o valor de $K=0,5$ para todos os produtos de fluxo livre. No entanto, a definição de estruturas baixas de armazenamento, segundo essa recomendação, são estruturas de fundo plano com seção transversal quadrada ou retangular, onde a largura da edificação é maior que duas vezes a altura efetiva do produto armazenado. Nesse caso, se a superfície do produto for plana, a pressão horizontal e vertical no fundo são obtidas pelas equações (60) e (62) respectivamente, da teoria de Rankine e a força de compressão devida ao atrito, $P_{v,w}$, na base do silo, por metro de parede, é obtida por:

$$P_{v,w} = \mu K \gamma h^2 / 2 \quad (75)$$

Nos casos onde a superfície livre do produto apresenta um prisma trapezoidal, é indicado que a altura equivalente (h) do produto seja obtida multiplicando a altura do ponto mais alto de contato do produto com a parede, por um coeficiente α , maior do que 1, fornecido na recomendação, que é obtido em função do ângulo de atrito interno e do ângulo de repouso do produto. A tabela 10 apresenta os valores fornecidos pela ANSI para o parâmetro α e, a figura 30 os parâmetros geométricos envolvidos nas formulações (60), (62) e (75), para o caso da superfície livre do produto formar um prisma trapezoidal, de acordo com a proposta da ANSI.

TABELA 10 – Coeficiente α para determinação da altura total equivalente do produto, h , para armazenamentos onde a superfície livre do produto forma um prisma trapezoidal, segundo a ANSI

Ângulo de atrito interno, f_i (graus)	Ângulo de repouso do produto, f_r (graus)							
	16	18	20	22	24	26	28	30
24	1,15	1,17	1,19	1,22	1,25	-	-	-
26	1,16	1,19	1,22	1,25	1,28	1,31	-	-
28	1,18	1,21	1,24	1,27	1,31	1,35	1,39	-
30	1,20	1,23	1,27	1,30	1,35	1,39	1,55	1,50

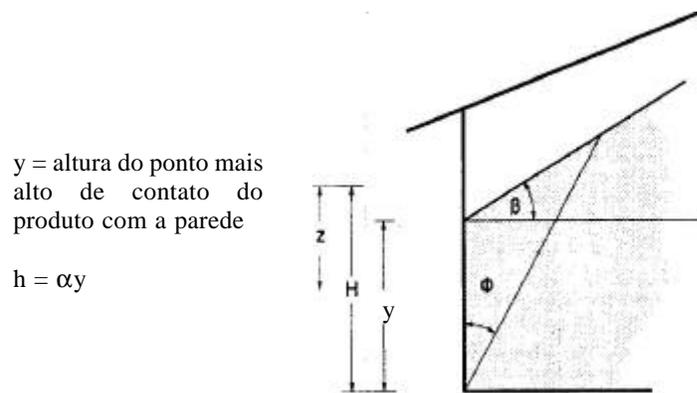


FIGURA 30 – Parâmetros geométricos para obtenção das pressões, segundo a ANSI

- **DIN-1987**

A norma alemã DIN recomenda a aplicação da teoria de Janssen para silos onde $h/d > 0,8$. Para essa relações, as pressões estáticas horizontais e de atrito são obtidas segundo as equações (24) e (26). Para os casos onde $h/d \leq 0,8$, a norma recomenda utilizar teorias de empuxo de terra, sem especificar nenhuma. A pressão vertical no fundo plano para $0,8 < h/d < 1,5$ é obtida por:

$$p_{vf} = c_b p_v \leq \gamma z^* \quad (76)$$

onde p_v é obtido da formulação de Janssen, equação (25).

$c_b = 1,8$ para produtos a granel que provoquem choques no fundo de silos com fluxo de funil (por exemplo, milho e clínquer)

$c_b = 1,5$ para os demais produtos

z^* = profundidade local da sobrecarga (figura 31)

A norma prevê pressões verticais diferenciadas junto à parede e no centro do silo, como a seguir:

- junto à parede usar $z = h$;
- no centro do silo usar $z = 1,5c$

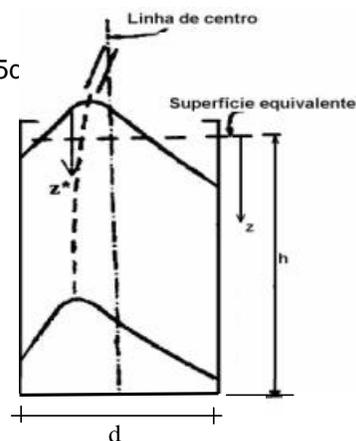


FIGURA 31 - Parâmetros geométricos para o cálculo da pressão no fundo do silo, segundo a norma DIN

- **BMHB-1985**

Para o caso de $h/d < 1$, a norma inglesa propõe duas fórmulas para o cálculo da pressão horizontal em silos cilíndricos, equações (77) e (79), onde deverá ser adotado o maior dos dois valores. Também a norma inglesa é a única que inclui, nas fórmulas para as pressões, os parâmetros dependentes das propriedades físicas dos produtos, com a indicação do limite (superior ou inferior) adequado para a obtenção da maior pressão possível com aquela formulação. A figura 32 apresenta os parâmetros geométricos necessários para a obtenção das pressões exercidas pelo produto armazenado, segundo a norma inglesa.

$$p_h = \frac{\gamma_u d}{4,88 \mu_l^{0,75}} \left[1 - \left(1 + \frac{z}{h_o} \right)^{-2} \right] \quad (77)$$

onde:

$$h_o = \frac{d}{4 \mu_l K_u} - \frac{h_s}{3} \quad (78)$$

ou:

$$p_h = K_u \gamma z \quad (79)$$

Para os casos em que $1 \leq h/d < 1,5$, a norma inglesa propõe somente a formulação dada na equação 77 para a obtenção da pressão horizontal.

A pressão de atrito por metro quadrado de parede é dada por μp_h e a força de compressão, na profundidade máxima, devida à pressão de atrito, por metro de parede na base do silo, é dada por:

$$P_{v,w} = \frac{\gamma d}{4} \left[z + \frac{h_s}{3} - \frac{\mu_l}{\mu_u} \frac{p_h}{\gamma K_u} \right] \quad (80)$$

A pressão vertical no fundo plano para $h/d < 1,5$ é suposta não uniforme e pode ser determinada por uma das duas equações a seguir:

$$p_{vf} = \gamma z \quad (81)$$

onde $z=h$, junto à parede, e $z=1,5d$, no centro da célula.

ou:

$$p_{vf} = \gamma z^* \quad (82)$$

e z , h_s e z^* , obtidos segundo a figura 32.

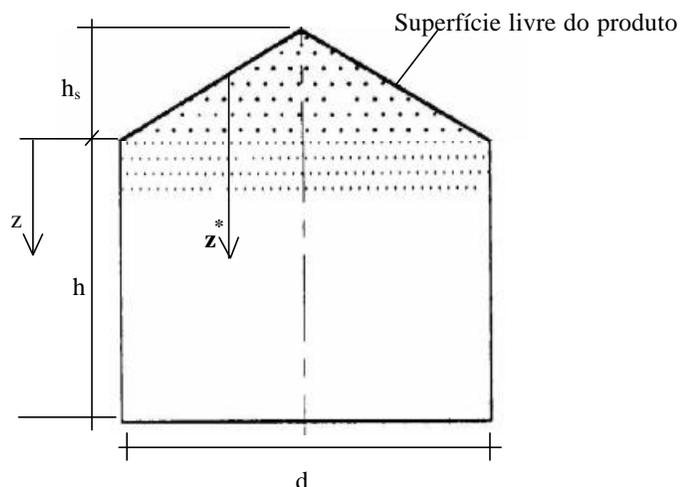


FIGURA 32 – Parâmetros geométricos segundo a norma inglesa BMHB

- **CFBC-1983**

A norma canadense considera silos baixos aqueles onde $h/d \leq 0,75$ e, para esses silos, no caso da superfície do produto ser nivelada, adota as mesmas fórmulas para a pressão horizontal, vertical e as de compressão na base do silo como as recomendadas pela ANSI (equações (60), (62) e (75)). A diferença fundamental entre a norma canadense e as recomendações da ANSI é que essas fórmulas valem também para silos cilíndricos. A norma também apresenta, para alguns produtos, os valores do ângulo de atrito interno e do coeficiente de atrito com a parede para concreto liso e rugoso, madeira compensada, aço liso e, para o caso de chapa de aço corrugada, $\mu = \text{tg}\phi_i$. O parâmetro K é variável, de acordo com o tipo de produto: $K=0,4$ para cereais, $K=0,5$ para sementes oleosas e $K=0,3$ para grãos de solo.

Para o caso da superfície livre do produto apresentar um cone, as pressões deverão ser majoradas pelo coeficiente 1,33.

Para silos com $h/d > 0,75$, a norma recomenda as formulações da teoria de Janssen para a obtenção da pressão horizontal e vertical (equações (24) e (25)), mas a força de compressão devida ao atrito por metro de parede na base é obtida por:

$$P_{v,w} = \gamma \frac{d}{4} \left[h - \frac{d}{4\mu K} + \frac{d}{4\mu K} e^{\left(\frac{-4K\mu h}{d} \right)} \right] \quad (83)$$

O parâmetro K , neste caso em função da rugosidade da parede, é fornecido em tabela própria da norma para vários produtos.

- **SNBATI-1975**

A obtenção das pressões exercidas pelos produtos armazenados, segundo a norma francesa, é caracterizada pela determinação de regiões onde a pressão horizontal varia linearmente com a profundidade, de acordo com as seguintes condições:

(a) Se a superfície livre do produto é plana, então o perfil da pressão horizontal será o dado na figura 33(a), onde os parâmetros geométricos necessários para a obtenção das pressões estão indicados.

(b) Se a superfície livre do produto tem a forma de um cone, então o perfil da pressão horizontal será o dado na figura 33(b), onde também estão indicados os parâmetros geométricos envolvidos para o cálculo das pressões.

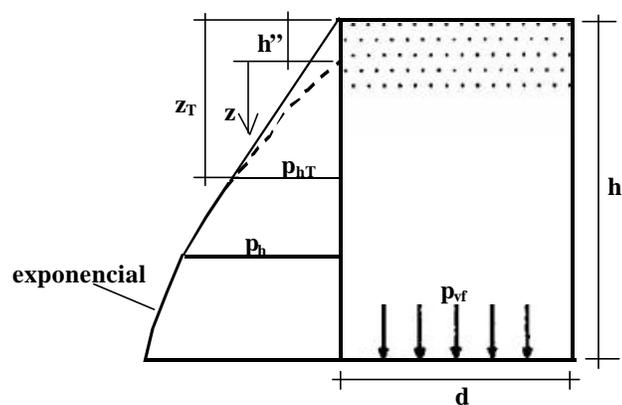


FIGURA 33(a) - Parâmetros geométricos para a obtenção das pressões segundo a norma francesa SNBATI – superfície livre do produto plana

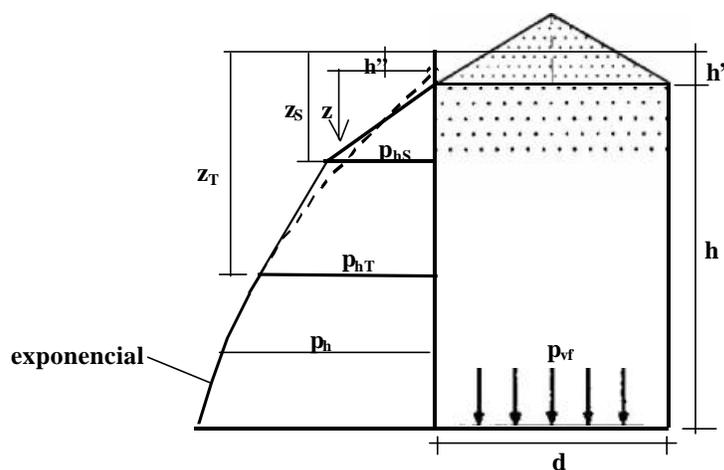


FIGURA 33(b) - Parâmetros geométricos para a obtenção das pressões segundo a norma francesa SNBATI – superfície livre do produto em cone

A seguir, são apresentados os valores dos parâmetros indicados nas figuras 33(a) e 33(b), bem como as pressões exercidas pelo produto armazenado em cada uma das situações.

(a) superfície livre do produto plana

$$h'' = \frac{d}{8} \mu \quad (84)$$

$$z_T = h'' + \sqrt{6h''z_o} \quad (85)$$

$$z_o = \frac{d}{4K\mu} \quad (86)$$

$$p_{hT} = 1,15 \frac{\gamma d}{4\mu} \left(1 - e^{-\frac{z_T - h''}{z_o}}\right) \quad (87)$$

$$p_h = 1,15 \frac{\gamma d}{4\mu} \left(1 - e^{-\frac{z - h''}{z_o}}\right) \quad (88)$$

$$p_{vf} = 1,35\gamma \left[z_o \left(1 - e^{-\frac{h - h''}{z_o}}\right) + h'' \right] \quad (89)$$

e a força de compressão devida ao atrito na profundidade máxima por metro de parede é dada pela formulação:

$$P_{v,w} = z_o \frac{\gamma d}{4} \left[\frac{h - h''}{z_o} - \left(1 - e^{-\frac{h - h''}{z_o}}\right) \right] \quad (90)$$

(b) Superfície livre do produto em cone

$$h'' = \text{equação (84)}$$

$$z_T = \text{equação (85)}$$

$$h' = \frac{d}{6} \text{tg}\phi_r \quad (91)$$

$$z_S = \frac{z_T + h''}{2} \quad (92)$$

$$p_{hS} = 1,15 \frac{\gamma d}{4\mu} \left(1 - e^{-\frac{z_S}{z_o}}\right) \quad (93)$$

$$p_{hT} = \text{equação (87)}$$

p_h = equação (88)

p_{vf} = equação (89)

$P_{v,w}$ = equação (90)

Pressões dinâmicas ou de descarregamento

As normas, de um modo geral, propõem, para a obtenção das pressões dinâmicas advindas do descarregamento do produto, a adoção do método dos coeficientes de sobrepressão aplicados às pressões estáticas e, além disso, algumas recomendam a adoção de pressões adicionais, de modo a levar em conta efeitos de excentricidade construtiva e mesmo sobrepressões na efetiva transição. A tabela 11, apresenta os valores propostos pelas normas anteriormente analisadas para os coeficientes de sobrepressão C a serem aplicados às pressões estáticas.

TABELA 11 – Coeficientes de sobrepressão indicados pelas principais normas estrangeiras para silos de baixa relação altura/diâmetro

Norma	Pressão horizontal	Pressão de atrito	Pressão vertical no plano da base
ISO-1997 (1)	$1,0 + 0,7 \cdot (h/d - 1,0)$	$1,0 + 0,7 \cdot (h/d - 1,0)$	1,35
AS-1996 (2)	$7,6(h/d)^{0,06} - 6,4$ ou 1,2	1,2	1,0
ENV-1995 (3)	$1,0 + 2(C_0 - 1,0)(h/d - 1,0)$	$1,0 + 0,2(h/d - 1,0)$	1,0
ACI-1991 (4)	Variável em função da profundidade e da formulação adotada (Janssen ou Reimbert)	1,0	1,35 (fundo de concreto)
DIN-19987 (5)	Depende se $h/d \geq 2,5\mu$	Depende se $h/d \geq 2,5\mu$	1,0
BMHB-1985 (6)	1,0	1,0	1,0
CFBC-1983 (7)	1,4 ou 1,6	1,0	1,0
SNBATI-1975 (8)	Ver observação 8	Ver observação 8	Ver observação 8

OBSERVAÇÕES:

(1) Para o caso de silos com $h/d \leq 1$, não há distinção entre as situações de carregamento e de descarregamento (considerado central), ou seja, $C=1$. Para o caso de silos com $1 < h/d < 1,5$, a formulação indicada é para quando a zona de fluxo interceptar a parede. O valor de C, definido na tabela 11, aplica-se apenas para produtos conforme as classes que a norma fornece em tabela própria. Para outros produtos, o valor de C pode ser calculado pela seguinte equação:

$$C = 1,35 + 0,02(\phi_i - 30^\circ) < 1,35 \quad (94)$$

Também, independentemente da relação h/d, a norma prevê a adoção de pressões adicionais.

(2) Deverá ser adotado o maior dos dois valores. Para o caso de $C > 1,2$, a norma permite a redução do mesmo da seguinte forma:

Em silos de fluxo de funil na parte da parede abaixo da transição efetiva, o coeficiente de sobrepressão devido ao fluxo pode ser reduzido. A menor altura que limita a transição efetiva será tomada como a altura h_t sobre a saída, e será determinada pela equação:

$$h_t = 0,4dtg\phi_i \quad (95)$$

Na transição efetiva, o coeficiente de sobrepressão devido ao fluxo será tomado como o valor definido na tabela 11. No nível da saída, o coeficiente de sobrepressão será tomado como 1,2. Será usada interpolação linear entre esses dois valores.

A norma não prevê pressões adicionais para levar em conta excentricidade construtiva ou outros fatores decorrentes do fluxo.

(3) Para o caso de silos com $h/d \leq 1$, não há distinção entre as situações de carregamento e de descarregamento (considerado central), ou seja, $C=1$.

C_0 = valor tabelado pela norma em função do produto armazenado e para produtos não listados, o coeficiente de sobrepressão máximo na parede deve ser obtido da seguinte forma:

$$\text{para } \phi_i \leq 35^\circ \rightarrow C = 1,35, \text{ e}$$

$$\text{para } \phi_i > 35^\circ,$$

$$C = 1,35 + 0,02 (\phi - 30^\circ) \quad (96)$$

Para o caso de $h/d > 1$, a norma propõe a adoção de pressões adicionais.

(4) Em $z=0$, $C=0$. A figura 34(a) apresenta os coeficientes de sobrepressão indicados pela norma americana para $h/d < 2$, em função da adoção da formulação de **Janssen** ou **Reimbert** para o cálculo da pressão horizontal, para o caso da superfície livre do produto ser plana e a 34(b) para o caso da superfície livre do produto formar um cone.

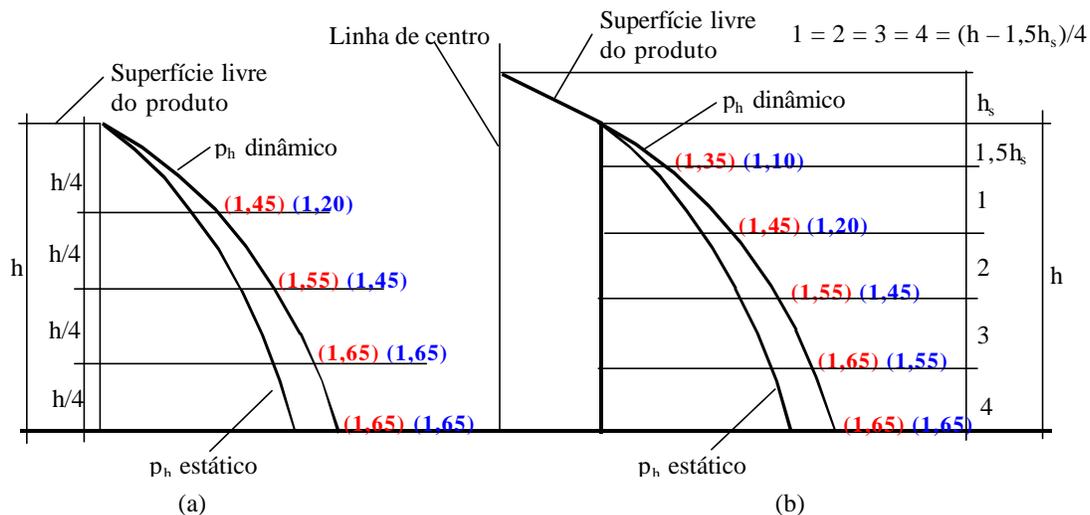


FIGURA 34 – Coeficiente de sobrepressão de acordo com a norma ACI para $h/d < 2$

(5) Em silos em que $h/d < 2,5\mu$, as sobrepressões devidas ao descarregamento podem ser desprezadas e $C=1$. Caso contrário, o valor de C , para as pressões horizontais, é fornecido em tabela própria da norma, variando de 1,2 a 1,6, dependendo do produto armazenado. Para pressão de atrito, o valor máximo de C é 1,1. Tanto o valor do coeficiente de sobrepressão para as pressões horizontais, quanto de atrito deverão ser interpolados se $2,5\mu < h/d < 5\mu$. Também independentemente da relação h/d , a norma prevê a adoção de pressões adicionais.

(6) As sobrepressões são consideradas somente através de pressões adicionais.

(7) 1,4 para cereais, soja e canola e 1,6 para alpiste e semente de linho. A norma explica que, em silos de fundo plano, durante o descarregamento, o produto forma uma tremonha estacionária a uma profundidade igual ao diâmetro. A partir daí, a pressão horizontal no descarregamento deverá ser reduzida à pressão de carregamento. A norma não prevê pressões adicionais.

(8) As pressões dinâmicas são obtidas com a adoção da relação entre pressões, K , diferentemente da situação estática (ver item 2.3.3). A norma não prevê pressões adicionais.

Pressões adicionais

- **ISO-1997**

A norma justifica que a adoção da pressão adicional, p_p (path load), se deve ao fato que pressões assimétricas são inevitáveis, mesmo em carregamentos e descarregamentos concêntricos, e são função das características físicas dos produtos e imperfeições geométricas e, além disso, que a não homogeneidade e alterações probabilísticas dentro do produto podem contribuir para flutuações na região do fluxo. Esta pressão adicional é para ser aplicada para qualquer relação h/d e para qualquer material da parede do silo. Segundo a norma, especial atenção deverá ser dada aos momentos de flexão induzidos por essa pressão. A pressão é para ser considerada atuando em todas as partes da parede do silo e é dada por:

$$p_p = 0,2 p_{he} \quad (97)$$

onde p_{he} é a pressão horizontal considerada no descarregamento.

Para o caso de silos cilíndricos, esta pressão deverá ser aplicada em uma área quadrada de lado igual a $0,2d$. A figura 35 apresenta esquematicamente a pressão adicional proposta pela norma ISO.

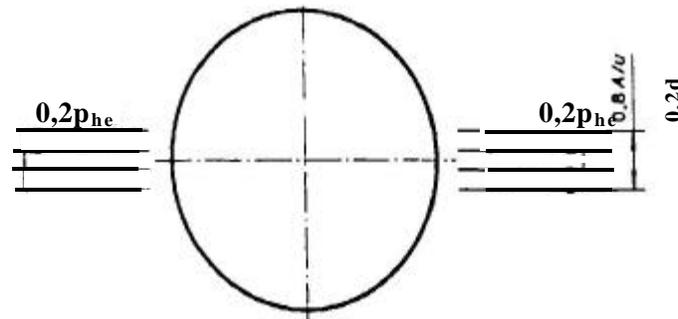


FIGURA 35 – Pressão adicional segundo a norma ISO

- **ENV-1995**

Para silos onde $h/d > 1$, a norma indica a adoção de pressão adicional, tanto para a fase de carregamento quanto para a fase de descarregamento. Para o caso de silos onde $h/d < 1,5$, na situação de carregamento, a pressão adicional é dada por:

$$p_p = 0,4p_h(h/d - 1,0) \quad (98)$$

e, semelhantemente, a norma ISO deverá ser considerada atuando em qualquer parte da parede vertical.

Para o caso de silos de concreto ou silos com enrijecedores, a pressão adicional poderá ser considerada atuando em duas áreas quadradas opostas de lado igual a $0,2d$. A figura 36 indica esquematicamente a aplicação da pressão adicional segundo a norma ENV, para o caso de silos de parede espessa.

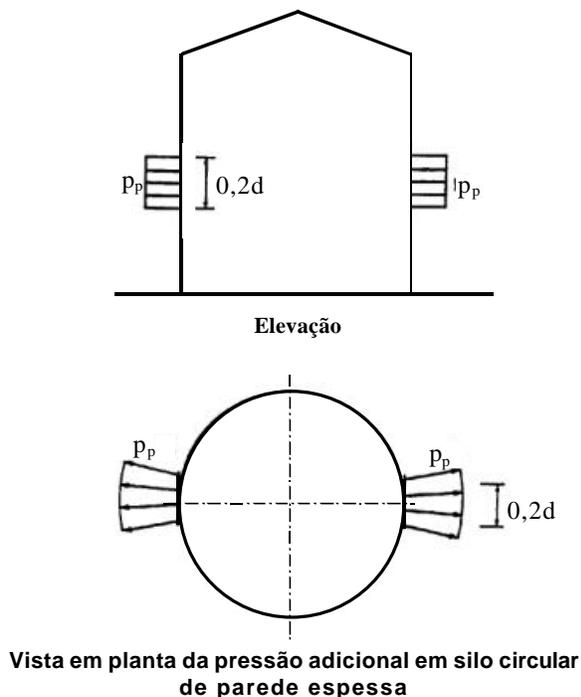


FIGURA 36 – Aplicação da pressão adicional segundo a norma ENV em silos de parede espessa

Em silos cilíndricos de parede fina, a pressão adicional deve ser considerada atuando em uma altura igual a $0,2d$, mas estendendo-se de uma pressão máxima p_p para fora, de um lado do silo, até uma mesma pressão máxima p_p para dentro, no lado oposto (figura 37). A variação deverá obedecer à seguinte expressão:

$$p_{ps} = p_p \cos\theta \quad (99)$$

onde: θ é mostrado na figura 37.

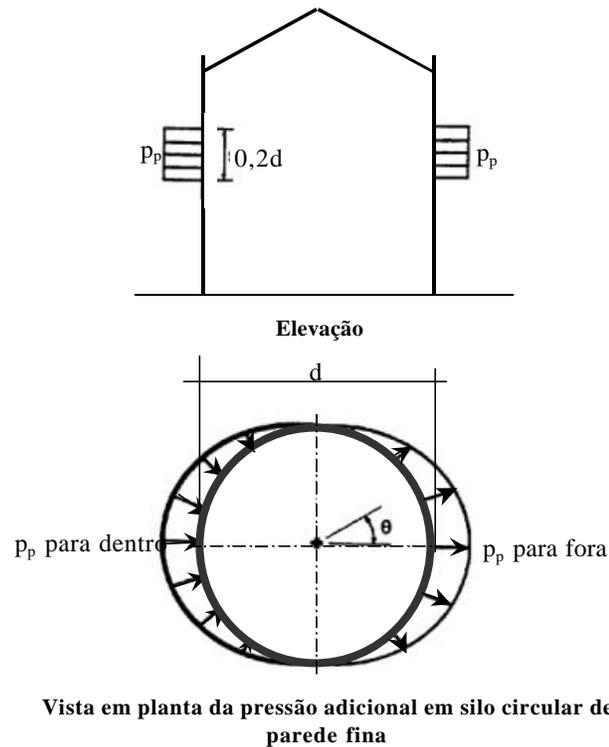


FIGURA 37 – Aplicação da pressão adicional segundo a norma ENV em silos de parede fina

A força horizontal total F_p , devido à pressão localizada em silos circulares de parede fina, é determinada pela expressão:

$$F_p = \frac{\pi}{2} 0,2d^2 p_p. \quad (100)$$

Para silos cilíndricos de parede fina, onde d é menor que 5m, a pressão adicional pode ser substituída por aumentos uniformes em outras pressões, como a seguir:

$$p_{h,s} = 1,1p_h \quad (101)$$

$$p_{w,s} = 1,2p_w \quad (102)$$

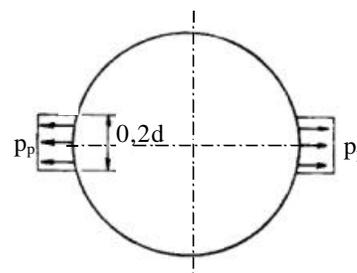
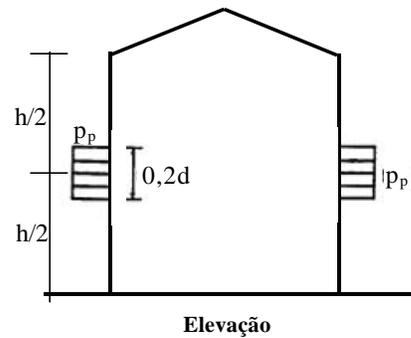
$p_{h,s}$ = pressão horizontal em silo cilíndrico de parede fina

$p_{w,s}$ = pressão de atrito em silo cilíndrico de parede fina

Na situação de descarregamento, a pressão p_h deverá ser substituída pela pressão p_{he} obtida para o descarregamento e poder-se-ão fazer as mesmas simplificações apresentadas na situação de carregamento.

- **DIN-1987**

Em silos de fluxo de funil com seção transversal circular e para qualquer relação h/d , de modo a prevenir eventuais irregularidades na pressão horizontal, mesmo com descarga central, a norma indica uma pressão horizontal adicional p_p , aplicada em uma área quadrada de lado $L=0,2d$, e localizada na metade da altura do silo ($h/2$), simetricamente oposta, conforme figura 38.



Vista em planta da pressão adicional em silo circular segundo a norma DIN

FIGURA 38 – Aplicação da pressão adicional segundo a norma DIN

A pressão p_p é obtida pela expressão:

$$p_p = L^2 \beta p_h \quad (103)$$

onde β = coeficiente de irregularidade definido por:

$$\beta = \beta_h \beta_a \beta_r \beta_g \quad (104)$$

β_h = coeficiente de esbeltez;

$$\beta_h = 1 \quad \text{para } h/d < 1$$

$$\beta_h = 0,2h/d + 0,8 \quad \text{para } 1 \leq h/d \leq 4$$

$$\beta_h = 1,6 \quad \text{para } h/d > 4$$

β_e = coeficiente de excentricidade;

$$\beta_e = 1 \quad \text{para } e_o/r < 1/3$$

$$\beta_e = 3e_o/r \quad \text{para } e_o/r \geq 1/3$$

e_o = excentricidade da boca de saída do produto (ver figura 1)

β_r = coeficiente de rigidez;

$$\beta_r = 0,3 \quad \text{para } r/t \leq 70$$

$$\beta_r = 0,05 \quad \text{para } r/t \geq 100$$

β_G = coeficiente do produto dado em tabela própria da norma.

No caso de paredes de chapas corrugadas horizontalmente, t é a espessura média equivalente de uma chapa lisa que apresente o mesmo momento de inércia da chapa corrugada. Deverá ser feita interpolação para o caso $70 < \beta_r < 100$.

Como alternativa à pressão adicional acima indicada, diferentemente da norma ENV, que só permite a substituição da pressão adicional para silos onde d é menor ou igual a 5m, a norma DIN propõe a substituição por um aumento uniforme na pressão horizontal, obtido pela multiplicação da pressão horizontal p_h pelo coeficiente x dado por:

$$x = 1 + 0,5\beta + 0,02\beta_r/t \quad \text{para } r/t \leq 70 \quad (105)$$

ou

$$x = 1 + 3\beta(h/d)^{1/2} \quad \text{para } r/t \geq 100 \quad (106)$$

- **BMHB-1985**

Também, para o caso de fluxo de funil e para qualquer relação h/d , a norma inglesa propõe pressões adicionais, como a seguir.

Primeiramente é obtida a posição da efetiva transição através da formulação:

$$z_T = h - \frac{d - d_s}{2} \operatorname{tg}\alpha \quad (107)$$

onde α é o ângulo formado pelo cone com a horizontal (ver figura 39) e é obtido pela seguinte formulação:

$$\alpha = 0,5 \arccos\left(\frac{1 - \operatorname{sen} \phi_{i,u}}{2 \operatorname{sen} \phi_{i,u}}\right) + \beta \quad (108)$$

com β obtido pela expressão:

$$2\beta = \arctg(\text{sen } \phi_{i,u}) + \arcsen\left(\frac{\text{sen } \phi_{w,u}}{\text{sen } \phi_{i,u}}\right) \quad (109)$$

Se $z_T < h$, então deverá ser adicionada uma pressão concentrada p_T obtida pela seguinte formulação:

$$p_T = \frac{p_h}{k_u} \frac{(1 + \text{sen } \phi_{i,u} \cos 2\beta_o)}{(1 - \text{sen } \phi_{i,u} \cos(180^\circ - 2\alpha + 2\beta_o))} \quad (110)$$

com:

$$\beta_o = 90^\circ + \phi_o + \arccos\left(\frac{\text{sen } \phi_o}{\text{sen } \phi_{i,u}}\right) \quad (111)$$

e:

$$\phi_o = \arctg(\text{sen } \phi_{i,u}) \quad (112)$$

Esta pressão adicional deverá ser aplicada em uma região, conforme indicado na figura 39.

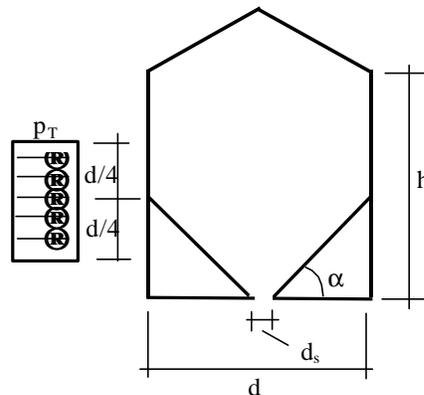


FIGURA 39– Parâmetros geométricos para aplicação da pressão adicional segundo a norma BMHB

3.3.1.3 Análise comparativa e discussão das principais normas estrangeiras em relação às pressões dinâmicas e as adicionais.

Tendo em vista que as pressões dinâmicas exercidas pelo produto armazenado são as mais importantes em termos de projeto, a seguir será feita uma análise entre as proposições formuladas pelas normas anteriormente citadas para a obtenção da pressão horizontal dinâmica, comparando-as entre si e em relação à pressão horizontal estática de Janssen para um silo constituído de chapa de aço corrugada, cujas características geométricas são dadas na figura 40, para armazenagem de milho. As propriedades físicas, obtidas experimentalmente com a célula de cisalhamento de Jenike, encontram-se na tabela 12. A tabela 13

apresenta o valor do parâmetro K obtido com a formulação empírica proposta por cada norma, conforme item 2.3 deste trabalho e do parâmetro μ . A tabela 14 apresenta os coeficientes de sobrepressão obtidos para o silo em questão, de acordo a tabela 11, para cada uma nas normas analisadas.

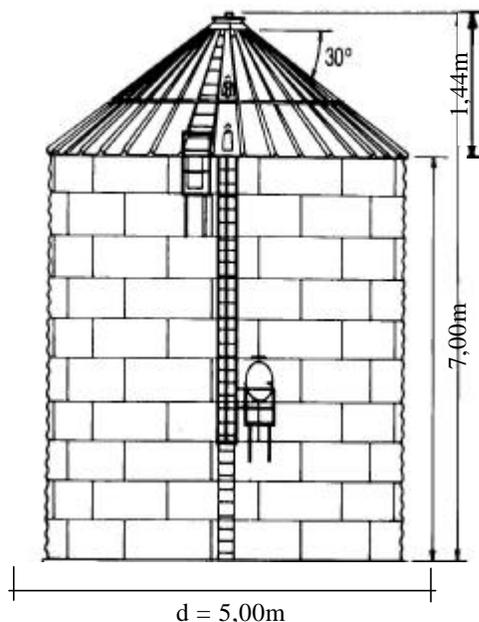


FIGURA 40 - Características geométricas do silo para análise comparativa entre as normas

TABELA 12 - Propriedades físicas do milho utilizadas na análise comparativa entre as normas

g (kN/m^3)		f_i			f_w		
g_m	g_u	$f_{i,m}$	$f_{i,l}$	$f_{i,u}$	$f_{w,m}$	$f_{w,l}$	$f_{w,u}$
7,45	8,5	32°	29°	37°	32°	29°	37°

TABELA 13 – Valores dos parâmetros K e μ segundo as principais normas para análise das pressões

Parâmetro	Norma															
	ISO		ENV		AS		DIN		ACI		BMHB		CFBC		SNBATI	
	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u		
K	0,44	0,57	0,44	0,57	0,47	0,62	0,48	0,62	0,25	0,35	0,25	0,75	0,4	0,60	0,64	0,76
μ	0,55	0,75	0,55	0,75	0,55	0,75	0,55	0,75	0,55	0,75	0,48	0,60	0,55	0,75	0,55	0,75

TABELA 14 – Valores do coeficiente de sobrepressão tendo como milho o produto armazenado, obtidos para cada uma das normas analisadas para o silo em questão

Coeficiente de sobrepressão	Norma							
	ISO	ENV	AS	DIN	ACI	BMHB	CFBC	SNBATI
	1,35	1,49	1,39**	1,0	*	1,0	1,4	***

* - os constantes da figura 33 para formulação de Janssen

** - na profundidade máxima $C=1,2$

*** - ver observação 8

A figura 41 apresenta graficamente as pressões dinâmicas para a situação de descarregamento proposta pelas principais normas. A pressão de Janssen foi obtida adotando, para o parâmetro K, a formulação de Rankine-Koenen, que é a adotada pela norma ACI.

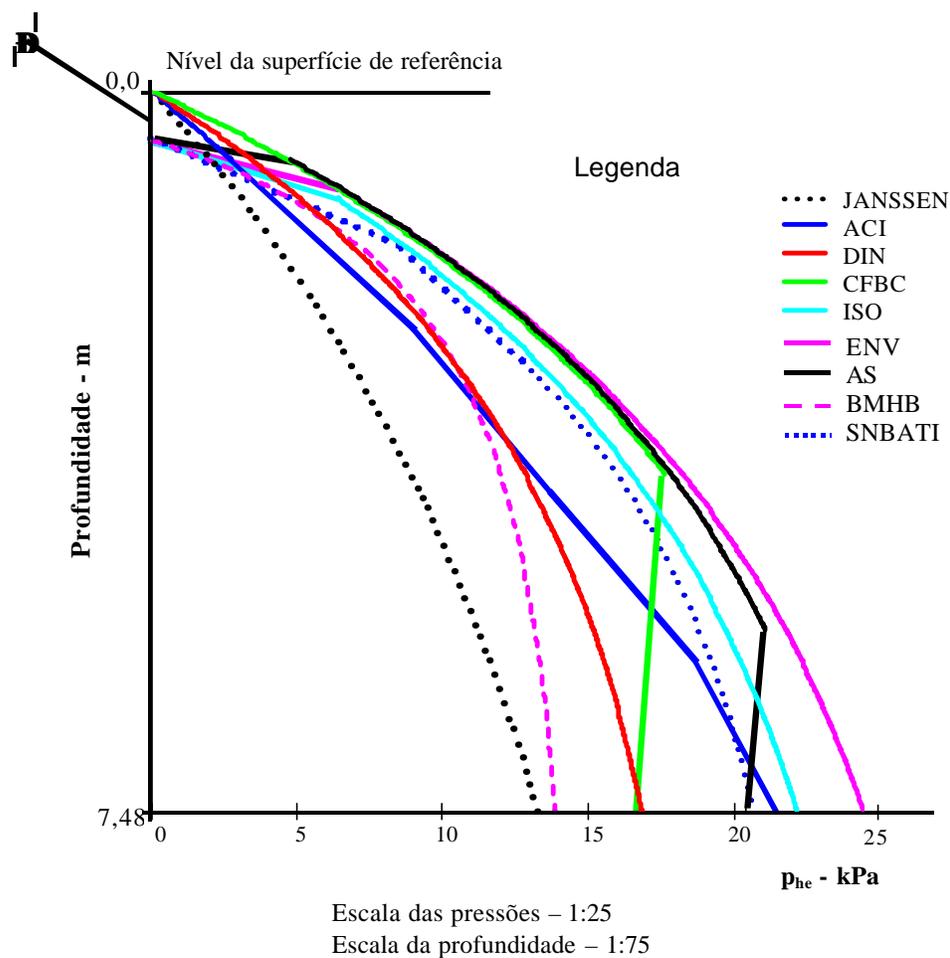


FIGURA 41 – Pressão horizontal dinâmica segundo as principais normas

Da figura 41 obtém-se que, na profundidade máxima em relação à formulação original de Janssen, a pressão prevista pela norma ENV é maior 1,85 vezes, enquanto o coeficiente de sobrepressão previsto com essa norma é 1,49. A principal razão disto está no baixo valor do parâmetro K obtido com a formulação Rankine-Koenen. Na profundidade máxima, a diferença entre a maior (norma ENV) e a menor pressão (norma BMHB) é de 77%. Em termos absolutos, a norma americana ACI é a que apresenta os maiores coeficientes de sobrepressão mas, na profundidade máxima, a diferença entre a pressão obtida com a norma ENV é de 12%. As normas que apresentaram as menores pressões foram a norma DIN e BMHB, pelo fato de não adotarem coeficientes de sobrepressão para relações h/d menores que 1,5.

Quanto às pressões adicionais, para o silo em questão, a pressão p_p prevista pela norma ISO será de $0,2p_{he}$, onde a pressão p_{he} é o valor da pressão horizontal dinâmica no local onde p_h é aplicado. Embora a norma ENV proponha uma formulação diferente da norma ISO para a pressão adicional, verifica-se que a magnitude máxima da pressão adicional obtida pela norma ENV é igual a da norma ISO, porém com a distribuição dada na figura 37. Para o caso de substituir-se a pressão adicional prevista pela norma ENV por aumentos na pressão horizontal e de atrito, o coeficiente global de sobrepressão para a pressão horizontal, pela norma ENV, passaria a ser 1,64. Pela formulação da norma DIN, a pressão adicional seria de $0,25p_{he}$, onde p_{he} é o valor da pressão horizontal a meia altura do silo. Para o caso de optar-se em substituir a pressão adicional proposta pela norma DIN por um aumento uniforme na pressão horizontal, o coeficiente de sobrepressão global seria de 1,1, muito menor que o previsto pela norma ENV. Considerando a aplicação da pressão adicional a meia altura do silo, de modo a comparar-se numericamente os valores propostos pelas norma ISO, ENV e DIN, tendo em vista serem estas as únicas que propõem semelhantemente a pressão adicional, a magnitude máxima seria de 3,29; 3,64 e 3,36 kPa respectivamente, e que, a não ser pela forma diferente que cada uma das normas citadas aplica essa pressão, seriam obtidos momentos de flexão bastante semelhantes. Outro fato que chama a atenção é em relação à transição efetiva. Enquanto a norma francesa prevê que o funil formado durante o fluxo intercepta a parede a uma altura de 3,5m acima do fundo e a norma australiana, 1,88m, pela formulação da norma inglesa o canal de fluxo não encontra a parede vertical do silo em questão.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Da revisão bibliográfica realizada, pode ser visto que a primeira grande controvérsia diz respeito ao que as normas estrangeiras e pesquisadores consideram silos de baixa relação altura/diâmetro. Embora seja amplamente reconhecida a influência da geometria do silo e portanto da relação altura/diâmetro nas pressões exercidas pelo produto armazenado, a maioria dos códigos normativos adota a formulação de Janssen, que foi obtida para silos altos, para previsão das pressões em silos baixos. São muito poucos os trabalhos experimentais realizados para silos de baixa relação altura/diâmetro, sendo os mais importantes voltados ao estudo do fluxo e da posição da efetiva transição.

Outro fato bastante divergente entre as normas refere-se aos valores fornecidos para as propriedades físicas dos produtos e parâmetros relacionados com o cálculo das pressões. No item 2.3.2, pode ser visto que, em relação ao parâmetro K, as diferenças chegam até 116% e, em relação ao coeficiente de atrito com a parede, até 74%.

Ao se examinar as principais normas estrangeiras em relação às formulações propostas para as pressões estáticas e dinâmicas para as paredes verticais e para fundo plano, observam-se, de imediato, as diferentes formulações para obtenção do parâmetro K. Conforme o silo analisado no item anterior, as diferenças entre os diversos valores obtidos com as diversas fórmulas chegam a ser de até 117%. Tendo em vista que o parâmetro K influencia diretamente a pressão horizontal, em geral as normas que propõem baixos valores para K adotam valores para o coeficiente de sobrepressão relativamente elevados.

As pressões horizontais dinâmicas obtidas para o silo considerado no item anterior, de acordo com as oito normas analisadas, mostram claramente a grande incerteza que existe para a previsão das pressões em silos de baixa relação altura/diâmetro e, portanto, a necessidade de uma avaliação experimental para a determinação das pressões.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa desenvolvida no presente trabalho é constituída de duas etapas principais:

1 - medições diretas através de células de pressão, em um silo protótipo e em um silo piloto, ambos de chapa metálica ondulada, das pressões horizontais (p_h), ao longo da parede, e verticais (p_{vt}), no fundo plano; medição da pressão vertical (p_v) em nível acima do fundo, no silo piloto, para determinação do parâmetro K (p_h/p_v);
2 – cálculo teórico das pressões, adotando-se a formulação de Janssen, de Airy, dos irmãos Reimbert, de Rankine-Calil e de Bischara, e as principais normas estrangeiras de modo a comparar os valores teóricos com os experimentais.

O silo protótipo de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano pertence à Cooperativa Agrícola Mista do Vale do Mogi-Guaçu, em Descalvado-SP, e o silo piloto foi doado pelo fabricante de silos metálicos Kepler Weber para realização dessa pesquisa. As características geométricas de ambos os silos são apresentadas nas figuras 42 e 43, respectivamente.

Os ensaios com o silo protótipo foram realizados na própria cooperativa, utilizando milho como produto armazenado, por ser este o seu principal produto de armazenamento. Foram realizados dois ciclos completos de carregamento-armazenamento-descarregamento, com a capacidade máxima de armazenamento do silo (ver figura 42). Nesse caso, $h/d=0,98$.

Os ensaios com o silo piloto foram realizados no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, e utilizou-se areia como produto armazenado, devido ao seu alto peso específico quando comparado com o milho, apresentar

características de produto de fluxo livre e ser de fácil obtenção. Com o silo piloto foram realizados um total de 12 ciclos completos de carga-armazenamento-descarga, sendo 4 com a relação $h/d = 0,98$; 4 com $h/d = 1,25$ e 4 com $h/d = 1,49$.

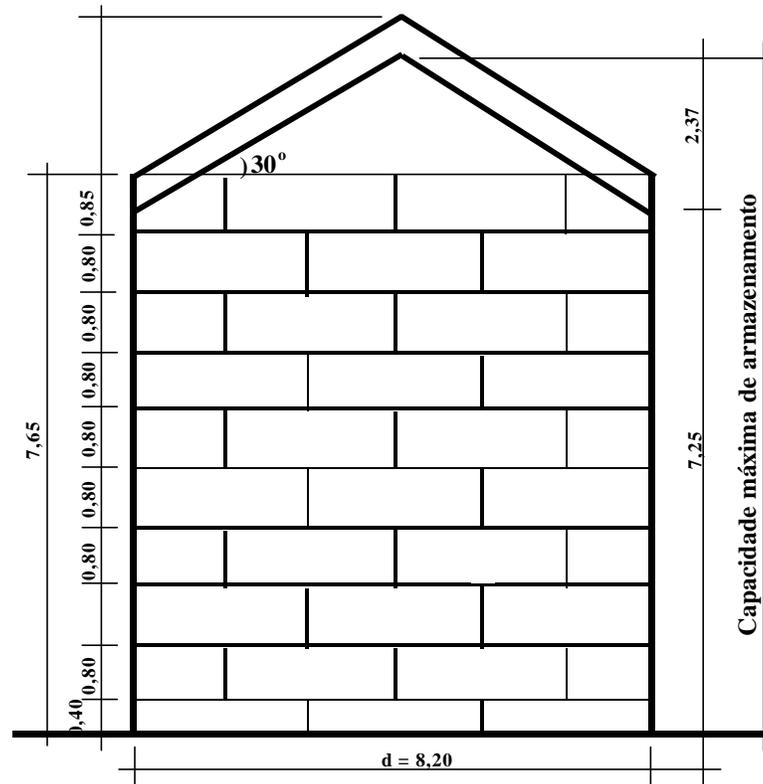


FIGURA 42 – Características geométricas do silo protótipo

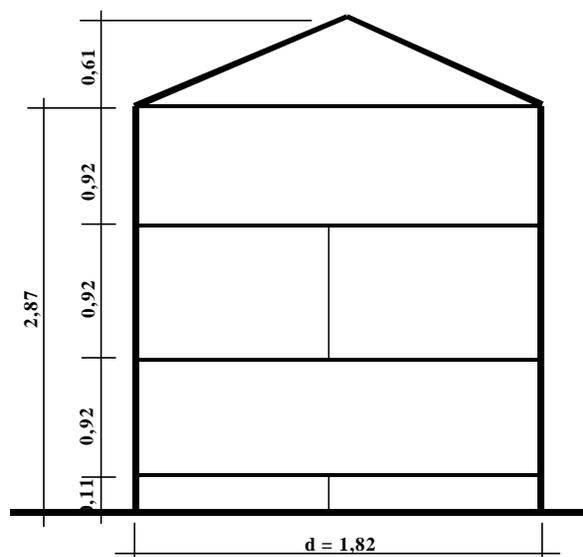


FIGURA 43 – Características geométricas do silo piloto

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PRODUTOS ARMAZENADOS.

Os ensaios para determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados nos silos ensaiados foram realizados no LAMEM/EESC-USP, de acordo com a metodologia proposta em MILANI (1993), utilizando o aparelho de cisalhamento TSG 70-140-AVT("JENIKE Shear Cell").

Para execução dos ensaios, foram utilizadas as seguintes referências:

- 1- Operating Instructions for Translational Shear tester TSG 70-140
- 2- Manual SSTT (Standart shear Testing Technique). Trabalho desenvolvido pela Federação Européia de Engenharia Química WPMS – 1989.
- 3- MILANI (1993): Determinação das propriedades de produtos armazenados para projeto de pressões e fluxo em silos.

Os produtos caracterizados foram areia seca ao ar, utilizada nos ensaios com o silo piloto, e o milho armazenado no silo protótipo da cooperativa. As amostras de cada produto foram retiradas de forma aleatória, em diversos pontos da massa dos grãos, durante os ensaios, e lacradas em sacos plásticos até o momento da realização dos ensaios.

Foram realizados três ensaios e determinados o peso específico e o ângulo de atrito interno para sua aplicação no cálculo teórico das pressões, através do software YLOCUS desenvolvido por CALIL JR. (1997). Tendo em vista que as paredes de ambos os silos ensaiados são de chapa metálica ondulada, não foi determinado o ângulo de atrito com a parede, considerado igual ao ângulo de atrito interno. Com a areia foi também realizado o ensaio de granulometria, de acordo com a norma NBR 7181 – Solo-Análise granulométrica, e determinado o teor de umidade do milho.

Os produtos armazenados foram classificados como de fluxo livre, de acordo com as dimensões do diâmetro de suas partículas, baseadas nas considerações de CALIL JR. (1984).

4.2 ENSAIOS COM O SILO PROTÓTIPO

Para a medição direta das pressões ao longo das paredes e no fundo plano do silo protótipo, foram utilizadas células de pressão do tipo hidráulica, modelo EPC 3500-1-100, fabricadas pela GEOKON. Essas células são constituídas de 2 placas circulares de aço inoxidável 304, com diâmetro de 22,86cm e espessura de 6,35mm, com seu interior preenchido com fluido e soldadas em seu contorno. Têm as duas faces ativas com capacidade de captar até 700kPa, com sensibilidade de 0,175kPa (figura 44). Estas placas são conectadas a um transdutor de pressão que converte as pressões do fluido, balanceadas com as pressões externas, em sinais elétricos, que são transmitidos por cabos até um condicionador de sinais elétricos. A adoção dessas células deu-se pelo fato de já terem sido usadas, com sucesso, na medição direta das pressões nas paredes e na tremonha de um silo protótipo horizontal e em silo piloto horizontal por GOMES (2000), para sua tese de doutorado “Estudo Teórico e Experimental das Ações em Silos Horizontais”.



FIGURA 44 – Célula de pressão utilizada para medição direta das pressões

As células foram calibradas adotando-se os procedimentos realizados por GOMES (2000), que utilizou o método proposto por BLIGHT et al (1996). Para esse fim, os transdutores das células foram acoplados ao sistema de aquisição de dados da marca LINX, modelo ADS-2000, que utiliza circuito integrado projetado para

diversas aplicações. Este sistema é composto de uma placa controladora e placas condicionadoras de sinais conectada ao computador, nesse caso um notebook, com interface paralela usada para impressora. A figura 45 apresenta os equipamentos utilizados para a calibração das células em laboratório.



FIGURA 45 – Calibração das células de pressão

O silo ensaiado (figura 46) tem 20 anos de utilização, faz parte de um conjunto de 10 silos, todos iguais, com capacidade máxima de armazenamento de 300t de milho. É constituído de chapa ondulada de aço galvanizado de 1,5mm de espessura. A distância entre ondas é de 70mm, com profundidade de 13mm. Os parafusos utilizados na ligação das chapas são do tipo M8. O corpo do silo está fixado sobre um viga anel de concreto armado, com 40cm de largura e 60cm de altura. A base do silo é constituída de uma laje plana de concreto armado, sob a qual está situado o túnel de descarga. O produto é descarregado pelo fundo, através de um orifício de 20cm de diâmetro situado no centro do fundo. O silo é carregado pelo topo centralmente. Para a realização das operações de carga e descarga são utilizados elevador de caçamba e correia transportadora. As células de pressão foram fixadas nos parafusos de ligação das chapas e, para manter o posicionamento das células na parede, foi fixada, em cada uma delas, uma placa quadrada de compensado de 30cm de lado e 18mm de espessura e, entre a chapa de compensado e a face da célula, uma manta de borracha para melhor distribuição das pressões. Após essa etapa, foram instaladas 12 células de pressão, sendo 6

distribuídas ao longo da parede e 6 no fundo do silo, em contato direto com o produto armazenado. A figura 47 apresenta, de forma esquemática, o posicionamento das células de pressão na parede e no fundo do silo. Os terminais das células foram conectados ao sistema LINX de aquisição de dados e este ao notebook. A figura 48 apresenta a instalação das 12 células de pressão.

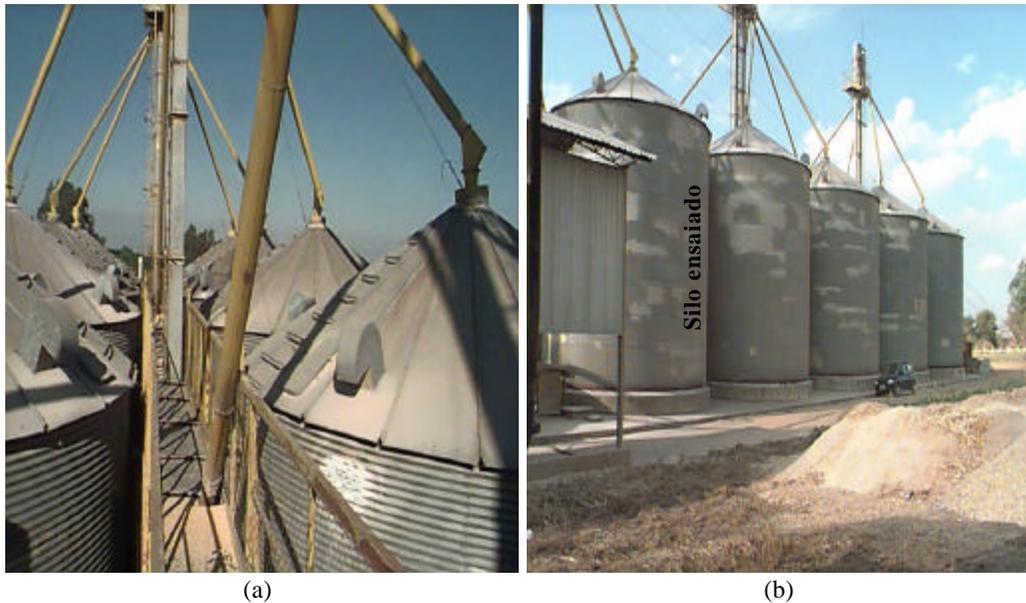


FIGURA 46– (a) Vista superior (b) Vista frontal do silo protótipo ensaiado

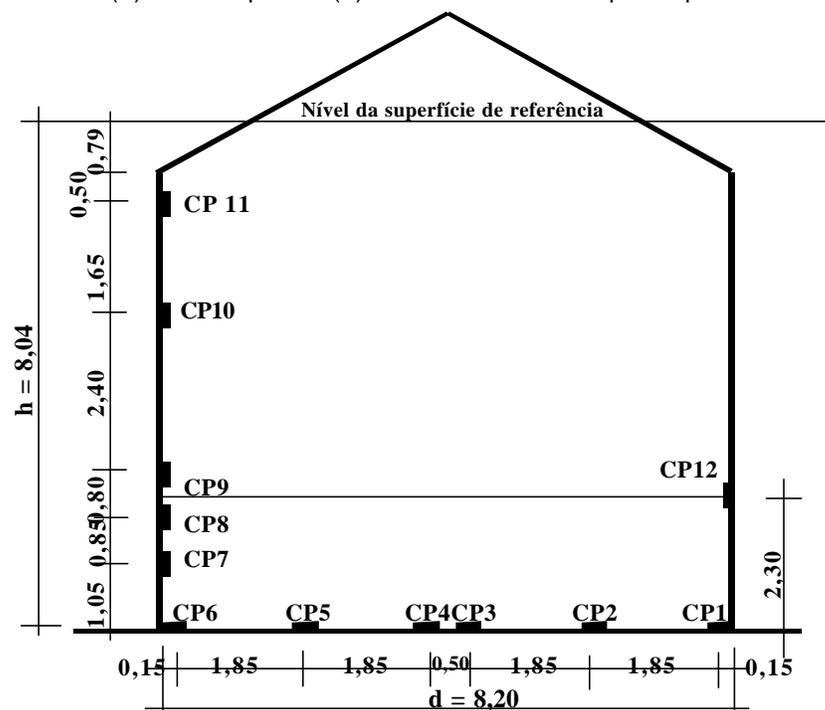


FIGURA 47 – Posicionamento das células de pressão na parede e no fundo do silo protótipo

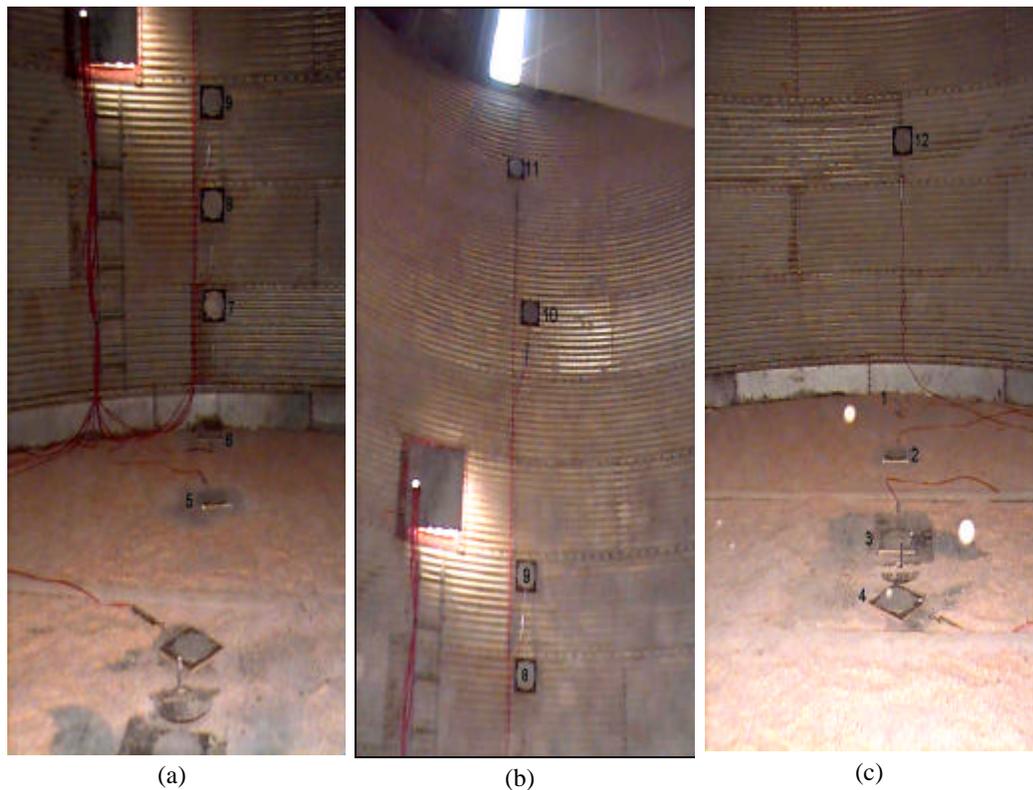


FIGURA 48 – Instalação das células de pressão no silo protótipo

Após a instalação das células de pressão, procedeu-se a conexão “in loco” com as células ligadas ao sistema de aquisição de dados LINX. O sistema de aquisição de dados foi configurado para uma frequência de 10 hertz, com coleta de dados a cada 5 segundos, de modo a permitir monitoramento das pressões com melhor precisão nas fases dinâmicas de carregamento e descarregamento do silo. O carregamento foi realizado através de transilagem do milho de um outro silo para o que estava instrumentado. A transilagem foi realizada utilizando correia transportadora e elevador de caçamba. A vazão do sistema de transporte era de 40t/hora, o que permitiu o carregamento total do silo em cerca de 8 horas. Foram realizados dois ciclos completos de carregamento-armazenamento-descarga e os dados coletados, simultaneamente e continuamente, em todas as células, no decorrer do carregamento, em 16 horas de armazenamento e no período do descarregamento. A figura 49 apresenta as diversas etapas do ensaio realizado no silo protótipo.



(a) conexão das células de pressão ao sistema de aquisição de dados



(b) Silo em operação



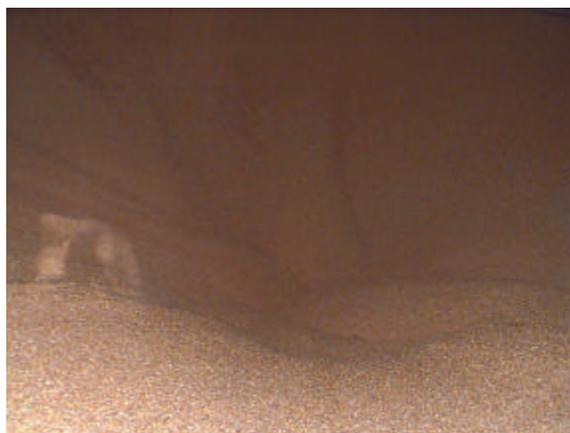
(c) Monitoramento das pressões



(d) Silo completamente carregado



(e) Detalhe da superfície livre do produto no silo totalmente carregado



(f) – Início do descarregamento



(g) Silo descarregado – Detalhe do cone final

FIGURA 49 – Etapas do ensaio no silo protótipo

4.3 ENSAIOS COM O SILO PILOTO

Para a medição direta das pressões no silo piloto, foram utilizadas as mesmas 12 células de pressão usadas no silo protótipo, inclusive mantendo a mesma identificação de cada uma e o respectivo canal a que foi conectado no sistema de aquisição de dados LINX, quando da realização dos ensaios no silo protótipo. As células foram posicionadas no silo piloto de tal forma que mantivesse a mesma posição relativa às dimensões do silo protótipo. Em função da proposta deste trabalho (silo de baixa relação altura efetiva/diâmetro $< 1,5$), foram medidas as pressões para 3 relações h/d : $h/d=0,98$, de modo a obter experimentalmente as pressões com a mesma relação h/d do silo protótipo, $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$. Foram utilizados cerca de 10m^3 de areia grossa. A areia foi seca ao ar e ensacada na medida em que eram realizados os ensaios para cada uma das relações h/d .

O silo ensaiado é constituído de chapa ondulada de aço galvanizado e foi doado pelo fabricante de silos metálicos Kepler Weber o modelo SILO GRANJA KWDR 1823 PLANO. Chegou ao LaMEM/EESC/USP totalmente desmontado e sua montagem foi realizada com o auxílio da planta de montagem do silo fornecida pelo fabricante. Para a realização dos ensaios para a relação $h/d=0,98$, foram montadas apenas duas partes do corpo do silo. Para a realização dos ensaios com $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$, foi montada a terceira parte do corpo do silo e o cone de cobertura.

O silo foi montado sobre uma plataforma de madeira com altura de 1,80m, de modo a facilitar o descarregamento do produto. Primeiramente foi construída uma base de concreto armado para sustentação da plataforma e do silo. As figuras 50 e 51 apresentam detalhes da execução da base de concreto e da plataforma de madeira, respectivamente.



FIGURA 50– Execução da base da plataforma de madeira



(a) Montagem da plataforma

(b) Plataforma pronta para receber o silo piloto

FIGURA 51 – Plataforma do silo piloto

O piso da plataforma é de compensado de madeira de 18mm de espessura e longarinas de ipê de 6x16cm. Centralmente foi feito um furo de 18cm de diâmetro para fixação do registro de descarga (figura 52)

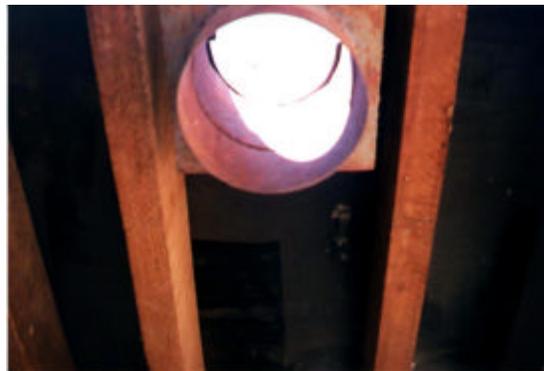


FIGURA 52 – Detalhe do registro para a descarga do silo piloto

Após a execução da plataforma, o silo foi montado para a execução da primeira série de ensaios com $h/d=0,98$. De modo a facilitar os trabalhos de montagem do silo nessa fase inicial, primeiramente ele foi montado no nível da

base de concreto e depois levado para cima da plataforma, sendo nela fixado através de parafusos e porcas em todo o seu perímetro. A figura 53 apresenta a montagem da primeira parte do silo, para a primeira etapa dos ensaios.



(a) silo aguardando ser montado



(b) Montagem da primeira parte do corpo de silo



(c) montagem da chapa de vedação



(d) Montagem da chapa de vedação



(e) Primeira etapa do silo montado na plataforma

FIGURA 53 – Montagem da primeira parte do corpo do silo piloto

Com a primeira parte do silo fixado na plataforma, foi montada a segunda parte do corpo do silo (figura 54). Para não haver infiltração de água pela base do silo, foi colocado material de calafetação entre a placa de vedação e o fundo de madeira compensada. As células de pressão somente foram instaladas quando se obteve areia seca suficiente para a realização da primeira etapa dos ensaios, mantendo-se percentualmente o posicionamento de cada uma em relação às dimensões do silo protótipo. A figura 55 apresenta, de forma esquemática, o posicionamento das células no silo piloto para relação $h/d=0,98$.



(a) Montagem da segunda parte do corpo do silo (b) Silo montado para execução da primeira série de ensaios $h/d=0,98$

FIGURA 54 – Montagem da segunda parte do corpo do silo piloto

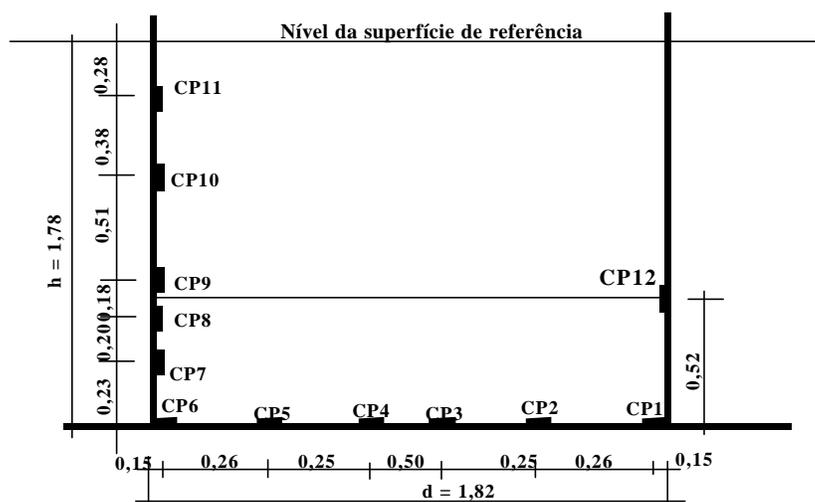


FIGURA 55 – Posicionamento das células de pressão na parede e no fundo do silo piloto para $h/d=0,98$

As células foram dispostas aleatoriamente em todo o perímetro do silo, respeitando-se a distância do seu centro até o nível de referência, pois, devido às dimensões das mesmas, não era possível mantê-las em um mesmo alinhamento. Com as células fixadas na parede do silo, procedeu-se a sua conexão com o sistema de aquisição de dados LINX. A figura 56 mostra a instalação das células e a figura 57 a conexão ao sistema de aquisição de dados.

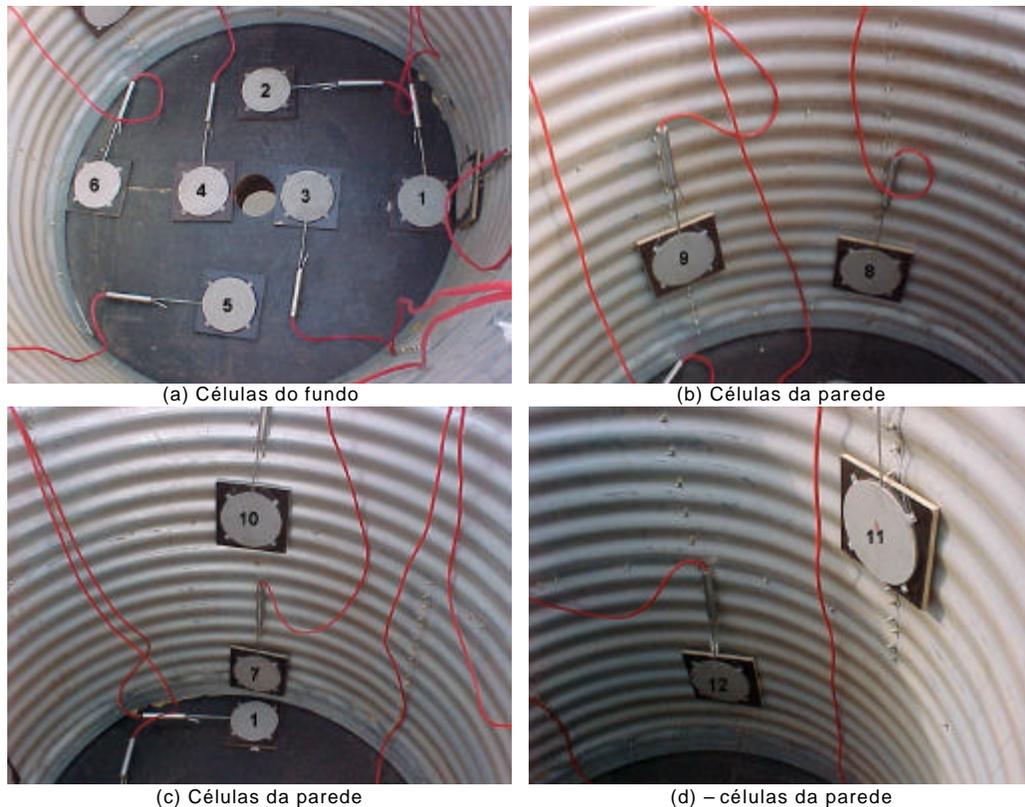


FIGURA 56 – Instalação das células de pressão para $h/d=0,98$

Para a realização do carregamento da areia no silo, foi utilizado um carregador pneumático acionado por um motor de 50 Âmpères. A capacidade de armazenamento do silo, nessa fase de ensaio, foi de 7,2t de areia. Em média, o carregamento completo para a relação $h/d=0,98$ levou cerca de 2 horas e uma vazão média de 3,5 t/hora, descontados os períodos de interrupção. Foram realizados 4 ciclos completos de carregamento-armazenamento-descarga. O carregamento era sempre realizado na parte da tarde, para que no dia seguinte, pela manhã, ocorresse o descarregamento. Em média o produto ficava em repouso cerca de 16 horas. O descarregamento do silo foi realizado por dois operadores,

abrindo-se a válvula e posicionando-se um saco de aninhagem, um após outro, sob a válvula, para recolher a areia. Esse procedimento era executado de forma contínua, o que levou a um fluxo dinâmico e contínuo no descarregamento do produto. A areia ensacada no descarregamento era então posicionada próximo ao local de carregamento. Após cada carregamento, a superfície do produto era nivelada. Nos dois primeiros carregamentos, foi mantida a posição da célula de pressão CP7 e, nos dois últimos, ela foi colocada a 15cm do fundo do silo, de modo a verificar a pressão horizontal no ponto mais próximo possível do fundo. A figura 58 apresenta as diversas etapas do ensaio com a relação $h/d=0,98$.

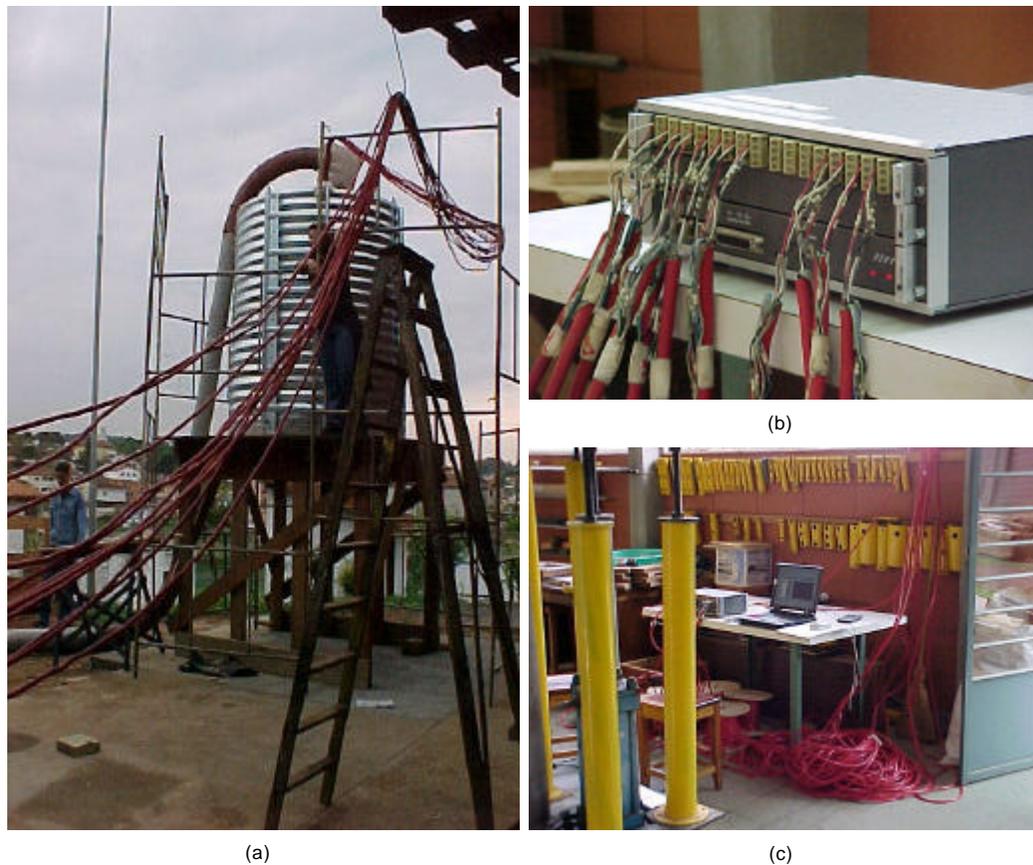


FIGURA 57 – Conexão das células de pressão ao sistema de aquisição de dados



(a) Silo aguardando o carregamento



(b) Areia ensacada para o carregamento



(c) Depósito de onde a areia era aspirada para o silo



(d) Descarregamento do silo



(e) Descarregamento do silo



(f) Descarregamento do silo



(g) Descarregamento do silo



(h) Descarregamento do silo

FIGURA 58 – Etapas do carregamento e descarregamento do silo piloto com $h/d=0,98$

Para a realização dos ensaios, para a relação $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$, foi montada a terceira parte do corpo do silo e a cobertura cônica. A figura 59 apresenta algumas das etapas de montagem do silo para a realização desses ensaios. As figuras 60 e 61 apresentam, de forma esquemática, o posicionamento das células em relação ao nível de referência das relações $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$, respectivamente.



FIGURA 59 – Montagem do silo piloto para a realização dos ensaios com relação $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$

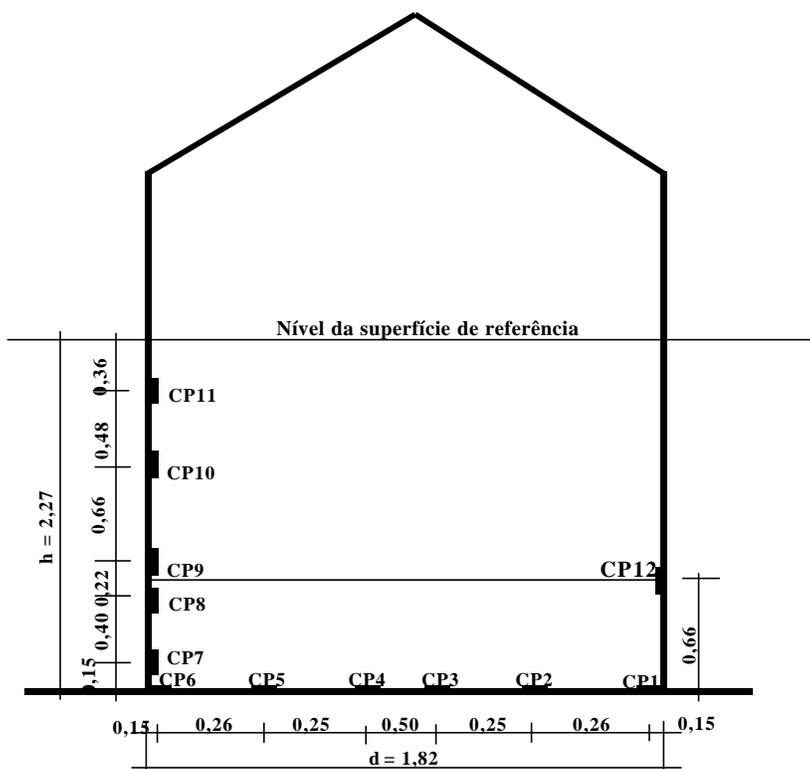


FIGURA 60 – Posicionamento das células de pressão na parede e no fundo do silo piloto com $h/d=1,25$

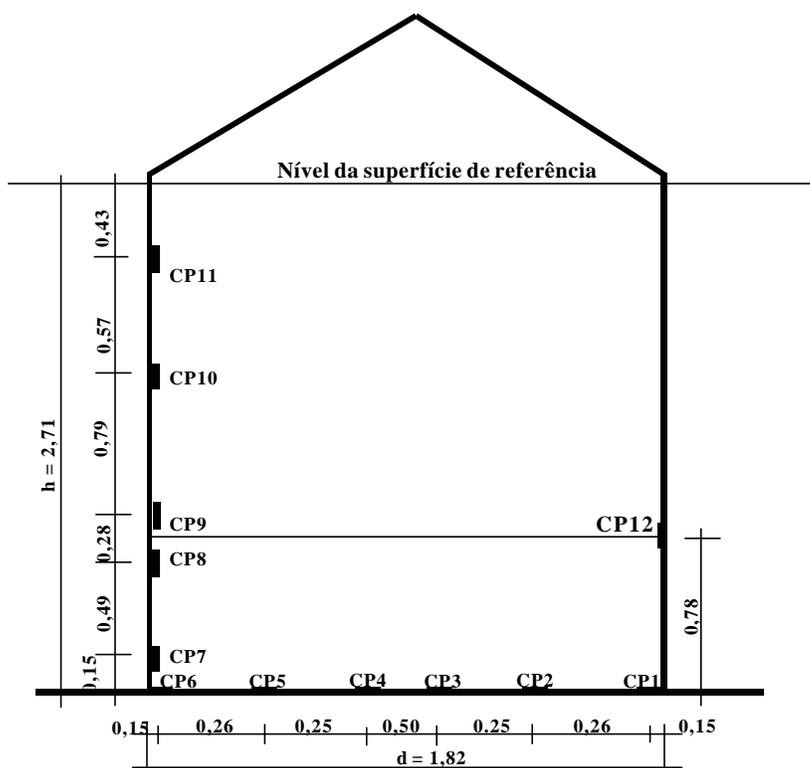


FIGURA 61 – Posicionamento das células de pressão na parede e no fundo do silo piloto com $h/d=1,49$

A fim de permitir a entrada e saída de pessoal no interior do silo, bem como a observação do produto, foi deixado um vão aberto na cobertura cônica (figura 62).



FIGURA 62 – Detalhes da cobertura do silo piloto

Para cada uma das relações h/d , foram realizados 4 ciclos completos de carregamento-armazenagem-descarregamento. Para a realização dos dois primeiros ensaios, as 6 células do fundo foram mantidas na posição mostrada nas figuras 58 e 59. Para a realização dos dois últimos ensaios de cada uma das relações, a célula CP2 foi colocada no nível da célula CP10 e, a CP5, no nível da célula CP9, para medição da pressão vertical nesses níveis e dessa forma avaliar o valor de K nessas sessões transversais. Para a relação $h/d=1,25$, foram armazenadas no silo cerca de 9,2t de areia, enquanto para a relação $h/d=1,49$, 11t.

Em todas as três relações h/d ensaiadas, os dados foram registrados simultaneamente e continuamente por todas as células. Em média, o carregamento completo para a relação $h/d=1,25$ levou cerca de 3 horas e, para $h/d=1,49$, 4 horas, descontados os períodos de interrupções. Ao final de cada carregamento, a superfície do produto era nivelada e o produto armazenado por cerca de 16 horas. No início de cada descarregamento, a válvula de descarga era aberta com a máxima vazão para que fosse verificada a ocorrência de sobrepressões. A figura 63 mostra detalhes de algumas etapas no carregamento e descarregamento do silo.



(a) Silo em carga



(b) Silo em carga



(c) Detalhe do carregamento do depósito e da ventoinha do carregador pneumático



(d) Detalhe do carregamento do depósito e da ventoinha do carregador pneumático



(e) Silo em descarga



(f) Reparo na tubulação do carregador pneumático

FIGURA 63 – Etapas dos ensaios com $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$ no silo piloto

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios realizados com o silo protótipo ocorreram sem nenhum contratempo, inclusive com as operações de carregamento e descarregamento do silo executadas similarmente à executadas pela equipe da cooperativa responsável por essas operações, em suas atividades diárias. As células de pressão, bem como o sistema de aquisição de dados, apresentaram excelente desempenho.

Os ensaios com o silo piloto levaram cerca de quatro meses desde o início da montagem do silo. As maiores dificuldades encontradas foram a secagem e o ensacamento da areia, a grande quantidade de poeira produzida durante o carregamento e as paralisações para reparo na tubulação do carregador pneumático. Da mesma forma que no silo protótipo, as células de pressão e o sistema de aquisição de dados tiveram ótimo desempenho.

Foi utilizado o software Origin 6.0, para o tratamento dos dados experimentais e o software Mathcad 8, para o cálculo teórico das pressões. Os resultados experimentais da medição das pressões no silo protótipo, bem como os resultados teóricos, encontram-se no capítulo 5 - Resultados e Discussão.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades físicas dos produtos armazenados

De acordo com as recomendações das normas europeias ISO 11697/95 e ENV 1991-4/95, vistas no capítulo 2, foram determinados o limite inferior e o limite superior das propriedades físicas dos produtos, de modo a obter-se a combinação mais desfavorável de carregamento na estrutura, considerando as possíveis mudanças das propriedades do produto com o tempo e as variações das amostras.

Dessa forma foram obtidos:

$\phi_{i,m}$ – valor médio do ângulo de atrito interno

$\phi_{i,l}$ - limite inferior do ângulo de atrito interno

$\phi_{i,u}$ - limite superior do ângulo de atrito interno

γ_m - peso específico médio

γ_u – limite superior do peso específico

O milho apresentou um teor de umidade de 13,9% e a areia foi classificada como grossa pelo ensaio de granulometria.

A tabela 15 apresenta os valores encontrados para as propriedades físicas do milho e da areia através do ensaio de cisalhamento.

TABELA 15 – Valores das propriedades físicas do milho e da areia obtidos no ensaio de cisalhamento

Propriedade	Produto	
	Milho	Areia
$f_{i,m}$	32 ⁰	35 ⁰
$f_{i,l}$	29 ⁰	32 ⁰
$f_{i,u}$	37 ⁰	40 ⁰
g_m	7,45kN/m ³	14,55kN/m ³
g_u	8,57kN/m ³	16,73kN/m ³

Para que se obtenha dados comparativos, a tabela 16 apresenta as propriedades do milho e da areia fornecidas pelas principais normas estrangeiras.

TABELA 16 – Valores das propriedades físicas do milho e da areia fornecidos pelas principais normas estrangeiras

Propriedade	Norma									
	ISO		ENV		AS		BMHB		DIN**	
	milho	areia	milho	areia	milho	areia	milho	areia	milho	areia
$f_{i,l}$	*	*	*	*	28 ⁰	30 ⁰	15 ⁰	35 ⁰	31 ⁰	31 ⁰
$f_{i,u}$	*	*	*	*	33 ⁰	40 ⁰	25 ⁰	40 ⁰	***	***
g_m (kN/m ³)	7,5	14	7,5	14,0	7,0	14,0	7,5	15,0	8,0	16,0
g_u (kN/m ³)	8,5	16	8,5	16,0	8,5	17,0	8,5	17,0	-	-

* A maioria das normas estrangeiras não fornece o ângulo de atrito interno dos produtos tabelados. Somente algumas, como a norma inglesa e a australiana é que o fazem.

** Quando a norma apresenta o coeficiente de atrito com a parede, $\mu = \text{tg}\phi_w$ (ϕ_w = ângulo de atrito do produto com a parede) para paredes de chapa de aço ondulada, que é o caso da norma DIN, é possível então determinar ϕ_i pois nesse caso $\phi_i = \phi_w$. As normas ISO e ENV não fornecem μ para paredes de chapa de aço ondulada.

*** A norma DIN não faz referência aos limites inferiores e superiores das propriedades dos produtos. O valor apresentado para o ângulo de atrito interno é o valor médio obtido como indicado em **.

A tabela 17 apresenta a diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente para o ângulo de atrito interno do milho e da areia e os fornecidos pelas normas australiana, inglesa e alemã.

TABELA 17 – Diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente para o ângulo de atrito interno do milho e da areia e os fornecidos pelas normas australiana, inglesa e alemã.

Norma	milho			areia		
	$\phi_{i,m}$	$\phi_{i,l}$	$\phi_{i,u}$	$\phi_{i,m}$	$\phi_{i,l}$	$\phi_{i,u}$
AS	-	+4	+12	-	+7	0
BHMB	-	+93	+48	-	-9	0
DIN	+3	-	-	-13	-	-

Como foi visto anteriormente, em todas as teorias para o cálculo teórico das pressões, um dos parâmetros utilizados é o coeficiente de atrito interno, $\mu = \text{tg}\phi_w$. De acordo com as fórmulas propostas, a pressão horizontal é inversamente proporcional ao coeficiente μ , enquanto as pressões verticais são diretamente

proporcionais. Para o caso de silo de paredes de chapa de aço ondulada, é grande a influência do ângulo de atrito interno, tendo em vista que nesse caso $\phi_i = \phi_w$.

As normas acima citadas, bem como outras consultadas, ao fornecerem os valores com as propriedades dos produtos, informam que são apenas sugestões para o caso de não haver possibilidade de realizar os ensaios para o produto específico. A maioria das normas recomenda o aparelho de Jenike para determinação das propriedades físicas. A realização de ensaios para caracterizar os produtos que serão armazenados em um silo é de fundamental importância para a obtenção de projetos mais seguros e econômicos.

5.2 CÁLCULO TEÓRICO DAS PRESSÕES

Como foi visto no capítulo 2, um dos parâmetros necessários para a predição teórica das pressões é a relação entre a pressão horizontal e a vertical, K . Este parâmetro é, de um modo geral, fornecido pelas normas estrangeiras para alguns produtos tabelados ou determinado indiretamente através de expressões matemáticas, e é considerando constante ao longo da altura e da seção transversal do silo.

A tabela 18 apresenta os valores do parâmetro K fornecidos pelas principais normas para o milho e a areia.

TABELA 18 – Valores da relação entre pressões, K , fornecidos pelas normas estrangeiras para a areia e o milho

Produto	Norma												
	ISO			ENV			AS		ACI		BMHB		DIN
	K_m	K_l	K_u	K_m	K_l	K_u	K_l	K_u	K_l	K_u	K_l	K_u	K_m
areia	0,50	0,45	0,58	0,45	0,41	0,52	0,35	0,38	0,22	0,41	0,25	0,75	0,50
milho	0,60	0,54	0,69	0,50	0,45	0,58	0,39	0,41	0,25	0,44	0,25	0,75	0,60

A tabela 19 apresenta os valores da relação entre as pressões, K , calculada com os valores do ângulo de atrito interno obtidos experimentalmente, para o milho e para a areia, adotando-se a formulação de Hartmann (equação 11), que é considerada de consenso entre os pesquisadores (CALIL JR, 1990) para silos metálicos de chapa de aço ondulada.

TABELA 19 – Valores de K obtidos em função do ângulo de atrito interno determinado experimentalmente

Produto	Valor da relação entre pressões, K		
	K_m	K_i	K_u
areia	0,50	0,42	0,56
milho	0,56	0,47	0,62

A tabela 20 apresenta a diferença percentual entre os valores obtidos para a relação entre pressões, K, para o milho e para a areia, calculados de forma indireta a partir do ângulo de atrito interno obtido experimentalmente e os fornecidos pelas principais normas estrangeiras.

TABELA 20 – Diferença percentual entre os valores de K obtidos a partir do ângulo de atrito interno do milho e da areia obtidos experimentalmente e os fornecidos pelas normas

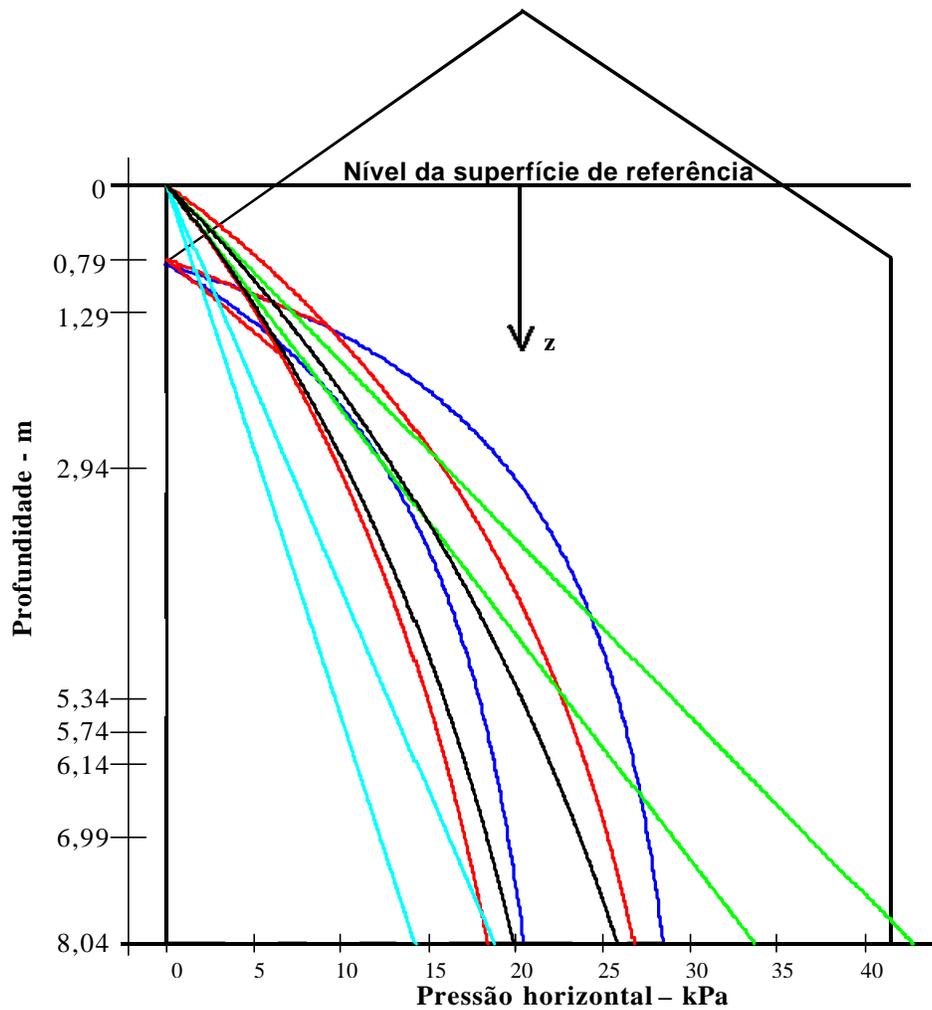
Norma	milho			areia		
	K_m	K_i	K_u	K_m	K_i	K_u
ISO	-7	-14	-11	0	-7	-4
ENV	+12	+4	+7	+11	+2	+8
AS	--	+21	+15	--	+20	+47
ACI	--	+88	+41	--	+90	+37
BHMB	--	+88	-21	--	+68	-34
DIN	-7	--	--	0	--	--

Como pode ser observado na tabela 20, existe uma grande variação para os valores de K fornecidos pelas normas para um mesmo produto. Os valores de K, calculados a partir do ângulo de atrito interno, com a formulação teórica de Hartmann, são próximos dos valores fornecidos pelas normas européias ISO e ENV e ao correspondente valor da DIN. Observa-se que os valores fornecidos pela norma inglesa proporcionam valores muito baixos tanto para a pressão horizontal quanto para a vertical.

5.2.1 Silo protótipo

5.2.1.1 Pressão horizontal – situação de carregamento e descarregamento

Com os valores do coeficiente de atrito interno μ e os valores da relação entre pressões, K , determinados anteriormente, apresenta-se o gráfico da figura 64 onde foi obtida a pressão horizontal para cada um dos modelos estudados, em duas hipóteses de cálculo: pressão obtida com os valores médios das propriedades físicas do milho e a pressão máxima obtida com a combinação mais desfavorável dessas propriedades. Para as características geométricas dos silos analisados, na situação de carregamento, as principais normas estrangeiras adotam o modelo de Janssen, com algumas alterações para o caso de relações $h/d < 1,5$ para previsão das pressões horizontais. A norma ACI 313/91, além do modelo de Janssen, sugere também o modelo de M & A Reimbert. Determinou-se também a faixa de linearização da pressão de acordo com as normas europeias ISO 11697/95 e ENV 1991-4/95 no modelo de Janssen. Optou-se em analisar o modelo de Rankine-Calil, tendo em vista que vários pesquisadores indicam esse modelo para o cálculo das pressões em silos baixos. A adoção também do modelo de Bischara para o cálculo teórico das pressões deu-se pelo fato deste modelo apresentar características diferentes do modelo de Janssen e ter sido obtido através do método de elementos finitos e de regressão não linear, com dados experimentais, como foi visto anteriormente. Foram também calculadas as pressões segundo o modelo de Coulomb, mas, tendo em vista que resultaram em pressões mais baixas que as do modelo de Airy, esse modelo não consta do gráfico da figura 64. As posições cotadas no gráfico são as relativas ao posicionamento das células de pressão quando da realização dos ensaios “in loco” com o silo. A tabela 21 apresenta os valores das pressões horizontais para cada hipótese analisada e para cada modelo estudado, nas posições das células de pressão, de modo a obter-se dados comparativos com os obtidos experimentalmente.



Legenda

m – pressões obtidas com os valores médios das propriedades físicas do milho

s – pressões obtidas com a combinação mais desfavorável das propriedades físicas do milho

- Janssen-m
- Janssen-s
- Linearização-s
- Linearização-m
- Airy-m
- Airy-s
- Rankine/Calil-s
- Rankine/Calil-m
- Bischara-m
- Bischara-s
- Reimbert-s
- Reimbert-m

Escala das pressões – 1:40

Escala da profundidade – 1:75

FIGURA 64 – Pressões horizontais teóricas para o silo protótipo – Carregamento

TABELA 21 – Valores obtidos para pressão horizontal no cálculo teórico das pressões do silo protótipo - kPa

Profundidade e z (m)	Modelo									
	Airy		Janssen		Reimbert		Bischara		Rankine/Calil	
	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s
0,79	1,40	1,84	3,09	5,24	0,00	0,00	3,17	3,93	3,30	4,19
1,29	2,28	3,00	4,85	8,10	4,20	7,28	5,00	6,22	5,40	6,85
2,94	5,19	6,84	9,68	15,53	12,45	19,36	10,12	12,75	12,30	15,61
5,34	9,44	12,43	14,69	22,42	17,75	25,67	15,62	20,02	22,34	28,35
5,74	10,14	13,36	15,34	23,24	18,29	26,24	16,36	21,01	24,01	30,47
6,14	10,85	14,29	15,95	24,00	18,77	26,74	17,05	21,96	25,68	32,59
6,99	12,35	16,27	17,12	25,39	19,62	27,60	18,39	23,81	29,24	37,10
8,04	14,21	18,71	18,34	26,77	20,43	28,40	19,83	25,82	33,33	42,68

No gráfico da figura 64, constata-se que as menores pressões são as dadas pelo modelo de Airy, tanto em relação às pressões horizontais máximas quanto em relação às pressões horizontais obtidas com os valores médios das propriedades físicas do milho. A linearização proposta pelas normas europeias em relação aos valores máximos, praticamente coincidiu com a respectiva curva do modelo de M & A Reimbert, na região considerada. Os valores obtidos com o modelo de Bischara, com os valores médios das propriedades do milho, foram um pouco maior que os obtidos para a mesma hipótese com o modelo de Janssen, e apresentaram valores inferiores aos de Janssen em relação à situação mais desfavorável das propriedades do milho. Observa-se também que, na profundidade máxima do silo, o modelo linear proposto por Rankine-Calil é o que apresenta as maiores pressões nas duas hipóteses calculadas e que, até a meia altura do silo, aproximadamente, as pressões máximas obtidas com o modelo de Rankine-Calil são menores que as dos modelos de Janssen e M & A Reimbert.

A tabela 22 apresenta percentualmente a diferença entre os valores obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil e os demais modelos em cada uma das hipóteses analisadas.

TABELA 22 – Diferença percentual entre os valores teóricos das pressões horizontais obtidas com o modelo de Rankine-Calil e os modelos de Airy, Janssen, Reimbert e Bischara Silo protótipo

Modelo		Profundidade							
		0,79	1,29	2,94	5,34	5,74	6,14	6,99	8,04
Airy	m	+137	+137	+137	+137	+137	+137	+137	+137
	s	+128	+128	+128	+128	+128	+128	+128	+128
Janssen	m	+7	+11	+27	+52	+57	+61	+71	+82
	s	-25	-18	+0,5	+26	+31	+32	+46	+59
Reimbert	m	--	+29	-1	+28	+31	+37	+49	+63
	s	--	-6	-24	+10	+16	+22	+34	+50
Bischara	m	+4	+8	+22	+43	+47	+51	+59	+68
	s	+7	+10	+22	+42	+45	+48	+56	+65

Como foi visto no capítulo 3, a previsão teórica das pressões horizontais na situação de descarregamento (p_{he}), é obtida através do coeficiente de sobrepressão, C, sendo função do produto armazenado, da geometria do silo e das condições de descarregamento. Para se ter dados comparativos com os resultados experimentais, a seguir são apresentados, na tabela 23, os valores propostos pelas principais normas estrangeiras, para o coeficiente de sobrepressão, na profundidade máxima do silo, para o milho, considerando as características geométricas do silo em questão, fluxo de funil e descarga central.

TABELA 23 – Coeficiente de sobrepressão para a pressão horizontal - Silo protótipo

C	Norma					
	ENV	ISO	AS	DIN	BHMB	ACI
	1,0	1,0	1,2	1,0	1,0	*

* Ver figura 34(b)

5.2.1.2 Pressão vertical no fundo do silo – situação de carregamento e descarregamento

O gráfico da figura 65 apresenta as pressões verticais teóricas no fundo plano do silo protótipo, na situação de carregamento (p_v), obtidas através das fórmulas propostas pelas principais normas estrangeiras e por M & A Reimbert.

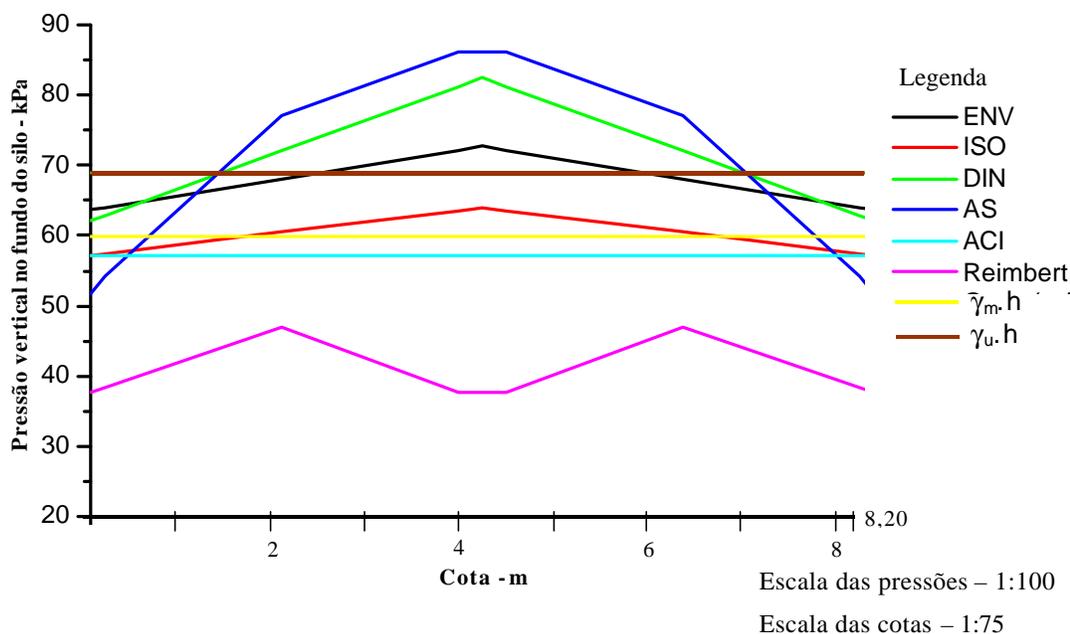


FIGURA 65 – Pressões verticais teóricas para o silo protótipo -Carregamento

A tabela 24 apresenta, nas posições das células de pressão, os valores das pressões verticais máximas na situação de carregamento para cada modelo estudado, isto é, adotando-se a combinação mais desfavorável das propriedades físicas do milho, de modo a obter-se dados comparativos com os experimentais. Os valores apresentados pela norma ACI são os propostos pela teoria de Janssen, sem nenhuma modificação.

TABELA 24 – Valores obtidos para pressão vertical máxima no fundo plano na situação de carregamento no cálculo teórico das pressões do silo protótipo - kPa

Posição	Norma					Reimbert t	$\gamma_m \cdot h$	$\gamma_u \cdot h$
	ENV	ISO	DIN	AS	ACI			
0,00	63,65	57,18	62,13	51,68	57,18	37,66	59,90	68,9
0,15	63,98	57,42	62,87	54,15	57,18	38,37	59,90	68,9
2,00	68,05	60,51	72,04	77,09	57,18	47,08	59,90	68,9
3,85	72,12	63,59	81,20	86,00	57,18	37,66	59,90	68,9
4,10	72,67	64,01	82,44	86,13	57,18	37,66	59,90	68,9
4,35	72,12	63,59	81,20	86,00	57,18	37,66	59,90	68,9
6,20	68,05	60,51	72,04	77,09	57,18	47,08	59,90	68,9
8,05	63,98	57,42	62,87	54,15	57,18	38,37	59,90	68,9
8,20	63,65	57,18	62,13	51,68	57,18	37,66	59,90	68,9

Do gráfico da figura 65 e da tabela 24, constata-se que, junto à parede, bem como no centro do silo, as pressões verticais na situação de carregamento

obtidas através da formulação proposta por M & A Reimbert são as que apresentam os menores valores. A maior pressão vertical no centro do silo é a obtida com a formulação da norma australiana, sendo cerca de 129% maior que a de M & A Reimbert. Junto à parede, a pressão obtida com a formulação $\gamma_u \cdot h$ é a maior, sendo cerca de 83% maior que a de M & A Reimbert. Observa-se também que a pressão obtida com a formulação $\gamma_m \cdot h$ é maior que a formulação de Janssen (ACI) que foi obtida com a combinação mais desfavorável das propriedades físicas do milho.

Na situação de descarregamento, analogamente às pressões horizontais, as verticais no fundo do silo são obtidas através do coeficiente de sobrepressão, C_b . A seguir são apresentados na tabela 25 os valores propostos pelas principais normas estrangeiras para o coeficiente de sobrepressão, considerando as características geométricas do silo protótipo, o produto armazenado (milho) e descarga central. Embora os coeficientes de sobrepressão indicados pelas normas ENV, AS e DIN sejam iguais a 1,0, como indicado na tabela 25, de certa forma, a sobrepressão já foi considerada na respectiva formulação para as pressões verticais no fundo plano, indicadas no item 3.2.1.2.

TABELA 25 – Coeficiente de sobrepressão para a pressão vertical - Silo protótipo

C_b	Norma					
	ENV	ISO	AS	DIN	BHMB	ACI⁽¹⁾
	1,0	1,35	1,0	1,0	1,0	1,0 1,12

(1) A norma americana ACI propõe dois coeficientes de sobrepressão para as pressões verticais no fundo do silo para produtos granulares: 1,0 para o caso de adotar-se o modelo de Janssen e 1,12 para o caso de adotar-se o modelo de M & A Reimbert.

5.2.2 Silo Piloto

5.2.2.1 Pressão horizontal – situação de carregamento e descarregamento

A figura 66 apresenta as pressões teóricas horizontais máximas (s) e as obtidas com os valores médios das propriedades físicas da areia (m), para cada relação h/d instrumentada no silo piloto, com os mesmos modelos adotados para o silo protótipo. As tabelas 26, 27 e 28 apresentam os valores das pressões horizontais para as duas hipóteses de cálculo acima citadas, para cada modelo analisado, nas posições das células de pressão, respectivamente à relações h/d=0,98, h/d=1,25 e h/d=1,49, a fim de se obter dados comparativos com os experimentais.

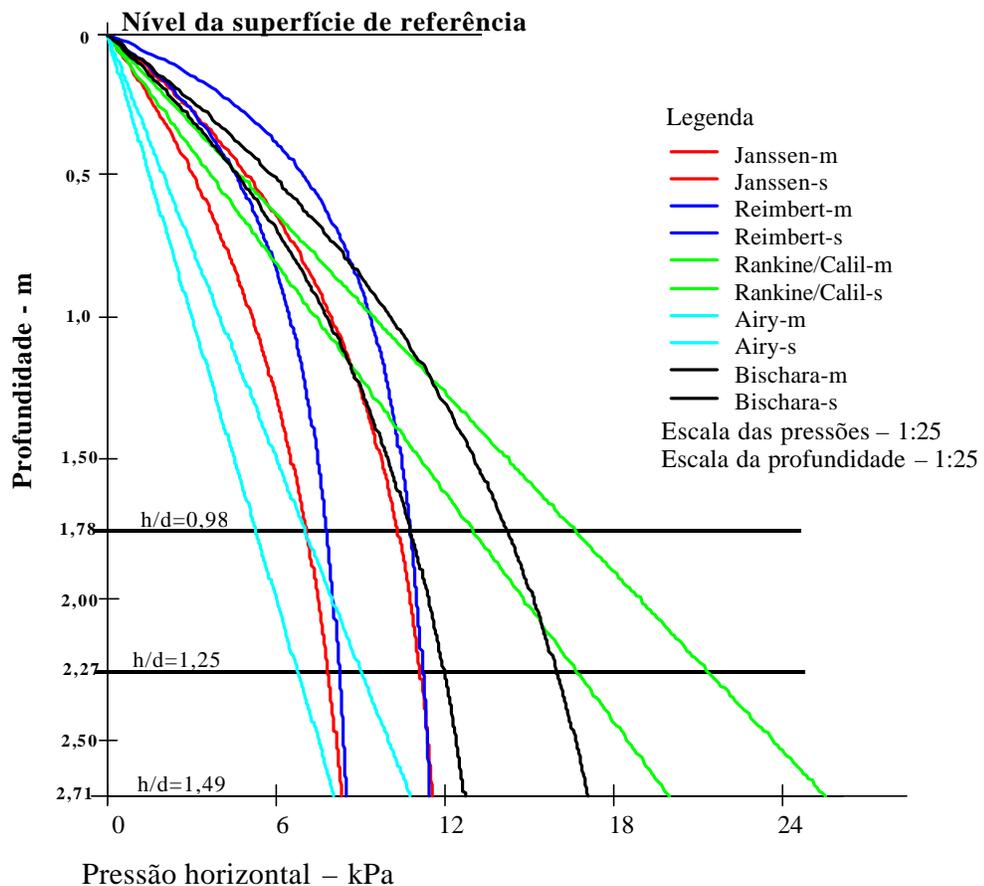


FIGURA 66 – Pressões horizontais teóricas para o silo piloto – Carregamento

TABELA 26 – Valores obtidos para pressão horizontal no cálculo teórico das pressões do silo piloto com $h/d=0,98$ - kPa

Profundidade e z (m)	Modelo									
	Airy		Janssen		Reimbert		Bischara		Rankine-Calil	
	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s
0,28	0,83	1,11	1,85	3,09	3,08	4,90	2,80	3,52	2,06	2,63
0,66	1,97	2,62	3,79	6,08	5,32	7,95	5,76	7,34	4,85	6,20
1,17	3,48	4,64	5,64	8,62	6,86	9,77	8,58	11,13	8,6	10,99
1,26	3,75	5,00	5,90	8,95	7,04	9,97	8,98	11,67	9,26	11,84
1,35	4,02	5,36	6,14	9,24	7,20	10,15	9,35	12,18	9,92	12,68
1,63	4,85	6,47	6,79	10,01	7,62	10,58	10,34	13,58	11,97	15,31
1,78	5,30	7,06	7,08	10,33	7,79	10,76	10,79	14,23	13,08	16,72

TABELA 27 – Valores obtidos para pressão horizontal no cálculo teórico das pressões do silo piloto com $h/d=1,25$ - kPa

Profundidade e z (m)	Modelo									
	Airy		Janssen		Reimbert		Bischara		Rankine-Calil	
	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s
0,36	1,07	1,43	2,31	3,82	3,68	5,77	3,50	4,41	2,64	3,38
0,84	2,50	3,33	4,53	7,14	5,99	8,77	6,89	8,83	6,17	7,89
1,50	4,47	5,95	6,50	9,68	7,44	10,40	9,90	12,97	11,02	14,09
1,61	4,79	6,39	6,75	9,96	7,59	10,55	10,27	13,49	11,83	15,12
1,72	5,12	6,82	6,97	10,21	7,72	10,69	10,61	13,98	12,64	16,16
2,12	6,31	8,41	7,63	10,91	8,11	11,08	11,63	15,48	15,57	19,92
2,27	6,76	9,01	7,83	11,10	8,22	11,19	11,94	15,94	16,68	21,32

TABELA 28 – Valores obtidos para pressão horizontal no cálculo teórico das pressões do silo piloto com $h/d=1,49$ - kPa

Profundidade e z (m)	Modelo									
	Airy		Janssen		Reimbert		Bischara		Rankine-Calil	
	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s
0,43	1,28	1,71	2,69	4,41	4,14	6,40	4,07	5,14	3,13	4,04
1,00	2,98	3,97	5,11	7,92	6,46	9,32	7,76	10,01	7,35	9,39
1,79	5,33	7,10	7,10	10,35	7,80	10,77	10,82	14,27	13,15	16,82
1,93	5,75	7,66	7,34	10,61	7,94	10,91	11,19	14,82	14,18	18,13
2,07	6,16	8,21	7,56	10,83	8,07	11,04	11,52	15,31	15,21	19,45
2,56	7,62	10,16	8,16	11,40	8,40	11,36	12,45	16,72	18,81	24,05
2,71	8,07	10,75	8,30	11,53	8,48	11,43	12,67	17,06	19,91	25,46

No gráfico da figura 66, pode-se observar que, para a relação $h/d=0,98$, as pressões horizontais máximas obtidas com o modelo de M & A Reimbert ainda são maiores que as do Janssen mas, a partir da relação $h/d=1,25$, praticamente são iguais. Observa-se também que, devido ao comportamento linear do modelo de Airy, os valores das pressões obtidas com esse modelo tende aos dos modelos de Janssen e A & M Reimbert, muito rapidamente, à medida em que a relação h/d aumenta. Os valores das pressões obtidos com o modelo de Bischara são maiores que os respectivos valores dos modelos de Airy, Janssen e A & M Reimbert. Ainda observa-se que, devido ao comportamento assintótico dos modelos de Janssen, A & M Reimbert e o de Bischara, os valores das pressões obtidas com o modelo linear de Rankine-Calil afastam-se rapidamente daqueles, à medida em que aumenta a relação h/d . É interessante notar, na relação $h/d=0,98$, a acentuada mudança no comportamento das curvas obtidas com modelo de Bischara para a areia, em relação às obtidas com os modelos de Janssen, A & M Reimbert e até mesmo o modelo linear de Rankine-Calil, comparativamente às obtidas com milho no silo protótipo, com os mesmos modelos.

As tabelas 29, 30 e 31 apresentam percentualmente a diferença entre os valores obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil e os demais modelos em cada uma das hipóteses e para cada relação h/d analisada.

TABELA 29 – Diferença percentual entre os valores das pressões horizontais obtidas com o modelo de Rankine Calil e os modelos de Airy, Janssen, Reimbert e Bischara – $h/d=0,98$

Modelo		Profundidade (m)						
		0,28	0,66	1,17	1,26	1,35	1,63	1,78
Airy	m	+146	+146	+146	+146	+146	+146	+146
	s	+136	+136	+136	+136	+136	+136	+136
Janssen	m	+11	+28	+52	+57	+62	+77	+85
	s	-18	+2	+28	+32	+37	+53	+62
Reimbert	m	-50	-10	+25	+32	+38	+57	+68
	s	-86	-28	+12	+19	+25	+44	+55
Bischara	m	-36	-19	0	+3	+6	+11	+21
	s	-34	-19	-1	+1	+4	+13	+18

TABELA 30 – Diferença percentual entre os valores das pressões horizontais obtidas com o modelo de Rankine-Calil e os modelos de Airy, Janssen, Reimbert e de Bischara – $h/d=1,25$

Modelo		Profundidade						
		0,36	0,84	1,50	1,61	1,72	2,12	2,27
Airy	m	+146	+146	+146	+146	+146	+146	+146
	s	+136	+136	+136	+136	+136	+136	+136
Janssen	m	+14	+36	+70	+75	+81	+104	+113
	s	-13	+11	+46	+52	+58	+83	+92
Reimbert	m	-39	+3	+48	+56	+64	+92	+103
	s	-71	-11	+35	+43	+51	+78	+90
Bischara	m	-33	-12	+11	+15	+19	+34	+40
	s	-30	-15	+9	+12	+16	+29	+34

TABELA 31 – Diferença percentual entre os valores das pressões horizontais obtidas com o modelo de Rankine-Calil e os modelos de Airy, Janssen e Reimbert – $h/d=1,49$

Modelo		Profundidade						
		0,43	1,00	1,79	1,93	2,07	2,56	2,71
Airy	m	+146	+146	+146	+146	+146	+146	+146
	s	+136	+136	+136	+136	+136	+136	+136
Janssen	m	+16	+43	+85	+93	+101	+130	+140
	s	-9	+19	+62	+71	+80	+111	+121
Reimbert	m	-32	+14	+69	+82	+88	+124	+135
	s	-58	+1	+56	+66	+76	+112	+122
Bischara	m	-30	-6	+21	+27	+32	+51	+57
	s	27	-7	+18	+22	+30	+43	+49

Para a situação de descarregamento, a tabela 32 apresenta os valores dos coeficientes de sobrepressão propostos pelas principais normas estrangeiras para cada relação h/d instrumentada no silo piloto.

Tabela 32 – Coeficiente de sobrepressão para a pressão horizontal para cada relação h/d instrumentada no silo piloto

C	Norma					
	ENV	ISO	AS	DIN	BHMB	ACI
$h/d=0,98$	1,00	1,00	1,20	1,00	1,00	*
$h/d=1,25$	1,20	1,18	1,30	1,00	1,00	*
$h/d=1,49$	1,49	1,35	1,39	1,00	1,00	*

* Ver figura 34(a)

5.2.2.2 Pressão vertical no fundo do silo – situação de carregamento e descarregamento

O gráfico da figura 67 apresenta, na situação de carregamento, as pressões verticais teóricas (p_{vf}) no fundo plano do silo piloto, para a relação $h/d=0,98$. A tabela 33 apresenta os valores das pressões verticais máximas, na situação de carregamento, para cada modelo estudado, nas posições das células de pressão, de modo a obter-se dados comparativos com os experimentais.

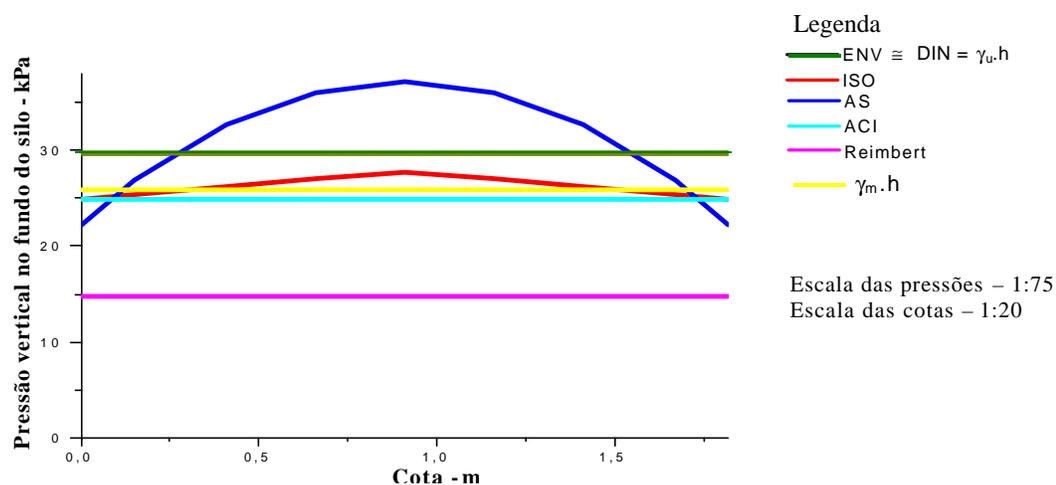


FIGURA 67 – Pressões verticais teóricas no fundo do silo piloto – $h/d=0,98$

TABELA 33 – Valores obtidos na situação carregamento para pressão vertical máxima no fundo plano no cálculo teórico das pressões do silo piloto com $h/d=0,98$ - kPa

Posição	Norma					Reimbert	$g_m \cdot h$	$g_u \cdot h$
	ENV	ISO	DIN	AS	ACI			
0,00	29,85	24,88	29,78	22,33	24,88	14,84	25,9	29,78
0,15	29,85	25,36	29,78	26,84	24,88	14,84	25,9	29,78
0,41	29,85	26,20	29,78	32,73	24,88	14,84	25,9	29,78
0,66	29,85	27,00	29,78	36,10	24,88	14,84	25,9	29,78
0,91	29,85	27,80	29,78	37,22	24,88	14,84	25,9	29,78
1,16	29,85	27,00	29,78	36,10	24,88	14,84	25,9	29,78
1,41	29,85	26,20	29,78	32,73	24,88	14,84	25,9	29,78
1,67	29,85	25,36	29,78	26,84	24,88	14,84	25,9	29,78
1,82	29,85	24,88	29,78	22,33	24,88	14,84	25,9	29,78

O gráfico da figura 68 apresenta, na situação de carregamento, as pressões verticais teóricas (p_v) no fundo plano do silo piloto, para a relação $h/d=1,25$. A tabela 34 apresenta os valores das pressões verticais máximas, na situação de carregamento, para cada modelo estudado, nas posições das células de pressão, de modo a obter-se dados comparativos com os experimentais.

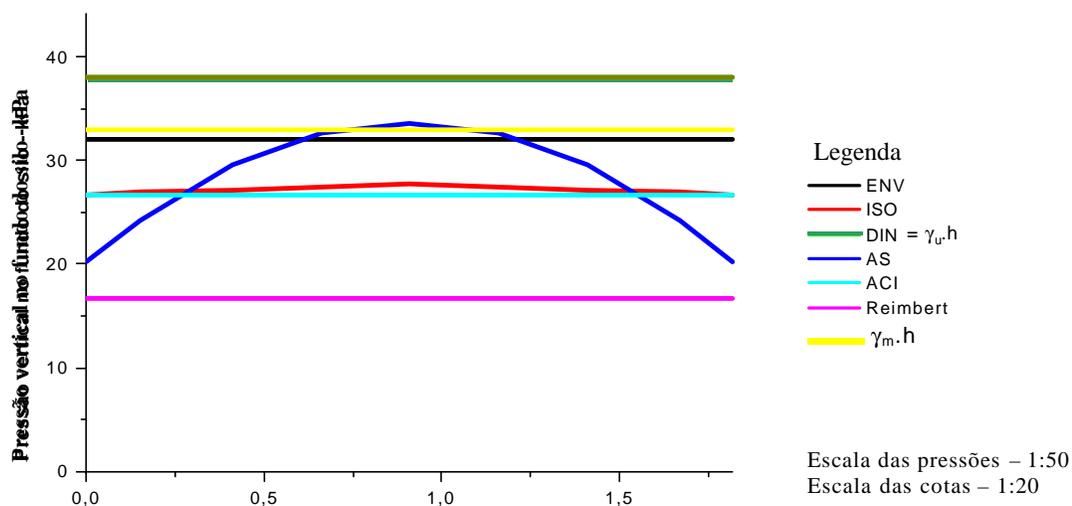


FIGURA 68 – Pressões verticais teóricas no fundo do silo piloto – $h/d=1,25$

TABELA 34 – Valores obtidos para pressão vertical máxima no fundo plano na situação carregamento no cálculo teórico das pressões do silo piloto com $h/d=1,25$ - kPa

Posição	Norma					Reimbert	$g_m \cdot h$	$g_u \cdot h$
	ENV	ISO	DIN	AS	ACI			
0,00	32,08	26,74	37,98	20,18	26,74	16,62	33,03	37,98
0,15	32,08	26,92	37,98	24,25	26,74	16,62	33,03	37,98
0,41	32,08	27,21	37,98	29,57	26,74	16,62	33,03	37,98
0,66	32,08	27,51	37,98	32,62	26,74	16,62	33,03	37,98
0,91	32,08	27,80	37,98	33,63	26,74	16,62	33,03	37,98
1,16	32,08	27,51	37,98	32,62	26,74	16,62	33,03	37,98
1,41	32,08	27,21	37,98	29,57	26,74	16,62	33,03	37,98
1,67	32,08	26,92	37,98	24,25	26,74	16,62	33,03	37,98
1,82	32,08	26,74	37,98	20,18	26,74	16,62	33,03	37,98

O gráfico da figura 69 apresenta, na situação de carregamento, as pressões verticais teóricas (p_{vf}) no fundo plano do silo piloto, para a relação $h/d=1,49$. A tabela 35 apresenta os valores das pressões verticais máximas, na situação de carregamento, para cada modelo estudado, nas posições das células de pressão, de modo a obter-se dados comparativos com os experimentais.

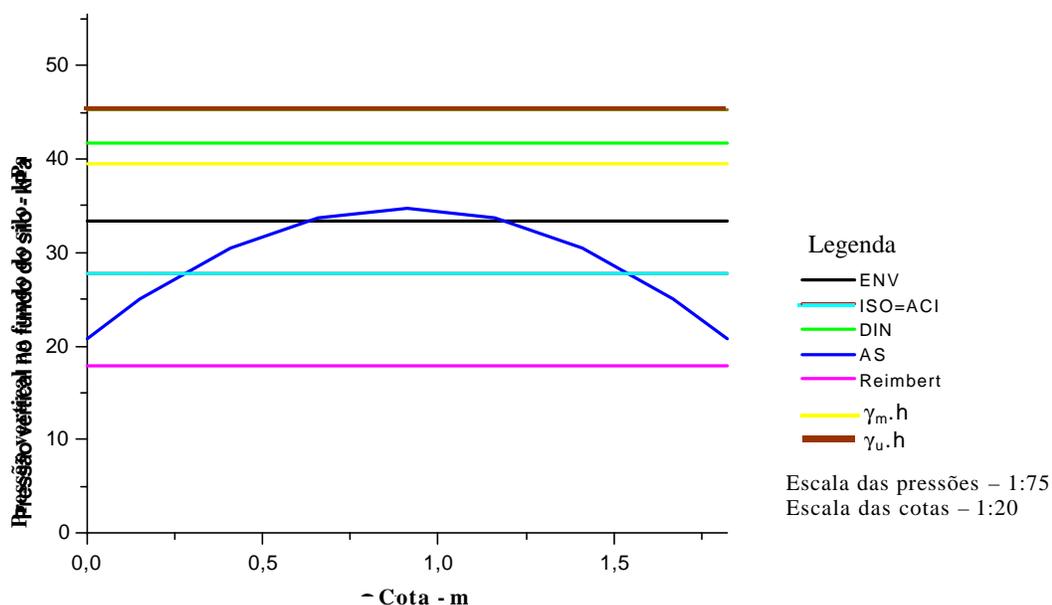


FIGURA 69 – Pressões verticais no fundo do silo piloto – $h/d=1,49$

TABELA 35 – Valores obtidos para pressão vertical máxima no fundo plano na situação carregamento no cálculo teórico das pressões do silo piloto com $h/d=1,49$ - kPa

Posição	Norma						$\gamma_m \cdot h$	$\gamma_u \cdot h$
	ENV	ISO	DIN	AS	ACI	Reimbert		
0,00	33,32	27,80	41,70	20,84	27,80	17,90	39,43	45,34
0,15	33,32	27,80	41,70	25,05	27,80	17,90	39,43	45,34
0,41	33,32	27,80	41,70	30,55	27,80	17,90	39,43	45,34
0,66	33,32	27,80	41,70	33,69	27,80	17,90	39,43	45,34
0,91	33,32	27,80	41,70	34,74	27,80	17,90	39,43	45,34
1,16	33,32	27,80	41,70	33,69	27,80	17,90	39,43	45,34
1,41	33,32	27,80	41,70	30,55	27,80	17,90	39,43	45,34
1,67	33,32	27,80	41,70	25,05	27,80	17,90	39,43	45,34
1,82	33,32	27,80	41,70	20,84	27,80	17,90	39,43	45,34

No gráfico da figura 67, pode-se constatar que a formulação proposta pela norma australiana é a que apresenta os maiores valores para as pressões verticais no centro do silo. Os valores obtidos com o modelo de M & A Reimbert são os menores no centro e junto à parede do silo.

Observando-se em conjunto os gráficos das figuras 67, 68 e 69, verifica-se que os valores obtidos com a formulação da norma europeia ISO tendeu aos da norma americana ACI, à medida que a relação h/d aumentou. Conforme foi visto no capítulo 3, a norma americana ACI é a única entre as normas analisadas que adota o modelo de Janssen para a previsão das pressões verticais sem nenhuma modificação, enquanto as demais normas embutem coeficientes de sobrepressão ao adotar o modelo de Janssen ou adotam outras expressões, como no caso da norma australiana para relações $h/d < 1,5$. Observa-se, também, que os valores obtidos pela norma europeia ENV se afastaram dos valores da norma alemã DIN, à medida que aumentou a relação h/d . Nas relações h/d iguais a 0,98 e 1,25, as pressões verticais previstas pela norma DIN ficaram limitadas por $\gamma_u \cdot h$ mas, à medida que aumentou a relação h/d , o valor 1,5 vezes o modelo de Janssen, conforme visto no item 3.2.1.2, torna-se menor. A queda brusca dos valores das pressões verticais obtidos com a formulação da norma australiana, na região central do silo, para as relações $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$, comparativamente à formulação $\gamma_u \cdot h$ que é a maior entre as fórmulas analisadas para estas relações, é justificada porque a norma australiana adota a formulação $1,25\gamma_u \cdot h$ somente para relações $h/d < 1$, passando a adotar 1,25 vezes a expressão de Janssen, para relações $h/d \geq 1$.

A tabela 36 apresenta a diferença percentual entre o valor obtido para a pressão vertical, no centro do silo e junto à parede, com formulação da norma australiana e os demais modelos para a relação $h/d = 0,98$ e, a tabela 37, a diferença percentual entre os valores obtidos para a pressão vertical junto à parede e no centro do silo com formulação $\gamma_u \cdot h$ e os demais modelos para cada relação h/d ensaiada.

TABELA 36 – Diferença percentual entre os valores obtidos no centro do silo e junto à parede com a formulação da norma australiana e os demais modelos analisados para a relação $h/d=0,98$ instrumentada no silo piloto

Posição	ENV	ISO	DIN	ACI	Reimbert	$\gamma_m \cdot h$	$\gamma_u \cdot h$
Centro do silo	+25	+34	+25	+50	+151	+44	+25
Junto à parede	-33	-11	-33	-11	+50	-15	-33

TABELA 37 - Diferença percentual entre os valores obtidos para a pressão vertical no centro do silo (c) e junto à parede (p) com a formulação $\gamma_u \cdot h$ e os demais modelos analisados em cada relação h/d instrumentada no silo piloto

h/d	Norma													
	ENV		ISO		DIN		AS		ACI		Reimbert		$g_n \cdot h$	
	c	p	c	p	c	p	c	p	c	p	c	p	c	p
0,98	≅0	≅0	+7	+20	≅0	≅0	-25	+33	+20	+20	+101	+101	+15	+15
1,25	+18	+18	+37	+42	≅0	≅0	+13	+88	+42	+42	+129	+129	+15	+15
1,49	+36	+36	+63	+63	+9	+9	+31	+118	+63	+63	+133	+133	+15	+15

Na situação de descarregamento, valem os mesmos coeficientes indicados na tabela 25, mesmo para relações $1 < h/d < 1,5$.

5.2.3 Conclusões da análise dos resultados do cálculo teórico das pressões

- O modelo proposto por M & A Reimbert para a previsão das pressões horizontais apresenta valores maiores em relação ao modelo de Janssen para relações $h/d < 1$ e, praticamente são iguais aos obtidos pelo modelo de Janssen para relações maiores.
- À medida que aumentou a relação h/d, os valores da pressão horizontal obtidos com a formulação linear de Airy, na profundidade máxima, tenderam muito rapidamente aos de Janssen e M & A Reimbert. A teoria de Airy consideraria silo baixo para as características do silo piloto até uma altura de 3,00m e, para as características do silo protótipo, até uma altura de 11,90m, com os respectivos produtos armazenados. Em média essas alturas representam uma relação h/d de aproximadamente, 1,65 e 1,45 respectivamente.
- À medida que aumentou a relação h/d, os valores da pressão horizontal obtidos com a formulação linear de Rankine-Calil, tenderam a afastar-se muito rapidamente dos valores de Janssen, M & A Reimbert e Bischara, devido ao comportamento assintótico das pressões obtidas com esses modelos.

- As pressões obtidas com os modelos de Janssen e M & A Reimbert tendem a valores constantes para relações $h/d > 1,25$.
- O modelo de Bischara teve um comportamento bastante diferenciado comparativamente aos modelos de Janssen, M & A Reimbert e o de Rankine-Calil, quando se mudou o produto armazenado para uma mesma relação h/d .
- As pressões horizontais para a condição de descarregamento são bastante diferenciadas em função dos coeficientes de sobrepressão propostos pelas normas.
- Os valores obtidos com a formulação proposta por M & A Reimbert para as pressões verticais são, em média, 60% menores que os do modelo de Janssen.
- As normas apresentam fórmulas bastante diferenciadas para a previsão das pressões verticais, no centro e junto à parede do silo, levando a diferenças de até 133%.

5.3 ENSAIOS

5.3.1 Silo protótipo

A figura 70 apresenta, de forma esquemática, o posicionamento das células de pressão no fundo do silo. Os gráficos das figuras 71 a 73 apresentam os valores registrados pelas células de pressão, para as pressões verticais no fundo do silo, e o gráfico da figura 74, a pressão horizontal nas paredes em cada um dos ensaios realizados no silo protótipo.

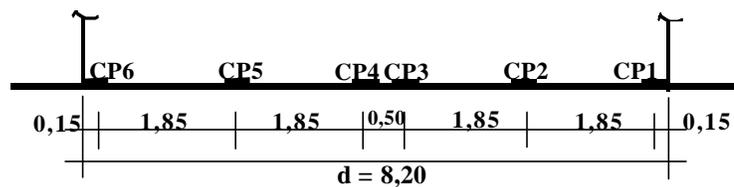
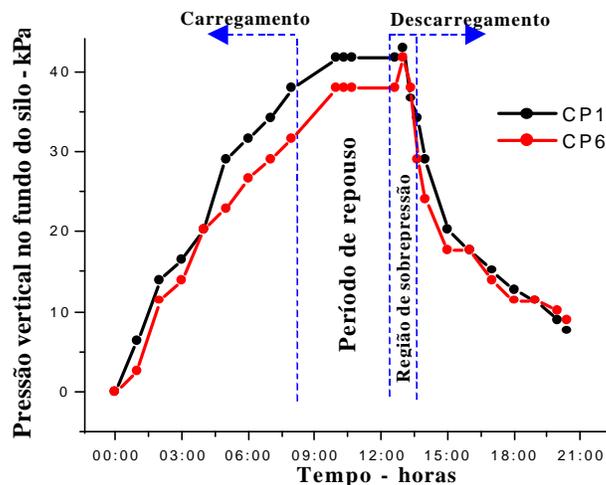
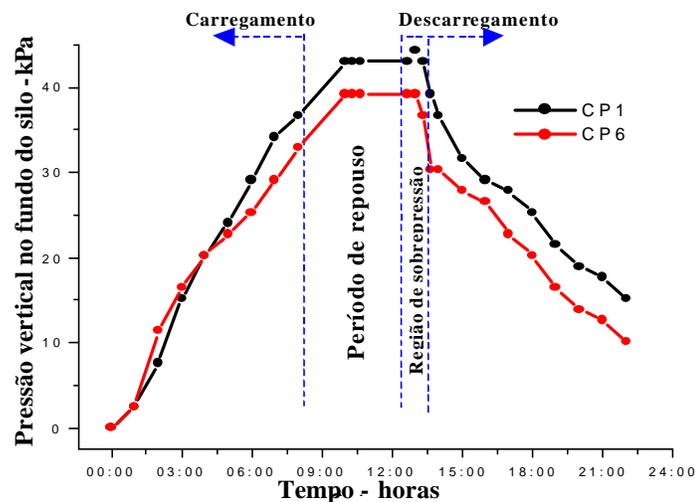


FIGURA 70 – Posicionamento das células de pressão no fundo do silo protótipo

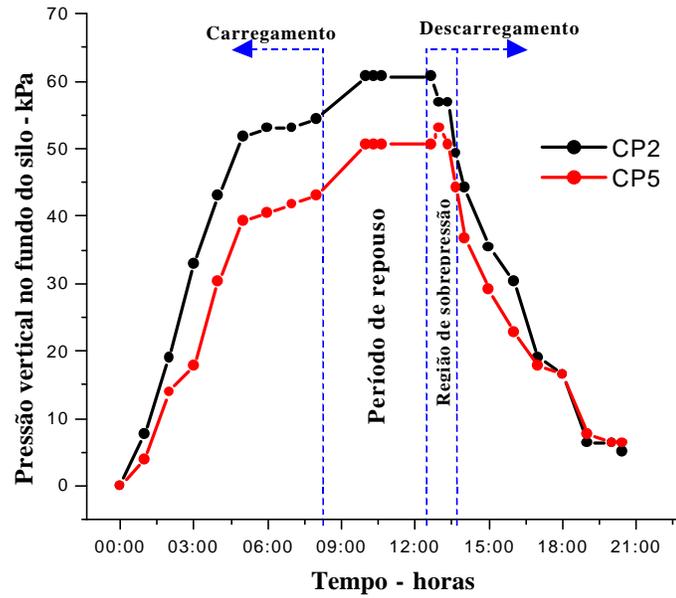


(a) Ensaio 1 – ciclo completo

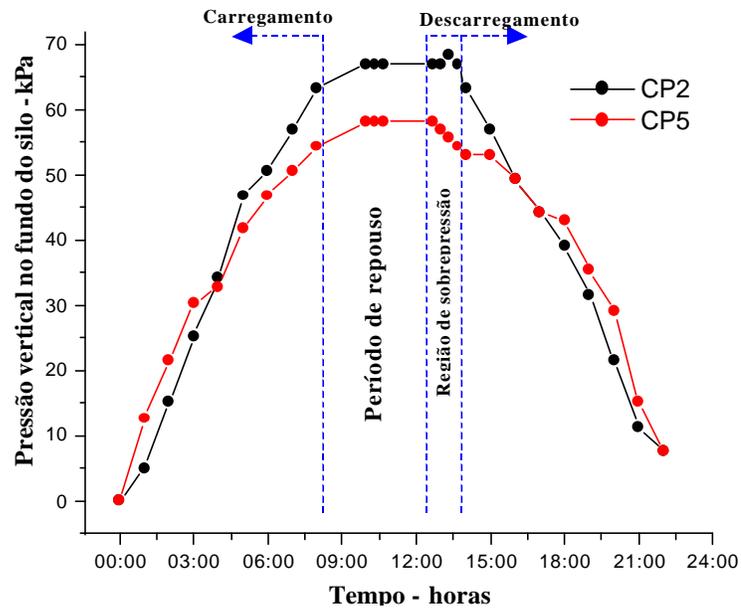


(b) Ensaio 2 – ciclo completo

FIGURA 71– Silo protótipo - Pressões dinâmicas nas células 1 e 6

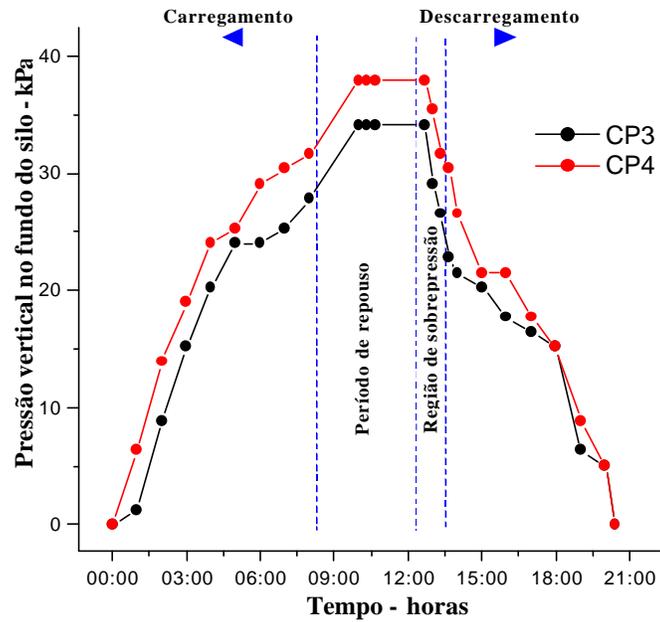


(a) Ensaio 1 – ciclo completo

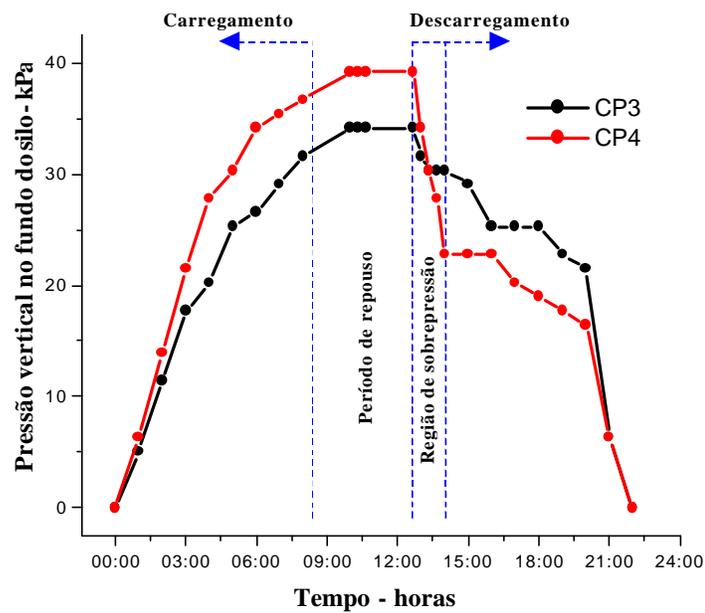


(b) Ensaio 2 – ciclo completo

FIGURA 72 – Silo protótipo - Pressões dinâmicas nas células 2 e 5



(a) Ensaio 1 – ciclo completo



(b) Ensaio 2 – ciclo completo

FIGURA 73 – Silo protótipo - Pressões dinâmicas nas células 3 e 4

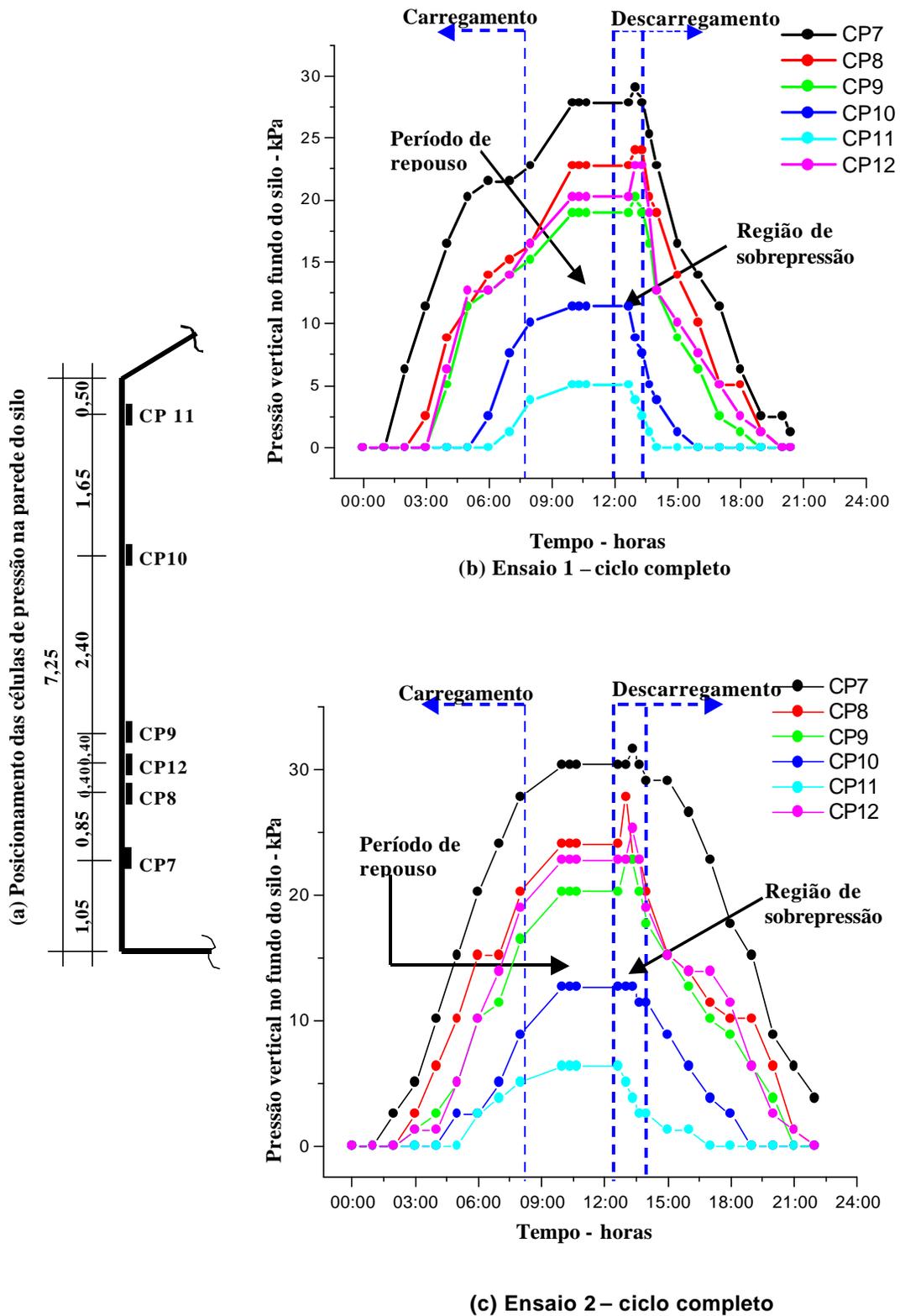


FIGURA 74 – Silo protótipo - Pressões dinâmicas nas células da parede

De acordo com os gráficos 71 a 74, pode-se observar que, sem exceção, todas as células de pressão registraram aumentos de pressão durante o período de repouso do produto. No ensaio 1, as células do fundo do silo tiveram um acréscimo de pressão em média de 18% e as células da parede 24%, durante o período de armazenamento. No ensaio 2, o acréscimo de pressão nas células do fundo do silo foi em média 8% e, nas células da parede, 26%. Observa-se, também, para as células do fundo do silo, que os valores medidos pelas células simétricas variaram durante as fases de carregamento e descarregamento, o que é justificado pela natureza aleatória das pressões em função da forma de carregamento e do produto armazenado.

5.3.1.1 Análise e discussão das pressões horizontais obtidas experimentalmente

A tabela 38 apresenta os valores médios das pressões horizontais, na parede do silo, obtidas experimentalmente, após o período de repouso (\cong 16 horas), e o gráfico da figura 75 apresenta os valores teóricos e os experimentais para as pressões horizontais na parede, na situação de carregamento.

TABELA 38 – Valores médios das pressões horizontais obtidas experimentalmente na parede do silo protótipo- Carregamento

Pressão horizontal kPa	Célula					
	CP7	CP8	CP12	CP9	CP10	CP11
	29,08	23,40	21,50	19,60	12,02	5,69

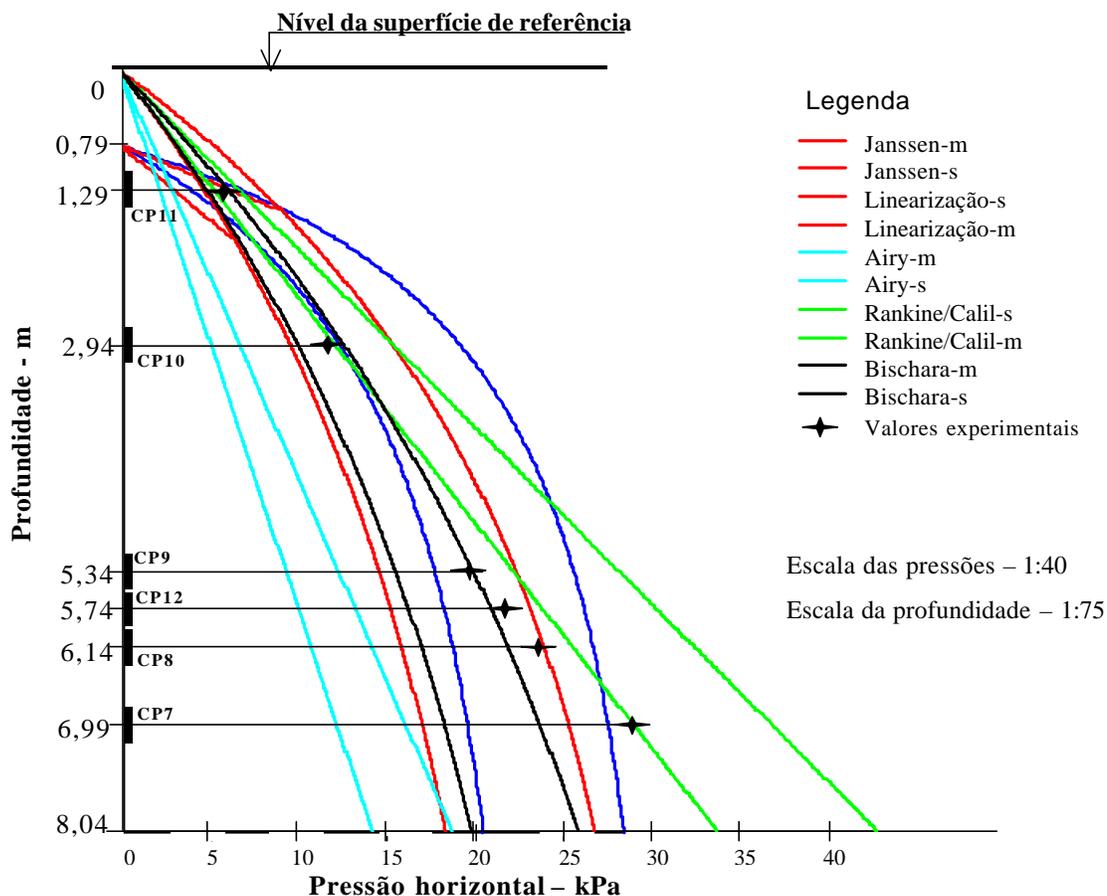


FIGURA 75- Pressões horizontais teóricas e experimentais para o silo protótipo Carregamento

No gráfico da figura 75, pode-se constatar que os valores obtidos experimentalmente não apresentaram comportamento assintótico em relação ao eixo da profundidade para a relação h/d ensaiada e ficaram relativamente próximos dos valores obtidos com o modelo linear de Rankine- Calil, com os valores médios das propriedades físicas do milho, propriedades essas que possuíam no momento do ensaio. Embora tenham também ficado relativamente próximos dos valores da curva limite superior de Janssen e também de Bischara, com exceção do valor obtido com a CP7, que ficou mais próximo da curva obtida com o modelo de A & M Reimbert, cumpre notar que a curva limite superior é aquela que irá produzir a situação mais desfavorável em relação à propriedades dos produtos, durante toda a vida útil do silo e para qual deverá ser projetado.

A tabela 39 apresenta a diferença percentual entre os valores obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil, nas duas hipóteses de cálculo, e os obtidos

experimentalmente, tendo em vista que, comparativamente aos resultados obtidos, esse modelo foi o que melhor se ajustou.

TABELA 39 – Diferença percentual entre os valores obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil e os obtidos experimentalmente - Silo protótipo.

%	Célula de pressão											
	CP7		CP8		CP12		CP9		CP10		CP11	
	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s
	+0,6	+27,6	+9,7	+39,3	+11,7	+41,7	+14,0	+44,6	+2,3	+29,9	-5,4	+20,4

m– pressões obtidas com os valores médios das propriedades físicas do milho

s – pressões obtidas com a combinação mais desfavorável das propriedades físicas do milho

Na tabela 39, pode-se verificar que a maior diferença encontrada entre os valores obtidos experimentalmente e os obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil, com os valores médios das propriedades do milho, é 14%, enquanto, com a combinação mais desfavorável das propriedades, é 44,6% na posição da CP9.

O gráfico da figura 76 apresenta a regressão linear realizada com os valores das pressões horizontais na parede obtidas experimentalmente de modo a obter-se dados comparativos com o modelo de Rankine-Calil.

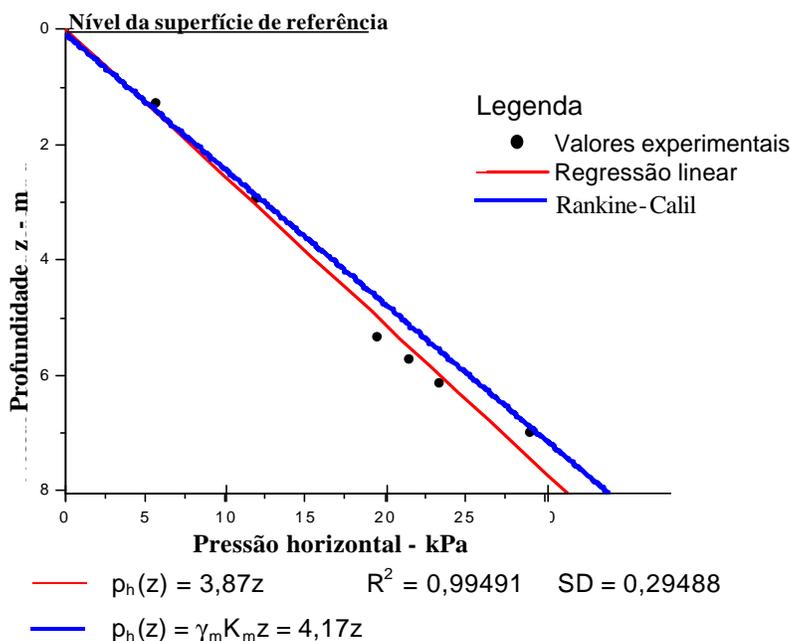


FIGURA 76 – Regressão linear x Modelo Rankine-Calil – Silo protótipo

Do gráfico da figura 76, pode-se observar que a regressão linear obtida com os valores experimentais apresenta uma boa correlação, o que indica que, para a relação h/d analisada (0,98), o modelo linear de Rankine-Calil pode ser adotado. A diferença percentual entre os valores obtidos com a regressão linear e o modelo de Rankine-Calil, nesse caso, é de 7,8%.

Dos gráficos da figuras 71 a 74, observa-se que algumas células registraram sobrepressão no início do descarregamento, mais notadamente nas paredes do silo. A tabela 40 apresenta os valores registrados pelas células de pressão na situação de carregamento (C) e descarregamento (D), em cada um dos ensaios realizados.

Tabela 40 – Pressões obtidas experimentalmente – Carregamento e Descarregamento – Silo protótipo

Pressão horizontal kPa	Célula												
	Fundo						Parede						
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP12	CP9	CP10	CP11	
Ensaio 1	C	41,73	60,70	34,15	37,94	50,59	37,94	27,82	22,76	20,23	18,97	11,38	5,06
	D	43,00	60,70	34,14	37,94	53,22	41,73	29,09	24,03	22,76	20,23	11,38	5,06
Ensaio 2	C	43,00	67,03	34,15	39,20	58,17	39,20	30,35	24,03	22,76	20,23	12,65	6,32
	D	44,26	68,29	34,15	39,20	58,17	39,20	31,62	27,82	25,29	22,76	12,65	6,32

A tabela 41 apresenta os percentuais relativos ao acréscimo de pressão devido ao descarregamento em cada um dos ensaios realizados.

Tabela 41 – Variação percentual das pressões obtidas experimentalmente na fase de descarregamento – Silo protótipo

Pressão horizontal kPa	Célula											
	Fundo						Parede					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP12	CP9	CP10	CP11
Ensaio 1	4	0	0	0	5	10	5	6	12	7	0	0
Ensaio 2	3	2	0	0	0	0	4	16	11	12	0	0

Na tabela 41, verifica-se um acréscimo de até 10% na pressão vertical atuante no fundo do silo e de até 16% na pressão horizontal atuante na parede na fase de descarregamento. Observa-se, também, que a região crítica sujeita a sobrepressões na parede se situa entre as células 8 e 9 e corresponde, aproximadamente, ao terço inferior da parede.

Considerando que a célula CP12 foi a que apresentou, em média, a maior sobrepressão e que, geometricamente, ficou situada entre as células CP8 e CP9, pode-se supor que a efetiva transição do fluxo de funil desenvolvido ficou a uma altura de 2,30m, aproximadamente, do fundo, correspondendo a um ângulo $\alpha_s \cong 60^\circ$ (figura 77), o que confirma os resultados obtidos por BENINK (1989), e não os propostos por JENIKE (1969).

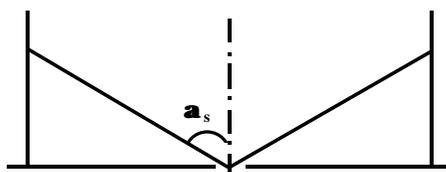


FIGURA 77 – Ângulo de inclinação do funil desenvolvido no descarregamento – silo protótipo

5.3.1.2 Análise e discussão das pressões verticais obtidas experimentalmente no fundo do silo

A tabela 42 apresenta os valores médios das pressões verticais no fundo do silo obtidos experimentalmente, após o armazenamento e, a figura 78 apresenta os valores teóricos e os experimentais, para as pressões verticais no fundo do silo.

TABELA 42 – Pressões verticais obtidas experimentalmente no fundo do silo protótipo

Pressão vertical kPa	Célula					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
	42,36	63,87	34,15	38,57	54,38	38,57

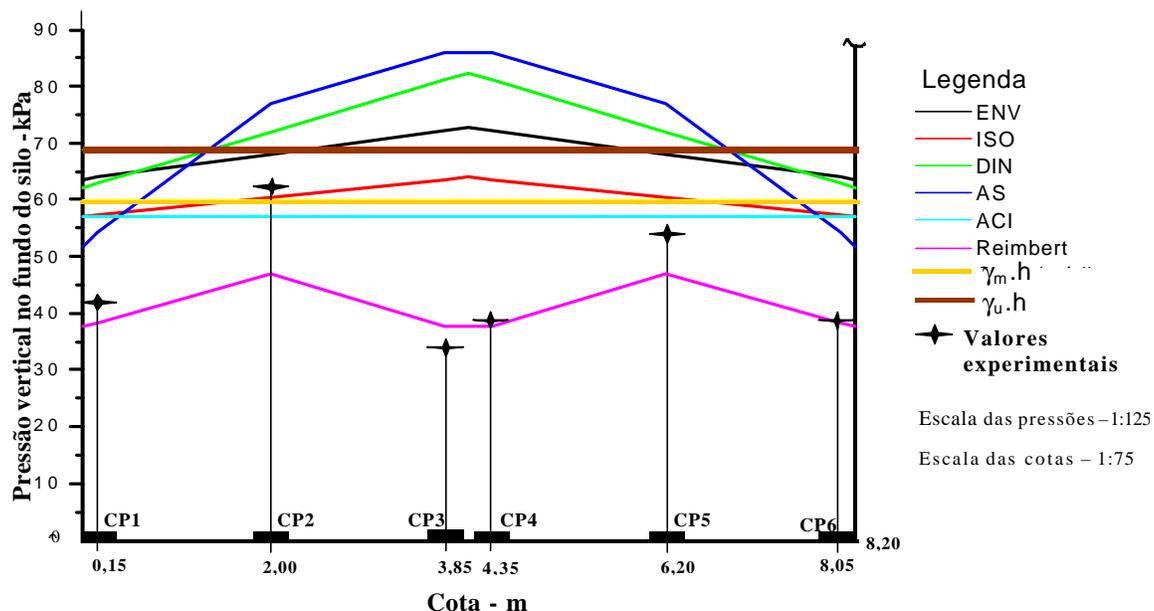


FIGURA 78 – Pressões verticais teóricas e experimentais para o silo protótipo Carregamento

Os valores obtidos experimentalmente para as pressões verticais no fundo do silo tiveram, aparentemente, uma conformação parecida com o que M & A Reimbert indicam, onde as maiores pressões ocorrem aproximadamente nos pontos quartos da base e não no centro, como prevê a maioria das normas, para o presente caso analisado. No entanto, pela proposição de M & A Reimbert, a pressão nos pontos quartos é maior 1,25 vezes que a pressão no centro, enquanto os valores experimentais nos pontos quartos foram em média 1,60 vezes maiores que os obtidos no centro.

As baixas pressões obtidas experimentalmente no centro do silo (CP3 e CP4), quando comparadas aos valores obtidos nos pontos quartos (CP2 e CP5), podem ser justificadas pelo posicionamento em que as mesmas ficaram. Nos dois ensaios realizados, as células CP3 e CP4 ficaram posicionadas sobre a tela metálica relativamente flexível que cobria o túnel de descarga. JARRET et al (1995) constataram que os resultados obtidos com a utilização de células de pressão em parede flexível foram bem menores que os previstos pelos modelos teóricos. Considerando esse fato e em função dos resultados obtidos nos 12 ensaios realizados com o silo piloto, não serão levados em conta os resultados experimentais registrados pelas células CP3 e CP4, para efeito de análise

comparativa com os modelos teóricos. Levando-se em conta somente os resultados experimentais obtidos com as células CP1, CP2, CP5, CP6, observa-se, no gráfico da figura 78, que os modelos que melhor estimaram as pressões verticais na base do silo para efeito de projeto foram os da norma australiana AS, da norma alemã DIN, da norma européia ENV e o modelo $\gamma_u \cdot h$. A tabela 43 apresenta a diferença percentual entre a média dos valores das pressões verticais obtidos experimentalmente junto à parede (CP1, CP6) e nos pontos quartos (CP2, CP5) e os valores teóricos.

TABELA 43 – Diferença percentual entre os valores das pressões verticais obtidos experimentalmente e os modelos teóricos – Silo protótipo

Células								
	ENV	ISO	DIN	AS	ACI	$\gamma_m \cdot h$	$\gamma_u \cdot h$	Reimbert
CP1-CP6	+58	+42	+55	+34	+41	+48	+70	-6
CP2-CP5	+15	+2	+21	+30	-3	-1	+17	-26

5.3.2 Silo piloto

A figura 79 apresenta o posicionamento das células de pressão no fundo do silo e a figura 80, esquematicamente, o posicionamento das células de pressão em cada relação h/d instrumentada. A tabela 44 apresenta os valores obtidos com as células de pressão para as pressões no fundo do silo e nas paredes, após o período de repouso, em cada um dos ensaios realizados e para cada relação ensaiada. Nos ensaios 1 e 2 da relação $h/d=0,98$, a célula de pressão CP7 foi posicionada conforme a figura 55 e, nos demais ensaios e de todas as outras relações, ela foi posicionada conforme a figura 80, de modo a obter-se a pressão horizontal o mais próximo possível do fundo. Nos ensaios 3 e 4 das relações h/d 1,25 e 1,49, as células de pressão CP2 e CP5 foram posicionadas no nível das células CP9 e CP10, respectivamente, para medição da pressão vertical nesse mesmo nível.

Analogamente ao silo protótipo, todas as células de pressão, sem exceção, registraram aumento de pressão durante o período de repouso. Em média, nas três relações h/d ensaiadas, houve um aumento de 15% nas células do fundo e de 25% nas células da parede. Observou-se, também, para as células do fundo do silo que os valores medidos pelas células simétricas variaram durante as fases de carregamento e descarregamento, mas não tão acentuadamente como no silo protótipo.

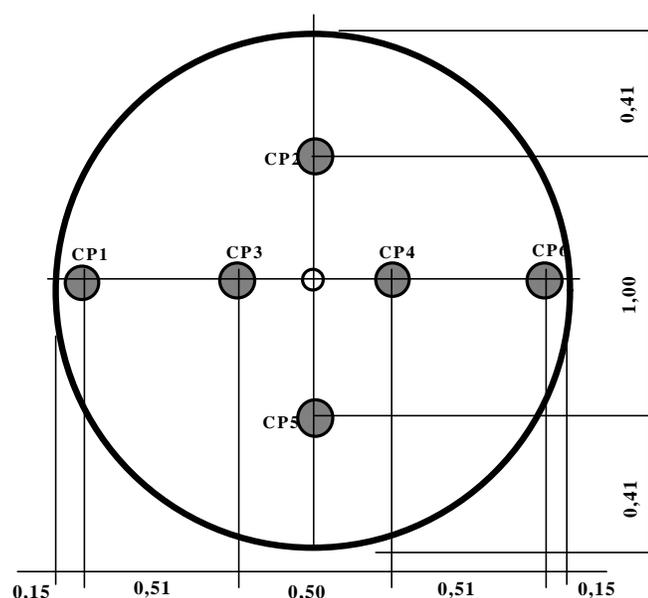


FIGURA 79 – Posicionamento das células de pressão no fundo do silo piloto

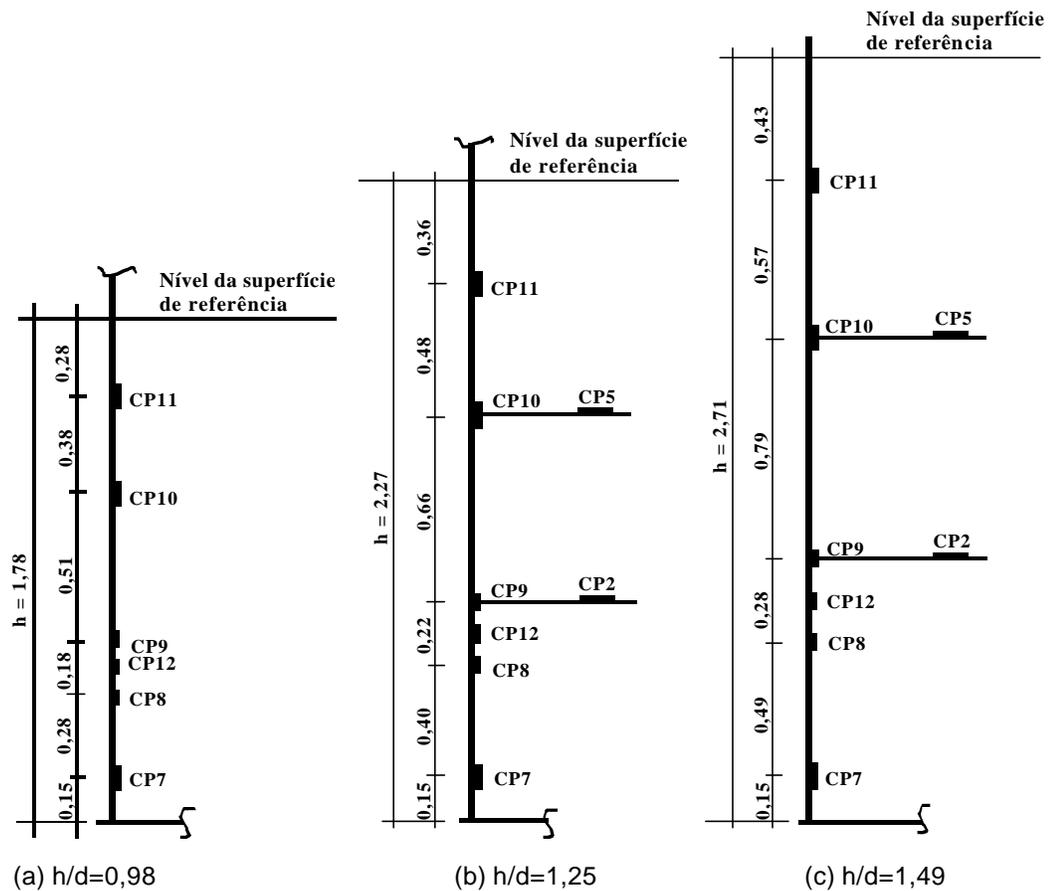


FIGURA 80– Posicionamento das células de pressão na parede em cada relação h/d no silo piloto

TABELA 44 – Pressões verticais e horizontais obtidas experimentalmente com o silo piloto em cada relação h/d ensaiada - Carregamento (kPa)

Célula		Relação h/d											
		0,98				1,25				1,49			
		Ensaio				Ensaio				Ensaio			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
CP1	p_v	21,50	21,50	22,76	22,76	26,56	26,56	27,80	27,80	32,88	32,88	32,88	34,15
CP2	p_v	22,76	22,76	24,03	24,03	27,80	29,07	22,76	22,76	35,42	35,42	22,76	24,03
CP3	p_v	25,29	26,56	26,56	26,56	32,88	32,88	32,88	32,88	37,97	37,97	39,20	39,20
CP4	p_v	25,29	25,29	26,56	26,56	31,62	32,88	32,88	32,88	39,20	39,20	39,20	40,47
CP5	p_v	21,50	22,76	22,76	24,03	29,07	29,07	13,91	13,91	35,42	36,67	15,17	16,44
CP6	p_v	20,23	21,50	22,76	22,76	27,80	27,80	29,07	30,35	32,88	32,88	32,88	34,15
CP7	p_h	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	12,66	12,66	12,66	12,66	13,91	13,91	13,91
CP8	p_h	8,85	8,85	8,85	10,12	10,12	10,12	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38
CP12	p_h	8,85	8,85	8,85	8,85	10,12	10,12	10,12	11,38	10,12	11,38	11,38	11,38
CP9	p_h	7,55	7,55	8,85	8,85	8,85	10,12	10,12	10,12	10,12	10,12	10,12	11,38
CP10	p_h	5,06	5,06	5,06	5,06	5,06	5,06	6,29	6,29	6,29	6,29	7,55	7,55
CP11	p_h	1,27	1,27	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	3,78	3,78	3,78	3,78	3,78

Os valores que estão em azul e em vermelho na tabela 44 são os valores das pressões verticais e horizontais que serão tomados (azul com azul e vermelho com vermelho) para a determinação experimental da relação entre a pressão horizontal e a vertical, K, o que será visto mais adiante.

A tabela 45 apresenta os valores médios das pressões obtidas experimentalmente na parede e no fundo do silo, nos 4 ensaios realizados em cada uma das relações h/d.

TABELA 45 – Valores médios das pressões obtidas experimentalmente na parede (P) e no fundo (F) em cada relação h/d ensaiada no silo piloto – Carregamento (kPa)

Célula		Relação h/d		
		0,98	1,25	1,49
CP1	F	22,13	27,18	33,20
CP2	F	23,40	28,43	35,42
CP3	F	24,98	32,88	38,58
CP4	F	25,29	32,56	39,52
CP5	F	22,76	29,07	36,04
CP6	F	21,81	28,75	33,20
CP7	P	11,38	12,33	13,60
CP8	P	9,17	10,75	11,38
CP12	P	8,85	10,44	11,06
CP9	P	8,20	9,80	10,44
CP10	P	5,06	5,98	6,96
CP11	P	1,90	2,84	3,78

Na fase de descarregamento dos ensaios das relações h/d=1,25 e h/d=1,49, observou-se a ocorrência de sobrepressões na parede do silo, o mesmo não acontecendo nos ensaios da relação h/d=0,98. Em nenhum dos ensaios se observou a ocorrência de sobrepressões na base do silo. A tabela 46 apresenta os valores registrados pelas células de pressão na situação de carregamento (C) e descarregamento (D), em cada um dos ensaios realizados.

TABELA 46 – Pressões obtidas experimentalmente: Carregamento (C) e Descarregamento (D)

Pressão horizontal kPa		Silo piloto											
		h/d=1,25						h/d=1,49					
		Célula						Célula					
		CP7	CP8	CP12	CP9	CP10	CP11	CP7	CP8	CP12	CP9	CP10	CP11
Ensaio 1	C	11,38	10,12	10,12	8,85	5,06	2,53	12,66	11,38	10,12	10,12	6,29	3,78
	D	11,38	11,38	10,12	8,85	5,06	2,53	12,66	11,38	10,12	10,12	6,29	3,78
Ensaio 2	C	12,66	10,12	10,12	10,12	5,06	2,53	13,91	11,38	11,38	10,12	6,29	3,78
	D	12,66	11,38	10,12	10,12	5,06	2,53	13,91	11,38	12,66	10,12	6,29	3,78
Ensaio 3	C	12,66	11,38	10,12	10,12	6,29	2,53	13,91	11,38	11,38	10,12	7,55	3,78
	D	12,66	12,66	10,12	10,12	6,29	2,53	13,91	11,38	12,66	10,12	7,55	3,78
Ensaio 4	C	12,66	11,38	11,38	10,12	6,29	3,78	13,91	11,38	11,38	11,38	7,55	3,78
	D	12,66	12,66	12,66	10,12	6,29	3,78	13,91	12,66	12,66	11,38	7,55	3,78

Na tabela 46, pode-se observar que, tanto na relação $h/d=1,25$ como na relação $h/d=1,49$, somente as células CP8 e CP12 registraram sobrepressões na fase de descarregamento. Em ambas as relações, o percentual relativo à sobrepressão foi de aproximadamente 12% na CP8 e de 11% na CP12. Dos dados da tabela 46, observa-se que na relação $h/d=1,25$, a célula CP8 foi a que apresentou sobrepressões nos 4 ensaios realizados, enquanto a célula CP12 apresentou sobrepressão em apenas 1 dos 4 ensaios. Dessa observação, pode-se supor que a efetiva transição do fluxo de funil desenvolvido na relação $h/d=1,25$ ficou a uma altura de 0,55m aproximadamente do fundo, correspondendo a um ângulo $\alpha_s \cong 59^\circ$ (figura 81), o que confirma, mais uma vez, os resultados obtidos por BENINK (1989). Na relação $h/d=1,49$, ocorreu o contrário, a célula CP12 registrou mais vezes sobrepressões que a CP8 que registrou sobrepressão somente uma vez. Considerando que, nessa relação, a posição da efetiva transição seja próxima a CP12, o ângulo α_s corresponderá a aproximadamente 49° . Benink (1989) observou, em sua tese de doutorado, que o ângulo de inclinação do funil formado durante o fluxo de funil pode variar em até 10° , durante o descarregamento.

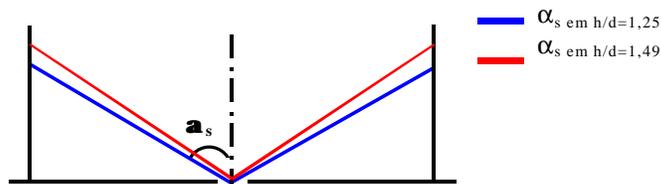


FIGURA 81 – Ângulo de inclinação do funil desenvolvido no descarregamento – Silo piloto

5.3.2.1 Análise e discussão das pressões horizontais obtidas experimentalmente

As figuras 82, 83 e 84 apresentam, graficamente, os valores experimentais e teóricos das pressões horizontais para $h/d=0,98$, $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$ respectivamente, na situação de carregamento.

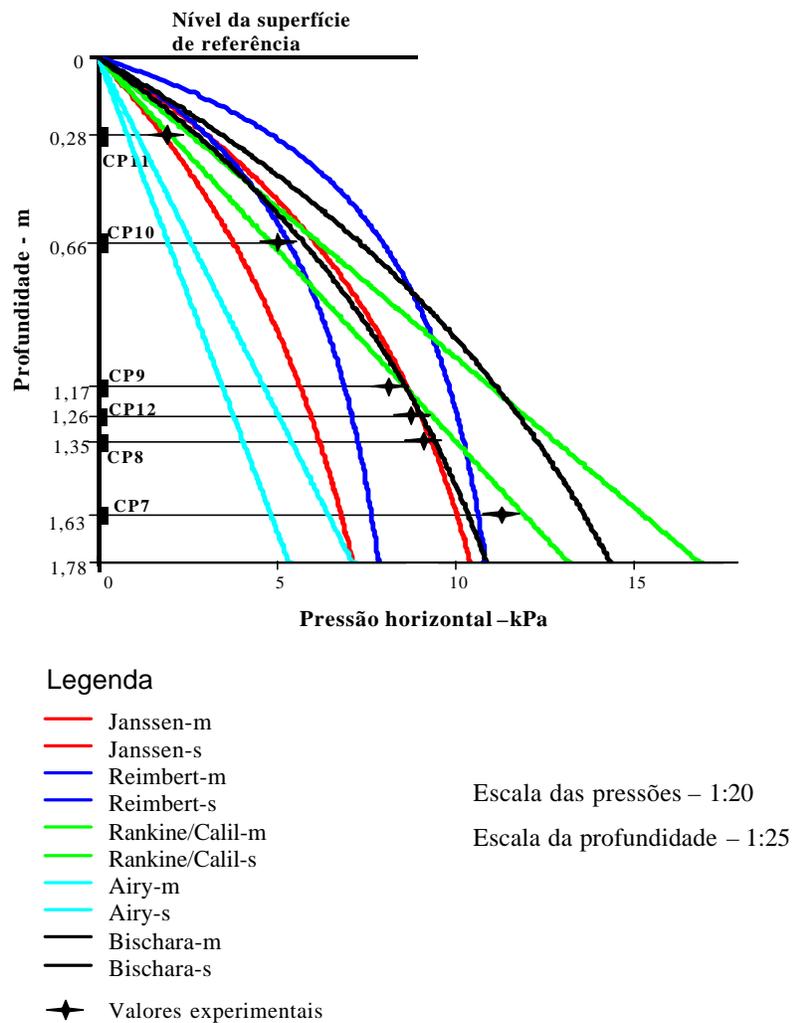
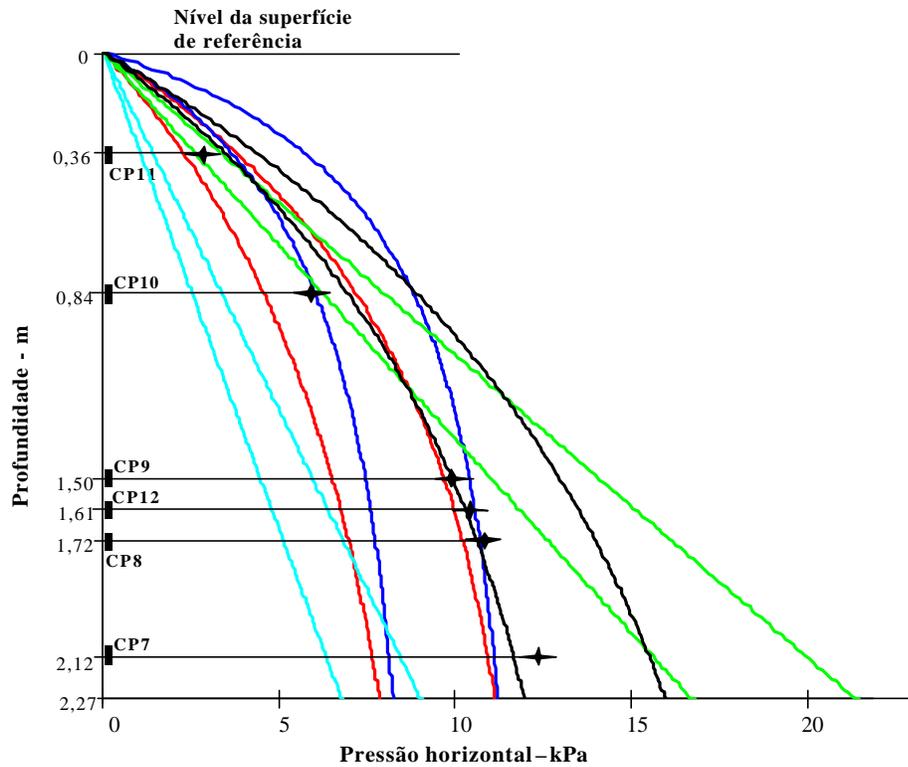


FIGURA 82– Pressões horizontais teóricas e experimentais - $h/d=0,98$ - Carregamento



Legenda

- Janssen-m
- Janssen-s
- Reimbert-m
- Reimbert-s
- Rankine/Calil-m
- Rankine/Calil-s
- Airy-m
- Airy-s
- Bischara-m
- Bischara-s
- ◆ Valores experimentais

Escala das pressões – 1:20

Escala da profundidade – 1:25

FIGURA 83– Pressões horizontais teóricas e experimentais - $h/d=1,25$ - Carregamento

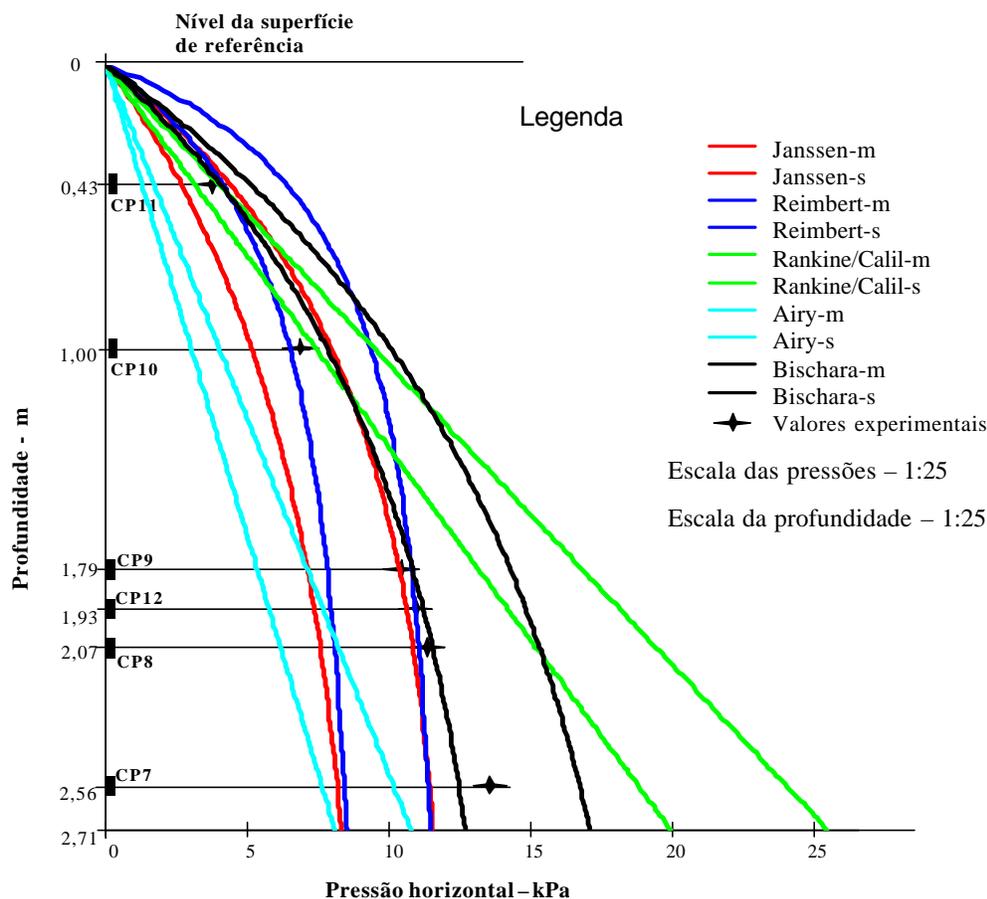


FIGURA 84– Pressões horizontais teóricas e experimentais - $h/d=1,49$ - Carregamento

A partir dos gráficos das figuras 82, 83 e 84, pode-se observar que os modelos de Airy, Janssen e M & R Reimbert não se mostraram adequados aos valores obtidos experimentalmente para as pressões horizontais na parede do silo, na região correspondente, aproximadamente, ao último terço da altura (CP7, CP8, CP12, CP9). Os valores obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil se afastam muito dos valores experimentais, à medida que aumentou a relação h/d . Considerando as curvas para relação h/d ensaiada, obtida com os valores médios das propriedades da areia, valores esses que possuíam no momento do ensaio, o modelo de Bischara mostrou-se bastante ajustado aos valores experimentais. Na relação $h/d=0,98$ (figura 82), analogamente ao ensaio com o silo protótipo, o modelo de Rankine-Calil mostrou-se bastante adequado para a previsão teórica das pressões para relações $h/d < 1$. Observa-se, também, um certo comportamento

curvilíneo dos valores experimentais nas relações $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$, mas não assintótico em relação ao eixo da profundidade.

As tabelas 47, 48 e 49 apresentam a diferença percentual entre os valores das pressões horizontais na parede obtidos com o modelo de Rankine-Calil e de Bischara, nas duas hipóteses analisadas, e os obtidos experimentalmente para $h/d=0,98$, $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$ respectivamente, tendo em vista que foram os que mais se mostraram adequados para o cálculo teórico das pressões, em função dos resultados experimentais obtidos.

TABELA 47 – Diferença percentual entre os valores obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil e Bischara e os obtidos experimentalmente – $h/d=0,98$

Modelo	Célula de pressão											
	CP7		CP8		CP12		CP9		CP10		CP11	
Rankine Calil	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s
Rankine Calil	+5,2	+34,5	+8,2	+38,3	+4,6	+33,8	+4,9	+34,0	-4,3	+22,5	+8,4	+38,4
Bischara	-10,0	+19,3	+2,0	+32,8	+1,5	+31,9	+4,6	+35,7	+13,8	+45,0	+47,4	+85,3

TABELA 48 – Diferença percentual entre os valores obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil e Bischara e os obtidos experimentalmente – $h/d=1,25$

Modelo	Célula de pressão											
	CP7		CP8		CP12		CP9		CP10		CP11	
Rankine Calil	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s
Rankine Calil	+26,3	+61,6	+17,6	+50,3	+13,3	+44,8	+12,4	+43,8	+3,2	+31,9	-7,6	+19,0
Bischara	-6,0	+25,5	-1,3	+30,0	-1,6	+29,2	+1,0	+32,3	+15,2	+47,6	+23,2	+55,2

TABELA 49 – Diferença percentual entre os valores obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil e Bischara e os obtidos experimentalmente – $h/d=1,49$

Modelo	Célula de pressão											
	CP7		CP8		CP12		CP9		CP10		CP11	
Rankine Calil	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s
Rankine Calil	+38,3	+76,8	+33,7	+70,9	+28,2	+63,9	+26,0	+61,1	+5,6	+34,9	-20,7	+6,9
Bischara	-9,2	+22,9	+1,2	+34,5	+1,2	+34,0	+3,6	+40,5	+11,5	+43,8	+6,9	+36,0

m – pressões obtidas com os valores médios das propriedades físicas do milho

s – pressões obtidas com a combinação mais desfavorável das propriedades físicas do milho

Em relação à tabela 47 pode -se observar que a diferença entre os valores obtidos experimentalmente e os obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil com os valores médios das propriedades dos produtos, variaram entre -4,3% e +8,4%. Em relação ao modelo de Bishara essa variação foi de -10% e +47,4%. Em relação

aos valores do limite superior, a diferença entre os valores obtidos experimentalmente e os valores do modelo linear de Rankine-Calil variaram entre +22,5% e +38,4%. Em relação ao modelo de Bishara, essa variação foi de +19,3% e +85,3%.

Em relação à tabela 48 pode-se observar que a diferença entre os valores obtidos experimentalmente e os obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil com os valores médios das propriedades dos produtos, variaram entre -7,6% e +26,3%. Em relação ao modelo de Bishara essa variação foi de -6,0% e +23,2%. Em relação aos valores do limite superior, a diferença entre os valores obtidos experimentalmente e os valores do modelo linear de Rankine-Calil variaram entre +19,0% e +61,3%. Em relação ao modelo de Bishara, essa variação foi de +25,5% e +55,2%.

Em relação à tabela 49 pode-se observar que a diferença entre os valores obtidos experimentalmente e os obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil com os valores médios das propriedades dos produtos, variaram entre -20,7% e +38,3%. Em relação ao modelo de Bishara essa variação foi de -9,2% e +11,5%. Em relação aos valores do limite superior, a diferença entre os valores obtidos experimentalmente e os valores do modelo linear de Rankine-Calil variaram entre +6,9% e +76,8%. Em relação ao modelo de Bishara, essa variação foi de +22,9% e +43,8%.

Observa-se, no gráfico das figuras 82 a 84 e das tabela 47 a 49, que a formulação de Rankine-Calil, comparativamente à formulação de Bischara, apresenta valores menores na região superior e maiores na região inferior.

Os gráficos das figuras 85 a 87 apresentam ajustes estatísticos realizados com os valores das pressões horizontais na parede obtidas experimentalmente para cada uma das relações h/d ensaiadas, de modo a obter-se dados comparativos com os modelos de Rankine-Calil e de Bischara, tendo em vista que, em função dos resultados experimentais, esses modelos foram os que se mostraram mais adequados para a previsão das pressões comparativamente aos outros modelos.

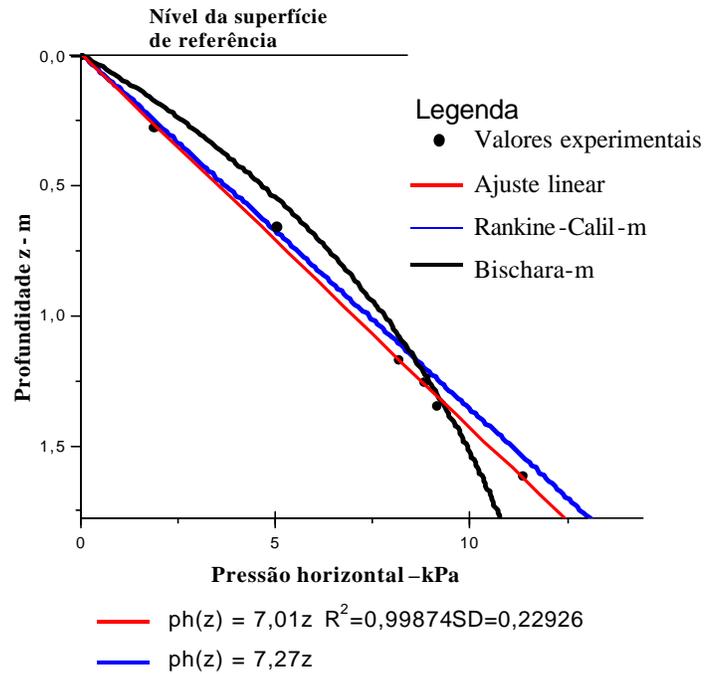


FIGURA 85 – Ajuste linear x Modelos Rankine-Calil e Bischara - h/d=0,98

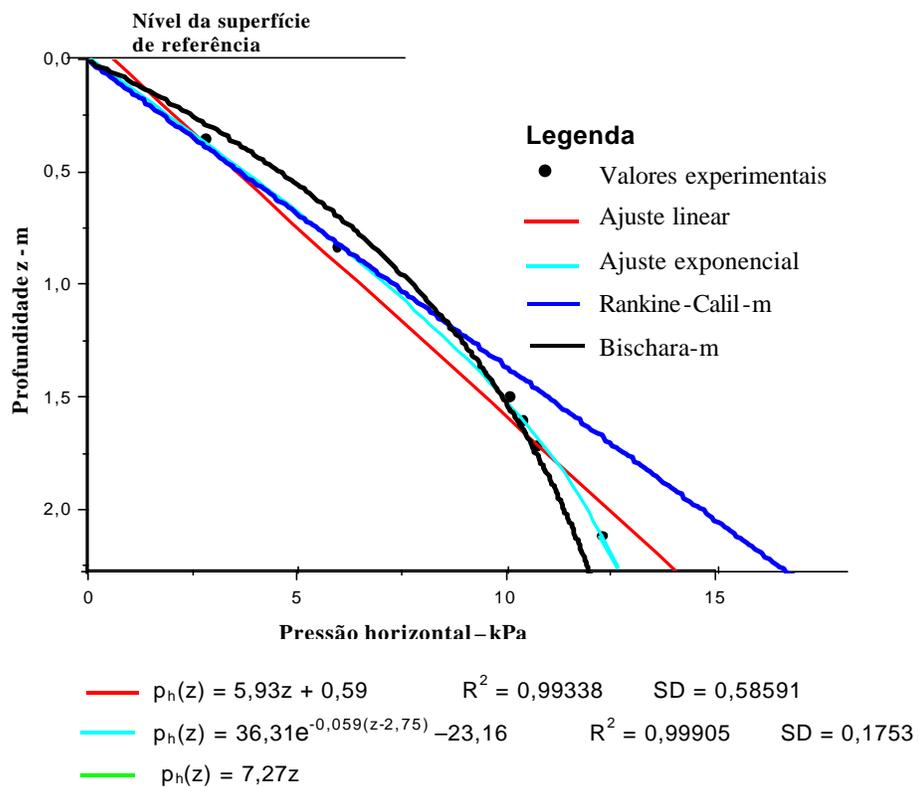


Figura 86 – Ajustes Estatísticos x Modelos Rankine-Calil e Bischara – h/d=1,25

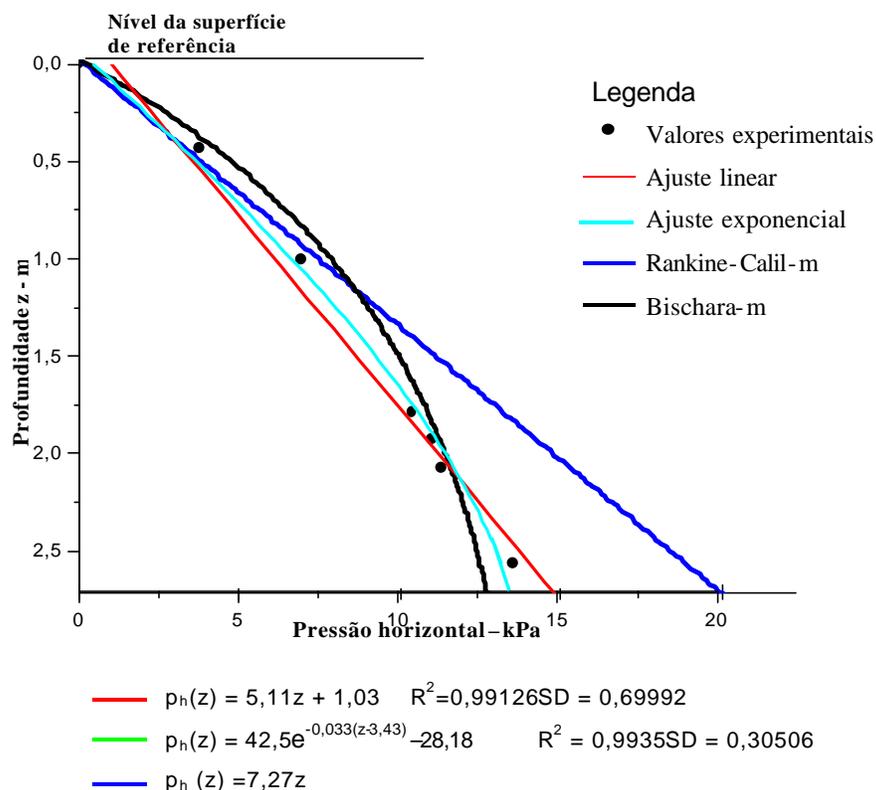


FIGURA 87– Ajustes estatísticos x Modelos Rankine-Calil e Bischara– $h/d=1,49$

No gráfico da figura 85, pode-se observar que o ajuste linear obtido com os valores experimentais das pressões horizontais na parede do silo, para a relação $h/d=0,98$, apresentou uma boa correlação, indicando que, para essa relação, um modelo linear como o de Rankine-Calil pode ser adotado para a previsão das pressões horizontais na parede do silo. A diferença percentual entre os valores obtidos com a regressão linear e o modelo de Rankine-Calil, nesse caso, é de -3,7%.

Nos gráficos das figuras 86 e 87, relativos a $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$ respectivamente, observa-se que o ajuste linear obtido com os valores experimentais não apresentou o mesmo grau de correlação, como na relação $h/d=0,98$. O modelo linear como o de Rankine-Calil poderia ser ainda adotado, mas seria um modelo um tanto conservador em relação às pressões horizontais correspondentes ao último terço da altura do silo. O ajuste exponencial apresentou uma boa correlação e indicou um comportamento levemente curvilíneo das pressões horizontais na parede para $h/d>1$, semelhante ao modelo de Janssen e Bischara, talvez, já pelo efeito do atrito do produto com a parede.

A análise da forma obtida com o ajuste exponencial para os casos de $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$, do modelo de Bischara e de Janssen, permitiu a obtenção de uma formulação empírica para a previsão das pressões horizontais na parede, como a seguir:

$$p_h(z) = \frac{d}{2\mu} \gamma \left(1 - e^{-\frac{z}{d}} \right) \cos \phi_i \quad (113)$$

Adotando-se os valores de K , μ , γ e ϕ_i de modo a obter-se a combinação mais desfavorável das propriedades físicas da areia (limite superior) e a menos desfavorável (limite inferior), tendo em vista a tendência mundial de dimensionamento das estruturas pelo método dos estados limites, os gráficos das figuras 88 e 89 apresentam a formulação empírica da equação (113), o modelo linear de Rankine-Calil, o modelo de Bischara e os valores experimentais para as relações $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$ respectivamente.

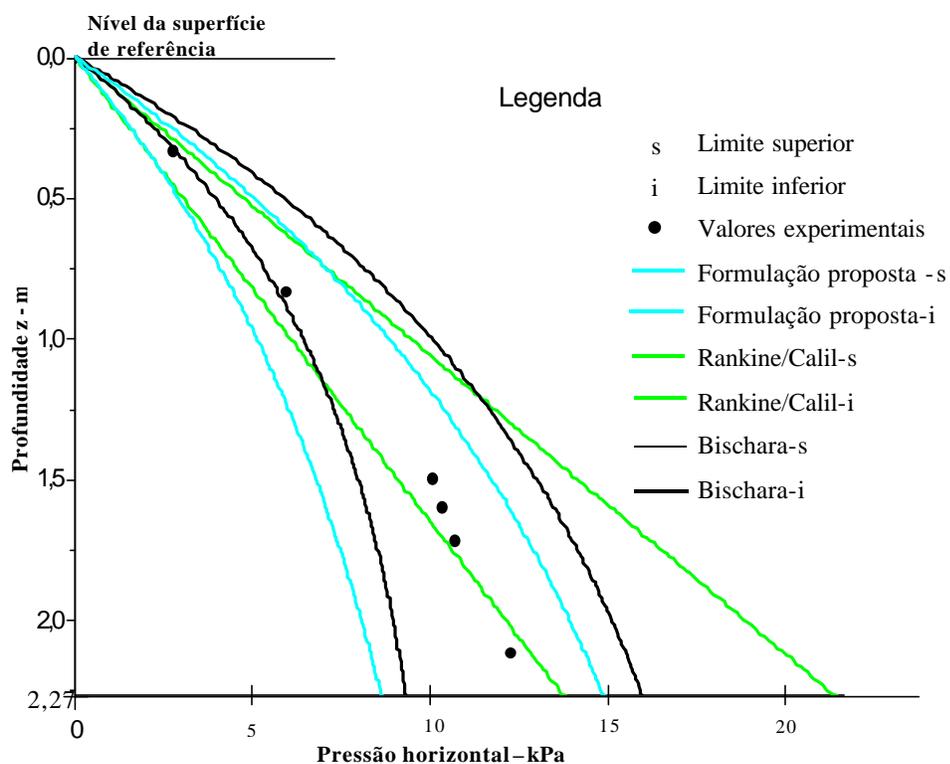


FIGURA 88– Formulação proposta x Modelos Rankine-Calil e Bischara– $h/d=1,25$

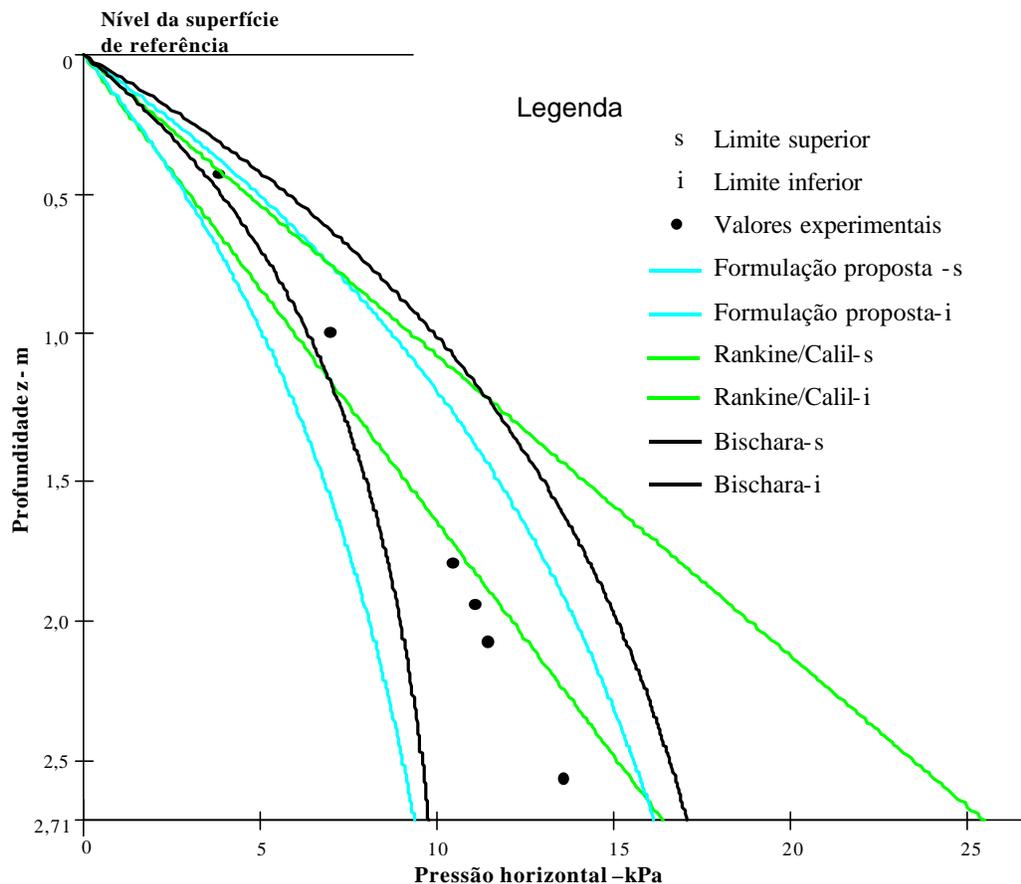


Figura 89 – Formulação proposta x Modelos Rankine-Calil e Bischara – $h/d=1,49$

Nos gráficos das figuras 88 e 89, pode-se observar que a formulação empírica proposta se mostrou mais adequada aos valores obtidos experimentalmente que o modelo linear de Rankine-Calil, mesmo em relação ao modelo de Bischara, principalmente em relação à curva obtida com os limites inferiores das propriedades dos produtos. A tabela 50 apresenta a diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente e o modelo empírico proposto, bem como os modelos de Rankine-Calil (R-C) e Bischara, em cada uma das hipóteses analisadas nas relações $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$.

TABELA 50 – Diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente para a pressão horizontal e os obtidos com o modelo linear de Rankine-Calil (R-C), Bischara e o modelo proposto com $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$

Modelo	Célula de pressão											
	CP7		CP8		CP12		CP9		CP10		CP11	
	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s
R-C	+3,9	+61,6	-3,5	+50,3	-7,2	+44,8	-8,2	+43,8	-17,7	+31,9	-30,3	+19,0
Bischara	-35,2	+25,5	-27,2	+30,0	-27,0	+29,2	-23,1	+32,3	-4,4	+47,6	+5,6	+55,2
Proposto	-48,4	+16,2	-45,7	+18,4	-47,2	+17,2	-44,5	+19,3	-34,4	+28,8	-30,9	+31,7
R-C	+13,8	+76,8	+9,9	+70,9	+5,4	+63,9	+3,6	+61,1	-15,2	+34,9	-45,4	+6,9
Bischara	-41,3	+22,9	-25,7	+34,5	-25,2	+34,0	-21,5	+40,5	-8,8	+43,8	-8,6	+36,0
Proposto	-49,1	+15,6	-38,7	+24,3	-40,2	+23,0	-38,1	+24,9	-36,5	+26,4	-48,8	+15,9

i – pressões obtidas com os limites inferiores das propriedades físicas da areia

s – pressões obtidas com os limites superiores das propriedades físicas da areia

— $h/d=1,25$

— $h/d=1,49$

A fim de se obter uma comparação entre as principais fórmulas para a previsão das pressões horizontais nas paredes dos silos e o modelo empírico proposto, os gráficos das figuras 90, 91, 92 e 93 apresentam as pressões horizontais em duas hipóteses: com a combinação mais desfavorável das propriedades físicas do produto (limite superior) e com a combinação menos desfavorável (limite inferior), para o silo protótipo e para as três relações h/d ensaiadas com o silo piloto e os valores experimentais obtidos, respectivamente. A formulação de Airy não foi incluída, tendo em vista os baixos valores obtidos quando comparados aos experimentais, como já foi dito anteriormente.

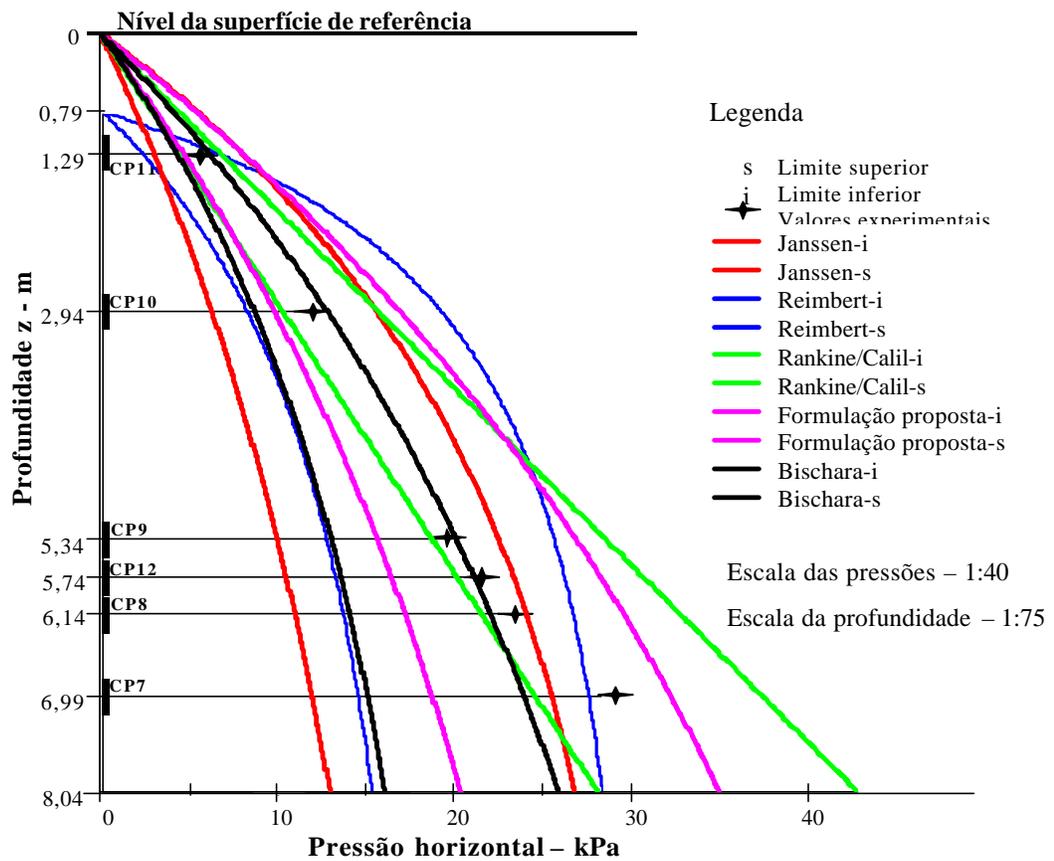


FIGURA 90 – Formulação proposta x pressões horizontais teóricas e experimentais para o silo protótipo- $h/d=0,98$

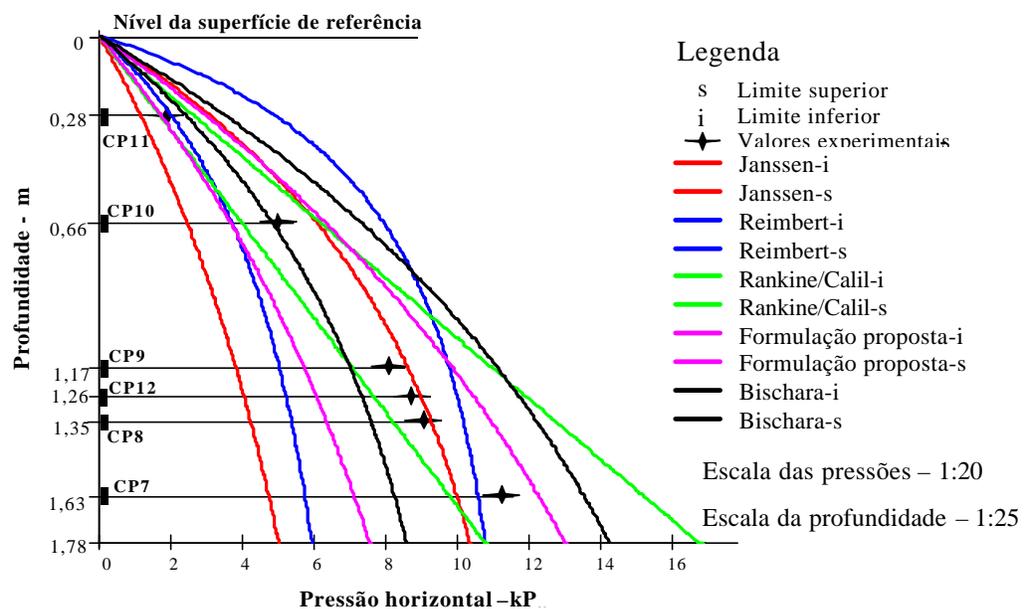


FIGURA 91 – Formulação proposta x pressões horizontais teóricas e experimentais para o silo piloto - $h/d=0,98$

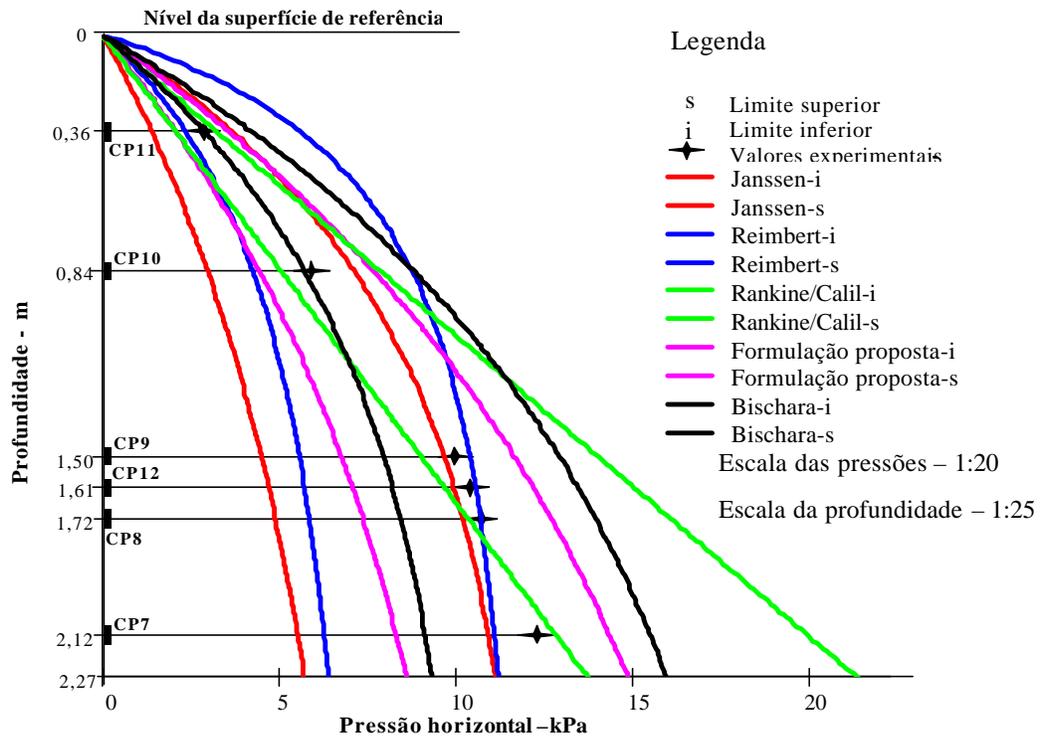


FIGURA 92– Formulação proposta x pressões horizontais teóricas e experimentais para o silo piloto - $h/d=1,25$

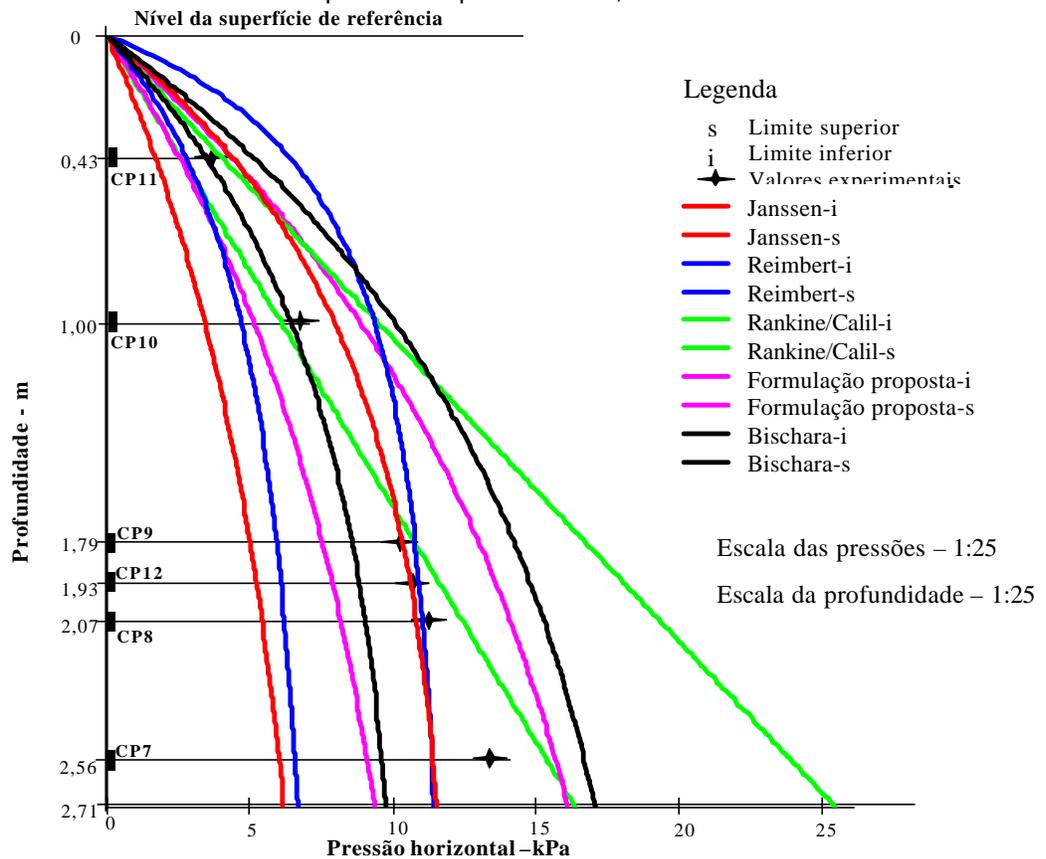


FIGURA 93– Formulação proposta x pressões horizontais teóricas e experimentais para o silo piloto - $h/d=1,49$

Considerando que as curvas constantes nos gráficos das figuras 90 a 93 foram obtidas com as propriedades do produto armazenado, de modo a propiciar a combinação mais desfavorável e a menos desfavorável em cada formulação, a formulação empírica proposta foi testada a fim de verificar o seu comportamento em relações $h/d < 1$, bem como propriedades físicas, diferentes da areia, comparativamente aos outros modelos. Observa-se que o modelo proposto teve um melhor desempenho que os modelos de Janssen e M & A Reimbert, em relação aos valores das pressões horizontais obtidas experimentalmente e que, comparativamente ao modelo de Bischara, o modelo proposto teve um desempenho muito melhor, não apresentando uma alta sensibilidade à mudança do tipo de produto armazenado, ou seja, à mudança nas propriedades físicas do produto para uma mesma relação h/d , como apresentou o modelo de Bischara. O modelo linear de Rankine-Calil mostrou-se o mais adequado para a previsão das pressões horizontais nas paredes de silos com $h/d \leq 1$, comparativamente ao modelo empírico proposto e, conseqüentemente, em relação demais modelos, principalmente em relação à curva limite superior.

Em relação aos gráficos das figuras 92 e 93, observa-se que os modelos de Janssen e M & R Reimbert não são adequados para a previsão das pressões horizontais no último terço da altura, tendo em vista os valores obtidos experimentalmente. O modelo linear de Rankine-Calil apresenta-se conservador em relação ao limite superior e, ao contrário, em relação ao limite inferior. Em relação aos cinco modelos analisados, o modelo empírico proposto mostrou-se o mais adequado em relação ao conjunto dos valores obtidos experimentalmente, tanto na relação $h/d=1,25$, quanto na relação $h/d=1,49$.

As tabelas 51, 52, 53 e 54 apresentam a diferença percentual entre os valores das pressões horizontais na parede obtidos experimentalmente e os modelos analisados, de modo a obter-se dados comparativos em cada uma das hipóteses analisadas para as relações $h/d=0,98$, no silo protótipo, e para cada uma das relações ensaiadas com o silo piloto.

TABELA 51 – Diferença percentual entre os valores das pressões horizontais obtidas teoricamente e as obtidas experimentalmente – Silo protótipo - $h/d=0,98$

Modelo		Profundidade (m)					
		1,29	2,94	5,34	5,74	6,14	6,99
Rankine Calil	s	+20	+30	+45	+41	+39	+28
	i	-26	-17	-5	-7	-9	-19
Janssen	s	+42	+29	+14	+8	+2	-14
	i	-87	-91	-97	-105	-114	-144
Reimbert	s	+28	+61	+31	+22	+14	-5
	i	-121	-44	-53	-62	-71	-100
Bischara	s	+9	+6	+2	-2	-7	-22
	i	-29	-39	-27	-59	-67	-93
Modelo proposto		+42	+29	+36	+31	+26	+10
		-12	-23	-26	-31	-36	-56

TABELA 52 – Diferença percentual entre os valores das pressões horizontais obtidas teoricamente e as obtidas experimentalmente – Silo piloto - $h/d=0,98$

Modelo		Profundidade (m)					
		0,28	0,66	1,17	1,26	1,35	1,63
Rankine Calil	s	+38	+22	+34	+34	+38	+35
	i	-12	-27	-16	-16	-12	-16
Janssen	s	+62	+20	+5	+1	+1	-14
	i	-65	-106	-115	-120	-118	-140
Reimbert	s	+158	+57	+20	+13	+11	+8
	i	+6	-37	-63	-70	-71	-98
Bischara	s	+85	+45	+36	+32	+33	+19
	i	+27	-4	-17	-21	-21	-40
Modelo proposto	s	+56	+25	+20	+13	+19	+8
	i	-10	-38	-43	-47	-45	-59

Tabela 53 – Diferença percentual entre os valores das pressões horizontais obtidas teoricamente e as obtidas experimentalmente – Silo piloto - $h/d=1,25$

Modelo		Profundidade (m)					
		0,36	0,84	1,50	1,61	1,72	2,12
Rankine Calil	s	+19	+32	+44	+45	+50	+62
	i	-30	-18	-8	-7	-4	+4
Janssen	s	+35	+19	-1	-5	-5	-13
	i	-95	-101	-117	-122	-119	-124
Reimbert	s	+103	+47	+6	+1	-1	-11
	i	-16	-40	-76	-83	-93	-97
Bischara	s	+55	+48	+32	+29	+30	+26
	i	+6	-4	-23	-27	-27	-32
Modelo empírico	s	+32	+29	+19	+17	+18	+16
	i	-31	-34	-44	-47	-46	-48

TABELA 54 – Diferença percentual entre os valores das pressões horizontais obtidas teoricamente e as obtidas experimentalmente – Silo piloto - $h/d=1,49$

Modelo		Profundidade (m)					
		0,43	1,00	1,79	1,93	2,07	2,56
Rankine Calil	s	+7	+35	+61	+64	+71	+77
	i	-45	-15	+4	+5	+10	+14
Janssen	s	+17	+14	-1	-4	-5	-19
	i	-122	-105	-108	-111	-109	-126
Reimbert	s	+69	+34	+3	-1	-3	-20
	i	-36	-49	-76	-82	-83	-107
Bischara	s	+36	+44	+40	+34	+34	+23
	i	-9	-9	-22	-25	-26	-41
Modelo proposto	s	+16	+26	+25	+23	+24	+16
	i	-49	-37	-38	-40	-39	-49

A seguir, será feita uma análise comparativa entre os valores obtidos experimentalmente para as pressões horizontais estáticas, com o silo protótipo e o silo piloto, para as três relações h/d ensaiadas, com base nas normas analisadas no capítulo 3, no modelo de Rankine-Calil e no modelo empírico proposto. As figuras 94, 95, 96 e 97 apresentam as pressões horizontais em duas hipóteses: com a combinação mais desfavorável das propriedades físicas do produto (limite superior) e com a combinação menos desfavorável (limite inferior), para a análise comparativa acima descrita. As normas canadense e francesa não foram incluídas, tendo em vista que não foi possível determinar o valor do limite superior e inferior do parâmetro K com as referidas normas. Para a norma americana foi adotada a formulação de Janssen.

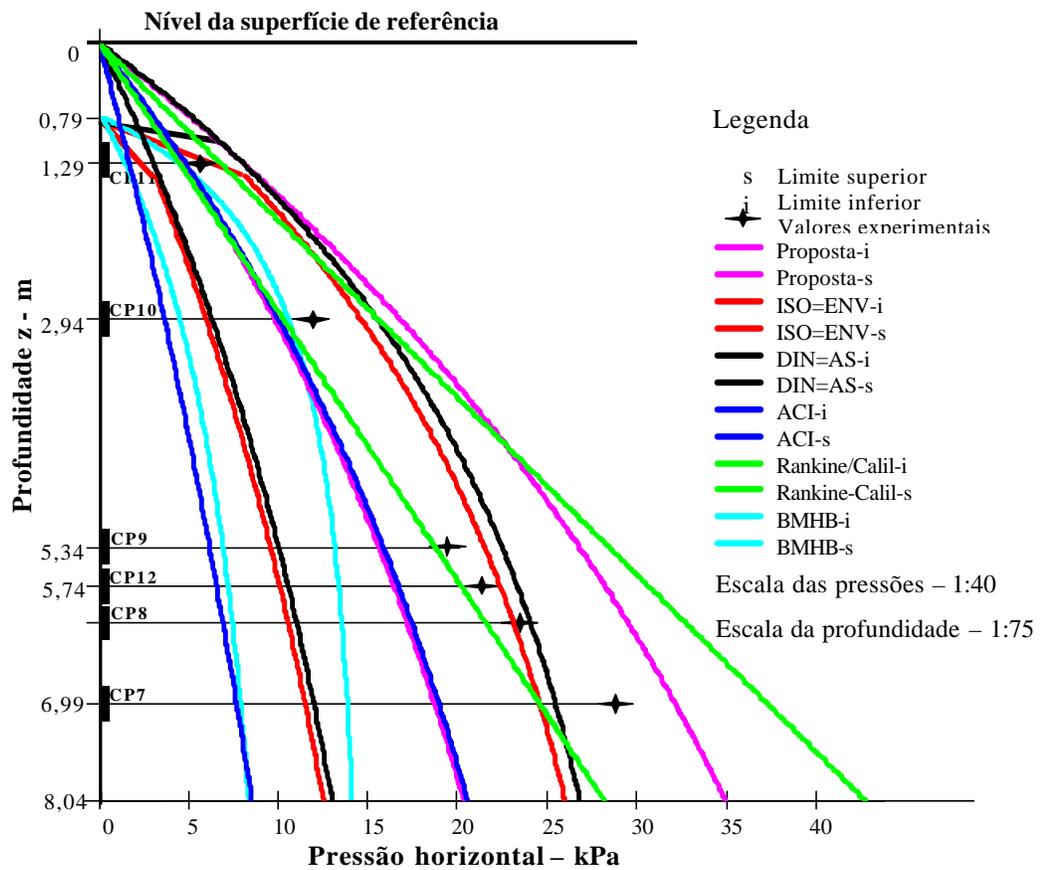


FIGURA 94 – Valores experimentais x Normas, modelo Rankine-Calil e formulação proposta para o silo protótipo - $h/d=0,98$

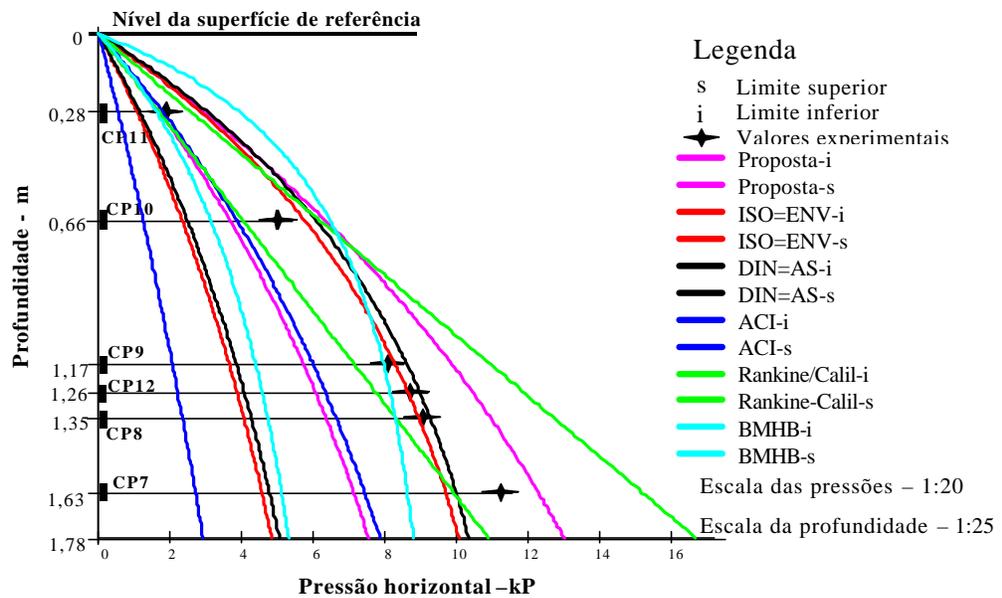


FIGURA 95 – Valores experimentais x Normas, modelo Rankine-Calil e formulação proposta para o silo piloto - $h/d=0,98$

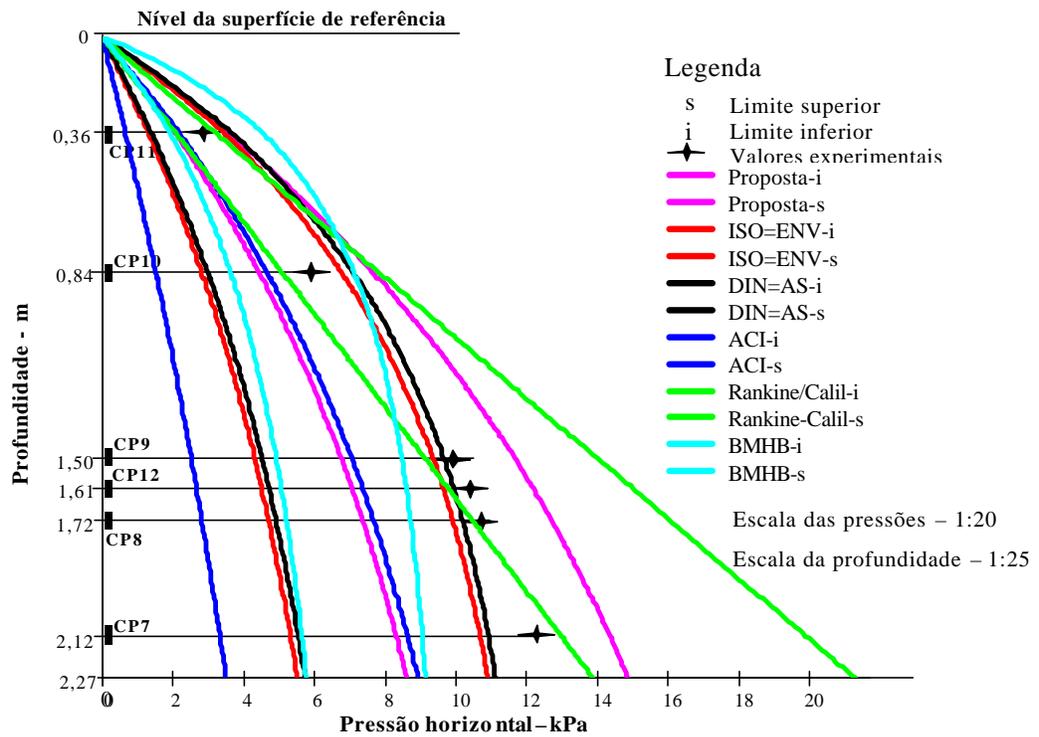


FIGURA 96 – Valores experimentais x Normas, modelo Rankine-Calil e formulação proposta para o silo piloto - $h/d=1,25$

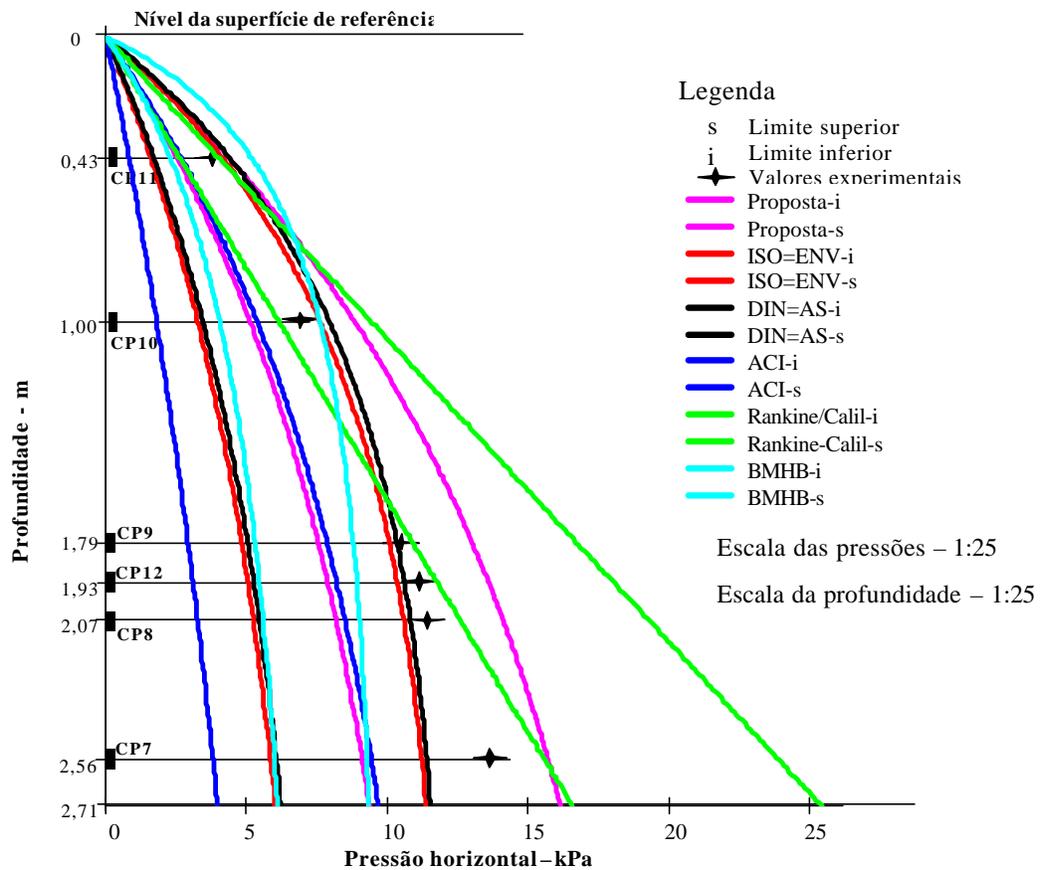


FIGURA 97 – Valores experimentais x Normas, modelo Rankine-Calil e formulação proposta para o silo piloto - $h/d=1,49$

Como foi visto no capítulo 3, com exceção da norma inglesa BMHB, as demais normas constantes dos gráficos 94 a 97 adotam, para a previsão das pressões horizontais, o modelo de Janssen também para silos de baixa relação altura/diâmetro, analogamente para silos altos. Como, neste caso, as propriedades físicas dos produtos foram obtidas experimentalmente, o elemento diferenciador é o parâmetro K , proposto por cada uma das normas. As normas ENV e ISO adotam a mesma formulação para esse parâmetro; as normas DIN e AS, embora adotem fórmulas bastante diferenciadas, obtiveram valores iguais, pelo fato do ângulo de atrito interno do produto, ϕ_i , ser igual ao ângulo de atrito com a parede, ϕ_w . As fórmulas para o parâmetro K , propostas pelas normas ENV-ISO e DIN, diferenciam entre si de 10%, o que levou à pequena diferença verificada nos gráficos das figuras 94 a 97. Os baixos valores apresentados pela norma ACI são causados pelo fato de a mesma adotar a formulação de Rankine-Koenen para o parâmetro K , que é a formulação que apresenta os menores valores para este parâmetro.

No silo piloto, a curva relativa ao limite inferior da norma BMHB apresentou configuração bastante semelhante às respectivas curvas obtidas com as normas ENV-ISO e DIN-AS, tendendo a esses valores à medida que a relação h/d aumentou. No entanto, as respectivas curvas do limite superior apresentaram um comportamento bastante diferenciado em relação às outras normas, tendendo a um valor assintótico, à medida que a relação h/d aumentou, mais rapidamente que a formulação de Janssen. Também, a curva obtida para o limite inferior, com a formulação proposta empiricamente, apresentou uma configuração muito semelhante à curva limite superior da norma ACI, tanto no silo protótipo, quanto no piloto e, em relação ao limite superior, teve um comportamento diferenciado em relação a todas as normas.

Tendo em vista os valores das pressões horizontais obtidos experimentalmente e considerando que as curvas constantes nos gráficos das figuras 94 a 97 foram obtidas com as propriedades do produto armazenado, de modo a propiciar a combinação mais desfavorável e a menos desfavorável em cada formulação, observa-se que, comparativamente às normas analisadas, a formulação proposta foi a que se mostrou mais adequada para a previsão das pressões horizontais em silos de baixa relação altura/diâmetro, com $h/d > 1$; para relações $h/d \leq 1,0$, a formulação de Rankine-Calil é a que se apresenta mais indicada.

As tabelas 55, 56, 57 e 58 apresentam os valores obtidos com as normas ENV, ISO, AS, DIN, BMHB e ACI, bem como os valores obtidos com o modelo de Rankine-Calil e o modelo proposto para a previsão das pressões horizontais para o silo protótipo e o silo piloto, em cada relação h/d ensaiada, respectivamente, a fim de comparar os valores obtidos experimentalmente com os valores teóricos,.

TABELA 55 – Valores obtidos para pressão horizontal no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo de Rankine-Calil e o modelo proposto - Silo protótipo - kPa

Profundidade z (m)	Norma ou Modelo											
	ENV=ISO		DIN=AS		BMHB		ACI		Rankine Calil		Modelo proposto	
	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s
0,79	1,81	4,85	1,93	5,24	0,00	0,00	1,05	3,07	2,77	4,19	2,99	5,13
1,29	2,88	7,53	3,06	8,10	1,35	4,41	1,69	4,86	4,52	6,85	4,73	8,13
2,94	5,97	14,64	6,31	15,55	4,42	10,54	3,64	10,02	10,29	15,61	9,80	16,84
5,34	9,52	21,45	9,98	22,43	6,84	13,13	6,13	15,82	18,70	28,35	15,57	26,74
5,74	10,02	22,29	10,49	23,25	7,11	13,35	6,51	16,63	20,10	30,47	16,37	28,13
6,14	10,50	23,07	10,97	24,01	7,36	13,53	6,87	17,39	21,50	32,59	17,14	29,45
6,99	11,44	24,51	11,93	25,40	7,82	13,84	7,82	18,89	24,48	37,10	18,66	32,05
8,04	12,48	25,97	12,97	26,79	8,29	14,12	8,49	20,53	28,15	42,68	20,32	34,95

TABELA 56 – Valores obtidos para pressão horizontal no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo de Rankine-Calil e o modelo proposto - Silo piloto – h/d=0,98 (kPa)

Profundidade z (m)	Norma ou Modelo											
	ENV=ISO		DIN=AS		BMHB		ACI		Rankine Calil		Modelo proposto	
	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s
0,28	1,09	2,89	1,17	3,09	1,64	3,97	0,55	1,82	1,71	2,63	1,72	2,97
0,66	2,33	5,76	2,48	6,07	3,13	6,96	1,24	3,86	4,03	6,20	3,67	6,33
1,17	3,65	8,28	3,85	8,62	4,39	7,96	2,06	5,99	7,15	10,99	5,73	9,88
1,26	3,85	8,62	4,05	8,94	4,55	8,13	2,19	6,31	7,70	11,84	6,03	10,40
1,35	4,04	8,92	4,24	9,24	4,70	8,27	2,32	6,61	8,25	12,68	6,32	10,91
1,63	4,57	9,71	4,78	10,00	5,11	8,63	2,71	7,45	9,96	15,31	7,14	12,32
1,78	4,82	10,05	5,04	10,33	5,30	8,78	2,91	7,84	10,88	16,72	7,53	12,99

TABELA 57 – Valores obtidos para pressão horizontal no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo de Rankine-Calil e o modelo proposto - Silo piloto –h/d=1,25 (kPa)

Profundidade z (m)	Norma ou Modelo											
	ENV=ISO		DIN=AS		BMHB		ACI		Rankine Calil		Modelo proposto	
	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s
0,36	1,37	3,59	1,47	3,82	2,01	4,68	0,70	2,29	2,20	3,38	2,17	3,74
0,84	2,84	6,80	3,01	7,13	3,65	7,14	1,54	4,69	5,13	7,89	4,46	7,70
1,50	4,33	9,37	4,54	9,67	4,94	8,48	2,54	7,07	9,17	14,09	6,78	11,69
1,61	4,53	9,66	4,74	9,95	5,09	8,61	2,69	7,39	9,84	15,12	7,09	12,23
1,72	4,72	9,92	4,94	10,20	5,23	8,72	2,83	7,69	10,51	16,16	7,38	12,73
2,12	5,33	10,67	5,54	10,91	5,65	9,04	3,33	8,63	12,96	19,92	8,31	14,33
2,27	5,52	10,89	5,73	11,10	5,78	9,13	3,50	8,93	13,87	21,32	8,61	14,84

TABELA 58 – Valores obtidos para pressão horizontal no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo de Rankine-Calil e o modelo proposto - Silo piloto –h/d=1,49 (kPa)

Profundidade z (m)	Norma ou Modelo											
	ENV=ISO		DIN=AS		BMHB		ACI		Rankine Calil		Modelo proposto	
	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s
0,43	1,61	4,15	1,72	4,41	2,30	5,20	0,83	2,68	2,63	4,04	2,54	4,38
1,00	3,25	7,58	3,43	7,91	4,03	7,59	1,80	5,35	6,11	9,39	5,10	8,80
1,79	4,84	10,08	5,05	10,35	5,31	8,79	2,92	7,87	10,94	16,82	7,56	13,04
1,93	5,06	10,35	5,27	10,61	5,46	8,91	3,10	8,21	11,79	18,13	7,89	13,61
2,07	5,26	10,59	5,47	10,83	5,60	9,01	3,27	8,52	12,65	19,45	8,20	14,15
2,56	5,86	11,23	6,06	11,41	5,99	9,28	3,82	9,44	15,64	24,05	9,12	15,72
2,71	6,01	11,37	6,21	11,53	6,09	9,34	3,97	9,67	16,56	25,46	9,35	16,13

Na figura 94 e na tabela 55, pode-se constatar que, em relação às normas analisadas, na profundidade máxima, a norma BMHB é a que apresenta os menores valores, tanto para o limite inferior como para o limite superior; a diferença entre o menor e o maior valor, em relação ao limite inferior, é de cerca de 56% e, em relação ao limite superior (DIN-AS), é de cerca de 90%.

Nas figuras 95 a 97 e nas tabelas 56 a 58, pode-se constatar que, em relação às normas analisadas, na profundidade máxima, a norma ACI é a que apresenta os menores valores, tanto para o limite inferior como para o limite superior e, as normas DIN-AS, as que apresentam os maiores valores. Em relação ao limite inferior, a diferença entre o menor e o maior valor (BMHB) é de cerca de 82%, na relação h/d=0,98; de 65%, na relação h/d=1,25 e de 56%, na relação h/d=1,49. Nesse caso, as normas DIN-AS foram as que apresentaram os maiores valores. Em relação ao limite superior, a diferença entre o menor e o maior valor é

de cerca de 32%, na relação $h/d=0,98$; de 24%, na relação $h/d=1,25$ e de 23%, na relação $h/d=1,49$, e neste caso, a norma BMHB é a que apresentou o menor valor.

As tabelas 59, 60, 61 e 62 apresentam as diferenças percentuais entre os valores obtidos experimentalmente, no silo protótipo e no silo piloto e os valores teóricos obtidos com as normas analisadas, o modelo de Rankine-Calil e o proposto, em cada uma das hipóteses analisadas.

TABELA 59 – Diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente e os valores das pressões horizontais obtidos no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo Rankine-Calil e o modelo proposto - Silo protótipo - kPa

Profundidade z (m)	Modelo											
	ENV=ISO		DIN=AS		BMHB		ACI		Rankine Calil		Modelo proposto	
	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s
1,29	-98	+32	-86	+42	-322	-29	-237	-17	-26	+20	-12	+42
2,94	-101	+22	-90	+29	-172	-14	-230	-20	-17	+30	-23	+29
5,34	-106	+9	-96	+15	-186	-49	-220	-24	-5	+45	-26	+36
5,74	-115	+4	-105	+8	-204	-61	-230	-29	-7	+41	-31	+31
6,14	-123	-1	-113	+3	-218	-73	-241	-35	-9	+39	-36	+26
6,99	-154	-19	-144	-16	-272	-110	-272	-54	-19	+28	-56	+10

TABELA 60 – Diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente e os valores das pressões horizontais obtidas no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo Rankine-Calil e o modelo proposto - Silo piloto – $h/d=0,98$ (kPa)

Profundidade z (m)	Modelo											
	ENV=ISO		DIN=AS		BMHB		ACI		Rankine Calil		Modelo proposto	
	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s
0,28	-74	+52	-62	+63	-15	+109	-245	-4	-12	+38	-10	+56
0,66	-117	+14	-104	+20	-62	+38	-308	-31	-27	+22	-38	+25
1,17	-125	+1	-113	+5	-87	+3	-298	-37	-16	+34	-43	+20
1,26	-130	-3	-118	+1	-95	-9	-304	-40	-16	+34	-47	+13
1,35	-127	-3	-116	+1	-95	-11	-295	-39	-12	+38	-45	+19
1,63	-149	-17	-138	-14	-123	-32	-291	-53	-16	+35	-59	+8

TABELA 61 – Diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente e os valores das pressões horizontais obtidas no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo Rankine-Calil e o modelo proposto - Silo piloto – $h/d=1,25$ (kPa)

Profundidade z (m)	Modelo											
	ENV=ISO		DIN=AS		BMHB		ACI		Rankine Calil		Modelo proposto	
	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s
0,36	-107	+26	-93	+35	-41	+65	-306	-25	-30	+19	-31	+32
0,84	-110	+14	-99	+16	-64	+19	-288	-36	-18	+32	-34	+29
1,50	-126	-5	-116	-1	-98	-16	-285	-39	-8	+44	-44	+19
1,61	-130	-8	-120	-5	-105	-21	-288	-41	-7	+45	-47	+17
1,72	-128	-8	-118	-5	-106	-23	-280	-40	-4	+50	-46	+18
2,12	-131	-16	-123	-13	-118	-36	-270	-43	+4	+62	-48	+16

TABELA 62 – Diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente e os valores das pressões horizontais obtidas no cálculo teórico das pressões com as principais normas estrangeiras, o modelo Rankine-Calilil e o modelo proposto - Silo piloto – $h/d=1,49$ (kPa)

Profundidade z (m)	Modelo											
	ENV=ISO		DIN=AS		BMHB		ACI		Rankine Calilil		Modelo proposto	
	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s
0,43	-135	+10	-120	+17	-64	+38	-355	-41	-45	+7	-49	+16
1,00	-114	+9	-103	+14	-72	+9	-287	-30	-15	+35	-37	+26
1,79	-116	-4	-107	-1	-97	-19	-257	-32	+4	+61	-38	+25
1,93	-119	-7	-110	-4	-103	-24	-257	-35	+5	+64	-40	+23
2,07	-116	-7	-108	-5	-103	-26	-248	-34	+10	+71	-39	+24
2,56	-132	-21	-124	-19	-127	-46	-256	-44	+14	+77	-49	+16

5.3.2.2 Análise e discussão da pressão vertical obtida experimentalmente na base do silo piloto

As figuras 98, 99 e 100 apresentam, graficamente, os valores experimentais e teóricos das pressões verticais na base do silo para $h/d=0,98$, $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$, respectivamente.

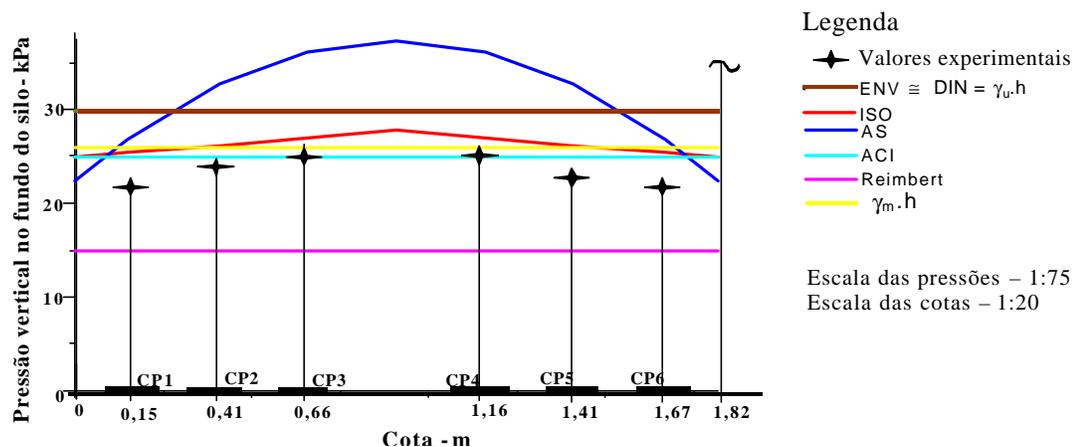


FIGURA 98 – Pressões verticais teóricas e experimentais no fundo do silo piloto $h/d=0,98$

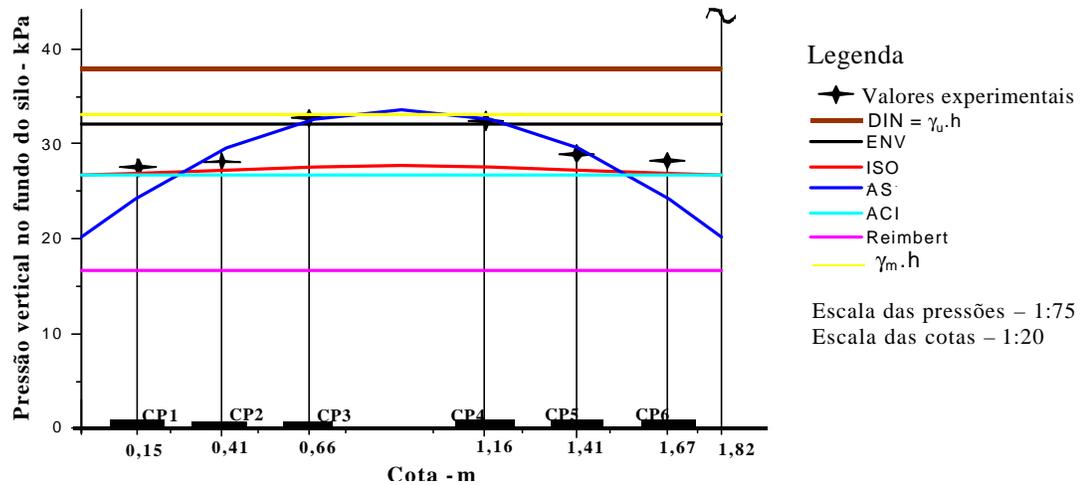


FIGURA 99 – Pressões verticais teóricas e experimentais no fundo do silo piloto $h/d=1,25$

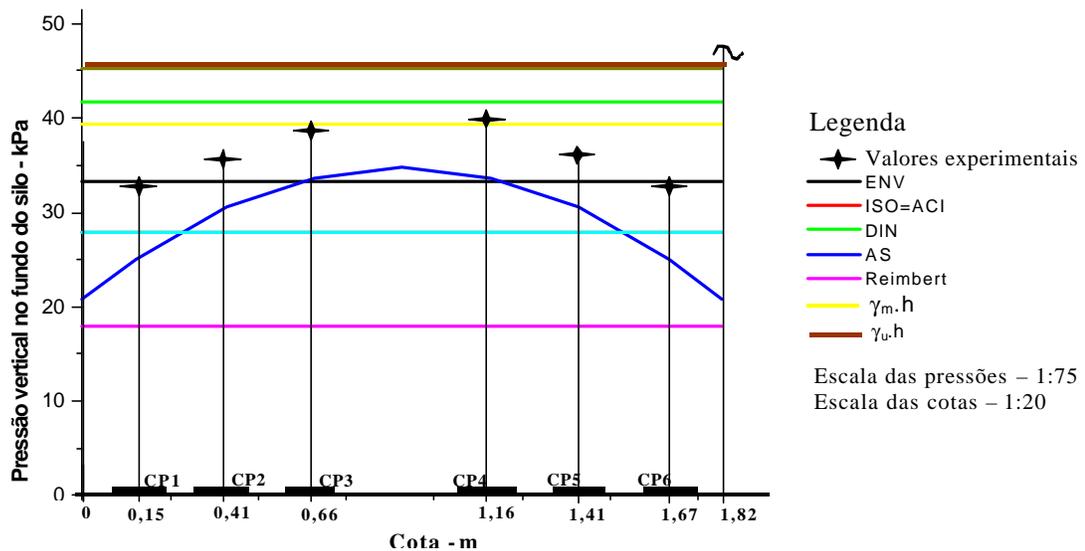


FIGURA 100 – Pressões verticais teóricas e experimentais no fundo do silo piloto $h/d=1,49$

Embora a superfície livre do produto, nas três relações h/d ensaiadas, fosse plana, observa-se, nos gráficos das figuras 98, 99 e 100, que as pressões verticais na região central do fundo do silo foram sempre maiores do que as pressões junto à parede, de certa forma semelhante aos valores obtidos com a formulação da norma australiana para silos de fundo plano. Considerando a média das pressões obtidas experimentalmente na região central (CP3 e CP4), esta foi maior que a pressão média junto à parede (CP1 e CP6), em cerca de 15% na relação $h/d=0,98$, 17% na relação 1,25 e 18% na relação 1,49.

Observa-se, também, que as pressões obtidas experimentalmente na região central do silo ficaram relativamente próximas de $\gamma_m h$, nas três relações h/d ensaiadas. No caso da relação h/d=0,98, a formulação da norma australiana e a formulação $\gamma_m h$ foram as que melhor estimaram as pressões verticais na base do silo. Para relações h/d>1, a norma australiana considera também uma variação parabólica das pressões verticais, mas, no centro, ela adota a formulação de Janssen multiplicada por 1,25. Considerando que, com exceção da formulação $\gamma_m h$, os valores teóricos foram obtidos com a combinação mais desfavorável das propriedades físicas da areia, a formulação que melhor estimou as pressões verticais na base do silo foi a formulação $\gamma_m h$. A formulação de M & A Reimbert subestima muito as pressões verticais na base do silo. A tabela 63 apresenta a diferença percentual entre os valores das pressões verticais obtidas experimentalmente junto à parede e na região central do silo e as teóricas, para cada relação h/d ensaiada.

TABELA 63 – Diferença percentual entre os valores das pressões verticais obtidas experimentalmente e as teóricas para cada relação h/d ensaiada no silo piloto

Modelo	h/d=0,98		h/d=1,25		h/d=1,49	
	parede	centro	parede	centro	parede	centro
ENV	+36	+19	+15	≅0	≅0	-17
DIN	+36	+19	+35	+16	+26	+7
ISO	+15	+7	-4	≅0	-19	-40
AS	+22	+44	-15	≅0	-32	-16
ACI	+13	-1	-5	-22	-19	-40
Reimbert	-48	-69	-68	-97	-86	-118
$\mathbf{g}_m h$	+18	+3	+18	≅0	+18	≅0
$\mathbf{g}_u h$	+36	+19	+36	+16	+37	+16

A partir da análise dos valores obtidos experimentalmente e da formulação da norma australiana, é proposta a formulação empírica para a determinação das pressões verticais na base do silo, como a seguir:

$$p_v(h) = \gamma h \left[1 - 0,9 \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right] \quad \text{onde } x \text{ varia de } -R \text{ a } R \quad (114)$$

$x = 0$ no centro do silo

O gráfico da figura 101 apresenta os valores médios obtidos experimentalmente, o modelo empírico proposto, a formulação da norma australiana e as fórmulas $\gamma_m h$ e $\gamma_u h$, para relação h/d=0,98. Os gráficos das figuras 102 e 103 apresentam os valores obtidos experimentalmente, o modelo empírico proposto e as fórmulas $\gamma_m h$ e $\gamma_u h$, para relação h/d=1,25 e 1,49.

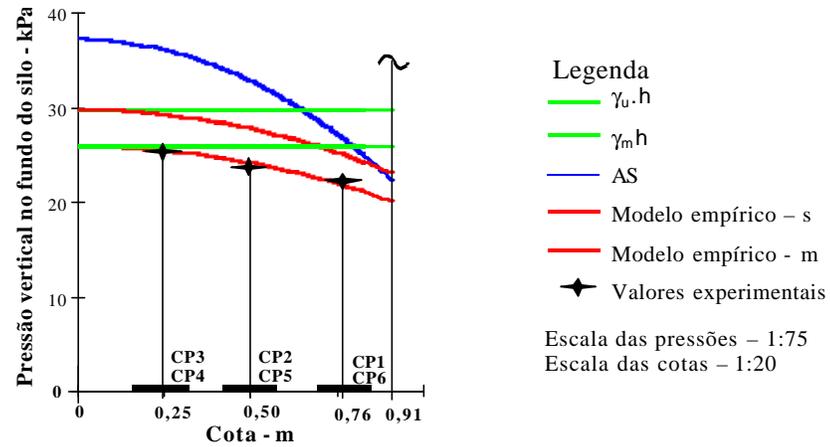


FIGURA 101– Pressão vertical: Formulação empírica x teóricas e experimentais – h/d=0,98

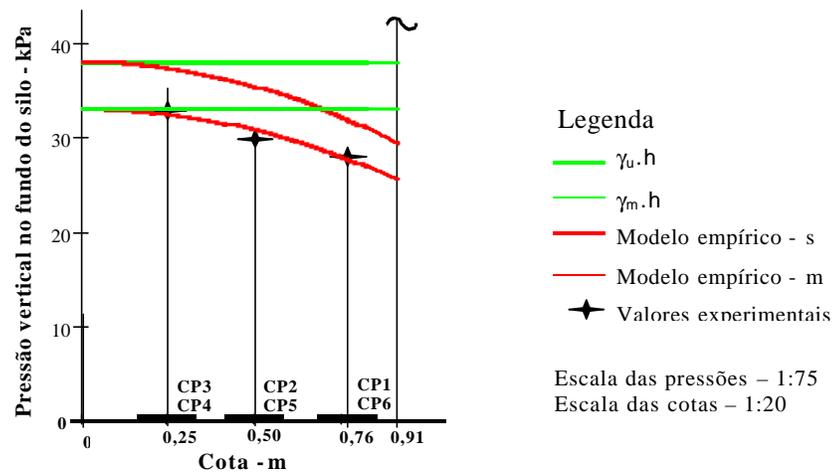


FIGURA 102– Pressão vertical: Formulação empírica x teóricas e experimentais – h/d=1,25

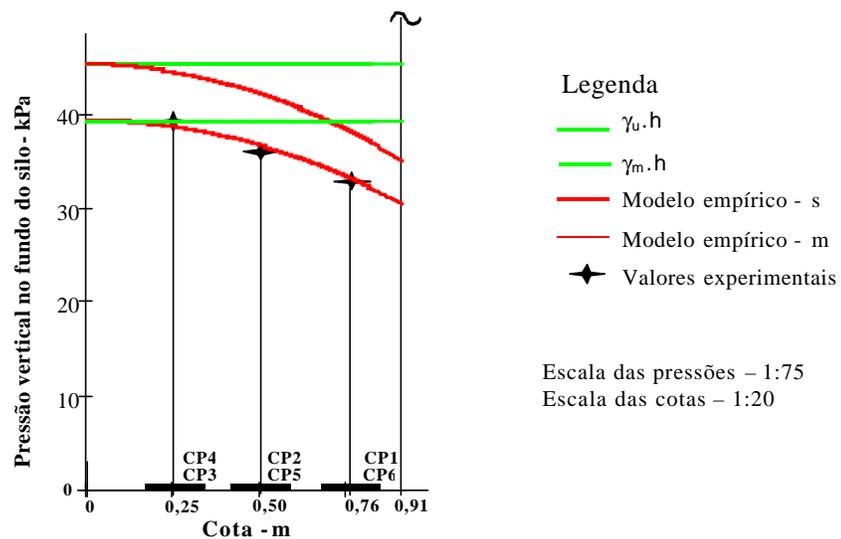


FIGURA 103 – Pressão vertical: Formulação empírica x teóricas e experimentais – h/d=1,49

A tabela 64 apresenta a diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente para as pressões verticais na base do silo e o modelo empírico proposto, para cada uma das hipóteses analisadas, e as fórmulas teóricas que melhor estimaram as pressões verticais, para cada relação h/d ensaiada.

TABELA 64 – Diferença percentual entre os valores das pressões verticais obtidos experimentalmente e as teóricas para cada relação h/d ensaiada no silo piloto

Modelo	h/d=0,98		h/d=1,25		h/d=1,49	
	parede	centro	parede	centro	parede	centro
g, h	+36	+19	+36	+16	+37	+16
Modelo empírico	s	+14	+14	+15	+15	+14
	m	$\cong 0$	+1	$\cong 0$	$\cong 0$	$\cong 0$
AS	+22	+44	--	--	--	--

Observa-se, nos gráficos das figuras 101, 102, 103 e na tabela 64, que o modelo empírico proposto, comparativamente ao conjunto dos valores experimentais, faz uma boa previsão das pressões verticais na base do silo.

De modo a verificar o desempenho do modelo empírico proposto para as pressões verticais em silos que não tenham a superfície livre do produto nivelada e, também, com outro produto diferente da areia, a figura 104 apresenta o modelo empírico para o silo protótipo.

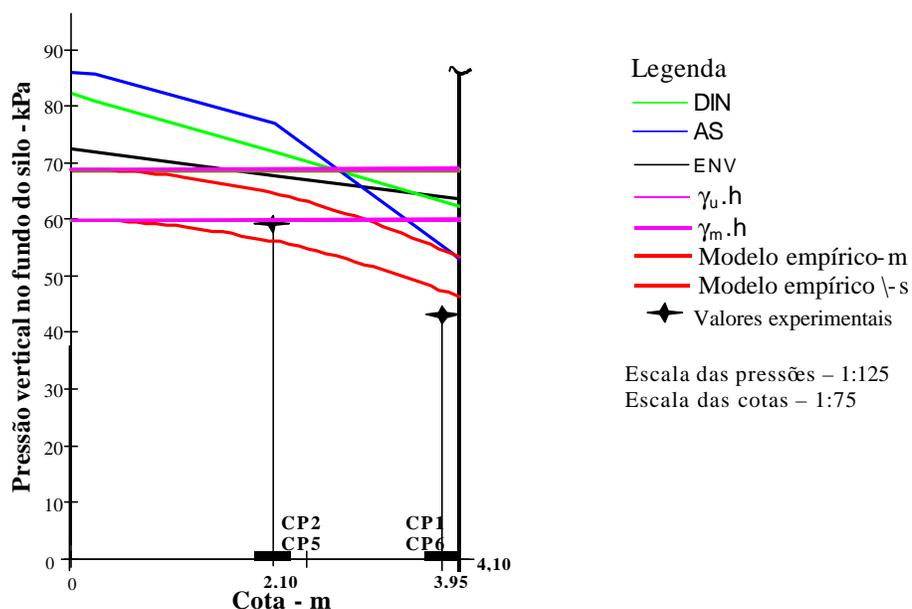


FIGURA 104– Pressões verticais: Modelo empírico x pressões verticais teóricas e experimentais para o silo protótipo

A tabela 65 apresenta a diferença percentual entre os valores obtidos experimentalmente para as pressões verticais na base do silo protótipo e os valores teóricos que melhor estimaram as pressões verticais.

TABELA 65 – Diferença percentual entre os valores das pressões verticais obtidos experimentalmente e os modelos teóricos e o empírico– Silo protótipo

Células	ENV	DIN	AS	g _v .h	Modelo empírico	
					s	m
CP1-CP6	+58	+55	+34	+70	s	+35
					m	+17
CP2-CP5	+15	+21	+30	+17	s	+10
					m	-5

No gráfico da figura 104 e na tabela 65, observa-se que o modelo empírico proposto, comparativamente aos outros modelos, também apresenta uma boa estimativa das pressões verticais na base do silo protótipo.

5.3.2.3 Determinação experimental da relação entre a pressão horizontal e a vertical, K, no silo piloto.

Na tabela 44 estão assinalados em azul e em vermelho, os valores das pressões horizontais e verticais obtidos experimentalmente, de modo a determinar o valor da relação entre pressões, K, (p_h/p_v), nas relações $h/d=1,25$ e $h/d=1,49$. A tabela 66 apresenta os valores médios obtidos para K no nível da célula CP9 e no nível da célula CP10, para aquelas relações h/d ensaiadas.

TABELA 66 – Valores da relação entre pressões, K, obtidos experimentalmente

Células	h/d	
	1,25	1,49
CP9	0,44	0,46
CP10	0,47	0,48
K_m	0,46	0,47

Na tabela 66 pode-se observar que a relação entre pressões, K, não é constante ao longo da altura e diminui com a profundidade. A tabela 67 apresenta os valores teóricos obtidos com as principais fórmulas propostas para o parâmetro

K, constantes do capítulo 2, e a respectiva diferença percentual entre o valor médio obtido experimentalmente.

TABELA 67 – Valor teórico da relação entre pressões K, obtido através das principais fórmulas e a respectiva diferença percentual em relação ao valor obtido experimentalmente

Formulação	Valor	Diferença percentual
RANKINE-KOENEN $K = \frac{1 - \text{sen } \phi_i}{1 + \text{sen } \phi_i}$	0,27	-70
HARTMANN $K = \frac{1 - \text{sen}^2 \phi_i}{1 + \text{sen}^2 \phi_i}$	0,50	+9
JAKY $K = 1 - \text{sen } \phi_i$	0,43	-7
WALKER* $K = \frac{1 + \text{sen}^2 \phi_i - 2\sqrt{(\text{sen}^2 \phi_i - \mu^2 \cos^2 \phi_i)}}{4\mu^2 + \cos^2 \phi_i}$	0,50	+9

* Observar que a formulação de Hartmann se torna igual à formulação de Walker quando $\phi_i = \phi_w$, como no presente caso.

Na tabela 67, pode-se observar que a expressão de Rankine-Koenen subestima em muito o valor do parâmetro K e, conseqüentemente o valor da pressão horizontal. A expressão de Hartmann, para o caso de paredes onde $\phi_i = \phi_w$, mostrou-se a mais adequada para o cálculo teórico da relação entre as pressões horizontais e verticais, K, bem como a expressão de Jaky.

5.4 AVALIAÇÃO DA FORÇA DE COMPRESSÃO DEVIDA AO ATRITO POR METRO DE PAREDE, NA BASE DO SILO

A tabela 68 apresenta os valores médios da pressão vertical obtidos experimentalmente no fundo plano do silo, para cada relação h/d ensaiada.

TABELA 68 – Valores médios da pressão vertical no fundo do silo para cada relação h/d ensaiada no silo piloto

h/d	0,98	1,25	1,49
p_v (kPa)	23,40	29,81	35,99

A tabela 69 apresenta os valores da força de compressão $P_{v,w}$ por metro de parede, na base do silo, para cada relação h/d ensaiada, a partir da equação 27 (p.35).

TABELA 69 – Estimativa dos valores da força de compressão por metro de parede na base do silo piloto para cada relação h/d ensaiada

h/d	0,98	1,25	1,49
$P_{v,w}$ (kN/m)	1,14	1,93	2,80

Os valores constantes da tabela 69 representam respectivamente 10%, 12% e 15%, aproximadamente, da carga total referente a cada relação h/d ensaiada. Isto leva a concluir que ocorreu um aumento do desenvolvimento do atrito com a parede, à medida em que aumentou a relação h/d.

A tabela 70 apresenta os valores teóricos para a força de compressão devida ao atrito do produto com a parede, na base do silo, obtida com a formulação de Janssen, que é a adotada por todas as normas, e a diferença percentual entre os valores estimados a partir das pressões verticais obtidas experimentalmente, para cada relação h/d ensaiada.

TABELA 70 – Valores da força de compressão, por metro de parede na base do silo obtidos com a formulação de Janssen, para cada relação h/d ensaiada no silo piloto e a respectiva diferença percentual entre essa formulação e a estimada

h/d	0,98	1,25	1,49
$P_{v,w}$ (kN/m)	5,33	7,88	10,37
Diferença %	371	308	369

Tendo em vista que a formulação de Janssen considera o desenvolvimento pleno do atrito com a parede, a partir da estimativa obtida para a força de compressão na base da parede vertical, pode-se concluir que, para as relações h/d ensaiadas, o atrito com a parede não foi completamente desenvolvido, o que também justifica a grande diferença encontrada entre as pressões horizontais obtidas experimentalmente e as obtidas com a formulação de Janssen. Embora os valores estimados tenham sido bastante baixos, comparativamente com a teoria de Janssen, cumpre notar que Ravenet (1992), em um estudo de vários silos cilíndricos que sofreram deformação, mostrou que, em um determinado momento, toda a massa ensilada pode ser suportada pelas paredes através do atrito e que a força de atrito alcança o seu valor mais alto quando começa a descarga e, particularmente, quando o produto ensilado permanece estático no silo durante vários meses.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Do estudo teórico e experimental realizado neste trabalho, pode-se concluir que em silos metálicos de chapa de aço corrugada, para armazenamento de produtos de fluxo livre:

Em relação às pressões horizontais nas paredes

- A análise comparativa realizada com as principais normas estrangeiras mostrou a existência de diferenças bastante significativas entre os valores obtidos, considerando a combinação mais desfavorável das propriedades dos produtos. Na condição estática, ocorreram diferenças de até 32% enquanto, na dinâmica, de até 77%.
- Os modelos de Airy, Janssen e M & A Reimbert não se mostraram adequados para a previsão das pressões horizontais na parede do silo na situação de carregamento, tanto no silo protótipo quanto em nenhuma das relações h/d ensaiadas no silo piloto. No silo protótipo, os valores experimentais chegaram a ser maiores que os obtidos com os modelos acima citados: 136, 70 e 48%, respectivamente. No silo piloto, os valores experimentais foram maiores que os modelos de Airy, Janssen e M & A Reimbert, em média, para as três relações h/d ensaiadas: 103, 67 e 54%, respectivamente.

- A maioria das normas estrangeiras adota a teoria de Janssen para a determinação das pressões horizontais, mesmo para silos de baixa relação altura/diâmetro ou, como no caso da norma inglesa, que adota uma formulação semelhante a de M & A Reimbert, resultando que nenhuma delas se mostrou adequada para a previsão das pressões horizontais, sobretudo no terço inferior da parede do silo, tanto no silo protótipo quanto no silo piloto, nas três relações h/d ensaiadas. Considerando a combinação mais desfavorável das propriedades dos produtos, na profundidade máxima, os valores experimentais chegaram a ser maiores que os obtidos com as normas analisadas em até 110% no silo protótipo e, no silo piloto, de até 53%, na relação h/d=0,98; 43%, na relação h/d=1,25 e 46%, na relação h/d=1,49. As diferenças percentuais acima obtidas entre os valores teóricos e os experimentais é uma das razões do grande número de acidentes com silos de baixa relação altura/diâmetro que ocorrem em todo o mundo.
- Tendo em vista os valores experimentais obtidos tanto no silo protótipo quanto no silo piloto para a relação h/d=0,98, recomenda-se a adoção do modelo linear de Rankine-Calil para silos com relações h/d ≤ 1, isto é:

$$p_h(z) = K \cdot \gamma \cdot z, \text{ com } K = \frac{1 - \operatorname{sen}^2 \phi_i}{1 + \operatorname{sen}^2 \phi_i}.$$

- Para a determinação das pressões horizontais em silos $1 < h/d < 1,5$, propõe-se o modelo empírico baseado no ajuste estatístico dos valores das pressões horizontais obtidas experimentalmente, como a seguir:

$$p_h(z) = \frac{d}{2} \frac{\gamma}{\mu} \left(1 - e^{-\frac{z}{d}} \right) \cos \phi_i$$

- Considerando o dimensionamento da estrutura do silo pelo método dos estados limites, as pressões horizontais deverão ser obtidas através da combinação mais desfavorável (limite superior) e da menos desfavorável (limite inferior) das propriedades físicas do(s) produto(s) a ser(em) armazenado(s) no silo.

- Tendo em vista os resultados obtidos experimentalmente, recomenda-se o coeficiente de sobrepressão de 1,15 para as pressões horizontais na parede na condição de descarregamento.

Em relação às pressões verticais na base do silo

- As fórmulas previstas pela norma americana ACI, a norma europeia ISO e o modelo de M & A Reimbert, para a previsão das pressões verticais na base do silo, não se mostraram adequadas comparativamente aos valores obtidos experimentalmente, tanto no silo protótipo quanto nas três relações h/d ensaiadas com o silo piloto. O modelo de Janssen, sem nenhuma alteração, proposto pela norma ACI apresentou valores menores que os obtidos experimentalmente na região central da base do silo, em até 49%, na relação h/d=1,49. Os valores obtidos experimentalmente para as pressões verticais na região central na base do silo foram maiores que os obtidos com a formulação de M & A Reimbert, em até 131%, e aumentou à medida que aumentou a relação h/d. Note-se que essas diferenças foram obtidas adotando-se, nos modelos teóricos, a combinação mais desfavorável das propriedades do produto ensilado, isto é, são as pressões máximas possíveis com cada uma das fórmulas.
- Tendo em vista os resultados obtidos experimentalmente, observou-se que a formulação proposta pela norma australiana AS é um pouco conservadora para previsão das pressões verticais na região central da base do silo, na relação h/d<1, e, para relações 1<h/d<1,5, ela não se mostrou adequada, tendo em vista que apresentou valores inferiores aos obtidos experimentalmente.
- Da observação da conformação do conjunto dos valores experimentais obtidos, propõe-se o modelo empírico para a previsão das pressões verticais na base plana, em silos com h/d<1,5, com a superfície livre do produto plana ou não, como a seguir:

$$p_v(h) = \gamma h \left[1 - 0,9 \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right]$$

onde x varia de -R a R e
x = 0 no centro do silo

- Tendo em vista os resultados obtidos experimentalmente, recomenda-se o coeficiente de sobrepressão de 1,1 para as pressões verticais na base do silo na condição de descarregamento.

Em relação ao parâmetro K

- Os valores experimentais obtidos para a relação entre pressões, K, mostraram que a formulação proposta por Hartmann para silos com paredes muito rugosas, onde $\phi_i = \phi_w$, isto é, $K=(1 - \text{sen}^2\phi_i)/(1 + \text{sen}^2\phi_i)$, é adequada para a determinação teórica do valor de K em silos metálicos de chapa ondulada.

Sugestões para trabalhos futuros

- 1 – Estudo teórico e experimental das pressões em silos verticais esbeltos ($h/d > 1,5$).
- 2 – Estudo experimental de um silo piloto para avaliação das propriedades físicas dos produtos armazenados, com base nas recomendações das várias normas estrangeiras.
- 3 – Estudo experimental utilizando células de pressão tipo sonda inseridas na massa de grãos, aplicado em medições de silos pilotos, para mapeamento das pressões na seção transversal do silo.
- 4 – Estudo teórico e experimental da ação do vento em silos.
- 5 - Estudo experimental da força de compressão devida ao atrito, por metro de parede, na base do silo.
- 6 - Estudo experimental das pressões em silos metálicos de chapa de aço corrugado de baixa relação altura/diâmetro para armazenamento de produtos coesivos

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1991). *Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials*. p.313-377. EUA. Revised. ACI 313.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (1996). ANSI/ASAE. EP545. *Loads exerted by free-flowing grain on shallow storage structures*. p.754-756.
- ANDRADE Jr., L.J. (1998). *Análise Estrutural das Chapas Metálicas de Silos e de Reservatórios Cilíndricos*. São Carlos. 208p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP. Orientador Prof. Dr. José Jairo de Sales
- ARAUJO, E.C.; CALIL Jr., C. (1995). Silos metálicos cilíndricos: "Recomendações mínimas de projeto". In: XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Bauru, 1995. *Anais*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. V.1, p.131-146.
- ARNALD, P.C.; ROBERTS, A.W. (1985). The geometric design of storage system for bulk solids. In: ROTTER, J.M. *Design of steel bins for storage of bulk solids*. p.27-33
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990). *TB-374 – Silos cilíndricos para grãos vegetais*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990). *TB-377 – Componentes de silos cilíndricos metálicos para grãos vegetais*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIATE COMMITTEE ON THE NATIONAL BUILDING CODE. (1983). *Canadian Farm building Code*. CFBC. National Research Council of Canada. Ottawa.

- ATEWOLOGUN, A.O.; RISKOWSKI, G.L. (1991). Experimental determination of Janssen' stress ratio by four methods for soybeans under static conditions. *Transaction of the ASAE*. V.34 (5), p.2193-2198.
- AUSTRALIAN STANDARD (1996). AS 3774. *Loads on bulk containers*. Sydney. AS 3774 Supplement 1 (1997). *Loads on bulk containers – Commentary*. Sydney.
- AYUGA, F. (1995). Los empujes del material almacenado en silos. *Informes de la construcción*. V.46, n.436, p. 27-34, marzo/abril.
- BADIALE, R.C.; CALIL Jr., C. (1997) *Estudo da estabilidade de silos cilíndricos sob compressão axial*. In: XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campina Grande, 1997. (CD ROM). Paraíba, UFP.
- BENINK, E.J. (1989). *Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes*. 162p. Tese (Doutorado). Universiteit Twente. The Netherlands.
- BISCHARA, A.G. et al. (1983). Static pressure in concrete circular silos storing granular materials. *ACI Journal* / May-June 1983 p.210-216.
- BISCHARA, A.G. (1985). Interaction of bin and stored bulk solids. In: ROTTER, J.M. *Design of steel bins for storage of bulk solids*. p.27-33
- BLIGHT, G.E. (1987). Measurements on full size silos. Part 1: Temperature e strains. *Bulk solids Handling*. V.7. n. 6 p.781-786.
- BLIGHT, G.E.; BENTEL, G.M. (1988). Measurements on full size silos. Part 2: Pressures. *Bulk solids Handling*. V.8. n. 3 p.343-346
- BLIGHT, G.E. (1988) A comparison of measured pressures in silos with code recommendations. *Bulk solids Handling*. V.8. n. 2 p.145-153.
- BLIGHT, G.E; HALMAGIU A.R. (1996). Calibrating Pressure Cells to measure pressures in silos. *Bulk solids Handling*. V.16. n. 1 p.71-73.

- BORCZ, A. (1987). Experimentally determined pressure exerted on walls and bottom in grain silos. Institute of Building Engineering of the Technical University of Wroclaw. 63p.
- BORCZ, A. et al. (1990). Pressure Measurements on cement Silos. *Powder Handling & Processing*. V.2 n3 p 239-246.
- BRITISH MATERIALS HANDLING BOARD (1985). *Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers*. Berkshire. 213p.
- BROWN, C.J.; NIELSEN, J. (1998). Silos: *Fundamentals of theory, behaviour and design*. E& FN Spon. London. 836p.
- CALIL Jr., C. (1978). *Silos de Madeira*. São Carlos. 198 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- CALIL Jr., C. (1984). *Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos*. Tese (Doutorado). Escola Politécnica de Barcelona. Espanha. Publicação do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 184 p.
- CALIL Jr., C. (1984/1985). Determinação das propriedades físicas de materiais granulares e pulverulentos para o projeto estrutural de silos. *Revista Brasileira de armazenagem*. V.9/10, n.1/2, p.3-6, 1984/1985.
- CALIL Jr., C. (1987). *Estudo teórico e experimental das pressões em silos verticais cilíndricos de pequena relação altura/diâmetro*. In: Colloquia, Porto alegre, 1987. *Anais*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1987. V.3, p.229-243.
- CALIL JR., C.; HAAKER, G. (1989). Overpressure coefficients in silos with funnel flow. *Powder Handling & Processing*. V.1 n.1 p. 67-61.
- CALIL Jr., C. (1990). *Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais*. Tese de Livre Docência. EESC - USP. 198 p.

- CALIL Jr., C.; NASCIMENTO, J.W.B. (1996). Recomendações de *combinação das ações para o projeto de silos*. In: XXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Bauru, 1996. Anais. Bauru, Faculdade de Engenharia e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, 1996. V.1, p.131-146.
- CALIL Jr., C.; GOMES, F., C.; NASCIMENTO, J.W.B.; ARAÚJO, E.C. (1996). Cylindrical Steel Silos: Study of cases of Deformation. *Powder Handling & Processing*. V.8 n.2 p.147-151. Trans Tech Publications. Germany.
- CALIL Jr., C.; NASCIMENTO, J.W.B.; ARAÚJO, E.C. (1997). *Silos metálicos Multicelulares*. Serviço Gráfico – EESC/USP – São Carlos-SP. 175p.
- CALIL Jr., C. (1997). Ações em silos pelo método dos estados limites: proposta de norma brasileira. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal. V.16, n. 4, p.110-117, jun.
- CALIL Jr., C. (1997). A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos. In: XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campina Grande, 1997. (CD ROM). Paraíba, UFP.
- CANADIAN FARM BUILDING CODE. (1983). Part 2, *Structural design*, Ottawa, Canada.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (2000). <http://www.conab.com.br>
- DEUTSCHE NORM (1985). DIN 18914 *Thin-walled cylindrical steel tower silos*. Berlin, Verlaz, 1985. 12p.
- DEUTSCHE NORM (1987). DIN 1055-87 Part 6 – *Design loads for buildings; Loads in silos bins*. Berlin, Verlaz, 1987. 6p.
- DRESCHER, A. (1991). *Analytical methods in bin-load analysis*. Department of Civil and Mineral Engineering, University of Minnesota. Minneapolis. 255p.

- ESTEVEES Jr., P. (1989). *Silos Metálicos de Chapa Corrugada*. São Carlos. 118p.
Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.
- EUROCODE 1 (1995). *ENV 1991-4 Part 4: Actions on silos and tanks*. Bruxelas.
- FASSONI, D.P.; CALIL Jr., C. (1991). Células de pressão aplicadas à determinação de pressões em silos. In: *International Seminar on Agricultural Buildings*. Campinas: Unicamp-Feagri/Sbea
- FORTES FILHO, J. (1985). *Uma introdução ao estudo dos silos*. São Carlos. 427p.
Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- GAIOTO N. (1979). *Estruturas de arrimo e empuxos de Terra*. Escola de Engenharia de São Carlos. Publicação, 40p.
- GAYLORD JR, E.H.; GAYLORD, C.N. (1977). Granular material pressures in bins. *American Society of Agricultural Engineers*. Paper n. 77-4503.
- GAYLORD JR, E.H.; GAYLORD, C.N. (1984). *Design of steel bins for storage of bulk solids*. Prentice-Hall, INC. New Jersey. 359p.
- GEEKON INCORPORATED (1998). <http://www.geokon.com> Vibrating Wire Pressure Transducers. Lebanon. Estados Unidos.
- GOMES, F.C. (1994). *Silos para armazenamento de Laranjas*. São Carlos. 107 p.
Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP.
Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.
- GOMES, F.C. (2000). *Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais*. São Carlos. 205p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.

- HAAKER, G.; RADEMACHER, J.C. (1981). A modified Triaxial Tester for measuring the flow properties of bulk solids. *Proceedings of International Symposium on Powder Technology*. University of Twente. The Netherlands. p. 126-132.
- HAAKER, G. (1998). Wall friction and wear testing. In: BROWN C. J. & NELSEN J. *Silos - Fundamentals of theory, behaviour and design*. Cap 2. p 76-86.
- HAAKER, G. (1999). An introduction to the storage of bulk solids in silos. University of Twente. The Netherlands. 45p.
- HAMADEH, H.; KAMINSKI, M. (1996). Measurement of pressure distribution inside the silo model. *Powder Handling Processing*. V. 8 n. 2, p153-154. April/June.
- HAYNAL, A. (1989) O cofre da propriedade pede mais recurso. *Revista Armazenagem*. p.32-33, mar/abr.
- HORABIK, J.; MOLEND, M., ROSS, I. J. (1995). Comparison of load distribution in two similar grain bins. *Transaction of the ASAE*. V.38 (6), p. 1875-1879.
- HORABIK, J. et al. (1995). Wall and bottom loads in grain of different diameters. *Bulk solids Handling*. V.15. n. 2 p.215-218.
- HORABIK, J., MOLEND, M., ROSS, I. J. (1999). Wall loads in a model grain bin during fill and unload cycles. *Transaction of the ASAE*. V.42 (3), p. 771-775.
- INTERNATIONAL STANDART (1995). ISO – 11697. Bases for design of structures: Loads due to bulk materials.
- JENIKE, A.W.; JOHANSON, J.R. (1968). Bin loads. *Journal of Structural Division*. ASCE, V.94. p.1011-1041.
- JENIKE, A. W et al (1973). Bin loads in 3 parts. *Journal of engineering for Industry*, ASCE, V.95. p.1-5, 6-12, 13-20.
- JENIKE, A.W. (1980). *Storage and flow of solids*. Utah, University of Utah. 197p.

- KAMINSKI, M.; HAMADEH, H. (1994). An experimental investigation of funnel flow and wall pressures variation in silos. *Powder Handling & Processing*. V.8 n. 4, p.389-393. October/December.
- KAMINSKI, M.; WIRSKA, E. (1998). Variation of pressures in flexible walled silo model. *Powder Handling & Processing*. V.10 n.4, p.349-355. October/December.
- KANDALA, R. N., PURI, V. M. (1998). Comparison of flowability measurements of powders at low pressures using two tests. Paper No. 984020 An ASAE Meeting Presentation. 27p.
- KWADE, A. et al. (1994). Determination of the stress ratio in uniaxial compression tests. Part 1 e 2. *Powder Handling & Processing*. V.6. n.1 e 2. p.61-65 e p.199-203.
- LAW G.J. et al (1993). A method for measurement of horizontal to vertical pressure ratios of wheat and barley in a circular bin. *Canadian Agricultural Engineering*. V.35. n.1 University of Guelph. Canada. p.45-49.
- LEEUWENSTIJN, P.L.L.; WIJK, L.A.; HAAKER, G. (1994). Investigation of the influence of wall stiffness on the stress ratio in mammoth silos. *Powder Technology*. V.78. p.213-220.
- LINX TECNOLOGIA ELETRÔNICA (1998). Sistema de aquisição de dados. São Paulo. *Manual do Usuário*. Software AQD5 – for Windows.
- LOHNES R.A. (1993). Lateral stress ratios for particulate materials. *Powder Handling & Processing*. V 5 n.4 p 331-336.
- MAcLEAN, A.G. (1985). Contend generated loads on bins and silos. In: ROTTER, J.M. *Design of steel bins for storage of bulk solids*. p.15-26.

- MILANI, A.P. (1993). *Determinação das propriedades de produtos armazenados para o projeto de pressões e fluxo em silos*. São Carlos. 272p. Tese (Doutorado). EESC - USP. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.
- NEGRISOLI, A.A. (1995). *Silos: Palestras*. ENGESILOS - Consultoria e Projetos de Engenharia S/C LTDA.
- NIELSEN J. (1998). Model laws and scale errors. In: BROWN C.J. & NIELSEN J. *Silos: Fundamentals of theory, behaviour and design*. London. E. & FN Spon. Cap. 6, p. 774-780.
- OOI, J. Y.; PHAM, L.; ROTTER, J. M. (1989). Systematic and random features of measured pressures on full-scale silo walls. In: Third International Conference on Bulk Solids Materials, Storage, Handling and Transportation. Newcastle USA. June. p.256-262.
- RAVENET, J. (1981). *Silo problems*. *Bulk solids Handling*. V.1. n.4. p.667-679.
- RAVENET, J. (1983). The development of industrial silos throughout the world during the last 100 years. *Bulk solids handling* V 3, n. 1. p.127-140.
- RAVENET, J. (1992). *Silos*. Edición Láser fotocomposición, S.L. Barcelona. 508p.
- RAVENET, J.; CALIL JR., C. (1992). *Cylindrical silos of corrugated sheeting: design, calculation, tests and problems*. Técnica Molitoria, Barcelona. p.184-214. Marzo.
- REIMBERT, M & A. (1979). *Silos: Teoría y Práctica*. Editorial Américalee S.R.L. Buenos Aires. 464p.
- REIMBERT, M & A. (1983). *Silos II: Presiones y Sobrepresiones de Vaciado en Silos Verticales*. Estudio de los Empujes en Silos Horizontales y Muros de Contención. Editorial Américalee S.R.L. Buenos Aires. 211p.

- ROBERTS, A. W. (1987). Storage, flow and handling of bulk solids. Department of Mechanical Engineering, University of Newcastle. 612p.
- ROBERTS, A. W. (1995). 100 Years of Janssen. *Bulk solids Handling*. V.15. n 3, p.369-383. Trans Tech Publications.
- ROTTER, J.M. (1985). Design of steel bins for storage of bulk solids. Civil and Mining Engineering Foundation, University of Sidney. 242p.
- ROTTER, J.M. et al. (1998). Properties of the stored granular material. In: BROWN C. J. & NELSEN J. *Silos - Fundamentals of theory, behaviour and design*. Cap 41.2. p. 650-664.
- ROWLANDS, G.O. et al (1989). A transducer for measuring normal and shear stresses. *Powder Handling & Processing*. V.1. n.2. p.157-162.
- RUSSELL, R.A. (1981). Service problems with steel bins. *Bulk solids Handling*. V.1. n.4, p.681-684. Trans Tech Publications.
- SAFARIAN, S.S.; HARRIS, E.C. (1985). *Design and construction of silos and bunkers*. Van Nostrand Reinhold Company Inc. New York. N.Y. 468p.
- SCHWEDES, J. (1998). Flow property measurements. In: BROWN C. J. & NELSEN J. *Silos - Fundamentals of theory, behaviour and design*. Cap 2. p.6-7.
- SCHWEDES, J. (1998). Flow patterns. In: BROWN C. J. & NELSEN J. *Silos - Fundamentals of theory, behaviour and design*. Cap 3. p 112-113.
- SILVA, M.C.A.T. (1993). *Estudo da Variabilidade Pressões em Silos*. São Paulo. 192p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, USP. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.
- STOFFERS, H. (1998). Test design. In: BROWN C. J. & NELSEN J. *Silos - Fundamentals of theory, behaviour and design*. Cap 5. p 621-641.

- VAN ZANTEN, D. C. et al. (1977). Bunker design part 3: Wall pressure and flow patterns in funnel flow. *Journal of Engineering for industry*. November p. 819-823.
- VARGAS, M. (1977). *Introdução à Mecânica dos Solos*. Cap. 8. Empuxos de Terra. Ed. McGrawl – Hill do Brasil Ltda
- VAZ, J. (1987). *Silos Verticais de Madeira Compensada*. São Carlos. 346p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.
- WALKER, D.M. (1966). An approximate theory for pressures and arching in hoppers. *Chemical Engineering Science*. V.21, p.975-997.
- WEBER. E. A. (1995). *Armazenagem Agrícola*. Kepler Weber Industrial. Porto Alegre. RS. 395p.
- WIJK, LA. (1993). *Earthquake resistance of mammoth silos of the Eurosilo type*. 241p. Tese (Doutorado). Universiteit Twente. The Netherlands.