

CLAUDIA REGINA HEZEL

**AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES EM SILOS VERTICAIS CONFORME
DIFERENTES NORMAS INTERNACIONAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em **Engenharia de Sistemas Agroindustriais**.

Orientador: Prof. Dr. Décio Lopes
Cardoso

**CASCADEL - Paraná - Brasil
Julho – 2007**

CLAUDIA REGINA HEZEL

**AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES EM SILOS VERTICAIS
CONFORME DIFERENTES NORMAS INTERNACIONAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Sistemas Agroindustriais, **aprovada** pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE.

Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei
Centro de Tecnologia, UEM.

Prof. Dr. Divair Christ
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE.

Cascavel, 16 julho de 2007.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Fábio Luiz Willrich pela amizade e sempre disposição em ajudar.

Ao Prof. Humberto Correia Lima Jr. pelo apoio sempre demonstrado e orientação no início do trabalho e minha admiração pela sua dedicação nas pesquisas e no ensino

Ao Prof. Décio Lopes Cardoso pela amizade demonstrada, experiência transmitida, orientação e incentivo à pesquisa e busca do conhecimento.

A todos os professores do Mestrado, que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS.....	xv
RESUMO.....	xvi
SUMMARY.....	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 SILOS.....	4
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SILOS.....	5
2.3 MECÂNICA DOS SOLOS.....	6
<u>2.3.1 Resistência ao cisalhamento</u>	<u>6</u>
<u>2.3.2 Empuxo de terra.....</u>	<u>10</u>
<u>2.3.3 Teoria de Rankine.....</u>	<u>13</u>
<u>2.3.4 Teoria de Coulomb.....</u>	<u>16</u>
2.4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ARMAZENADOS.....	17
<u>2.4.1 Ensaio Jenike 20</u>	
<u>2.4.2 Ângulo de repouso e ângulo de atrito interno.....</u>	<u>23</u>
<u>2.4.3 Ângulo efetivo de atrito interno.....</u>	<u>25</u>
<u>2.4.4 Ângulo de atrito com a parede.....</u>	<u>26</u>
<u>2.4.5 Peso específico.....</u>	<u>30</u>
2.5 FLUXO DOS MATERIAIS ARMAZENADOS.....	31
2.6 PARÂMETRO K.....	33
2.7 PRESSÕES EXERCIDAS PELOS PRODUTOS ARMAZENADOS.....	34
<u>2.7.1 Fundamentos 39</u>	
<u>2.7.2 Teoria de Janssen.....</u>	<u>43</u>
<u>2.7.3 Teoria de Rankine.....</u>	<u>45</u>
<u>2.7.4 Teoria de Coulomb.....</u>	<u>48</u>
2.8 NORMAS INTERNACIONAIS.....	49
<u>2.8.1 ENV (1995) 50</u>	
<u>2.8.2 AS 3774 (1996).....</u>	<u>51</u>
<u>2.8.3 ACI 313 (1991).....</u>	<u>53</u>
<u>2.8.4 DIN 1055 (1987).....</u>	<u>53</u>
<u>2.8.5 BMHB (1995) 54</u>	
2.9 CASCAS CILÍNDRICAS.....	56
<u>2.9.1 Considerações Iniciais.....</u>	<u>56</u>
<u>2.9.2 Método para Análise de Cascas Cilíndricas.....</u>	<u>60</u>
<u>2.9.3 Elementos Finitos.....</u>	<u>61</u>
2.10 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	63
<u>2.10.1 Teste de Hipóteses.....</u>	<u>64</u>
<u>2.10.2 Análise de Variância.....</u>	<u>65</u>
<u>2.10.3 Teste de Tukey.....</u>	<u>67</u>
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	69
3.1 CONCEITUAÇÃO.....	69
3.2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	70
3.3 DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE CÁLCULO.....	70
3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	76
<u>3.4.1 Parâmetros e metodologias de Análise.....</u>	<u>78</u>

3.4.2 Análise dos resultados.....	78
3.5 ANÁLISE NUMÉRICA DO SILO.....	79
3.5.1 Característica do Silo.....	79
3.5.2 Método Numérico.....	79
3.5.3 Ansys.....	79
3.5.4 Esquema de análise.....	81
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	82
4.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	82
4.2 PROGRAMA COMPUTACIONAL.....	84
4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	86
4.4 ANÁLISE NUMÉRICA.....	92
3.3.1 Silo 1.....	92
3.3.2 Silo 2.....	96
3.3.3 Silo 3.....	100
3.3.4 Discussões.....	102
103	
5 CONCLUSÕES.....	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
ANEXOS.....	115
ANEXO A Análise estatística – Pressão horizontal.....	116
ANEXO B Análise estatística – Pressão vertical.....	118
ANEXO C Análise estatística - Pressão de atrito com a parede.....	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Classificação dos silos segundo a relação h/d.....	5
Figura 1 Empuxo ativo, passivo e em repouso.....	11
Figura 2 Empuxos.....	13
Figura 3 Determinação da pressão lateral – Rankine.....	14
Figura 4 Comportamento da pressão vertical e horizontal – Rankine.....	15
Figura 5 Determinação da pressão lateral– Rankine.....	16
Tabela 2 Fatores que afetam as pressões nas paredes dos silos.....	18
Figura 6 Célula de cisalhamento de Jenike.....	21
Figura 7 Gráfico do lugar geométrico de deslizamento.....	22
Figura 8 Gráfico de determinação do ângulo de atrito.....	23
Figura 9 Representação gráfica do efetivo ângulo de atrito.....	26
Figura 10 Determinação do atrito com a parede na célula de Jenike.....	26
Figura 11 Lugar geométrico de deslizamento da parede e ϕ_i com a parede.	27
Figura 12 Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede..	28
Figura 13 Lugar geométrico de deslizamento com a parede.....	29
Figura 14 Principais tipos de fluxo em silos.....	32
Figura 15 Silos de fundo plano.....	32
Figura 16 Formas mais comuns de silos com fundo tremonhado.....	32
Figura 17 Pressões atuantes.....	40
Figura 18 Camada elementar adotada por Janssen.....	44
Figura 19 Pressões em silos de fundo plano – Rankine.....	46
Figura 20 Silos tremonha, diagrama de pressão lateral - Rankine.....	47
Figura 21 Pressões no fundo de silos baixos de fundo plano - Norma ENV.	50
Figura 22 Distribuição da pressão horizontal ou de atrito em silos baixos – Norma ENV.....	51
Figura 23 Distribuição das pressões em silos com fundo plano – AS 3774.	52
Figura 24 Distribuição da pressão horizontal e atrito em silos baixos –AS 3774.....	53
Figura 25 Parâmetros geométricos para cálculo da pressão no fundo – DIN.....	54
Figura 26 Parâmetros geométricos - BMHB.....	56
Figura 27 Características de uma casca.....	56
Figura 28 Elemento de casca cilíndrica.....	58
Figura 29 Nível de significância.....	65
Figura 30 Planilha eletrônica – Dados de entrada.....	71
Figura 31 Planilha eletrônica – Dados de saída Norma ENV.....	71
Figura 32 Planilha eletrônica – Dados de saída da norma ACI.....	72
Figura 33 Planilha eletrônica – Dados de saída da norma BMHB.....	72
Figura 34 Planilha eletrônica – Dados de saída da norma DIN.....	73
Figura 35 Planilha eletrônica – Dados de saída da norma AS.....	73
Figura 36 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma ENV.....	74
Figura 37 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma ACI.....	74
Figura 38 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma BMHB.....	75
Figura 39 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma DIN.....	75
Figura 40 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma AS.....	76

Figura 41 Elemento para a casca elástica, SHELL 93.....	80
Figura 42 Tensões no elemento de casca, SHELL 93.....	80
Figura 43 Pressões – Norma ENV.....	84
Figura 44 Pressões – Norma ACI.....	84
Figura 45 Pressões – Norma BMHB.....	85
Figura 46 Pressões – Norma DIN.....	85
Figura 47 Pressões – Norma AS.....	85
Tabela 3 Resultados das pressões (kgf.m-2) nas normas para D1 - ϕ_w 20°	86
Tabela 4 Resultados das pressões (kgf.m-2) nas normas para D2 - ϕ_w 27°	87
Tabela 5 Resultados das pressões (kgf.m-2) nas normas para D3 - ϕ_w 32°	87
Tabela 6 Resultado da análise das pressões horizontais.....	89
Tabela 7 Resultado da análise das pressões verticais - ϕ_i.....	90
Tabela 8 Resultado da análise das pressões verticais - ϕ_w.....	90
Tabela 9 Resultado da análise das pressões de atrito com a parede - γ.....	91
Tabela 10 Resultado da análise das pressões de atrito com a parede - ϕ_i.....	92
Figura 48 Silo 1 – Construção do silo.....	93
Figura 49 Silo 1 – Construção da casca cilíndrica.....	93
Figura 50 Silo 1 – Divisão em segmentos.....	93
Figura 51 Silo 1 – Malha dos elementos.....	94
Figura 52 Silo 1 – Condições de contorno.....	94
Figura 53 Silo 1 – Aplicação da pressão constante.....	94
Figura 54 Silo 1 – Resultado: deformada.....	95
Figura 55 Silo 1 – Resultado: deformada e indeformada 1.....	95
Figura 56 Silo 1 – Resultado: deformada e indeformada 2.....	96
Figura 57 Silo 2 – Subdivisão das alturas.....	96
Figura 58 Silo 2 – Casca cilíndrica.....	97
Figura 59 Silo 2 – Subdivisão dos elementos.....	97
Figura 60 Silo 2 – Malha dos elementos.....	98
- 98	
Figura 61 Silo 2 – Nós coincidentes.....	98
Figura 62 Silo 2 – Condições de contorno.....	99
Figura 63 Silo 2 – Aplicação de carga.....	99
Figura 64 Silo 2 – Resultado: deformada e indeformada 1.....	99
Figura 65 Silo 2 – Resultado: deformada e indeformada 2.....	100
Tabela 11 Pressões no silo 3.....	100
Figura 66 Silo 3 – Aplicação de carga.....	101
Figura 67 Silo 3 - Resultado: deformada e indeformada 1.....	101
Figura 68 Silos 1, 2 e 3 Resultado: deformada e indeformada.....	102
Tabela 1A Teste de Tukey da pressão horizontal.....	116
Figura 1A Análise de Variância da Pressão Horizontal.....	117
Tabela 1B Análise desdobramento norma x ângulo de atrito interno.....	118
Tabela 2B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo interno de 25°	119
Tabela 3B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo interno de 35°	119

<u>Tabela 4B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo interno de 45°</u>	<u>120</u>
<u>Tabela 5B Análise desdobramento ângulo de atrito interno x norma.....</u>	<u>120</u>
<u>Tabela 6B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma ACI..</u>	<u>121</u>
<u>Tabela 7B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma AS...</u>	<u>121</u>
<u>Tabela 8B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma BMHB</u>	<u>122</u>
<u>Tabela 9B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma DIN..</u>	<u>122</u>
<u>Tabela 10B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma ENV</u>	<u>122</u>
<u>Tabela 11B Análise desdobramento norma x ângulo de atrito com a parede.....</u>	<u>123</u>
<u>Tabela 12B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo atrito com a parede de 20°.....</u>	<u>123</u>
<u>Tabela 13B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo atrito com a parede de 27°.....</u>	<u>124</u>
<u>Tabela 14B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo atrito com a parede de 32°.....</u>	<u>124</u>
<u>Tabela 15B Análise desdobramento ângulo de atrito com a parede x norma.....</u>	<u>125</u>
<u>Tabela 16B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x norma ACI.....</u>	<u>125</u>
<u>Tabela 17B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x norma AS.....</u>	<u>126</u>
<u>Tabela 18B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x norma BMHB.....</u>	<u>126</u>
<u>Tabela 19B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x norma DIN.....</u>	<u>127</u>
<u>Tabela 20B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x norma ENV.....</u>	<u>127</u>
<u>Figura 1B Análise de Variância da Pressão Vertical.....</u>	<u>128</u>
<u>Figura 2B Análise de Variância da Pressão Vertical – Dados transformados.....</u>	<u>128</u>
<u>Tabela 1C Análise desdobramento norma x peso específico.....</u>	<u>129</u>
<u>Tabela 2C Teste Tukey – Desdobramento norma x peso específico 500 kg.m-3.....</u>	<u>130</u>
<u>Tabela 3C Teste Tukey – Desdobramento norma x peso específico 1000 kg.m-3.....</u>	<u>130</u>
<u>Tabela 4C Teste Tukey – Desdobramento norma x peso específico 1500 kg.m-3.....</u>	<u>131</u>
<u>Tabela 5C Análise desdobramento peso específico x norma.....</u>	<u>131</u>
<u>Tabela 6C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma ACI</u>	<u>132</u>
<u>Tabela 7C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma AS.</u>	<u>132</u>
<u>Tabela 8C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma BMHB</u>	<u>133</u>
<u>Tabela 9C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma DIN</u>	<u>133</u>
<u>Tabela 10C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma ENV</u>	<u>134</u>
<u>Tabela 11C Análise desdobramento norma x ângulo atrito interno.....</u>	<u>134</u>

<u>Tabela 12C Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo de atrito de 25°</u>	<u>135</u>
<u>Tabela 13C Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo de atrito de 35°</u>	<u>135</u>
<u>Tabela 14C Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo de atrito de 45°</u>	<u>136</u>
<u>Tabela 15C Análise desdobramento ângulo atrito interno x norma.....</u>	<u>136</u>
<u>Tabela 16C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma ACI</u>	<u>137</u>
<u>Tabela 17C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma AS.</u>	<u>137</u>
<u>Tabela 18C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma BMHB</u>	<u>138</u>
<u>Tabela 19C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma DIN</u>	<u>138</u>
<u>Tabela 20C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma ENV</u>	<u>138</u>
<u>Figura 1C Análise de Variância da Pressão de Atrito com a Parede.....</u>	<u>139</u>

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS.....	xv
RESUMO.....	xvi
SUMMARY.....	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 SILOS.....	4
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SILOS.....	5
Tabela 1 Classificação dos silos segundo a relação h/d.....	5
2.3 MECÂNICA DOS SOLOS.....	6
2.3.1 Resistência ao cisalhamento	6
2.3.2 Empuxo de terra.....	10
Figura 1 Empuxo ativo, passivo e em repouso.....	11
Figura 2 Empuxos.....	13
2.3.3 Teoria de Rankine.....	13
Figura 3 Determinação da pressão lateral – Rankine.....	14
Figura 4 Comportamento da pressão vertical e horizontal – Rankine.....	15
Figura 5 Determinação da pressão lateral– Rankine.....	16
2.3.4 Teoria de Coulomb.....	16
2.4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ARMAZENADOS.....	17
Tabela 2 Fatores que afetam as pressões nas paredes dos silos.....	18
2.4.1 Ensaio Jenike 20	
Figura 6 Célula de cisalhamento de Jenike.....	21
Figura 7 Gráfico do lugar geométrico de deslizamento.....	22
Figura 8 Gráfico de determinação do ângulo de atrito.....	23
2.4.2 Ângulo de repouso e ângulo de atrito interno.....	23
2.4.3 Ângulo efetivo de atrito interno.....	25
Figura 9 Representação gráfica do efetivo ângulo de atrito.....	26
2.4.4 Ângulo de atrito com a parede.....	26
Figura 10 Determinação do atrito com a parede na célula de Jenike.....	26
Figura 11 Lugar geométrico de deslizamento da parede e ϕ_i com a parede.	27
Figura 12 Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede...28	
Figura 13 Lugar geométrico de deslizamento com a parede.....	29
2.4.5 Peso específico.....	30
2.5 FLUXO DOS MATERIAIS ARMAZENADOS.....	31
Figura 14 Principais tipos de fluxo em silos.....	32
Figura 15 Silos de fundo plano.....	32
Figura 16 Formas mais comuns de silos com fundo tremonhado.....	32
2.6 PARÂMETRO K.....	33
2.7 PRESSÕES EXERCIDAS PELOS PRODUTOS ARMAZENADOS.....	34
2.7.1 Fundamentos 39	
Figura 17 Pressões atuantes.....	40
2.7.2 Teoria de Janssen.....	43
Figura 18 Camada elementar adotada por Janssen.....	44
2.7.3 Teoria de Rankine.....	45

Figura 19 Pressões em silos de fundo plano – Rankine.....	46
Figura 20 Silos tremonha, diagrama de pressão lateral - Rankine.....	47
2.7.4 Teoria de Coulomb.....	48
2.8 NORMAS INTERNACIONAIS.....	49
2.8.1 ENV (1995) 50	
Figura 21 Pressões no fundo de silos baixos de fundo plano - Norma ENV.	50
Figura 22 Distribuição da pressão horizontal ou de atrito em silos baixos – Norma ENV.....	51
2.8.2 AS 3774 (1996).....	51
Figura 23 Distribuição das pressões em silos com fundo plano – AS 3774.	52
Figura 24 Distribuição da pressão horizontal e atrito em silos baixos –AS 3774.....	53
2.8.3 ACI 313 (1991).....	53
2.8.4 DIN 1055 (1987).....	53
Figura 25 Parâmetros geométricos para cálculo da pressão no fundo – DIN.	54
2.8.5 BMHB (1995) 54	
Figura 26 Parâmetros geométricos - BMHB.....	56
2.9 CASCAS CILÍNDRICAS.....	56
2.9.1 Considerações Iniciais.....	56
Figura 27 Características de uma casca.....	56
Figura 28 Elemento de casca cilíndrica.....	58
2.9.2 Método para Análise de Cascas Cilíndricas.....	60
2.9.3 Elementos Finitos.....	61
2.10 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	63
2.10.1 Teste de Hipóteses.....	64
Figura 29 Nível de significância.....	65
2.10.2 Análise de Variância.....	65
2.10.3 Teste de Tukey.....	67
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	69
3.1 CONCEITUAÇÃO.....	69
3.2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	70
3.3 DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE CÁLCULO.....	70
Figura 30 Planilha eletrônica – Dados de entrada.....	71
Figura 31 Planilha eletrônica – Dados de saída Norma ENV.....	71
Figura 32 Planilha eletrônica – Dados de saída da norma ACI.....	72
Figura 33 Planilha eletrônica – Dados de saída da norma BMHB.....	72
Figura 34 Planilha eletrônica – Dados de saída da norma DIN.....	73
Figura 35 Planilha eletrônica – Dados de saída da norma AS.....	73
Figura 36 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma ENV.....	74
Figura 37 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma ACI.....	74
Figura 38 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma BMHB.....	75
Figura 39 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma DIN.....	75
Figura 40 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma AS.....	76
3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	76
3.4.1 Parâmetros e metodologias de Análise.....	78
3.4.2 Análise dos resultados.....	78
3.5 ANÁLISE NUMÉRICA DO SILO.....	79

3.5.1	Característica do Silo.....	79
3.5.2	Método Numérico.....	79
3.5.3	Ansys	79
	Figura 41 Elemento para a casca elástica, SHELL 93.....	80
	Figura 42 Tensões no elemento de casca, SHELL 93.....	80
3.5.4	Esquema de análise.....	81
	4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	82
4.1	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	82
4.2	PROGRAMA COMPUTACIONAL.....	84
	Figura 43 Pressões – Norma ENV.....	84
	Figura 44 Pressões – Norma ACI.....	84
	Figura 45 Pressões – Norma BMHB.....	85
	Figura 46 Pressões – Norma DIN.....	85
	Figura 47 Pressões – Norma AS.....	85
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	86
	Tabela 3 Resultados das pressões (kgf.m-2) nas normas para D1 - ϕ_w 20°	86
	Tabela 4 Resultados das pressões (kgf.m-2) nas normas para D2 - ϕ_w 27°	87
	Tabela 5 Resultados das pressões (kgf.m-2) nas normas para D3 - ϕ_w 32°	87
	Tabela 6 Resultado da análise das pressões horizontais.....	89
	Tabela 7 Resultado da análise das pressões verticais - ϕ_i	90
	Tabela 8 Resultado da análise das pressões verticais - ϕ_w	90
	Tabela 9 Resultado da análise das pressões de atrito com a parede - γ	91
	Tabela 10 Resultado da análise das pressões de atrito com a parede - ϕ_i	92
4.4	ANÁLISE NUMÉRICA.....	92
3.3.1	Silo 1	92
	Figura 48 Silo 1 – Construção do silo.....	93
	Figura 49 Silo 1 – Construção da casca cilíndrica.....	93
	Figura 50 Silo 1 – Divisão em segmentos.....	93
	Figura 51 Silo 1 – Malha dos elementos.....	94
	Figura 52 Silo 1 – Condições de contorno.....	94
	Figura 53 Silo 1 – Aplicação da pressão constante.....	94
	Figura 54 Silo 1 – Resultado: deformada.....	95
	Figura 55 Silo 1 – Resultado: deformada e indeformada 1.....	95
	Figura 56 Silo 1 – Resultado: deformada e indeformada 2.....	96
3.3.2	Silo 2	96
	Figura 57 Silo 2 – Subdivisão das alturas.....	96
	Figura 58 Silo 2 – Casca cilíndrica.....	97
	Figura 59 Silo 2 – Subdivisão dos elementos.....	97
	Figura 60 Silo 2 – Malha dos elementos.....	98
	Figura 61 Silo 2 – Nós coincidentes.....	98
	Figura 62 Silo 2 – Condições de contorno.....	99
	Figura 63 Silo 2 – Aplicação de carga.....	99
	Figura 64 Silo 2 – Resultado: deformada e indeformada 1.....	99
	Figura 65 Silo 2 – Resultado: deformada e indeformada 2.....	100
3.3.3	Silo 3	100

Tabela 11 Pressões no silo 3.....	100
Figura 66 Silo 3 – Aplicação de carga.....	101
Figura 67 Silo 3 - Resultado: deformada e indeformada 1.....	101
3.3.4 Discussões	102
Figura 68 Silos 1, 2 e 3 Resultado: deformada e indeformada.....	102
103	
5 CONCLUSÕES.....	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
ANEXOS.....	115
ANEXO A Análise estatística – Pressão horizontal.....	116
Tabela 1A Teste de Tukey da pressão horizontal.....	116
Figura 1A Análise de Variância da Pressão Horizontal.....	117
ANEXO B Análise estatística – Pressão vertical.....	118
Tabela 1B Análise desdobramento norma x ângulo de atrito interno.....	118
Tabela 2B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo interno de 25°	
.....	119
Tabela 3B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo interno de 35°	
.....	119
Tabela 4B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo interno de 45°	
.....	120
Tabela 5B Análise desdobramento ângulo de atrito interno x norma.....	120
Tabela 6B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma ACI.	121
Tabela 7B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma AS...	121
Tabela 8B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma BMHB	
.....	122
Tabela 9B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma DIN.	122
Tabela 10B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma ENV	
.....	122
Tabela 11B Análise desdobramento norma x ângulo de atrito com a parede	
.....	123
Tabela 12B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo atrito com a	
parede de 20°.....	123
Tabela 13B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo atrito com a	
parede de 27°.....	124
Tabela 14B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo atrito com a	
parede de 32°.....	124
Tabela 15B Análise desdobramento ângulo de atrito com a parede x norma	
.....	125
Tabela 16B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x	
norma ACI.....	125
Tabela 17B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x	
norma AS.....	126
Tabela 18B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x	
norma BMHB.....	126
Tabela 19B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x	
norma DIN.....	127
Tabela 20B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x	
norma ENV.....	127
Figura 1B Análise de Variância da Pressão Vertical.....	128

Figura 2B Análise de Variância da Pressão Vertical – Dados transformados.....	128
ANEXO C Análise estatística - Pressão de atrito com a parede.....	129
Tabela 1C Análise desdobramento norma x peso específico.....	129
Tabela 2C Teste Tukey – Desdobramento norma x peso específico 500 kg.m-3.....	130
Tabela 3C Teste Tukey – Desdobramento norma x peso específico 1000 kg.m-3.....	130
Tabela 4C Teste Tukey – Desdobramento norma x peso específico 1500 kg.m-3.....	131
Tabela 5C Análise desdobramento peso específico x norma.....	131
Tabela 6C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma ACI.....	132
Tabela 7C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma AS.....	132
Tabela 8C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma BMHB.....	133
Tabela 9C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma DIN.....	133
Tabela 10C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma ENV.....	134
Tabela 11C Análise desdobramento norma x ângulo atrito interno.....	134
Tabela 12C Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo de atrito de 25°.....	135
Tabela 13C Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo de atrito de 35°.....	135
Tabela 14C Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo de atrito de 45°.....	136
Tabela 15C Análise desdobramento ângulo atrito interno x norma.....	136
Tabela 16C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma ACI.....	137
Tabela 17C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma AS.....	137
Tabela 18C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma BMHB.....	138
Tabela 19C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma DIN.....	138
Tabela 20C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma ENV.....	138
Figura 1C Análise de Variância da Pressão de Atrito com a Parede.....	139

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS MINÚSCULAS

α	Ângulo de inclinação do fundo do silo
α	Ângulo de inclinação da tremonha
α	Nível de significância
β	Erro tipo II
β	Efeito principal do fator B
β_x, β_θ	Rotações relativas em relação aos eixos
ε	Deformação específica ou unitária
ε_{ijk}	Erro experimental
ε_x	Deformação específica ou unitária na direção “x”
ε_y	Deformação específica ou unitária na direção “y”
Δ	Diferença mínima significativa
ϕ	Ângulo de atrito
ϕ_e	Ângulo de atrito efetivo
ϕ_i	Ângulo de atrito interno
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo do solo
ϕ_r	Ângulo de repouso do produto
ϕ_w	Ângulo de atrito do produto com a parede
ϕ_{wl}	Limite inferior do ângulo de atrito do produto com a parede
ϕ_{wu}	Limite superior do ângulo de atrito do produto com a parede
μ	Coefficiente de atrito do produto com a parede
μ	Média dos resultados
μ_l	Valor inferior do coeficiente de atrito do produto com parede
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Densidade
γ	Peso específico do produto
γ_u	Valor superior da densidade do produto
κ	Curvatura
E	Energia
Ω	Potencial das cargas externas

τ	Tensão de Cisalhamento
τ_i	Efeito principal do fator A
$(\tau\beta)_{ij}$	Efeito da interação entre os fatores A e B
σ	Tensão Normal
σ_x	Tensão normal na direção “x”
σ_z	Tensão normal na direção “z”
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais
$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$	Tensões principais efetivas
σ_c	Tensão inconfiada de ruptura
σ_{ct}	Tensão inconfiada de ruptura com o tempo
σ_v	Tensão normal vertical
σ_h	Tensão normal horizontal
σ_{ha}	Tensão normal lateral ativa
σ_{hp}	Tensão normal lateral passiva
σ_{fundo}	Pressão na base plana de um modelo de silo alto
σ^2	Variância
a_0	Distância genérica para cálculo da pressão
a_1	Abertura da boca da tremonha em cunha
c	Coesão
c'	Coesão efetiva
d	Diâmetro do silo
d_w	Incremento infinitesimal da ordenada w
d_{pv}	Incremento infinitesimal da pressão vertical “p _v ”
d_z	Incremento infinitesimal da ordenada z
e	Espessura da parede
e_i	Excentricidade de carregamento
e_{ij}	Erros ou desvios
g	Aceleração da gravidade
h	Altura
h	Altura efetiva do silo
h_s	Altura do cone formado pela superfície livre do produto
h_c	Altura do corpo do silo
h_{cob}	Altura da cobertura do silo
h_{cn}	Altura do cone da tremonha
h_t	Altura da tremonha
h_1	Distância da superfície 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

i	Inclinação
p	Carga uniformemente distribuída
p	Carregamento axial distribuído nos bordos do cilindro
p_a	Pressões laterais ativas
p_p	Pressões laterais passivas
p_h	Pressão horizontal na parede vertical
p_v	Pressão vertical
p_{vf}	Pressão vertical atuando no fundo plano
p_w	Pressão de atrito na parede vertical
q	Amplitude total estudentizada
r	Raio do silo
r	Número de repetições
s	Estimativa do desvio padrão residual
s'	Tensão normal efetiva
t_c	Valor crítico da estatística de teste
u	Pressão neutra
u^*, v^*, w^*	Componentes de deslocamento em qualquer ponto da casca
u, v, w	Componentes de deslocamento correspondentes ao plano médio
z	Ordenada a partir do nível de referência
z^*	Profundidade local
z'	Ordenada a partir do vértice da tremonha

LETRAS MAIÚSCULAS

A	Área da sessão transversal de um silo
C	Parâmetro de rigidez axial
C	Contrastes
D_1, D_2, D_3	Tipos de rugosidade da parede
E	Módulo de Elasticidade longitudinal do material
E_0	Empuxo em repouso
E_a	Empuxo ativo
E_p	Empuxo passivo
EYL	Efetivo lugar geométrico de deslizamento do produto
F	Parâmetro de rigidez à flexão
H_0	Hipótese de nulidade ou nula
H_1	Hipótese alternativa
IYL	Lugar geométrico de deslizamento do produto
K	Razão entre as pressões horizontal e vertical
K_a	Coefficiente de empuxo ativo
K_p	Coefficiente de empuxo passivo
K_0	Coefficiente de empuxo em repouso

K_u	Valor superior de K
K_i	Valor inferior de K
M_x, M_θ	Momentos fletores
$M_{\theta x}, M_{x\theta}$	Momentos torçores
N	Força normal
$P_{v,w}$	Força de compressão devida ao atrito na base da parede
P_w	Força de compressão sobre a parede por unidade de perímetro
Q	Força transversal cisalhante
U	Perímetro da seção A
U	Energia de deformação
U_b	Energia de deformação à flexão
U_m	Energia de membrana
V	Notação para caracterizar o tipo de fundo de um silo horizontal
YL	Lugar geométrico de deslizamento do produto
WYL	Lugar geométrico de deslizamento do produto na parede

LISTA DE ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS

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
DEM	Método de Elementos Discretos
DIN	Deutsche Industrie Norm
EUROCODE	European Committee for Standardization
FEA	Finite Element Analysis
ISO	International Organization for Standardization
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira Registrada
QM	Quadrado Médio
QMR	Quadrado Médio do Resíduo
QMTrat	Quadrado Médio dos Tratamentos
SNBATI	Syndicat National du Béton Armé et des Techniques Industrialisées
SQ	Soma Quadrado

RESUMO

Na engenharia, procura-se sempre construir estruturas resistentes, seguras e economicamente viáveis. O projeto seguro e econômico das estruturas é função das ações impostas; no caso de silos, não há uma norma brasileira que prescreva sobre seus projetos e ações, além disso, algumas divergências são observadas entre as normas estrangeiras. Este trabalho tem como objetivo principal a análise comparativa das prescrições das normas internacionais: ENV (1995), AS 3774 (1996), ACI 313 (1991), DIN 1055 (1987) e BMHB (1985), fazendo-se uma análise estatística entre elas, sendo elaborada uma planilha eletrônica de cálculo das pressões, podendo-se variar as propriedades, facilitar a análise e o desenvolvimento de um estudo teórico-experimental. Tem ainda como finalidade apresentar um estudo teórico das pressões em silos verticais, para isso, um estado da arte das teorias de pressões propostas pelos mais importantes pesquisadores foi desenvolvido e por último a modelagem de um silo para ser analisado através do software Ansys®. A análise comparativa estatística das principais normas estrangeiras mostrou a existência de diferenças bastante significativas entre os valores obtidos, sendo que no caso das pressões horizontais há diferenças de até 59% (entre norma BMHB e DIN) e que na média os menores valores são obtidos na Britânica e os maiores na Alemã. Verificou-se ainda que a maioria das normas estrangeiras adota a teoria de Janssen para a determinação das pressões horizontais. Em relação às pressões verticais, a diferença entre as normas chegou a quase 400% (entre normas ENV e AS), em média os menores valores são obtidos na norma Européia e os maiores na Australiana, observou-se ainda que o modelo de Janssen, sem nenhuma alteração é proposto pela norma ACI. E no caso das pressões de atrito com a parede os menores valores são obtidos na norma BMHB e os maiores na DIN, chegando-se a diferenças de 59% (entre norma BMHB e DIN). Em relação ao uso do programa Ansys® esboçou-se um plano inicial de modelagem de um silo, observando-se que o programa e a metodologia são úteis, podendo-se fazer um refinamento, comparar os resultados e variar a pressão conforme as diversas normas existentes, podendo ser desenvolvido em um trabalho futuro, fazendo-se um comparativo entre teórico e prático com uso de silo protótipo e células de pressão.

Palavras-chave: parâmetro K, análise estatística, análise numérica, normas internacionais.

SUMMARY

EVALUATION OF PRESSURES IN SILOS AS DIFFERENT INTERNATIONAL NORMS

In engineering it is always looked to construct resistant structures, safe and economically viable. The safe and economic project of the structures is function of the imposed actions; in the case of silos it does not have a Brazilian norm that it prescribes on its projects and action, moreover, some divergences are observed between the foreign norms. This main work as objective the comparative analysis of the lapsings of the international norms: ENV (1995), the 3774 (1996), ACI 313 (1991), DIN 1055 (1987) and BMHB (1985), becoming an analysis statistics between them, being elaborated an electronic spread sheet of calculation of the pressures, being able itself to vary the properties, to facilitate to the analysis and the development of an theoretician-experimental study. It still has as purpose to present a theoretical study of the pressures in vertical silos, for this, a state of the art of the theories of pressures proposals for the most important researchers was developed and finally the modeling of a silo to be analyzed through Ansys® software. The comparative analysis statistics of the main foreign norms showed the existence of sufficiently significant differences between the gotten values, being that in the case of the horizontal pressures it has differences of up to 59% (between norm BMHB and DIN) and that in the average the lesser values are gotten in the British and the greater in the German. It was still verified that the majority of the foreign norms adopts the theory of Janssen for the determination of the horizontal pressures. In relation to the vertical pressures, the difference between the norms arrived 400% almost (between norms ENV and), in average the lesser values is gotten in the European norm and the greater in the Australian, were still observed that the model of Janssen, without no alteration are considered by norm ACI. E in the case of the pressures of attrition with the wall the lesser values are gotten in norm BMHB and the greater in the DIN, having arrived themselves it 59% differences (between norm BMHB and DIN). In relation to the use of the Ansys® program an initial plan of modeling of a silo was sketched, observing itself that the program and the methodology are useful, being able itself to make a refinement, to compare the results and to vary the in agreement pressure the diverse existing norms, being able to be developed in a future work, becoming a comparative degree between practical theoretician and with silo use archetype and cells of pressure.

Keywords: parameter K, analysis statistics, numerical analysis, international norms.

1 INTRODUÇÃO

A ampliação da capacidade armazenadora brasileira, conservação dos produtos agrícolas e manutenção de estoques têm se tornado uma necessidade cada vez mais constante. Isso se deve à análise de alguns dados, como o agronegócio, que é, atualmente, o setor propulsor da economia brasileira, movimentando no ano de 2006 pouco menos de 30% do Produto Interno Bruto. Observa-se, ainda, que o mesmo gerou 37% do total de empregos e representou 36% das exportações (FREITAS, 2006). Dentre os produtos da agropecuária brasileira destacam-se os grãos, que têm alcançado recordes nas últimas safras, graças ao uso de tecnologias de última geração.

A despeito de todo este vultoso, as infra-estruturas de armazenagem têm se desenvolvido de forma aleatória, sendo que no período compreendido entre os anos de 2001 e 2006 a capacidade de armazenagem no País teve aumento de 34,4%. Nesse mesmo espaço de tempo, a produção de grãos teve um crescimento menor, de 23,1%. Esse fato permitiu que em 2006 houvesse o equilíbrio entre a oferta de grãos e a demanda por armazenagem, ambas, respectivamente, com 121,3 e 121,7 milhões de toneladas, verificando-se que em poucos anos a construção destas estruturas tem crescido de forma assustadora (CONAB, 2006).

De acordo com SILVA (2000), essas estruturas para armazenamento devem satisfazer a finalidade precípua de armazenar o produto por um determinado período e manter suas qualidades desejáveis para utilização futura. Assim, as estruturas para armazenamento devem ser suficientemente resistentes para suportar o material armazenado, protegê-lo de intempéries, permitirem o controle da temperatura e umidade dos grãos, controle de insetos, roedores e pássaros e, ainda, que sejam de fácil operação. A armazenagem divide-se, basicamente, em dois tipos: sistema convencional e a granel. No sistema convencional, os produtos são armazenados em sacarias, formando

blocos individualizados, segundo a sua origem e suas características. Já no sistema a granel, o produto é armazenado sem segregação, em silos ou armazéns graneleiros.

A necessidade de ampliar a capacidade da rede armazenadora, atendendo as exigências dos novos materiais de construção e das solicitações de projeto, tornaram o estudo de silos bastante empolgante para os pesquisadores, projetistas e construtores.

Visando a industrialização do agronegócio, é fundamental que os sistemas de armazenagem sejam eficazes. Deste modo, observa-se que o sistema a granel propicia redução do custo e tempo de operação devido à eliminação de sacaria e mecanização, maior facilidade na operação de controle de pragas, temperatura e umidade, maior facilidade no manuseio e menor custo de mão de obra. Nessas unidades, o fluxograma do processo produtivo compreende as etapas de recepção, pré-limpeza, secagem, limpeza, armazenamento, aeração e expedição.

Dentre os diversos assuntos a serem desenvolvidos e avaliados na área de silos armazenadores, a análise do comportamento das estruturas tem se destacado nas diversas áreas de pesquisa relacionada às estruturas de armazenamento. Nas últimas décadas, muitos trabalhos foram desenvolvidos em relação à determinação das pressões nos silos, como VAN ZANTEN et al. (1977), Bischara et al. (1983) citados por FREITAS (2001), CALIL JR. (1987), GOMES, NEGRISOLI & CALIL JR. (1997) e Horabik et al. (1999) citados por FREITAS (2001). Contudo, observa-se que no Brasil, até o presente momento, os procedimentos de cálculo estrutural de silos não estão sistematizados em uma única norma.

A determinação das pressões de forma direta vem sendo estudada por diversos pesquisadores nos últimos tempos. Embora seja o modelo mais utilizado em todo o mundo, a previsão das pressões atuantes nas paredes e fundo, devido ao produto armazenado, é bastante complexa e há divergências entre pesquisadores e as normas estrangeiras. Tal complexidade é decorrente da heterogeneidade dos parâmetros dos produtos. Observam-se diferentes resultados obtidos experimentalmente para as pressões horizontais, verticais e

a relação entre elas, parâmetro K. Isto tem levado diversos pesquisadores a formularem diferentes teorias sobre as pressões nos silos.

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 (FREITAS, 2001).

Para uma estrutura ser segura e econômica, é importante que as cargas não sejam subestimadas nem especificadas como maiores que as estritamente necessárias. Um exame detalhado dos códigos normativos e regulamentações de cálculo por todo o mundo indica grandes diferenças existentes 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 (FREITAS, 2001).

Deste modo, fazem-se necessários maiores estudos sobre o tema, para que, com base nestes, seja possível a redação de um texto que normalize os projetos e os cálculos estruturais dos silos.

O objetivo principal do trabalho foi uma análise comparativa entre algumas normas internacionais, fazendo-se uma análise estatística entre elas, e elaborada uma planilha eletrônica de cálculo das pressões.

Além disso, este trabalho se propõe a um estudo teórico sobre as pressões internas em silos cilíndricos verticais. Para isso, um estudo da arte das teorias de pressões propostas pelos mais importantes pesquisadores foi desenvolvido. E por último, foi realizada uma análise numérica através de elementos finitos, a fim de verificar as deformações da estrutura, modelando-se um silo com utilização do programa Ansys®.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SILOS

A palavra SILO tem origem da palavra SIRUS (do latim) que deriva da palavra grega SIROS, que significa lugar profundo, cavernoso e escuro (CALIL JR., 1984). Para SILVA (2000), silos agrícolas ou silos graneleiros são estruturas que apresentam condições necessárias para a preservação da qualidade de produtos agrícolas a granel por longos períodos de armazenamento, especificamente grãos ou sementes como a soja, milho e trigo.

Os silos são células individualizadas, geralmente cilíndricas, construídas em concreto, chapas metálicas ou alvenaria e, quando agrupadas, denominam-se baterias, podendo ou não ser dotadas de sistema de ventilação (BADIALE & SÁLES, 1999).

Os primeiros grandes silos foram construídos em madeira, a partir de 1800, tendo até vinte metros de altura. A princípio, os cálculos eram feitos ponderando que o produto armazenado provocava pressão horizontal como os líquidos. Contudo, posteriormente, constatou-se que estas pressões eram muito elevadas, graças ao atrito do produto com a parede. Este comportamento foi verificado por Janssen em 1895, que em pouco tempo modificou a forma de cálculos de silos. Juntamente, houve um progresso no uso de materiais de construção que também proporcionou o aumento da capacidade de armazenamento dos silos (ARAÚJO & CALIL JR., 1995).

Dentre os aspectos históricos das pesquisas sobre silos, JENIKE & JOHANSON (1968) relatam que os primeiros grandes silos foram construídos em 1860 para o armazenamento de grãos. Desde então, milhares de grandes e pequenos silos têm sido construídos para o armazenamento de uma extensa variedade de pós, grãos, torrões, fibras, etc.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SILOS

Segundo as normas estrangeiras, os silos podem ser classificados de acordo com diversas características, dentre as quais se destacam: geometria do silo, tipo de material estrutural utilizado, tipo de fluxo durante o descarregamento, geometria do fluxo e tipo de fundo.

Quanto à classificação geométrica, os silos cilíndricos subdividem-se em verticais, quando o diâmetro da base é menor que a altura, e em horizontais, quando o diâmetro da base é maior que a altura. Comparando-se esses dois tipos de silos, constata-se que os verticais exigem menos investimentos por quantidade unitária (tonelada) armazenada (BADIALE & SÁLES, 1999).

Segundo Safarian & Harris (1985) citados por FREITAS (2001), entre os pesquisadores também não há consenso em relação ao que seja uma célula alta ou baixa, além disso, as normas internacionais não são unânimes em relação a essa classificação, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 Classificação dos silos segundo a relação h/d

NORMA	CLASSIFICAÇÃO		
	Baixo	Medianamente esbelto	Esbelto
AUSTRALIANA AS 3774/1996	$h/d < 1$	$1 < h/d < 3$	$h/d > 3$
EUROCODE ENV 1991/1995	$h/d < 1,5$	-	$h/d \geq 1,5$
AMERICANA ACI 313/1991	$h/d \leq 2$	-	$h/d > 2$
ALEMÃ DIN 1055/1987	$h/d < 2,5\mu$	$2,5\mu \leq h/d \leq 5\mu$	$h/d > 5\mu$
INGLESA BMHB - 1985	$h/d \leq 1,5$	-	$h/d > 1,5$
CANADENSE CFBC/1983	$h/d \leq 0,75$	-	$h/d > 0,75$
FRANCESE SBATI/1975	$h/d < 2,5$	-	$h/d \geq 2,5$
ISSO 11697/1995	$h/d < 1,5$	-	$h/d > 1,5$
DIN 1055-6/ 2000	$h/d < 1,5$	-	$h/d > 1,5$

Fonte: Freitas (2001).

Outros atributos geométricos também diferenciam os silos, como por exemplo, o tipo de fundo, que pode se apresentar de forma cônica (ou com tremonha) ou plana; ainda, verificam-se silos elevados ou semi-enterrados (SILVA, FREIRE & CALIL JR., 1998).

Sobre o material empregado, há maior predominância na utilização de silos metálicos em chapa ondulada de aço galvanizado. Segundo REIMBERT

(1979) estas chapas onduladas são assim conformadas, com o objetivo de proporcionar maior rigidez ao conjunto e facilitar operações, prevenindo deformações durante o manejo e montagem. Silos de pequeno a médio porte em concreto armado tornam-se muito onerosos para o agricultor, sendo estes mais apropriados para armazéns graneleiros e mais viáveis economicamente a partir da capacidade estática de cinco mil toneladas (HAYNAL, 1989).

2.3 MECÂNICA DOS SOLOS

O campo da mecânica dos solos teve uma significativa influência na pesquisa considerando as peculiaridades das análises feitas na área de processamento dos produtos armazenados. As tensões atuantes numa massa de solo são bem maiores do que aquelas encontradas durante o processamento dos produtos armazenados. Enquanto a mecânica dos solos trata das tensões antes da ruptura do solo as teorias para silos se preocupam com as condições sobre as quais a ruptura e o fluxo de um determinado produto armazenado pode ocorrer.

Dessa forma, as similaridades entre os dois campos de estudo permitem algumas aplicações comuns. Os primeiros pesquisadores a tratar das pressões em silos de células baixas foram Airy em 1897 e Cain em 1904, baseados nas teorias de Coulomb e Rankine da mecânica dos solos. Os irmãos Reimbert em 1941 também baseados nas mesmas teorias desenvolveram cálculos e citam a sua aplicação para silos horizontais (GOMES, 2000a).

Entre as normas internacionais a Norma Canadense trata dos silos de células baixas, baseando-se na teoria de Rankine com aplicação restrita para armazenamento de forragem (FORTES FILHO, 1985). REIMBERT (1979), seguindo a teoria dos muros de arrimo, que considera a distribuição das pressões linear, propõe uma formulação teórica para os esforços nas paredes de silos horizontais de grande capacidade.

2.3.1 Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento pode ser definida como o máximo valor que a tensão cisalhante pode alcançar ao longo de um plano qualquer no

interior do maciço sem que haja ruptura da estrutura do solo. Como uma grande parte dessa resistência provém do atrito entre as partículas do solo, ela depende da tensão normal que age sobre este plano (BARROS, 2006).

A lei que determina a resistência ao cisalhamento do solo é o critério de ruptura ou de plastificação do material; trata-se de um modelo matemático aproximado que relaciona a resistência ao estado de tensão atuante. No caso dos solos, o critério mais amplamente utilizado é o critério de Mohr-Coulomb, que estabelece uma relação entre a resistência ao cisalhamento e a tensão normal (σ), assumindo que a envoltória de resistência ao cisalhamento do solo tem a forma de uma reta dada pela equação (1).

$$\tau = c + \sigma \cdot \text{tg}\phi_i \quad (1)$$

na qual τ é a resistência ao cisalhamento, c é chamada de coesão.

A coesão e o ângulo de atrito interno (ϕ_i) são os parâmetros da resistência ao cisalhamento do solo. Essa determinação pode ser feita por ensaios de laboratório, como o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio de compressão triaxial; podem também ser estimados a partir de ensaios de campo, ou mesmo a partir de outras características do material.

É importante notar que c e ϕ_i não são parâmetros intrínsecos do solo, mas parâmetros do modelo adotado como critério de ruptura. Além disso, o valor desses parâmetros depende de outros fatores, como teor de umidade, velocidade e forma de carregamento e condições de drenagem. Esses valores podem, inclusive, variar com o tempo, o que leva à conclusão de que o valor do empuxo também pode variar com o tempo (BARROS, 1992), havendo divergências no cálculo do cisalhamento de solos coesivos e não coesivos.

Solos não coesivos são representados pelas areias e pedregulhos, também chamados de solos granulares (BARROS, 2006). A resistência ao cisalhamento desses solos se deve principalmente ao atrito entre as partículas que os compõem. Assim, a envoltória de resistência pode ser expressa pela equação (2).

$$\tau = \sigma \cdot \text{tg}\phi_i \quad (2)$$

ou seja, a coesão c é nula, e o ângulo de atrito interno é o único parâmetro de resistência.

Os principais fatores que determinam o ângulo de atrito interno são (BARROS, 2006):

1. Compacidade: é o principal fator. Quanto maior a compacidade, maior o esforço necessário para se romper a estrutura das partículas e, conseqüentemente, maior o valor de ϕ_i ;
2. Granulometria: nas areias bem graduadas as partículas menores ocupam os vazios formados pelas partículas maiores, conduzindo a um arranjo mais estável, com maior resistência. Além disso, as areias mais grossas tendem a se dispor naturalmente de forma mais compacta, devido ao peso próprio de cada partícula. Isto faz com que, em geral, o valor de ϕ_i seja um pouco maior nas areias grossas e pedregulhos;
3. Forma das partículas: partículas mais arredondadas oferecem menos resistência do que partículas mais irregulares. Assim, estas últimas apresentam ϕ_i maior;
4. Teor de umidade: a umidade do solo tem pequena influência na resistência das areias. Isto se deve ao fato de a água funcionar como um lubrificante nos contatos entre as partículas, diminuindo o valor de ϕ_i .

O comportamento dos solos argilosos no cisalhamento é muito mais complexo do que o dos solos granulares; isto se deve ao tamanho das partículas que compõem as argilas (partículas de tamanho menor que 0,002 mm). Nestas condições, a superfície específica, definida como a relação entre a superfície total de todas as partículas e o volume total dos sólidos, é muito maior no caso das argilas. Isto faz com que forças de superfície de natureza físico-químicas se tornem preponderantes no comportamento do solo. Estas forças dependem muito da distância entre as partículas. Assim, a resistência ao cisalhamento aumenta com o adensamento, quando as partículas são aproximadas umas das outras por efeito de um carregamento. Quando este carregamento é retirado, as forças de superfície impedem o retorno das partículas à situação anterior e surge então a coesão (BARROS, 1994).

A presença de água nos vazios do solo argiloso também influencia muito na sua resistência. Isto se deve, em parte, ao fato da água provocar um afastamento entre as partículas, diminuindo a coesão. Por outro lado, em solos

argilosos parcialmente saturados, o efeito da sucção causada por forças de capilaridade tende a aumentar a coesão.

Outra característica importante ligada à presença de água, que influi no comportamento dos solos argilosos, é a sua baixa permeabilidade. Enquanto nas areias qualquer excesso de poro-pressão provocado pelo carregamento se dissipa quase imediatamente, no caso das argilas esta dissipação é muito mais lenta. Distinguem-se, duas situações extremas: a situação imediatamente posterior à aplicação da carga, quando pouca ou nenhuma dissipação de poro-pressão ocorreu, chamada de situação de curto prazo ou não drenada e aquela de longo prazo ou drenada, após a total dissipação de toda a poro-pressão causada pelo carregamento, sendo assim o comportamento do solo em cada uma dessas duas condições diferente (MARINHO, 2005).

A envoltória de resistência que representa a situação de curto prazo é denominada envoltória rápida ou não drenada τ_u . Esta envoltória é utilizada na análise, quando se admite que no campo não ocorreu qualquer dissipação da poro-pressão ocasionada pela carga aplicada sobre o solo. Além disso, admite-se também que o valor da poro-pressão que age no campo é semelhante ao que age nos ensaios de resistência e, portanto, não necessita ser determinado. No caso de solos saturados, a envoltória rápida não apresenta atrito, sendo $\tau_u = c_u$, na qual c_u é chamada de coesão não drenada (ALEXANDRE, 2006). Isso ocorre, porque o aumento de pressão confinante não se traduz num aumento da resistência do solo, já que sem drenagem não ocorre adensamento e então o aumento do confinamento é transferido para a água e se traduz num aumento igual da poro-pressão.

No outro extremo, a situação de longo prazo é caracterizada pela dissipação de toda a poro-pressão causada pela carga. A envoltória de resistência que representa essa situação é chamada de envoltória efetiva τ' e é utilizada para se analisar situações em que toda a poro-pressão causada pelo carregamento se dissipou. Nesse caso, a análise é feita em termos de tensões efetivas e é necessário determinar as poro-pressões devidas ao lençol freático, quando presente.

Em argilas, normalmente adensadas e saturadas, a envoltória efetiva τ não apresenta coesão, dada pela equação (3).

$$\tau' = \sigma' \cdot \text{tg}\phi' \quad (3)$$

onde τ' é a tensão normal efetiva e ϕ' é o ângulo de atrito efetivo do solo.

A coesão efetiva surge apenas nas argilas pré-adensadas, como efeito do sobreadensamento do solo. Para pressões confinantes abaixo da pressão de pré-adensamento, a resistência ao cisalhamento é superior à da argila normalmente adensada (MONTEIRO, 2006). Ao se aproximar, esta envoltória de uma reta num intervalo de tensões de trabalho que inclui tensões abaixo da pressão de pré-adensamento, a envoltória efetiva é calculada pela equação (4).

$$\tau' = c' + \sigma' \cdot \text{tg}\phi' \quad (4)$$

onde “ τ ” é a coesão efetiva.

Na determinação de empuxos atuantes sobre estruturas de arrimo, em geral é mais indicada análise em termos de tensões efetivas, utilizando-se a envoltória de resistência efetiva do solo. Isso porque a hipótese de empuxo ativo caracteriza um descarregamento do solo e a situação de longo prazo é, em geral, mais desfavorável.

2.3.2 Empuxo de terra

Uma conceituação importante se faz necessária quando se trata de esforços sobre paredes de contenção, de produtos granulares e pulverulentos, o empuxo é a resultante das pressões laterais de um material, que atuam sobre uma estrutura de contenção (MONTEIRO, 2006).

MACHADO & MACHADO (1997) dizem que as obras de contenção exigem, em seus dimensionamentos e análises de estabilidade, o conhecimento dos valores dos empuxos. Tais estruturas freqüentemente requerem verificações adicionais no seu dimensionamento, não só a análise da sua estabilidade global, como a segurança de seus elementos de construção.

Para avaliar o empuxo de terra que atua sobre uma estrutura, Terzaghi (1943), citado por ALEXANDRE (2006), construiu um modelo, utilizando areia pura, colocada atrás de um anteparo vertical, que podia sofrer movimentos de translação. A princípio mediu o valor da força necessária para manter o anteparo estático, a qual denominou de Empuxo em repouso (E_0). A seguir provocou translações no anteparo de forma a afastá-lo da areia, ao valor da força ele denominou de Empuxo ativo (E_a). Com movimentos de translação

contra a massa de areia ele mediu o Empuxo passivo (E_p), no momento de ruptura do maciço. Com os resultados obtidos construiu o gráfico da Figura 1, lançando os valores da força sobre o anteparo em função da translação por ele sofrida nos dois sentidos, GAIOTO (1979).

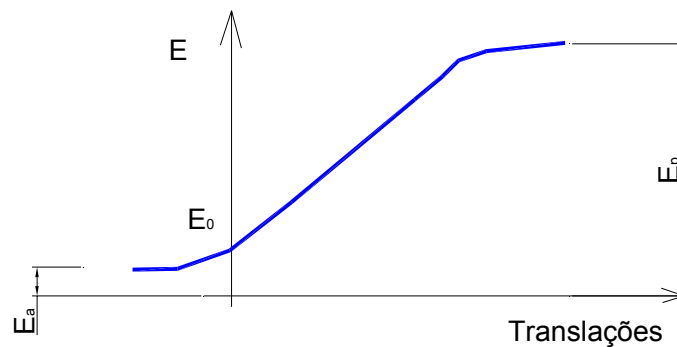


Figura 1 Empuxo ativo, passivo e em repouso.
Fonte: Gaioto (1979).

A relação entre as pressões lateral e vertical sobre um elemento de solo a uma profundidade qualquer, atuantes sobre a face vertical e a face horizontal, é denominada de coeficiente de empuxo. As tensões σ_x e σ_z em um elemento de solo a uma profundidade z são independentes de x e representam as tensões principais segundo equação (5).

$$\sigma_z = \gamma \cdot Z \quad (5)$$

onde γ é o peso específico do solo.

Pela equação (6), calcula-se o K_0 , denominado coeficiente de empuxo em repouso.

$$\sigma_x / \sigma_z = K_0 \quad (6)$$

Se sobre a superfície do maciço é aplicada uma carga uniformemente distribuída p têm-se as equações (7) e (8).

$$\sigma_z = \gamma \cdot Z + p \quad (7)$$

$$\sigma_x = K_0 \cdot \gamma \cdot Z + K_0 \cdot p \quad (8)$$

No caso do solo não sofrer expansão ou compressão lateral ($\epsilon_x = \epsilon_y = 0$), da teoria da elasticidade obtêm-se a equação (9).

$$\sigma_x = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_z \quad (9)$$

Sendo ν o coeficiente de Poisson, logo K_0 é obtido pela equação (10).

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (10)$$

Segundo GOMES (2000a), para solos arenosos e argilas adensadas, Jáky determinou uma correlação empírica entre o coeficiente de empuxo em repouso e o ângulo de atrito interno ϕ_i pela equação (11).

$$K_0 = 1 - \text{sen} \phi_i \quad (11)$$

Esta expressão também é indicada para o valor de K para as pressões de carregamento do silo, de acordo com Pieper e Wenzell, citados por GAYLORD JR. & GAYLORD (1984).

Segundo MACHADO & MACHADO (1997), os empuxos laterais de solo sobre uma estrutura de contenção são normalmente calculados por intermédio de um coeficiente, que é multiplicado pelo valor da tensão vertical efetiva naquele ponto. O valor deste coeficiente irá depender do processo de interação solo/estrutura. Estes coeficientes são denominados de coeficiente de empuxo do solo, que dependem da direção do movimento lateral imposto pela estrutura de contenção.

O empuxo de terra que atua sobre um suporte que resiste, mas cede certa quantidade e que depende de suas características estruturais, denomina-se empuxo de terra ativo (E_a), ou seja, o solo está empurrando a estrutura, como mostra a Figura 2(a). Quando a parede é que avança contra o solo tem-se então o empuxo passivo (E_p), ou seja, a estrutura empurra o solo, como se pode notar na Figura 2(b). As pressões correspondentes chamam-se ativa e passiva e os coeficientes de empuxo ativo, K_a , e passivo, K_p (CAPUTO, 1988).

Para a determinação dos empuxos ativo e passivo, podem ser utilizadas duas teorias: a de Rankine, que analisa as tensões em um elemento de solo no estado de equilíbrio plástico, com o auxílio da teoria de Mohr, e a de Coulomb, que analisa o equilíbrio de uma cunha de maciço, adjacente à estrutura de arrimo e determina a reação que a estrutura deve aplicar sobre a cunha, quando é mobilizada toda a resistência ao cisalhamento do maciço e o atrito na superfície de contato entre o muro e o terrapleno, GAIOTO (1979).

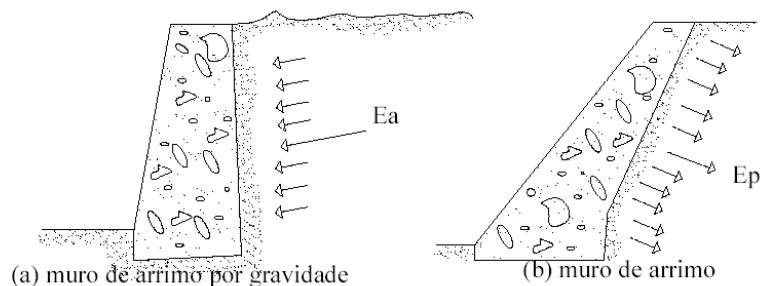


Figura 2 Empuxos.

Fonte: Moliterno (1994).

2.3.3 Teoria de Rankine

As principais hipóteses adotadas por Rankine para representar o empuxo foram as seguintes:

- Plastificação total do solo;
- Não leva em consideração o atrito entre solo/muro;
- Considera a distribuição triangular das tensões;
- Maciço homogêneo e de superfície horizontal.

A Teoria de Rankine possibilita o cálculo do empuxo ativo ou passivo em uma estrutura de contenção com paramento vertical, incluindo superfícies de solo inclinado de β com a horizontal (SILVA, 2000).

Segundo MACHADO & MACHADO (1997), os processos práticos utilizados para a determinação dos empuxos de terra são métodos de utilização de equilíbrio limite. Admite-se, que a cunha de solo situada em contato com a estrutura de suporte esteja num dos possíveis estados de plastificação, ativo ou passivo. Esta cunha tenta deslocar-se da parte fixa do maciço e sobre ela são aplicadas as análises de equilíbrio dos corpos rígidos. A análise de Rankine apóia-se nas equações de equilíbrio interno do maciço, cujas equações são definidas para um elemento infinitesimal do meio e estendida a toda massa plastificada através de integração.

ALEXANDRE (2006) diz que as solicitações internas são as reações que se desenvolvem na cunha, como consequência das solicitações externas. Para resolução das equações de equilíbrio, todos os pontos dentro da cunha de ruptura são supostos em estado limite e as tensões se relacionam pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Segundo Lambe (1974), citado por ALEXANDRE (2006), a presença de atrito ou adesão na interface solo/muro gera tensões tangenciais que contribuem para resistir ao deslocamento da cunha plastificada; a utilização da teoria de Rankine faz com que o empuxo ativo seja superestimado e o empuxo passivo subestimado.

Solos não coesivos apresentam a variação das tensões horizontais linearmente com a profundidade e o empuxo consistirá na integração das tensões laterais ao longo da altura, apresentando diagrama resultante triangular. Ao analisar o estado de tensão de um elemento de solo, localizado a uma profundidade “z”, junto ao anteparo da Figura 3, pode-se determinar a tensão vertical σ_v , pela equação (12).

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (12)$$

onde γ é o peso específico do solo.

Afastando-se do anteparo do solo, até a formação do estado ativo, calcula-se a tensão horizontal, que pode ser determinada a partir da envoltória de resistência do material, como mostrado na Figura 3.

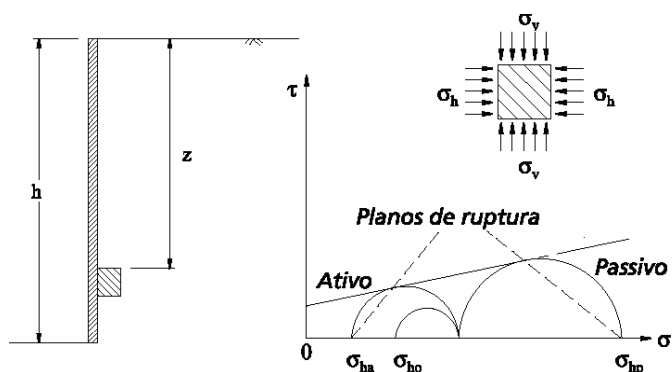


Figura 3 Determinação da pressão lateral – Rankine.
Fonte: Moliterno (1994).

Neste instante, a tensão horizontal σ_h é dada pela equação (13).

$$\sigma_h = K_a \cdot \gamma \cdot z - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_a} \quad (13)$$

sendo K_a denominado coeficiente de empuxo ativo, dado pela equação (14).

$$K_a = \frac{\sigma_{ha}}{\sigma_v} = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) = \frac{1 - \operatorname{sen}\phi}{1 + \operatorname{sen}\phi} \quad (14)$$

onde σ_{ha} é a tensão normal lateral ativa e σ_v é a tensão normal vertical.

O cálculo do empuxo passivo, segundo a teoria de Rankine, consiste numa aplicação da teoria de equilíbrio passivo dos maciços terrosos. Tratando-se da reação que o solo oferece a uma estrutura de contenção, que é empurrado ou puxado contra o maciço terroso (MAGALHÃES, 2003).

No caso do anteparo se mover contra o solo até o estado passivo, obtém-se a equação (15).

$$\sigma_h = K_p \cdot \gamma \cdot z + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p} \quad (15)$$

A determinação do coeficiente de empuxo para solos granulares se dá através da equação (16).

$$K_p = \frac{\sigma_{hp}}{\sigma_v} = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) = \frac{1 + \operatorname{sen}\phi}{1 - \operatorname{sen}\phi} \quad (16)$$

onde σ_{hp} é tensão normal lateral passiva e σ_v é a tensão normal vertical.

A Figura 4 ilustra como é calculado o empuxo para o caso passivo, na qual a força é aplicada no terço inferior da altura, quando a parede se desloca contra o terrapleno. As direções das superfícies de ruptura nos estados ativo e passivo são dadas pelo gráfico da Figura 4 (Deslocamento).

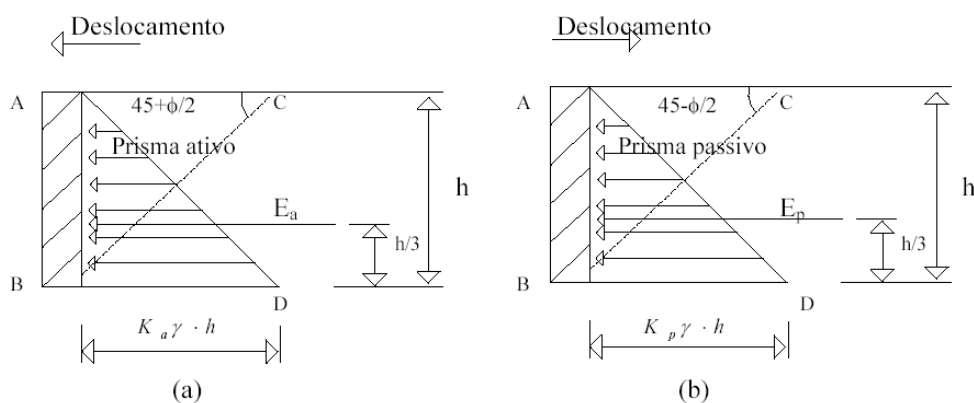


Figura 4 Comportamento da pressão vertical e horizontal – Rankine.
Fonte: Caputo (1998).

Caso a superfície do solo não seja horizontal, exibindo uma inclinação “ i ”, o valor da pressão vertical p_v é dado pela equação (17), Figura 5.

$$p_v = \gamma \cdot Z \cdot \cos i \quad (17)$$

Como a tensão vertical p_v possui uma obliquidade “ i ” em relação à superfície do elemento de solo mostrado, esta pode ser decomposta em uma tensão normal σ e uma tensão de cisalhamento τ , equações (18) e (19).

$$\sigma = p_v \cdot \cos i = \gamma \cdot Z \cdot \cos^2 i \quad (18)$$

$$\tau = p_v \cdot \sen i = \gamma \cdot Z \cdot \sen i \cdot \cos i \quad (19)$$

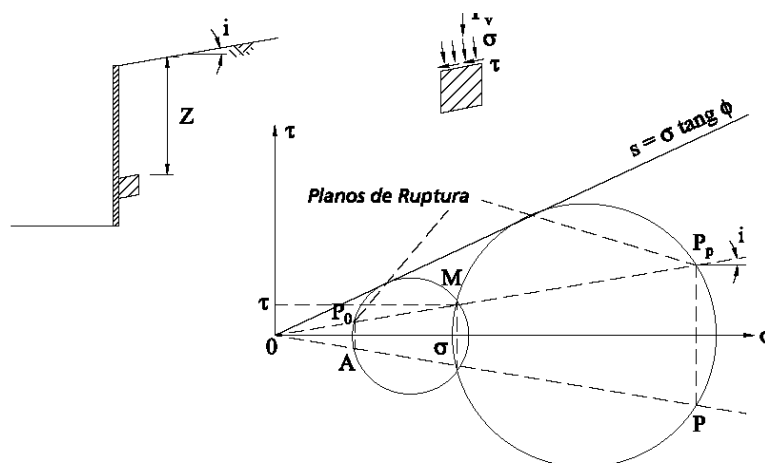


Figura 5 Determinação da pressão lateral– Rankine.
Fonte: Caputo (1998).

2.3.4 Teoria de Coulomb

As hipóteses básicas adotadas por Coulomb foram:

- Solo homogêneo e isotrópico;
- Ruptura em superfície de plastificação plana;
- Considera o atrito entre solo/muro.

Na teoria de Coulomb, considera-se o equilíbrio limite de uma cunha de solo com seção triangular, que desliza pela perda de resistência ao cisalhamento ou atrito, delimitada pelo tardo do muro e pelas superfícies do retroaterro e de ruptura. A solução do problema não é rigorosamente correta,

pois considera unicamente duas equações de equilíbrio de forças, desprezando o equilíbrio de momentos (MOLITERNO, 1994).

Em relação à teoria de Rankine, o método de Coulomb tem aplicação mais ampla, pois vale para condições irregulares de geometria de muro e superfície de retroaterro, sem desprezar a resistência mobilizada entre o muro e o solo. MAGALHÃES (2003) diz que embora a teoria de Coulomb só se aplique aos solos não coesivos, está mais próxima das condições vigentes nos casos de empuxo de terra, pois leva em consideração o atrito entre o material que exerce o empuxo e a superfície do muro, sobre a qual se aplica o empuxo.

Segundo MACHADO & MACHADO (1997), no empuxo ativo o muro se movimenta de modo que o solo é forçado a mobilizar a sua resistência ao cisalhamento, até a sua ruptura iminente. A ativação da resistência ao cisalhamento do solo pode ser entendida como sendo o fim do processo de expansão que se desencadeia no solo a partir de uma posição em repouso, ou seja, o valor do empuxo sobre a estrutura de contenção vai diminuindo, com a expansão, até atingir um valor crítico, no limiar da ruptura, ou da plastificação.

Para se quantificar o empuxo ativo ou o passivo sobre uma estrutura de arrimo, admite-se que no instante da mobilização total da resistência do solo formam-se superfícies de deslizamento ou de ruptura no interior do maciço. Estas superfícies delimitariam uma parcela do maciço que se movimentaria em relação ao restante do solo, no sentido do deslocamento da estrutura. Se esta parcela do solo for considerada como um corpo rígido, o empuxo pode então ser determinado do equilíbrio das forças atuantes sobre este corpo rígido. O método de Coulomb admite que tais superfícies de ruptura são planas e o empuxo é aquele que age sobre a mais crítica das superfícies de ruptura planas. A vantagem deste método reside no fato de que se pode considerar a ocorrência de atrito entre a estrutura de arrimo e o solo, além de possibilitar a análise de estruturas com o paramento não vertical (MAGALHÃES, 2003).

2.4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ARMAZENADOS

Os silos são estruturas que estão sujeitas a uma série de ciclos de carregamento – armazenamento - descarga, produzindo uma distribuição das pressões nas paredes dependentes da interação de alguns fatores. As medidas

desses parâmetros a serem consideradas estão sujeitas a variações espaciais e temporais. A interação dos parâmetros produz um tipo de tensão no produto armazenado durante o carregamento e o armazenamento, que afeta a grandeza e a distribuição das pressões nas paredes dos silos e na massa dos produtos (CHEUNG & CALIL JR., 2006).

Diversos autores vêm estudando o comportamento dessas propriedades e nas fases de operação de um silo e procedimentos para a sua determinação. De acordo com SILVA (1993), a variabilidade espacial e temporária das pressões devidas aos produtos armazenados em silos impede que sejam calculadas com certeza e precisão absoluta. Com intuito de caracterizar os principais fatores que afetam as medições das pressões são mostrados na Tabela 2 aqueles que são mensuráveis e que durante a condução dos ensaios podem ser alterados.

Tabela 2 Fatores que afetam as pressões nas paredes dos silos

Propriedade dos produtos armazenados	Características dos silos (sistema)	Modos de operação (ações)
Peso específico	Altura de carga	Vazão de carga
Ângulo de atrito interno	Seção transversal	Vazão de descarga
Ângulo de atrito com a parede	Geometria da descarga	Fluxo
Forma, dimensão e distribuição da partícula	Obstruções internas	Carregamento
Resistência elástica e cisalhante	Rigidez na parede	Descarga
Coesão	Rugosidade da parede	Excentricidade de carregamento
Consolidação		Excentricidade de descarga
Umidade		
Temperatura		

Fonte: Calil Jr. (1990).

Assim as propriedades físicas dos produtos armazenados são importantes porque determinam o comportamento das pressões que o produto exerce sobre paredes e fundo de silos e as condições de fluxo nas operações de descarga. Apesar disso, não há ainda consenso sobre suas formas de determinação, e seus valores variam significativamente entre as normas existentes (BANDEIRA, 1997).

Segundo CALIL JR. et al. (1997), a determinação das propriedades físicas dos produtos a serem armazenados é o primeiro passo para o projeto

estrutural de silos verticais e deve ser realizada nas condições mais severas daquelas que podem ocorrer.

As normas internacionais destacam as propriedades e informam sobre sua importância, variabilidade, métodos e equipamentos para determinação. Vários pesquisadores considerando tal relevância desenvolveram estudos neste campo com objetivo de padronizar os métodos de ensaios e conseqüentemente os valores a serem aplicados nos cálculos.

As propriedades dos materiais armazenados são obtidas em testes de laboratório usando células especiais de cisalhamento desenvolvidas para armazenamento de sólidos. Há três tipos básicos de aparelhos nomeados segundo os seus inventores, quais sejam: Jenike, Walker e Pesch. Dentre estes, o mais utilizado em todo o mundo é o de Jenike (CALIL JR., 1990).

Segundo Rotter et al. (1998), citados por DINIZ & NASCIMENTO (2006), 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.

Pieper & Schultz (1980), citados por GOMES (2000a), propuseram um modelo para determinação das pressões verticais e horizontais de forma indireta. Este trabalho resultou na determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados como o ângulo de atrito interno ϕ_i e o ângulo de atrito com a parede ϕ_w , formando um banco de dados de alguns produtos, servindo de subsídio para a norma Alemã.

MILANI (1993) também desenvolveu um importante trabalho utilizando o equipamento (TSG 70-140) para determinar as propriedades dos produtos armazenados, propondo uma metodologia padrão. Os resultados obtidos formaram um banco de dados de diversos produtos relacionando as principais

propriedades e sua variabilidade em função de alguns parâmetros tais como consolidação e umidade.

Várias pesquisas estão em desenvolvimento, pois ainda existem lacunas no domínio das propriedades que variam de produto para produto e podem variar dentro de um mesmo produto, dito uniforme, sob condições diferenciadas de armazenamento. As propriedades físicas podem variar com o grau de compactação, com o tempo de armazenamento e com variações de temperatura e umidade intergranular (GAYLORD JR. & GAYLORD, 1984).

No trabalho busca-se conceituá-las com o intuito de analisar os seus efeitos na predição das pressões, sendo descritas algumas propriedades mais importantes como: ângulo de atrito interno (ϕ_i), ângulo efetivo de atrito interno (ϕ_e), ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w) e peso específico (γ).

2.4.1 Ensaio Jenike

Para determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados, usam-se os chamados ensaios de cisalhamento. Com o aparelho de Jenike, a determinação das propriedades físicas 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.

O aparelho proposto por JENIKE (1964) é equipado com: uma célula de cisalhamento de forma cilíndrica, a qual é colocada sobre a base da máquina; um pendural com pesos, para aplicação de uma carga vertical por gravidade na célula; um suporte de carga acionado eletro-mecanicamente, o qual promove a ação do cisalhamento movendo-se horizontalmente numa velocidade de 3 mm.s^{-1} ; uma célula de carga para medir a força de cisalhamento e um registrador para indicação desta força.

De maneira simplificada, o ensaio consiste em avaliar a capacidade resistente a tensões normais e cisalhantes de um elemento de produto armazenado confinado. Para tanto, submete-se, num primeiro estágio, uma

amostra do produto às pressões que causem uniformidade, consolidação e forneça resistência ao sólido. Num segundo estágio, a amostra submetida a um estado triplo de tensões constantes é forçada a se deformar por meio de tensões cisalhantes incrementais, até que ocorra a ruptura por cisalhamento da mesma e a estabilização da força cisalhante aplicada. A Figura 6 mostra a célula de cisalhamento do aparelho de Jenike (*Jenike Shear Tester*).

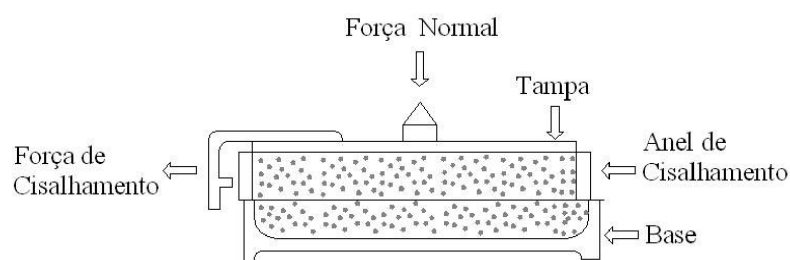


Figura 6 Célula de cisalhamento de Jenike.

Fonte: Teixeira (2006).

Inicialmente, a tensão de cisalhamento e a densidade do produto aumentam com o tempo t como indicado no diagrama da Figura 7(a). Após certo tempo, a densidade e a tensão de cisalhamento τ_{pre} que são função da tensão normal σ_{pre} , tornam-se constantes. A deformação do produto armazenado nesta condição chama-se de estado de fluxo estável. Quando o estado de fluxo estável é alcançado, diz-se que a amostra está consolidada criticamente [círculo de tensão A da Figura 7 (b)]. No processo de pré-cisalhamento (*“preshear”*) o produto é colocado num estado de consolidação definido e sua importância é para a definição do plano de cisalhamento. O pré-cisalhamento é parado assim que o estado de fluxo estável é alcançado. Os valores da tensão normal σ_{pre} e tensão de cisalhamento τ_{pre} formam o ponto do estado de fluxo estável mostrado no diagrama σ versus τ [Figura 7(b)].

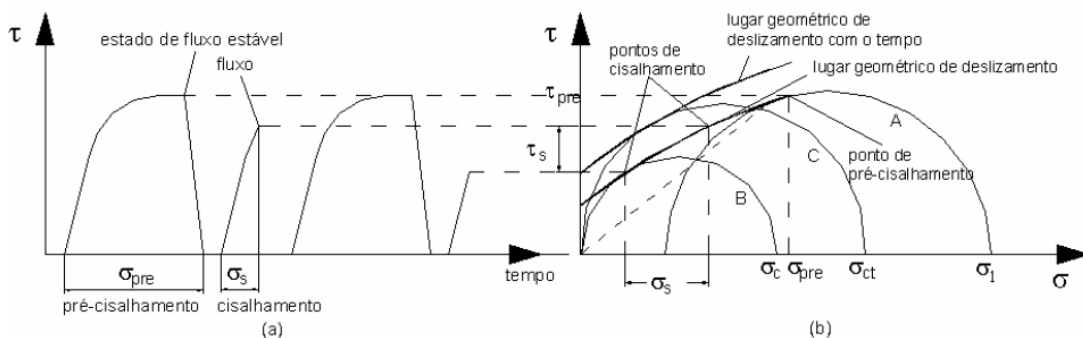


Figura 7 Gráfico do lugar geométrico de deslizamento.
Fonte: Teixeira (2006).

Posteriormente, a amostra é cisalhada com uma redução da tensão normal $\sigma_s < \sigma_{pre}$. Nota-se que a força de cisalhamento aumenta rapidamente, alcançando um valor máximo, representando a tensão de cisalhamento e depois diminui. Este processo é chamado de cisalhamento (“shear”). Sob tensões representadas pelo círculo B, o ponto de ruptura (deslizamento) é alcançado e o produto inicia o fluxo. O ponto de deslizamento do produto armazenado é chamado de “*yield locus*”.

De posse dos valores das pressões pertinentes verificadas no ensaio, plotam-se gráficos tensões normais (σ) versus tensões cisalhantes (τ) e obtêm-se os semicírculos de Mohr. Em seguida, traça-se uma reta tangente a todos os semicírculos que vem a ser denominada de “lugar geométrico de deslizamento do produto” ou YL. Em determinado momento do ensaio é removida a parte do fundo da célula e instalado um fundo de mesmo material da parede do silo. As pressões obtidas nestas condições irão determinar o YL da parede ou WYL no gráfico (Figura 7).

Todos os círculos de tensões que são tangenciais ao lugar geométrico de deslizamento representam estados de tensões em que o produto inicia o fluxo. Em resumo, o lugar geométrico de deslizamento nada mais é que a envoltória de todos os círculos de tensões que representam os estados de tensões no qual o produto entra em fluxo.

O início do fluxo está associado a uma diminuição da densidade e uma correspondente redução da tensão de cisalhamento (Figura 8). As tensões normais e de cisalhamento fornecem um ponto sobre o lugar geométrico de

deslizamento no diagrama σ versus τ . Se várias amostras do produto são pré-cisalhadas sob iguais tensões normais σ_{pre} , mas cisalhadas sob diferentes tensões normais $\sigma_s < \sigma_{pre}$, pode ser determinado o lugar geométrico de deslizamento no diagrama σ versus τ .

Em resumo, o ensaio de cisalhamento constitui-se de duas fases. A primeira é a preparação da amostra para obtenção do fluxo de estado estável e do pré-cisalhamento para definição do lugar geométrico de deslizamento. Na segunda fase do ensaio, a determinação real das tensões de cisalhamento é realizada com diferentes valores de tensões normais menores que os utilizados na primeira fase, determinando as tensões de cisalhamento necessárias para o deslizamento (ruptura) do produto.

Segundo SILVA et al. (2005), os parâmetros que descrevem as propriedades de fluxo podem ser determinados através do lugar geométrico de deslizamento (Figuras 7 e 8). A tensão de consolidação σ_1 é igual a tensão principal maior do círculo de Mohr que é tangencial ao lugar geométrico de deslizamento. Este círculo de tensões representa as tensões na amostra no final do procedimento de consolidação (tensões no estado de fluxo estável). A tensão inconfined σ_c resulta do círculo de tensões que é tangente ao lugar geométrico de deslizamento e que passa através da origem (tensão principal menor $\sigma_2 = 0$).

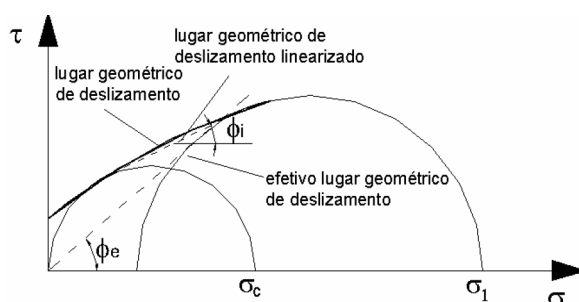


Figura 8 Gráfico de determinação do ângulo de atrito.
Fonte: Gomes (2000a).

2.4.2 Ângulo de repouso e ângulo de atrito interno

O ângulo de repouso pode ser medido em um monte de produto granular ou pulverulento formado pelo seu basculamento sobre uma superfície

plana. Este somente estará em equilíbrio se os grãos menos estáveis situados na superfície da pilha estiverem em equilíbrio estático. Desta forma, o ângulo formado pela superfície livre da pilha com o plano horizontal é o ângulo de repouso do material, definido pelos grãos menos estáveis e não confinados situados próximos à superfície da pilha. Este corresponderia ao ângulo de atrito interno para o caso de pressões de confinamento praticamente nulas, ou ainda, ao ângulo de atrito interno do produto depositado num estado extremamente solto (DALBELLO, OLIVEIRA & BENEDETTI, 1994).

O ângulo de atrito interno refere-se às condições internas do maciço, dependendo do nível de pressões médias aplicado a todos os grãos do maciço. O aumento das pressões de confinamento irá tornar o maciço mais denso (com menor índice de vazios). Dessa forma, o ângulo de atrito interno aumenta com o peso específico do maciço ou com a diminuição do índice de vazios e, portanto, o ângulo de atrito interno tende a ser maior que o ângulo de repouso. Um sólido em um recipiente é solicitado por pressões que causam consolidação e fornece resistência ao mesmo. As pressões mais importantes ocorrem durante o fluxo do sólido, ou durante a deformação contínua acima do seu limite elástico (CALIL JR., 1990).

Como explicado, a linha que tangencia os círculos é chamada de lugar geométrico de deslizamento e o ângulo que forma com o eixo σ é chamado de ângulo de atrito interno ϕ_i . Já a linha tangente ao maior círculo de Mohr e passando pela origem é chamada de lugar geométrico de deslizamento efetivo e o ângulo que forma com o eixo σ é chamado de ângulo de atrito interno efetivo ϕ_e .

O ângulo de atrito interno ϕ_i é definido como a inclinação local do lugar geométrico dos estados de deslizamento. Devido à inclinação do lugar geométrico de deslizamento seguir a forma curva ao invés de reta, o ângulo de atrito interno varia ao longo do lugar geométrico de deslizamento. Para a maioria das aplicações é suficiente um ângulo de atrito interno. Neste caso, o ângulo de atrito interno é definido pela inclinação do lugar geométrico de deslizamento linearizado. A linearização do lugar geométrico de deslizamento resulta da tangente comum a ambos os círculos de tensões de Mohr mostrados

na Figura 8. Cabe salientar, que para produtos de fluxo livre o lugar geométrico de deslizamento passa pela origem, portanto, $\phi_i = \phi_e$.

Se forem esperadas influências causadas por temperatura, umidade e período de armazenamento, então os ensaios de cisalhamento devem ser realizados de acordo com estas condições. Para a medição do efeito da consolidação com o tempo pode-se usar a célula de cisalhamento de Jenike com o auxílio da bancada de consolidação.

Após a obtenção do estado de fluxo estável e pré-cisalhamento, a amostra é armazenada por um determinado tempo t sob tensão normal $\sigma = \sigma_1$. Posteriormente, a amostra é cisalhada por uma tensão normal ($\sigma_s < \sigma_{pre}$) da mesma maneira que aquelas usadas para determinar um ponto sobre o lugar geométrico de deslizamento mostrado na Figura 7. Os produtos ganham resistência com o tempo de armazenamento, adquirem maior resistência ao cisalhamento, portanto no diagrama σ versus τ , o lugar geométrico de deslizamento com o tempo fica acima do lugar geométrico de deslizamento (GOMES, 2000a).

2.4.3 Ângulo efetivo de atrito interno

A determinação das propriedades dos materiais armazenados depende do conhecimento do lugar geométrico (YL) de deslizamento determinado pela relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal para o produto armazenado. Do gráfico (Figura 9), pode-se determinar o ângulo de atrito interno, formado pela reta do lugar geométrico e a horizontal. O ângulo efetivo de atrito interno é formado com a horizontal a partir de uma linha entre a origem e P, (tangente ao YL no semicírculo de Mohr da maior tensão de consolidação - Figura 9). O ângulo efetivo de atrito interno, ϕ_e , é obtido de forma igual ao ângulo de atrito interno, ϕ_i , quando se considera o produto de fluxo livre. Tal observação conduz a dimensionamentos mais adequados nos projetos de silos que apresentam tremonhas, para este tipo de produto. Devido às condições de geometria do fundo, as tensões impostas ao produto armazenado são alteradas, exigindo uma análise mais detalhada de sua magnitude e distribuição.

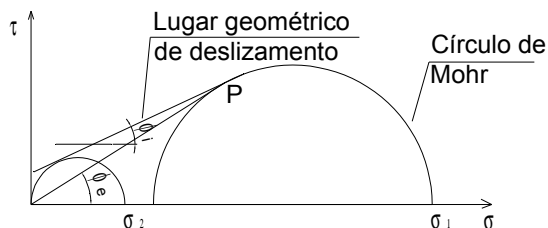


Figura 9 Representação gráfica do efetivo ângulo de atrito.
Fonte: Freitas (2001).

2.4.4 Ângulo de atrito com a parede

A determinação do atrito do produto armazenado com a parede também pode ser obtida usando o aparelho de Jenike. Neste caso, a base da célula de cisalhamento é substituída por uma amostra do material de parede que será avaliado (Figura 10) e define-se o lugar geométrico da parede para uma série de pressões de consolidação. A força de cisalhamento ou a tensão de cisalhamento τ_w que são necessárias para mover a célula de cisalhamento com o produto armazenado através do material da parede são medidas sob diferentes tensões normais σ_w (TEIXEIRA, 2006).

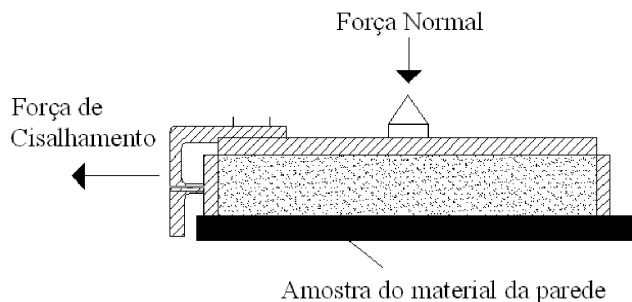


Figura 10 Determinação do atrito com a parede na célula de Jenike.
Fonte: Teixeira (2006).

O lugar geométrico é desenhado no mesmo gráfico do YL e o seu ponto de interseção determinado com o círculo de Mohr de maior consolidação, (Figura 11). O YL da parede é então desenhado no mesmo diagrama do YL e seu ponto de interseção determinado com o círculo de Mohr de maior consolidação. O ponto mais alto da interseção é escolhido. O ângulo da linha

reta deste ponto, através da origem, é o ângulo de atrito com a parede ϕ_w para esta particular tensão de consolidação. Os ensaios são repetidos para outras tensões de consolidação (TEIXEIRA, 2006).

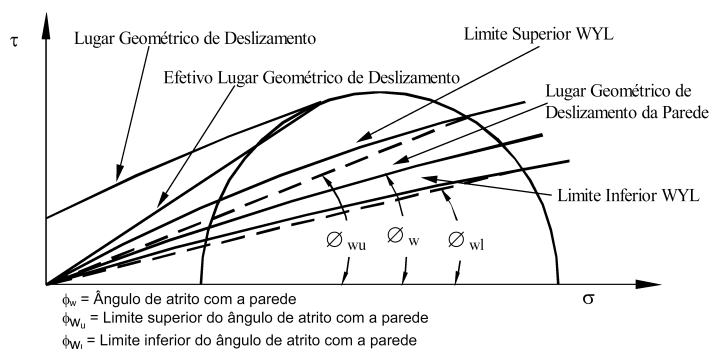


Figura 11 Lugar geométrico de deslizamento da parede e ϕ_i com a parede.

Fonte: Freitas (2001).

Segundo FREITAS (2001), 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 12(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 12(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 (FREITAS, 2001).

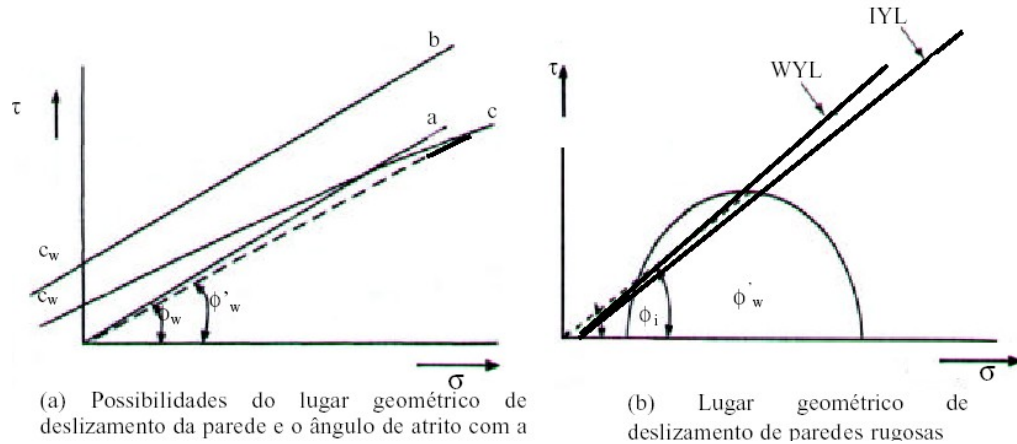


Figura 12 Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede.

Fonte: Freitas (2001).

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 SILVA et al. (2003), 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 12(b). Isto implica que $\tan\phi_w = \text{sen}\phi_i$, e a situação de tensão como determinada para o ponto de topo do círculo de Mohr é correspondente a um plano de deformação máxima.

Se os pares de valores medidos (σ_w, τ_w) são plotados num diagrama, τ_w versus σ_w (Figura 13), então o resultado da união dos pontos medidos fornece o lugar geométrico de deslizamento com a parede. O ângulo de atrito com a parede ϕ_w resulta da inclinação do lugar geométrico de deslizamento com a parede com o eixo σ . Pode ser determinado pela relação da equação (20).

$$\phi_w = \text{arctg} \frac{\tau_w}{\sigma_w} \quad (20)$$

Este parâmetro é de grande importância para o cálculo das pressões, devendo se considerado para todas as condições desfavoráveis como umidade, corrosão, abrasão, revestimento da superfície. Nos cálculos de pressão é tomado o menor valor do ângulo determinado nos ensaios, também conhecido como o limite inferior do ângulo de atrito interno com a parede (GOMES, 2000a). Tal confirmação é feita por Schwedes (1983) citado por ALVES (2001), que sugere a adoção do coeficiente de atrito com a parede considerando um intervalo de variação a partir dos limites inferior e superior obtidos em ensaios.

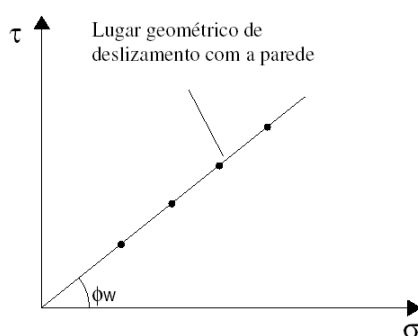


Figura 13 Lugar geométrico de deslizamento com a parede.
Fonte: Gomes (2000a).

Outros ensaios também indicam a variabilidade do fator. CALIL JR. (1984) determinou a partir de dados experimentais de pressão obtidos em um modelo de silo, os ângulos de atrito interno e os ângulos de atrito do produto armazenado com a parede e analisou sua variação em função da relação entre a altura do produto armazenado e o lado da seção transversal do modelo. Dessa análise, concluiu que, para as relações altura/lado 3,0 e 1,5 há discrepâncias na determinação das cargas em silos. Neste intervalo, segundo o autor, os ângulos passam de um valor constante para uma variação linear e, à medida que diminui o valor do ângulo de atrito interno, aumenta o valor do ângulo de atrito com a parede. Afirmou que a anomalia observada nos ensaios mostra o erro de utilização da fórmula de Janssen no cálculo de silos com relação altura/lado pequena.

Muitos autores relatam que a grande variabilidade ocorrida nos valores se deve aos equipamentos utilizados para a determinação tanto que sugerem novos métodos. Haaker (1990), citado por SILVA et al. (2003), propôs um novo tipo de equipamento para a determinação do coeficiente de atrito com a parede, onde fatores tais como velocidade de deslizamento, pressão normal, temperatura, presença de vibrações e comportamento do atrito são considerados. Dos valores medidos com esse equipamento, pôde concluir que o coeficiente de atrito com a parede para certa combinação produto/parede não é um valor único e pode depender fortemente da velocidade de deslizamento e em menor proporção da pressão normal. O coeficiente pode mudar significativamente com o tempo devido à variação das características das paredes, causada pela ação do deslizamento do produto.

2.4.5 Peso específico

O peso específico (γ) é definido como a quantidade de massa de partículas sólidas dividida pelo seu volume total e multiplicado pela aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$). Segundo TEIXEIRA (2006) as normas internacionais recomendam que os valores sejam aplicados em função dos valores determinados em laboratórios e considerando sua variação devem ser tomados valores inferiores e superiores. Quando não é possível sua determinação sugere-se a utilização dos valores multiplicados por 0,75 e 1,25 do valor tabelado.

Algumas pesquisas mostram variações destes valores, observadas em função da manipulação dos produtos e a influência da compressibilidade dos sólidos armazenados em silos. Nestes estudos, observou-se que, embora os métodos de cálculo utilizados, tais como os de Janssen e outros similares, não levem em consideração essa influência, a maioria dos produtos sólidos é relativamente compressível, afetando significativamente os parâmetros de projeto. As Normas Americana e Alemã omitem análises resultantes da compressibilidade do produto armazenado, o que levou a concluir que o uso desses métodos, especialmente nos casos de produtos fofos com alta compressibilidade ou alto grau de consolidação, resultam em valores incorretos de tensões. A compressibilidade deve ser considerada no projeto de um silo

tendo em vista os efeitos que pode causar no comportamento da estrutura (GOMES, 2000a).

Recentes pesquisas demonstram que o peso específico do produto armazenado em um silo é função da sua umidade, das sobrepressões que ocorrem no silo, do tempo de armazenamento, da taxa de carregamento, do modo de carregamento e da altura de queda do produto. Ficou constatado que os valores reais desse parâmetro em geral divergem dos estabelecidos por normas, recomendando um aumento médio de 6% sobre os valores observados (CFBC,1983).

O peso específico do produto é muito simples de ser obtido com o aparelho de Jenike, sendo que 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.

2.5 FLUXO DOS MATERIAIS ARMAZENADOS

O fluxo em silos refere-se à forma de deslizamento do produto armazenado no silo na operação de descarga. CALIL JR. (1990) defende a importância de análise de fluxo, porque é este que determina as características de descarga do material, tipos de segregação, zonas de materiais sem movimentação, possibilidade de a célula ser esvaziada completamente, distribuição de pressões nas paredes e fundações, integridade e custo da construção. O fluxo é influenciado pelas propriedades do produto e em silos dotados de tremonha, pela geometria e rugosidade de suas paredes. Em adição, os fluxos podem ser classificados como fluxo de massa e de funil (Figura 14).

Quanto ao tipo de fundo, os silos podem ter:

- Fundo plano: silo de fundo horizontal ou um fundo com paredes inclinadas de um ângulo $\alpha \leq 20^\circ$ com relação à horizontal (Figura 15);
- Fundo com tremonha: fundo em forma de funil, cujas formas mais comuns são as tronco-piramidais, Figura 16(a) e as tronco-cônicas, Figura 16(b).

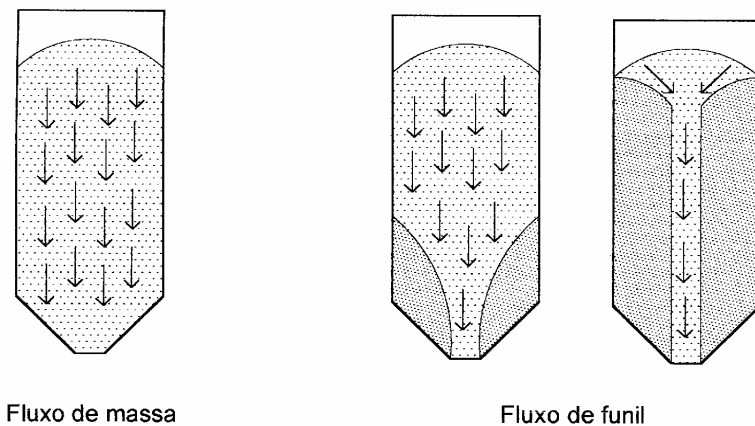


Figura 14 Principais tipos de fluxo em silos.

Fonte: Freitas (2001).

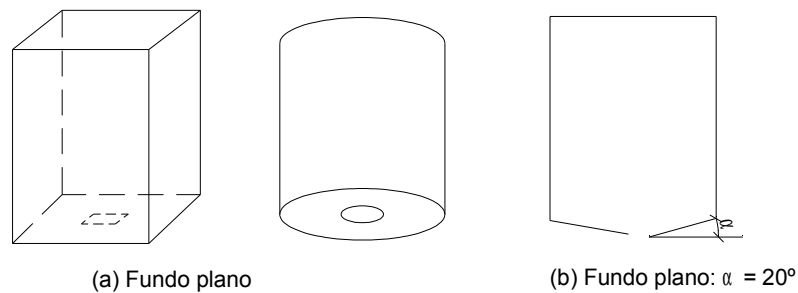


Figura 15 Silos de fundo plano.

Fonte: Freitas (2001).

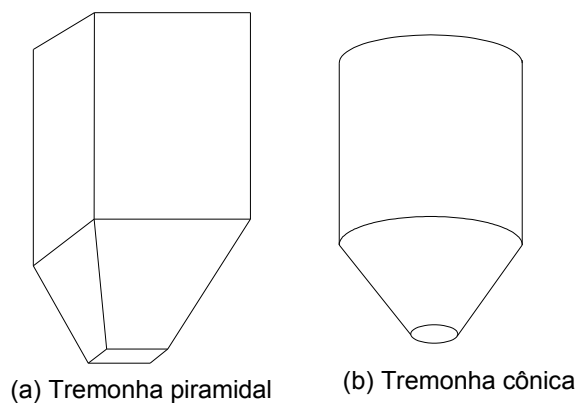


Figura 16 Formas mais comuns de silos com fundo tremonhado.

Fonte: Freitas (2001).

2.6 PARÂMETRO K

A relação entre as pressões horizontal e vertical em qualquer ponto de uma massa granular é definida como a relação K. Esse é um dos parâmetros necessários para o cálculo das pressões que o produto exerce sobre as paredes e fundo de um silo (CALIL JR., 1997). 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 resultados dos deslocamentos da parede do silo, sendo K_a relativo ao deslocamento de dentro para fora e K_p na direção oposta. Já o terceiro estado K_0 ocorre 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 da equação (21).

$$K = \frac{\gamma d}{\sigma_{\text{fundo}} \text{tg} \phi_w} \quad (21)$$

O valor empírico para K expresso na equação (22).

$$K = \frac{1 - \text{sen} \phi_i}{1 + \text{sen} \phi_i} = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_i}{2} \right) \quad (22)$$

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 JR., 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 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 & 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 (1990), citado por SILVA et al. (2003), 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.

Em estudo experimental, BLIGHT (1988) verificou que os valores de K, para produtos granulares, de fluxo livre, não variam em função da relação altura/diâmetro do silo, pois os ângulos de atrito não variaram com a compactação do produto. Na descarga, estes produtos apresentaram valor de K maior, pois ocorre aumento das pressões horizontais e redução das pressões verticais.

Alguns valores são tabelados e há também formulações para obtenção de K, tanto para condição de carga quanto para de descarga. FREITAS (2001) relacionou valores e equações matemáticas desenvolvidas por diferentes pesquisadores e adotadas por normas estrangeiras, verificando-se que a autora encontrou valores muito diferentes entre as mesmas.

2.7 PRESSÕES EXERCIDAS PELOS PRODUTOS ARMAZENADOS

Os primeiros silos foram construídos admitindo-se a hipótese de que os produtos armazenados comportavam-se como líquidos, com aplicação da teoria hidrostática para o cálculo das pressões. Objeto de estudos desde o século passado, as pressões exercidas por um sólido nas paredes de um silo, começaram a ser pesquisadas por Baker em 1881. Em 1892, Roberts, na Inglaterra, realizou os primeiros testes para determinar pressões laterais e verticais em silo, considerando que parte do peso do produto armazenado é

transferida por atrito para as paredes dos silos. Em 1895, Janssen confirmou as hipóteses de Roberts, vindo a fornecer uma das mais importantes contribuições para o desenvolvimento da teoria sobre pressões em silos. O modelo de Janssen é até hoje utilizado, tendo sido adotado como base de cálculo em diversas normas (GOMES, 2000a).

Segundo Ravenet (1983), citado por NASCIMENTO & CALIL JR. (1998), já havia comprovações de que as pressões de descarga eram maiores que as pressões estáticas, com um coeficiente de sobrepressão de 2,32. Neste mesmo período, surgiu o conceito do coeficiente K, que expressava a relação entre a pressão horizontal e pressão vertical no silo. Roberts (1995), citado por GOMES & CALIL JR. (2005), faz um breve histórico e comenta sobre os trabalhos e avanços da pesquisa em silos, posteriores a contribuição de Janssen; Prante, em 1896, conduzindo ensaios em dois silos verticais de 19 m altura e diâmetros 1,5 m e 3,8 m, obteve valores de pressão lateral menores que os de Janssen.

Airy, em 1897, na Inglaterra, foi o primeiro a fazer a distinção entre silos altos e baixos com uma proposta de um modelo para o cálculo de pressões em silos, analisando o problema de um ângulo totalmente diferente do utilizado por Janssen (GOMES & CALIL JR., 2005). Empregando uma massa de produto em forma de cunha deslizando sobre si mesma e exercendo uma força sobre a parede, são fornecidos os valores da pressão lateral.

De acordo com SILVA (1993), as teorias de Janssen e Airy formaram a base para o projeto de silos. A partir daí, outros autores estudaram o comportamento de pressões em silos sob diferentes aspectos, como Cameron que em 1930, menciona a variabilidade dos parâmetros considerados no cálculo das pressões em silos como peso específico, ângulo de atrito interno, ângulo de atrito com a parede e coeficiente K.

As teorias formuladas no fim do século XIX tinham como interesse especial dos engenheiros, a construção de silos elevados. Poucos pesquisadores tinham retratado os problemas ocorridos com os silos horizontais com algumas formulações teóricas para as ações nessas estruturas.

Nas décadas seguintes, enquanto na Europa e Estados Unidos desenvolvia-se um vasto conhecimento sobre os silos verticais, no Brasil, as estruturas horizontais passaram a ser construídas. Nos anos de 1977 e 1978, com a expansão da rede armazenadora, os primeiros projetos executados no Brasil, baseados nas publicações de Reimbert & Reimbert em 1943, conduziram a soluções práticas para células baixas e para silos de células altas. Adequando-se às condições locais, vários projetos foram desenvolvidos e construídos e a partir daí, os projetistas começaram a indagar sobre a aplicabilidade das diversas teorias para o cálculo dos silos horizontais (CALIL JR., 1984/1985).

Jáky, em 1948, desenvolveu estudos das pressões laterais em silos horizontais, empregando a teoria do empuxo de terra de Coulomb e Rankine. Para a determinação das pressões laterais, foram derivadas as equações de pressão lateral, obtendo uma função do tipo linear até uma dada profundidade (GOMES, 2000a).

Para determinar as pressões laterais, foi considerado o equilíbrio de uma seção reta do silo de espessura infinitesimal, adotando que o peso desta porção de produto armazenado estaria em equilíbrio devido ao atrito com a parede. Outros autores como Caquot e Kerisel, em 1956, na França, utilizando o círculo de Mohr, demonstraram a relação entre as pressões laterais e verticais. Durante o carregamento, foram consideradas as pressões ativas de Rankine e na descarga devem ser usadas as pressões passivas. Algumas teorias, como as de Janssen (1895), Koenen (1896), e Reimbert & Reimbert (1956), foram usadas e o desenvolvimento dos projetos indicava que para células baixas deveria ser usada a teoria para cálculo de empuxo de terra (CALIL JR., 1990).

Porém, recomendava-se que a pressão horizontal fosse calculada “sem atrito” entre o material armazenado e a parede. Bowles (1977), citado por BRANDI (2004), recomenda a teoria de Rankine, desde que a célula tenha altura inferior a 7,0 m e relação entre altura/lado ou altura/diâmetro menor que 2. A restrição busca impedir, provavelmente, que o efeito das ações de atrito entre o produto armazenado e as paredes seja significativo. De acordo com GAYLORD JR. & GAYLORD (1984), as formulações de Coulomb são

adequadas para os silos baixos e desconsiderando o atrito entre o produto e a parede a Teoria de Rankine pode ser aplicada.

Da mesma forma, Ravenet (1984), citado por NASCIMENTO (1998), propõe para o cálculo das pressões laterais, a teoria de Coulomb, com restrições, citando que, problemas estruturais haviam ocorrido como a ruptura das paredes em curtos períodos de operação dessas unidades armazenadoras.

De acordo com DANTAS (2004), as ações provocadas pelo produto armazenado (empuxo), devem ser avaliadas a partir das pressões laterais nas estruturas consideradas rígidas indeslocáveis e deslocáveis. Devendo ser verificadas a rigidez da estrutura e sua deslocabilidade (rotação, translação), bem como a forma da deslocabilidade relativa entre a estrutura e o maciço do produto armazenado, aplicando as teorias de Coulomb e Rankine.

De acordo com Jarrett et al. (1995), citado por FREITAS (2001), a determinação correta da distribuição e magnitude das pressões laterais nas paredes de um silo retangular ou quadrado é determinante para a segurança e economia dos projetos. Vários métodos analíticos foram desenvolvidos para o cálculo das pressões estáticas nas paredes dos silos, mas são baseados em diferentes hipóteses e são aplicáveis para casos específicos. A base para a determinação das pressões nas paredes em silos quadrados ou retangulares está nas teorias de Rankine (1857) ou Coulomb (1776), nos modelos axissimétricos de Janssen, (1895), ou nos dados empíricos de Reimbert & Reimbert (1976).

NEGRISOLI (1995) propõe uma revisão dos critérios de dimensionamento para os silos horizontais de grande porte, bem como a avaliação das ações e suas combinações, consideradas as principais causas de rupturas nas paredes dessas unidades. Após uma avaliação dos projetos já executados, afirmou que o critério de Rankine é conservador, pois o atrito sempre existe, podendo ser desprezível apenas para as paredes de pequena altura ($h < 2,00$ m) ou quando a parcela dele resultante estiver a favor da segurança.

De acordo com NEGRISOLI (1997), os silos horizontais requerem nos projetos uma análise criteriosa das ações. Estas devem ser levantadas e

combinadas para a condição mais desfavorável. As ações devido ao peso próprio, peso dos equipamentos, ventos e outros (recalques diferenciais de apoios, protensão, vibração de máquinas) devem ser consideradas, mesmo sabendo que suas parcelas de contribuição nas combinações são inferiores quando comparadas às ações devidas ao produto armazenado.

Atualmente, os projetos de silos horizontais têm se baseado, tradicionalmente, em experiências anteriores, o que tem levado às soluções conservadoras, devido à falta de conhecimento das pressões que realmente ocorrem. As dificuldades encontradas pelos projetistas podem ser verificadas quando novos materiais de construção e métodos de projetos estruturais conduzem à redução dos fatores de segurança. A ocorrência de número de colapsos estruturais tem exigido novas investigações das ações atuantes nas estruturas de armazenamento.

No estudo das pressões, três fatores de interesse devem ser destacados: o primeiro é o econômico, pois várias instalações foram e estão sendo construídas em todo o país e no mundo e requerem projetos mais elaborados; o segundo é o científico, pois os silos são estruturas complexas onde se combinam comportamentos estruturais de diferentes materiais, e mesmo após uma série de estudos, ainda existem grandes lacunas de conhecimento que estimulam vários pesquisadores a desenvolverem trabalhos no campo das pressões; o terceiro é o social, pois vários problemas ocorreram devido ao não conhecimento do comportamento estrutural das estruturas de armazenamento. O Brasil é carente de uma norma que indique especificações e critérios de dimensionamento. Existem apenas duas referências (TB-374 e TB-377) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1990), que tratam sumariamente o assunto, indicando a terminologia a ser adotada para os diversos tipos de estruturas de armazenamento.

As normas internacionais apresentam um vasto e avançado estudo no campo dos silos verticais e fazem recomendações sobre o comportamento das pressões dos produtos armazenados. Na década de 80, importantes avanços foram dados com a utilização do método dos elementos finitos. Atualmente, no Brasil e no mundo, as pesquisas nesta área estão divididas em três grupos distintos: os que estudam as ações e deformações em silos reais ou modelos,

os que se dedicam a melhorar os materiais estruturais construtivos e os que avançam no estudo das análises estruturais através de elementos finitos.

Ainda existem incertezas consideráveis com relação às pressões que atuam nos silos. Uma revisão das normas existentes indica grandes diferenças entre as recomendações para as cargas dos silos. Dessa forma as contribuições no campo experimental são importantes servindo como subsídio para os códigos normativos e confrontação dos refinamentos dos cálculos.

2.7.1 Fundamentos

No projeto de uma estrutura, seja ela de concreto armado, aço, madeira ou qualquer outro material, independentemente de sua complexidade arquitetônica ou estrutural, deve-se exigir que a mesma desempenhe as funções para que foi concebida com eficiência, aliando economia, durabilidade e segurança estrutural. Pode-se dizer que uma estrutura apresenta segurança estrutural se ela for capaz de resistir ilesa a todas as ações que vierem a solicitá-la desde o período construtivo até o final de sua vida útil, sendo a determinação das ações importante para a determinação dos esforços atuantes, dimensionamento, estabilidade e segurança estrutural (STAMATO & CALIL JR., 1997).

Segundo FUSCO (1976), o termo ação designa qualquer influência ou conjunto de influências capaz de produzir estados de tensão na estrutura. Usualmente, as forças e as deformações são consideradas como se fossem as próprias ações.

A análise das pressões nas paredes dos silos é objeto de estudo de diversas pesquisas. Existem diversas teorias e aproximações para a sua distribuição que variam entre as estáticas e dinâmicas. De maneira geral, toda unidade de silo está solicitada a diversos tipos de ações: permanentes (peso próprio, cobertura), variáveis (pressão dos produtos, vento, recalques) e excepcionais (explosões e impactos). As pressões exercidas por produtos armazenados, objeto de estudo deste trabalho, são tidas como de ação variável.

No projeto de silos, as principais ações a serem consideradas são as provenientes dos produtos armazenados que exercem pressões nas paredes

verticais e no fundo do silo. Na parede vertical atuam pressões perpendiculares, denominadas pressões horizontais (p_h) e pressões de atrito do produto com a parede (p_w). No fundo do silo, atuam pressões denominadas pressões verticais (p_v), conforme é apresentado na Figura 17.

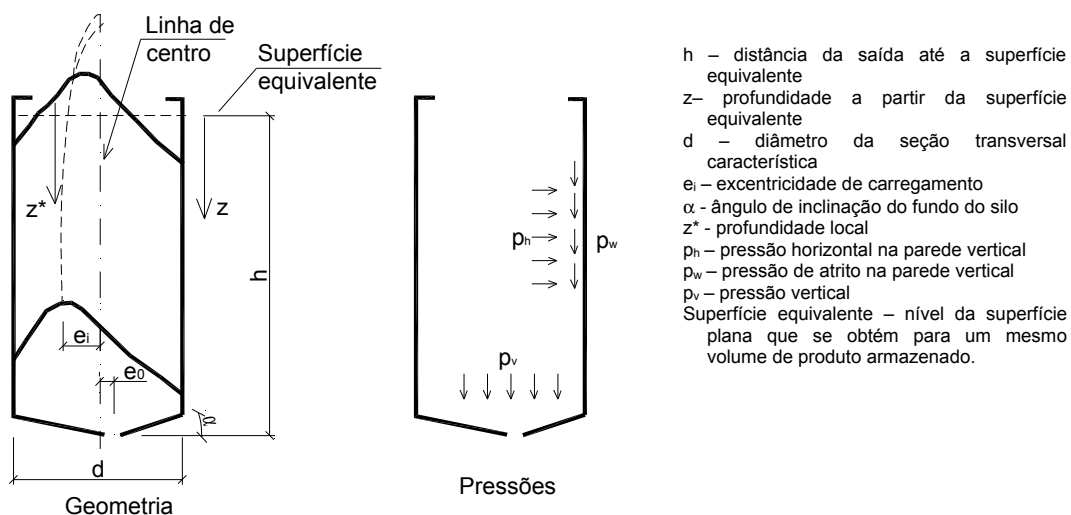


Figura 17 Pressões atuantes.

Fonte: Freitas (2001).

A pressão de atrito é distribuída na superfície das paredes e equilibra parte do peso do produto, resultando em esforços de compressão nas paredes. A existência deste atrito faz com que as pressões horizontais que o produto exerce nas paredes não aumentem indefinidamente com a altura como as pressões hidrostáticas, mas apresentem um crescimento que tende exponencialmente a um valor máximo.

Para o melhor entendimento dos conceitos para a estimativa das curvas de pressões nas paredes dos silos, torna-se indispensável compreensão de que o campo de tensões iniciais, que atua enquanto o silo está sendo carregado na condição inicialmente vazio e com a boca de descarga fechada, é totalmente diferente do campo de tensões dinâmicas que atua quando é realizada alguma descarga do produto armazenado. Esta diferença nos campos de tensões, entre as situações de carregamento e

descarga, leva a formação de picos de pressões consideráveis que atuam nas paredes do silo quando a situação de fluxo é obtida.

Conforme CALIL JR. (1990), o problema da estimativa das curvas de pressões está essencialmente em sua variabilidade tanto no tempo como no espaço. A magnitude das pressões horizontais aumenta de maneira considerável na fase de descarga do produto; no entanto, o percentual deste aumento em relação à fase de carregamento ainda é alvo de discussões e pesquisas.

Este tipo de ação induz ao aparecimento de pressões horizontais, verticais e de atrito. Como o Brasil ainda não dispõe de norma que trate da estimativa destas cargas para projeto de silos, tem-se buscado nas normas internacionais aquelas que mais se aproximam das condições do país. Estas, por sua vez, baseiam-se em teorias de estimativa de cargas em silos.

As teorias definem como as pressões do material granular em um silo se comportam. Inicialmente, essas eram baseadas no princípio básico da teoria de Rankine, que proporcionava a pressão vertical (maior), pressão horizontal (menor), coeficientes de pressão ativos e passivos (K_a e K_p) e ângulo de atrito interno. Em seguida, em função do atrito com as paredes, verificou-se que a associação com a teoria de Rankine não seria mais tão simples. Com isto, surgiram novas teorias que consideravam o arraste nas paredes e também as condições de silo cheio e sendo descarregado, com a constatação que nesta última, as pressões horizontais sobrepunham-se às verticais (GAYLORD JR. & GAYLORD, 1984). Portanto, a intensidade das pressões horizontais e verticais é diferente para a situação de enchimento e do tempo que o silo permanece cheio para a situação de descarga. A primeira denomina-se de pressões iniciais ou estáticas e a segunda, de pressões de fluxo ou dinâmicas. A diferença entre estas duas situações conduz a sobre-pressões consideráveis na descarga atuando nas paredes do silo e, ainda, em fluxo de funil a predição das cargas é mais difícil e incerta do que em fluxo de massa (CALIL JR., 1990).

REIMBERT (1979) destaca a importância do aumento das pressões sobre as paredes no momento de descarga e afirma que as pressões devidas ao empuxo de materiais sobre as paredes de silos são bastante regulares durante o enchimento e podem ser interpretadas matematicamente, não

ocorrendo o mesmo com as curvas de pressão correspondentes ao esvaziamento, pois as perturbações no equilíbrio da massa ensilada durante o fluxo são tais que não é possível estimar seus efeitos com precisão suficiente.

Devido a estes fatos, e com base em seus experimentos, diversas formulações foram produzidas por pesquisadores para gerar diferentes teorias. Segundo CALIL JR. (1997), ultimamente há 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.

Não há um modelo analítico para as pressões nas paredes do silo que inclua todos os parâmetros relevantes. Segundo CALIL JR. (1990) no desenvolvimento da maioria das normas, pouca atenção tem sido dada para o exame estatístico ou probabilístico das pressões.

A aplicação de métodos de resolução analíticos não é muito eficiente em alguns casos, seja pela complexidade de cálculo exigida, seja pela imprecisão dos resultados obtidos por meio destes métodos, devido às simplificações que devem ser feitas para se possibilitar a resolução. Exemplos muito claros deste fato é a análise de estruturas com mais de um grau de hiperestaticidade, de estruturas com mais de um material envolvido na sua confecção e de estruturas com seção transversal variável ao longo de seu comprimento.

As normas apresentam muitas diferenças em suas recomendações, desde os valores dos parâmetros dos produtos a armazenar até os valores dos coeficientes de sobre-pressão para ponderar o efeito dinâmico da descarga do produto armazenado.

No que se referem à estimativa das pressões em silos as normas internacionais existentes são basicamente apoiadas em duas teorias: a teoria de Janssen, para as cargas iniciais ou de natureza estática e a teoria de Rankine, na qual a deformação produz uma condição de pressões.

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.

2.7.2 Teoria de Janssen

Para o cálculo das pressões estática e dinâmica em silos verticais tem-se aplicado, nos últimos anos, a norma Alemã DIN – 1055, parte 6, que utiliza a teoria de Janssen. Um complemento desta norma fornece alguns valores diferenciados especificados para os coeficientes de atrito entre o produto e a parede, e da relação K da pressão lateral e a pressão vertical.

A norma ACI 313 (1991), para silos de concreto para produtos granulares, especifica coeficientes de sobrepressão baseado num código soviético que estabelece também estes valores diferenciados para as pressões de carregamento e descarga. Outras normas também foram desenvolvidas posteriormente e suas aplicações se verificam em diversos países como a ISO 11697 (1995), Eurocode (1991-4/1995), a Australiana (AS 3774/1996) e Canadense (CFBC, 1983).

A teoria de Janssen 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 usada na maioria das normas sobre projeto de silos para o cálculo da pressão estática ou inicial no carregamento em silos de seções cilíndricas.

É a teoria mais aceita para o cálculo das pressões em paredes verticais. As pressões vertical e horizontal foram determinadas pelo equilíbrio de forças verticais que atuam numa camada horizontal de espessura infinitesimal do produto armazenado. Sobre a camada infinitesimal, atuam o peso próprio da mesma, as forças nas faces superior e inferior devidas ao produto e a força devida ao atrito entre o produto e a parede.

As hipóteses em que esta teoria é baseada são:

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

- O peso específico (γ) do produto é uniforme;
- As paredes do silo são totalmente rígidas;
- A relação entre as pressões horizontais e verticais (K) é constante em toda a altura do silo.

Na formulação de Janssen, o equilíbrio de um elemento de altura (d_z) 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. Deste modo, a pressão horizontal pode ser calculada deduzindo das equações (23), (24) e (25) chega-se a equação (26) conhecida como fórmula de Janssen para o cálculo teórico da pressão. Na qual, A é a área da seção transversal do silo e U é o perímetro do mesmo, conforme a Figura 18.

$$p_h \cdot \mu \cdot d_z \cdot U + (p_v + dp_v - p_v)A - \gamma \cdot A \cdot dz = 0 \quad (23)$$

Fazendo $K \cdot dp_v = dp_h$ e separando as variáveis:

$$\frac{A}{U} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{dp_h}{\frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{A}{U} - p_h} = dz \quad (24)$$

Integrando, tem-se que:

$$-\frac{A}{U} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \ln\left(\frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{A}{U} - p_h\right) = z - \text{cte} \quad (25)$$

Aplicando as condições de contorno em $z = 0$ tem-se a equação (26).

$$p_h = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{A}{U} \cdot (1 - e^{-zK\mu \frac{U}{A}}) \quad (26)$$

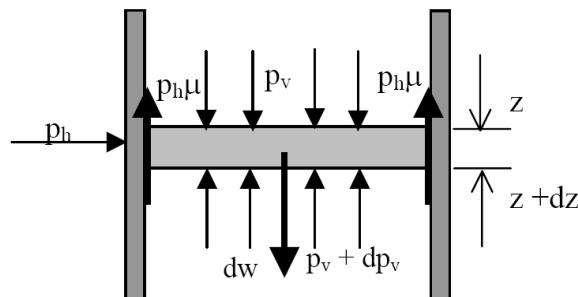


Figura 18 Camada elementar adotada por Janssen.
Fonte: Freitas (2001).

A partir da equação (26) podem-se calcular os valores da pressão vertical, obtida por meio da equação (27).

$$p_v = \frac{p_h}{K} \quad (27)$$

O parâmetro μ constante da formulação de Janssen é obtido pela equação (28).

$$\mu = \text{tg} \phi_w \quad (28)$$

A pressão de atrito na parede é definida pelo produto da pressão horizontal pelo coeficiente de atrito (μ) e pode ser expressa pela equação (29).

$$p_w = \mu \cdot p_h \quad (29)$$

A pressão de atrito na parede p_w causa esforço de compressão na parede e pode ser integrada verticalmente para o cálculo da força de compressão resultante sobre a parede $P_{w(z)}$ por unidade de perímetro de parede atuando na profundidade z , fornecendo a seguinte equação (30).

$$P_w(z) = \mu \int p_h dz = \gamma \cdot A / U \left[z - \frac{A}{\mu \cdot K \cdot U} (1 - e^{-\mu \cdot k \cdot z \cdot U / A}) \right] = \frac{A}{U} (\gamma \cdot z - p_v) \quad (30)$$

ou seja, é igual ao peso total do produto menos a resultante da pressão vertical p_v , dividido pelo perímetro.

2.7.3 Teoria de Rankine

Em sua teoria, publicada em 1857, Rankine estudou o estado de tensões dentro de um maciço granular, fofo, não coesivo. As pressões lateral e vertical que atuam no elemento, a uma profundidade z , constituem um par de conjugado de tensões. Considerando as propriedades do círculo de Mohr representativo do estado de ruptura do maciço, podem-se calcular os coeficientes de empuxo ativo e passivo para um terrapleno horizontal, a partir das componentes normal e cisalhante. Os valores de p_a e p_p podem ser calculados em função de p_v , bem como as relações p_a/p_v e p_p/p_v , denominados, coeficiente de empuxo ativo e passivo. As pressões laterais valem, portanto segundo as equações (31) e (32).

$$p_a = K_a \cdot p_v = K_a \cdot \gamma \cdot z \cdot \cos \phi_r \quad (31)$$

$$p_p = K_p \cdot p_v = K_p \cdot \gamma \cdot z \cdot \cos \phi_r \quad (32)$$

onde p_a são as pressões laterais ativas, p_p são as pressões laterais passivas, p_v as pressões verticais, K_a o coeficiente de empuxo ativo, K_p o coeficiente de empuxo passivo e ϕ_r é o ângulo de repouso.

Pela teoria de Rankine as pressões laterais variam linearmente com a profundidade e os valores dos empuxos ativo e passivo, por unidade de largura, de uma estrutura de arrimo, de altura h , segundo equações (33) e (34).

$$E_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2 \cdot K_a \cdot \cos \phi_r \quad (33)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2 \cdot K_p \cdot \cos \phi_r \quad (34)$$

onde K_a é dado pela equação (35).

$$K_a = \frac{\cos \phi_r - \sqrt{\cos^2 \phi_r - \cos^2 \phi_i}}{\cos \phi_r + \sqrt{\cos^2 \phi_r - \cos^2 \phi_i}} \quad (35)$$

A teoria de Rankine baseia-se na aplicação de um estado de tensão em um maciço granular, fofo, não coesivo e semi-infinito. Esta foi desenvolvida baseada na 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 (Figura 19).

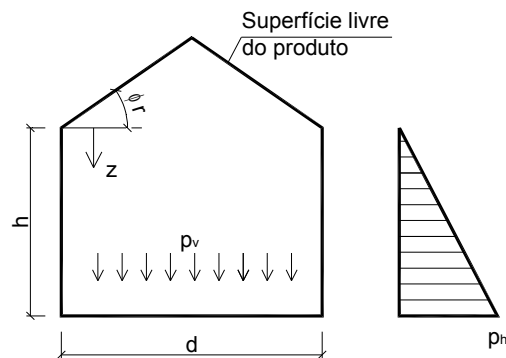


Figura 19 Pressões em silos de fundo plano – Rankine.
Fonte: Freitas (2001).

Rankine subdividiu as formulações para as pressões horizontais e verticais para dois casos distintos. No primeiro, considera-se que a superfície

de topo do produto armazenado é horizontal. Neste caso a pressão horizontal (p_h) estática na profundidade z , pode ser expressa pela equação (36).

$$p_h = K \cdot \gamma \cdot z \quad (36)$$

na qual, o parâmetro K é definido pela equação (37).

$$K = \frac{1 - \text{sen}\phi_r}{1 + \text{sen}\phi_r} \quad (37)$$

A pressão vertical (p_v) estática na profundidade z , abaixo da superfície, pode ser expressa pela equação (38).

$$p_v = \gamma \cdot z \quad (38)$$

No segundo caso, Rankine considera a superfície do produto armazenado com inclinação igual ao ângulo de repouso (ϕ_r). Para esse caso a pressão horizontal estática na profundidade z , pode ser calculada com base na equação (39).

$$p_h = \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \phi_r \quad (39)$$

Finalmente, a pressão vertical estática na profundidade z é definida pela equação (40).

$$p_v = \gamma \cdot (z + a_0 \cdot \text{tg}\phi_r) \quad (40)$$

na qual, parâmetro a_0 é definido como a distância genérica para cálculo da pressão conforme Figura 20.

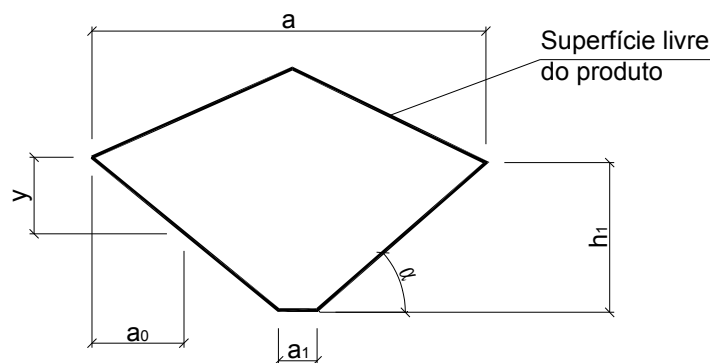


Figura 20 Silos tremonha, diagrama de pressão lateral - Rankine.
Fonte: Gomes (2000a).

2.7.4 Teoria de Coulomb

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. Esta teoria baseia-se na hipótese de que o esforço exercido no paramento do muro é proveniente da pressão do peso parcial de uma cunha de material que desliza pela perda de resistência ao cisalhamento ou atrito. O deslizamento ocorre, freqüentemente, ao longo de uma superfície de curvatura, em forma de espiral logarítmica. Nos casos práticos, esta curvatura é substituída por uma superfície plana, denominada plano de ruptura (BARROS, 2006).

Há vários parâmetros que influenciam na ruptura do solo, devendo-se avaliar o que determina a ruptura das fundações, usando os critérios de Terzaghi (ruptura lisa) e a espiral logarítmica. Sendo que o colapso pelas espirais logarítmicas cujo parâmetro não é a atrito interna do solo, o colapso clássico por mecanismos das cunhas e dos blocos usando e pelos estudos das espirais, assumindo que a superfície de ruptura é uma espiral logarítmica (MAYNAR, 2005).

Coulomb considerou o atrito entre o material e parede do muro de arrimo e sua teoria, mesmo adotando hipóteses simplificadoras, permite o cálculo das pressões com menor erro em relação à teoria de Rankine. Segundo Wijk (1993), citado por FREITAS & CALIL JR. (2005), 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. Em certos casos, quando pela teoria de Rankine são satisfeitas as condições limites da Teoria de Coulomb, chega-se a resultados idênticos. O valor do empuxo ativo e coeficiente são determinados pelas equações (41) e (42).

$$E_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2 \cdot K_a \quad (41)$$

$$K_a = \frac{\cos^2 \phi_i}{\cos \phi_w \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi_i + \phi_w) \cdot \text{sen}(\phi_i - \phi_r)}{\cos \phi_w \cdot \cos \phi_r}} \right]} \quad (42)$$

2.8 NORMAS INTERNACIONAIS

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. As normas internacionais que dispõem sobre previsão de pressões iniciais para silos de baixa relação são:

- Norma europeia ISO 11697 (1995);
- Norma europeia ENV (1995);
- Norma australiana AS 3774 (1996);
- Norma americana ACI 313 (1991);
- Norma alemã DIN 1055 (1987);
- Norma britânica BMHB (1985);
- Norma canadense CFBC (1983);
- Norma francesa SNBATI (1975).

De modo geral, estas normas baseiam-se em alguma das teorias tradicionais e introduzem elementos próprios para a previsão de pressões estáticas. Quanto à pressão dinâmica, adotam determinados coeficientes de sobre-pressão.

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 britânica BMHB (1985) e da francesa SNBATI (1975) que propõem configuração de carregamento diferentemente de Janssen, considerando uma região linearizada na parte superior do carregamento, como no caso das normas europeias EUROCODE ENV (1995) e ISO 11697 (1995), da australiana AS 3774 (1996) e da francesa SNBATI (1975). A norma canadense CFBC (1983) adota a teoria de Rankine e a norma DIN 1055 (1987) e a americana ACI 313 (1991), para o caso das pressões horizontais e de atrito, não alteram a formulação de Janssen.

Nesta pesquisa, foram analisadas as normas: europeia EUROCODE ENV (1995), alemã DIN 1055 (1987), australiana AS 3774 (1996), a americana

ACI 313 (1991) e a britânica BMHB (1995). Apresentando-se as formulações propostas para as pressões exercidas pelos produtos armazenados nas paredes e fundo de silos, além de todo o equacionamento, condições pré-estabelecidas e enquadramentos, tabelas e figuras.

2.8.1 ENV (1995)

A norma ENV (1995) adota a formulação de Janssen sem nenhuma alteração para o cálculo das pressões horizontais, equação (26), e de atrito na parede, equação (29). A pressão vertical (p_{vf}) na base plana de silos de baixa relação altura/diâmetro é expressa pela equação (43).

$$p_{vf} = 1,2 \cdot \left\{ p_{v1} + (p_{v2} - p_{v3}) \frac{1,5 \cdot d - h}{1,5 \cdot d - h_1} \right\} \quad (43)$$

na qual, p_{v1} é obtida da equação (27) com z igual à altura h , e p_{v2} é definido pela equação (44), p_{v3} é obtida pela equação (27) com z igual a h_1 (distância da superfície equivalente até o ponto de contato mais alto entre o produto e a parede) e d o diâmetro do silo.

$$p_{v2} = \gamma \cdot h_2 \quad (44)$$

na qual h_2 é a distância do ponto mais alto de contato entre o produto e a parede e a superfície livre do produto, segundo Figura 21.

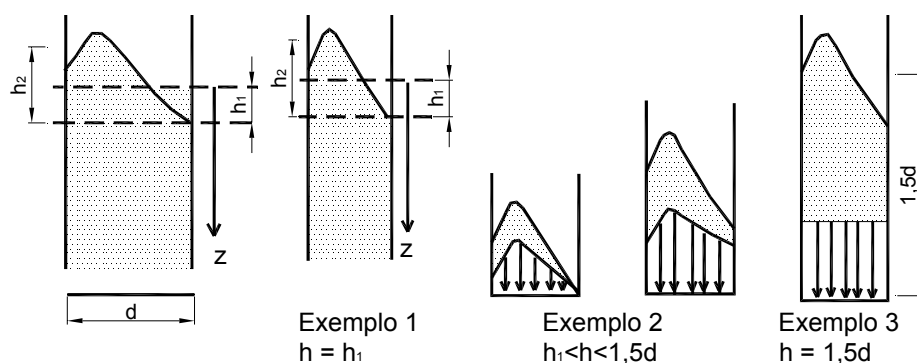


Figura 21 Pressões no fundo de silos baixos de fundo plano - Norma ENV.

A norma ENV (1995) introduz o parâmetro K na formulação de Janssen, o qual pode ser expresso pela equação (45).

$$K = 1,1 \cdot (1 - \text{sen} \phi_i) \quad (45)$$

na qual ϕ_i é o ângulo de atrito interno.

A norma ENV permite 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 22, calculada usando $K = 1,0$; até que esta pressão linear alcance a pressão obtida da equação (26) ou (29).

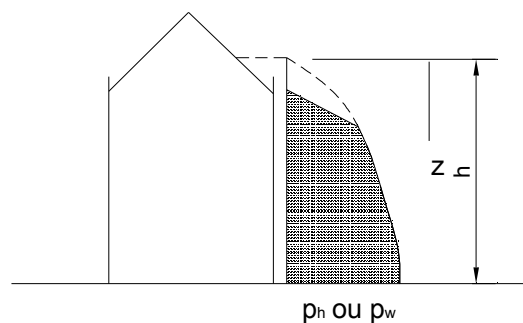


Figura 22 Distribuição da pressão horizontal ou de atrito em silos baixos – Norma ENV.

2.8.2 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 e, sendo obtida a pressão vertical no fundo do silo ($p_{vf(x)}$), variando segundo a coordenada radial no silo circular (x), expressa pela equação (46) e conforme Figura 23.

$$p_{vf(x)} = 1,25 \cdot p_{v1} \cdot \left[1 - 1,6 \cdot \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right] \quad (46)$$

na qual p_{v1} é calculada pela equação (47).

$$p_{v1} = \gamma \cdot h \quad (47)$$

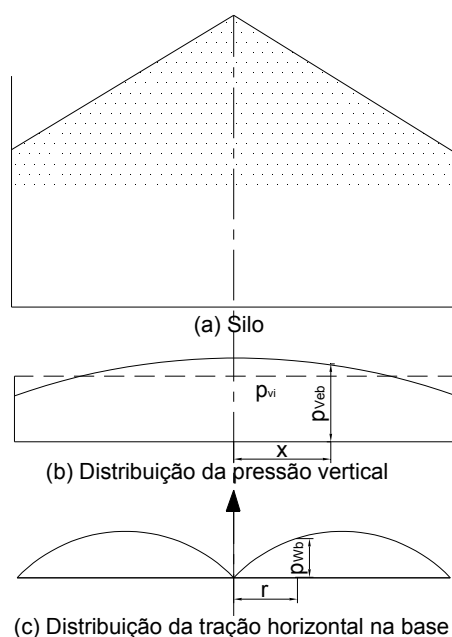


Figura 23 Distribuição das pressões em silos com fundo plano – AS 3774.

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 24, até a profundidade $z = 1,5h_0$, cuja pressão tem o mesmo valor, como dado pela equação (26) ou (29).

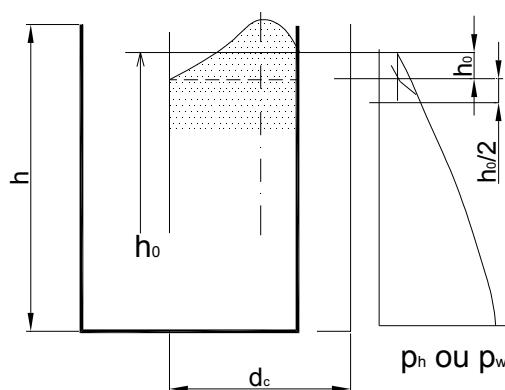


Figura 24 Distribuição da pressão horizontal e atrito em silos baixos –AS 3774.

Na formulação de Janssen [equação (26) e equação (27)], K é obtido através da equação (48).

$$K = \frac{1 + \operatorname{sen}^2 \phi_i - 2 \cdot \sqrt{(\operatorname{sen}^2 \phi_i - \mu \cdot \cos^2 \phi_i)}}{4 \cdot \mu^2 + \cos^2 \phi_i} \geq 0,35 \quad (48)$$

na qual o coeficiente de atrito do produto com a parede (μ) é calculada pela equação (28).

Analisando-se a equação (48), observa-se que para valores elevados tanto de ângulo de atrito interno (ϕ_i) quanto do coeficiente de atrito do produto com a parede (μ), obtém-se na raiz da equação (48) valores negativos, chegando-se a uma indeterminação do valor K; assim, a norma estabelece o valor K maior ou igual a 0,35; garantindo o procedimento de cálculo, principalmente para o caso no qual o parâmetro K não pode ser calculado.

2.8.3 ACI 313 (1991)

A norma americana ACI 313 (1991) 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 (26), (27) e (29)]; contudo, adota a formulação proposta por Rankine para o cálculo do parâmetro K, expresso pela equação (37) já vista anteriormente.

2.8.4 DIN 1055 (1987)

A norma alemã recomenda a utilização da teoria de Janssen para silos onde $h/d > 0,8$. Para essas relações, as pressões estáticas horizontais e de atrito são obtidas segundo as equações (26) e (29). 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 (p_{vf}) para $0,8 < h/d < 1,5$ é obtida pela equação (49).

$$p_{vf} = c_b \cdot p_v \leq \gamma \cdot z^* \quad (49)$$

na qual p_v é obtido da formulação de Janssen pela equação (27), c_b é igual a 1,8 para produtos a granel que provoquem choques no fundo de silos com fluxo de funil e c_b igual a 1,5 para os demais produtos e por fim z^* é a profundidade local da sobrecarga (Figura 25).

A norma prevê pressões verticais diferenciadas junto à parede e no centro do silo, sendo que junto à parede deve-se usar z igual à altura h e no centro do silo z deve ser o produto de uma vez e meia o diâmetro do silo, expresso pela equação (50).

$$z = 1,5 \cdot d \quad (50)$$

Na formulação de Janssen [equações (26) e (27)], K deve ser obtido pela equação (51).

$$K = 1,2 \cdot (1 - \text{sen} \phi_i) \quad (51)$$

Verificando-se que o valor de K calculado na norma DIN é aproximadamente igual ao valor da norma ENV, equação (45).

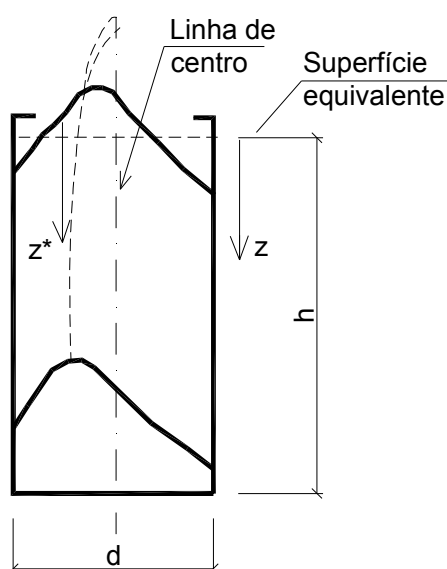


Figura 25 Parâmetros geométricos para cálculo da pressão no fundo – DIN.

2.8.5 BMHB (1995)

A norma britânica é a única que inclui na formulação para o cálculo das 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. Para o caso de $h/d < 1$, a norma britânica propõe duas fórmulas para o cálculo da pressão horizontal em silos cilíndricos, as quais podem ser escritas por meio das equações (52) e (53), onde deverá ser adotado o maior dos dois valores obtidos.

$$p_h = \frac{\gamma_u \cdot d}{4,88 \cdot \mu_l \cdot 0,75} \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{z}{h_0} \right) \right] \quad (52)$$

$$p_h = K_u \cdot \gamma \cdot z \quad (53)$$

na qual o valor de h_0 é definido pela equação (54).

$$h_0 = \frac{d}{4 \cdot \mu_l \cdot K_u} - \frac{h_s}{3} \quad (54)$$

sendo γ_u é o valor superior da densidade do produto, μ_l é o valor inferior do coeficiente de atrito do produto com parede, K_u é o valor superior de K e h_s é altura do cone formado pela superfície livre do produto.

A pressão de atrito por metro quadrado de parede é dada por $\mu \cdot p_h$ e a pressão vertical no fundo plano (p_{vf}) para $h/d < 1,5$ é suposta não uniforme, podendo ser determinada por meio da equação (55).

$$p_{vf} = \gamma \cdot z \quad (55)$$

na qual z é igual a h junto à parede e z é igual a $1,5d$ no centro do silo.

Finalmente, a norma britânica define dois valores para K , sendo um valor inferior K_l é igual a 0,25; para cálculo das pressões verticais, e um valor superior K_u igual a 0,60; para cálculo das pressões horizontais (Figura 26).

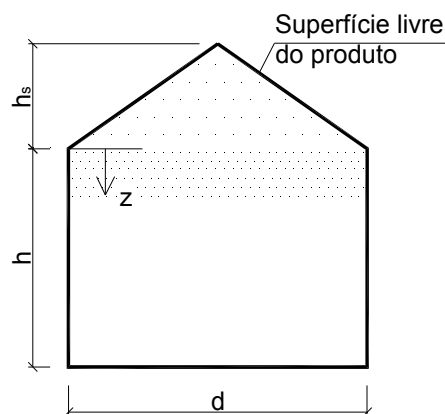


Figura 26 Parâmetros geométricos - BMHB.

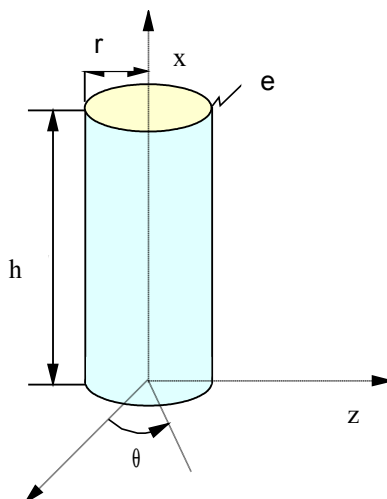
2.9 CASCAS CILÍNDRICAS

2.9.1 Considerações Iniciais

O objetivo da análise numérica é avaliar a distribuição dos esforços e deslocamentos, oriundos das ações permanentes e variáveis, com ênfase nos efeitos devidos ao material armazenado e ao vento, em regime linear de deformações (MITTELBAACH, 2002).

A análise numérica encontra-se estabelecida para duas categorias de produtos a serem ensilados: os que não provocam atrito nas paredes; e os que provocam atrito nas paredes. Também se considera na análise a variação de espessura das chapas do costado do silo ao longo da altura.

Uma casca cilíndrica básica pode ser representada pela Figura 27. Será considerada que a casca cilíndrica tem paredes finas, altura “h”, espessura da parede “e”, e raio “r”, onde $e \ll r$. Adotar-se-á a hipótese de que a relação altura/diâmetro não é muito grande (MITTELBAACH, 2002).

**Figura 27** Características de uma casca.

O objetivo da teoria de placas esbeltas é reduzir o problema tri-dimensional para uma aproximação bi-dimensional. Forças e momentos

internos que agem em um elemento de placa, como é ilustrado na Figura 28, são expressos em termos de forças e momentos por unidade de comprimento ao longo das arestas do elemento (MESQUITA & CODA, 2005). Assim, as intensidades das forças e dos momentos são expressas em termos das tensões internas pelas equações (56), (57), (58), (59) e (60).

$$N_x = \int_{-e/2}^{e/2} \sigma_x^* \cdot \left(1 + \frac{z}{r}\right) \cdot dz \quad N_\theta = \int_{-e/2}^{e/2} \sigma_\theta^* \cdot dz \quad (56)$$

$$N_{x\theta} = \int_{-e/2}^{e/2} \sigma_{x\theta}^* \cdot \left(1 + \frac{z}{r}\right) \cdot dz \quad N_{\theta x} = \int_{-e/2}^{e/2} \sigma_{\theta x}^* \cdot dz \quad (57)$$

$$Q_x = \int_{-e/2}^{e/2} \tau_{xz}^* \cdot \left(1 + \frac{z}{r}\right) \cdot dz \quad Q_\theta = \int_{-e/2}^{e/2} \tau_{\theta z}^* \cdot dz \quad (58)$$

$$M_x = r \cdot \int_{-e/2}^{e/2} \sigma_x^* \cdot \left(1 + \frac{z}{r}\right) \cdot z \cdot dz \quad M_\theta = r \cdot \int_{-e/2}^{e/2} \sigma_\theta^* \cdot z \cdot dz \quad (59)$$

$$M_{x\theta} = r \cdot \int_{-e/2}^{e/2} \tau_{\theta x}^* \cdot \left(1 + \frac{z}{r}\right) \cdot z \cdot dz \quad M_{\theta x} = r \cdot \int_{-e/2}^{e/2} \tau_{\theta x}^* \cdot z \cdot dz \quad (60)$$

nas quais N_x , $N_{x\theta}$, N_θ , $N_{\theta x}$ são as intensidades das forças normais e cisalhante no plano, por unidade de comprimento; Q_x , Q_θ são as intensidades das forças transversais cisalhantes, por unidade de comprimento; M_x , M_θ são as intensidades dos momentos fletores, por unidade de comprimento; e $M_{\theta x}$, $M_{x\theta}$ são as intensidades dos momentos torçores, por unidade de comprimento. E finalmente, σ_x^* , $\tau_{x\theta}^*$, etc. são as componentes de tensões em um ponto ao longo da espessura da casca e σ_x , $\tau_{x\theta}$, etc denotam as componentes de tensões no plano médio da casca (PAULA, 2003).

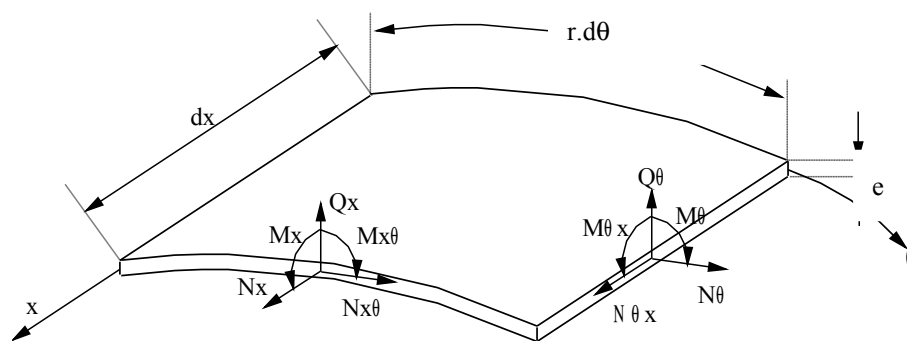


Figura 28 Elemento de casca cilíndrica.

No caso de casca são utilizadas as hipóteses de Kirchhoff. Dentre elas destacam-se: uma seção reta e normal ao plano médio da estrutura indeformada permanece reta e normal ao plano na configuração deformada (desta forma pode-se desprezar as deformações cisalhantes transversais); e as tensões normais na direção transversal são pequenas quando comparadas com outras componentes de tensão normal (MACHADO, 2006).

Como consequência da primeira aproximação, as componentes de deslocamento em qualquer ponto da casca, u^* , v^* , w^* , podem ser expressas em termos das quantidades correspondentes ao plano médio, u , v , w , pelas equações (61), (62) e (63).

$$u^* = u + z \cdot \beta_x \quad (61)$$

$$v^* = v + z \cdot \beta_\theta \quad (62)$$

$$w^* = w \quad (63)$$

nas quais, β_x , β_θ são as rotações relativas em relação aos eixos θ e x respectivamente (PAULA, 2003).

As componentes de deformação em qualquer ponto da casca ε_x , ε_θ , $\gamma_{x\theta}$, podem ser expressas em termos dos deslocamentos correspondentes ao plano médio pelas equações (64), (65) e (66).

$$\varepsilon_x^* = u_{,x}^* + \frac{1}{2} \cdot w_{,x}^{*2} \quad (64)$$

$$\varepsilon_\theta^* = \left(\frac{v_{,\theta}^* + w^*}{a} \right) + \frac{1}{2} \cdot w_{,\theta}^{*2} \quad (65)$$

$$\gamma_{x\theta}^* = \left(\frac{v_{,\theta}^*}{r} + v_{,x}^* \right) + \frac{1}{2} \cdot w_{,\theta}^* \cdot w_{,x}^* \quad (66)$$

Substituindo as equações (61) em (64), equação (62) em (65) e equação (63) na (66) obtém-se as equações cinemáticas para as cascas cilíndricas equações (67), (68) e (69).

$$\varepsilon_x = u_{,x} + \frac{1}{2} \cdot \beta_x^2 \quad (67)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \left(\frac{v_{,\theta} + w}{r} \right) + \frac{1}{2} \cdot \beta_{\theta}^2 \quad (68)$$

$$\gamma_{x\theta} = \left(\frac{v_{,\theta}}{r} + v_{,x} \right) + \frac{1}{2} \cdot \beta_{\theta} \cdot \beta_x \quad (69)$$

Assim, obtém-se que as rotações e curvaturas expressas pelas equações (70) a (74).

$$\beta_x = -w_{,x} \quad (70)$$

$$\beta_{\theta} = \frac{-w_{,\theta}}{r} \quad (71)$$

$$\kappa_x = \beta_{x,x} \quad (72)$$

$$\kappa_{\theta} = \beta_{\theta,\theta} \quad (73)$$

$$\kappa_{x\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\beta_{x,\theta}}{r} + \beta_{\theta,x} \right) \quad (74)$$

Com as relações cinemáticas, equações (67) a (74), e a lei de Hooke generalizada, pode-se agora substituí-las nas equações (56) a (60) e se obter as leis constitutivas, equações (75), (76) e (77).

$$N_x = C \cdot (\varepsilon_x + v \cdot \varepsilon_{\theta}) \quad M_x = F \cdot (\kappa_x + v \cdot \kappa_{\theta}) \quad (75)$$

$$N_{\theta} = C \cdot (\varepsilon_{\theta} + v \cdot \varepsilon_x) \quad M_{\theta} = F \cdot (\kappa_{\theta} + v \cdot \kappa_x) \quad (76)$$

$$N_{x\theta} = C \cdot \frac{1-v}{2} \cdot \gamma_{x\theta} \quad M_x = F \cdot (1-v) \cdot \kappa_{x\theta} \quad (77)$$

nas quais, C e F são os parâmetros de rigidez axial e à flexão, obtidos respectivamente, pelas equações (78) e (79).

$$C = \frac{E \cdot e}{1 - \nu^2} \quad (78)$$

$$F = \frac{E \cdot e^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (79)$$

Pode-se escrever que a energia total do sistema pela equação (80).

$$\Pi = U + \Omega \quad (80)$$

na qual U é a energia de deformação e Ω é o potencial das cargas externas.

A energia de deformação pode ser decomposta em duas parcelas, uma referente à energia de deformação à flexão (U_b) e outra a energia de membrana (U_m), equação (81).

$$U = U_m + U_b \quad (81)$$

Os valores de cada termo da energia de deformação podem ser expressos pelas equações (82) e (83).

$$U_m = \frac{r \cdot C}{2} \cdot \iint \left(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_\theta^2 + 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon_x \cdot \varepsilon_\theta + \frac{1-\nu}{2} \cdot \gamma_{x\theta}^2 \right) \cdot dx \cdot d\theta \quad (82)$$

$$U_b = \frac{r \cdot F}{2} \cdot \iint \left(\kappa_x^2 + \kappa_\theta^2 + 2 \cdot \nu \cdot \kappa_x \cdot \kappa_\theta + 2 \cdot (1-\nu) \cdot \kappa_{x\theta}^2 \right) \cdot dx \cdot d\theta \quad (83)$$

Por conseguinte, a expressão do potencial das cargas externa pode ser escrita pela equação (84).

$$\Omega = \iint p \cdot u_{,x} \cdot dx \cdot d\theta \quad (84)$$

na qual p é o carregamento axial por unidade de comprimento, distribuído nos bordos do cilindro (PAULA, 2003).

2.9.2 Método para Análise de Cascas Cilíndricas

Na engenharia há basicamente três caminhos para se resolver um problema: o método analítico, o método experimental e os métodos numéricos. O método analítico é aquele baseado em equações desenvolvidas com base teórica para certas situações. Suas vantagens são a exatidão da resposta, para aquela modelagem e a exigência de apenas lápis e papel. A solução analítica geralmente só é disponível para problemas simples e a sua aplicação geral exige hipóteses de difícil ocorrência na prática, tais como homogeneidade das características do material, isotropia e linearidade de resposta, o que se torna distante da realidade e, portanto, inexata (MITTELBAACH, 2002).

O método experimental apresenta algumas vantagens interessantes, como a alta confiança na resposta obtida e a simplificação de cálculos. Porém, também, apresenta fortes desvantagens, como o alto custo da confecção de protótipos, a validade da resposta para casos específicos e o tempo consumido. Os métodos numéricos são métodos de convergência que apresentam uma seqüência de cálculos simples; porém, repetitivos. Devido a estas características, são normalmente oferecidos como softwares para execução no computador. Estes métodos simulam uma realidade e apresentam vantagens inquestionáveis, a saber: possibilidade de executar várias versões de possíveis soluções a fim de se otimizar a resposta, rapidez na resposta,

menor custo em relação aos métodos experimentais e razoável facilidade de execução. Entre esses métodos, coloca-se o Método dos Elementos Finitos, um método com grande disseminação na área da engenharia do produto, em empresas de projeto (ALMEIDA & CODA, 2005).

Este método aplica-se às mais diversas áreas da engenharia, tais como análise estrutural, problemas de contato, grandes deformações, fluxo de calor ou material, ou quaisquer problemas que possam ser expressos por meio de equações diferenciais. Apesar de ser uma solução aproximada, sua característica de alta flexibilidade, custo reduzido e disponibilidade para a resolução de praticamente qualquer tipo de problema são vantagens decisivas (ANDRADE JR., 1998).

2.9.3 Elementos Finitos

Segundo ALMEIDA (1992), o Método dos Elementos Finitos surgiu como uma nova possibilidade para resolver problemas da teoria da elasticidade, superando as dificuldades e problemas inerentes aos métodos de Rayleigh-Ritz, Galerkin, diferenças finitas e outros. Nos dois primeiros métodos, nem sempre é fácil obter as funções aproximadoras que satisfaçam as condições de contorno irregular e saber se elas se aproximam da função exata. O método das diferenças finitas, apesar de oferecer uma resposta mais rápida e exigir menor nível de recursos computacionais, apresenta grande limitação quanto à capacidade de modelagem e representação de estruturas e condições reais (ALMEIDA, 2004).

A maioria dos problemas de engenharia é governada por sistemas de equações diferenciais que descrevem matematicamente o comportamento físico de um determinado fenômeno. Estas equações são válidas em certa região onde são impostas condições de contorno ou iniciais apropriadas formando assim o modelo matemático para o problema físico (ALMEIDA & CODA, 2005). No entanto, na prática, a solução analítica da maioria desses problemas de engenharia é desconhecida ou de difícil obtenção. Neste contexto, os métodos numéricos de resolução de equações diferenciais têm sido utilizados amplamente com o objetivo de obter soluções aproximadas para o problema físico.

O método dos elementos finitos (MEF) é um dos métodos numéricos mais utilizados na modelagem do comportamento de estruturas, principalmente devido a sua grande confiabilidade e flexibilidade. A idéia básica do MEF consiste em discretizar o domínio físico (geometria) por meio de uma quantidade finita de elementos com forma e tamanho arbitrários, formando assim o domínio computacional (BADIALI & SÁLES, 1999).

Embora o MEF seja uma ferramenta bastante poderosa e versátil na simulação de problemas de engenharia, a geração de modelos inadequados pode resultar em péssimas interpretações da análise. A geração de bons modelos implica na geração de malhas com boa qualidade (reduzindo os erros de aproximação), escolha adequada das propriedades do material e aplicação de adequadas condições iniciais e de contorno (CAVALCANTI, 2006).

Segundo MANFRIM (1994), apenas em casos relativamente simples é possível obter soluções exatas para as equações diferenciais obtidas pela teoria das cascas delgadas. Assim, nas situações gerais é necessário lançar mão de métodos que proporcionem soluções aproximadas.

A essa divisão do domínio dá-se o nome de rede de elementos finitos, ou malha. A malha, desse reticulado, pode ser aumentada ou diminuída variando o tamanho dos elementos finitos. Os pontos de intersecção das linhas dessa rede são chamados nós. Ao invés de buscar uma função admissível que satisfaça as condições de contorno para todo o domínio, no método dos elementos finitos as funções admissíveis são definidas no domínio de cada elemento finito. Para cada elemento finito, é montado um funcional que, somado aos dos demais elementos finitos, formam o funcional para todo o domínio. Para cada elemento, a função aproximadora é formada por variáveis referidas aos nós do elemento e por funções denominadas de funções de forma.

Na fase denominada de Modelagem da Estrutura, procede-se a uma simplificação e posterior discretização da estrutura. O modelo não deve desprezar detalhes necessários a uma solução precisa, mas também não deve conter pormenores demasiados, conforme Livesley (1983) citado por ALMEIDA (2004). Conforme referido anteriormente, sabe-se que a precisão da resposta é proporcional ao número de elementos em que a estrutura foi dividida; porém,

também é proporcional a este número o tempo de processamento em computador e a memória utilizada pelo programa de Elementos Finitos. Assim deve-se achar uma posição intermediária que possibilite uma precisão de resposta suficiente juntamente com um tempo de execução admissível.

A escolha do tipo e tamanho dos elementos nessas subdivisões artificiais constitui ponto importante, e depende das propriedades do elemento escolhido. A última fase reveste-se de grande importância, pois são as funções de deslocamento que definem as formas possíveis que o elemento pode assumir ao deformar-se, influenciando diretamente na qualidade da resposta obtida. Quanto maior o grau das funções de deslocamento, mais as deformações da estrutura são reais. Uma dificuldade adicional para utilizá-las é que quanto maior este grau, maior número de nós por elemento ela pede, aumentando a quantidade de dados de entrada. Todavia, ao se utilizar elementos de ordem superior, pode-se utilizar menor número de elementos para a mesma precisão de resposta, o que pode diminuir o número de dados de entrada (ALMEIDA, 2003).

2.10 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A Estatística é uma parte da Matemática Aplicada que fornece métodos para coleta, organização, descrição, análise e interpretação de dados, visando à tomada de decisões (TOREZANI, 2005).

A estatística é uma ciência do ramo da matemática, que pode ser dividida em duas grandes partes: a estatística descritiva, que se preocupa com a organização e apresentação dos dados de interesse; e a inferência estatística, que tem por meta a análise e interpretação do significado desses dados. Essa análise e interpretação são necessárias, pois os dados referem-se apenas a amostras de elementos extraídos do universo da pesquisa, enquanto os resultados desejados são referentes ao conjunto desse universo, também chamado população. Existe aí, portanto, um processo de indução ou inferência tirar conclusões sobre o todo a partir do conhecimento de uma parte, a amostra – e para isso existem conceitos e fórmulas adequadas (GOMES, 2000b).

Usualmente, é impraticável observar toda uma população, seja pelo custo alto seja por dificuldades operacionais. Examina-se então uma amostra,

de preferência bastante representativa, para que os resultados obtidos possam ser generalizados para toda a população (PEDRUZZI, 2005).

2.10.1 Teste de Hipóteses

A maioria das tomadas de decisões ocorre em situação de incerteza, porque é baseada nos dados de uma amostra proveniente de uma população. Nesses casos, a estatística fornece um poderoso instrumento para a tomada de decisões (GOMES, 2000b).

Os testes de hipóteses são procedimentos comuns em estudos experimentais que através dos resultados numéricos, permitem ao pesquisador concluir diferença ou igualdade estatística de efeitos (MUCELIN, 2003). Podendo-se verificar se as médias são iguais ou não, ou seja, se existe efeitos dos tratamentos aplicados (são iguais a zero ou não).

Ao realizar um experimento e obter os dados, geralmente duas hipóteses são enunciadas, a primeira considera nulo o efeito (hipótese nula H_0) e a segunda considera que tais efeitos são diferentes (hipótese alternativa H_1). Todo o processo decisório será feito em função de H_0 , ou seja, aceitar ou rejeitar H_0 . Logo, se aceita H_1 só se a hipótese nula for rejeitada (FERRÃO, 2005).

Segundo DANTAS & PAULA (2005), a hipótese alternativa H_1 é a definição operacional da hipótese de pesquisa, que é a predição deduzida da teoria que está sendo testada (na postura conservadora é a afirmação do novo, do que se quer mostrar).

FERRÃO (2005) expõe que a teoria estatística possibilita medir todas as probabilidades envolvidas na questão, logo se pode prevenir, controlando a probabilidade de cometer o erro mais grave. A probabilidade de cometer o erro de tipo I (rejeitar a hipótese nula H_0 quando ela é verdadeira) é simbolizada por alfa (α), também, conhecida como nível de significância.

Já a probabilidade de cometer o erro de tipo II (aceitar a hipótese nula H_0 quando ela é falsa) é simbolizada por beta (β), que está relacionado com o poder do teste (BERGAMASCHI, 2005).

Assim, a área de significância é algo que precisa ser considerado, é o significado do que é ou não distante da média ou que apresente destaque em

relação à maioria, ou seja, serem considerados como estatisticamente não-significativos (Figura 29).



Para decidir sobre qual hipótese assumir como verdadeira, deve-se fixar o nível de significância, que é a probabilidade de se rejeitar uma hipótese quando esta é verdadeira. Usualmente, usa-se o nível de significância entre 1 a 5%. Comumente, usa-se fixar o nível de significância antes do teste (MUCELIN, 2003).

Se aceita a hipótese (aceita-se H_0), quer dizer que as médias são iguais ao nível de significância de 5%, não se pode afirmar com certeza que as médias são iguais. Pode-se afirmar com certeza usando 5% de nível de significância, ou seja, têm-se 95% de certeza.

O nível de significância dá a probabilidade de o pesquisador estar cometendo um erro ao tomar decisão, assim sendo não é correto afirmar com certeza que as médias são iguais, pois o nível de significância de 5%, ou seja, há 5% de chance de estar cometendo um erro. Assim, o correto em toda análise de hipóteses é enunciar o nível de significância.

2.10.2 Análise de Variância

A Análise de Variância (ANOVA) é um método de análise estatística, constata se existe efeito do fator em estudo (FERRÃO, 2005). Deseja-se verificar se existem diferenças entre as respostas médias de tratamentos; o procedimento utilizado para inferir se tais diferenças realmente existem é chamado de Análise de Variância – ANOVA (OPAZO, 2005).

Segundo CAZORLA (2005), analisa-se a variação atribuída às diferenças entre as unidades experimentais (QMR - quadrado médio do resíduo), variação atribuída às diferenças entre as unidades experimentais e

atribuída às diferenças causadas pelos tratamentos (diferenças entre as médias, QM_{Trat} - quadrado médio dos tratamentos).

A Análise de Variância (ANOVA) avalia se o que está sendo analisado tem médias iguais ou diferentes, verificando se são iguais ou não, o que equivale a testar se os efeitos tratamentos (T_i) são iguais a zero ou não – se existe o efeito tratamento (OPAZO, 2005).

A hipótese inicial prevê a igualdade das médias, enquanto que a hipótese alternativa afirma que pelo menos uma das médias é diferente.

Hipótese:

$H_0: T_i = 0$ (hipótese nula) Versus

$H_1: T_i \neq 0$ para pelo menos um tratamento i é diferente (hipótese alternativa)

Sendo que neste caso o efeito tratamento é o tipo de variável que está sendo analisado.

Utiliza-se a estatística F , que é dada pela equação (85).

$$F_0 = \frac{\text{média da soma dos quadrados devido aos tratamentos}}{\text{média da soma dos quadrados dos resíduos}} = \frac{QM_{Tr}}{QMR} \quad (85)$$

Uma vez estabelecido o nível de significância desejado (α), pela Anova retira-se o valor de F_0 , se for menor que $F_{(k-1, N-k, \alpha\%)}$ se aceita a hipótese de H_0 , significa que os dados são consistentes com H_0 e por isso ela não deve ser rejeitada, ou seja, as médias são iguais e não existe efeito tratamento ao nível de 5% de significância. Já se $F_0 > F_{(k-1, N-k, \alpha\%)}$, rejeita-se H_0 ao nível de $\alpha\%$ de significância, ou seja, existe o efeito tratamento e as médias são diferentes (CAZORLA, 2005).

A ANOVA não indica quais tratamentos são iguais, nem se todos são distintos, para isso deve-se fazer comparação de médias (teste Tukey, Scott-Knott, etc.). Usa-se este resultado para testar hipóteses sobre diferenças entre médias de tratamentos. Realiza-se a Análise de Variância para concluir, com certo nível de confiança, que os tratamentos (resultados) são ou não são significativamente diferentes entre si. Sendo que a inferência formal para comparar médias de diferentes tratamentos implica a definição de modelos probabilísticos (CAZORLA, 2005).

Quando há vários fatores a serem estudados pode-se fazer uma análise fatorial, segundo BUTTON (2001), o planejamento fatorial é indicado

para um procedimento quando há necessidade de se definir os fatores mais importantes e estudar os efeitos sobre a variável resposta escolhida. Para ilustrar o procedimento desta técnica considere um experimento com dois fatores (A e B), cada um desses parâmetros será testado com a níveis para o fator A e b níveis para o fator B. Assim, nesse experimento existem ab combinações de teste. Essa organização também representa o caso geral do experimento fatorial de dois fatores para uma resposta (y_{ijk}) observada quando o fator A está no i -ésimo nível ($i=1,2, \dots,a$).

Segundo MONTGOMERY (1991), com o experimento organizado dessa forma é possível verificar se:

- A resposta é alterada significativamente quando muda o nível do fator A;
- A resposta é alterada significativamente quando muda o nível do fator B;
- A interação dos fatores altera significativamente a resposta.

O autor também define o modelo estatístico pela equação (86).

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (86)$$

na qual μ é a média dos resultados, τ_i é o efeito principal do fator A, β_j é o efeito principal do fator B, $(\tau\beta)_{ij}$ é o efeito da interação entre os fatores A e B, ε_{ijk} é o erro experimental.

Podendo-se utilizar a ANOVA para verificar se esses efeitos são significativos nas respostas, podendo-se encontrar experimentos com técnicas fatoriais com dois, três ou mais níveis, seguindo os mesmos conceitos de dois fatores (MONTGOMERY, 1991).

2.10.3 Teste de Tukey

O teste de Tukey (PIMENTEL, 1987) é baseado na amplitude total estudentizada, onde se deve calcular o valor $\Delta = q.s/\sqrt{r}$, onde r é o número de repetições, Δ a diferença mínima significativa, $s = \sqrt{QMR}$ - a estimativa do desvio padrão residual e q é o valor de $q_{(k,n-k)}$ - amplitude total estudentizada ao nível de 5% ou 1% de probabilidade, que é função de n° . e tratamentos e n° . de graus de liberdade do resíduo (erro).

O teste de Tukey é válido para comparar a totalidade dos contrastes de 2 médias, ou seja, para os $k(k-1)/2$ contrastes do tipo $C = \mu_i - \mu_j$; $1 \leq i < j \leq k$.

As hipóteses a serem testadas são:

$$H_0 : \mu_i = \mu_j \quad \text{vs} \quad H_1 : \mu_i \neq \mu_j \quad \text{para } i \neq j$$

A estatística do teste é dada pela equação (87).

$$|C| = |\bar{Y}_i - \bar{Y}_j| \tag{87}$$

Regra de decisão: se $|C| = |\bar{Y}_i - \bar{Y}_j| > \Delta$, rejeita-se H_0 .

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CONCEITUAÇÃO

Esta pesquisa centra-se na análise de pressões de silos, realizando, primeiramente, uma investigação teórica das pressões exercidas por produtos armazenados em silos metálicos cilíndricos, objetivando a análise dos conceitos e métodos de cálculo.

Ela foi estruturada em algumas etapas:

A primeira foi a revisão bibliográfica, podendo a mesma ser dividida em três partes: Silos, Análise Estatística e Análise Numérica. Na abordagem dos silos, foram apresentados conceitos de silos, suas classificações, as principais teorias e normas internacionais de cálculo. Na Análise Estatística e Análise Numérica, apresentaram-se as técnicas estatísticas e análise através de elementos finitos, respectivamente, que serão utilizados no presente trabalho. Com a revisão bibliográfica pode-se fazer uma análise das diversas normas e pesquisas, comparando-se os conceitos e formulações propostas por cada um.

Em segundo lugar, utilizou-se o software OpenOffice Calc 2.0 (2005) para o desenvolvimento de uma planilha de cálculo, a fim de facilitar o cálculo das pressões, segundo cada norma analisada.

Em seguida, fez-se a análise estatística, comparando-se as normas, a fim de verificar se alguma apresentava o mesmo valor de cálculo que a outra, avaliando-se os maiores e menores valores apresentados segundo os parâmetros analisados.

Esta pesquisa teve prosseguimento, na última etapa, com a modelagem de um silo, utilizando-se os conceitos de elementos finitos.

A seguir, serão mais bem detalhados os materiais e métodos utilizados em cada etapa da pesquisa.

3.2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

O comparativo e o estado da arte das teorias de pressões foram realizados através da pesquisa bibliográfica de artigos, dissertações, teses e formulações propostas pelos mais importantes pesquisadores, além da pesquisa das prescrições das normas internacionais.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE CÁLCULO

Para o cálculo das pressões e com base nas formulações das normas estudadas, foi elaborada uma planilha eletrônica no software OpenOffice Calc, para determinação das pressões devidas ao produto armazenado em silos.

Foi utilizado o software OpenOffice Calc, tendo em vista sua facilidade de uso, disponibilidade e ser utilização livre, e hoje está entre os mais utilizados na indústria tecnológica e ainda ser grandemente utilizado em ensino e pesquisa.

A estrutura da planilha baseia-se em uma pasta de trabalho com os dados de entrada (Figura 30) e várias outras pastas com a formulação de cada norma e o gráfico com o resultado obtido de cada cálculo.

Na entrada de dados (Figura 30), devem ser informadas todas as características geométricas do silo e as propriedades físicas do produto armazenado. Contém, ainda, as características dos materiais de armazenagem segundo a NBR 6120 (1980), características dos materiais de armazenamento segundo a Norma AS 3774 (1996) e designação da superfície da parede do silo segundo a Norma australiana AS 3774 (1996).

Dados do silo:

Altura "h _{tot} " (m)	2,75
Diâmetro "d" (m)	4,00
Perímetro "L" (m)	12,57
Área da base "A" (m²)	12,57
Altura efetiva "h" (m)	2,00

Dados do produto armazenado:

Peso específico "γ" (kg/m³)	1300,00
Coefficiente de atrito do produto com a parede "μ"	0,41
Ângulo de atrito interno "φ"	35
Ângulo de repouso "δ"	35
Valor superior da densidade do produto "γ _{sup} " (kg/m³)	1300,00
Valor inferior do coeficiente de atrito do produto com parede "μ"	0,41
Altura do cone formado pela superfície livre do produto "h _c "	0,75
constante para norma EN1991-4	1,3
Ângulo de atrito com a parede "φ _w "	22,5

Dados Auxiliares:

Arroz	7,5	35
Amor com casca	5,5	35
Árvore	5	30
Batata	7,5	30
Canola	3,5	-
Centeio	7	35
Canavieira	7	25
Faveola	5	45
Ferilho	7,5	31
Feno prensado	1,7	-
Fritas	3,5	-
Fumo	3,5	35
Milho	7,5	27
Sopa	7	25
Trigo	7,8	27

Características dos materiais de armazenamento segundo a Norma NBR 6120/1988

Material	Peso específico (KN/m³)	Ângulo de atrito interno
Areia com umidade natural	17	30
Areia atenuada	18	25
Cal em pó	10	35
Cal em pedra	10	45
Calça	12	-
Cimento	14	25
Clinker de cimento	15	30
Pedra brita	18	40
Seno	19	30

Características dos materiais de armazenamento segundo a Norma AS 3774/1990

Produto	Peso específico (kN/m³)	Ângulo de atrito interno (δ)	Ângulo de atrito com a parede (δ _w)	Ângulo de repouso (δ _r)	Parâmetro K
Alumina	10	32,5	22,5	27,5	27
Carvão	7	29,5	19,5	22,5	29
Cimento	13	45	22,5	25,5	28
Carvão negro	8,5	30	20	22,5	35
Carvão marrom	7	35	23,5	30	33
Areia seca	14	35	20	25	30
Farelo (trigo)	6,5	26,5	19	26,5	40
Cinza volante	8	32,5	21,5	30	22
Cal hidratada	6	40	21,5	29	40
Cal silo em pó	11	30	20	26,5	34
Milho	7	30,5	20	25	30
Arçúcar	8	35,5	20	27,5	29
Trigo	7,8	29	20	24	29

Designação da superfície da parede do silo segundo a Norma australiana AS 3774 1990

Tipo	Descrição da Superfície	Requisitos média da linha central (μm)	Materiais típicos
D1	Polido	0,01 a 1	Aço inoxidável polido, plástico polímero estruturado de alto peso específico, aço carbono galvanizado, alumínio.
D2	Liso	1 a 10	Aço inoxidável decapado, plástico de polímero fundido de alto peso específico, aço carbono pintado, aço carbono com leve ferrugem de superfície, aços cerâmicos lisos, concreto liso, metal laminado perfurado com nervura vertical; produto móvel (separação do produto por deformação da estrutura).
D3	Plugado	10 a 1000	Concreto aparente áspero, aço carbono corroído, aços cerâmicos grossos, metal laminado perfurado com nervura vertical; produto móvel (imobilidade do produto devido a rugosidade da estrutura).
D4	corrugado	>1000	Metal laminado perfurado com nervura horizontal.

Figura 30 Planilha eletrônica – Dados de entrada.

O programa calcula as pressões devidas ao produto armazenado para silos. A saída de dados é realizada por meio da apresentação dos resultados (pressões) na forma de tabela (Figuras 31 a 35) e também na forma gráfica (Figuras 36 a 40).

Norma Europeia:

Pressão vertical na base do silo	d (m)	P _v (kg/m²)
P _v = 3549,14	0	3549,14
P _{v1} = 2789,53	z=h	3549,14
P _{v2} = 650,00		
P _{v3} = 317,23	z=h1	
K = 0,47		
Ph _{w0} = 148,80		
Ph _{w1} = 1299,09		

Pressão horizontal

Ph = 0,00	(kg/m²)	z (m)
Ph = 163,29	(kg/m²)	0,28
Ph = 318,08	(kg/m²)	0,55
Ph = 464,82	(kg/m²)	0,83
Ph = 603,53	(kg/m²)	1,10
Ph = 735,80	(kg/m²)	1,38
Ph = 860,81	(kg/m²)	1,65
Ph = 979,31	(kg/m²)	1,93
Ph = 1091,65	(kg/m²)	2,20
Ph = 1198,14	(kg/m²)	2,48
Ph = 1299,09	(kg/m²)	2,75

Pressão de atrito com a parede

P _w = 0,00	(kg/m²)
P _w = 67,64	(kg/m²)
P _w = 131,75	(kg/m²)
P _w = 192,54	(kg/m²)
P _w = 250,16	(kg/m²)
P _w = 304,78	(kg/m²)
P _w = 356,55	(kg/m²)
P _w = 405,64	(kg/m²)
P _w = 452,18	(kg/m²)
P _w = 496,29	(kg/m²)
P _w = 538,10	(kg/m²)

Figura 31 Planilha eletrônica – Dados de saída Norma ENV.

Microsoft Excel - programa

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

100%

Pressão de atrito com a parede

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
Laboratório de Modelos Reduzidos
Rua Universitária, 2069, Jardim Universitário
Cascavel - PR - CEP: 85819-110
Fone: 45 - 220-3221 Fax: 45-324-4566

LMPR
Laboratório de Modelos Reduzidos - COET

h1 = Distância da superfície equivalente até o ponto de contato mais alto entre o produto e a parede (m) 0,25

h2 = Distância do ponto mais alto de contato entre o produto e a parede e a superfície livre do produto (m) 0,5

Norma Americana:

Pressão vertical na base do silo	d (m)	Pv (kg/m ²)	Pressão horizontal	z (m)	Pressão de atrito com a parede
P _{hw} = 833,53 (kg/m ²)	0	3075,88	Ph = 0,00 (kg/m ²)	0,00	Pw = 0,00 (kg/m ²)
k = 0,27	4,00	3075,88	Ph = 95,40 (kg/m ²)	0,28	Pw = 39,52 (kg/m ²)
Pv = 3075,88			Ph = 187,90 (kg/m ²)	0,55	Pw = 77,83 (kg/m ²)
			Ph = 277,59 (kg/m ²)	0,83	Pw = 114,98 (kg/m ²)
			Ph = 364,55 (kg/m ²)	1,10	Pw = 151,00 (kg/m ²)
			Ph = 448,86 (kg/m ²)	1,38	Pw = 185,93 (kg/m ²)
			Ph = 530,62 (kg/m ²)	1,65	Pw = 219,79 (kg/m ²)
			Ph = 609,89 (kg/m ²)	1,93	Pw = 252,62 (kg/m ²)
			Ph = 686,75 (kg/m ²)	2,20	Pw = 284,46 (kg/m ²)
			Ph = 761,27 (kg/m ²)	2,48	Pw = 315,33 (kg/m ²)
			Ph = 833,53 (kg/m ²)	2,75	Pw = 345,26 (kg/m ²)

Dados de entrada / ENV1991-4 / Graf ENV / ACI / Graf ACI / BMHB / Graf BMHB / DIN / Graf5 / AS3774 / Graf AS

Figura 32 Planilha eletrônica – Dados de saída da norma ACI.

Microsoft Excel - programa

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

100%

Pressão de atrito com a parede

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
Laboratório de Modelos Reduzidos
Rua Universitária, 2069, Jardim Universitário
Cascavel - PR - CEP: 85819-110
Fone: 45 - 220-3221 Fax: 45-324-4566

LMPR
Laboratório de Modelos Reduzidos - COET

h1 = Distância da superfície equivalente até o ponto de contato mais alto entre o produto e a parede (m) 0,25

h2 = Distância do ponto mais alto de contato entre o produto e a parede e a superfície livre do produto (m) 0,5

Norma Inglesa:

Pressão vertical na base do silo	d (m)	Pv (kg/m ²)	Pressão horizontal	z (m)	K _u	Pressão de atrito com a parede
Pv1 = 2600,00 (kg/m ²)	0,00	2600,00	Ph = 0,00 (kg/m ²)	0,00	0,6	Pw = 0,00 (kg/m ²)
Pv2 = 3575,00 (kg/m ²)	2,00	3575,00	Ph = 270,84 (kg/m ²)	0,28		Pw = 112,18 (kg/m ²)
Pv3 = 2600,00 (kg/m ²)	4,00	2600,00	Ph = 491,66 (kg/m ²)	0,55		Pw = 203,65 (kg/m ²)
			Ph = 674,06 (kg/m ²)	0,83		Pw = 279,21 (kg/m ²)
			Ph = 826,47 (kg/m ²)	1,10		Pw = 342,33 (kg/m ²)
			Ph = 955,11 (kg/m ²)	1,38		Pw = 395,62 (kg/m ²)
			Ph = 1064,69 (kg/m ²)	1,65		Pw = 441,01 (kg/m ²)
			Ph = 1158,79 (kg/m ²)	1,93		Pw = 479,99 (kg/m ²)
			Ph = 1240,20 (kg/m ²)	2,20		Pw = 513,71 (kg/m ²)
			Ph = 1311,09 (kg/m ²)	2,48		Pw = 543,07 (kg/m ²)
			Ph = 1373,21 (kg/m ²)	2,75		Pw = 568,80 (kg/m ²)
			h ₀ = 3,773689 (m)			

Dados de entrada / ENV1991-4 / Graf ENV / ACI / Graf ACI / BMHB / Graf BMHB / DIN / Graf5 / AS3774 / Graf AS

Figura 33 Planilha eletrônica – Dados de saída da norma BMHB.

Microsoft Excel - programa

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

Digite uma pergunta

Arial 10

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
Laboratório de Modelos Reduzidos
Rua Universitária, 2069, Jardim Universitário
Cascavel - PR - CEP: 85819-110
Fone: 45 - 220-3221 Fax: 45-324-4566

LMR
Laboratório de Modelos Reduzidos - CCET

h1 =	Distância da superfície equivalente até o ponto de contato mais alto entre o produto e a parede (m)	0,25
h2 =	Distância do ponto mais alto de contato entre o produto e a parede e a superfície livre do produto (m)	0,5

Norma Inglesa:

Pressão vertical na base do silo				Pressão horizontal			Pressão de atrito com a parede		
		(kg/m ²)	d (m)	Pv (kg/m ²)	Ph =	z (m)	Pw =	(kg/m ²)	
Pv1=	1396,30		0,00	4876,50	0,00	0,00	0,00		
Pv1=	4876,50		0,00	4876,50	177,71	0,28	73,61		
Pv2=	7314,75		2,00	7314,75	345,35	0,55	143,05		
Pv3=	4876,50		4,00	4876,50	503,50	0,83	208,56		
K	0,51				652,70	1,10	270,36		
					793,45	1,38	328,66		
					926,23	1,65	383,66		
					1051,49	1,93	435,54		
					1189,66	2,20	484,49		
					1281,14	2,48	530,66		
					1386,30	2,75	574,23		

Dados de entrada \ENV1991-4 \Graf ENV \ACI \ Graf ACI \ BM-HB \ Graf BM-HB \ DIN \ Gráf5 \ AS3774 \ Graf AS

Figura 34 Planilha eletrônica – Dados de saída da norma DIN.

Microsoft Excel - programa

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

Digite uma pergunta

Arial 10

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
Laboratório de Modelos Reduzidos
Rua Universitária, 2069, Jardim Universitário
Cascavel - PR - CEP: 85819-110
Fone: 45 - 220-3221 Fax: 45-324-4566

LMR
Laboratório de Modelos Reduzidos - CCET

h1 =	Distância da superfície equivalente até o ponto de contato mais alto entre o produto e a parede (m)	0,25
h2 =	Distância do ponto mais alto de contato entre o produto e a parede e a superfície livre do produto (m)	0,5

Norma Inglesa:

Pressão vertical na base do silo					Pressão horizontal			Pressão de atrito com a parede		
		(kg/m ²)	x	Pv (kg/m ²)	d(m)	Ph =	z (m)	Pw =	(kg/m ²)	
Pv1=	3575,00			2681,25	0	0,00	0,00	0,00		
Pv1=	2681,25		-2,00	2681,25	0,666667	104,65	0,26	43,35		
Pv1=	3674,31		-1,33	3674,31	1,333333	205,81	0,55	85,25		
Pv1=	4270,14		-0,67	4270,14	2,000000	303,59	0,83	125,75		
Pv1=	4468,75		0,00	4468,75	2,666667	398,12	1,10	164,90		
Pv1=	4270,14		0,67	4270,14	2,666667	489,49	1,38	202,75		
Pv1=	3674,31		1,33	3674,31	3,333333	577,81	1,65	239,34		
Pv1=	2681,25		2,00	2681,25	4,000000	663,20	1,93	274,70		
K=	0,30					745,73	2,20	308,89		
						825,51	2,48	341,94		
						902,63	2,75	373,88		

Dados de entrada \ENV1991-4 \Graf ENV \ACI \ Graf ACI \ BM-HB \ Graf BM-HB \ DIN \ Gráf5 \ AS3774 \ Graf AS

Figura 35 Planilha eletrônica – Dados de saída da norma AS.

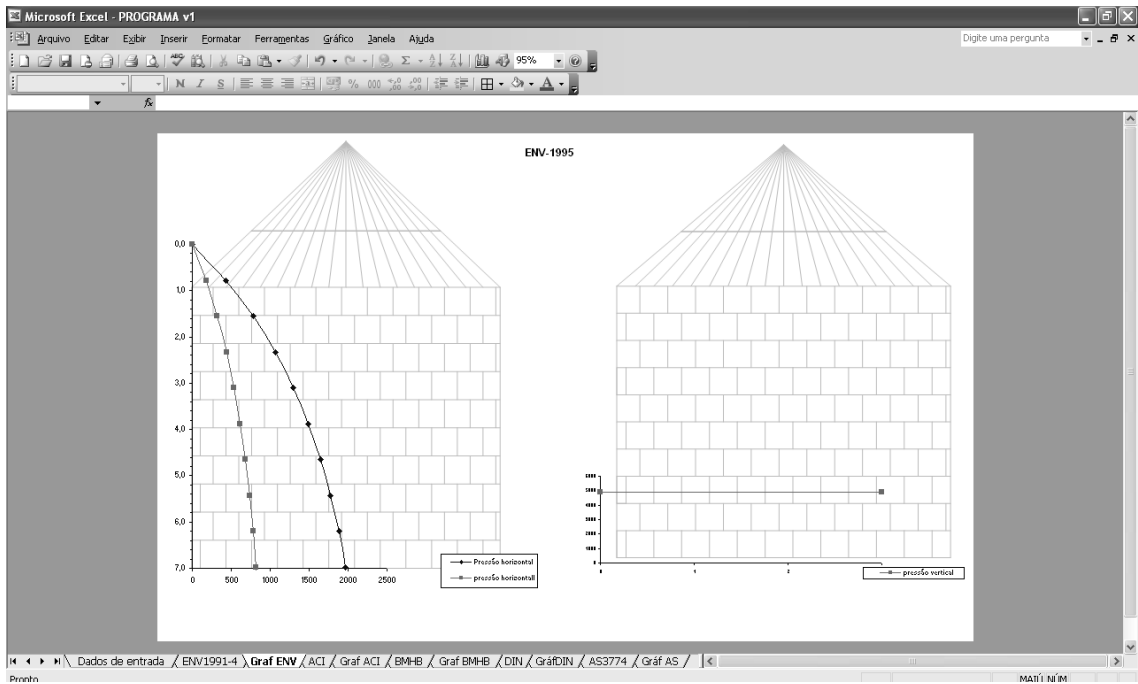


Figura 36 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma ENV.

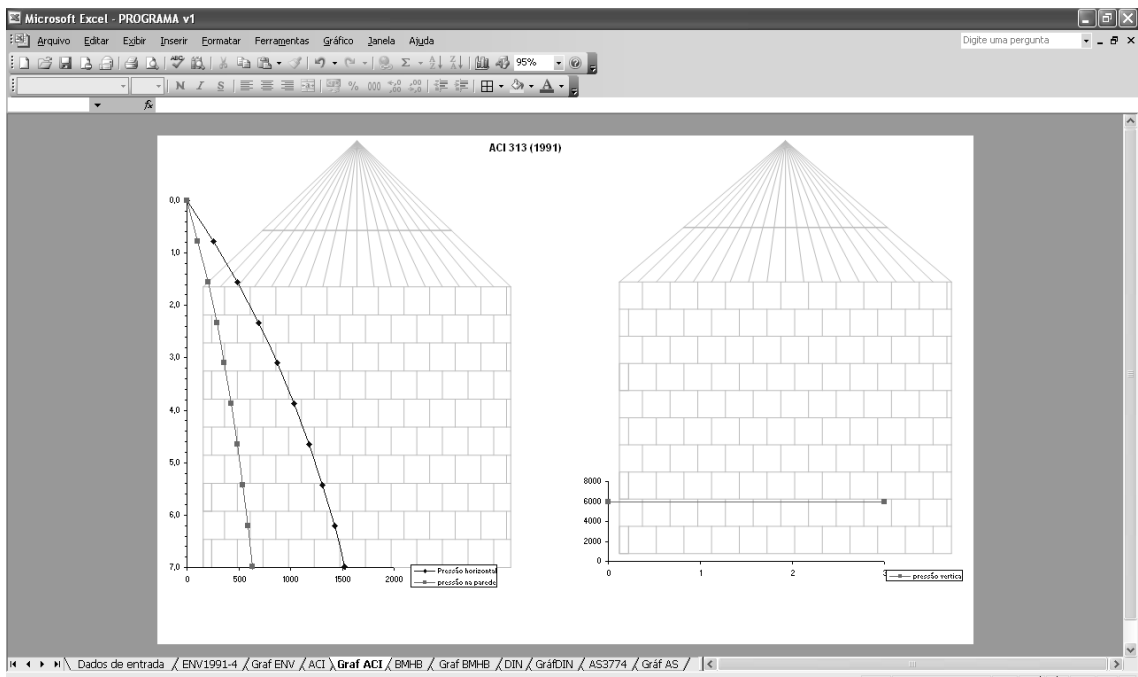


Figura 37 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma ACI.

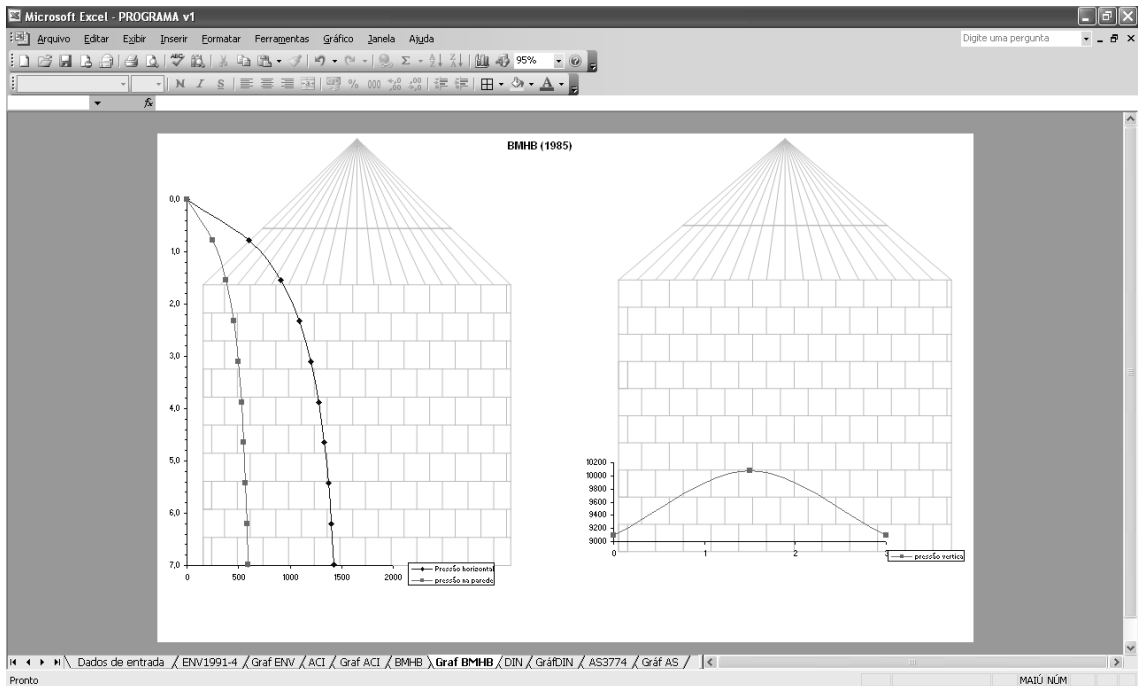


Figura 38 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma BMHB.

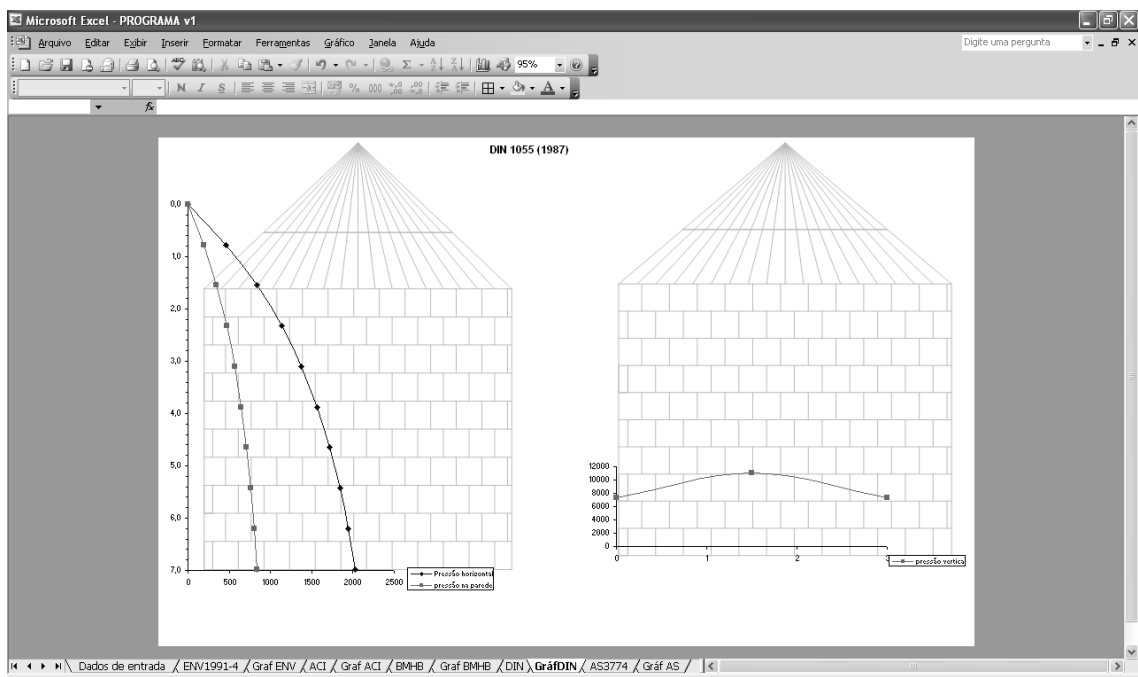


Figura 39 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma DIN.

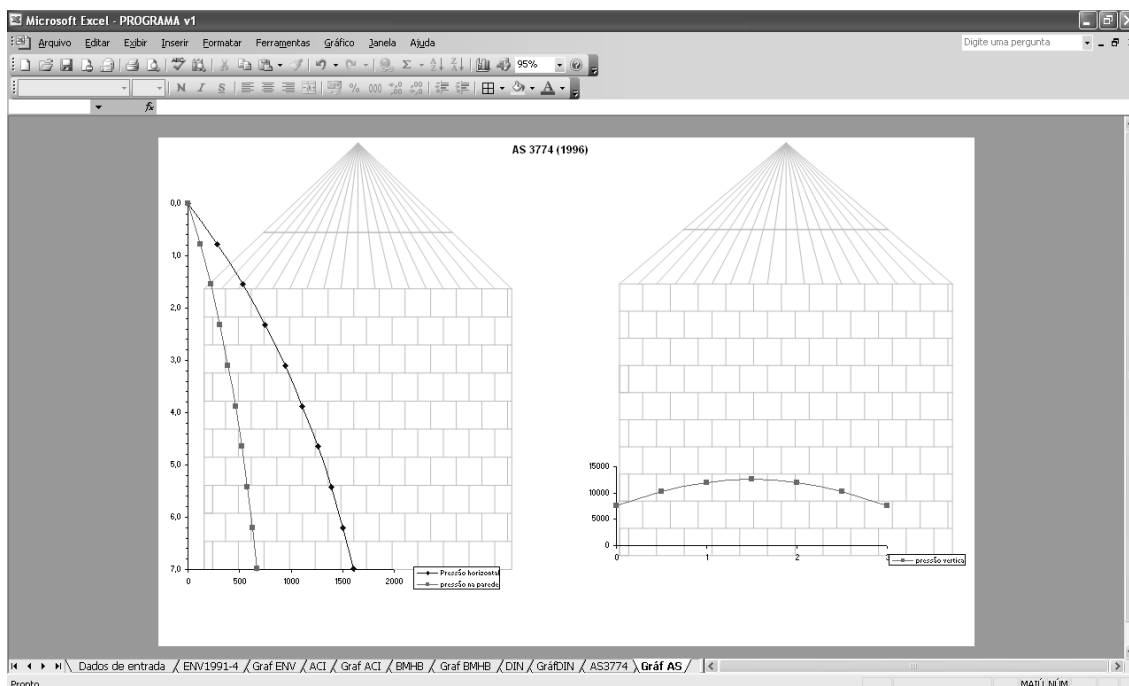


Figura 40 Planilha eletrônica – Gráfico de saída da norma AS.

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Na análise estatística, foi seguido um método científico, que consiste das cinco etapas básicas (TOREZANI, 2005):

1. Coleta e crítica de dados;
2. Tratamento dos dados;
3. Apresentação dos dados;
4. Análise e interpretação dos resultados;
5. Conclusão.

Foi feita a análise estatística das normas, buscando-se verificar se alguma norma se equipara à outra, quanto ao resultado obtido no cálculo das pressões. Para facilitar a análise dos dados, os valores obtidos no cálculo em cada norma foram lançados nos softwares Minitab® (2000) e Sisvar® 4.6 para Windows (FERREIRA, 2000). Foram escolhidos esses softwares por apresentar uma plataforma interativa, por terem versão demonstrativa com uso livre e ainda por ser um dos programas mais completos da área existente na atualidade. Sendo programas integrados de Análise Estatística, Gráficos, de Gerenciamento de Base de Dados, caracterizando uma ampla seleção do processo analítico, para as Ciências e Engenharia.

No presente trabalho, foi feito o teste de hipótese, pela análise da ANOVA. Como a ANOVA não indica quais tratamentos são iguais, nem se todos são distintos, fez-se a comparação de médias.

Para verificar quais médias são iguais, pode-se lançar mão de comparação através de vários testes, sendo que no caso do presente trabalho foi utilizado o teste de Tukey por ser o mais utilizado em estudos e pesquisas, sendo seu cálculo realizado automaticamente através do lançamento dos dados e processamentos nos softwares Sisvar e Minitab.

Foi utilizado o nível de significância de 5%, pois se utiliza normalmente este índice na comparação de experimentos e testes de comparações de médias, além de ser o recomendado para pesquisas de campo e agronomia (PIMENTEL, 1987 e MUCELIN, 2003).

As etapas básicas utilizadas no teste de hipóteses seguiram as recomendações de OPAZO (2005):

1. Formular estatisticamente as hipóteses a testar, isto é, definir o parâmetro a testar e especificar a hipótese nula e a hipótese alternativa;
2. Escolher o nível de significância, α , a ser utilizado; estabelecer o valor crítico da estatística de teste, t_c ; o mesmo é delimitar a região crítica e região de aceitação;
3. Calcular a estatística de teste;
4. Tomar a decisão e interpretar os resultados: Se $|t| < t_c$ então H_0 não deve ser rejeitada.

Como já citado, na pesquisa para os cálculos do teste estatístico foram utilizados os softwares Minitab e Sisvar. Devendo-se apenas lançar os valores obtidos no cálculo das pressões de cada norma e selecionar as opções desejadas, obtendo-se os resultados tabelados da Análise de Variância e Teste de Tukey (Anexos A, B e C).

Sendo que nesses softwares a regra de decisão utilizada é do Teste F, utilizando o resultado do p-value. Sendo que se $p\text{-value} = P[F > F_{(k-1, N-k, \alpha\%)}] < \alpha\%$, com $\alpha\%$ de significância, que as médias dos tratamentos são diferentes. Assim, se o p-value for menor o nível de significância rejeita-se H_0 : $T_1 = T_2 = T_3 = T_i = 0$ (hipótese nula), há pelo menos um efeito tratamento diferente, ou seja, pelo menos um deles apresenta média diferente dos demais.

3.4.1 Parâmetros e metodologias de Análise

Na pesquisa, foram avaliadas as respostas das formulações propostas pelas normas ENV (1995), DIN 1055 (1987), AS 3774 (1996), ACI 313 (1991) e a BMHB (1995) para diferentes produtos armazenados e matérias constituintes das paredes do silo, através das rotinas de cálculo na plataforma OpenOffice Calc. Fazendo-se simulações, variando-se os valores do ângulo de atrito interno e peso específico do produto armazenado e os valores do ângulo de atrito com a parede.

Os parâmetros para análise foram determinados com base nas formulações de Janssen e Rankine e em uma análise fatorial. Para cada fator analisado, foram utilizados três níveis de estudo. Deste modo, adotaram-se os valores de 25, 35 e 45° para ângulo de atrito interno; 500, 1000 e 1500 kg m⁻³ para o peso específico; e, 20, 27 e 32° para o ângulo de atrito com a parede. Os resultados foram analisados por meio do software de análise estatística Sisvar, aplicando-se o teste F. A análise de variância e comparação de médias foi realizada para um nível de significância 5%.

Os valores de 25, 35 e 45° para ângulo de atrito interno foram escolhidos de acordo com NBR 6120 (1980) e abrangem vários materiais que poderiam ser analisados desde Cevada (25°) a Farinha (45°), incluindo nestas faixas de valores a soja e milho (29° e 27°), que são produtos comuns de armazenamento na região onde se desenvolveu a pesquisa (região Oeste do Paraná)

No caso do peso específico, os valores 500, 1000 e 1500 kg m⁻³ foram escolhidos, pois modela a faixa de peso de vários produtos desde areia até clinker de cimento, incluindo nessas faixas a soja e o milho (700 kg.m⁻³ e 750 kg.m⁻³).

Os valores de 20, 27 e 32° para o ângulo de atrito com a parede, valores médios abrangendo dos três tipos de superfície da parede (D₁ a D₃).

3.4.2 Análise dos resultados

Os dados foram alinhados em tabelas e são apresentados os valores das pressões vertical, horizontal e de atrito conforme cada combinação dos valores dos parâmetros estudados.

3.5 ANÁLISE NUMÉRICA DO SILO

Para análise numérica, foi considerado que os silos cilíndricos são formados por chapas de aço solidarizadas entre si e geometricamente definidos pelo diâmetro, altura e espessura do corpo. O corpo do silo é soldado ao fundo e a tampa pode ser ou inteiramente parafusada ou apenas fixada em determinados pontos do topo do silo. As paredes do silo são vinculadas ao fundo considerando restrições aos deslocamentos nas direções x, y, z.

3.5.1 Característica do Silo

O aço empregado está caracterizado por um módulo de elasticidade (E) igual a 205.000 MPa, coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,3; densidade (γ) de 77.000 N.m⁻³, tensão de escoamento $f_y = 250$ MPa, e tensão última $f_u = 400$ MPa. As espessuras das chapas do corpo do silo são consideradas constantes ao longo da altura do silo. As ações do material armazenado de acordo com a norma DIN 1055-6 (1987).

3.5.2 Método Numérico

Neste item da pesquisa, trabalhou-se apenas com a norma DIN, pois o principal objetivo é gerar a análise do silo por método finito e, posteriormente, se comparar com normas, sendo que foi escolhida esta norma por apresentar resultados maiores em média no cálculo das pressões, ou seja, a pior situação.

No caso de uma análise experimental, deve-se fazer a modelagem de cada norma com intuito de fazer um comparativo entre o teórico, a modelagem e o experimental, tendo-se neste trabalho uma modelagem inicial do silo.

3.5.3 Ansys

Foi utilizado o software Ansys® para a modelagem dos silos, envolvendo essencialmente as seguintes etapas: (a) modelamento sólido top-down e bottom-up, (b) geração do modelo para FEA (Finite Element Analysis) com definição de elementos e densidade da malha; (c) definição de material, (d) aplicação de carregamentos e condições de contorno, (e) escolha e execução do solver, e (f) pós-processamento, com geração de relatórios.

O programa computacional Ansys® foi utilizado na elaboração e análise dos modelos em elementos finitos. Na geração das malhas, foi utilizado o elemento de casca SHELL93, definido por oito nós, com seis graus de liberdade por nó: translações nas direções x, y e z e rotações em torno dos eixos x, y, z. (Figura 41).

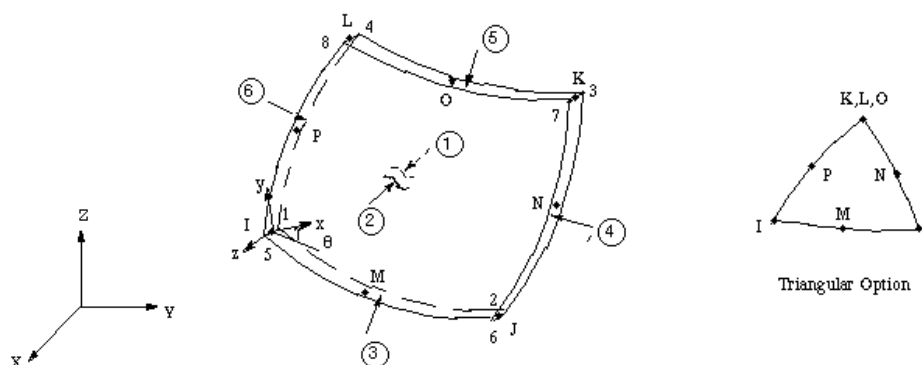


Figura 41 Elemento para a casca elástica, SHELL 93.

As solicitações externas podem ser aplicadas aos nós e às superfícies dos elementos (indicados por números circulados na Figura 42). A espessura do elemento é definida em cada nó e pode ser constante ou variar de cada nó para nó. Pode-se definir, também, a distância da superfície média (MID) e as superfícies (1) (fundo-BOT) e (2) (topo – TOP – na direção positiva do eixo z).

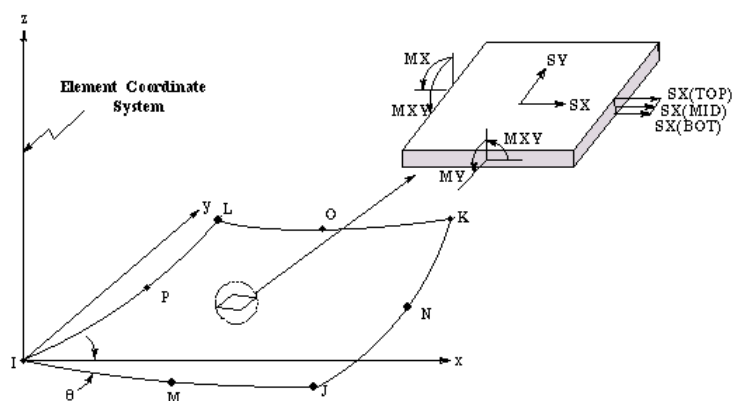


Figura 42 Tensões no elemento de casca, SHELL 93.

3.5.4 Esquema de análise

Foram realizados três esquemas de análise, sendo que as características gerais do silo são altura de 5,00 m e diâmetro de 2,00 m. Escolheram-se essas dimensões por serem semelhantes ao silo protótipo recebido como doação da empresa Consilos S.A e instalado no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, podendo, assim, se utilizar o mesmo para trabalhos futuros de análises experimentais.

O primeiro esquema sem subdivisões e pressão constante de 600 kgf.m⁻²; o segundo com 10 subdivisões e pressão constante de 600 kgf.m⁻²; e o último com 10 subdivisões e pressão variável. Foram escolhidos este três esquemas a fim de se verificar qual se adequaria melhor à realidade de deformação dos silos, um com pressão constante, outro com subdivisões e aplicações constante ou o último com subdivisões e variação de pressão ao longo de sua altura. As características do material utilizado são:

- Ângulo de atrito interno (ϕ_i): 35° - valor médio dos produtos agrícolas segundo NBR 6120/1980;
- Peso específico (γ): 600 kg.m⁻³ - valor médio do peso específico dos produtos agrícolas segundo NBR 6120/1980;
- Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w): 25° - rugosidade D₂, sendo a rugosidade média dos produtos utilizados.

Quanto aos dados de entrada no programa Ansys®, foram adotados as seguintes constantes:

- Sistema Estrutural;
- Elemento tipo: Shell 93;
- Real constantes: Shell tickness at node I até node L = 0,2;
- Element X- axis rotation THETA = 10°;
- Propriedades do material isotrópico: Módulo de Elasticidade (E) igual a 2100000 kgf.cm⁻² e coeficiente de Poisson igual a 0,2.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Na presente pesquisa, realizou-se uma investigação teórica das pressões exercidas por produtos armazenados em silos cilíndricos, verificando-se que 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.

Além disso, na formulação de Janssen os valores calculados entre as normas não são os mesmos, pois a equação de Janssen é função de três variáveis: densidade, coeficiente de atrito com a parede, relação entre as pressões horizontais e verticais. Sendo que a maioria das normas apresenta em tabela própria para os valores de γ , μ e K de alguns produtos. Ao se examinar as principais normas estrangeiras em relação às formulações propostas para as pressões observam-se, de imediato, as diferentes formulações para obtenção do parâmetro K.

As formulações apresentadas para a determinação das pressões ainda estão sujeitas a algumas limitações, com variações entre as normas, como: relação altura/diâmetro, dimensão máxima das partículas do produto armazenado, pequenas cargas de impacto no carregamento, excentricidade máxima da abertura da saída, produto de fluxo livre, entre outras.

Embora seja o modelo mais utilizado em todo o mundo, a previsão das pressões atuantes nas paredes e fundo, devido ao produto armazenado, é bastante complexa e há divergências entre pesquisadores e as normas estrangeiras. Tal complexidade é decorrente da heterogeneidade dos parâmetros dos produtos. Observam-se diferentes resultados obtidos para as pressões horizontais, verticais e a relação entre elas, parâmetro K. Isso tem

levado diversos pesquisadores a formularem diferentes teorias sobre as pressões nos silos.

Considerando que as pressões estão diretamente relacionadas com as propriedades dos produtos e sua grande variabilidade, é necessário maior domínio destas. Outro ponto importante é a determinação do valor de K . Este precisa ser mais estudado, levando em consideração o ângulo de atrito com a parede, nos cálculos desse parâmetro, o que para alguns pesquisadores tornaria a análise mais consistente. A utilização de modelos passa a ser uma alternativa para a definição do valor de K , pois as condições de ensaio passam a ser reais, no estudo das tensões internas de confinamento dos produtos armazenados.

As pressões horizontais, de acordo com as 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.

A utilização de equipamentos de medição direta de pressão tem se desenvolvido, considerando as limitações e erros nas determinações indiretas das pressões. A construção de modelos de células de pressão em laboratórios que forneçam valores de pressão normal e tensões de cisalhamento é o grande desafio para os pesquisadores. No tocante à experimentação em silos, os resultados das pesquisas mostram que a sua condução está diretamente ligada ao domínio das variáveis que interferem nas medidas. A escolha correta do equipamento, bem como a sua instalação são elementos imprescindíveis na obtenção de resultados mais coerentes. Muitos projetos têm se limitado ao custo de montagem e de calibração das células.

Pode-se, ainda, constatar que o comportamento das pressões é condicionado pelas propriedades físicas dos produtos armazenados. Recomendando-se, então, que para cada produto a ser armazenado, sejam realizados ensaios de caracterização, de forma para se ter um correto dimensionamento e análise do silo a ser construído, de modo a evitar erros de cálculos e gastos com super-dimensionamento, ou ainda, recuperação de uma estrutura por sub-dimensionamento.

4.2 PROGRAMA COMPUTACIONAL

Na primeira fase do projeto, foi desenvolvido um programa computacional, onde foram implementadas as formulações das prescrições normativas e as teorias citadas no item anterior. Nas Figuras 43 a 47, são apresentados os comportamentos das pressões nos silos conforme cada norma internacional analisada.

Invertendo o eixo y (crescente), a curva é uma espiral logarítmica, que foi estudada por Terzaghi e Coulomb, na análise de resistência e colapso do solo (item 2.7.4 desta Dissertação).

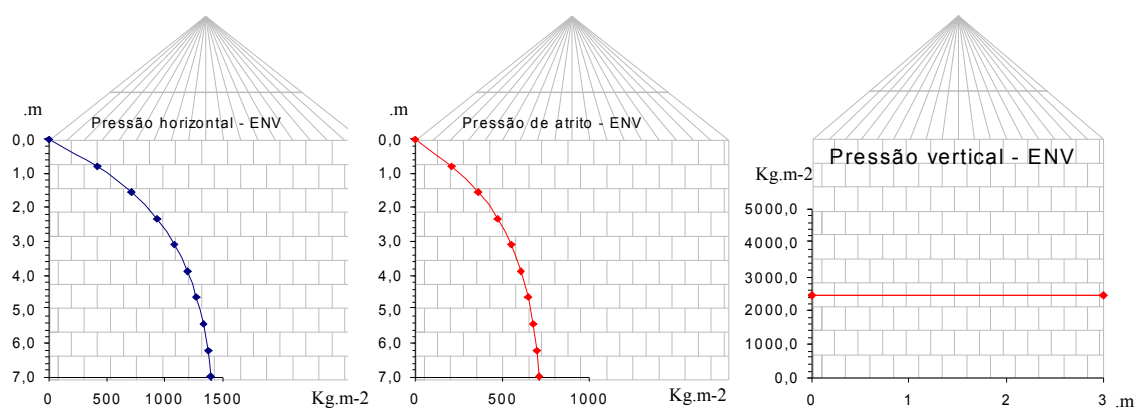


Figura 43 Pressões – Norma ENV.

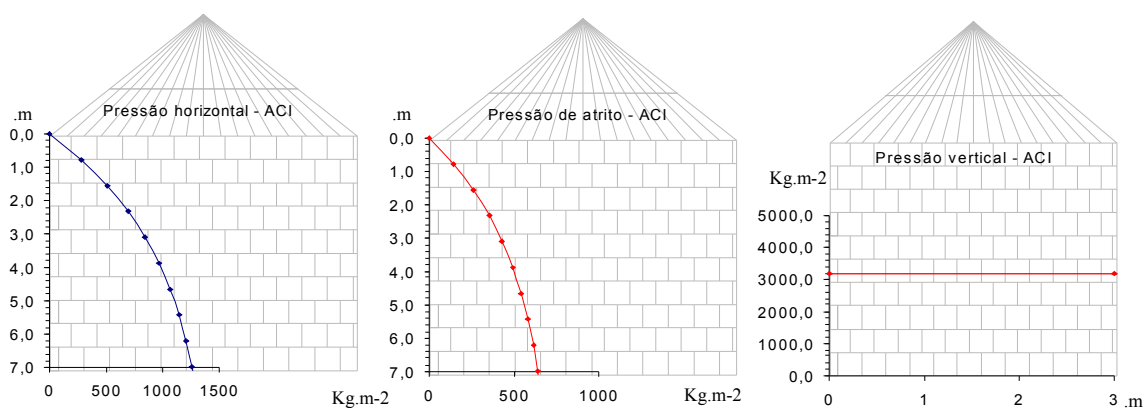


Figura 44 Pressões – Norma ACI.

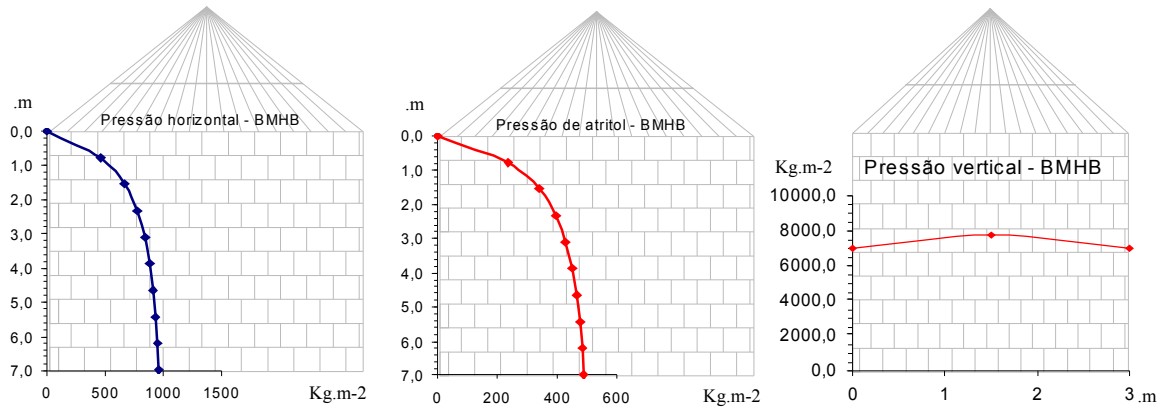


Figura 45 Pressões – Norma BMBH.

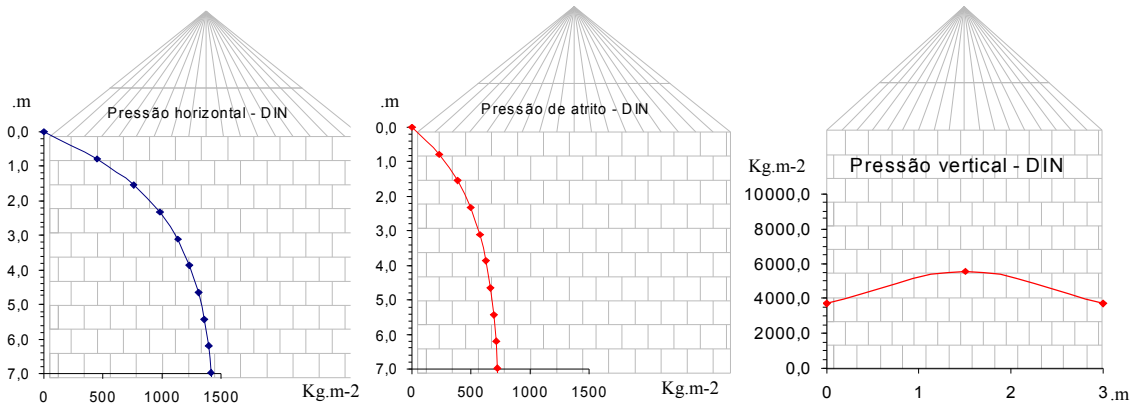


Figura 46 Pressões – Norma DIN.

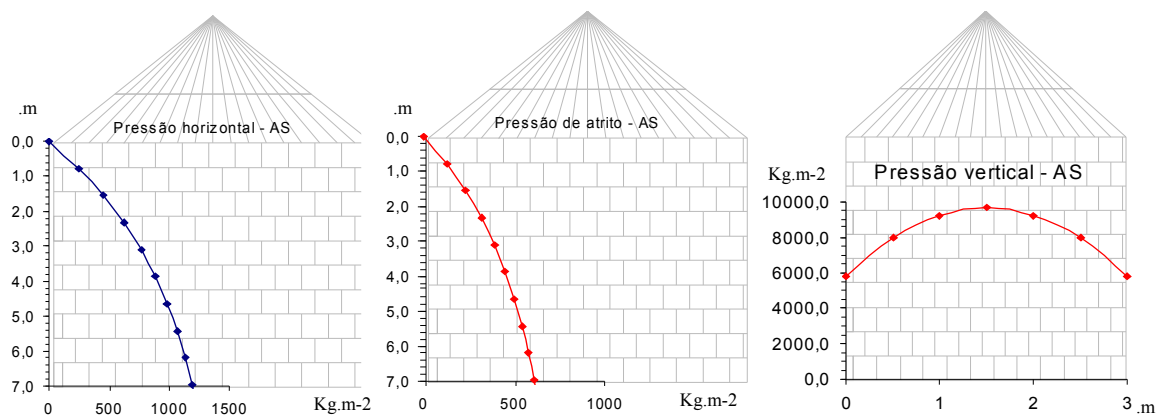


Figura 47 Pressões – Norma AS.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Utilizou-se o programa de cálculo, para realização do estudo paramétrico das normas, baseado em uma análise fatorial, onde as variáveis de estudo foram: ângulo de atrito interno do grão, o ângulo de atrito entre o grão e a parede do silo e a relação altura/diâmetro do silo, resultados obtidos nas Tabelas 3, 4 e 5. Com este estudo, determinaram-se as teorias e códigos normativos que levem às menores e maiores tensões na estrutura do silo e quais são estatisticamente iguais.

Tabela 3 Resultados das pressões (kgf.m^{-2}) nas normas para $D_1 - \phi_w$ 20°

γ	ϕ_i	500 kg.m^{-3}			1000 kg.m^{-3}			1500 kg.m^{-3}		
		25	35	45	25	35	45	25	35	45
ENV	Pressão									
	P_v	1649,05	2066,30	2578,21	3298,09	4132,61	5156,42	4947,14	6198,91	7734,64
	P_h	935,78	853,78	723,60	1871,55	1707,57	1447,21	2807,33	2561,35	2170,81
	P_w	340,59	310,75	263,37	681,19	621,50	526,74	1021,78	932,25	790,11
ACI	P_v	1986,93	2429,92	2855,34	3973,86	4859,84	5710,68	5960,79	7289,76	8566,02
	P_h	806,41	658,48	489,90	1612,82	1316,97	979,80	2419,24	1975,45	1469,70
	P_w	293,51	239,67	178,31	587,02	479,34	356,62	880,53	719,01	534,93
BMHB	P_v	3875,00	3875,00	3875,00	7750,00	7750,00	7750,00	11625,00	11625,00	11625,00
	P_h	600,32	600,32	600,32	1200,64	1200,64	1200,64	1800,96	1800,96	1800,96
	P_w	218,50	218,50	218,50	437,00	437,00	437,00	655,50	655,50	655,50
DIN	P_v	3718,53	4642,95	5804,46	7437,05	9285,90	11608,92	11155,58	13928,86	17413,39
	P_h	954,23	879,94	755,59	1908,45	1759,88	1511,19	2862,68	2639,82	2266,78
	P_w	347,31	320,27	275,01	694,62	640,54	550,03	1041,93	960,82	825,04
AS	P_v	4843,75	4843,75	4843,75	9687,50	9687,50	9687,50	14531,25	14531,25	14531,25
	P_h	861,66	754,07	754,07	1723,31	1508,14	1508,14	2584,97	2262,21	2262,21
	P_w	313,62	274,46	274,46	627,24	548,92	548,92	940,85	823,38	823,38

Tabela 4 Resultados das pressões (kgf.m⁻²) nas normas para D₂ - ϕ_w 27°

Norma	γ	ϕ_i	500 kg.m ⁻³			1000 kg.m ⁻³			1500 kg.m ⁻³		
			25	35	45	25	35	45	25	35	45
ENV	Pressão	P _v	1220,81	1604,37	2120,82	2441,61	3208,74	4241,63	3662,42	4813,11	6362,45
		P _h	710,00	673,71	601,03	1420,00	1347,41	1202,06	2130,00	2021,12	1803,10
		P _w	361,76	343,27	306,24	723,53	686,54	612,48	1085,29	1029,81	918,72
ACI	Pressão	P _v	1599,37	2063,86	2551,41	3198,74	4127,72	5102,81	4798,10	6191,59	7654,22
		P _h	649,12	559,29	437,75	1298,23	1118,57	875,50	1947,35	1677,86	1313,26
		P _w	330,74	284,97	223,05	661,48	569,94	446,09	992,23	854,91	669,14
BMHB	Pressão	P _v	3875,00	3875,00	3875,00	7750,00	7750,00	7750,00	11625,00	11625,00	11625,00
		P _h	484,70	484,70	484,70	969,41	969,41	969,41	1454,11	1454,11	1454,11
		P _w	246,97	246,97	246,97	493,94	493,94	493,94	740,91	740,91	740,91
DIN	Pressão	P _v	2793,34	3620,85	4765,27	5586,68	7241,70	9530,53	8380,03	10862,55	14295,80
		P _h	716,81	686,23	620,32	1433,62	1372,46	1240,63	2150,43	2058,69	1860,95
		P _w	365,23	349,65	316,07	730,47	699,30	632,14	1095,70	1048,95	948,20
AS	Pressão	P _v	4843,75	4843,75	4843,75	9687,50	9687,50	9687,50	14531,25	14531,25	14531,25
		P _h	619,42	619,42	619,42	1238,84	1238,84	1238,84	1858,25	1858,25	1858,25
		P _w	315,61	315,61	315,61	631,22	631,22	631,22	946,83	946,83	946,83

Tabela 5 Resultados das pressões (kgf.m⁻²) nas normas para D₃ - ϕ_w 32°

Norma	γ	ϕ_i	500 kg.m ⁻³			1000 kg.m ⁻³			1500 kg.m ⁻³			
			25	35	45	25	35	45	25	35	45	
ENV	Pressão	P _v	993,14	1340,8	1837,6	1986,2	8	2681,77	3675,20	2979,42	4022,65	5512,80
		P _h	590,19	571,09	525,18	1180,3	8	1142,19	1050,35	1770,57	1713,28	1575,53
		P _w	368,79	356,86	328,17	737,58	713,72	656,33	1106,37	1070,58	984,50	
ACI	Pressão	P _v	1371,0	1829,6	2342,5	2742,1	5	3659,29	4685,14	4113,22	5488,94	7027,71
		P _h	556,46	495,82	401,92	1112,9	2	991,63	803,84	1669,39	1487,45	1205,77
		P _w	347,72	309,82	251,15	695,43	619,64	502,30	1043,15	929,46	753,45	
BMHB	Pressão	P _v	3875,0	3875,0	3875,0	7750,0	0	7750,00	7750,00	0	11625,00	11625,00
		P _h	422,50	422,50	422,50	845,01	845,01	845,01	1267,51	1267,51	1267,51	
		P _w	264,01	264,01	264,01	528,02	528,02	528,02	792,03	792,03	792,03	
DIN	Pressão	P _v	2311,9	3050,2	4133,6	4623,9	2	6100,43	8267,21	6935,88	9150,64	12400,81
		P _h	593,28	578,08	538,09	1186,5	6	1156,16	1076,18	1779,84	1734,24	1614,27
		P _w	370,72	361,23	336,24	741,45	722,45	672,47	1112,17	1083,68	1008,71	

AS	P_v	4843,7 5	4843,7 5	4843,7 5	9687,5 0	9687,50	9687,50	14531,2 5	14531,25	14531,25
	P_h	537,50	542,68	537,50	0	1075,0	1075,00	1612,50	1628,04	1612,50
	P_w	335,87	339,10	335,87	671,73	678,21	671,73	1007,60	1017,31	1007,60

Pela análise estatística, observou-se que a norma Australiana admite valor fixo para relação entre pressões vertical e horizontal (K) para valores do ângulo de atrito inferior a 31°. Todas as normas prescreveram pressões que variaram linearmente em relação ao peso específico e não linearmente em relação aos demais parâmetros. Constataram-se diferenças máximas da ordem de 400% entre os valores prescritos pelas diferentes normas para as tensões verticais na base do silo.

Foi feita uma análise estatística de variância, utilizando-se o Programa Sisvar e fazendo-se comparação de médias de forma a se verificar se alguma pressão apresenta valor estatisticamente igual entre ao nível de 5% de significância. Tendo-se no total 27 combinações de análise, foi feita uma análise geral, análise de variância e comparação de médias (teste de Tukey) ao nível de 5% de significância a fim de verificar se as normas apresentam os mesmos valores de pressões, sendo que as análises estatísticas estão apresentadas detalhadamente nos Anexos A, B e C.

No caso da pressão horizontal pela Análise da Variância, verificou-se que não há interação entre as variáveis, devendo-se estudar individualmente a igualdade entre as normas. Pelo teste de Tukey para comparação de médias, conclui-se que as normas BMHB e ACI apresentam médias de pressões horizontais iguais ao nível de significância de 5%, ou seja, mostram o mesmo resultado de pressão horizontal (a 5% de nível de significância). E ao mesmo tempo as normas AS, ENV e DIN apresentam médias iguais ao nível de significância de 5%, ou seja, confirmam o mesmo resultado de pressão horizontal (Tabela 6).

Quanto às pressões horizontais, as diferenças máximas foram da ordem de 59%, sendo na média os menores valores prescritos pela Britânica e os maiores pela Alemã.

Sendo o maior valor calculado na norma DIN, com ângulo de atrito interno de 25°, peso específico de 1500 kg.m⁻³ e ângulo de atrito com a parede

de 20°, e o menor valor na norma ACI, com ângulo de atrito interno de 45°, peso específico de 500 kg.m⁻³ e ângulo de atrito com a parede de 32°.

Tabela 6 Resultado da análise das pressões horizontais

NORMA	PRESSÃO HORIZONTAL
BMHB	a
ACI	a
AS	b
ENV	b
DIN	b

Normas seguidas pela mesma letra indicam igualdade entre elas.

No caso da pressão vertical, a Análise de Variância indicou que existe interação Norma x Ângulo atrito interno (ϕ_i) e Norma x Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w). O estudo individual de igualdade entre as normas perde o significado. Então se passa a estudar os fatores utilizando o desdobramento que consiste em estudar o fator norma em cada ângulo de atrito; e em estudar o fator ângulo de atrito dentro de cada Norma, da mesma forma a interação Norma x Ângulo de atrito com a parede. No caso do peso específico a variação entre eles não influencia nos valores entre as normas. A comparação de médias foi efetuada fixando um nível de cada fator e variando as interações, de forma a se fazer todos os desdobramentos, Tabela 7.

As letras minúsculas iguais (a, b, c, d, e – ordem crescente de valor das pressões) indicam cada ϕ_i se as médias não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Já para o caso das normas, as letras maiúsculas iguais (A, B e C – ordem crescente de valor das pressões) indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Sendo o maior valor calculado na norma DIN, com ângulo de atrito interno de 45°, peso específico de 1500 kg.m⁻³ e ângulo de atrito com a parede de 20°, e o menor valor na norma ENV, com ângulo de atrito interno de 25°, peso específico de 500 kg.m⁻³ e ângulo de atrito com a parede de 32°.

Em média os menores valores são obtidos na norma Européia e os maiores na Australiana, com diferenças máximas da ordem de 400%.

Pela Tabela 7, verifica-se que as normas ENV e ACI, bem como as normas BMHB e AS são iguais no caso do ângulo de atrito interno é 45° (apresentam mesma letra maiúscula e minúscula, aC e cA, respectivamente).

Tabela 7 Resultado da análise das pressões verticais - ϕ_i

NORMA	Ângulo de Atrito Interno		
	$\phi_i = 25^\circ$	$\phi_i = 35^\circ$	$\phi_i = 45^\circ$
ENV	a A	a B	a C
ACI	b A	b B	a C
DIN	c A	c B	b C
BMHB	d A	c A	c A
AS	e A	d A	c A

Normas seguidas pelas mesmas letras indicam igualdade entre elas. Letras minúsculas comparam normas dentro de cada ângulo de atrito interno. Letras maiúsculas comparam ângulo de atrito interno dentro de cada norma.

Pela Tabela 8, verifica-se que nenhuma norma apresenta resultado igual à outra, variando o ângulo de atrito da parede.

Tabela 8 Resultado da análise das pressões verticais - ϕ_w

NORMA	Ângulo de Atrito Parede		
	$\phi_w = 20^\circ$	$\phi_w = 27^\circ$	$\phi_w = 32^\circ$
ENV	a C	a B	a A
ACI	a B	b A	b A
BMHB	b A	c A	d A
DIN	c C	c B	c A
AS	c B	d A	e A

Normas seguidas pelas mesmas letras indicam igualdade entre elas. Letras minúsculas comparam normas dentro de cada ângulo de atrito com a parede. Letras maiúsculas comparam ângulo de atrito com a parede dentro de cada norma.

No caso da pressão de atrito com a parede vertical, na Análise de Variância existe a interação Norma x Peso Específico (γ) e Norma x Ângulo de atrito interno (ϕ_i). O estudo individual de igualdade entre as normas perde o significado. Então, se passa a estudar os fatores utilizando o desdobramento que consiste em estudar o fator norma dentro do peso específico; e em estudar o fator peso específico dentro de cada norma, da mesma forma a interação

Norma x Ângulo de atrito interno. No caso do ângulo de atrito com a parede a variação, entre eles não influencia nos valores entre as normas. A comparação de médias será efetuada fixando um nível de cada fator e variando as interações, de forma a se fazer todos os desdobramentos, Tabelas 9 e 10.

Pela Tabela 9, verifica-se que as normas ENV, ACI, DIN e AS, assim como as normas BMHB e ACI são iguais no caso do peso específico de 500 kg.m^{-3} . Da mesma forma, as normas ACI e AS, assim como as normas ENV, DIN e AS são iguais, quando o peso específico é 1000 kg.m^{-3} . E no caso do peso específico de 1500 kg.m^{-3} , as normas ENV, DIN e AS também são iguais.

Tabela 9 Resultado da análise das pressões de atrito com a parede
- γ

NORMA	Peso Específico		
	$\gamma = 500$	$\gamma = 1000$	$\gamma = 1500$
ENV	b A	c B	c C
ACI	a b A	b B	b C
DIN	b A	c B	c C
BMHB	a A	a B	a C
AS	b A	b c B	c C

Normas seguidas pelas mesmas letras indicam igualdade entre elas. Letras minúsculas comparam normas dentro de cada peso específico. Letras maiúsculas comparam peso específico dentro de cada norma.

Pela Tabela 10, verifica-se que as normas ENV e DIN são iguais no caso de ϕ_i de 25° . Da mesma forma as normas DIN e AS são iguais de ϕ_i de 35° . E no caso de ϕ_i de 45° , as normas ACI e BMHB, bem como as normas ENV, DIN e AS também são iguais.

O maior valor calculado foi obtido na norma DIN, com ângulo de atrito interno de 25° , peso específico de 1500 kg.m^{-3} e ângulo de atrito com a parede de 32° , e o menor valor na norma ACI, com ângulo de atrito interno de 45° , peso específico de 500 kg.m^{-3} e ângulo de atrito com a parede de 20° .

Em média, os menores valores são obtidos na norma BMHB e os maiores na DIN.

Tabela 10 Resultado da análise das pressões de atrito com a parede - ϕ_i

NORMA	Ângulo de Atrito Interno		
	$\phi_i = 25^\circ$	$\phi_i = 35^\circ$	$\phi_i = 45^\circ$
ENV	b c B	c B	b A
ACI	b C	b B	a A
DIN	c B	c A	b A
BMHB	a A	a A	a A
AS	b A	b c A	b A

Normas seguidas pelas mesmas letras indicam igualdade entre elas. Letras minúsculas comparam normas dentro de cada ângulo de atrito interno. Letras maiúsculas comparam ângulo de atrito interno dentro de cada norma.

4.4 ANÁLISE NUMÉRICA

Foi feito um estudo através de análise numérica, por elementos finitos, utilizando-se o programa Ansys®, modelando-se um silo, a fim de simular o comportamento do silo e verificar as suas deformações, de modo a verificar posteriormente em trabalhos futuros a relação entre o teórico e o prático obtido em um programa experimental. Realizaram-se três esquemas de análise: Silo 1, Silo 2 e Silo 3.

3.3.1 Silo 1

Primeira análise, altura total igual a cinco metros, sem subdivisões, e pressão constante de 600 kgf.m^{-2} .

A seguir, são apresentadas várias figuras de forma a elucidar o que foi realizado no trabalho, desde a criação do elemento, malha, as condições de contorno e os resultados obtidos. Nas Figuras 48 e 49, têm-se os esquemas do silo.

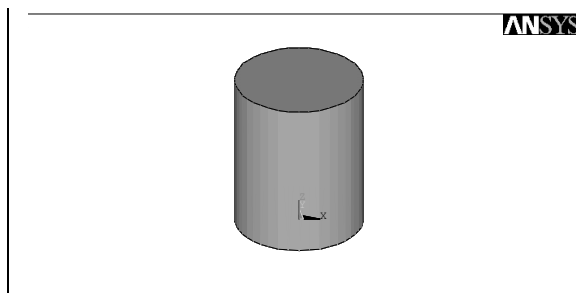


Figura 48 Silo 1 – Construção do silo.

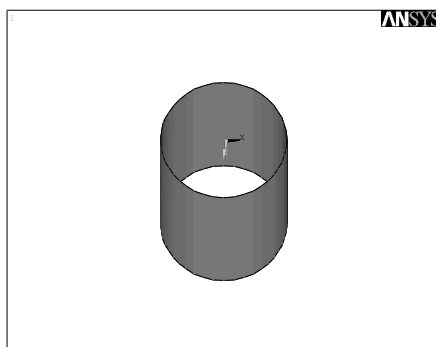


Figura 49 Silo 1 – Construção da casca cilíndrica.

Nas Figura 50 e 51, tem-se a subdivisão dos elementos, sendo que a base e a altura (arco do diâmetro) foram divididas em 4 partes cada e a altura em 6 partes, apresentando-se a malha gerada.

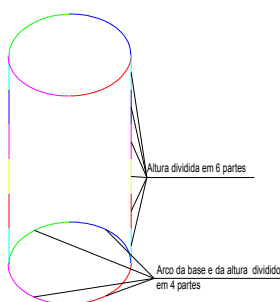


Figura 50 Silo 1 – Divisão em segmentos.

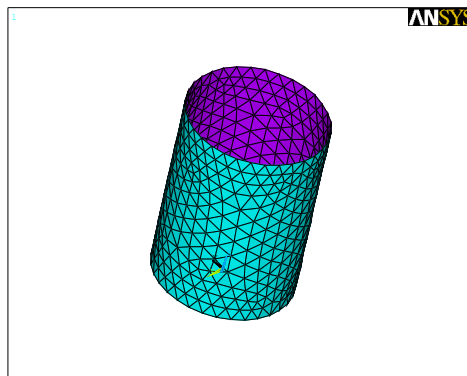


Figura 51 Silo 1 – Malha dos elementos.

Nas Figuras 52 e 53, verificam-se as condições de contorno, sendo que foi considerado que a base não deforma em nenhuma das condições e é aplicada uma pressão constante em todo o silo.

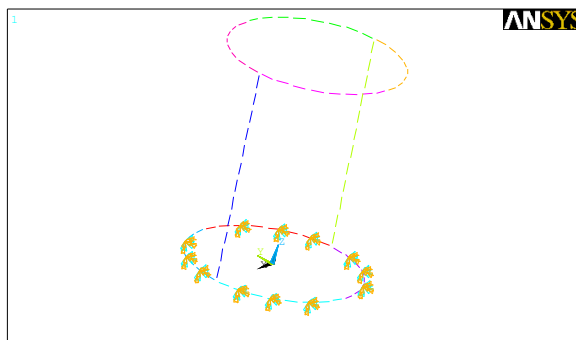


Figura 52 Silo 1 – Condições de contorno.

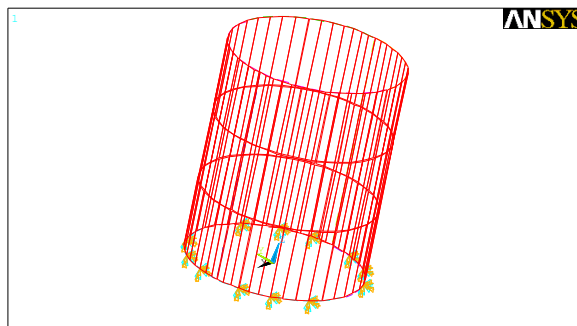


Figura 53 Silo 1 – Aplicação da pressão constante.

Deve-se salientar, que os resultados obtidos analisados foram os resultados dos nós (*Nodal Solution*) de deformação em relação ao eixo x (*DOF solution UX*), em todos os silos analisados.

Nas Figuras 54 a 56, têm-se alguns dos resultados que podem ser obtidos (*Nodal Solution - DOF solution UX*), verificando-se que a parte superior do silo tende a se deformar para fora, com uma compressão dentro para fora do silo, ou seja, há a tendência de deformação aumentando o seu raio.

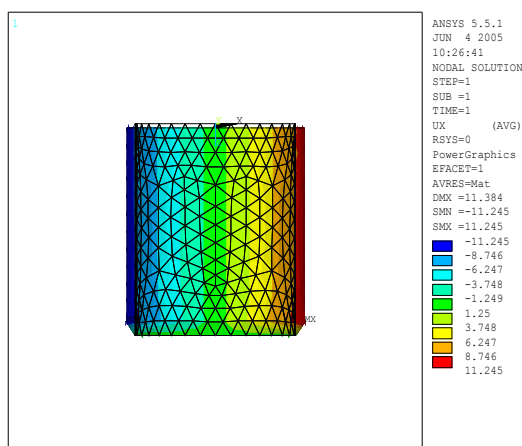


Figura 54 Silo 1 – Resultado: deformada.

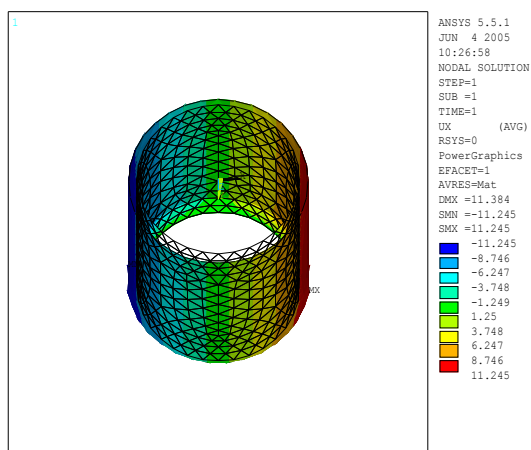


Figura 55 Silo 1 – Resultado: deformada e indeformada 1.

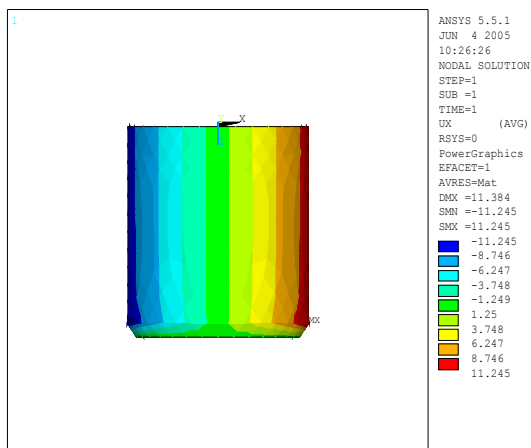


Figura 56 Silo 1 – Resultado: deformada e indeformada 2.

3.3.2 Silo 2

Segunda análise, com dez subdivisões, pressão constante de 600 kgf.m^{-2} . Na Figura 57, tem-se o cilindro, sendo que a altura foi dividida em 10 partes (cada com 0,50 m) e na Figura 58 o esquema da casca.

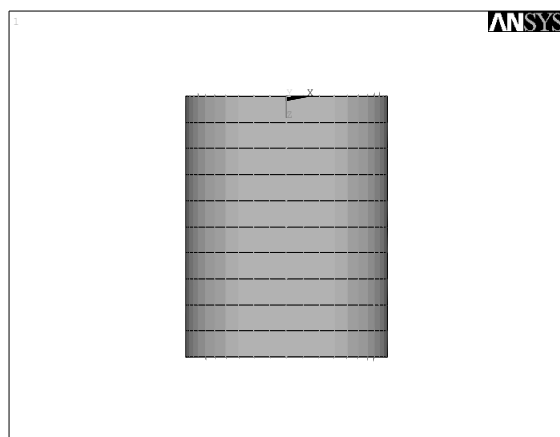


Figura 57 Silo 2 – Subdivisão das alturas.

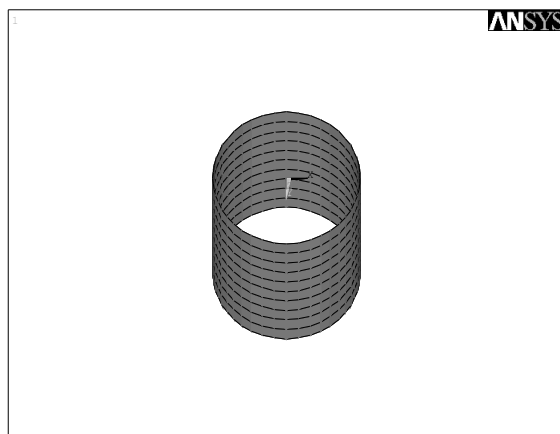


Figura 58 Silo 2 – Casca cilíndrica.

Na figura 59, tem-se a subdivisão dos elementos, sendo que cada segmento de arco do diâmetro foi dividido em quatro partes e cada segmento de altura em duas partes.

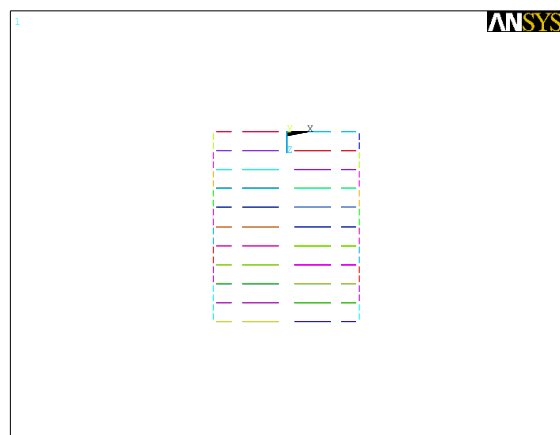


Figura 59 Silo 2 – Subdivisão dos elementos.

Na Figura 60, tem-se a malha dos elementos e, em cima desta, é que foram feitas as aplicações de carga. Na Figura 61, tem-se a amarração dos nós coincidentes, já que o silo foi construído em partes de forma a tornar a estrutura uma só.

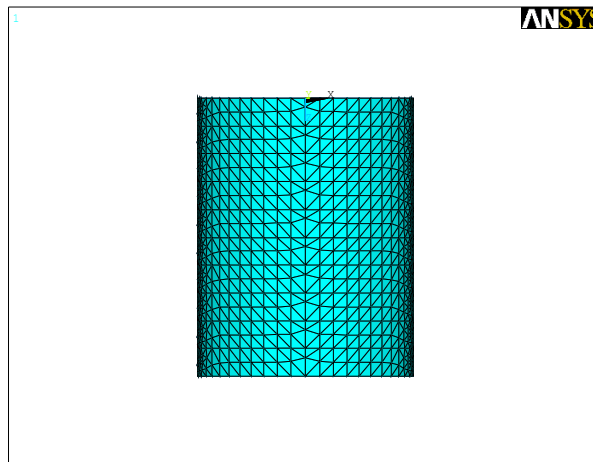


Figura 60 Silo 2 – Malha dos elementos.

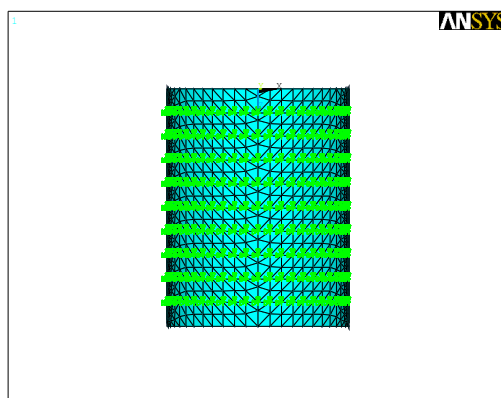


Figura 61 Silo 2 – Nós coincidentes.

Na Figura 62, é apresentada a condição de contorno da base, onde não há deformações. Pela Figura 63, percebe-se que o silo foi construído em partes (10 subdivisões), porém a carga aplicada foi constante 600 kg.m^{-2} .

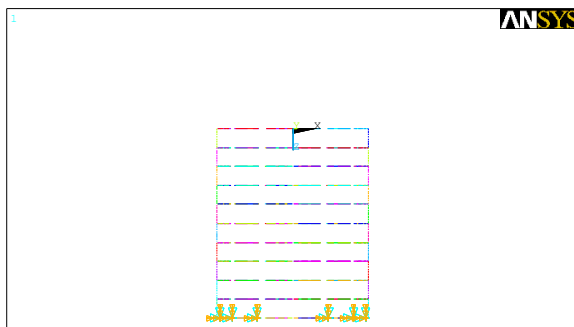


Figura 62 Silo 2 – Condições de contorno.

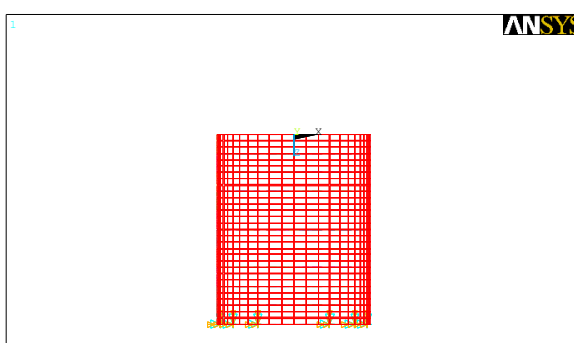


Figura 63 Silo 2 – Aplicação de carga.

Nas Figuras 64 e 65, têm-se os resultados obtidos, verificando-se que a parte superior do silo tende a se deformar para fora.

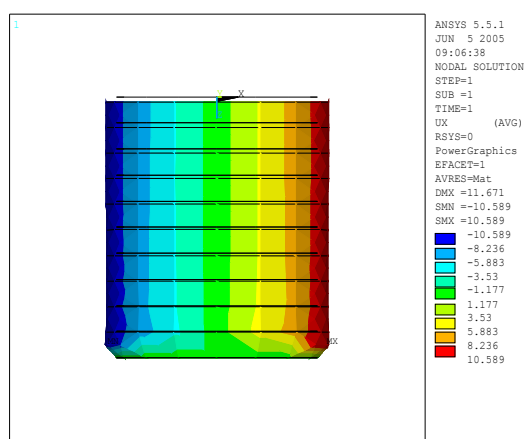


Figura 64 Silo 2 – Resultado: deformada e indeformada 1.

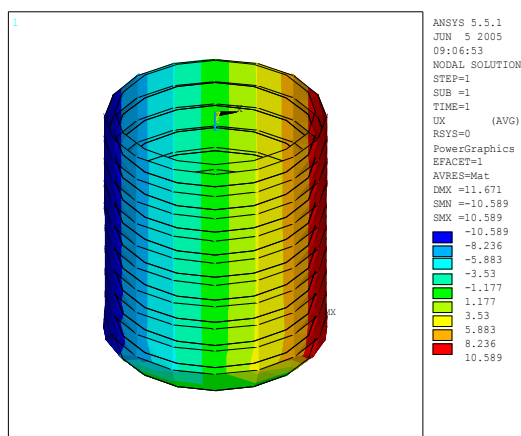


Figura 65 Silo 2 – Resultado: deformada e indeformada 2.

3.3.3 Silo 3

Terceira análise com dez subdivisões, pressão variável conforme Tabela 11, altura total de cinco metros e dez subdivisões. Neste silo, as Figuras 57 a 62 se repetem. Na Figura 66, é mostrado o esquema de aplicação de carga variável.

Tabela 11 Pressões no silo 3

	Pressão		z (m)
P1 =	0,00	(kg.m ⁻²)	0,00
P2 =	157,01	(kg.m ⁻²)	0,50
P3 =	275,71	(kg.m ⁻²)	1,00
P4 =	365,43	(kg.m ⁻²)	1,50
P5 =	433,26	(kg.m ⁻²)	2,00
P6 =	484,53	(kg.m ⁻²)	2,50
P7 =	523,29	(kg.m ⁻²)	3,00
P8 =	552,59	(kg.m ⁻²)	3,50
P9 =	574,74	(kg.m ⁻²)	4,00
P10 =	591,49	(kg.m ⁻²)	4,50
P11 =	604,15	(kg.m ⁻²)	5,00

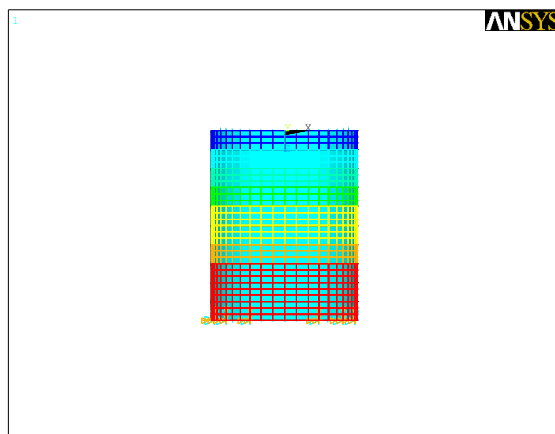


Figura 66 Silo 3 – Aplicação de carga.

Na Figura 67, têm-se os resultados obtidos, verificando-se que a parte superior do silo tende a se deformar de forma irregular, mostrando um resultado semelhante aos silos anteriormente analisados. Verificando-se que, neste caso, como se têm pressões variáveis ao longo do comprimento (o silo foi subdividido ao longo da altura em 10 partes), as deformações foram maiores na região mais inferior do silo, já que apresentam pressões mais elevadas do que no extremo superior.

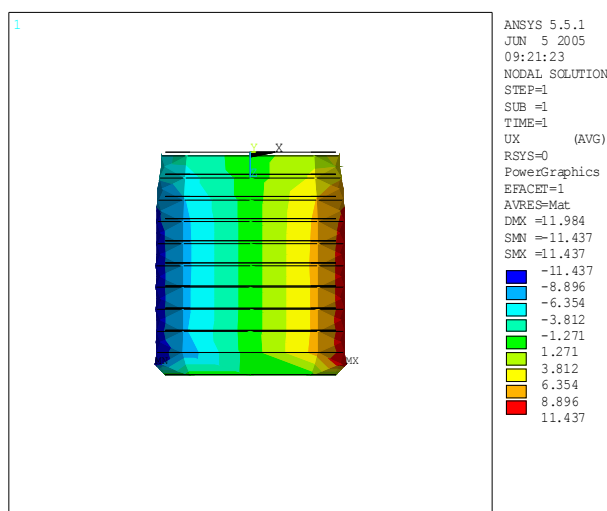


Figura 67 Silo 3 - Resultado: deformada e indeformada 1.

3.3.4 Discussões

Na figura 68, há o comparativo dos resultados dos três silos analisados, verificando-se que o Silo 1 e 2 apresentam deformação semelhante, pois são submetidos à mesma pressão constante ao longo da altura. Porém, o Silo 3 mostra uma deformação diferente; as deformações foram maiores na região mais inferior do silo, já que apresentam maiores pressões do que o extremo superior. Com isso, verifica-se que o Silo 3 parece representar de forma mais adequada à realidade.

De forma geral, verificou-se que o programa Ansys® poderá ser utilizado na modelagem do silo a ser analisado, podendo-se em trabalhos futuros fazer uma análise da deformação do modelo teórico e do experimental de forma a obter uma modelagem ideal, a fim de se adequar melhor o protótipo, utilizando-se programa de aquisição de dados, medindo-se as deformações através de extensometria e células de pressão.

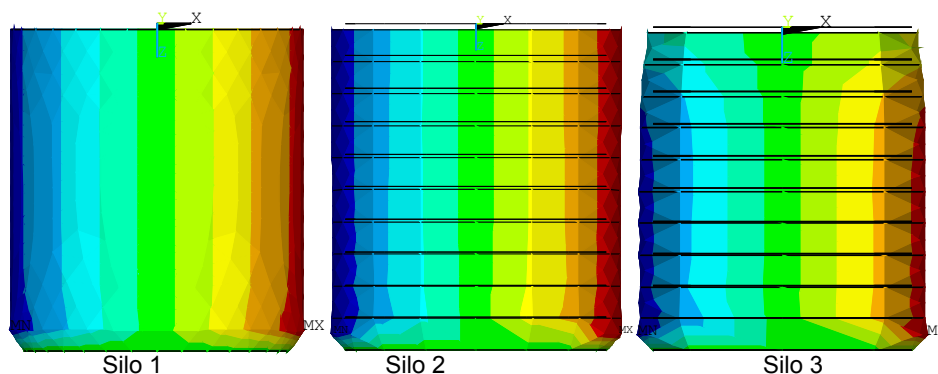


Figura 68 Silos 1, 2 e 3 Resultado: deformada e indeformada.

5 CONCLUSÕES

Pelo presente trabalho, desenvolveu-se um programa de cálculo das pressões, podendo-se variar as propriedades dos silos e dos materiais e fazer um comparativo entre normas, materiais e pressões obtidas, e ainda facilitar a análise e desenvolvimento de um estudo teórico-experimental.

Estatisticamente, verificou-se que algumas normas apresentam o mesmo resultado calculado. Em relação à pressão horizontal, a análise comparativa realizada com as principais normas estrangeiras mostrou a existência de diferenças bastante significativas entre os valores obtidos, chegando-se a diferenças de até 59% (entre norma BMHB e DIN), sendo, na média, os menores valores prescritos pela Britânica e os maiores pela Alemã, sendo os mesmos resultados encontrados na análise das pressões de atrito com a parede. Verificou-se ainda, que a maioria das normas estrangeiras adota a teoria de Janssen para a determinação das pressões horizontais.

Em relação às pressões verticais, as diferenças entre as normas chegaram a quase 400% (entre normas ENV e AS) e em média os menores valores são obtidos na norma Européia e os maiores na Australiana. Observou-se também, que o modelo de Janssen, sem nenhuma alteração, é proposto pela norma ACI.

A análise comparativa realizada com as principais normas estrangeiras mostrou a existência de diferenças bastante significativas entre os valores obtidos, sendo recomendado um estudo experimental de um silo piloto para avaliação das propriedades físicas dos produtos armazenados, com base nas recomendações das várias normas estrangeiras e/ou 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, de modo a se obter uma formulação a realidade brasileira.

Pelo presente trabalho, ainda pode-se ter contato com os fundamentos de elementos finitos e a construção de modelos de silos de modo a se obter o que acontece num modelo real. Já em relação ao uso do programa Ansys®, notou-se que muitos estudos têm explorado o assunto referente ao comportamento das cascas cilíndricas, sendo que muitos desses trabalhos surgem da busca por um tratamento teórico que possa prever as pressões e deformações na estrutura real.

Constata-se que, mesmo variando-se o tipo de subdivisão e mesmo a pressão, os resultados obtidos foram semelhantes nos três tipos de silos analisados, sendo que todos apresentam uma deformação na direção x. Sendo que no caso do silo com pressão variável ao longo da altura as deformações foram maiores onde a pressão aplicada é maior (região inferior), não havendo deformação do extremo inferior em nenhum já que foi colocada a condição de contorno de base engastada (sem deformação em nenhuma das direções).

Nesta pesquisa, esboçou-se um plano inicial de modelagem de um silo. Em um trabalho futuro, observando-se que o programa e a metodologia são úteis, pode-se fazer um refinamento, comparando os resultados e variando a pressão, conforme as diversas normas existentes; fazendo-se um comparativo entre teórico e prático com uso de silo protótipo e células de pressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDRE, G. F. **Contribuição ao entendimento da fluência não-drenada**. 2006. 167 p. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- ALMEIDA, F.J., **Projeto e Implementação de Pré/Pós Processador Gráfico para Exibir Tensões Calculadas pelo Método dos Elementos Finitos**. 1992. 100 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.
- ALMEIDA, F. J. **Implementação de Disciplina de Métodos Computacionais No Curso de Engenharia Mecânica**. In: WCETE 2004 - World Congress on Engineering and Technology Education. Santos, 2004. p.1556 – 1570. v.1.
- ALMEIDA, F. P. A. **Aplicação do acoplamento entre o MEC e o MEF para o estudo da interação dinâmica elastoplástica entre o solo e estruturas**.2003. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- ALMEIDA, F. P. & CODA, H. B. **Aplicação do Acoplamento entre o MEC e o MED para o Estudo da Interação Dinâmica Elastoplástica entre o Solo e Estruturas**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, v. 7, n. 24, p. 113-129, 2005.
- ALVES, V. **Análise e Dimensionamento de Silos de Concreto Armado: Desenvolvimento de um Programa Computacional**. 2001. 114 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2001.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 313: Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials**. EUA. Revised., 1991. p.313-377.

ANDRADE JR., L. J. **Análise Estrutural das Chapas Metálicas de Silos e de Reservatórios Cilíndricos**. 1998. 208 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

ANSYS® **Tutorial**. Ansys Inc., 2002.

ARAÚJO, E.C.; CALIL JR., C. Silos metálicos cilíndricos: Recomendações mínimas de projeto. In: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1995. **Anais...** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1995. V.1, p.131-146.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **TB-374**: Silos cilíndricos para grãos vegetais. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **TB-377**: Componentes de silos cilíndricos metálicos para grãos vegetais. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3774: Loads on bulk containers**. 1996 Sydney. 1996. AS 3774: Supplement 1. Loads on bulk containers: Commentary. Sydney, 1997.

BADIALE, R. C.; SÁLES, J. J. **Reservatórios metálicos elevados para aplicação na indústria sucro-alcooleira**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, n. 13, 1999. 30 p.

BANDEIRA, I.S.A. **Análise de fluxo de ração e farelo de trigo em silos prismáticos industriais**. 1997. 97p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1997.

BARROS, P. L. A. **Análise e Dimensionamento de Muros de Arrimo de Gabiões, GCP Engenharia**. São Paulo: Projetos e Consultoria S/C Ltda, 1992.

BARROS, P. L. A. **Empuxo exercido por maciço não homogêneo sobre muros de arrimo**. Simpósio de Informática em Geotecnia. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, São Paulo, 1994. p 159-166.

BARROS, P. L. A. **Obras de Contenção**. São Paulo: Manual Técnico, Maccaferri do Brasil. 2006.

BERGAMASCHI, D. P. **Notas de aula: HEP5750 - Bioestatística II**. Disponível em: < <http://hygeia.fsp.usp.br/~denisepb/>>. Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo. Acesso em 20 nov. 2005.

BLIGHT, G.E. A comparison of measured pressures in silos with code recommendations. **Bulk solids Handling**, V.8, n. 2, p.145-153, 1988.

BRANDI, **J. L. G.** **Previsibilidade e controle de recalques em radiers sobre solo mole**. 2004. 140 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

BRITISH MATERIALS HANDLING BOARD. **BMHB 1985: Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers**. Berkshire, 1985. 213p.

BUTTON, S.T. **Apostila: Metodologia para planejamento experimental e análise de resultado**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. 2001.

CALIL JR., C. **Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos**. 1984. 184 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica de Barcelona. Espanha. Publicação do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

CALIL JR., C. Determinação das propriedades físicas de materiais granulares e pulverulentos para o projeto estrutural de silos. **Revista Brasileira de armazenagem**, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, V.9/10, n.1/2, p.3-6, 1984/1985.

CALIL JR., C. Estudo teórico e experimental das pressões em silos verticais cilíndricos de pequena relação altura/diâmetro. In: COLLOQUIA, 1987, Porto alegre. **Anais...** Porto alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1987. V.3, p.229-243.

CALIL JR., C. **Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais**. 1990. 198 p. Tese de Livre Docência, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 1990.

CALIL JR., C. **A Relação K entre as Pressões Horizontais e Verticais em Silos**. In: XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Paraíba: Universidade Federal da Paraíba, 1997. CD-ROM.

CALIL JR., C.; NASCIMENTO, J.W.B. do; ARAÚJO, E.C. de. **Silos metálicos multicelulares**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997. 177p.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. 1 v.

CANADIAN FARM BUILDING CODE. **CFBC Part 2: Structural design**, Ottawa, Canada. 1983.

CAVALCANTI, J. H. **Análise da Interação Solo-estrutura através do Emprego Conjunto dos Métodos dos Elementos de Contorno e Elementos Finitos**. 2006. 156 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

CAZORLA, I. M. Apostila de Estatística. Disponível em: < <http://www.socio-estatistica.com.br/Edestatistica/apostila.htm>>. Acesso em 25 jun. 2005.

CHEUNG, A. B.; CALIL JR. C. R. C. **Modelo Estocástico de Pressões para a Estimativa da Confiabilidade Estrutural de Silos Esbeltos**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, v. 8, n. 32, p. 109-112, 2006.

DALBELLO, O.; OLIVEIRA, M.J.G.; BENEDETTI, B.C. Determinação do ângulo de taluda e coeficiente de atrito para amendoim (*Arachis hipogea* L.) e aveia preta (*Avena strigosa* L.) em diferentes teores de umidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, XXIII, 1994, Campinas. **Resumos...** São Paulo: SBEA. 15p. 1994.

CONAB Companhia Nacional de Abastecimento. **Relatório da Situação da Armazenagem no Brasil**. 2006

DANTAS, B. T. **Análise do comportamento de estruturas de solo reforçado sob condições de trabalho**. 2004. 209 p. Tese (Doutorado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

DANTAS, C. A.; PAULA, G. A. **Noções de Estatística: Noções de Teste de Hipóteses**. São Paulo: Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, 2005.

DEUTSCHE NORM. **DIN 1055-87 Part 6: Design loads for buildings; Loads in silos bins**. Berlin, Verlaz, 1987. 6p.

DEUTSCHE NORM. **DIN 1055-6: Basis of design and actions on structures – Part 6: design loads for buildings and loads in silo bins**. Berlin, Verlaz, 2000.

DINIZ, M. J.; NASCIMENTO, J. W. B. Análise de pressões em silo vertical de alvenaria de tijolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.10, n. 1, Campina Grande, mar. 2006.

EUROCODE 1. **ENV 1991-4 Part 4: Actions on silos and tanks**. Bruxelas, 1995.

FERRÃO, M. E. Guia das aulas de Estatística II: Análise e tratamento de dados Portugal: Universidade da Beira Interior, 2005.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In...45a Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade internacional de Biometria. UFSCar, São Carlos, SP, Julho de 2000. p.255-258.

FORTES FILHO, J. **Uma introdução ao estudo dos silos**. 1985. 427p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.

FREITAS, E. G. A. **Estudo Teórico e Experimental das Pressões em Silos Cilíndricos de Baixa Relação Altura/Diâmetro e Fundo Plano**. 2001. 197 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

FREITAS, N. Agronegócio. **Anuário Exame**:. Editora Abril, São Paulo, p. 28, jun. 2006.

FREITAS, E. G. A.; CALIL JR. C. **Estudo Teórico e Experimental das Pressões em Silos Cilíndricos de Baixa Relação Altura/Diâmetro e Fundo**

Plano. Cadernos de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, v. 7, n. 24, p. 1-34, 2005.

FUSCO, P. B. **Estruturas de concreto: fundamentos do projeto estrutural.** São Paulo: McGraw –Hill do Brasil, 1976.

GAIOTO, N. **Apostila: Estruturas de arrimo e empuxos de terra.** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 1979.

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

GOMES, F. C.; NEGRISOLI, A ; CALIL JR., C. **Estudo das Ações em Silos Horizontais.** In: XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Paraíba: Universidade Federal da Paraíba. 1997. CD-ROM.

GOMES, 2000a, F. C. **Estudo Teórico e Experimental das Ações em Silos Horizontais.** 2000. 187 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

GOMES, 2000b, F. **Curso de estatística experimental.** 14. ed. Piracicaba: Nobel, 2000. 648 p.

GOMES, F. C.; CALIL JR.; C. **Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais.** Cadernos de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, v. 7, n. 24, p. 33-62, 2005.

HAYNAL, A. O cofre da propriedade pede mais recurso. **Revista Armazenagem.** 1989. p.32-33, mar/abr.

INTERNATIONAL STANDART. **ISO 11697: Bases for design of structures: Loads due to bulk materials.** Switzerland: International Classification for Standards. 1995. 15p.

JENIKE, A. W. **Storage and Flow of Solids.** Bulletin 123. Utah Engineering Experiment Station. University of Utah, Salt Lake City, Utah, 1964. 197 p.

JENIKE, A. W.; JOHANSON, J. R. Bin loads. **Journal of Structural Division**. ASCE, V.94, p.1011-1041, 1968.

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

MANFRIM, I. M. S. **Um Estudo dos Silos para Açúcar: Propriedades Físicas do Material Armazenado, Recomendações Construtivas, Normativas e Análise Estrutural**. 1994. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

MACHADO, S. L.; MACHADO, M. F. **Mecânica dos solos II: conceitos introdutórios**. Salvador: DCTM/Universidade Federal da Bahia, 1997.

MACHADO, A. C. **Um Elemento Finito de Tubo Tridimensional para Análise Geometricamente não Linear de Dutos**. 2006. 100p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

MAGALHÃES, E. P. **Comportamento experimental de uma cortina de estaca prancha assente em solo poroso de DF: implicações para o projeto e metodologia de cálculo**. 2003. 149 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

MARINHO, F. **Notas de aula: Mecânica dos Solos e Fundações**. Disponível em: <http://www.usp.br/fau/ensino/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/pef0522/Antigos>. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. Acesso em 29 set 2005.

MAYNAR, M. M. El colapso del túnel ferroviario por inestabilidad del frente en suelos y rocas blandas o muy diaclasadas (Segunda parte). **Revista de Obras Públicas**, n. 3458, ano 152, Madrid, p 7 – 24, 2005.

MESQUITA, A. D.; CODA, H. B. **Uma formulação do método dos elementos finitos aplicada à análise elastoplástica de cascas**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, v. 7, n. 22, p. 89-106, 2005.

MILANI, A.P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para projetos de pressões e fluxo em silos**. 1993. 272p. Tese (Doutorado) -

Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

MINITAB Release 13.0. Sistema de Ajuda do Software. BCIS Lab St. Cloud State University: Minitab Inc.,2000.

MITTELBACH, F. R. **Método das Diferenças Finitas Energéticas na Análise de Reservatórios Cilíndricos**. 2002. 96p. Tese (Doutorado) - COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MOLITERNO, A. **Caderno de muros de arrimo**. São Paulo: Edgar Blücher, 1994.

MONTEIRO, V. M. C. **Obtenção de Coeficientes de Atrito Solo/Estrutura para um Solo Residual de Basalto e sua Importância no Cálculo de Estruturas de Contenção**. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2006.

MONTGOMERY, D. C. **Diseño y análisis de experimentos**. Trad. Jaime Delgado Saldivar. México: Iberoamérica. 1991.

MUCELIN, C. A. **Estatística Elementar e Experimental Aplicada às Tecnologias**. Medianeira: Editora Valério, 2003.

NEGRISOLI, A. A. **Silos: palestras**. São Paulo: ENGESILOS - Consultoria e Projetos de Engenharia S/C LTDA, 1995.

NEGRISOLI, A. A. **Exemplo de uma unidade de armazenamento de cereais**. São Paulo: ENGESILOS Consultoria e Projetos de Engenharia S/C Ltda. 1997.

NASCIMENTO, J. W. B.; CALIL JR. C. **Painéis Estruturais para Paredes de Silos Verticais Prismáticos**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, n. 6, p 1-21, 1998.

OPAZO, M. A. U. **Apostilas da Disciplina Métodos de Estatística Aplicada**. Cascavel: Mestrado em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2005.

OPEN OFFICE CALC 2.0. Manual do Usuário. Disponível em <<http://www.openoffice.org/product/calc.html>. 2006>. Acesso em 15 jun 2007.

BERGAMASCHI, D. P. **Notas de aula: HEP5750 - Bioestatística II**. Disponível em: <<http://hygeia.fsp.usp.br/~denisepb/>>. Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo. Acesso em 20 nov. 2005.

PAULA, M. A. R. **Estudo do Acoplamento Acústico-Estrutural de uma Estrutura do Tipo Casca Cilíndrica Uniforme**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2003.

PEDRUZZI, J. B. **Apostila de Estatística**. Espírito Santo: Faculdades Integradas Castelo Branco, Curso de Administração de Empresas. 2005.

PIMENTEL, F. G. **Curso de estatística experimental**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1987. 467p.

REIMBERT, M & A. **Silos: Teoria y Pratica**. Editorial Américalee SRL. Buenos Aires, 1979.

SILVA, E. T.; FREIRE, W. J.; CALIL JR. C. Elementos Pré-moldados de Concreto Armado, para Silos Quadrados Verticais, Modulares, para Armazenamento e Grãos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.2, n. 3, p.325-328, Campina Grande, 1998.

SILVA, F. S. et al. C. Efeito do Beneficiamento nas Propriedades Físicas e Mecânicas dos Grãos de Arroz de Distintas Variedades. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande**, v.5, n.1, p.33-41, 2003.

SILVA, J.S. **Secagem e armazenagem de Produtos**. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2000. CD-ROM.

SILVA, M.C.A.T. **Estudo da Variabilidade Pressões em Silos**. 1993. 192p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

SILVA, V. R. et al. Caracterização das propriedades físicas e de fluxos do amendoim para o estudo de silos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Universidade Federal da Paraíba, v. 5, n. 2, 2º Semestre, 2005.

STAMATO, G. C.; CALIL JR., C. **Recomendações da Norma Australiana para Cálculos das Ações em Silos**. In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Paraíba, 1997.

SYNDICAT NATIONAL DU BÉTON ARMÉ ET DES TECHNIQUES INDUSTRIALISÉES. SNBATI: Reglas para **projeto y cálculo de Silos Hormigon**. França, 1975.

TEIXEIRA, L. G. R. **Determinação das Propriedades Físicas e de Fluxo do Café para Projeto Estrutural de Silos e Equipamentos**. 2006. 122p. Dissertação (Mestrado). Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

TOREZANI, W. **Apostila de Estatística**. Vila Velha: Faculdade Univila, Curso de Administração, 2005.

VAN ZANTEN, D. C. et al. Bunker design part 3: Wall pressure and flow patterns in funnel flow. **Journal of Engineering for industry**. p. 819-823, nov. 1977.

ANEXOS

ANEXO A Análise estatística – Pressão horizontal

Pela análise da variância, verificou-se que não existe o efeito da interação entre as variáveis e as normas a 5% de significância.

Observou-se ainda, que o valor do p-valor é maior que 0,05 (nível de significância) em alguns casos, indicando que não há interação entre os fatores analisados e as normas. Obtém-se o valor do p-value menor que 0,05 rejeita-se a hipótese de que todas as normas são iguais, ou seja, pelo menos um das normas apresenta resultado diferente das demais.

No caso do trabalho, foi feita a análise apenas das normas, não havendo interesse na análise das outras variáveis separadamente.

É interessante prosseguir-se a análise, a fim de identificar as diferenças entre as normas. Sendo utilizado o teste de Tukey.

Tabela 1A Teste de Tukey da pressão horizontal

Teste Tukey para a FV Norma		

DMS: 157,702763164655 NMS: 0,05		

Média harmônica do número de repetições (r): 27		
Erro padrão: 36,6413204414619		

Tratamentos	Médias	Resultados do teste

BMHB	1005.018760	a1
ACI	1123.366746	a1
AS	1299.051278	a2
ENV	1374.302310	a2
DIN	1405.015828	a2

Pelo teste de Tukey para comparação de médias, conclui-se que as normas BMHB e ACI apresentam médias iguais ao nível de significância de 5% (a1), ou seja, apresentam o mesmo resultado de pressão horizontal. E ao mesmo tempo as normas AS, ENV e DIN apresentam médias iguais (a2) ao nível de significância de 5%.

Homogeneity of Variance Test for Pressão

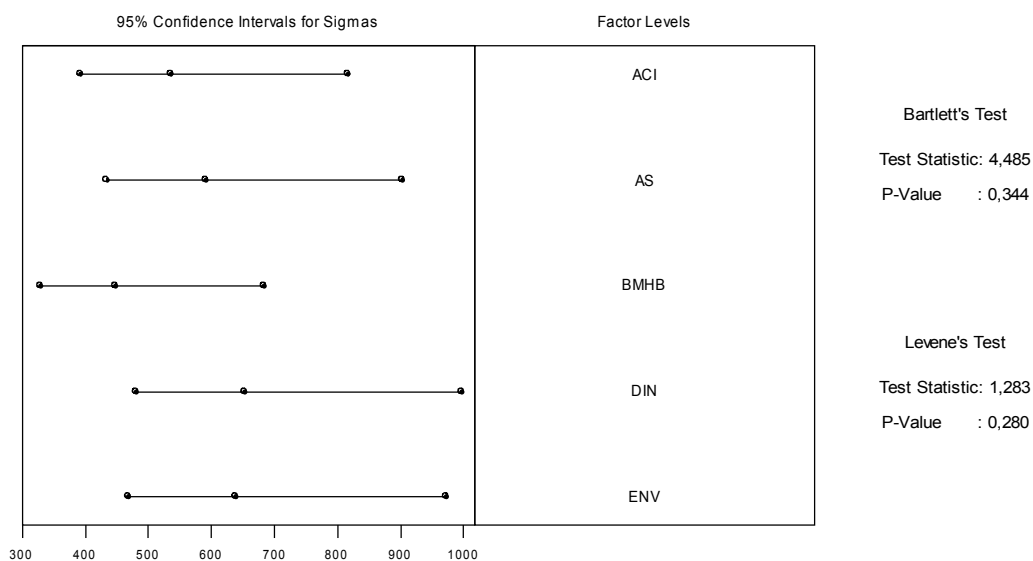


Figura 1A Análise de Variância da Pressão Horizontal.

Por Bartlett's Test e Levene's Test, observa-se que em ambos o p-value é maior que 0,05 (0,344 e 0,280; respectivamente), assim há homogeneidade das variâncias. Portanto, conclui-se que não é necessária a transformação dos dados.

ANEXO B Análise estatística – Pressão vertical

Pela Análise de Variância, observou-se que o valor do p-valor é menor que 0,05 (nível de significância) quando se analisa a interação Norma x Ângulo atrito interno (ϕ_i) e Norma x Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w). O estudo individual de igualdade entre as normas perde o significado. Então, se passa a estudar os fatores, utilizando o desdobramento que consiste em estudar o Fator Norma de Ângulo de Atrito; e em estudar o fator Ângulo de Atrito dentro de cada Norma, da mesma forma a interação Norma x Ângulo de atrito com a parede. No caso do peso específico, a variação entre eles não influencia nos valores entre as Normas. A comparação de médias será efetuada fixando um nível de cada fator e variando as interações, de forma a se fazer todos os desdobramentos.

Tabela 1B Análise desdobramento norma x ângulo de atrito interno

 Análise do desdobramento de **Norma** dentro de cada nível de: **Angulo Interno**

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Norma /1	4	25.859453	6.464863	188.050	0.0000 *
Norma /2	4	17.007551	4.251888	123.679	0.0000 *
Norma /3	4	12.454797	3.113699	90.571	0.0000 *
Resíduo	17	0.584432	0.034378		

Codificação usada para o desdobramento
 cód. Angulo Interno
 1 = 25
 2 = 35
 3 = 45

Pela Anova fixando-se cada ângulo interno, verifica-se que a formulação de cada norma influencia no resultado das pressões, apresentando média diferente ao nível de 5% de significância. Como a Anova não informa quais normas influenciam da mesma forma conforme o ângulo interno, deve-se fazer a comparação de médias em cada ângulo interno, sendo feita a análise de comparação de médias pelo teste de Tukey.

Tabela 2B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo interno de 25°

Teste de Tukey para o desdobramento de **Norma** dentro da codificação: **1**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV Norma		
DMS: 0,269309348295753 NMS: 0,05		
Tratamentos	Médias	Resultados do teste
ENV	5.701633	a1
ACI	6.040354	a2
DIN	6.933256	a3
BMHB	7.327200	a4
AS	7.703127	a5

Para o desdobramento das normas quando ϕ_i é de 25°, verifica-se que as médias são estatisticamente diferentes ao nível de significância de 5%, ou seja, nenhuma norma apresenta mesmo valor de pressão horizontal.

Tabela 3B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo interno de 35°

Teste de Tukey para o desdobramento de **Norma** dentro da codificação: **2**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV Norma		
DMS: 0,263331330897201 NMS: 0,05		
Tratamentos	Médias	Resultados do teste
ENV	6.050669	a1
ACI	6.384568	a2
DIN	7.169137	a3
BMHB	7.327200	a3
AS	7.703127	a4

Para o desdobramento das normas quando ϕ_i é de 35°, verifica-se que as médias são estatisticamente diferentes ao nível de significância de 5% das normas ENV, ACI e AS, e iguais entre as normas DIN e BMHB.

Tabela 4B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo interno de 45°

Teste de Tukey para o desdobramento de **Norma** dentro da codificação: **3**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

```
-----
Teste Tukey para a FV Norma
-----
DMS: 0,266004813966128  NMS: 0,05
-----
Tratamentos                Médias                Resultados do teste
-----
ENV                          6.428968  a1
ACI                          6.686469  a1
BMHB                         7.327200  a2
AS                           7.703127  a3
DIN                          7.710377  a3
-----
```

Para o desdobramento das normas quando ϕ_i é de 45°, verifica-se que as médias da norma BMHB são estatisticamente diferentes em relação às demais normas; e as normas ENV e ACI apresentam resultados de pressão iguais e da mesma forma as normas AS e DIN.

Tabela 5B Análise desdobramento ângulo de atrito interno x norma

Análise do desdobramento de Angulo Interno dentro de cada nível de: **Norma**

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Angulo Interno /1	2	1.881273	0.940636	27.361	0.0000 *
Angulo Interno /2	2	-0.000000	-0.000000	-0.000	1.0000 NS
Angulo Interno /3	2	0.000000	0.000000	0.000	1.0000 NS
Angulo Interno /4	2	2.751769	1.375885	40.022	0.0000 *
Angulo Interno /5	2	2.381854	1.190927	34.642	0.0000 *
Residuo	17	0.584432	0.034378		

Codificação usada para o desdobramento

cód. Norma
1 = ACI
2 = AS
3 = BMHB
4 = DIN
5 = ENV

Pela Anova fixando-se cada norma, verifica-se que o ângulo interno influencia no valor das pressões horizontais. A pressão apresenta média diferente ao nível de 5% de significância, conforme o ângulo de atrito interno.

A Anova não informa quais normas influenciam da mesma forma conforme o ângulo, devendo-se fazer a comparação de médias em cada norma, sendo feita a análise de comparação de médias pelo teste de Tukey.

Tabela 6B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma ACI

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Interno** dentro da codificação: **1**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV Ângulo Interno		
DMS: 0,224335448044069 NMS: 0,05		
Tratamentos	Médias	Resultados do teste
25	6.040354	a1
35	6.384568	a2
45	6.686469	a3

No caso da norma ACI, as pressões são estatisticamente diferentes em todas as variações de ângulo ao nível de significância de 5%. Obtendo-se a maior média quando o ângulo interno é de 45°.

Tabela 7B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma AS

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Interno** dentro da codificação: **2**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV Ângulo Interno		
DMS: 0,224335448044069 NMS: 0,05		
Tratamentos	Médias	Resultados do teste
45	7.703127	a1
35	7.703127	a1
25	7.703127	a1

No caso da norma AS, as pressões são estatisticamente iguais em todas as variações de ângulo ao nível de significância de 5%.

Tabela 8B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma BMHB

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Interno** dentro da codificação: 3
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

 Teste Tukey para a FV **Ângulo Interno**

 DMS: 0,224335448044069 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
45	7.327200	a1
35	7.327200	a1
25	7.327200	a1

No caso da norma BMHB, as pressões são estatisticamente iguais em todas as variações de ângulo ao nível de significância de 5%.

Tabela 9B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma DIN

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Interno** dentro da codificação: 4
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

 Teste Tukey para a FV **Ângulo Interno**

 DMS: 0,225268239793236 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
25	6.933256	a1
35	7.169137	a2
45	7.710377	a3

No caso da norma DIN, as pressões são estatisticamente diferentes em todas as variações de ângulo ao nível de significância de 5%.

Tabela 10B Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma ENV

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Interno** dentro da codificação: 5
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

 Teste Tukey para a FV **Ângulo Interno**

 DMS: 0,224335448044069 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
25	5.701633	a1
35	6.050669	a2
45	6.428968	a3

No caso da norma ENV, as pressões são estatisticamente diferentes em todas as variações de ângulo ao nível de significância de 5%.

Tabela 11B Análise desdobramento norma x ângulo de atrito com a parede

Análise do desdobramento de **Norma** dentro de cada nível de: **Ângulo Parede**

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Norma	/1 4	13.552037	3.388009	98.551	0.0000 *
Norma	/2 4	18.085625	4.521406	131.519	0.0000 *
Norma	/3 4	22.704233	5.676058	165.106	0.0000 *
Resíduo	17	0.584432	0.034378		

Codificação usada para o desdobramento
cód. Ângulo Parede
1 = 20
2 = 27
3 = 32

Pela Anova fixando-se cada ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), verifica-se que a formulação de cada norma influencia no resultado das pressões. A pressão apresenta média diferente ao nível de 5% de significância, conforme a norma.

A Anova não informa quais normas influenciam da mesma forma conforme o ϕ_w , devendo-se fazer a comparação de médias em cada ângulo interno, sendo feita a análise de comparação de médias pelo teste de Tukey.

Tabela 12B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo atrito com a parede de 20°

Teste de Tukey para o desdobramento de **Norma** dentro da codificação: **1**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV **Norma**

DMS: 0,266004813966128 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
-------------	--------	---------------------

ENV	6.366996	a1
ACI	6.583194	a1
BMHB	7.327200	a2
DIN	7.637399	a3
AS	7.703127	a3

Para o desdobramento das normas quando ϕ_w é de 20°, verifica-se que as médias são estatisticamente iguais ao nível de significância de 5% em alguns casos, sendo que as normas ENV e ACI apresentam valor de pressão igual, da mesma forma as normas DIN e AS, e a norma BMHB é apresenta valor de pressão diferente das demais.

Tabela 13B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo atrito com a parede de 27°

Teste de Tukey para o desdobramento de **Norma** dentro da codificação: 2
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV Norma		
DMS: 0,266004813966128 NMS: 0,05		
Tratamentos	Médias	Resultados do teste
ENV	6.023016	a1
ACI	6.347433	a2
DIN	7.233424	a3
BMHB	7.327200	a3
AS	7.703127	a4

Para o desdobramento das normas quando ϕ_w é de 27°, verifica-se que as médias são estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%, assim as normas DIN e BMHB apresentam valor de pressão igual. Já as normas ENV, ACI e AS apresentam valores de pressão horizontal diferente entre elas e as demais.

Tabela 14B Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo atrito com a parede de 32°

Teste de Tukey para o desdobramento de **Norma** dentro da codificação: 3
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV Norma		
DMS: 0,266004813966128 NMS: 0,05		
Tratamentos	Médias	Resultados do teste

ENV	5.791259	a1
ACI	6.180763	a2
DIN	6.968156	a3
BMHB	7.327200	a4
AS	7.703127	a5

Para o desdobramento das normas quando ϕ_w é de 32°, verifica-se que as médias são estatisticamente diferentes ao nível de significância de 5%, assim todas as normas apresentam valores de pressão horizontal diferentes.

Tabela 15B Análise desdobramento ângulo de atrito com a parede x norma

Análise do desdobramento de **Ângulo Parede** dentro de cada nível de: **Norma**

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Ângulo Parede /1	2	0.735939	0.367969	10.704	0.0009 *
Ângulo Parede /2	2	-0.000000	-0.000000	-0.000	1.0000 NS
Ângulo Parede /3	2	0.000000	0.000000	0.000	1.0000 NS
Ângulo Parede /4	2	2.044349	1.022174	29.733	0.0000 *
Ângulo Parede /5	2	1.510518	0.755259	21.969	0.0000 *
Residuo	17	0.584432	0.034378		

Codificação usada para o desdobramento
 cód. Norma
 1 = ACI
 2 = AS
 3 = BMHB
 4 = DIN
 5 = ENV

Pela Anova fixando-se cada norma, verifica-se que ϕ_w influencia no valor das pressões horizontais. A pressão apresenta média diferente ao nível de 5% de significância, conforme ϕ_w .

A Anova não informa quais normas influenciam da mesma forma conforme ϕ_w , devendo-se fazer a comparação de médias em cada norma, sendo feita a análise de comparação de médias pelo teste de Tukey.

Tabela 16B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x norma ACI

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Parede** dentro da codificação: 1
 Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV **Ângulo Parede**

 DMS: 0,224335448044069 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
32	6.180763	a1
27	6.347433	a1
20	6.583194	a2

No caso da norma ACI, as pressões são estatisticamente diferentes quando ϕ_w é igual a 20°. E são iguais quando ϕ_w é de 32 e 27° ao nível de significância de 5%.

Tabela 17B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x norma AS

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Parede** dentro da codificação: 2
 Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

 Teste Tukey para a FV **Ângulo Parede**

DMS: 0,224335448044069 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
32	7.703127	a1
27	7.703127	a1
20	7.703127	a1

No caso da norma AS, as pressões são estatisticamente iguais em todas as variações de ϕ_w ao nível de significância de 5%.

Tabela 18B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x norma BMHB

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Parede** dentro da codificação: 3
 Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

 Teste Tukey para a FV **Ângulo Parede**

DMS: 0,224335448044069 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
32	7.327200	a1
27	7.327200	a1
20	7.327200	a1

No caso da norma BMHB, as pressões são estatisticamente iguais em todas as variações de ϕ_w ao nível de significância de 5%.

Tabela 19B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x norma DIN

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Parede** dentro da codificação: **4**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV Ângulo Parede		
DMS: 0,224335448044069 NMS: 0,05		
Tratamentos	Médias	Resultados do teste
32	6.968156	a1
27	7.233424	a2
20	7.637399	a3

No caso da norma DIN, as pressões são estatisticamente diferentes em todas as variações de ϕ_w ao nível de significância de 5%.

Tabela 20B Teste Tukey – Desdobramento ângulo atrito com a parede x norma ENV

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Parede** dentro da codificação: **5**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV Ângulo Parede		
DMS: 0,224335448044069 NMS: 0,05		
Tratamentos	Médias	Resultados do teste
32	5.791259	a1
27	6.023016	a2
20	6.366996	a3

No caso da norma ENV, as pressões são estatisticamente diferentes em todas as variações de ϕ_w ao nível de significância de 5%.

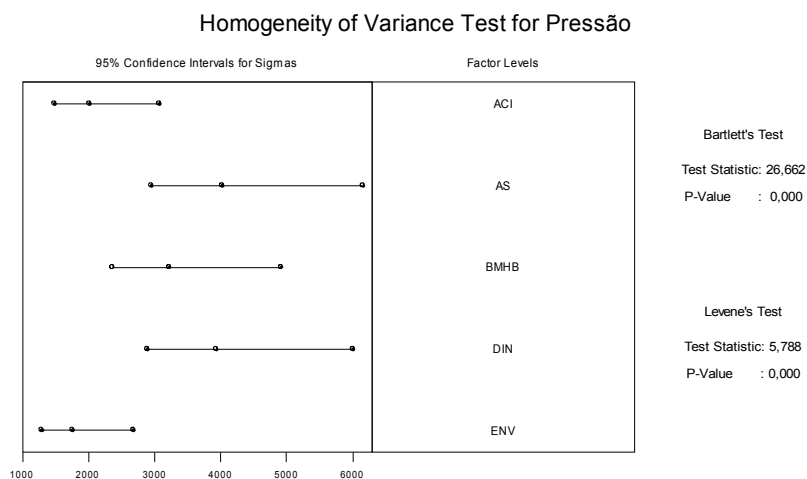


Figura 1B Análise de Variância da Pressão Vertical.

Por Bartlett's Test e Levene's Test, observa-se que em ambos o p-value é menor que 0,05 assim não há homogeneidade das variâncias. Assim, conclui-se que é necessária a transformação dos dados.

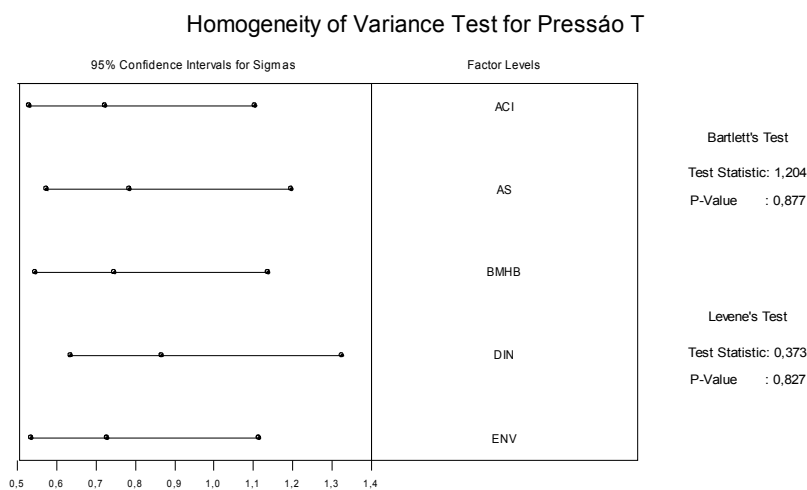


Figura 2B Análise de Variância da Pressão Vertical – Dados transformados.

Por Bartlett's Test e Levene's Test, observa-se que em ambos o p-value é maior que 0,05 (0,877 e 0,827 respectivamente), assim há homogeneidade

das variâncias. Assim, conclui-se que a transformação dos dados homogeneizou as variâncias.

ANEXO C Análise estatística - Pressão de atrito com a parede

Pela Tabela de Análise de Variância, observou-se que o valor do p-valor é menor que 0,05 (nível de significância) quando se analisa a interação Norma x Peso Específico (γ) e Norma x Ângulo de atrito interno (ϕ). O estudo individual de igualdade entre as normas perde o significado. Então, se passa a estudar os fatores utilizando o desdobramento que consiste em estudar o Fator Norma dentro do Peso Específico; e em estudar o fator Peso Específico dentro de cada Norma, da mesma forma a interação Norma x Ângulo de atrito interno. No caso do ângulo de atrito com a parede, a variação entre eles não influencia nos valores entre as Normas. A comparação de médias foi efetuada fixando um nível de cada fator e variando as interações, de forma a se fazer todos os desdobramentos.

Tabela 1C Análise desdobramento norma x peso específico

 Análise do desdobramento de **Norma** dentro de cada nível de: **Peso Específico**

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV		GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Norma	/1	4	88312.113347	22078.028337	6.439	0.0024 *
Norma	/2	4	353252.617356	88313.154339	25.758	0.0000 *
Norma	/3	4	794812.857569	198703.214392	57.955	0.0000 *
Resíduo		17	58286.102510	3428.594265		

Codificação usada para o desdobramento
 cód. Peso Específico
 1 = 500
 2 = 1000
 3 = 1500

Pela Anova fixando-se cada peso específico, verifica-se que a formulação de cada norma influencia no resultado das pressões. A pressão apresenta média diferente ao nível de 5% de significância, conforme a norma.

A Anova não informa quais normas influenciam da mesma forma conforme o peso específico, sendo feita a análise de comparação de médias pelo teste de Tukey.

Tabela 2C Teste Tukey – Desdobramento norma x peso específico 500 kg.m⁻³

Teste de Tukey para o desdobramento de **Norma** dentro da codificação: **1**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV **Norma**

DMS: 84,0049696737908 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
BMHB	218.500000	a1
ACI	273.215556	a1 a2
AS	313.356667	a2
ENV	331.088889	a2
DIN	337.970000	a2

Para o desdobramento das normas quando γ é 500 kg.m⁻³, verifica-se que as médias são estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%, sendo que as normas BMHB e ACI apresentam valor de pressão iguais, da mesma forma entre as normas ACI, AS, ENV e DIN.

Tabela 3C Teste Tukey – Desdobramento norma x peso específico 1000 kg.m⁻³

Teste de Tukey para o desdobramento de **Norma** dentro da codificação: **2**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV **Norma**

DMS: 84,0049696737908 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
BMHB	437.000000	a1
ACI	546.428889	a2
AS	626.712222	a2 a3
ENV	662.178889	a3
DIN	675.941111	a3

Para o desdobramento das normas quando γ é 1000 kg.m⁻³, verifica-se que as médias são estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%, sendo que as normas ACI e AS apresentam valor de pressão iguais, da mesma forma entre as normas AS, ENV e DIN, já a norma BMHB apresenta valor de pressão diferente das demais.

Tabela 4C Teste Tukey – Desdobramento norma x peso específico 1500 kg.m⁻³

Teste de Tukey para o desdobramento de **Norma** dentro da codificação: **3**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV **Norma**

DMS: 84,0049696737908 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
BMHB	655.500000	a1
ACI	819.645556	a2
AS	940.067778	a3
ENV	993.267778	a3
DIN	1013.911111	a3

Para o desdobramento das normas quando γ é 1500 kg. m⁻³, verifica-se que as médias são estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%, entre as normas AS, ENV e DIN. Sendo que as normas BMHB e ACI apresentam valores de pressão diferentes das demais.

Tabela 5C Análise desdobramento peso específico x norma

Análise do desdobramento de **Peso Específico** dentro de cada nível de: **Norma**

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Peso Específico /1	2	1343635.852067	671817.926033	195.946	0.0000 *
Peso Específico /2	2	1767450.675556	883725.337778	257.752	0.0000 *
Peso Específico /3	2	859360.500000	429680.250000	125.323	0.0000 *
Peso Específico /4	2	2056033.735607	1028016.867804	299.836	0.0000 *
Peso Específico /5	2	1973163.964007	986581.982004	287.751	0.0000 *
Resíduo	17	58286.102510	3428.594265		

Codificação usada para o desdobramento

cód. Norma

1 = ACI

2 = AS

3 = BMHB

4 = DIN
5 = ENV

Pela Anova fixando-se cada norma, verifica-se que γ influencia no valor das pressões. A pressão apresenta média diferente ao nível de 5% de significância, conforme γ .

A Anova não informa quais normas influenciam da mesma forma conforme γ , devendo-se fazer a comparação de médias em cada norma, sendo feita a análise de comparação de médias pelo teste de Tukey.

Tabela 6C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma ACI

Teste de Tukey para o desdobramento de **Peso Específico** dentro da codificação: **1**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV Peso Específico		
DMS: 70,8456821841502 NMS: 0,05		
Tratamentos	Médias	Resultados do teste
500	273.215556	a1
1000	546.428889	a2
1500	819.645556	a3

No caso da norma ACI, as pressões são estatisticamente diferentes em todas as variações de γ ao nível de significância de 5%.

Tabela 7C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma AS

Teste de Tukey para o desdobramento de **Peso Específico** dentro da codificação: **2**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV Peso Específico		
DMS: 70,8456821841502 NMS: 0,05		
Tratamentos	Médias	Resultados do teste
500	313.356667	a1
1000	626.712222	a2
1500	940.067778	a3

No caso da norma AS, as pressões são estatisticamente diferentes em todas as variações de γ ao nível de significância de 5%.

Tabela 8C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma BMHB

Teste de Tukey para o desdobramento de **Peso Específico** dentro da codificação: **3**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

```
-----
Teste Tukey para a FV Peso Específico
-----
DMS: 70,8456821841502  NMS: 0,05
-----
Tratamentos                Médias                Resultados do teste
-----
500                        218.500000 a1
1000                       437.000000 a2
1500                       655.500000 a3
-----
```

No caso da norma BMHB, as pressões são estatisticamente diferentes em todas as variações de γ ao nível de significância de 5%.

Tabela 9C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma DIN

Teste de Tukey para o desdobramento de **Peso Específico** dentro da codificação: **4**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

```
-----
Teste Tukey para a FV Peso Específico
-----
DMS: 70,8456821841502  NMS: 0,05
-----
Tratamentos                Médias                Resultados do teste
-----
500                        337.970000 a1
1000                       675.941111 a2
1500                       1013.911111 a3
-----
```

No caso da norma DIN, as pressões são estatisticamente diferentes em todas as variações de γ ao nível de significância de 5%.

Tabela 10C Teste Tukey – Desdobramento peso específico x norma ENV

Teste de Tukey para o desdobramento de **Peso Específico** dentro da codificação: 5
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV **Peso Específico**

DMS: 70,8456821841502 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
500	331.088889	a1
1000	662.178889	a2
1500	993.267778	a3

No caso da norma ENV, as pressões são estatisticamente diferentes em todas as variações de γ ao nível de significância de 5%.

Tabela 11C Análise desdobramento norma x ângulo atrito interno

Análise do desdobramento de **Norma** dentro de cada nível de: **Ângulo Interno**

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Norma /1	4	554160.236157	138540.059039	40.407	0.0000 *
Norma /2	4	332292.980676	83073.245169	24.230	0.0000 *
Norma /3	4	334270.827902	83567.706976	24.374	0.0000 *
Resíduo	17	58286.102510	3428.594265		

Codificação usada para o desdobramento
cód. Ângulo Interno
1 = 25
2 = 35
3 = 45

Pela Anova fixando-se cada ângulo interno, verifica-se que a formulação de cada norma influencia no resultado das pressões. A pressão apresenta média diferente ao nível de 5% de significância, conforme a norma.

A Anova não informa quais normas influenciam da mesma forma conforme o ângulo atrito interno, devendo-se fazer a comparação de médias em cada ângulo interno, sendo feita a análise de comparação de médias pelo teste de Tukey.

Tabela 12C Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo de atrito de 25°

Teste de Tukey para o desdobramento de **Norma** dentro da codificação: **1**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

 Teste Tukey para a FV **Norma**

 DMS: 85,0485496827658 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
BMHB	437.000000	a1
AS	643.396667	a2
ACI	647.978889	a2
ENV	714.097778	a2 a3
DIN	769.036250	a3

Para o desdobramento das normas quando ϕ_i é 25°, verifica-se que as algumas médias são estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%, sendo que as normas AS, ACI e ENV (a2) apresentam valor de pressão iguais, da mesma forma as normas ENV e DIN (a3). E a norma BMHB é diferente das demais ao nível de 5% de significância.

Tabela 13C Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo de atrito de 35°

Teste de Tukey para o desdobramento de **Norma** dentro da codificação: **2**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

 Teste Tukey para a FV **Norma**

 DMS: 83,1606771935908 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
BMHB	437.000000	a1
ACI	556.306667	a2
AS	619.448889	a2 a3
DIN	653.420000	a3
ENV	673.920000	a3

Para o desdobramento das normas quando ϕ_i é 35°, verifica-se que as algumas médias são estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%, sendo que as normas ACI e AS (a2) apresentam valor de pressão iguais, da mesma forma as normas AS, DIN e ENV (a3). E a norma BMHB é diferente das demais ao nível de 5% de significância.

Tabela 14C Teste Tukey – Desdobramento norma x ângulo de atrito de 45°

Teste de Tukey para o desdobramento de **Norma** dentro da codificação: **3**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

 Teste Tukey para a FV **Norma**

 DMS: 84,0049696737908 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
ACI	435.004444	a1
BMHB	437.000000	a1
ENV	598.517778	a2
AS	617.291111	a2
DIN	618.212222	a2

Para o desdobramento das normas quando ϕ_i é 45°, verifica-se que as algumas médias são estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%, sendo que as normas ACI e BMHB (a1) apresentam valor de pressão iguais, da mesma forma as normas ENV, AS e DIN (a2).

Tabela 15C Análise desdobramento ângulo atrito interno x norma

 Análise do desdobramento de **Ângulo Interno** dentro de cada nível de: **Norma**

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Ângulo Interno /1	2	205428.418289	102714.209144	29.958	0.0000 *
Ângulo Interno /2	2	3778.956289	1889.478144	0.551	0.5827 *
Ângulo Interno /3	2	0.000000	0.000000	0.000	1.0000 *
Ângulo Interno /4	2	104399.265042	52199.632521	15.225	0.0002 NS
Ângulo Interno /5	2	61975.456030	30987.728015	9.038	0.0020 NS
Resíduo	17	58286.102510	3428.594265		

Codificação usada para o desdobramento
 cód. Norma
 1 = ACI
 2 = AS
 3 = BMHB
 4 = DIN
 5 = ENV

Pela Anova fixando-se cada norma, verifica-se que ϕ_w influencia no valor das pressões horizontais. A pressão apresenta média diferente ao nível de 5% de significância, conforme ϕ_i .

A Anova não informa quais normas influenciam da mesma forma conforme ϕ_i , devendo-se fazer a comparação de médias em cada norma, sendo feita a análise de comparação de médias pelo teste de Tukey.

Tabela 16C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma ACI

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Interno** dentro da codificação: **1**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV **Ângulo Interno**

DMS: 70,8456821841502 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
45	435.004444	a1
35	556.306667	a2
25	647.978889	a3

No caso da norma ACI, as pressões são estatisticamente diferentes em todas as variações de ângulo ao nível de significância de 5%.

Tabela 17C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma AS

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Interno** dentro da codificação: **2**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV **Ângulo Interno**

DMS: 70,8456821841502 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
45	617.291111	a1
35	619.448889	a1
25	643.396667	a1

No caso da norma AS, as pressões são estatisticamente iguais em todas as variações de ângulo ao nível de significância de 5%.

Tabela 18C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma BMHB

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Interno** dentro da codificação: **3**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV **Ângulo Interno**

DMS: 70,8456821841502 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
45	437.000000	a1
35	437.000000	a1
25	437.000000	a1

No caso da norma BMHB, as pressões são estatisticamente iguais em todas as variações de ângulo ao nível de significância de 5%.

Tabela 19C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma DIN

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Interno** dentro da codificação: **4**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV **Ângulo Interno**

DMS: 71,1402600958517 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
45	618.212222	a1
35	653.420000	a1
25	769.036250	a2

No caso da norma DIN, as pressões são estatisticamente diferentes em quando ϕ_i é igual a 25°, e iguais quando ϕ_i é 35° e 45° ao nível de significância de 5%.

Tabela 20C Teste Tukey – Desdobramento ângulo interno x norma ENV

Teste de Tukey para o desdobramento de **Ângulo Interno** dentro da codificação: **5**
Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV **Ângulo Interno**

 DMS: 70,8456821841502 NMS: 0,05

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
45	598.517778	a1
35	673.920000	a2
25	714.097778	a2

No caso da norma ENV, as pressões são estatisticamente diferentes em quando ϕ_i é igual a 45°, e iguais quando ϕ_i é 35° e 45° ao nível de significância de 5%.

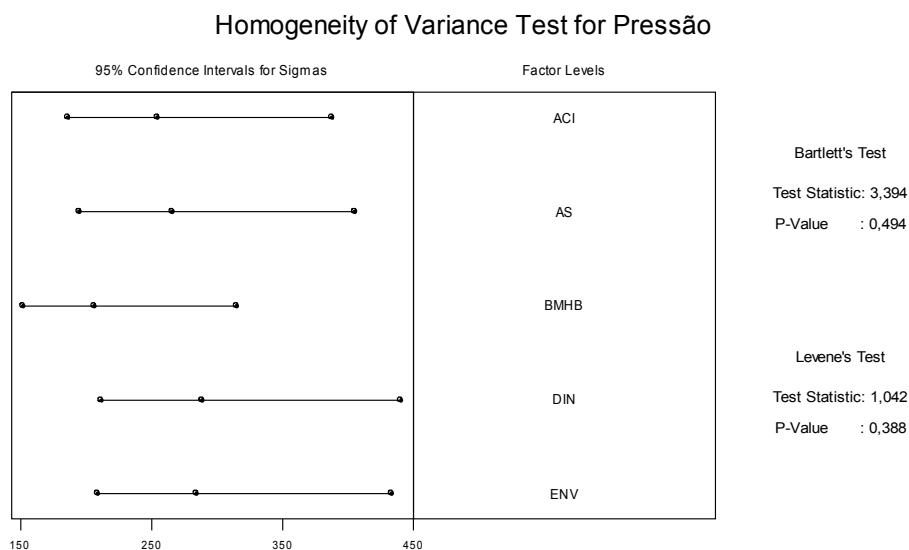


Figura 1C Análise de Variância da Pressão de Atrito com a Parede.

Por Bartlett's Test e Levene's Test, observa-se que em ambos o p-value é maior que 0,05 (0,494 e 0,388; respectivamente), assim há homogeneidade das variâncias. Assim, conclui-se que não é necessária a transformação dos dados.