

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DAS AÇÕES EM SILOS HORIZONTAIS

FRANCISCO CARLOS GOMES

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

ORIENTADOR : Prof Titular Carlito Calil Júnior

São Carlos, 2000

A sabedoria é vã, sem o amor.

Para Ângela e Marina.

DEDICATÓRIA

*À minha esposa, **Ângela**, e a minha filha, **Marina**, que tanto souberam suportar a minha ausência em momentos do nosso convívio, e sempre me apoiaram. Como é bom chegar neste momento e poder escrever tais palavras, é um sentimento ímpar, que aqui compartilho. Com todo amor e carinho.*

*À meus pais **Antônio Bernardino Gomes** e **Zélia Fazzion Gomes**, que com muito amor e luta me educaram, dando-me a maior fortuna, **o saber do viver.***

*Aos meus irmãos, **Fátima**, **José Antônio**, **Sílvia**, **Jader Bosco**, **Judith** e **Cláudio** que sempre me apoiaram e acreditaram em mim.*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlito Calil Júnior, um dos pioneiros na área de pesquisa em estruturas de armazenamento em nosso país, por sua experiência transmitida, dedicação, orientação e acima de tudo pela amizade demonstrada.

Ao engenheiro Ari A. Negrisoni, um dos maiores projetistas em nosso país, pelo apoio, experiência e pela amizade.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Engenharia e aos colegas de trabalho, em especial, ao Professor Vítor Hugo Teixeira, pelo apoio e incentivo.

Às instituições de fomento, CAPES/PICDT, FAPESP, pela concessão de bolsa de estudos e pelo apoio financeiro para execução desta pesquisa.

À equipe de funcionários do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras da EESC/USP : Aparecido Galindo, Arnaldo Floro de Souza, Jaime Galindo, José Francisco do Nascimento Filho, Luís E. Bragatto, Sílvio A. Ferro, e, em especial, Roberto Galindo e Tânia M. Ferreira, pelo apoio técnico, convívio e amizade.

Aos funcionários da CEAGESP- Araraquara, Luiz Eulálio A. Kannebley (Gerente Regional Interino), George W. Rocha, Lázaro Lipisk, Eduardo Pascoal Bassetti, Roberto Carlos Boalim e Mairton Vicente Pereira, pelo apoio técnico, fundamental, para a realização dos ensaios no silo horizontal.

À José Wallace B. Nascimento e Ernani C. Araújo, contemporâneos, pela amizade firmada.

Aos companheiros de pós-graduação, pela troca de conhecimentos e amizade e ao aluno de iniciação científica Cláudio Issamy Osako.

RESUMO

GOMES, F.C. (2000). *Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais*. São Carlos, 2000. 205p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O projeto seguro e econômico das estruturas de armazenamento é função das máximas ações impostas e da resistência destas estruturas de suportar tais ações, observadas as combinações mais desfavoráveis. Entre as ações consideradas nos cálculos dos silos horizontais (peso próprio, peso de equipamentos, vento, recalques diferenciais de apoios, impacto de veículos, explosões, etc), a de maior importância é a causada pelo empuxo dos produtos armazenados e que foi objeto de estudo nesta pesquisa. Este trabalho foi realizado em duas etapas, teórica e experimental, procurando avaliar estas ações com base em teorias e métodos de cálculo de diversos autores. Na tremonha do silo, as pressões foram avaliadas através do método de cálculo proposto por Safarian & Harris, da teoria de Walker e da Norma Australiana AS 3774. Nas paredes, foram avaliadas as pressões de acordo com as teorias de Airy, Reimbert & Reimbert, Coulomb e Rankine e da norma americana ANSI/96. Os modelos teóricos foram estudados e comparados com os resultados obtidos através de medições diretas das pressões em modelo piloto e silo horizontal em escala real com a determinação da relação entre as pressões verticais e horizontais (K). Dos resultados obtidos propõe-se um novo método de cálculo com base em um modelo empírico para a determinação das pressões horizontais nestas unidades.

Palavras – chave: Silos horizontais, ações, pressões, produto armazenado.

ABSTRACT

GOMES, FC. *Theoretical and experimental study of loads in horizontal silos.*

São Carlos, 2000. 205p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The safe and economic design of storage structures is a function of the loads and of the strength of these structures, considering unfavorable loads combinations. Among the loads considered in the calculations of the horizontal silos, the most important load is due stored products. Silos are usually designed on the basis of simple theory which is used to predict horizontal pressures on the walls and hoppers. The pressures generally depend on many factors including the physical properties of the stored materials, the flow pattern and also the method of operating the silo. This work is divided in two parts in order to evaluate these loads based in theories and international codes. The silo hopper was evaluated by Walker's theory and by AS 3774-1996 code. The silo walls was evaluated by theories of Airy, Rankine, Reimbert & Reimbert, Coulomb, Safarian & Harris and ANSI (1996) code. The theoretical models were studied and compared with the results obtained through pressure measurements in a real and a pilot silos. From the results we proposed a new empiric design method to evaluate the horizontal pressures in the silos wall.

Keywords : horizontal silos, loads, pressures, bulk solids.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 01 – Vista dos silos verticais de concreto armado e silos metálicos | 10 |
| FIGURA 02 – Cortes dos silos horizontais não elevados – fundo “V” e “VV” | 14 |
| FIGURA 03 – Silos com fundo semi-plano, vista frontal, vista geral e cortes | 14 |
| FIGURA 04 – Silo com fundo em formato “V” | 15 |
| FIGURA 05 – Silo com cobertura em estrutura de madeira (MLC) | 16 |
| FIGURA 06 – Silos horizontais para armazenamento de fertilizantes | 16 |
| FIGURA 07 – Vistas frontal e lateral dos silos com cobertura e paredes pré moldadas | 17 |
| FIGURA 08 - (a) Esquema geral de um silo para algodão | 18 |
| FIGURA 08 - (b) Silos para armazenamento de sementes de algodão e grãos | 19 |
| FIGURA 09 – Silo Buffalo | 20 |
| FIGURA 10 – Silo horizontal elevado | 21 |
| FIGURA 11 – Silos circulares | 22 |
| FIGURA 12 – Silos circulares com cobertura metálica em cúpula | 22 |
| FIGURA 13 – Silo com cobertura em concreto armado monolítico em cúpula pneumática | 23 |
| FIGURA 14 – Instalações de cabos de termometria em silos de fundo plano e semi-plano | 25 |
| FIGURA 15 – Planta de uma instalação de grande capacidade | 27 |
| FIGURA 16 – Fluxograma de processamento numa unidade | 28 |
| FIGURA 17 – Representação do lugar geométrico | 39 |
| FIGURA 18 – Representação gráfica do efetivo ângulo de atrito | 39 |
| FIGURA 19 – Lugar geométrico de deslizamento e ângulo de atrito com a parede | 40 |
| FIGURA 20 – Determinação geométrica do tipo de fluxo | 53 |
| FIGURA 21 – Forças agindo sobre uma camada infinitesimal | 54 |
| FIGURA 22 – Quadrados imaginários para cálculo dos raios hidráulicos | 57 |
| FIGURA 23 – Comparação entre modelos teóricos e dados experimentais para pressão | 58 |
| FIGURA 24 – Definição dos silos de acordo com o plano de ruptura | 59 |
| FIGURA 25 – empuxo ativo, passivo e em repouso | 61 |
| FIGURA 26 – Representação gráfica das condições de pressão ativa e passiva | 63 |
| FIGURA 27 – Aplicação do empuxo para terraplenos inclinados e horizontais (Rankine) | 64 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 28 - (a) Silos tremonha – Diagrama de pressão lateral de acordo com Rankine | 65 |
| FIGURA 28 - (b) Silos horizontais – Diagrama de pressão lateral de acordo com Rankine | 66 |
| FIGURA 29 – Representação gráfica para o empuxo de acordo com Coulomb | 67 |
| FIGURA 30 – Planos de deslizamento do produto armazenado | 68 |
| FIGURA 31 – Curva de pressão obtida através da teoria de Airy, em função de h/b | 70 |
| FIGURA 32 – Representação do equilíbrio de uma cunha de um maciço granular | 74 |
| FIGURA 33 – Prismas de ruptura para um silo horizontal | 74 |
| FIGURA 34 – Definição do prisma de ruptura para uma superfície inclinada | 75 |
| FIGURA 35 - (a) Pressões sobre a parede - (b) círculo de Mohr | 78 |
| FIGURA 36 – Forças numa faixa elementar da tremonha | 79 |
| FIGURA 37 – Estado de tensões para o produto em repouso (b) –Círculo de Mohr | 80 |
| FIGURA 38 – Comparação entre os modelo teórico de Walker e resultados experimentais | 81 |
| FIGURA 39 – Tipos básicos de células de pressão | 90 |
| FIGURA 40 – Modelos de células EPC (a) tipo diafragma (b) tipo hidráulica | 92 |
| FIGURA 41 – Instalação da célula de pressão sobre placas | 93 |
| FIGURA 42 – Calibração das células de pressão | 95 |
| FIGURA 43 – Disposição das células de pressão no modelo | 97 |
| FIGURA 44 – Instalação das células de pressão nas paredes e na tremonha do modelo | 98 |
| FIGURA 45 – Montagem do modelo piloto | 98 |
| FIGURA 46 – Instrumentação do modelo | 98 |
| FIGURA 47 – Disposição das células dentro do modelo | 99 |
| FIGURA 48 – Execução do ensaio do modelo | 99 |
| FIGURA 49 – Silo horizontal elevado ensaiado | 102 |
| FIGURA 50 – Planta – disposição das células de pressão no silo horizontal | 103 |
| FIGURA 51 – Pressões ativas nas paredes do modelo | 108 |
| FIGURA 52 – Pressões ativas nas paredes do silo horizontal | 109 |
| FIGURA 53 – Pressões estáticas nas paredes da tremonha do modelo piloto | 110 |
| FIGURA 54 – Pressões estáticas nas paredes da tremonha do silo horizontal | 111 |
| FIGURA 55 – Pressões dinâmicas verticais de acordo com Walker e AS 3774 | 112 |
| FIGURA 56 – Pressões dinâmicas normais de acordo com Walker e AS 3774 | 112 |
| FIGURA 57 – Curvas de calibração das células de pressão EPC 3500-1-100 | 115 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 58 – Disposição das células de pressão no modelo piloto | 116 |
| FIGURA 59 – Pressões ativas nas paredes do modelo e valores experimentais | 118 |
| FIGURA 60 – Pressões estáticas na tremonha do modelo e valores experimentais | 118 |
| FIGURA 61 – Mapeamento das pressões no modelo piloto | 119 |
| FIGURA 62 – Disposição das células de pressão no silo horizontal - corte | 120 |
| FIGURA 63 – Pressões dinâmicas no silo horizontal – células 05 e 06 | 121 |
| FIGURA 64 – Pressões dinâmicas no silo horizontal – células 04 e 07 | 122 |
| FIGURA 65 – Pressões dinâmicas no silo horizontal – células 03 e 08 | 123 |
| FIGURA 66 – Pressões dinâmicas no silo horizontal – células 02 e 09 | 124 |
| FIGURA 67 – Pressões dinâmicas no silo horizontal – células 01 e 10 | 125 |
| FIGURA 68 – Pressões dinâmicas no silo horizontal – células 13 e 14 | 126 |
| FIGURA 69 – Pressões dinâmicas no silo horizontal – células 11 e 12 | 127 |
| FIGURA 70 – Pressões dinâmicas no silo horizontal – células 15 e 16 | 128 |
| FIGURA 71 – Gráfico de pressão x tempo – ciclo de carregamento | 131 |
| FIGURA 72 – Gráfico de pressão x tempo – ciclo de descarga | 132 |
| FIGURA 73 – Pico de pressão na descarga do silo | 133 |
| FIGURA 74 – Mapeamento das pressões máximas nas paredes e na tremonha | 134 |
| FIGURA 75 – Gráfico das pressões ativas e valores experimentais na parede do silo | 134 |
| FIGURA 76 – Pressões estáticas e dinâmicas na tremonha | 135 |
| FIGURA 77 – Silo I | 142 |
| FIGURA 78 – Silo II | 142 |
| FIGURA 79 – Silo pré - moldado | 143 |
| FIGURA 80 – Vista lateral e canaletas | 143 |
| FIGURA 81 – Canaleta de aeração | 144 |
| FIGURA 82 – Impermeabilização das juntas dos elementos | 144 |
| FIGURA 83 – Exaustão de ar | 144 |
| FIGURA 84 – Painel de controle | 144 |
| FIGURA 85 – Vista geral | 145 |
| FIGURA 86 – Vista lateral | 145 |
| FIGURA 87 – Vista geral do silo não elevado | 146 |
| FIGURA 88 – Vista da cobertura do silo horizontal não elevado | 146 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 89 – Vista geral do silo horizontal elevado | 147 |
| FIGURA 90 – Sistema de descarga do silo elevado | 147 |
| FIGURA 91 – Descarga em moegas dos silos | 147 |
| FIGURA 92 – Cobertura do silo horizontal | 148 |
| FIGURA 93 – (a) Silo em construção – (b) Silo acabado – (c) Vista lateral | 148 |
| FIGURA 94 – Vista geral da unidade | 149 |
| FIGURA 95 – Elevação do silo sobre aterro | 149 |
| FIGURA 96 – Canaletas e guia para o sistema móvel de aeração | 149 |
| FIGURA 97 – (a) Infiltração na base do silo próximo às paredes – (b) planta baixa. | 149 |
| FIGURA 98 – Vista geral | 151 |
| FIGURA 99 – Cobertura danificada | 152 |
| FIGURA 100 – Fundo e sépto divisório | 152 |
| FIGURA 101 – Saída de descarga | 152 |
| FIGURA 102 – Descolamento do concreto | 152 |
| FIGURA 103 – Impermeabilização da parede | 152 |
| FIGURA 104 – Impermeabilização na base da coluna | 152 |
| FIGURA 105 – Vista geral | 153 |
| FIGURA 106 – Sistema de carregamento | 153 |
| FIGURA 107 – Arco de cobertura | 154 |
| FIGURA 108 – Equipamento de descarga | 154 |
| FIGURA 109 – Ângulo de repouso | 154 |
| FIGURA 110 – Carregamento | 154 |
| FIGURA 111 – Sistema de aeração | 154 |
| FIGURA 112 – Perdas nos cantos | 154 |
| FIGURA 113 – Silo em construção | 155 |
| FIGURA 114 – Silo acabado | 155 |
| FIGURA 115 – Sistema de carregamento | 155 |
| FIGURA 116 – Vista geral | 155 |
| FIGURA 117 – Esquema geral | 173 |
| FIGURA 118 – Dimensões gerais | 174 |
| FIGURA 119 – Frontal superior | 175 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 120 - Frontal inferior | 176 |
| FIGURA 121 – Gaveta de abertura da tremonha | 177 |
| FIGURA 122 – Pilar | 178 |
| FIGURA 123 – Tremonha | 179 |
| FIGURA 124 – Vista superior | 180 |
| FIGURA 125 – Cobrejunta | 181 |

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELAS

| | |
|---|-----|
| TABELA 01 – Custo estimado de construção por tonelada estática | 04 |
| TABELA 02 – Classificação geométrica dos silos segundo as normas internacionais | 11 |
| TABELA 03 – Fatores que afetam a predição de pressões nas paredes dos silos | 35 |
| TABELA 04 – Classes de produtos segundo a norma ISO 11697 | 48 |
| TABELA 05 – Tipos de carregamento e modelo teórico segundo M. & A. Reimbert | 76 |
| TABELA 06 – Classificação dos produtos de acordo com a granulometria | 85 |
| TABELA 07 – Carregamentos – padrão (N) para a determinação do lugar geométrico | 86 |
| TABELA 08 – Principais fatores que afetam as medições das células de pressão | 94 |
| TABELA 09 – Posicionamento das células – Simbologia para indicação | 97 |
| TABELA 10 – Resultados obtidos nos ensaios de propriedades do milho | 105 |
| TABELA 11 – Resultados obtidos nos ensaios de propriedades da areia | 106 |
| TABELA 12 – Valores do coeficientes K fornecidos pelas normas internacionais | 107 |
| TABELA 13 – Limites de K em função do ângulo de atrito interno | 107 |
| TABELA 14 – Dados de calibração da célula de pressão EPC – 47089 | 114 |
| TABELA 15 – Valores médios das pressões verticais, horizontais e de K | 117 |
| TABELA 16 – Valores de pressão de carregamento e do coeficiente K | 129 |
| TABELA 17 – Valores de pressão de descarga e do coeficiente K | 129 |

QUADROS

| | |
|--|-----|
| QUADRO 01 – Valores de pressão médios, em kPa, medidos nas paredes do corpo e da tremonha do modelo piloto | 116 |
| QUADRO 02 – Valores de calibração das células de pressão – EPC 3500-1-100 | 156 |

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS MINÚSCULAS

| | | |
|-----------------|---|---------------------|
| a | Lado de um retângulo | [L] |
| a | Lado de um silo horizontal ou silo tremonha | [L] |
| a_0 | Distância genérica para cálculo da pressão | [L] |
| a_1 | Abertura da boca da tremonha em cunha | [L] |
| a' | Lado de um quadrado imaginário para cálculo da pressão no lado b de um retângulo | [L] |
| α | Ângulo de inclinação da parede da tremonha | [1] |
| b | Lado de um retângulo | [L] |
| β | Ângulo entre a maior tensão principal e a normal à parede da tremonha | [1] |
| β | Ângulo que a parede faz com a superfície do terreno | [1] |
| c | Constante de integração | [1] |
| d | Diâmetro | [L] |
| d' | Distância entre os prismas de ruptura | [L] |
| d_c | Diâmetro inscrito | [L] |
| dp_v | Incremento infinitesimal da pressão vertical “ p_v ” | [FL ⁻²] |
| dp_{VT} | Incremento infinitesimal da pressão p_{VT} | [FL ⁻²] |
| dy | Incremento infinitesimal da ordenada y | [L] |
| dz | Incremento infinitesimal da ordenada z | [L] |
| ε | Deformação específica ou unitária | [1] |
| ε_x | Deformação específica ou unitária na direção “x” | [1] |
| ε_y | Deformação específica ou unitária na direção “y” | [1] |
| ϕ_e | Efetivo Ângulo de atrito interno | [1] |
| ϕ_i | Ângulo de atrito interno | [1] |
| ϕ_{iu} | Valor superior do efetivo ângulo de atrito interno do produto | [1] |

| | | |
|-----------------|---|---------------------|
| ϕ_r | Ângulo de repouso | [1] |
| ϕ_w | Ângulo de atrito do produto com a parede | [1] |
| ϕ_{wL} | Valor inferior do ângulo de atrito do produto com a parede | [1] |
| ϕ_{wu} | Valor superior do ângulo de atrito do produto com a parede | [1] |
| g | Aceleração da gravidade | [LT ⁻²] |
| γ | Peso específico do produto | [FL ⁻³] |
| h | Altura do silo | [L] |
| h_c | Altura do corpo do silo | [L] |
| h_e | Altura equivalente | [L] |
| h_t | Altura da tremonha | [L] |
| l | Comprimento | [L] |
| l | Perímetro da seção transversal | [L] |
| m | Fator numérico | [1] |
| m | Fator numérico da expressão de K | [1] |
| μ | Coeficiente de atrito interno do produto | [1] |
| μ' | Coeficiente de atrito entre o produto e a parede da célula | [1] |
| ν | Coeficiente de Poisson | [1] |
| p | Carga uniformemente distribuída | [F] |
| p_n | Pressão normal à parede do corpo do silo | [FL ⁻²] |
| p_{NT} | Pressão normal às paredes da tremonha | [FL ⁻²] |
| p_{TT} | Pressão tangencial às paredes da tremonha | [FL ⁻²] |
| p_{HT} | Pressão horizontal na tremonha | [FL ⁻²] |
| $-$ p_{VT} | Pressão vertical média na tremonha | [FL ⁻²] |
| p_a | Pressão ativa de Rankine | [FL ⁻²] |
| p_p | Pressão passiva de Rankine | [FL ⁻²] |
| p_h | Pressão horizontal atuando na parede do silo | [FL ⁻²] |
| p_v | Pressão vertical atuando sobre a seção transversal da massa | [FL ⁻²] |
| p_w | Pressão de atrito por metro quadrado de parede | [FL ⁻²] |
| q | Pressão de atrito sobre a parede do corpo do silo | [FL ⁻²] |
| τ | Tensão de cisalhamento | [FL ⁻²] |
| τ_{VT} | Tensão de cisalhamento do produto contra a parede da tremonha | [FL ⁻²] |
| σ | Tensão | [FL ⁻²] |

| | | |
|------------|--|---------------------|
| σ_x | Tensão na direção “x” | [FL ⁻²] |
| σ_y | Tensão na direção “y” | [FL ⁻²] |
| θ | Ângulo que o plano de deslizamento forma com a horizontal e que corresponde à máxima força lateral | [1] |
| θ_1 | Metade do ângulo do vértice da tremonha | [1] |
| y | Altura do produto acima da seção transversal considerada no corpo do silo | [L] |
| y | Altura considerada abaixo da transição entre o corpo do silo e a tremonha | [L] |
| z | Ordenada genérica | [L] |

LETRAS MAIÚSCULAS

| | | |
|----------------|---|---------------------|
| A | Área da seção transversal de um silo | [L ²] |
| D | Diâmetro | [L] |
| D | Fator de distribuição representado pela relação entre a pressão vertical próxima à parede e a pressão vertical média numa seção transversal. Teoria de Walker | [1] |
| E | Módulo de Elasticidade longitudinal do material | [FL ⁻²] |
| E _a | Empuxo ativo | [FL ⁻¹] |
| E _p | Empuxo passivo | [FL ⁻¹] |
| H | Altura total da célula | [L] |
| H | Altura da parede de contenção | [L] |
| K | Razão entre as pressões horizontal e vertical | [1] |
| K _a | Coeficiente de empuxo ativo | [1] |
| K _p | Coeficiente de empuxo passivo | [1] |
| K ₀ | Coeficiente de empuxo em repouso | [1] |
| K ₁ | Razão entre as pressões horizontal e vertical – Norma Francesa | [1] |
| K ₂ | Relação entre a pressão normal e a pressão vertical média na tremonha | [1] |
| K ₃ | Relação entre a pressão normal e a pressão vertical média na tremonha | [1] |

| | | |
|-------|--|-----|
| K_u | Valor superior de K | [1] |
| K_L | Valor inferior de K | [1] |
| P | Força horizontal na parede da célula de acordo com Airy | [F] |
| R | Raio hidráulico da célula | [L] |
| R | Componente na direção perpendicular ao plano de deslizamento da força reativa do maciço sobre o plano de deslizamento da cunha de espessura unitária | [F] |
| U | Perímetro da seção A | [L] |
| V | Notação para caracterizar o tipo de fundo de um silo horizontal | [1] |
| YL | Lugar geométrico de deslizamento | [1] |
| W | Peso da cunha de do produto | [F] |
| WYL | Lugar geométrico de deslizamento da parede | [1] |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACI | Amercan Concrete Institute |
| ANSI | American National Standard Institute |
| ASAE | American Society of Agricultural Engineering |
| AS | Australian Standard |
| CEAGESP | Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais do Estado de São Paulo |
| CONAB | Companhia Nacional de Abastecimento |
| COPACENTRO | Cooperativa Central de Armazenamento |
| CNAGA | Companhia Nacional de Armazéns Gerais Alfandegados |
| CFBC | Canadian Farm Building Code |
| DIN | Deutsche Norm |
| EUROCODE | European Committee for Standardization |
| ISO | International Organization for Standardization |
| ISRM | International Society for Rock Mechanics |
| MLC | Madeira Laminada Colada |

SUMÁRIO

| | |
|---------------------------------------|----|
| LISTA DE FIGURAS | i |
| LISTA DE TABELAS E QUADROS | v |
| LISTA DE SÍMBOLOS | vi |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | ix |
| RESUMO | x |
| ABSTRACT | xi |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

| | |
|--|----|
| 1.1 O armazenamento no Brasil | 02 |
| 1.2 O armazenamento em silos horizontais | 03 |
| 1.3 Pesquisas sobre silos horizontais | 05 |
| 1.3.1 Medições de pressões em silos | 06 |
| 1.4 Considerações finais | 08 |

CAPÍTULO II

DEFINIÇÕES E PARTES CONSTITUINTES

| | |
|--|----|
| 2.1 Silos | 09 |
| 2.2 Silos Horizontais | 11 |
| 2.2.1 Silos horizontais não elevados | 12 |
| 2.2.1.1 Silos com estrutura de cobertura metálica | 12 |
| 2.2.1.2 Silos com estrutura de cobertura em MLC | 15 |
| 2.2.1.3 Silos com cobertura e paredes pré-moldadas | 17 |
| 2.2.1.4 Silos metálicos para caroço de algodão | 17 |
| 2.2.2 Silos Horizontais elevados | 19 |
| 2.2.2.1 Silos Buffalo | 19 |
| 2.2.2.2 Silos de paredes e cobertura monolíticas | 20 |
| 2.3 Silos circulares | 21 |

| | |
|---|----|
| 2.3.1 Silos com cobertura metálica cônica | 22 |
| 2.3.2 Silos com cobertura metálica em cúpula | 22 |
| 2.3.3 Silos com cobertura em cúpula à formação pneumática | 23 |
| 2.4 Termometria em silos horizontais | 24 |
| 2.5 Conclusões | 26 |
| 2.6 Instalações de uma unidade de grande capacidade | 26 |

CAPÍTULO III

PRESSÕES DE PRODUTOS ARMAZENADOS

| | |
|--|----|
| 3.1 Fundamentação teórica | 29 |
| 3.2 Parâmetros a serem observados nas predições das pressões | 34 |
| 3.2.1 Propriedades físicas dos produtos armazenados | 35 |
| 3.2.1.1 Peso específico | 37 |
| 3.2.1.2 Ângulo de repouso e ângulo de atrito interno | 38 |
| 3.2.1.3 Ângulo efetivo de atrito interno | 38 |
| 3.2.1.4 Ângulo e coeficiente de atrito com a parede | 40 |
| 3.2.2 Determinação experimental das pressões em silos | 42 |
| 3.2.2.1 Fatores que afetam as medições | 43 |
| 3.2.2.2 Sistemas de medições de pressão em silos | 43 |
| 3.2.3 Coeficiente K | 46 |
| 3.2.3.1 Determinação experimental do valor de K em modelos | 49 |
| 3.2.4 Considerações finais | 51 |
| 3.3 Teoria das pressões | 52 |
| 3.3.1 Introdução | 52 |
| 3.3.1.1 Fluxo | 52 |
| 3.3.2 Teoria de Janssen | 54 |
| 3.3.3 Pressões em células baixas | 58 |
| 3.3.4 Teoria das pressões para células baixas | 60 |
| 3.3.4.1 Teoria de Rankine | 62 |
| 3.3.4.2 Teoria de Coulomb | 66 |
| 3.3.4.3 Teoria de Airy | 67 |
| 3.3.4.4 Modelo empírico das pressões | 71 |
| 3.3.4.5 Teoria de M. & A. Reimbert | 73 |
| 3.3.5 Pressões nas paredes da tremonha | 77 |
| 3.3.5.1 Teoria de Walker | 77 |
| 3.4 Considerações finais | 81 |

CAPÍTULO IV

MATERIAIS E MÉTODOS

| | |
|---|-----|
| 4.1 Cálculo das pressões | 83 |
| 4.1.1 Pressões nas paredes dos silos | 83 |
| 4.1.2 Pressões na tremonha (fundo do silo) | 84 |
| 4.2 Levantamento das principais instalações | 84 |
| 4.3 Ensaio | 85 |
| 4.3.1 Determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados | 85 |
| 4.3.1.1 Produtos | 85 |
| 4.3.1.2 Máquina de ensaio de cisalhamento | 86 |
| 4.3.1.3 Método | 86 |
| 4.3.1.4 Material da parede | 87 |
| 4.3.2 Determinação direta das pressões | 87 |
| 4.3.2.1 Sistema de aquisição de dados | 87 |
| 4.3.2.2 Células de pressão – características gerais | 88 |
| 4.3.3 Calibração e testes das células de pressão | 95 |
| 4.3.4 Cálculo e ensaio do modelo piloto | 96 |
| 4.3.4.1 Instalação das células de pressão no modelo | 96 |
| 4.3.4.2 Ensaio | 98 |
| 4.3.5 Ensaio em silo horizontal elevado | 99 |
| 4.3.5.1 Informações básicas sobre ensaios em silos reais (<i>in loco</i>) | 99 |
| 4.3.5.2 Detalhes do silo | 100 |
| 4.3.5.3 Instrumentação | 100 |
| 4.3.5.4 Ensaio | 101 |
| 4.4 Considerações finais | 104 |

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

| | |
|---|-----|
| 5.1 Propriedades dos produtos armazenados | 105 |
| 5.2 Cálculo das pressões e do coeficiente K | 106 |
| 5.2.1 Determinação indireta do coeficiente K | 106 |
| 5.2.2 Pressões na parede do modelo piloto | 108 |
| 5.2.3 Pressões na parede do silo horizontal | 108 |
| 5.2.4 Pressões normais na tremonha do modelo piloto | 110 |

| | |
|---|-----|
| 5.2.5 Pressões normais na tremonha do silo horizontal | 110 |
| 5.2.5.1 Condição estática | 111 |
| 5.2.5.2 Condição dinâmica | 111 |
| 5.2.6 Análise dos resultados dos cálculos teóricos das pressões | 113 |
| 5.3 Determinação experimental das pressões e e de K | 113 |
| 5.3.1 Calibração das células de pressão | 114 |
| 5.3.2 Ensaio do modelo piloto | 115 |
| 5.3.2.1 Determinação experimental do coeficiente K no modelo piloto | 117 |
| 5.3.2.2 Discussões finais sobre os resultados dos ensaios do modelo | 117 |
| 5.3.3 Ensaio do silo horizontal | 120 |
| 5.3.3.1 Resultados das pressões na tremonha | 121 |
| 5.3.3.2 Resultados das pressões nas paredes | 124 |
| 5.3.3.3 Resultados das pressões na massa do produto | 128 |

CAPÍTULO VI

| | |
|-------------------|-----|
| CONCLUSÕES | 136 |
|-------------------|-----|

ANEXOS

| | |
|--|-----|
| ANEXO I - FICHAS CATALOGRÁFICAS | 141 |
| ANEXO II – RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO | 156 |
| ANEXO III – DIMENSIONAMENTO DO MODELO PILOTO | 157 |
| ANEXO IV – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS (silo horizontal elevado) | 182 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 191 |
|-----------------------------------|-----|

| | |
|------------------|-----|
| GLOSSÁRIO | 205 |
|------------------|-----|

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A necessidade de ampliar a capacidade estática 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.

Dentre os temas desenvolvidos, o estudo do comportamento das pressões 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, com ênfase às estruturas verticais. Pouco se conhece sobre as teorias empregadas no estudo dos silos horizontais e um número restrito de pesquisas retratam as dificuldades encontradas para a avaliação dessas estruturas.

Atualmente, encontramos vários trabalhos desenvolvidos por pesquisadores brasileiros na área de silos. Entretanto, desenvolveu-se um vasto domínio sobre os silos verticais em detrimento aos silos horizontais, tão largamente difundidos e executados a partir do final da década de 70. Tais fatos, induziram à elaboração de um trabalho de pesquisa cujo resultado fosse um texto que abordasse com mais profundidade o comportamento das pressões, as aplicações mais frequentes e os aspectos relacionados com os problemas dos silos horizontais, no universo das Engenharias Civil e Agrícola.

1.1 O ARMAZENAMENTO NO BRASIL

A expansão da rede de armazenamento ocorreu devido ao aumento das atividades destinadas à conservação dos produtos agrícolas e manutenção de estoques reguladores, por iniciativa do governo. Com o desenvolvimento industrial, as estruturas de armazenamento foram construídas para fins diversos, atendendo aos seus vários ramos. Na indústria de fiação armazena-se o algodão em pluma, carvão nas indústrias de carburetos ou de aço, calcário para a agricultura e indústria, clínquer de cimento e cimento em pó para as usinas, cavacos de madeira, pasta de celulose, nas indústrias de papel, etc.

Tratando-se especificamente de grãos, o Brasil tem apresentado problemas relacionados a capacidade estática e distribuição dos silos. Algumas regiões, chamadas de fronteiras agrícolas, apresentam capacidades abaixo das necessárias pois safras anteriores já ocupam as unidades, comprometendo o armazenamento das futuras safras. Outro fato observado é que muitas dessas unidades, principalmente na região sudeste, apresentam uma sub – ocupação e para compensar os gastos de manutenção, armazenam diversos produtos originários da agroindústria, como por exemplo, a polpa de laranja peletizada que é exportada para a Europa e Estados Unidos para a fabricação de ração animal. O processamento e o armazenamento deste produto tem trazido sérios problemas para a estrutura dos silos, devido a combustão decorrente da fermentação e o não conhecimento de suas propriedades físicas e químicas. Poucos fatos são relatados e divulgados para posterior documentação e catalogação dos acidentes e falhas. Um exemplo que pudemos constatar e vistoriar ocorreu na unidade da CEAGESP (S.J. da Barra-SP) com o incêndio provocado pela queima deste produto, derivado da indústria de suco. Houve comprometimento do concreto que reveste o fundo do silo e o túnel de descarga. A passarela localizada na parte superior e a correia transportadora também foram danificadas. Algumas unidades ainda armazenam açúcar cristal em silos horizontais, contrariando às técnicas de armazenamento devido aos problemas de fluxo deste produto.

A distribuição regional das unidades armazenadoras, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (1999) é bastante irregular. Verifica-se que há uma grande concentração de unidades na região Centro - Oeste e Sudeste. Nos

últimos anos, com a iniciativa de algumas empresas privadas este quadro tem se alterado, devido a descoberta de novas áreas de exploração agrícola como no Oeste da Bahia e algumas regiões do estado do Maranhão, bem como o desenvolvimento das hidrovias, através do transporte de grandes volumes de produtos.

A capacidade armazenadora estática no país em 1991 era de 125,5 milhões de toneladas, aí incluídos 78 milhões de toneladas de armazéns convencionais, útil apenas para produtos ensacados. Algumas iniciativas tem sido tomadas pelas cooperativas, mas o quadro evolutivo da capacidade armazenadora tem se mantido estável nos últimos anos. O armazenamento à granel chegava a apenas 47,5 milhões de toneladas, enquanto a produção de grãos atinge níveis de 82,5 milhões de toneladas para a safra 1998/1999 e as estimativas para 1999/2000 chegam a 83 milhões de toneladas, de acordo com a CONAB (2000). Com estas metas e a finalidade de suprir a demanda reprimida interna e o crescimento populacional são necessários investimentos em armazenamento de boa qualidade e de grandes capacidades.

1.2 O ARMAZENAMENTO EM SILOS HORIZONTAIS

A partir do final da década de 70, para atender a demanda de armazenamento foi necessário o aumento da capacidade estática, com a expansão e adequação da rede armazenadora com a finalidade de conservar adequadamente os produtos, sem o comprometimento de suas características físicas e químicas.

O armazenamento dos produtos em grandes quantidades passou a ser feito em silos horizontais* de capacidades estáticas variando entre 20.000 e 100.000 toneladas. Este sistema de armazenamento é considerado como um modelo desenvolvido apropriadamente para o país, devido as dimensões das unidades, suas características construtivas e a área necessária para a sua construção.

Estas estruturas de armazenamento caracterizadas pela dimensão horizontal muito maior em relação as demais, permitem o armazenamento de produtos à granel e

*Também chamados de armazéns graneleiros, ou simplesmente graneleiros.

apresentam uma grande vantagem que é a redução do preço por m³ armazenado tornando-se uma alternativa viável para o setor agrícola. Adotando-se um custo “X” de construção por tonelada estática armazenada, teremos para uma instalação de mesma capacidade, os valores comparativos dos custos, mostrados na tabela 01, de acordo com NEGRISOLI (1997).

TABELA 01 – Custo estimado de construção por tonelada estática.

| Unidade | Custo X / tonelada estática |
|--|------------------------------------|
| Silos horizontais não elevados | 1,0 |
| Silos verticais, metálicos | 1,5 |
| Silos verticais, elevados, de concreto | 10,0 |
| Silos horizontais, elevados, de concreto | 10,0 |

Fonte : (NEGRISOLI,1997).

Os primeiros silos horizontais construídos no Brasil, foram considerados projetos ousados sendo muito criticados devido aos problemas levantados pelos técnicos e pesquisadores da área de processamento de produtos agrícolas, quanto a aeração e controle de umidade intergranular. A proposta da construção dessas unidades, tinha como objetivo principal a redução dos custos da construção civil, quando comparadas com os silos verticais.

Além do baixo custo, exceto para os elevados, duas outras vantagens são apresentadas : a primeira refere-se à simplicidade do sistema estrutural e a segunda é que a estocagem é feita por montes, sobre lajes de concreto executadas diretamente sobre o terreno. Contudo a manutenção do armazenamento em condições satisfatórias requer uma estrutura que atenda as exigências de projetos de equipamentos e uma análise das patologias nas unidades já construídas. De acordo com NEGRISOLI (1997), para estas unidades construídas, é necessário que se faça manutenções periódicas permitindo as condições ótimas de conservação e o não comprometimento da estrutura. Os problemas mais comuns apresentados se devem, em grande parte, a infiltração nas paredes e na cobertura, problemas de escoamento do produto e ainda sistemas de aeração e termometria mal dimensionados.

A grande desvantagem dos modelos de fundo plano está no processamento da descarga dos produtos. Os modelos de fundo em “V” e duplo “V” , apresentam baixo

custo, pois permitem a descarga dos produtos por gravidade. Os silos horizontais elevados de concreto tem seu custo igual aos silos verticais, contudo apresentam grandes vantagens no manuseio do produto. De acordo com consultas aos técnicos da CEAGESP-SP, estes silos são extremamente importantes na expedição dos produtos granulares e pulverulentos permitindo a descarga por gravidade diretamente sobre vagões ou caminhões.

1.3 PESQUISAS SOBRE SILOS HORIZONTAIS

As soluções adotadas no Brasil, visando expandir a rede armazenadora, através de grandes unidades, têm sido caracterizadas por experiências anteriores de outros projetos e utilizando formulações teóricas sem o conhecimento de dados experimentais das ações nestas estruturas. A constatação desses valores incidiriam de forma direta nos custos de construção e manutenção das mesmas.

Com o advento de novas técnicas construtivas e novos materiais estruturais e suas aplicações na construção civil, tem-se buscado inovações no setor, com a otimização dos projetos. O processamento a granel dos produtos com a diminuição dos custos com sacarias, equipamentos e mão de obra e ainda a diminuição do custo por volume armazenado, são fatores que tem conduzido ao emprego de grandes unidades armazenadoras horizontais. Outra razão para a construção de novas unidades se verifica a partir da exploração do transporte hidroviário que tem crescido nos últimos anos no país, exigindo unidades adaptadas para grandes volumes processados.

Em estudos realizados por SHORTER (1985), comparando-se os custos de construção de duas unidades, uma vertical de 2750t em concreto armado e uma horizontal de fundo plano com capacidade de 9200t, utilizando placas pré-moldadas de concreto nas paredes e estrutura de cobertura em madeira laminada colada, obteve-se uma redução geral dos custos em 50% quando analisadas a execução das fundações, superestrutura e equipamentos.

ANDRADE (1979), mostrou que para silos de caroço de algodão, o custo por tonelada armazenada diminui com o aumento da capacidade das unidades, utilizando para a execução da cobertura, a estrutura metálica e telhas de chapa de aço galvanizado.

Muitos problemas surgidos nas unidades horizontais construídas, como, aeração deficiente, infiltração e escoamento do produto, estão sendo sanados, o que as tem tornado viável para o armazenamento em grande escala. Técnicos de operação confirmam que as unidades armazenadoras horizontais de grande capacidade que possibilitam a descarga por gravidade são mais versáteis e exigem menor número de empregados envolvidos no processamento. Equipamentos de transportes estão sendo adaptados nos modelos de silos de fundo plano, para otimizar o escoamento do produto.

Em síntese, pode-se constatar que o emprego de unidades horizontais de armazenamento é economicamente viável para grandes capacidades. Sanados os problemas mais freqüentes, certamente teremos a otimização do processamento em grande escala. Torna-se então necessário, o conhecimento das pressões através de medições e a definição de um modelo empírico, o que permitirá um maior domínio sobre o comportamento estrutural, repercutindo em segurança e economia na execução de futuros projetos.

1.3.1 Medições de pressões em silos

A medição das pressões de forma direta tem sido objeto de pesquisa de vários autores durante as últimas décadas. Muitos experimentos foram conduzidos na expectativa de avaliar os valores das pressões através de métodos indiretos e a utilização de modelos reduzidos, onde os dados observados pudessem ser extrapolados para os silos em escala real. Nos ensaios conduzidos, os métodos indiretos correspondem à instrumentação no material da parede do silo. Os resultados obtidos agregam algumas incertezas provenientes da variabilidade dos fatores envolvidos e limitações na condução dos ensaios, como módulo de elasticidade do produto armazenado, material da parede e rigidez parcial e global dos elementos estruturais.

A instrumentação dos silos através de células de pressão tem possibilitado o estudo do comportamento das pressões devidas aos produtos armazenados nas condições estáticas e dinâmicas. Estes sensores encontraram grande aplicação no

estudo do comportamento dos meios granulares e pulverulentos, tais como solos e produtos destinados ao armazenamento agrícola e industrial.

A adequação de teorias para o cálculo das estruturas de armazenamento, a avaliação da segurança estrutural, bem como o estudo de protótipos de novos tipos de silos tem sido os principais objetos de estudo de pesquisadores e projetistas no Brasil e no mundo. Muitos resultados importantes estão sendo obtidos através de ensaios, entretanto, grandes dispersões ainda são verificadas devido às técnicas experimentais utilizadas e a variabilidade das pressões e das propriedades dos produtos armazenados, definindo assim as condições de contorno envolvidas no estudo.

De acordo com CALIL (1990), a dispersão dos resultados obtidos em ensaios para a determinação das pressões pode ser esclarecida por quatro fatores :

- 1- **A utilização de modelos para os ensaios e extrapolação de dados para os silos em escala real.** NIELSEN (1998) propõe que as condições de ensaios em modelos sejam obedecidas de acordo as leis de modelos e os erros de escala. No caso específico das pressões o autor considera uma relação linear com as características geométricas do produto e seu peso específico.
- 2- **A deficiência dos equipamentos de medição das pressões.** ASKEEGARD et al (1971), informam que muitas das células de pressão utilizadas não são suficientemente rígidas, resultando em baixas medidas de pressão. (DUNNICLIFF & GREEN, 1993), informam que além das dificuldades encontradas para a instalação de equipamentos, deve-se ressaltar, os problemas quanto a aferição e escolha das células, utilizadas para efetuar tais medidas.
- 3- **A variabilidade das características do produto.** O conhecimento da variabilidade das propriedades como densidade, ângulo de atrito interno e ângulo de atrito com a parede, são parâmetros suficientes para análise do comportamento das pressões, mas, requer um número elevado de ensaios para a sua correta determinação.
- 4- **A influência do tipo de fluxo de descarga e as imperfeições das paredes dos silos.** A vazão do produto, o tipo de fluxo, e o tipo de parede devem ser analisados previamente para se estimar corretamente as pressões que ocorrem de forma localizada.

Além das variações obtidas nas estimativas das pressões, vários problemas são encontrados quanto a instalação da instrumentação. Diversos trabalhos citam as dificuldades encontradas para a instalação de células comprometendo a integridade do silo. Na maioria dos trabalhos publicados sobre ensaios em silos poucas informações são encontradas sobre a sua condução. Apenas informam sobre a forma, as principais dimensões e o tipo de material estrutural usado. Estas não são sempre suficientes para um estudo comparativo com outros resultados obtidos. Em outros casos são necessárias informações básicas que eliminariam certas dúvidas levantadas no estudo das pressões em silos.

1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pudemos constatar que as unidades horizontais precisam ser mais estudadas juntamente com o comportamento dos produtos. No campo teórico pouco se avançou no estudo das leis constitutivas, o que permitiria um avanço da utilização dos modelos teóricos. No campo experimental é necessária a realização de um maior número de ensaios. A proposta é utilizar modelos pilotos como instrumentação desenvolvida, considerando as variáveis envolvidas no estudo do comportamento das pressões. Com a aplicação dos métodos numéricos através dos elementos finitos, várias aproximações tem sido obtidas para os silos verticais e o comportamento dos produtos armazenados.

Sendo um trabalho pioneiro para as unidades horizontais, os objetivos foram assim estabelecidos: *1- Comparação dos resultados teóricos com os experimentais, obtidos em modelo piloto e em um silo horizontal através de medições diretas das pressões. 2- Proposição de uma formulação empírica para a relação entre as pressões laterais e verticais, através do coeficiente K. 3- Definição de um coeficiente de sobrepressão de descarga para estas unidades.*

Em síntese, o estudo teórico e experimental das pressões objetiva balizar os métodos numéricos que venham a ser desenvolvidos, tornando as análises mais refinadas nos estudos futuros.

CAPÍTULO II

DEFINIÇÕES E PARTES CONSTITUINTES

2.1 SILOS

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.

A definição de silo, sempre esteve associada a depósito agrícola, destinado ao armazenamento e conservação de cereais e de forragens. Com o desenvolvimento industrial foram construídos silos para os diversos fins, como para as indústrias de fiação, de carburetos e de aço, agrícola, cimenteira e para as usinas, entre outros.

Do ponto de vista do armazenamento os silos podem ser classificados como coletores, construídos nos locais de produção; reguladores, na recepção e distribuição de safras; terminais, para a conservação de estoques anuais; e estratégicos, para a conservação de estoques reguladores.

Os silos podem ser classificados de acordo com os materiais estruturais utilizados como; metálicos, em concreto armado ou protendido, alvenaria armada, argamassa armada, madeira e fibra de vidro, podendo ser enquadrados de acordo com a vedação em silos herméticos, semi herméticos e abertos. Quanto à sua instalação podem ser considerados elevados, superficiais, enterrados e semi enterrados. De acordo com as dimensões os silos podem ser classificados como

baixos ou altos, em função da relação altura/lado ou diâmetro (h/d) e ainda verticais ou horizontais, segundo a direção à qual a estrutura se desenvolve. As Normas internacionais classificam os silos de acordo com a esbeltez da estrutura podendo ser classificados conforme a tabela 2, a seguir.

As estruturas do tipo vertical são instaladas nas regiões urbanas, em áreas industriais, ou mesmo nos portos marítimos e fluviais, devido às facilidades de embarque e desembarque, com tendência a concentrar as construções em áreas menores, devido ao maior custo dos terrenos e a proximidade das indústrias de processamento. Detalhes dessas instalações podem ser vistos nas figuras 1(a) e 1(b), indicando alguns modelos utilizando diversos tipos de materiais construtivos.

As unidades horizontais, ao contrário das verticais, são instaladas, na sua maioria, em regiões onde os terrenos são menos valorizados, e até mesmo nos portos devido ao grande volume de produto processado.



FIGURA 01(a) - Vista dos silos verticais de concreto armado. NEGRISOLI (1997).

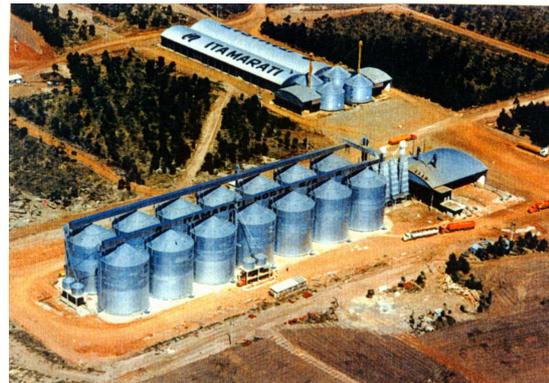


FIGURA 01(b) - Vista de uma bateria de silos metálicos. NEGRISOLI (1997).

Neste trabalho trataremos especificamente das unidades horizontais dando enfoque as ações nestas estruturas destacando àquelas causadas pelos produtos armazenados. O objetivo é caracterizar as unidades em virtude de suas peculiaridades construtivas, típicas de nosso país, e ainda pouco estudadas pelos pesquisadores.

TABELA 02 –Classificação geométrica dos silos segundo as normas internacionais.

| Norma | Classificação | | |
|--|---|-------------------------------|--|
| | Baixo | Medianamente esbelto | Esbelto |
| Australiana AS3774/96 | $h/d_c < 1,0$. | $1,0 \leq h/d_c \leq 3,0$ | $h/d_c > 3,0$ |
| Europeias ENV 1991-4/95 ISO 11697/95 | $h / d_c < 1,5$ | --- | $h / d_c \geq 1,5$ |
| Americana ACI-313/91 | $h/d_c \leq 2,0$ | --- | $h/d_c > 2,0$ |
| Alemã DIN 1055/87 | $h/d_c < 2,5\mu$ | $2,5\mu \leq h/d_c \leq 5\mu$ | $h/d_c > 5\mu$ |
| Canadense CFBC/83 | $h/d_c \leq 1,0$ ou $h/d_c < \text{tg}^2(\phi_i/2 + \pi/4)$ | --- | $h/d_c > 1,0$ e $h/d_c \geq \text{tg}^2(\phi_i/2 + \pi/4)$ |

2.2 SILOS HORIZONTAIS

Devido a não existência de códigos normativos brasileiros, muitas denominações são dadas para este tipo de estrutura, existindo ainda algumas controvérsias sobre a terminologia a ser adotada. Em algumas regiões estas unidades são chamadas de armazéns graneleiros ou simplesmente graneleiros. A denominação armazém surgiu com a utilização das unidades destinadas para o armazenamento de café em sacarias. Algumas destas unidades foram adaptadas para estocar produtos a granel. WEBER (1995), classifica estas unidades como armazéns granelizados.

Com as inovações construtivas adaptadas aos projetos originais e a otimização das condições de armazenamento e processamento, estas unidades passaram a ter fundo inclinado no formato V, duplo V e triplo V e ainda semi-plano. Com a instalação de cabos de termometria para controle da aeração e umidade da massa de grãos estas estruturas passaram a ter “status” de silos. NEGRISOLI (1997), emprega a terminologia “silos horizontais” apenas para as unidades elevadas, enquanto que as demais são denominadas armazéns graneleiros ou simplesmente graneleiros.

Neste trabalho são descritas as unidades de acordo com a terminologia proposta pela ABNT (1990), TB – 377. De acordo com esta terminologia o silo horizontal é uma **“estrutura que se desenvolve segundo o eixo horizontal”**.

As características construtivas aqui descritas estão de acordo com os projetos desenvolvidos pelo Engenheiro Ari Negrisoli (Engesilos – Consultoria e Projetos SC) e observações feitas pelo autor durante as visitas realizadas.

2.2.1 Silos horizontais não elevados

2.2.1.1 Silos com estrutura de cobertura metálica

Estas estruturas de armazenamento apresentam seção transversal de acordo com o formato do piso (*plano, semi - plano ou semi - V, V e duplo V*), e ainda quanto à sua instalação em relação ao nível do terreno (térreos, enterrados, semi - enterrados), limitando-se a sua escolha a capacidade pretendida, topografia do terreno, limitações da área, tipo de terreno, nível do lençol freático e finalmente o tipo de produto a ser armazenado. Detalhes das instalações com o fundo plano, fundo “V” e duplo “V”, podem ser vistos nas figuras 2 e 3.

Paredes

As paredes laterais e frontais são geralmente construídas com pilares e placas pré moldadas, formando uma estrutura articulada, ao longo de todo o perímetro, permitindo acomodações resultantes de possíveis recalques. Esta solução permite abrir mais frentes de trabalho, sobrepondo as atividades na obra, reduzindo os prazos e os custos das construções. A proteção contra a entrada de água de chuva é garantida por 3 elementos (beiral do telhado, cordão de mastique ao longo dos três lados da placa e encaixes da placa com a viga baldrame.

Fundo

A execução do piso do silo depende da seção transversal e do tipo de terreno. Para os silos com fundo tipo “V”, o piso pode ser de concreto simples, sem nenhuma armadura. Para as unidades de fundo semi - “V”, deve-se construir o piso de dois tipos : nas partes inclinadas, o piso deve ser igual ao dos silos de fundo “V”, nas partes planas, deverá ser projetado para suportar o tráfego de veículos do tipo de pás carregadoras, pequenos tratores e até mesmo caminhões. Para os silos de fundo plano a armação do piso é sempre necessária.

Sempre que possível adota-se o fundo “V” ou duplo “V”, para que a descarga seja feita por gravidade, reduzindo-se custos operacionais e conservando-se a integridade dos grãos. Os ângulos de inclinação do piso são

adotados para que o escoamento dos produtos ocorra só pela ação da gravidade sendo que o plano dos pisos laterais deva ter um ângulo mínimo de 35° com o plano horizontal. Nos oitões o ângulo deve ser maior ou igual a 45° , para que a aresta resultante da interseção deste piso com a lateral, permita ainda o escoamento do produto por gravidade.

Fundação

Os silos horizontais não elevados constituem o tipo de estrutura, que melhor permite aplicar as cargas diretamente sobre o terreno. Quanto maior, mais baixo o custo por tonelada armazenada. Mesmo para terrenos de baixa resistência, tem sido possível projetá-los com fundações diretas. Neste caso, ocorrerão recalques com variações, aproximadamente lineares. As estruturas deverão ser divididas em trechos, separados por juntas do tipo de dilatação. Se os recalques são pequenos, as juntas poderão ser mais distanciadas, caso contrário deverão ficar mais próximas, (NEGRISOLI,1995).

A galeria subterrânea é projetada estaticamente, para resistir as cargas da coluna do cereal, do peso próprio e das pressões do terreno, sendo sua fundação, executadas por estacas, em certas situações.

Cobertura

A cobertura, a galeria superior e as estruturas da cobertura e de fechamento dos oitões são metálicas, projetadas para as ações devidas ao peso próprio, ventos transversal e longitudinal, carga da galeria superior, cargas de equipamentos e possíveis recalques das fundações. Geralmente a estrutura de cobertura é em arco treliçado bi-articulado. Existem exemplos com grandes vãos em concreto, tais como o terminal de açúcar de Recife e o terminal de Sumaré e ainda estruturas em madeira laminada colada, bastante difundidas na Europa. As telhas, geralmente, são de alumínio ou de aço galvanizado, (figuras 4a e 4b).

Nas regiões produtoras de cereais, os terrenos são de menor custo, resultando uma preferência na utilização das unidades horizontais e de silos metálicos de altura máxima igual ao diâmetro. Em terrenos onde não é possível a escavação tipo "V", opta-se pelo fundo duplo ou triplo "V", aumentando o número de transportadores, mas em contrapartida aumentam a vazão de descarga do produto.

Neste tipo de construção a estrutura metálica participa com 25 a 30% do custo total, em relação ao custo da escavação, concretagem do piso, paredes periféricas e impermeabilizações sendo a opção mais utilizada dentre os materiais de construção.

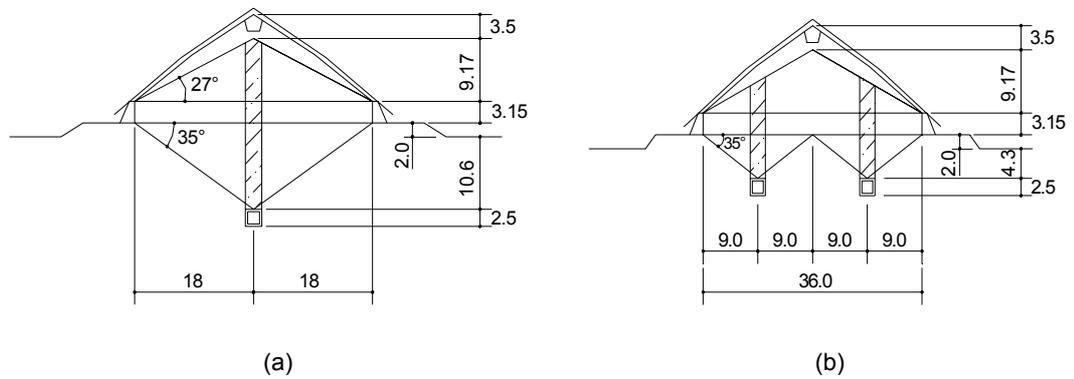


FIGURA 02 – Cortes dos silos horizontais não elevados. (a) fundo “V”, (b) duplo “V”.

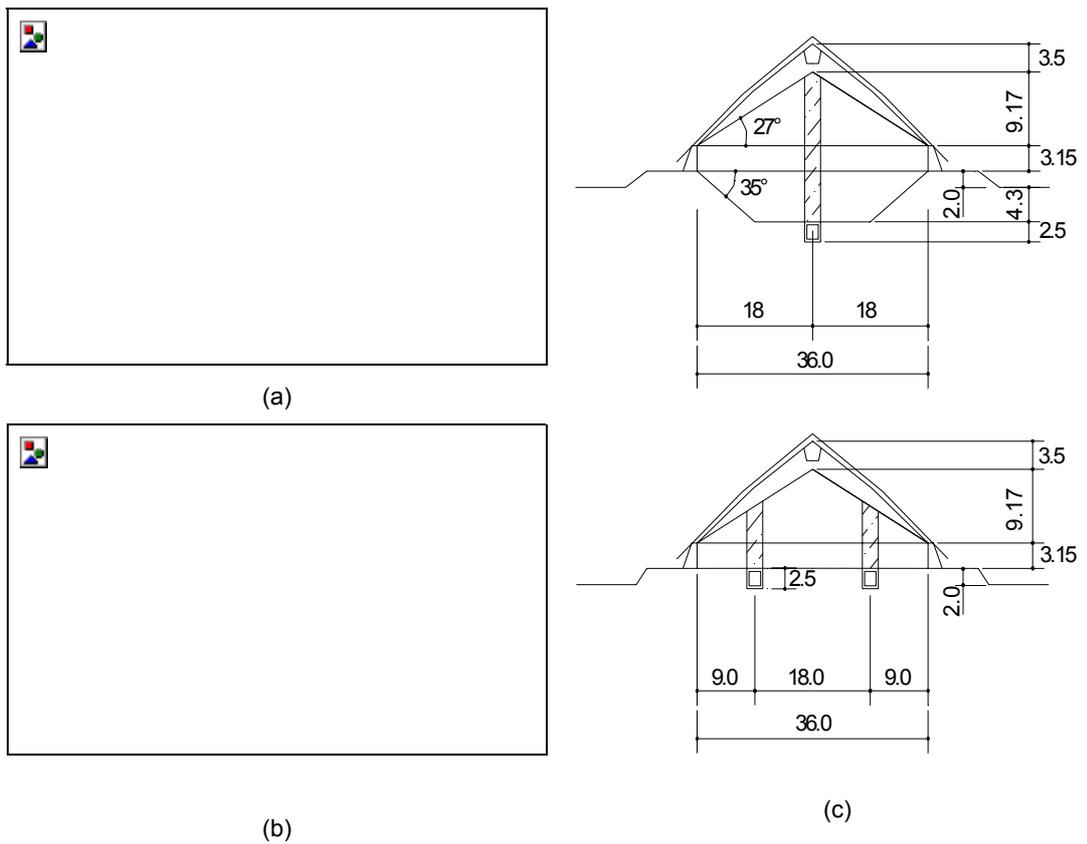


FIGURA 03 – Silos com fundo plano e semi-plano– (a) vista frontal, (b). vista geral, (c) cortes – semi-plano e plano.

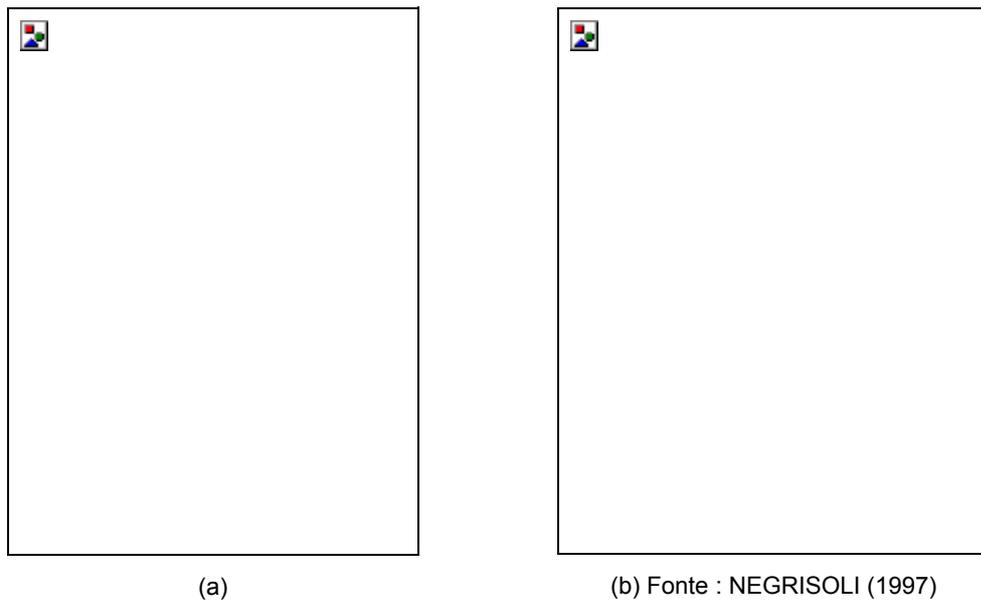


FIGURA 04 – Silo com fundo em formato “V” – (a) vista geral da cobertura e (b) vista interna da cobertura em estrutura metálica.

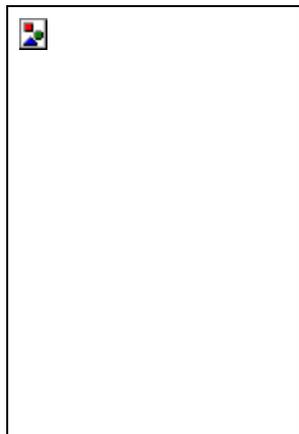
2.2.1.2 Silos com estrutura de cobertura em MLC

De acordo com SHORTER (1985), alguns modelos de silos horizontais foram desenvolvidos e executados na Europa, mais precisamente na França, utilizando a estrutura da cobertura em **madeira laminada colada** e telhas de cimento amianto. A unidade apresenta dimensões de 36m de largura e 55m de comprimento. As paredes são em placas de concreto com 3,70m de altura, para armazenamento de polpa seca. A cobertura apresenta uma inclinação de 45°, acompanhando o talude natural do produto armazenado. A escolha deste tipo de estrutura permitiu uma economia na execução da fundação superficial em um solo de baixa resistência. A figura 5 ilustra uma unidade, onde os pórticos são executados em madeira laminada colada, sendo utilizada para o armazenamento de fertilizantes.

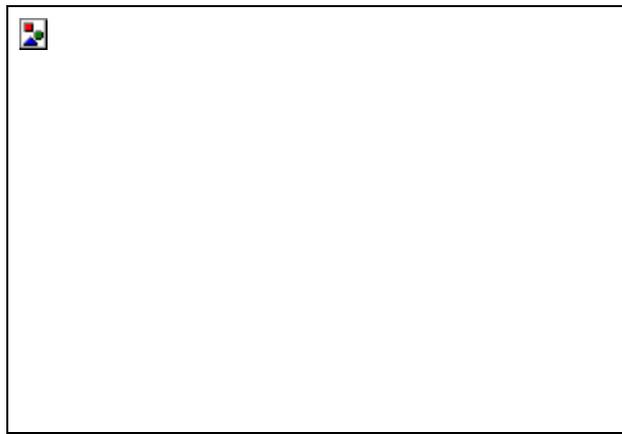


FIGURA 05 – Silo com cobertura em estrutura de madeira (MLC).

Uma das vantagens da utilização das estruturas de madeira se verifica no armazenamento de produtos corrosivos como por exemplo sulfatos, cloretos e fosfatos (fertilizantes em geral). Um exemplo deste tipo de construção pode ser observada nas instalações da empresa ULTRAFERTIL, em Cubatão (SP). A capacidade é de 50.000t. A estrutura de cobertura é em pórtico treliçado de madeira (estruturas Hauff) e a cobertura em cimento amianto. A fundação e os contrafortes são estruturados em concreto. A figura 6, ilustra este tipo de construção.



(a) vista interna



(b) vista geral

FIGURA 06 – Silos horizontais para armazenamento de fertilizantes. NEGRISOLI (1997)

2.2.1.3 Silos com cobertura e paredes pré – moldadas

Algumas estruturas de armazenamento foram executadas em placas pré moldadas em concreto armado (cobertura e paredes), apresentando problemas de infiltração na região de encaixes das peças. Uma solução adotada foi a impermeabilização com cordões de mastic. Algumas unidades como a construída em Sumaré (SP), estão sendo usadas para o armazenamento de trigo e milho e de acordo com os técnicos da Companhia, a operação destes silos é bastante facilitada. A forma do fundo (duplo “V”) permite o escoamento e a expedição do produto rapidamente. As figuras 7a e 7b ilustram este tipo de unidade.



FIGURA 07 – Vistas frontal (a) e lateral (b) dos silos com cobertura e paredes pré moldadas.

2.2.1.4 Silos metálicos para caroço de algodão

Este tipo de silo , lançado originalmente nos Estados Unidos pela firma MUSKOGEE IRON WORKS, foi largamente exportado para o Brasil nas décadas de 1930 e 1950. Todos eles, estão ainda em plena atividade, em diversas fábricas de óleo. Muitos já foram desmontados e transferidos para outras regiões, onde foram remontados, o que passa a ser uma grande vantagem de sua aplicação devido a grande mobilidade e funcionalidade. A característica desse silo, especialmente projetado para o armazenamento de caroço de algodão, é sua forma piramidal alongada, com telhado de 4 águas e inclinação de 45° , acompanhando o talude natural do caroço.

Nesse tipo de silo, outros materiais não apresentam competitividade com as estruturas metálicas, pois apresentam dimensões de 30 a 45 metros de vão e

alturas de 18 a 27 metros. Uma observação importante constatada é que o preço por tonelada armazenada cai com o aumento dos vãos, com isso a aplicação das estruturas metálicas se torna viável do ponto de vista econômico em detrimento a outros materiais de construção.

Toda estrutura é metálica, geralmente constituída de pórticos treliçados e bi-articulados nas bases, não transmitindo momentos nas fundações, o que sem dúvida é condição de economia. Dentro do silo, existe um túnel metálico, formado por cavaletes em forma de letra “A”, revestido de chapas metálicas abrigando correias transportadoras de descarga que atravessam todo o comprimento do silo. Na parte superior existe um lanternim que abriga a correia transportadora de carregamento.

O carregamento se faz por meio de correias transportadoras, ao longo de um espigão ou por meio de elevadores instalados em torres metálicas e ligadas ao lanternim por meio de galeria em estrutura metálica.

As paredes periféricas com cerca de 4 metros de altura, são constituídas de chapas metálicas corrugadas, apoiadas em longarinas. As figuras 8a, b e c, ilustram o corte transversal e a visão geral deste tipo de estrutura.

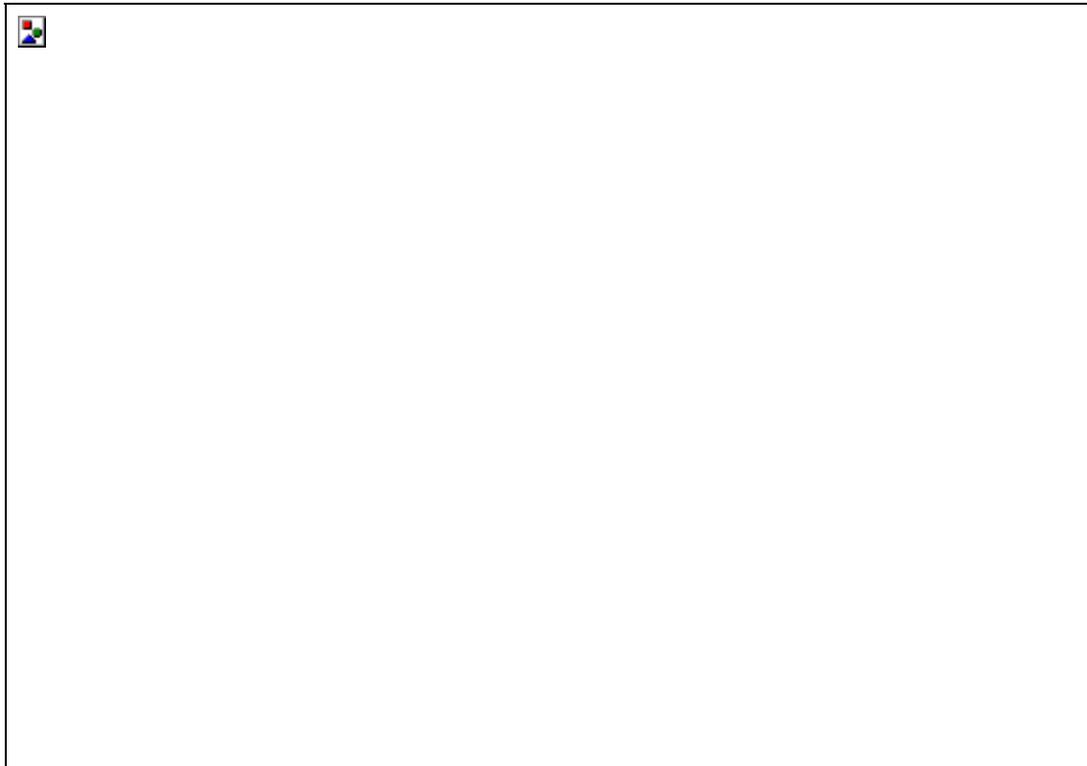
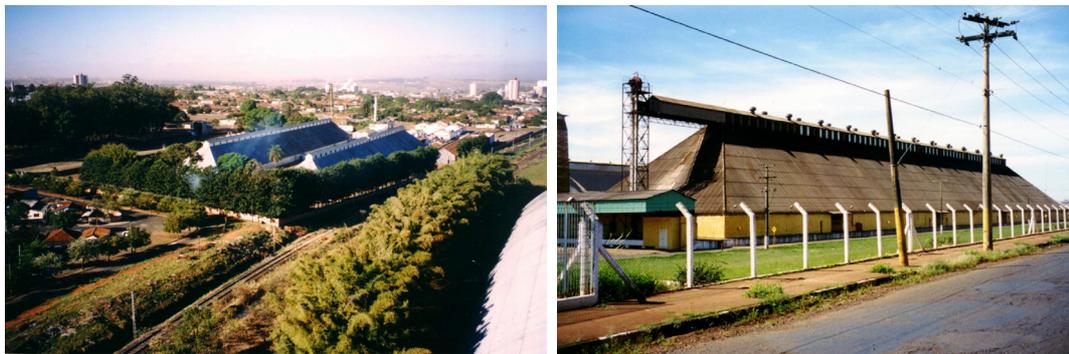


FIGURA 08(a) - Esquema geral de um silo para algodão



(b)

(c)

FIGURAS 08 -(b) – Silos para armazenamento de sementes de algodão. (c) silos para grãos.

2.2.2 Silos horizontais elevados

2.2.2.1 Silos Buffalo

As primeiras unidades foram construídas, no Brasil, com tecnologia importada do Canadá, através da extinta CIBRAZEM, hoje CONAB, chamados silos Buffalo. Existem cinco unidades, sendo que duas foram construídas nas cidades de Uberaba e Uberlândia com capacidades de 25.000 e 100.000 toneladas, respectivamente. As unidades são multicelulares e o sistema construtivo e estrutural é em concreto aparente pré – moldado. A unidade aqui descrita refere-se a unidade da cidade de Uberaba, composta por sete células de armazenamento de 3950 m³ e três mil toneladas cada e 7 células de serviço ou auxiliares, utilizadas para transilagem, expedição expurgo) com capacidade de 1000 toneladas cada.

Fundação

Executada com estacas pré-moldadas com diâmetro de 60 cm, sendo que em alguns casos estas estacas alcançaram a profundidade de 17 metros.

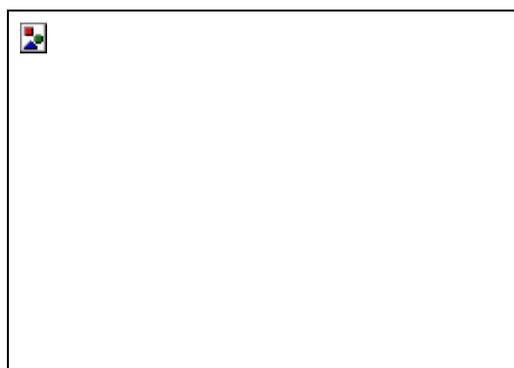
Estrutura principal

É constituída por sete células de armazenamento. As colunas em concreto aparente, foram fundidas ao longo das células. As vigas são em concreto aparente pré moldado com ferragem de espera nas pontas de emenda com pilares e paredes.

O local onde se encontram os transportadores de arraste (redlers), as correias transportadoras e os elevadores de canecas está situado abaixo do nível do solo em uma região de terreno saturado o que provoca infiltrações, havendo a necessidade de bombeamento de água.

As células de armazenamento são retangulares com fundo duplo V, elevadas, que permitem a descarga por gravidade. Nas células de serviço, a laje de cobertura e de piso tem inclinação de 58° e são compostas por placas retangulares pré moldadas montadas sobre as vigas. No interior das células estão instaladas placas pré moldadas defletoras, sobre vigas intermediárias que diminuem a altura de queda do produto e conseqüentemente os danos mecânicos dos grãos.

As paredes são formadas por placas em concreto pré moldado cujas dimensões base – altura são 3,20 e 1,30m e espessura de 70mm.



(a) – Vista geral

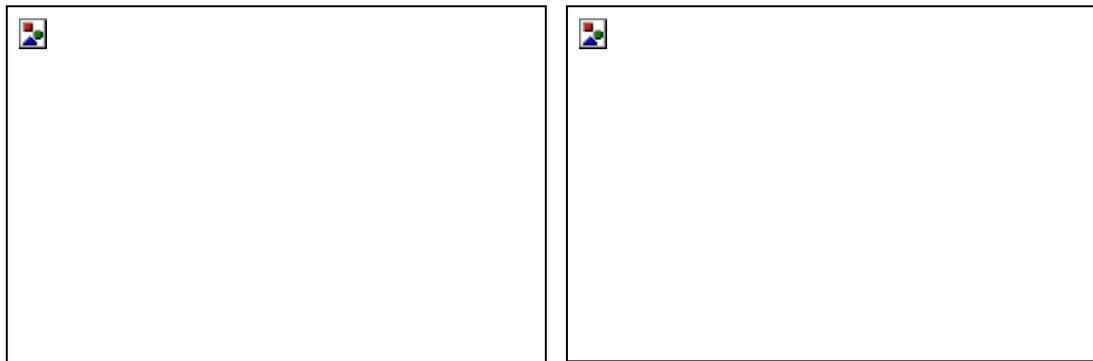


(b) – Sistema de carregamento e secador.

FIGURA 09 – Silo Buffalo -CONAB – Uberaba.

2.2.2.2 Silos de paredes e cobertura monolíticas

A CEAGESP construiu duas unidades deste tipo com estruturas monolíticas em toda a sua execução (S.J. da Barra e Araraquara). Em outras duas unidades a estrutura de cobertura é composta por placas pré moldadas e formas trepantes nas paredes. O problema de infiltração de algumas unidades só foi resolvido com execução de cobertura com telhas de aço galvanizado sobre a laje. Duas grandes vantagens destas instalações podem ser citadas : a primeira é que são herméticas; a segunda, por serem elevadas e de grande comprimento (100m), funcionam como silos de expedição rodoviária, numa lateral e ferroviária na outra, figura 10(a, b).



(a) – Vista frontal do silo horizontal elevado

(b) – Vista lateral – Sistema de descarga lateral

FIGURA 10 – Silo Horizontal elevado.(Araraquara) – SP

De acordo com BAIKOV (1978), estas estruturas são chamadas de “Bunker”. No dimensionamento, a altura das paredes deve ser menor que 1,5 da menor dimensão do silo. Para efeitos de cálculo o autor desconsidera o atrito do produto com as paredes e recomenda que o ângulo de inclinação das paredes da tremonha deva ser 5 a 10% maior que o ângulo de repouso do produto armazenado. Ainda recomenda que a menor dimensão da boca de saída deva ser 6 vezes maior que a dimensão do produto. Para o autor, o cálculo da estrutura deve se basear no estado limite último, ou seja, considerando os tipos de ruptura possíveis de ocorrer.

2.3 SILOS CIRCULARES

Trataremos aqui destas unidades pois apresentam características construtivas semelhantes aos silos horizontais. São classificadas entre as verticais e as horizontais. O cálculo das ações devidas ao produto armazenado seguem as mesmas formulações teóricas dos silos horizontais e apresentam custo por tonelada armazenada inferior aos silos verticais. Tais estruturas são mostradas com o objetivo de ilustrar as inovações na área de armazenamento de grandes capacidades, não sendo, desta forma, objeto de estudo neste trabalho.

2.3.1 Silos com cobertura metálica cônica

Estas unidades apresentam cobertura metálica e as paredes de contenção executadas com chapas e perfis metálicos, conforme é ilustrado na figura 10a e 10b abaixo. Apresentam diâmetro de 45 a 60m e alturas de 18 a 20 metros. A descarga é feita por elevadores de canecas e o acesso de veículos em seu interior. As capacidades variam de 7.000 a 22.500t. Para alguns projetos pode ser uma opção competitiva quando comparados aos silos tradicionais, figuras 11 (a, b)

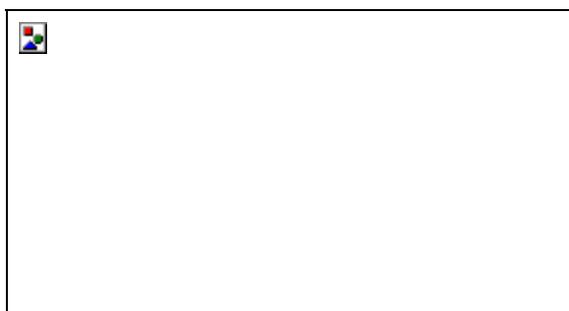


FIGURA 11(a)– Silos circulares

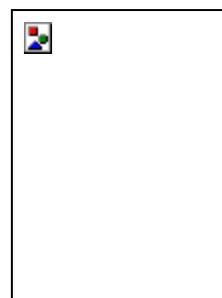


FIGURA 11(b) – Vista interna

FONTE : KEPLER WEBER – CATÁLOGOS.

2.3.2 Silos com cobertura metálica em cúpula

Estas unidades apresentam características peculiares pelo seu formato circular e cobertura em cúpula metálica e paredes em concreto armado. Algumas soluções padrão são mostradas a seguir com alguns modelos mais empregados. Estas unidades são caracterizadas pelo formato da cúpula de cobertura.

As figuras 12 a, b, c e d, ilustram algumas fases da construção dos silos circulares mistos com paredes em concreto armado e cobertura em cúpulas metálicas.



(a)



(b)

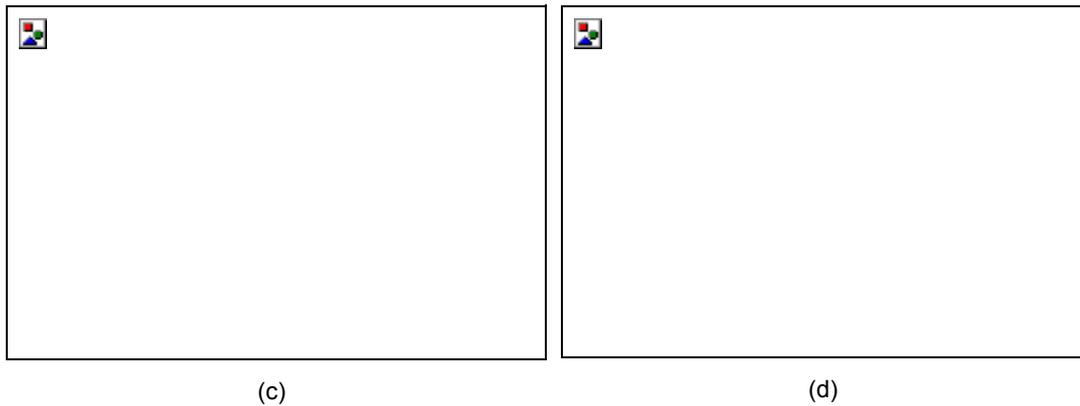


FIGURA 12 – (a) Esquema estrutural do silo circular. (b) – Execução simultânea das paredes e cobertura, (c) - Silo circular em fase final de construção. (d) – Silo acabado .FONTE : Bulk Solids Handling. Vol.17. n.2 e 4.

2.3.3 Silo com cobertura em cúpula à formação pneumática.

Este sistema estrutural, bastante difundido nas décadas de 70 e 80 e estão sendo novamente executados nos Estados Unidos a partir dos últimos 5 anos. No Brasil alguns projetos foram desenvolvidos pela empresa BINISHELLS do Brasil Ltda, conforme especificações mostradas a seguir. Sua vantagem é a rapidez de construção e o seu custo, principalmente devido à simplicidade da fundação. Como desvantagem podemos citar o alto custo dos equipamentos para carregamento e descarga.

Estas unidades de armazenamento estão entre os silos verticais e os horizontais podendo apresentar dimensões e formas variadas. Sua construção é rápida exigindo a execução de uma viga armada para a sua fundação e um túnel para descarga do produto armazenado.

No anel de fundação é fixada a cúpula de borracha de poliuretano que será inflada. A insuflação de ar ocorre num intervalo de tempo de 2 a 4 horas, até atingir o formato final. Em seguida uma fina camada de concreto é jateada nas paredes, dando a configuração final da unidade.

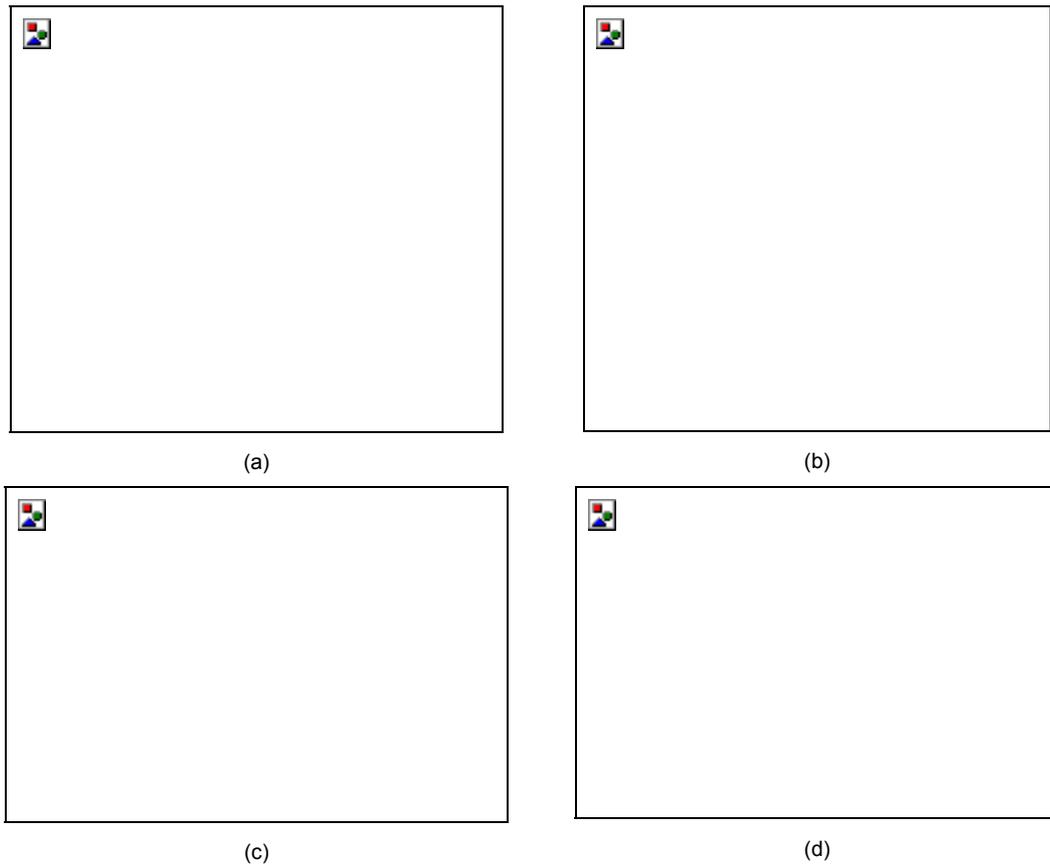


FIGURA 13 – (a) – Execução da fundação. (b)- cúpula de manta de poliuretano sendo insuflada. (c) – vista interna do silo e equipamento para descarga. (d)- vista geral do silo em cúpula acabado. FONTE : Bulk Solids Handling. Vol.17. n.2 / 4.-1999.

2.4 TERMOMETRIA EM SILOS HORIZONTAIS

A temperatura é um indicativo das condições de armazenamento e umidade da massa dos produtos. Dessa forma é comum a execução de transilagens ou aeração para que se mantenha as condições ótimas do produto dentro do silo. Para que isto ocorra é feito um controle através de cabos de termometria, com vários sensores, que permitem monitorar a temperatura e a umidade dentro do silo.

Com o desenvolvimento dos projetos dos silos horizontais, houve a necessidade de controle do armazenamento nestas unidades de grande capacidade. A solução para os problemas do armazenamento foi a adaptação de cabos de termometria e projetos de aeração que permitissem a insuflação de grandes volumes de ar e permitir que a temperatura se mantivesse em níveis aceitáveis.



Figura 14(a) – Instalação de cabos de Termometria em silos horizontais de fundo plano.

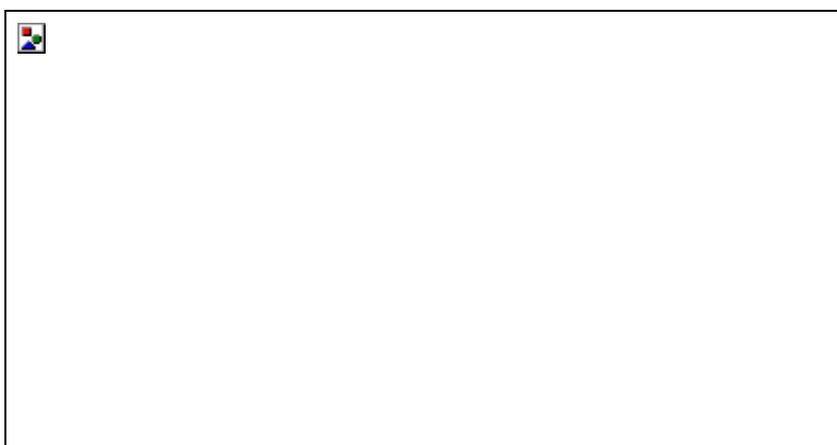


FIGURA 14(b) – Instalação de cabos de termometria em silos horizontais de fundo semi-plano.

No estudo das ações em silos horizontais um dado importante é a avaliação das forças de tração nos cabos de termometria. Estes são fixados na estrutura de cobertura, o que exige que os esforços sejam considerados no projeto. De acordo com NEGRISOLI (1997), o atrito do cereal com os cabos, dá origem a forças de tração, que são transmitidas às estruturas metálicas da cobertura e representam esforços, até mesmo superiores ao do peso próprio da cobertura. ZEM* (2000), realizou testes na unidade da CONAB – Ponta Grossa (PR), constatando um esforço de tração de 25000N nos cabos centrais de 25m de comprimento, o que nos remete a concluir que os esforços chegam a 1000N para cada 1m de cabo.

Os cabos de termometria são fixados nos arcos metálicos, ou em vigas da cobertura e são compostos por cabos termopares. Os sensores são instalados ao

* ZEM, J.A. (2000) - Ensaios CONAB – Ponta Grossa (PR). Comunicação pessoal.

longo dos cabos, em distâncias pré fixadas, para possibilitar leituras de temperaturas em toda a massa do produto armazenado. O controle é feito a partir de painéis que permitem a leitura e registram os dados coletados em fitas de arquivo.

Nos silos horizontais os cabos de termometria não devem ser fixados nos pisos dos silos, pois em caso de possíveis recalques, pode ocorrer transferência de esforços adicionais, capazes de danificar a cobertura. DANIEL¹ (2000), informou que nas unidades da cooperativa COPACENTRO em Dourados (MS), ocorreram recalques de piso de 20cm, comprometendo os sensores de temperatura que estavam fixados ao piso do silo horizontal de fundo plano.

2.5 CONCLUSÕES

Comparando-se os silos horizontais com os verticais, podemos concluir que as vantagens construtivas são grandes. Alguns tipos como BUFFALO ainda geram dúvidas para novos projetos, o que pode ser visto de forma contrária para os outros tipos de silos. Com o conhecimento dos principais problemas e falhas que possam a ocorrer juntamente com o domínio das técnicas de manuseio de produtos e o estudo das pressões que se inicia, os tipos de silos horizontais apresentados, característicos de nosso país, apresentam grandes potencialidades para a expansão da capacidade armazenadora.

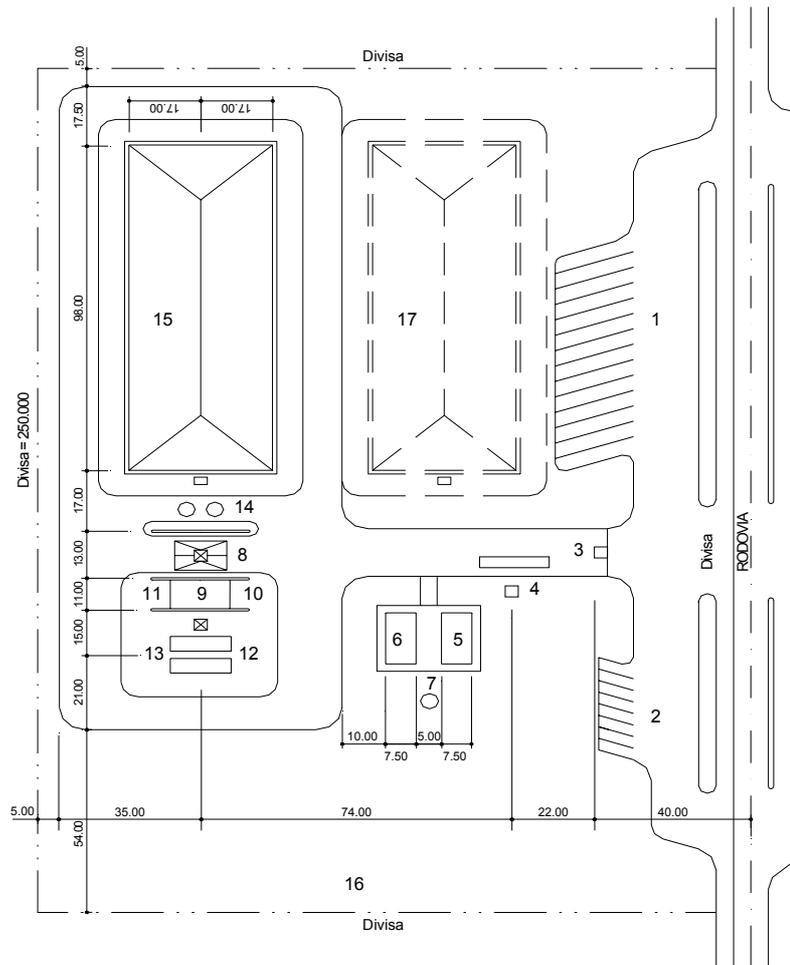
2.6 INSTALAÇÕES DE UMA UNIDADE DE GRANDE CAPACIDADE

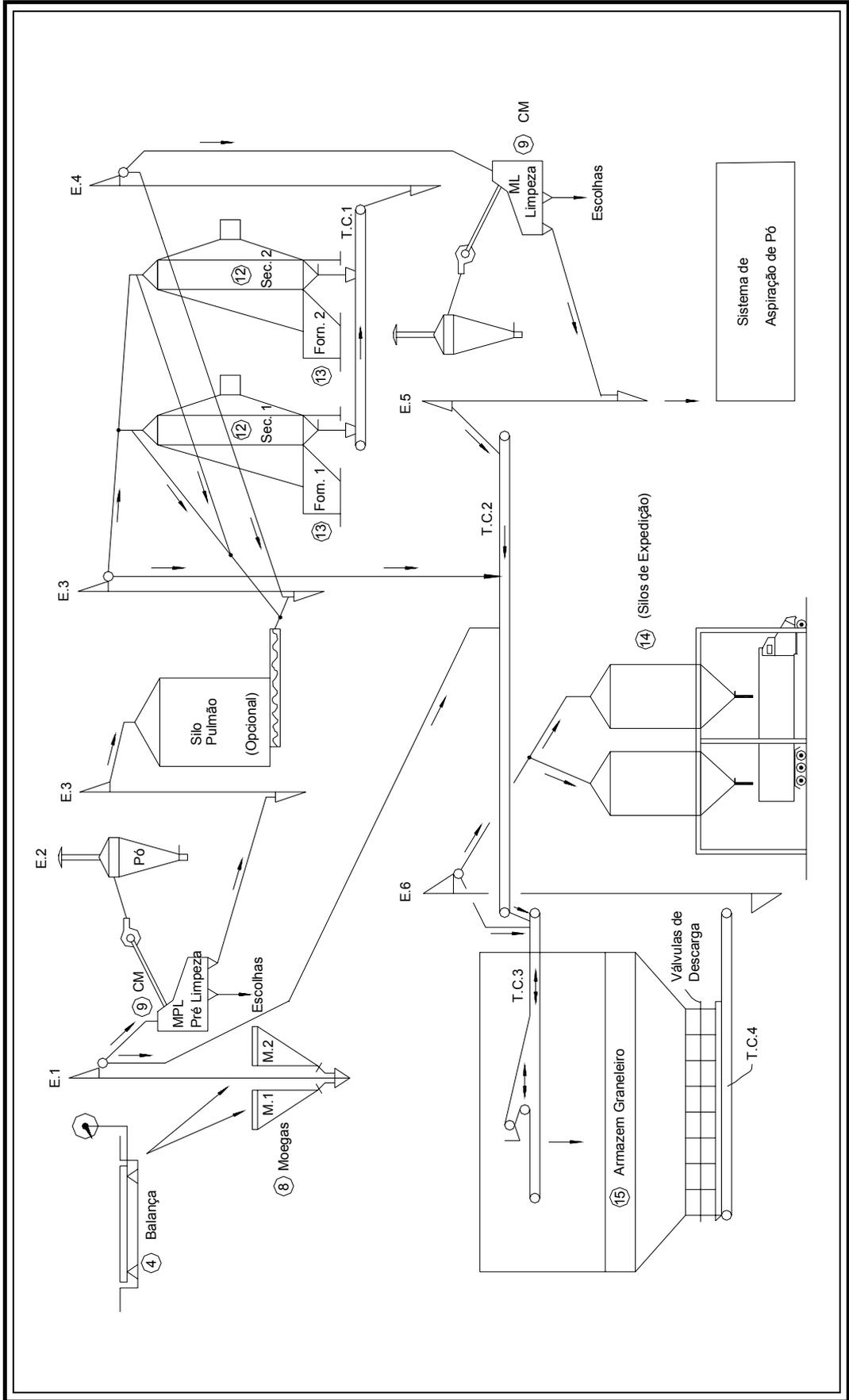
Com a finalidade ilustrar uma instalação de grande capacidade é mostrado a seguir a planta de situação (fig.115) e um fluxograma (fig.116), especificando as áreas destinadas a cada fase de processamento. Esta unidade apresenta uma capacidade estática de 30.000t, de um silo horizontal de fundo V.

* Alcides José Daniel – COPACENTRO – Dourados. MS – Comunicação Pessoal.

LEGENDA:

- 1- estacionamento de caminhões
- 2- estacionamento de carros e de utilitários
- 3- portaria e guarita
- 4- balança rodoviária e cabine do balanceiro
- 5- edifício administrativo
- 6- edifício do almoxarifado
- 7- caixas d'água enterrada e elevada
- 8- moegas de recepção rodoviária e respectivo galpão
- 9- casa de máquinas de pré-limpeza, de limpeza e sistema de despoireamento
- 10- laboratório de controle
- 11- subestação elétrica
- 12- secadores
- 13- fornalhas
- 14- silo de expedição rodoviária
- 15- silo horizontal, fundo v, capacidade de 30.000t
- 16- pátio de estoque de lenha
- 17- área de expansão





CAPÍTULO III

PRESSÕES DE PRODUTOS ARMAZENADOS

3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

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.

Segundo RAVENET (1983), em 1896, 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), 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 19m altura e diâmetros 1,5m e 3,8m, obteve valores de pressão lateral menores que os de Janssen. Entretanto o

autor observou que as pressões de descarga aumentavam rapidamente e foram 4 vezes maior que as pressões estáticas. Toltz, em 1897, seguindo os trabalhos de Prante, projetou silos de grande capacidade (Buffalo). Em 1903 publica sua pesquisa envolvendo uma série de experimentos com silos quadrados de 4,27 metros e 19,8 metros de altura, obtendo um valor máximo de pressão de descarga de 21 kPa. Jamieson, em 1900, apresenta uma importante contribuição aos estudos das pressões, obtendo em seus ensaios, o comportamento das pressões para diferentes condições de descarga centrada e excêntrica. Durante a descarga foi observado um acréscimo de 40% nos valores das pressões em relação as pressões estáticas. Pleisner, no período de 1902 a 1905, conduziu uma série de ensaios em silos verticais, concluindo que a relação das pressões horizontais e verticais não era constante ao longo da altura. Para o trigo os valores variaram de 0,3 a 0,5 e para o centeio os valores foram de 0,23 a 0,45.

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. 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 CAMERON, citado por SILVA (1993)¹, as teorias de Janssen e Airy formaram a base para o projeto de silos, utilizando um coeficiente de sobrepressão na descarga de 1,3. 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.

As fórmulas de Janssen e mais tarde a de Reimbert & Reimbert, foram bastante usadas para o projeto de silos verticais de produtos granulares. Ambas são usadas considerando o equilíbrio estático, entretanto, observou-se que as pressões de descarga eram maiores que as pressões estáticas de carga, obtendo

¹ SILVA (1993). Estudo da variabilidade de pressões em silos. Tese de doutorado (Poli/USP)

um coeficiente de sobrepressão entre 1,76 e 2,39. Vários pesquisadores propuseram coeficientes de sobrepressão, informando que as pressões de descarga poderiam ser de 2 a 4 vezes o valor das pressões de carregamento em silos verticais; Bergau e Kastenius obtiveram valores de coeficientes de 2,1; 2,4 e 2,8 em ensaios realizados em silos reais de concreto armado e metálicos; Pamelar obteve um coeficiente de 1,5. GAYLORD & GAYLORD (1984), comprovaram estas variações dos valores dos coeficientes.

No ano de 1930, houve uma redução geral dos coeficientes de segurança devido ao aperfeiçoamento dos materiais de construção e refinamentos nas análises conduzindo a um grande número de observações de falhas e a extensas investigações na Europa e Estados Unidos. A partir de 1960 alguns especialistas, obtiveram valores do coeficiente de sobrepressão entre 2,4 e 2,7. A norma DIN 1055, Walker, Safarian, Pieper, entre outros, obtiveram valores entre 1,7 e 2,4. Especialistas russos chegaram a valores de 1,65 e 2,4. Na década de 70, os valores obtidos pela DIN 1977, ACI 1977, foram de 1,15 e 2,3, (RAVENET, 1980).

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 os problemas de sobrepressão para células baixas e para silos de células altas. Adequando-se as 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.

Jàky em 1948, desenvolveu estudos das pressões laterais em silos horizontais, entre eles, 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. 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 indicavam que para células baixas deveria ser usada a teoria para cálculo de empuxo de Terra. Porém recomendava-se que a pressão horizontal fosse calculada “sem atrito” entre o material armazenado e a parede. BOWLES (1977), recomenda a teoria de Rankine, desde que a célula tenha altura inferior a 7,0 metros 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 significativa. De acordo com GAYLORD & 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), 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 TEIXEIRA (1987) 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), 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 ²(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

² Negrisola, Ari. Comunicação Pessoal – Palestra: Silos e Armazéns Graneleiros (UFLA/MG)

Rankine é conservador, pois o atrito sempre existe podendo ser desprezível, apenas para as paredes de pequena altura ($h < 2,00 \text{ m}$) 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 (máquinas, cabos e correias transportadoras), 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 à 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. Nosso país 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 (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 em 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.

3.2 PARÂMETROS A SEREM OBSERVADOS NAS PREDIÇÕES DAS PRESSÕES

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. De acordo com CALIL (1990), a pressão nas paredes é função de três conjuntos de parâmetros: 1- propriedades do produto armazenado; 2- propriedades geométricas e estruturais do silo; 3- o modo de operação.

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. De acordo com SILVA (1993), a variabilidade espacial e temporária das pressões devidas aos produtos armazenados em silos impedem 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 abaixo aqueles que são mensuráveis e que durante a condução dos ensaios podem ser alterados.

TABELA 03 - Fatores que afetam a predição de pressões nas paredes dos silos.

| Propriedades 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 (1990).

Entre os parâmetros levantados pode-se notar que alguns são de difícil estimativa e controle durante as medições. Atualmente as pesquisas no campo das propriedades físicas tem se dirigido para o domínio das leis constitutivas que regem seu comportamento.

No campo experimental o domínio das propriedades dos silos é facilitado pela interferência nas características geométricas. Quanto aos modos de operação, o planejamento do ensaio proporciona maior domínio e conhecimento prévio sobre as variáveis.

3.2.1 Propriedades físicas dos produtos armazenados

As propriedades físicas dos produtos armazenados são extremamente importantes na determinação das pressões e do fluxo em silos. 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.

Um dos mais importantes estudos na determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados em silos foi desenvolvido por JENIKE (1964). Na busca de uma forma padronizada de medir as propriedades, o autor analisou inicialmente

a aplicabilidade de equipamentos de teste utilizados em solos, concluindo que os resultados não eram satisfatórios. Dessa forma decidiu desenvolver um aparelho de cisalhamento direto apropriado para produtos armazenados. O aparelho denominado “Jenike Shear Cell” tem sido usado, desde então, por diversos pesquisadores. Um grupo de pesquisadores europeus (Working Party on the Mechanics of Particulate Solids of the European Federation of Chemical Engineering) iniciou em 1989 estudos na tentativa de padronizar métodos de medidas das propriedades físicas de produtos a serem armazenados, a partir de algumas limitações observadas durante os ensaios. Dessa forma estabeleceram técnicas de testes de forma detalhada (EUROPEAN FEDERATION OF CHEMICAL ENGINEERING, 1989), o que resultou um documento denominado “Standart Shear Testing Technique” que fornece instruções detalhadas para a operação do equipamento.

Outro importante trabalho de pesquisa foi desenvolvido por PIEPER & SCHULTZ (1980). Os autores 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 & GAYLORD, 1984).

O interesse aqui é ressaltar a sua importância e conceituá-las com o objetivo de analisar os seus efeitos na predição das pressões. Desta forma, são descritas as propriedades físicas mais importantes como : peso específico (γ), ângulo de atrito interno (ϕ_i), ângulo efetivo de atrito interno (ϕ_e), ângulo de atrito do produto com a

parede (ϕ_w) e o coeficiente de atrito entre o produto e a parede do silo. Alguns resultados de pesquisas são mostrados para informar sobre a ocorrência de suas variabilidades.

3.2.1.1 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 ($g = 9,81\text{m/s}^2$).

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.

Pesquisas realizadas mostram algumas 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.

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).

3.2.1.2 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 estejam 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, portanto 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. Pode-se afirmar, portanto, que o ângulo em repouso do produto difere do ângulo de atrito interno em função das pressões impostas.

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, 1990).

3.2.1.3 Ângulo efetivo de atrito interno

A determinação das propriedades dos materiais armazenados depende do conhecimento do lugar geométrico (YL) de deslizamento determinados pela relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal para o produto armazenado. Do gráfico (figura 17), podemos 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 18). O efetivo ângulo de atrito interno, ϕ_e , é obtido de forma igual ao ângulo de atrito interno, ϕ_i , quando consideramos o produto de fluxo livre. Tal observação nos conduz à

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.

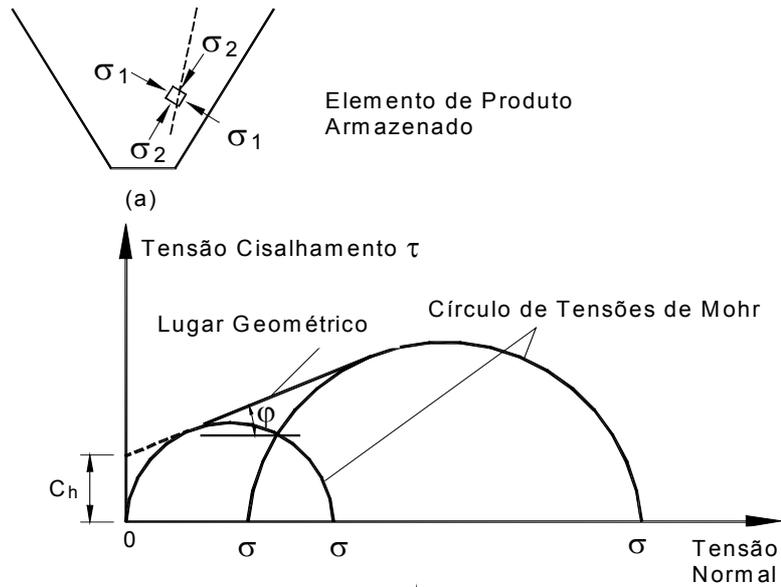


Figura 17 – Representação do lugar geométrico. (CALIL, 1990)

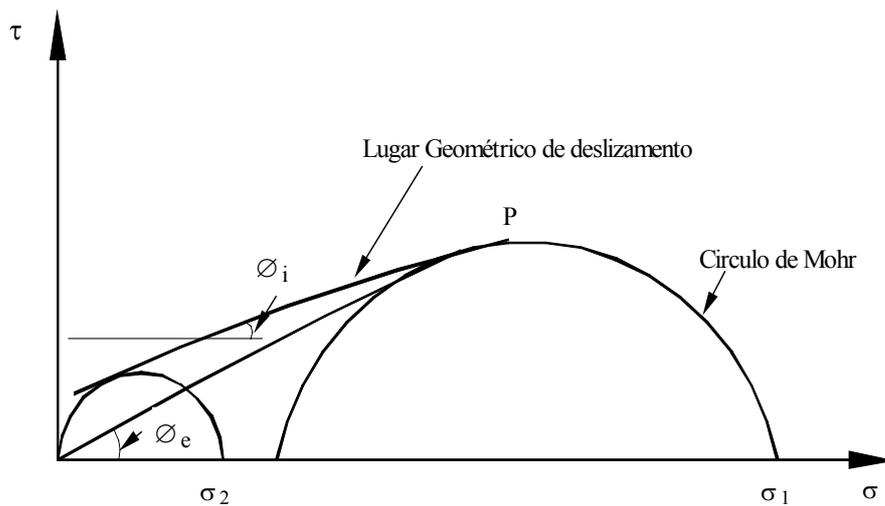


Figura 18 – Representação gráfica do efetivo ângulo de atrito.

3.2.1.4 Ângulo e coeficiente de atrito com a parede

O ângulo de atrito com a parede é determinado na célula de cisalhamento de Jenike, substituindo a parte inferior da célula pelo material a ser testado e define-se o lugar geométrico da parede para uma série de pressões de consolidação. 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 19). 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 testes são repetidos para outras tensões de consolidação.

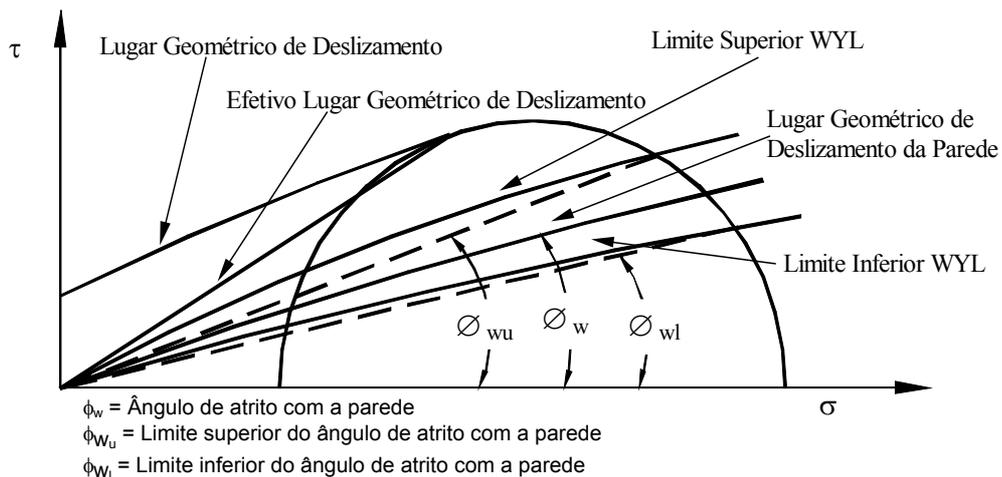


FIGURA19 - Lugar geométrico de deslizamento da parede e ângulo de atrito com a parede

Este parâmetro é de grande importância tanto para o fluxo como para o cálculo das pressões, devendo ser 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. Tal confirmação é feita por SCHWEDES (1983) 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. O autor comparando os interesses da engenharia de processo com os da engenharia civil, observou que, para

combinações idênticas entre o produto armazenado e parede, as medidas desse parâmetro podem variar em até mais de 10^0 . Verificou que tais medidas, obtidas por um teste de cisalhamento, nem sempre são lineares, creditando essa variação ao comportamento de meio não contínuo do produto armazenado.

SCHWEDES (1985), observou que valores do coeficiente de atrito com a parede obtidos por teste de cisalhamento apresentam, em geral, grande dispersão, devendo portanto este parâmetro ser estabelecido por meio de um intervalo. Mencionou a possível influência que outros parâmetros exercem sobre ele tais como : velocidade de cisalhamento, temperatura, umidade, tempo, diferença entre atrito estático e dinâmico, vibração ,etc. Baseado em estudos desenvolvidos por outros autores, observou que, para o projeto estrutural, a influência da velocidade deve ser irrelevante, que produtos armazenados sobre pressão durante um dado período de tempo podem levar a um aumento substancial do coeficiente de atrito e que a presença de vibrações pode reduzir a resistência ao cisalhamento em até 30%. Sugeriu que os valores do coeficiente de atrito com a parede sejam estabelecidos para cada problema individualmente.

Outros ensaios também indicam a variabilidade do fator CALIL Jr.(1984,1985), determinou a partir de dados experimentais de pressão obtidos em um modelo de silo , os ângulo 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 (1988), 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 uma 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.

BLIGHT (1990) investigou o comportamento do coeficiente de atrito com a parede levando em consideração o efeito de diferentes rugosidades e da presença de descontinuidades nas paredes causadas por dobras, soldas, sobreposições, etc. O testes realizados mostraram que esse parâmetro é sensível às descontinuidades em uma superfície, sejam elas paralelas ou normais a direção do movimento. O autor sugeriu uma relação semi – empírica para explicar o comportamento do coeficiente de atrito com a parede em função dos efeitos observados.

3.2.2 Determinação experimental das pressões em silos

Analisando-se vários estudos teóricos e experimentais em silos, constata-se que algumas informações básicas devem ser fornecidas para melhor entendimento da montagem, instalação dos equipamentos e condução dos ensaios. De acordo com STOFFERS (1998), estas informações devem iniciar com uma breve descrição da localização do silo, principais formas e dimensões, o material estrutural, a capacidade de armazenamento, o produto a ser armazenado e as formas de enchimento e esvaziamento do silo. No casos de silos industriais é interessante obter alguns dados históricos. Idade, tipos de materiais já armazenados, a ocorrência de algum problema estrutural são dados importantes para avaliação geral das condições de ensaio. As circunstâncias em que ocorreram os danos, sua localização bem como os métodos de reparação passam a ser fatores que devem ser considerados; em silos de concreto a ocorrência de fissuras e imperfeições devem ser verificadas. As descontinuidades e rugosidades das paredes podem alterar a velocidade e o tipo de fluxo do produto e ainda influenciar as pressões nas paredes.

Em silos multicelulares é importante informar sobre utilização das células vizinhas, como forma de enchimento e esvaziamento durante os ensaios. Informações sobre o tipo de fundação, propriedades do solo, dimensões e posição dos blocos de concreto, número e dimensões das estacas de fundação são importantes, pois é a base da estrutura de reação durante a execução dos ensaios.

3.2.2.1 Fatores que afetam as medições

Durante as medições de pressão em silos existem alguns fatores que comprometem a aquisição dos dados, como por exemplo; número de células a serem utilizadas, efeitos de temperatura, tipo de célula entre outros.

A definição do número de células a serem instaladas, requer uma avaliação das condições locais. Recomenda-se executar ensaios preliminares e de acordo com a necessidade de obtenção dos dados define-se o número de células.

Os efeitos de temperatura devem ser verificados nas células de pressão. As células usadas para a medição de pressão entre o produto e a parede devem apresentar uma face ativa e camada de líquido o mais fina possível. A melhor solução para se obter as pressões reais no campo ou em laboratório é o projeto adequado das células para as condições locais de ensaio observadas as trocas na interface produto e superfície.

Além dos quesitos técnicos de instrumentação deve-se atentar para a natureza estocástica das pressões, que ocorrem devidas à distribuição aleatória do peso específico de uma massa armazenada e à vazão de carregamento. Dessa forma, medidas de pressão obtidas de um mesmo lugar na parede apresentam dispersões sobre condição estática (produto em repouso). Durante a descarga as pressões mudam continuamente devido ao fluxo do material. Picos de pressão e variações da pressão dependem das propriedades do produto armazenado e do tipo de fluxo.

3.2.2.2 Sistemas de medições de pressões em silos

Aqui são descritos alguns sistemas de medições com a utilização de sensores ou células de pressão desenvolvidos por pesquisadores e/ou fabricantes. São apresentadas as formas de condução dos ensaios e as limitações encontradas no desenvolvimento e aferição dos equipamentos e sua instalação. Alguns pesquisadores desenvolveram equipamentos para medição das tensões normais e tensões de cisalhamento para medição do atrito entre o produto e a parede na condição de carregamento e descarga de silos para se avaliar as pressões dinâmicas.

Alguns trabalhos de grande importância na área de instrumentação foram desenvolvidos por ASKEGAARD (1981,1987), ASKEGAARD et al (1990), onde relatam a aplicação de células de pressão desenvolvidas em laboratório, e concluíram que os valores obtidos nos ensaios dependem do método de instalação e do material utilizado para a sua construção. Os autores informam que a obtenção de valores com pequena variabilidade depende da estabilidade do transdutor e de sua aferição. Resolvidos estes problemas as células podem ser fabricadas em grande escala para as mais diversas aplicações e especificamente para as pesquisas em silos.

ROWLANDS et al (1989), desenvolveram um transdutor de pressão ortogonal fabricado em alumínio com módulo de elasticidade ($E= 71\text{kN/mm}^2$), para medir a tensão normal/radial e a tensão de cisalhamento nas paredes e na seção dos silos. Na construção do sensor foram utilizados extensômetros elétricos em ponte completa. Após vários testes os autores puderam constatar uma variação da ordem de 0,6% na determinação das tensões de cisalhamento e de 1,46% para as tensões normais radiais.

ATEWOLOGUN et al (1992), utilizaram o mesmo princípio de medição através de transdutores inseridos na massa de grãos para se medir as pressões horizontais e verticais. Os transdutores foram desenvolvidos utilizando sensores do tipo diafragma no qual foram fixados extensômetros elétricos. O objetivo da pesquisa foi estudar o coeficiente K, a partir das medidas das pressões laterais e verticais e a um ângulo de 45° , através da célula de pressão desenvolvida. Após a aferição do equipamento desenvolvido em laboratório, os resultados obtidos apresentaram boa correlação com o resultados teóricos obtendo um fator de correlação de 0,99 para várias repetições de ensaio.

NEGI & JOFRIET (1992), desenvolveram um sensor tridimensional para avaliar a relação entre as pressões horizontais e verticais na seção transversal do silo. O equipamento foi montado com instalação de 3 sensores piezoresistivos dispostos ortogonalmente para medir as tensões normais em cada direção. Os sensores foram instalados em três faces de um cubo e calibrados com um manômetro. Os ensaios de um modelo foi executado utilizando trigo e aveia como produtos, para 2 ciclos de carregamento e descarga com a obtenção dos valores de pressão. O desempenho do equipamento foi satisfatório o que permitiu definir os valores da relação entre as pressões horizontal e vertical de acordo com a proposta da norma canadense que considera o valor de K igual a 0,4.

Um outro trabalho, também de grande importância no campo da instrumentação, foi de HAAKER (1994), que desenvolveu uma célula de pressão e avaliou sua aplicação em modelos reduzidos de silos com paredes flexíveis. O autor comparou as relações teóricas das pressões com os valores empíricos obtidos em ensaios através da avaliação do módulo de elasticidade do produto armazenado e a parede do silo. Concluiu que os produtos com módulo maior que 25Mpa e paredes com valores de rigidez elevado forneceram resultados com boa correlação com os valores teóricos.

JARRETT et al (1995), empregaram células de pressão, instalando células em contato com a parede e inserida na massa do produto para avaliar as pressões normais nas paredes do silo e tremonha e na seção transversal. O autor constatou que os modelos teóricos aplicados forneceram resultados conservadores para paredes flexíveis, quando comparados com os valores obtidos experimentalmente. A formação de arcos na massa do produto interfere nos valores de pressão. Ressalta ainda que o modelo de célula inserido na massa apresentou pouca sensibilidade devido a instalação, ou seja, o campo de tensões no produto é alterado devido a instalação da célula. O mesmo não foi observado para as células de contato.

A medição de pressão exercida por produtos granulares e sua distribuição dentro do silo foi relatada por HAMADEH e KAMINSKI (1996), que através de células inseridas na massa de grãos, construíram curvas de isopressão nas condições estática e dinâmica. O ensaio foi conduzido com a instalação de 30 células tipo sondas, inseridas na massa do produto pela fixação em barras metálicas. Através de um sistema de aquisição de dados e um software de mapeamento, puderam constatar a não uniformidade da distribuição das pressões estáticas e dinâmicas dentro da massa de grãos, considerando as condições de fluxos de funil e de massa.

JOFRIET (1988) et al, utilizando as medições indiretas de pressão com extensômetros elétricos, encontraram algumas limitações na análise de projetos de silos horizontais para armazenamento de forragem. Os silos eram montados com paredes laterais utilizando painéis de concreto pré – fabricadas de dimensões 3,7m x 4,9m e foram instrumentados para avaliação das pressões. Os cálculos teóricos, baseados na norma canadense (CFBC, 1983), foram confrontados com os valores obtidos experimentalmente e destacaram algumas variações para o cálculo das pressões nas paredes. Os valores das pressões laterais atingiram valores máximos

próximos de 20 kPa, enquanto que os estimados pela norma atingiu um valor constante de 6,7 kPa a partir de 1,0m da altura da borda da parede, justificando a ocorrência do aparecimento de fissuras e rupturas das paredes laterais com certo comprometimento das estruturas.

BLIGHT et al (1997) relatam a aplicação de células desenvolvidas em laboratório para as medições de pressões. O produto armazenado foi o cimento. Foram instalados 6 células de pressão nas paredes e duas células no fundo do silo sobre o túnel de descarga. Foram medidas as pressões estáticas e dinâmicas durante o carregamento e descarga do silo. O silo de concreto instrumentado apresentava as seguintes dimensões: 17 metros de altura, 41 metros de diâmetro e espessura da parede de 400mm. A célula de pressão foi construída e calibrada para as medições de produtos aquecidos. Um dos problemas constatados foi a aferição da célula considerando os efeitos de temperatura do produto armazenado. O cimento ao ser armazenado atingiu temperaturas superiores a 95^oC. A célula de pressão foi confeccionada com uma barra metálica na qual foram fixados os extensômetros ligados em ponte completa. As deformações ocorridas no diafragma eram lidas e os valores de pressão calculados, após a calibragem do equipamento. Os ensaios foram conduzidos durante 15 meses e a máxima pressão medida no fundo do silo foi de 55 kPa. Nas paredes o valor das pressões atingiu o valor de 36 kPa, enquanto que as pressões estáticas verticais chegaram a 74 kPa. Nos cálculos para as pressões em repouso utilizou a expressão de Jaky, considerando as condições de carregamento, repouso e descarga do silo. Para as pressões dinâmicas de descarregamento foi obtido o valor máximo de 95 Kpa, nas paredes. A grande limitação na condução do ensaio foi a instalação das células nas paredes, o que de certa forma comprometeu a integridade das paredes dos silos.

3.2.3 Coeficiente K

A relação entre a pressão horizontal e a vertical em qualquer ponto de uma massa granular é definida como a relação K, também conhecido como coeficiente de pressão lateral. A pressão horizontal depende das propriedades de atrito e da direção das tensões principais. É um dos parâmetros necessários para o cálculo das pressões que o produto exerce sobre as paredes e fundo de um silo. Os três estados de tensão associados com K são referidos aos estados ativo, passivo e em

repouso. O primeiro é resultado do movimento da parede contra a massa de grãos, o segundo é decorrente do movimento da massa de grãos contra a parede e o terceiro ocorre quando a estrutura é indeslocável e evita a deformação lateral na região entre o produto e a parede.

Várias propostas de determinação indireta e direta do valor de K são recomendadas. As normas internacionais propõe valores empíricos e teóricos para este parâmetro e ainda recomendam a utilização de equipamentos para a sua medição. São revisados aqui alguns trabalhos para esclarecer a ocorrência da variabilidade deste parâmetro.

A norma Britânica BMHB (1985) define dois valores para K sendo um valor inferior $K_1=0,25$ para o cálculo das pressões verticais e um valor superior de $K_u = 0,60$ para o cálculo das pressões horizontais. Para paredes rugosas o valor de K_u deve ser tomado igual a 0,75. A norma Canadense, CFBC (1983), especifica o valor de K para oito produtos, em função da rugosidade da parede. O valor de 0,4 é para as paredes lisas e 0,6 para paredes rugosas considerando produtos granulares. A norma DIN 1055(1987), define o valor de K considerando um coeficiente de empuxo de solos igual a 1,2, compensando as pequenas alturas. A norma Americana ACI (1991) utiliza o valor de K conforme as formulações de Koenen, indicada a seguir no item 3.3.4.4.

A norma européia, ENV 1991-4 (1991), fornece uma tabela para 10 produtos coesivos e não coesivos, sendo que aqueles que não constam na mesma, o valor de K deve ser determinado experimentalmente através de metodologia definida nesta norma. Os valores observados variam de 0,45 a 0,55, levando em consideração dois tipos de paredes: aço e concreto. A norma ISO 11697 (1995), apresenta uma tabela para 5 classes de produtos de acordo com o peso específico, coeficiente de atrito e o valor de K, mostradas na tabela 04 a seguir. Nos cálculos dos carregamentos máximos de projetos, as seguintes combinações dos parâmetros de K e μ' são propostos :

$$\text{Para cálculo de} \quad \left\{ \begin{array}{l} p_h : 1,15K \text{ e } 0,9\mu' \\ p_v : 0,9K \text{ e } 0,9\mu' \\ p_h : 1,15K \text{ e } 1,15\mu' \end{array} \right.$$

TABELA 04 – Classes de produtos segundo a norma ISO 11697.(valores médios)

| classe | $\gamma(\text{kN/m}^3)$ | K | μ' (parede lisa) | μ' (parede rugosa) |
|--------|-------------------------|------|----------------------|------------------------|
| 1 | 7,5 | 0,3 | 0,3 | 0,4 |
| 2 | 8,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 |
| 3 | 10 | 0,5 | 0,5 | 0,6 |
| 4 | 13 | 0,6 | 0,6 | 0,7 |
| 5 | 16 | 0,75 | 0,75 | 0,85 |

CALIL Jr.(1984,1985) determinou o valor do coeficiente K a partir de dados experimentais de pressão obtidos em um modelo de silo, comparando-o com os valores teóricos definidos por alguns autores (Rankine, Walker, Frazer e Jaky). Segundo o autor, o valor de K obtido pela fórmula de Frazer foi o que melhor se adaptou aos resultados experimentais obtidos.

SCHWEDES (1985), enfatizou em seu trabalho que, como há diferenças no comportamento das pressões nas fases de carga e descarga, o coeficiente K deve ser diferente para essas duas situações, e não necessariamente constante ao longo do silo. O autor ainda comenta que a relação física pode ser demonstrada qualitativamente, porém, para que uma determinação quantitativa se torne possível, será necessário um avanço significativo na teoria da mecânica dos sólidos.

BRITTON & MOYSEY(1986), verificaram a partir de informações obtidas em diversos trabalhos que, embora o valor de K seja assumido como constante, sua variação em função de diferentes parâmetros de um silo vem sendo considerada, não havendo contudo um consenso de como esta variação pode ser estabelecida. Os autores recomendam que, enquanto informações mais detalhadas não forem obtidas, o valor de K deve ser estimado pela fórmula original de Rankine.

JENIKE et al, (1973) estudando silos metálicos cilíndricos, estruturas baixas com relação altura/diâmetro entre 0,5 e 2,0, consideram que a relação entre as pressões horizontais e verticais (k), no produto armazenado é de fundamental importância. O uso de $K= 0,4$ para todos os materiais armazenados pode ser justificado para células altas onde K tem pequeno efeito, mas em silos baixos é necessária maior precisão. Além disso, a variação de pressões perto do primeiro contato do sólido armazenado com a parede, afeta significativamente o cálculo, mas não é bem tratado na maioria dos estudos das pressões em silos.

KWADE et al, (1994), utilizaram o equipamento oedômetro, adaptado da mecânica dos solos, para determinar a relação entre pressões laterais e verticais

através de testes de compressão uniaxial. Os autores propuseram um procedimento, variando alguns parâmetros como rugosidade da parede, forma de enchimento da célula, tempo de carregamento e atrito com a parede e tampa, com objetivo de torná-lo padrão. Dos resultados obtidos concluíram que o ângulo de atrito deve ser considerado na determinação do valor de K. Nos valores propostos pela norma europeia (ENV 1991-4) para o coeficiente K, a correção é necessária sendo aplicado um coeficiente de 1,1 sobre o valor determinado. De acordo com o valor proposto pela norma alemã DIN 1055 parte 6, o coeficiente de majoração de 1,2 para K, corrige este parâmetro considerando os efeitos do atrito com a parede e sua magnitude, em função do nível de tensões encontrados em silos reais.

3.2.3.1 Determinação experimental do valor de K em modelos

Inicialmente, duas questões devem ser levantadas, quando pretende-se estudar as tensões em uma massa de produtos armazenados na condução de ensaios de modelos reduzidos. A primeira questão é verificar se as leis de semelhança mecânica podem ser aplicadas no estudo. REIMBERT & REIMBERT (1979), em uma análise matemática inicial concluíram que a semelhança geométrica entre o silo real e o reduzido, não interfere nas pressões relativas médias, a uma mesma profundidade relativa. A conclusão é justificada pelos ensaios realizados e os resultados obtidos comparados com os cálculos, havendo perfeita concordância entre os resultados experimentais e teóricos.

Uma segunda questão a ser observada diz respeito à instrumentação a ser utilizada e os problemas decorrentes dos ensaios. O estudo teórico e experimental da relação entre as pressões horizontais e verticais em silos é de extrema importância para o cálculo das pressões, daí a necessidade de se aplicar equipamentos compatíveis. As normas internacionais tratam deste item e vários trabalhos foram realizados para efeito de comparação com os valores teóricos.

A medida da relação K em um dado ponto da massa de um produto tem sido objeto de estudo dos pesquisadores. Como já vimos, o valor de K, preciso, é importante para a predição das pressões. Na busca de resultados mais consistentes alguns trabalhos anteriores demonstram que os pesquisadores se voltaram para 3 áreas da determinação experimental do valor de K:

- 1- Medição de forças verticais e horizontais feitas separadamente.
- 2- Medição de forças verticais e horizontais com um diafragma na parede do silo.
- 3- Medição de pressões verticais e horizontais na massa de grãos.

Poucos pesquisadores tem utilizado a última metodologia, informando que esta pode trazer algumas imperfeições, (Terzagui,1920; Perry and Jangda (1970); Clower et al, 1973 e Mohsey, 1983), citados por ATEWOLOGUN et al (1992). A justificativa para tal afirmação se faz por alguns fatores a serem observados que podem interferir nas medições, tais como:

- a introdução de um corpo estranho na massa de grãos pode alterar a distribuição de tensões, próximo a região de instalação.
- a calibração destes sensores construídos em laboratório é difícil.
- os projetos de silos dão prioridade às cargas nas estruturas dos silos não dando importância à interação do produto com as mesmas.

Mas mesmo com estas limitações, as medições diretas apresentam uma grande vantagem que é a de excluir a influência da parede, como deformações, atritos e heterogeneidade do material construtivo.

BLIGHT (1992), concluiu a partir de um conjunto de ensaios em escala real em medição de pressões e forças de atrito nas paredes que, o cálculo das pressões apresenta grandes dispersões devidas as estimativas do valor de K. Foram estudadas 18 estruturas com diâmetro variando de 5,5 a 25m e capacidades de 250 a 15.000t, entre silos verticais e silos baixos, com diversos produtos armazenados. As pressões foram medidas durante o carregamento e descarga do silos a partir de medidas indiretas utilizando extensômetros instalados nas paredes. O estudo objetivou avaliar a validade das hipóteses de cálculos assumidas, utilizando as equações de Janssen e Walker para o cálculo das pressões laterais. Os valores de K foram calculados pela relação entre as pressões preditas e as medidas em laboratório para o estado ativo e em repouso das pressões. Os valores de K_a (coeficiente ativo) obtidos experimentalmente foram 0,21 a 0,23 e os valores K_o (coeficiente em repouso) foram de 0,43 a 0,67. O produto armazenado usado foi a cal.

3.2.4 Considerações finais

Após estudos realizados sobre os parâmetros, pode-se concluir que estes são intrínsecos à predição das pressões. A determinação das propriedades é ainda objeto de estudos, considerando a utilização dos equipamentos e os modelos empíricos. É de consenso universal que a máquina de cisalhamento seja utilizada, embora alguns grupos de pesquisadores discordem propondo novos equipamentos nos quais o manuseio é mais simplificado.

Considerando que as pressões e a fluxibilidade 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 ser reais no estudo das tensões internas de confinamento dos produtos armazenados.

O comportamento das pressões em silos verticais já é de domínio dos pesquisadores. No campo das pressões ainda existem lacunas sobre o comportamento dos produtos em unidades de baixa relação altura/lado. 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, tem sido o grande desafio para os pesquisadores. No tocante à experimentação em silos, os resultados das pesquisas tem mostrado 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 tem se limitado ao custo de montagem e de calibração das células.

Com o desenvolvimento de novos equipamentos, as pesquisas nesta área tem se desenvolvido de forma satisfatória. É necessário que no campo experimental as pesquisas sejam realizadas como forma de balizamento das análises numérica e teórica utilizando modelos reduzidos ou pilotos, fornecendo ensaios com custos menos onerosos.

3.3 TEORIAS DAS PRESSÕES EM SILOS

3.3.1 Introdução

Durante o carregamento de um silo, ocorre um estado de tensões ativo (estático), enquanto que um estado de tensões passivo (dinâmico) se desenvolve durante a descarga. Na descarga ocorre uma mudança do estado ativo para o passivo que inicia na boca de saída e continua através da tremonha. Esta mudança instantânea do estado de tensões é conhecida como “switch” e provoca altos picos de pressões verificados acentuadamente em silos verticais. De acordo com ARAÚJO (1997), a influência deste efeito sobre a tremonha não é grande, podendo ser questionável no corpo do silo. Se este efeito ocorre na transição, o estado de tensões no corpo do silo permanece ativo, enquanto que o estado de tensões na tremonha permanece passivo durante a descarga. Este efeito é desconsiderado no silos horizontais devido ao volume de material armazenado acima da linha de transição entre o corpo do silo e a tremonha.

As **pressões estáticas** dos produtos armazenados, são aquelas exercidas pelo produto em repouso no interior do silo calculadas sobre as paredes e o fundo da célula. Após o enchimento do silo, o peso do produto é suportado em parte pelas paredes, devido ao atrito do produto armazenado, e parte pelo fundo da célula. As pressões perpendiculares às paredes são denominadas de pressões horizontais ou pressões laterais e as ações paralelas às paredes devido ao atrito, pressões verticais atuando sobre o fundo da célula. As **pressões dinâmicas** são aquelas exercidas nas paredes durante o carregamento e descarga dos silos, também denominadas ativas e passivas, apresentando valores superiores às estáticas.

3.3.1.1 Fluxo

É um caso particular de ruptura, que ocorre quando as pressões são tais que, o cisalhamento ocorre sem destruir a isotropia do sólido. Durante o fluxo o peso específico da massa do produto é função das pressões. Quando as pressões são constantes, a massa de produto sofre cisalhamento a um peso específico constante. Quando as pressões aumentam, a massa de produtos se compacta e o

peso específico aumenta. Quando as pressões diminuem a massa de grãos se expande e o peso específico diminui.

Na análise do comportamento das pressões em projetos de silos, uma das necessidades é conhecer as propriedades de fluxo do produto armazenado, ou seja, se ele é de fluxo livre ou não. Um segundo ponto é saber qual o tipo de fluxo será utilizado no projeto, se fluxo de massa ou funil, determinando as características de descarga do material, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e o mais importante determinar a distribuição de pressões nas paredes dos silos, na fundação, com objetivo de avaliar a integridade e o custo da construção.

De acordo com as normas internacionais, o tipo de fluxo pode ser pré definido, a partir de dois gráficos que relacionam o coeficiente de atrito com a parede e o ângulo de inclinação das paredes de dois tipos de tremonha, em cunha ou cônica. As figuras 20 (a) e (b) ilustram estes dois casos.

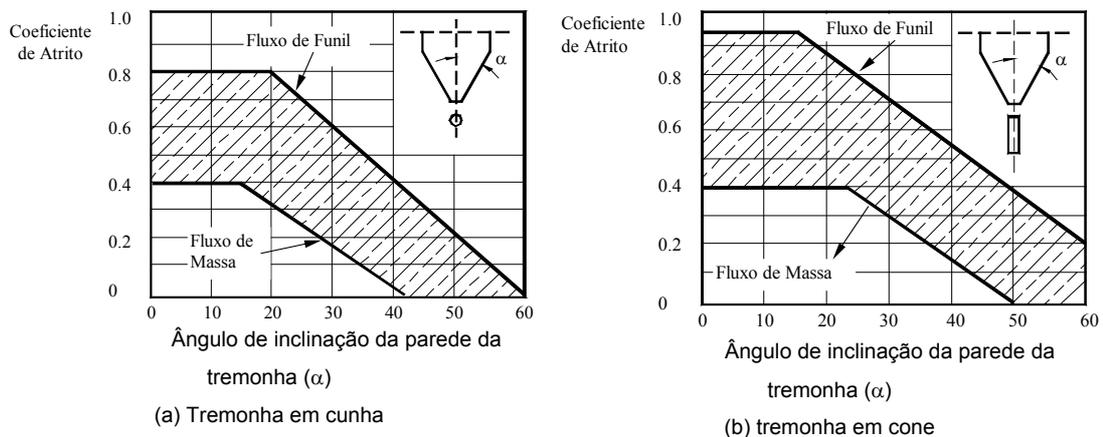


Figura 20 - Determinação geométrica do tipo de fluxo.

Em se tratando de silos horizontais, em função das características geométricas, onde a altura das paredes é muito inferior ao comprimento, para efeito de fluxo, os projetistas dimensionam estas estruturas considerando não haver sobrepressões de descarga. O tipo de fluxo vai depender da inclinação do fundo e das paredes e o atrito do produto com as mesmas devendo ser considerado nos cálculos das pressões. BENINK (1989), analisando silos sujeitos ao fluxo de funil, verificou que ocorreram altas pressões nas paredes, onde as zonas estagnadas atingem as paredes do corpo do silo. As pressões nas paredes da tremonha são amortecidas devido às zonas de estagnação e, conseqüentemente não são altas como as que ocorrem em fluxo de massa.

3.3.2 Teoria de Janssen

Para o cálculo das pressões estática e dinâmicas 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 sobrepessão 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).

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. De acordo com TROITSKY (1982), Janssen considerou as seguintes hipóteses: 1- a pressão vertical é constante em uma seção transversal horizontal do produto armazenado; 2- adota-se um valor de K constante em qualquer profundidade.

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.

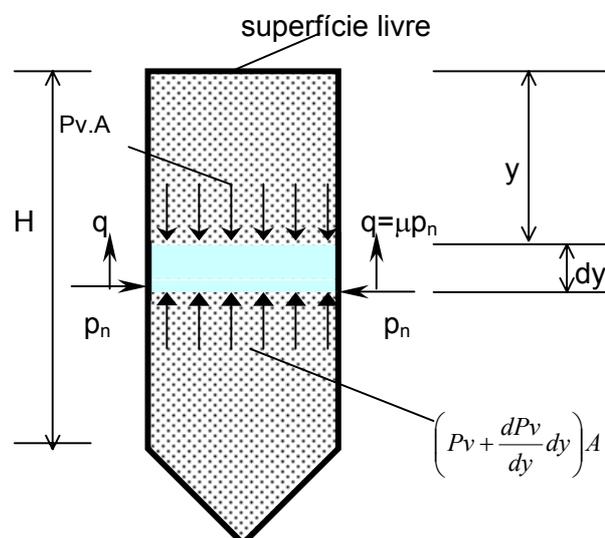


Figura 21 - Forças agindo sobre uma camada infinitesimal

Do esquema dado na figura 19, temos:

q = pressão de atrito sobre a parede, onde $q = \mu \gamma \phi_w$

γ = peso específico do produto

A = área da seção transversal horizontal do silo

l = perímetro da seção transversal

z = altura do produto acima da seção transversal considerada

R = raio hidráulico (relação entre a área da seção transversal e o perímetro mesma (A/l) e sendo a força de atrito total dada por $q.l.dz$, através do equilíbrio das forças na direção vertical chega-se à seguinte equação diferencial:

$$\frac{dp_v}{z - \frac{\mu k p_v}{R}} = dy \quad (01)$$

Integrando-se a equação anterior, temos:

$$\ln\left(z - \frac{\mu k p_v}{R}\right) = \left(-\frac{\mu k}{R} z\right) + c \quad (02)$$

Quando $z = 0$, tem-se $p_v=0$, então $c = \ln z$ e, finalmente, chega-se a equação de Janssen :

Pressões verticais

$$p_{v(z)} = \frac{\gamma R}{\mu K} \left(1 - e^{-\frac{\mu K z}{R}}\right) \quad (03)$$

Pressões horizontais

$$p_{n(z)} = \frac{\gamma R}{\mu} \left(1 - e^{-\frac{\mu K z}{R}}\right) \quad (04)$$

Pressões de atrito por m^2 de superfície de parede

$$p_{w(z)} = \gamma R \left(1 - e^{-\frac{\mu K z}{R}}\right) \quad (05)$$

A formulação de Janssen como pode se observar depende do raio hidráulico. O raio hidráulico de uma célula quadrada é igual a $a/4$ (a é o lado do quadrado) e para uma célula circular é igual a $D/4$ (D é o diâmetro do círculo). De acordo com FORTES FILHO (1985), baseado em resultados experimentais, as pressões laterais não serão iguais se “ a ” for igual a D , considerando células armazenando um mesmo produto. REIMBERT & REIMBERT (1979), consideram que, no caso de silos retangulares de largura “ a ” e comprimento “ b ”, para uma dada altura de produto armazenado, o empuxo em um dado ponto da parede menor mantém-se constante e igual ao que exerceria no mesmo ponto se o silo fosse quadrado de lado “ a ”, qualquer que seja a dimensão das paredes maiores.

De acordo com ARAÚJO (1997), a expressão do empuxo médio sobre as paredes maiores ($pn_{máx,a}$) e sobre as menores ($pn_{máx,b}$), que atuam sobre uma fatia de mesma seção transversal da célula e de espessura infinitesimal igual a “ dy ”, são máximos quando o atrito a estes empuxos equilibra o peso da fatia considerada. Assim temos as seguintes expressões :

$$a \cdot b \cdot dy \cdot \gamma = (pn_{máx,a}) \cdot 2a \cdot dy \cdot \mu + (pn_{máx,b}) \cdot 2b \cdot dy \cdot \mu$$

para um quadrado de lado “ a ” a expressão (04) desprezando-se a parte exponencial nos fornece:

$$pn_{máx,a} = \gamma R / \mu = \gamma \cdot a / 4 \mu$$

substituindo na expressão anterior tem-se:

$$pn_{máx,b} = \gamma / 4 \mu \cdot [(2a \cdot b - a^2) / b]$$

Comparando com o valor final da expressão, têm-se a expressão de “ a ” dado pela norma ACI 317-91 que emprega no cálculo de empuxo máximo sobre os lados de um silo de lado “ a ” a seguinte expressão :

$$a' = \frac{2ab - a^2}{b} \quad (06)$$

Assim, chega-se a expressão do empuxo para um silo de seção retangular. Sobre as paredes menores é igual àquele que exerceria em um silo de seção quadrada de lado “a”, e, o empuxo médio para as paredes maiores é igual àquele que exerceria em um silo de quadrado imaginário, cujo lado é dado pela expressão (06).

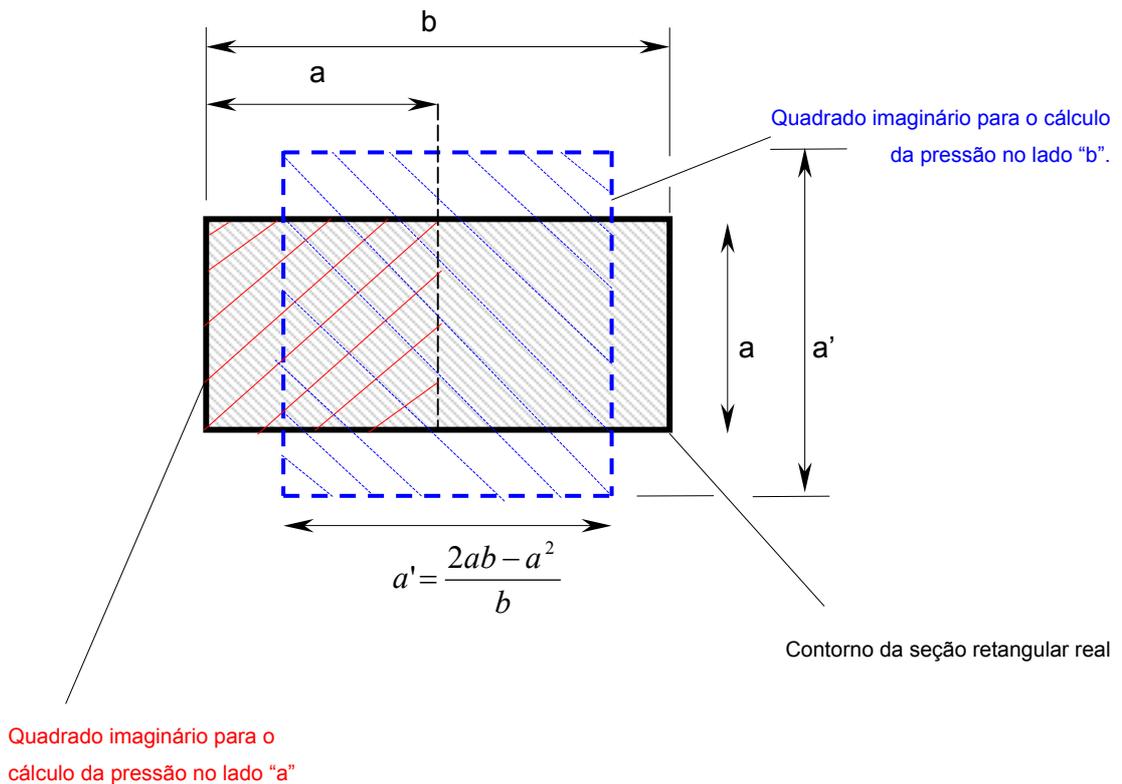


Figura 22 - Quadrados imaginários para os cálculos dos raios hidráulicos. (M. & A. REIMBERT, 1979).

Nas paredes verticais do silos aparecem forças de compressão, por unidade de comprimento. De acordo com GAYLORD & GAYLORD, (1984), estas forças são provocadas pelo atrito entre o produto armazenado e as paredes podem ser calculadas através do conceito de força de atrito: $F_{at} = \mu.Pn$. Sendo “dy” uma faixa infinitesimal, tem-se : $F = \int_0^y \mu k p v dy$, aplicando-se a equação (03) e integrando-as, temos: $F = R(\gamma.y - p v)$

Comparando o modelo teórico de Janssen com outros modelos e normas podemos observar que as equações definidas para as pressões na parede e tremonha, a partir de dados experimentais e valores teóricos, têm comportamentos diferenciados, quando avaliados os estados de tensão em repouso e dinâmico individualmente. Nota-se que as pressões calculadas pelo método de Walker são maiores que calculadas pelo método de Janssen e Jenike e as normas Americana (ACI 313 - 1991) e Alemã (DIN 1055, 1977). O gráfico da figura 23, ilustra a variação encontrada para os valores de pressão nas paredes e tremonha de um silo.

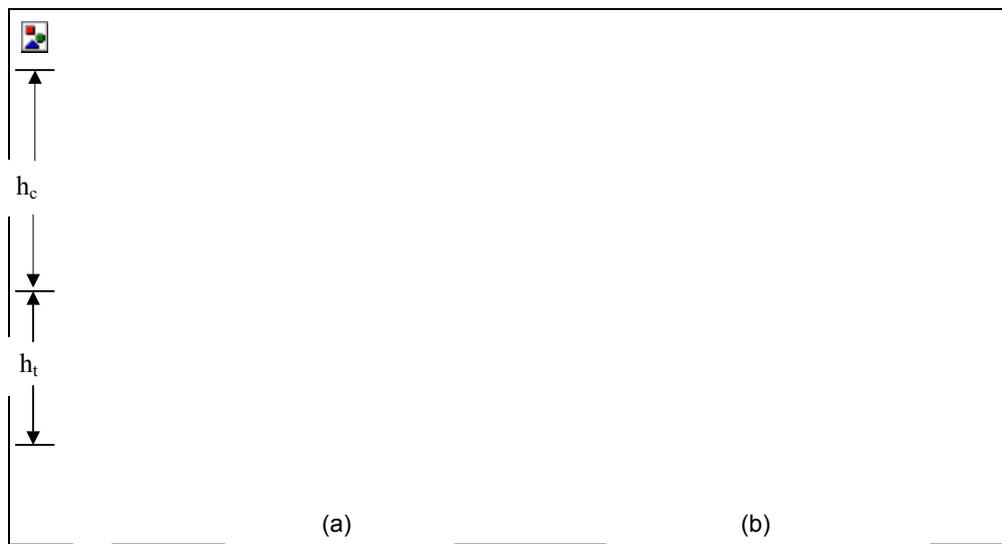


Figura 23 - Comparação entre os modelos teóricos e dados experimentais para os valores de pressão. (a) estático, (b) dinâmico. Fonte : GAYLORD & GAYLORD, 1984)

3.3.3 Pressões em células baixas

Quando mencionamos as características geométricas das estruturas com base nas dimensões ou relações entre elas, muitos pesquisadores definem as unidades de armazenamento de diversas formas. De acordo com a ACI – 313 (1991), as células altas e baixas são diferenciadas a partir do plano de ruptura do produto armazenado, como ilustra a figura 24.

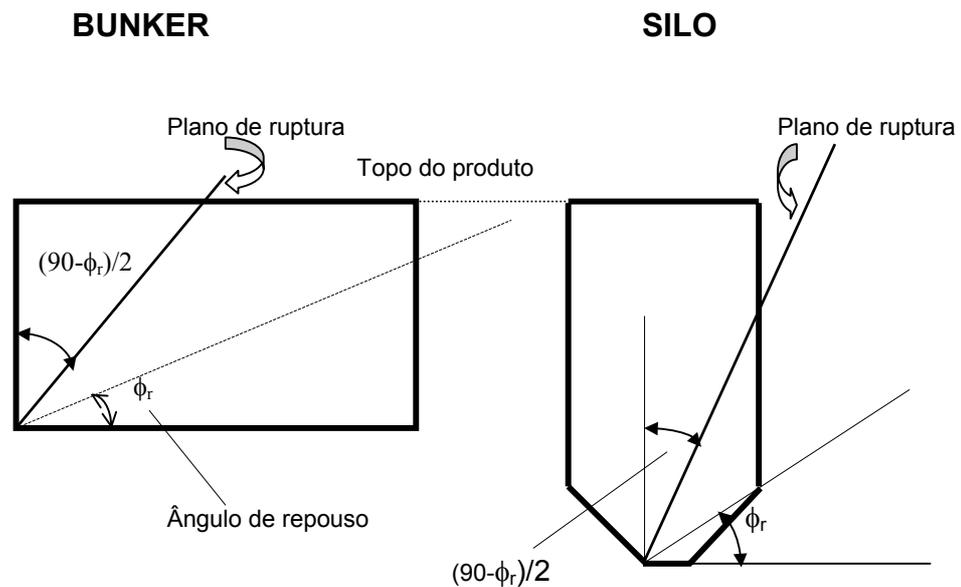


FIGURA 24 – Definição dos silos de acordo com o plano de ruptura.(ACI 313/1991).

Para muitos pesquisadores as células altas têm a razão entre a sua altura e o diâmetro do círculo inscrito na seção transversal da célula, igual ou maior que 1,5. Quando a razão é menor que este valor temos as células baixas. A partir dessa definição podemos aplicar os processos específicos para a determinação das ações exercidas pelo produto. Essa diferenciação é importante, pois as teorias aplicadas para silos de células baixas também são adequadas para silos horizontais sendo recomendado, para os dois casos, o emprego das teorias de Coulomb e Rankine. A norma Canadense CFBC (1983), no item 2.2.1.11, trata das ações para os silos horizontais propondo uma formulação empírica para o cálculo das pressões laterais. Para os silos baixos, recomenda no item 2.2.1.13 a utilização da teoria de Coulomb.

É interessante observar que as normas internacionais ISO 11697 (1995) e a ENV 1991-4(1993) tratam dos silos baixos de fundo plano, recomendando algumas formulações teóricas, podendo ser aplicadas para silos horizontais.

RAVENET (1992), considera os silos horizontais como estruturas com características próprias quanto ao seu dimensionamento diferenciando-se das teorias clássicas de silos, recomendando que as pressões nas paredes sejam calculadas de acordo as teorias de Rankine e Coulomb.

A ANSI (1996), utiliza para o cálculo das pressões nas paredes de silos horizontais o coeficiente K igual a 0,5 e recomenda calcular uma altura efetiva de produto quando se forma um talude natural baseada nos ângulos de repouso e atrito interno do produto, para silos horizontais de fundo plano.

3.3.4 Teorias das pressões para células baixas

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 autores 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. 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. M. & A. REIMBERT (1987) seguindo a teoria dos muros de arrimo, que considera a distribuição das pressões linear, propõem uma formulação teórica para os esforços nas paredes de silos horizontais de grande capacidade.

Empuxo ativo, passivo e em repouso

Tratando-se das teorias para o cálculo das pressões horizontais, são indicadas o campo de aplicação e as limitações de emprego nos diversos casos. Uma conceituação importante se faz necessária quando tratamos de esforços sobre paredes de contenção, de produtos granulares e pulverulentos.

O empuxo é a resultante das pressões laterais de um material (terra, água e demais produtos), que atuam sobre uma estrutura de contenção. Sua magnitude depende das características do material, da deformação sofrida pela estrutura, entre outros fatores.

“Para avaliar o empuxo de terra que atua sobre uma estrutura, Terzaghi 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 ilustrado na figura 25, lançando os valores da força sobre o anteparo em função da translação por ele sofrida nos dois sentidos,” GAIOTO (1979).

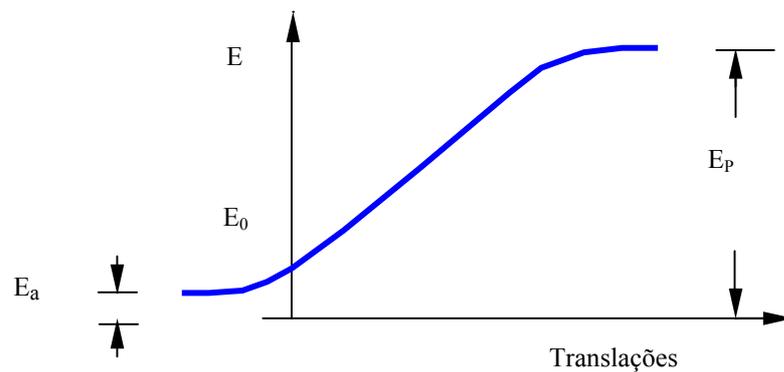


FIGURA 25 – Empuxo ativo, passivo e em repouso.

“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_y em um elemento de solo a uma profundidade z são independentes de x e representam as tensões principais ($\sigma_z = \gamma z$), onde γ é o peso específico do solo.

A experiência mostra que, no estado de repouso completo, tem-se:

$$\sigma_x / \sigma_y = \text{cte} = K_0,$$

onde K_0 é denominado coeficiente de empuxo em repouso. Se sobre a superfície do maciço é aplicada uma carga uniformemente distribuída p têm-se:

$$\sigma_z = \gamma z + p \text{ e } \sigma_x = K_0 \gamma z + K_0 p.$$

No caso do solo não sofrer expansão ou compressão lateral ($\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$), da teoria da elasticidade obtêm-se a equação:

$$\sigma_x = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z \quad \text{logo} \quad K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (07)$$

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 :

$$K_0 = 1 - \text{sen } \phi_i \quad (08)$$

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

“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).

3.3.4.1 Teoria de Rankine

Em sua teoria, publicada em 1857, Rankine estudou o estado de tensões dentro de um maciço granular, fofo, não coesivo. “Sua análise foi baseada na hipótese de que uma deformação no solo é suficiente para provocar uma mobilização da resistência de atrito e produzir um estado ativo se o solo sofre expansão e um estado passivo se ele sofre uma compressão”, GAIOTO (1979). Na determinação das pressões laterais sobre uma estrutura de arrimo foram assumidas algumas hipóteses para o material: *não coesivo, homogêneo, isotrópico, de extensão semi-infinita, com resistência ao cisalhamento, peso específico γ , ângulo de atrito ϕ_i , sendo a direção do empuxo paralela à superfície do livre do maciço*. 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, pode-se calcular os

coeficientes de empuxo ativo e passivo para um terrapleno horizontal, a partir das componentes normal e cisalhante, (figura 26). 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.

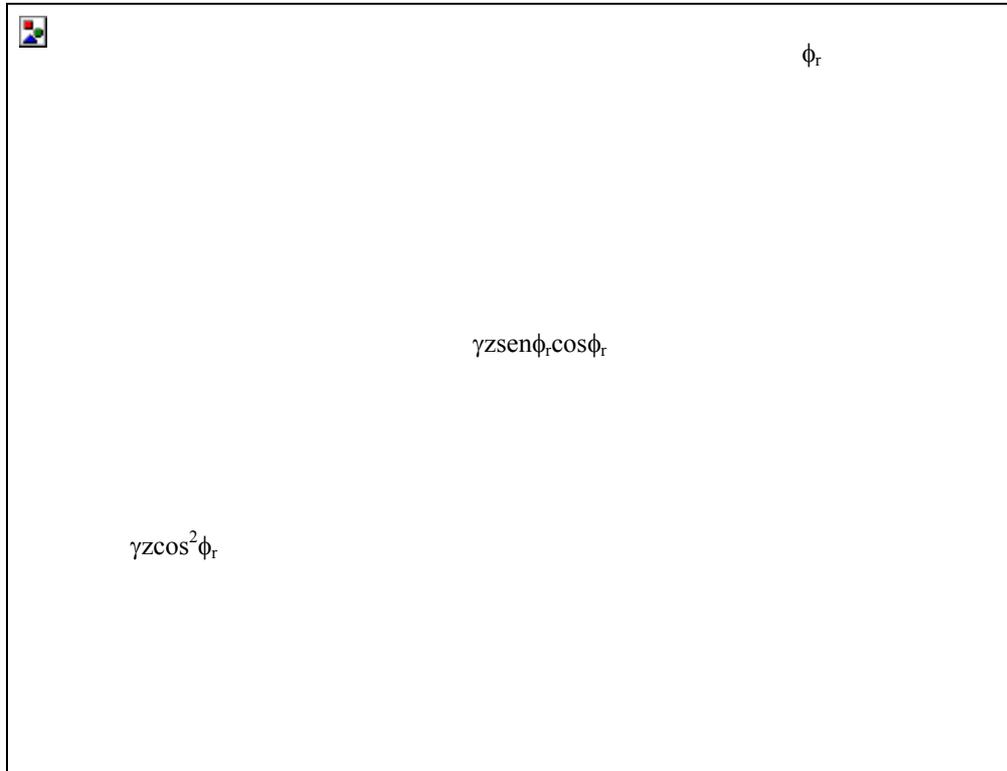


Figura 26- Representação gráfica das condições de pressão ativa e passiva. GAIOTO (1979).

As pressões laterais valem portanto:

$$\left. \begin{aligned} p_a &= K_a p_v = K_a \gamma z \cos \phi_r \\ p_p &= K_p p_v = K_p \gamma z \cos \phi_r \end{aligned} \right\} \quad (09)$$

onde : p_a = Pressões laterais ativas

p_p = Pressões laterais passivas

p_v = Pressões verticais

K_a = coeficiente de empuxo ativo

K_p = coeficiente de empuxo passivo

ϕ_r = 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 , valem :

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma h^2 K_a \cos \phi_r \quad (10)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 K_p \cos \phi_r \quad (11)$$

onde K_a é dado pela seguinte equação:

$$K_a = \frac{\cos \phi_r - \sqrt{\cos^2 \phi_r - \cos^2 \phi_i}}{\cos \phi_r + \sqrt{\cos^2 \phi_r - \cos^2 \phi_i}} \quad (12)$$

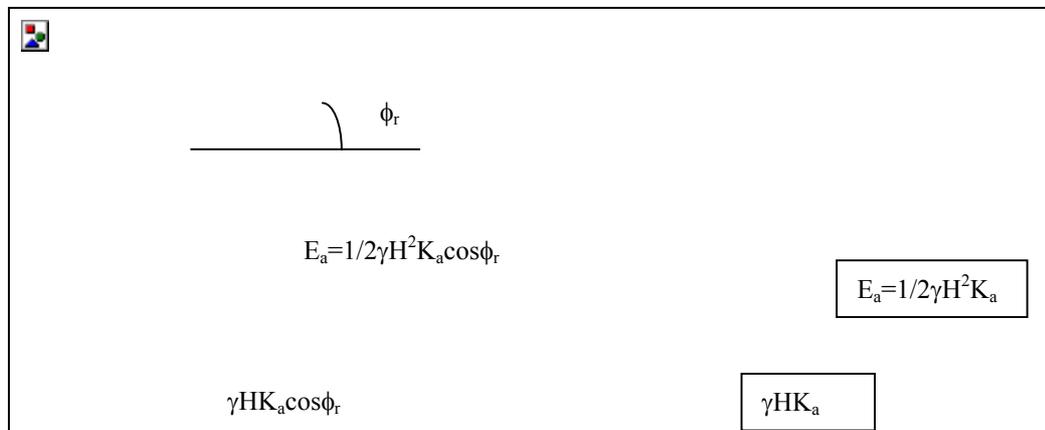


FIGURA 27 – Aplicação do empuxo para terraplenos inclinados e horizontais de acordo com Rankine. GAIOTO, (1979).

De acordo com SAFARIAN & HARRIS (1985) esta teoria foi desenvolvida inicialmente para muros de arrimo, não sendo um método suficientemente preciso para os bunkers. Se baseia em hipóteses simplificadoras, ignorando condições de contorno e negligenciando as forças de atrito. As formulações teóricas para bunkers são dadas para duas condições de armazenamento; a primeira para silos tremonhas (figura 28a) e a segunda para silos horizontais (figura 28b). Admite-se duas condições de armazenamento:

1 – Se a superfície do produto é horizontal temos a seguinte expressão para o cálculo das pressões :

$$p_h = K\gamma \quad (13)$$

$$p_v = \gamma$$

onde,

$$K = \frac{1 - \operatorname{sen} \phi_r}{1 + \operatorname{sen} \phi_r} \quad (14)$$

e a pressão estática normal a uma superfície inclinada ;

$$p_{v\alpha} = \gamma (\cos^2 \alpha + K \operatorname{sen}^2 \alpha) \quad (15)$$

2- Se o produto forma uma superfície inclinada, de acordo com um ângulo de repouso (ϕ_r), a pressão estática horizontal a uma dada altura é;

$$p_h = \gamma \cos^2 \phi_r \quad (16)$$

a pressão estática vertical é:

$$p_v = \gamma (y + a_0 \operatorname{tg} \phi_r) \quad (17)$$

e na tremonha :

$$p_{v\alpha} = \gamma \cos^2 \alpha (y + a_0 \operatorname{tg} \phi_r) + \gamma \cos^2 \alpha \operatorname{sen}^2 \alpha \quad (18)$$

as pressões de projeto são :

$$\left. \begin{aligned} p_{v_{des}} &= C d p_v \\ p_{h_{des}} &= C d p_h \\ p_{v\alpha_{des}} &= C d p_{v\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

para produtos de fluxo livre $Cd = 1,0$; para produtos coesivos $Cd = 1,25$

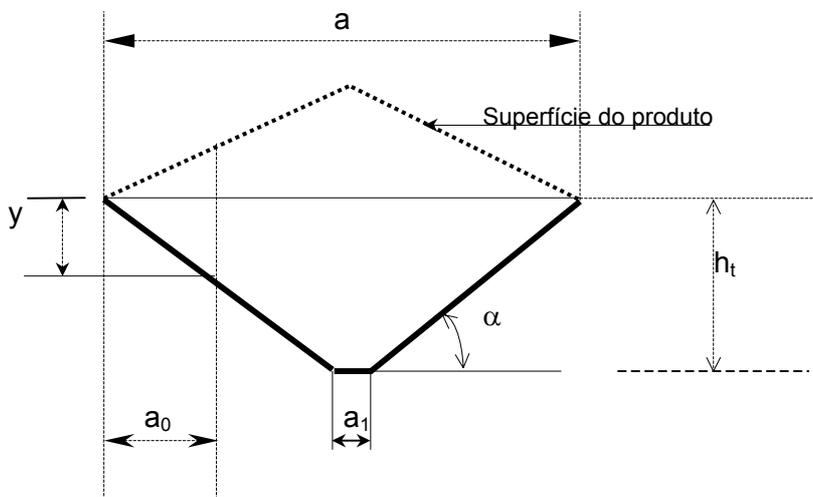


FIGURA 28(a) – Silos tremonha - Diagrama de pressão lateral de acordo com a teoria de Rankine.

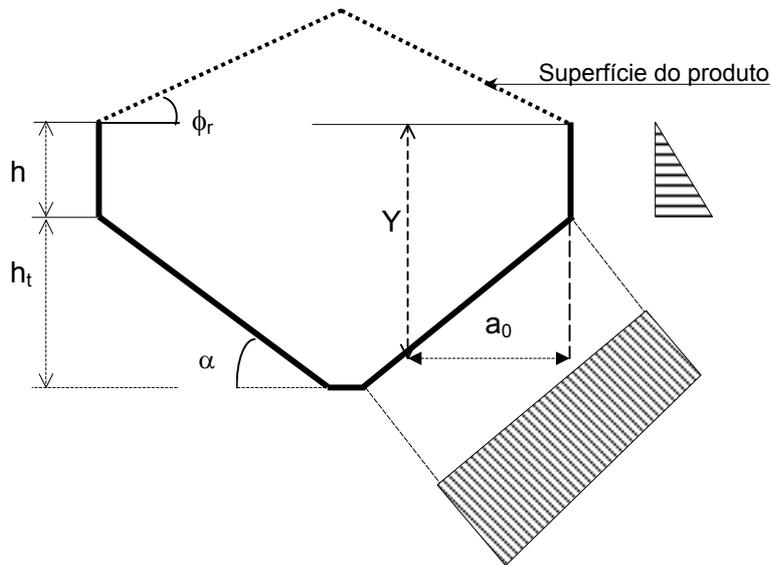


FIGURA 28(b) – Silos horizontais - Diagrama de pressão lateral de acordo com a teoria de Rankine.

3.3.4.2 Teoria de Coulomb

Esta teoria, publicada em 1776, 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.

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.

Em certos casos, quando pela teoria de Rankine são satisfeitas as condições limites da Teoria de Coulomb, chega-se a resultados idênticos (por exemplo, quando o ângulo de atrito entre o solo e a estrutura de arrimo é igual à inclinação do terrapleno e o tardo é vertical ($\beta = 90^\circ$). O valor do empuxo ativo é determinado pelas expressões :

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma h^2 k_a \quad (20)$$

$$K_a = \frac{\cos^2 \phi_i}{\cos \phi_w \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_i + \phi_w) \sin(\phi_i - \phi_r)}{\cos \phi_w \cos \phi_r}} \right]^2} \quad (21)$$

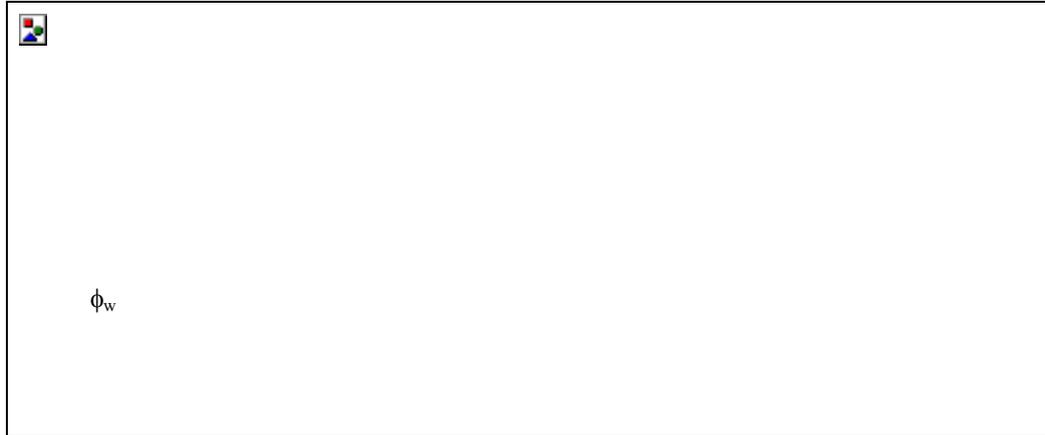


FIGURA 29 – Representação gráfica para o empuxo de acordo com Coulomb. GAIOTO (1979).

Onde ϕ_w = ângulo de atrito do material com a parede

β = ângulo de inclinação entre o tardoz e o material

α = ângulo entre a superfície horizontal e o plano de cisalhamento do maciço.

3.3.4.3 Teoria de Airy

W. Airy em 1897, desenvolveu uma teoria para o cálculo da força horizontal nas paredes. Aplicou-a no cálculo e construção de silos de madeira, aço e concreto armado utilizando vários produtos agrícolas. Foi o primeiro a definir silos baixos e silos altos e analisou o caso específico de silos horizontais. Para determinar esta força, Airy estabeleceu o equilíbrio de uma cunha de material ABC de espessura unitária, onde atuam as seguintes forças: o peso da cunha, a reação da massa de material restante atuando na superfície livre de deslizamento, considerando que ao longo deste plano a resistência ao cisalhamento deve estar totalmente mobilizada, e a reação da parede sobre a massa ensilada. Coulomb empregou a definição de planos de deslizamento na sua teoria de cálculo de empuxo de terra de forma semelhante. A teoria de Airy foi desenvolvida para as células baixas e altas. Para as baixas o plano de deslizamento emerge na superfície livre do produto ensilado antes de atingir qualquer parede da célula. No caso da célula alta o plano de deslizamento atinge uma das paredes antes da superfície livre do produto. Na

figura 30, são esquematizadas as seções transversais e os planos de deslizamento para definição de sua formulação teórica.

Fazendo-se o somatório de forças nas direções normal e paralela ao plano de deslizamento, encontra-se:

$$\begin{aligned} R - P \operatorname{sen} \theta &= (W - \mu'P) \cos \theta \\ \mu R + P \cos \theta &= (W - \mu'P) \operatorname{sen} \theta \end{aligned} \quad (22)$$

onde : θ : ângulo que o plano de deslizamento forma com a horizontal e que corresponde à máxima força lateral.

P : força horizontal na parede da célula, distribuída por unidade de comprimento do perímetro da seção transversal da massa ensilada.

R : componente na direção perpendicular ao plano de deslizamento da força reativa do maciço sobre o plano de deslizamento da cunha de espessura unitária.

W : peso da cunha do produto



FIGURA 30 – Planos de deslizamento do produto armazenado, para silos horizontais e verticais, de acordo com Airy. FILHO (1985), SAFARIAN & HARRYS (1985) e ROBERTS (1995).

O valor de P é encontrado a partir da forma da cunha, variando θ , que exerce a máxima pressão sobre a parede e para este valor de θ , a derivada de P em relação a θ deve ser nula. O valor da pressão máxima horizontal e a fórmula

que permite obter P em função da profundidade são dadas pelas expressões, obtidas a partir do valor da $\text{tg}\theta$.

$$P = \frac{\gamma}{2\text{tg}\theta} \frac{\text{tg}\theta - \mu}{(1 - \mu\mu') + (\mu + \mu')\text{tg}\theta} y^2 \quad (23)$$

$$\text{tg}\theta = \mu + \sqrt{\mu \frac{1 + \mu^2}{\mu + \mu'}}$$

Airy em um segundo estudo chegou seguinte formulação a partir de simplificações para o cálculo das pressões horizontais na parede da célula. Para células baixas ele obteve:

$$ph = \frac{\gamma y^2}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{\mu(\mu + \mu')} + \sqrt{1 + \mu^2}} \right)^2 \quad (24)$$

onde :

p_h : pressão horizontal na parede da célula, distribuída por unidade de comprimento do perímetro da seção transversal da massa ensilada.

γ : peso específico do material ensilado

μ : tg de ϕ , coeficiente de atrito interno do produto

μ' : tg de ϕ_w coeficiente de atrito entre o produto e as paredes da célula.

De acordo com GRAY & MANNING (1973), SAFARIAN & HARRYS (1985) e ROBERTS (1995) , a expressão (24) deve ser modificada, considerando na determinação das pressões horizontais o cálculo da variação da pressão horizontal com a profundidade (dph/dy). Na equação anterior, a força está sendo aplicada na profundidade y , o que não é correto. No equilíbrio da cunha do produto, ocorre uma sobreposição entre várias cunhas tomadas individualmente, o que fornece resultados diferenciados aos dados experimentais. FILHO (1985), observou que para silos com relação da altura do produto armazenado e altura da célula maior que 4, os valores da força vertical decrescem com o aumento da profundidade. A diferença entre o peso do material armazenado, a uma dada profundidade, e o somatório das forças causadas pelo atrito entre o produto até esta profundidade nos fornece o equilíbrio de forças na direção vertical. O valor da força vertical é menor que o calculado pela equação de Airy se houvesse a sobreposição, pois neste somatório calcula-se a influência do volume comum às várias cunhas de uma

vez. Dessa forma as equações das pressões horizontal e vertical no caso de células baixas são dadas a seguir:

$$ph = \gamma y \left(\frac{1}{\sqrt{\mu(\mu + \mu')} + \sqrt{1 + \mu^2}} \right)^2 \quad (25)$$

$$q = \frac{\gamma Ay - \mu' Up}{A} = \gamma y \left[\frac{1 - \mu' U}{A} y \left(\frac{1}{\sqrt{\mu(\mu + \mu')} + \sqrt{1 + \mu^2}} \right) \right]^2 \quad (26)$$

$$F_a = \mu' UP = \frac{\gamma \mu' U}{2} y^2 \left(\frac{1}{\sqrt{\mu(\mu + \mu')} + \sqrt{1 + \mu^2}} \right)^2 \quad (27)$$

GRAY & MANNING (1973), aplicaram as formulações de Airy no cálculo das pressões em silos quadrados de concreto para o armazenamento de trigo. Determinados os valores de μ e μ' , foi obtido o gráfico ilustrado na figura 31 variando a relação h/b . A posição de aplicação da força horizontal não é estabelecida pela teoria de Airy e dessa forma, puderam observar o comportamento da pressão por unidade de comprimento da parede em função da relação h/b . Pode-se observar que para pequenas relações h/b , o comportamento das pressões é linear. As equações de Airy são aplicadas para silos quadrados e retangulares enquanto que a equação de Janssen é aplicada para qualquer forma de silo.

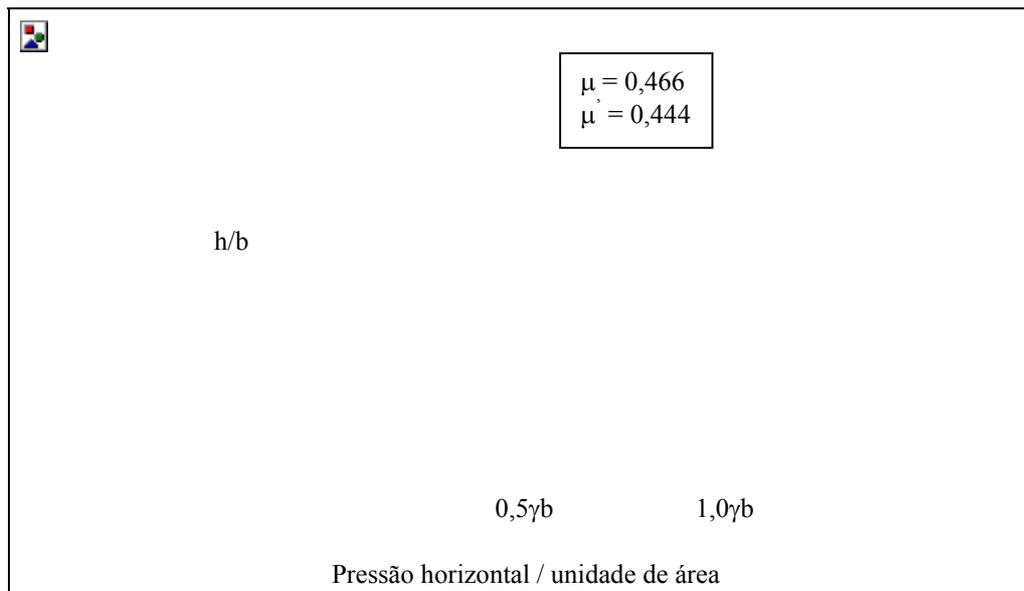


Figura 31 – Curva de pressão obtida através da teoria de Airy, em função da relação h/b .

3.3.4.4 Modelo empírico das pressões

Nos cálculos das pressões de produtos armazenados, inicialmente, não se considerava a variação das pressões ao longo da parede, quando o produto se encontrava em movimento. Alguns projetistas majoravam as pressões sem nenhum conhecimento do comportamento das pressões horizontais. De acordo com a teoria hidrostática todo o peso do produto seria suportado pelo fundo da célula, pois desprezava-se o atrito. Assim um recipiente destinado ao armazenamento de um líquido era inadequado para produtos sólidos de mesmo peso específico e as pressões horizontais sempre superiores às reais, conduzia a dimensionamentos antieconômicos das paredes.

Vários pesquisadores tem buscado hipóteses simplificadoras para o cálculo das pressões. De acordo com CALIL (1990), verificada a relação entre as pressões verticais e horizontais em ensaios de modelos, adotando o valor de K determinado experimentalmente para cada silo a ser projetado, a expressão para o cálculo das pressões horizontais é dada pela expressão: $p_h = \gamma h K$ também citada por Rankine na equação (13). O modelo empírico então se baseia na determinação do valor de K, de forma indireta ou experimentalmente.

Existem algumas divergências entre os pesquisadores quanto à determinação do valor de K. Uma das expressões mais aceitas foi proposta por KOENEN em 1896, sendo determinada com base no coeficiente de empuxo ativo da teoria de Rankine para empuxos de terra. Um importante contribuição para o assunto foi dada por AYUGA (1995) que define o valor de K em função do tipo de parede. O autor adota três equações para as condições a seguir:

- 1- Para o caso de paredes absolutamente lisas, $\phi_w = 0$, tem-se:

$$K = \frac{1 - \operatorname{sen} \phi_i}{1 + \operatorname{sen} \phi_i} \quad (28)$$

- 2- Para o caso de paredes muito rugosas, $\phi_i = \phi_w$, tem-se:

$$K = \frac{1 - \operatorname{sen}^2 \phi_i}{1 + \operatorname{sen}^2 \phi_i} \quad (29)$$

- 3- Para os casos intermediários, têm-se :

$$K = \frac{1 - m \cdot \operatorname{sen} \phi_i}{1 + m \cdot \operatorname{sen} \phi_i} \cos^2 \phi_w \quad (30)$$

onde ,

$$m = \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \phi_w}{\operatorname{tg}^2 \phi_i}} \quad (31)$$

Uma outra expressão para K é dada por FRAZER

$$\frac{1}{K} = \frac{1 + \operatorname{sen}^2 \phi_i}{\cos^2 \phi_i} + \frac{2 \operatorname{sen} \phi_i}{\cos^2 \phi_i} \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \phi_w}{\operatorname{tg}^2 \phi_i}} \quad (32)$$

A expressão adotada pela norma francesa está em função dos estados de carregamento e descarga central. No caso de carregamento adota-se a seguinte expressão:

$$K_1 = \frac{1 - m \operatorname{sen} \phi_i}{1 + m \operatorname{sen} \phi_i} \cos^2 \phi_w \quad (33)$$

sendo:

$$m = \sqrt{1 - \left(\frac{\operatorname{tg} \phi_w}{\operatorname{tg} \phi_i} \right)^2} \quad (34)$$

Para a descarga central adota-se a seguinte expressão $K = 1,4 \times K_1$.

A norma alemã, DIN 1055(1987), define o valor de K pela expressão:

$$K = 1,2 (1 - \operatorname{sen} \phi_i) \quad (35)$$

O fator 1,2 foi escolhido para garantir que em pequenas alturas do produto armazenado, ou seja, na parte superior do silo, resultem curvas de cargas mais completas. A norma Européia, ENV 1991-4 (1995), recomenda para o valor de K, a expressão abaixo para a determinação indireta do valor de K:

$$K = 1,1 (1 - \operatorname{sen} \phi_i) \quad (36)$$

A norma americana, ACI 313(1991), adota o valor de K de acordo com a expressão de Koenen. A norma Australiana, AS3774 (1996) adota a seguinte expressão para a determinação do valor de K:

$$K = \frac{1 + \operatorname{sen}^2 \phi_i - 2 \sqrt{(\operatorname{sen}^2 \phi_i - \mu^2 \cdot \operatorname{cos}^2 \phi_i)}}{4 \mu^2 + \operatorname{cos}^2 \phi_i} \geq 0,35 \quad (37)$$

sendo: $\mu = \operatorname{tg} \phi_w$

Podemos notar que o valor K está diretamente relacionado com o valor do ângulo de atrito interno (ϕ_i), através das equações matemáticas, que nos fornecem valores aproximados. As expressões 28 e 29, que relacionam os fatores como o ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), estão sendo mais aceitas para definir os limites inferior e superior para K, para dimensionamentos nos estados limites. Outras formulações mais complexas foram definidas relacionando a coesão ou adesão às paredes, mas evidências mostraram que estas estimativas não foram mais exatas que as acima descritas, ROTTER et al (1998).

3.3.4.5 Teoria de M. & A. Reimbert

Os irmãos Reimbert, calcularam a partir de dados experimentais e deduções teóricas as pressões laterais estáticas para células horizontais, baseados na teoria formulada em 1956. Considerando os silos horizontais de grande dimensões, comprimento e largura em relação à altura, o problema foi determinar as forças que agem sobre as paredes.

Segundo a teoria dos muros de arrimo, a primeira hipótese é que a distribuição do empuxo é proporcionalmente linear com a variação da altura. No segundo estudo, em 1987, os autores lançam uma segunda hipótese estabelecendo que a distribuição dos empuxos sobre as paredes verticais é hiperbólica em função da altura do produto ensilado. Desta forma, a distribuição das pressões em função da altura é linear para paredes consideradas indefinidas (silos horizontais). Para os silos divididos em células esta relação é considerada hiperbólica (silos verticais).

O equilíbrio de um maciço sustentado por uma parede vertical está compreendido em três regiões, mostradas na figura 32. A primeira região (1), corresponde ao ângulo de repouso ϕ_r e não influencia o empuxo exercido sobre a parede. A região (3), representa o prisma de cisalhamento que age contra a parede, formando um ângulo igual a $\pi/4 - \phi_r/3$, definido experimentalmente.

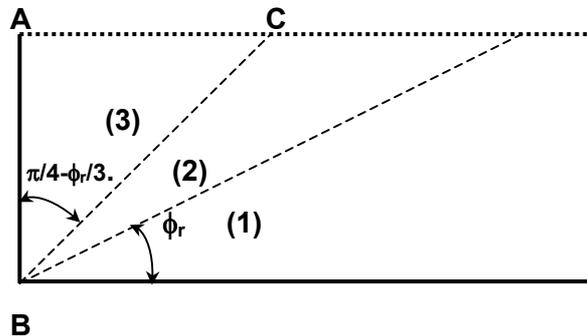


Figura 32- Representação do equilíbrio de uma cunha de um maciço granular.

Entre as duas regiões anteriores, existe a região (2), onde são depositados uma certa quantidade de produto, não acompanhando o ângulo de repouso e não exercem nenhuma influência sobre a parede de contenção.

Com base no plano de ruptura de um maciço são propostas as seguintes formulações para o cálculo das pressões laterais nas paredes. São considerados dois casos em que a superfície livre do maciço é horizontal e o outro quando a superfície é inclinada segundo o ângulo de repouso natural.

Caso 1 : A superfície livre do maciço é horizontal

Considerando o maciço da figura abaixo, consideremos os prismas de ruptura relativos em cada um dos muros AB e DE, definindo um região central, que não influencia o valor dos empuxos sobre cada muro. O valor da pressão horizontal é dado pela equação (38) :

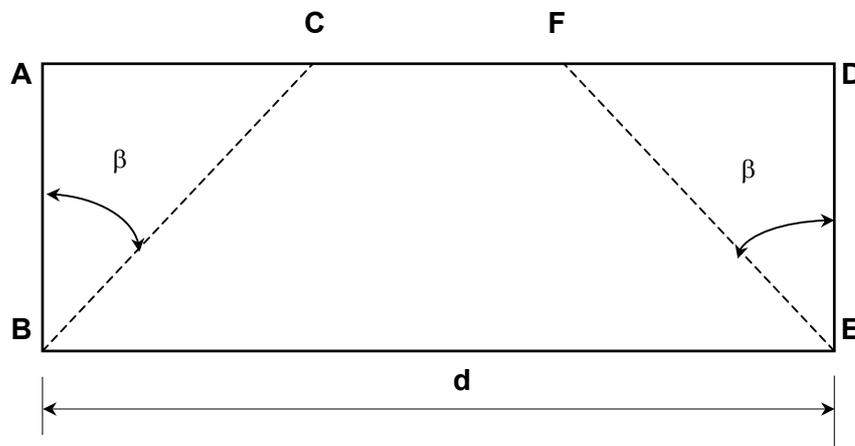


Figura 33 – Prismas de ruptura para um silo horizontal

O ângulos formados entre as paredes e o plano ruptura. ABC e DEF são dados pela expressão $\beta = \pi/4 - \phi_r/3$.

$$p_h = \frac{\gamma h^2}{2} \left(\frac{\pi - 2\phi_r}{\pi + 2\phi_r} \right)^2 \quad (38)$$

em função da equação anterior, deduz-se que:

$$d \geq 2htg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_r}{3}\right) \quad (39)$$

Caso 2 : A superfície livre de um maciço é inclinada segundo o ângulo de repouso.

Aqui as equações são definidas, considerando a região (3), correspondente à cunha de ruptura que se estende a uma distância d' da parede AB. Esta distância é dada pela equação a seguir:

$$d' = h \frac{\operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_r}{3}\right) \cos \phi_r}{\operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{2\phi_r}{3}\right)} \quad (40)$$

Os valores dos empuxos devem ser calculados sendo exercidos sobre as paredes de contenção.

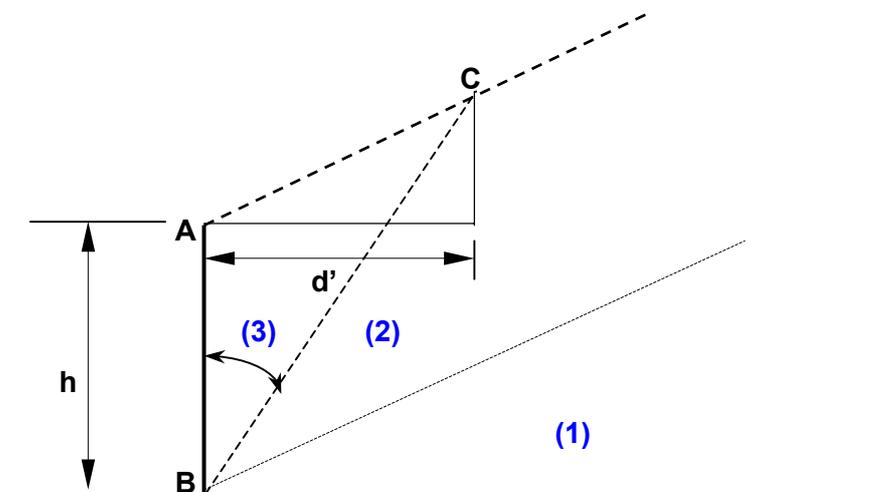


Figura 34 – Definição do prisma de ruptura para uma superfície inclinada.

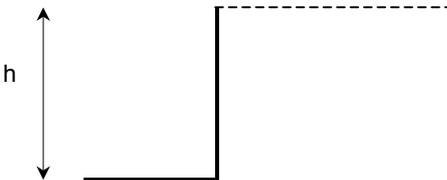
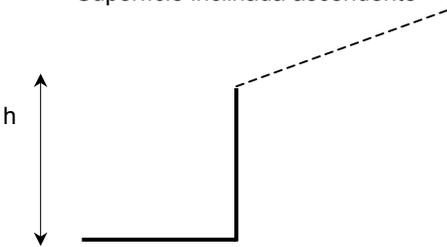
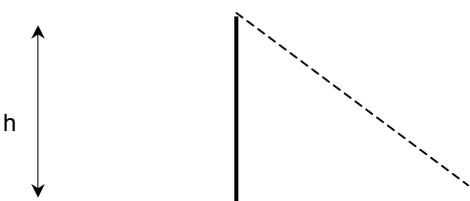
O valor da pressão é dado pela equação :

$$p_h = \frac{\gamma h^2}{2} \left(\frac{\pi - 2\phi_r}{\pi + 2\phi_r} \right)^2 \left(1 + \frac{2\phi_r}{\pi} \right) \quad (41)$$

Segundo a teoria, não se considera as sobrepensões de descarga. Dessa forma recomenda-se calcular as paredes sem majorar os valores de pressão dados pelas equações anteriores.

O emprego das equações de M. & A. REIMBERT pode ser resumido, em função das seguintes condições de carregamento das paredes, mostradas nos esquemas da tabela 05, a seguir.

TABELA 05 – Tipos de carregamento e modelo teórico segundo M.& A. Reimbert.

| TIPO DE CARREGAMENTO | EQUAÇÃO |
|---|--|
| <p>Superfície horizontal</p>  | $p_h = \frac{\gamma h^2}{2} \left(\frac{\pi - 2\phi_r}{\pi + 2\phi_r} \right)^2$ |
| <p>Superfície inclinada ascendente</p>  | $p_h = \frac{\gamma h^2}{2} \left(\frac{\pi - 2\phi_r}{\pi + 2\phi_r} \right)^2 \left(1 + \frac{2\phi_r}{\pi} \right)$ |
| <p>Superfície inclinada descendente</p>  | $p_h = \frac{\gamma h^2}{2} \left(\frac{\pi - 2\phi_r}{\pi + 2\phi_r} \right)^2 \left(1 - \frac{2\phi_r}{\pi} \right)$ |

3.3.5 Pressões nas paredes da tremonha

A seção transversal do fundo, é a principal responsável pelo êxito de funcionamento dos silos horizontais. Nos modelos observados, os silos com fundo em tremonha apresentam melhor desempenho no seu funcionamento, ficando evidente que os custos de operação são bem menores embora o custo de construção seja bem maior. É o tipo de fundo que provoca a mudança de direção do fluxo do produto armazenado para o túnel de descarga. As formas e rugosidades de suas paredes basicamente definem a facilidade de ocorrência do fluxo. Considerando a seção transversal dos silos horizontais de fundo “V” , duplo “V” e semi –“V”, elevados e não elevados, permiti-nos fazer uma analogia com os modelos teóricos para cálculos de pressão em tremonhas, já consagradas para os silos verticais.

3.3.5.1 Teoria de Walker

A teoria de Walker para o estudo de fluxo nos fornece as tensões na massa de um produto granular ou pulverulento em tremonhas e ainda os fatores críticos que asseguram a continuidade do fluxo gravitacional. O campo de tensões durante o fluxo de massa foi deduzido considerando que as forças agem numa camada elementar e ao longo da parede da tremonha. Quando consideramos o arco ou abóbada, assume-se que a resistência do grão ou pó é função somente das tensões locais que prevalecem até a ocorrência do fluxo. Na tremonha o produto é considerado sobreconsolidado, o que possibilita a formação de arcos.

A teoria de WALKER (1966) é bastante precisa para os cálculos no estado estático e dinâmico nas paredes da tremonha. No estado dinâmico esta teoria se baseia nas seguintes hipóteses :

- 1- As direções das tensões principais maior e menor estão no plano vertical próximo à seção da parede e estas definem o escorregamento do produto, independente da terceira tensão principal, perpendicular a este plano.
- 2- O produto deve escorregar e ser capaz de deslocar independentemente das variações transversais da tremonha.
- 3- O produto é de fluxo de livre e para fins de projeto o silo é dimensionado para fluxo de massa.

4- Supõe-se que as pressões verticais sobre o mesmo plano horizontal são constantes.

Admitindo-se as duas primeiras hipóteses, as tensões no produto adjacente, à parede da tremonha podem ser representadas pelo Círculo de Mohr que tangencia o lugar geométrico de escorregamento do produto. A partir da terceira hipótese, as tensões nas paredes devem ser representadas por um ponto do lugar geométrico de escorregamento da parede. A figura 35, ilustra a parede de uma tremonha fazendo um ângulo θ_1 com a vertical e a maior tensão principal formando um ângulo β com a normal à parede. As tensões sobre os vários planos são mostradas no círculo de Mohr, figura 35(b), onde “M” representa o plano de maior tensão principal, “W” o plano da parede e “Y” o plano vertical.

As relações abaixo são definidas geometricamente:

$$\beta = \left[\phi_w + \arcsen\left(\frac{\text{sen } \phi_w}{\text{sen } \phi_e}\right) \right] \quad (42)$$

$$B = \frac{\text{sen}(2\theta_1 + 2\beta) \text{sen } \phi_e}{[1 - \cos(2\theta_1 + 2\beta) \text{sen } \phi_e]} \quad (43)$$

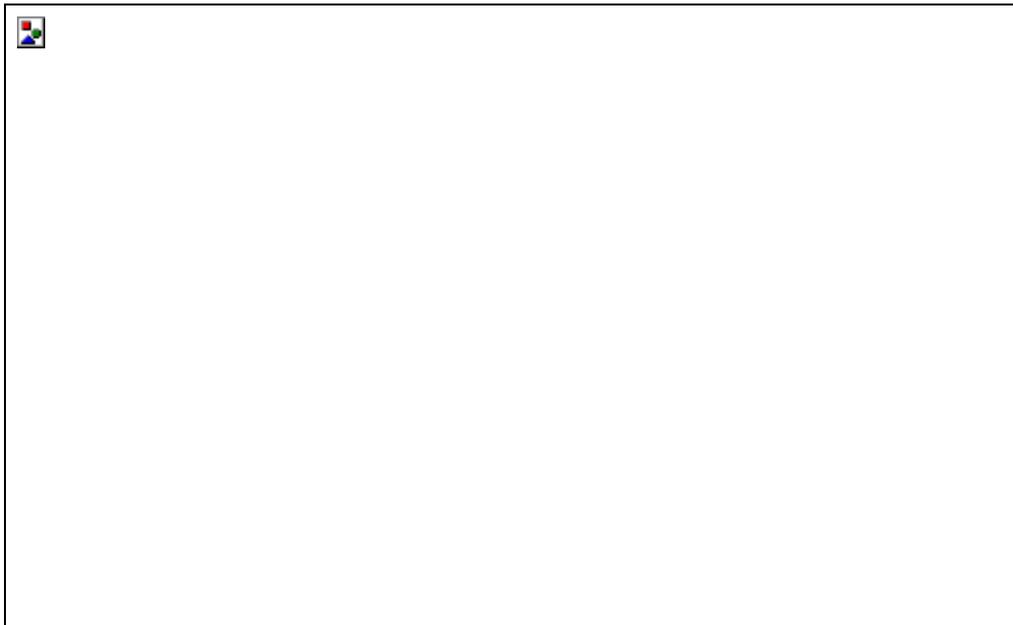


Figura 35 – (a)- Pressões sobre a parede. (b) Círculo de Mohr.(WALKER,1966)

Sendo p_{NT} a pressão normal à parede da tremonha e p_{VT} a pressão vertical média na tremonha, tem-se a seguinte relação :

$$k_2 = \frac{p_{NT}}{p_{VT}} = \frac{1 + \cos 2\beta \operatorname{sen} \phi_e}{1 - \operatorname{sen} \phi_e \cos(2\theta_1 + 2\beta)} \quad (44)$$

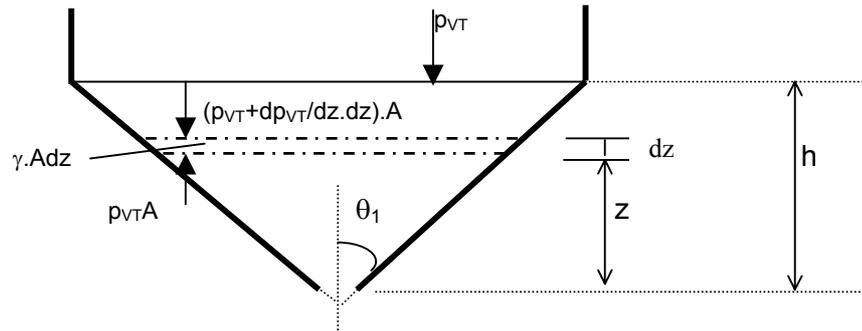


FIGURA 36 – Forças numa faixa elementar da tremonha. (WALKER, 1966)

Considerando-se o equilíbrio das forças atuantes sobre uma faixa elementar (figura 36) no interior de uma tremonha e, tomando-se como origem do sistema de eixos coordenados o vértice da tremonha, chega-se a equação abaixo fazendo-se γ , o peso específico do produto, “ l ” o perímetro e “ A ” a área da seção transversal desta faixa:

$$\frac{d \bar{p}_{VT}}{dz} = \frac{l}{A} B \bar{p}_{VT} - \gamma = \frac{2B \bar{p}_{VT}}{z \operatorname{tg} \phi_1} - \gamma \quad (45)$$

A partir de deduções de equações diferenciais, Walker definiu a seguinte expressão para o cálculo das pressões verticais médias dinâmicas. PISKUNOV (1973) apud ARAÚJO (1997).

Para $z = H$, tem-se $\bar{p}_{VT} = p_{vt}$

$$\bar{p}_{VT} = \frac{\gamma H}{(n-1)} \left[\left(\frac{z}{H} \right) - \left(\frac{z}{H} \right)^{(n-1)} \right] + p_{vt} \left(\frac{z}{H} \right)^n \quad (46)$$

$$n = \left(\frac{1+m}{\operatorname{tg}\theta_1} \right) BD \quad (47)$$

Nas deduções a generalização acima faz concluir que se m for igual a zero, o n será usado para tremonhas em cunha, e se m for igual a 1, o n será usado para tremonhas cônicas ou piramidais.

Fazendo-se $n = 0$ na equação (47), obtêm-se a equação particular para o caso das pressões verticais nas paredes das tremonhas com o produto no estado estático.

$$\bar{p}_{VT} = \gamma y + p_{vt} \quad (48)$$

O cálculo da pressão normal, quando o produto está no estado estático, é calculado a partir de uma nova relação K_3 , considerando a figura abaixo.

$$K_3 = \frac{\operatorname{sen} 2\theta_1 \cos \phi_w}{\operatorname{sen}(2\theta_1 + \phi_w) + \operatorname{sen} \phi_w} \quad (49)$$



FIGURA 37 – (a)- Estado de Tensões para o produto em repouso. (b)- Representação gráfica do círculo de Mohr

GAYLORD & GAYLORD (1984), descrevem alguns trabalhos realizados para a medição de pressão em tremonhas comparando com o modelo teórico de Walker. O autor cita os ensaios conduzidos por Walker e Blanchard em tremonhas cônicas e piramidais com capacidade de 5 toneladas com ângulos de 15, 30 e 45 graus. O diâmetro da boca de saída das tremonhas era de 15,24cm enquanto que a parte superior apresentava uma área de 183cm². O produto utilizado para o carregamento foi o carvão com os seguintes valores de propriedades - $\phi_e = 41^\circ$ e $\phi_w = 16^\circ$ (para o aço inoxidável). Para a medição das pressões foram usadas sondas do tipo diafragma com transdutores de deslocamento. A figura abaixo ilustra o comportamento dos dados obtidos experimentalmente, comparados com os valores teóricos do modelo de Walker. Os resultados observados se ajustaram ao modelo, quando se utilizou as tremonhas com inclinação de 15 e 30 graus, tanto para carregamento estáticos quanto dinâmicos.



FIGURA - 38 - Comparação entre o modelo teórico de Walker e os resultados experimentais –(a) tremonha – (b) pressão estática, (c) e (d) pressões dinâmicas.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É correto afirmar, após vários relatos e o atual estágio em que se encontram as pesquisas que, as pressões exercidas pelos produtos armazenados, dependem além das propriedades físicas, do tipo de fluxo, do método de operação do silo. O desconhecimento do comportamento das pressões levou vários pesquisadores a

estudar os seus efeitos após vários silos terem apresentado problemas como fissuras, colapsos das paredes e recalques das fundações.

Alguns trabalhos informam a ocorrência de falhas e nos remete a novas análises. BLIGHT (1986), descreve vários problemas levantados em silos por alguns pesquisadores. Theimer em 1969 avaliou o estado de 14 silos de concreto que apresentavam fissuras, indicando o prenúncio de mal funcionamento; Sadler em 1980 descreveu 15 casos de colapsos parciais ou totais nos Estados Unidos em silos de armazenamento para diversos produtos, sugerindo que tais ocorrências se verificaram devido as variações das estimativas das pressões nas paredes dos silos.

As ações devidas ao produto armazenado podem ser distribuídas assimetricamente e este fato não é adequadamente considerado nas teorias das ações em silos. CALIL (1990), recomenda que a utilização das normas, seja feita com cautela pois em algumas a sua prática é recente e de única edição e ainda devem ser observadas as restrições impostas por elas como por exemplo : a ACI (1983) somente para silos de concreto, e a DIN 1055 (1987) para os silos altos.

De acordo com CALIL(1990), a vantagem de se tomar como base as regras dos códigos em observações experimentais é que haverá muitas vezes uma boa relação entre as pressões preditas e aquelas as quais estão sendo observadas. Uma dificuldade imediata aparece devido ao limitado campo de aplicação dos experimentos disponíveis.

Quanto às normas, poucas são as que tratam do assunto específico. As ações em silos horizontais são destacadas apenas pela norma canadense (CFBC, 1983) que trata especificamente da avaliação de pressões de produtos forrageiros. A maior parte das normas se baseiam em teorias desenvolvidas, merecendo destaque a de Janssen (1895), Walker (1966), Airy (1897), e Jenike (1968,1973) Reimbert (1976). Todas estas teorias assumem que a pressão na parede varia somente com a altura no silo. Além disso, todas exceto as teorias de Airy e Reimbert, tratam da condição de equilíbrio no topo do material armazenado, tornando difícil de serem aplicadas com confiança em silos baixos. A maioria dos projetistas tem adotado a teorias de Coulomb, Rankine e Reimbert & Reimbert para o cálculo das pressões nas paredes de silos horizontais. Não existem relatos de observações experimentais para avaliação das pressões nas paredes e na tremonha destas estruturas.

CAPÍTULO IV

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho e atendimento dos objetivos propostos foram seguidas as atividades abaixo descritas, adotando-se a metodologia que foi dividida em duas etapas : - **Teórica** ; cálculo das pressões utilizando os modelos teóricos; - **Experimental** ; medições diretas de pressões através de células em modelo piloto e em silo real com a determinação da relação $K (p_h/p_v)$ das pressões horizontais e verticais.

4.1 CÁLCULO DAS PRESSÕES

4.1.1 Pressões nas paredes dos silos

As pressões foram calculadas utilizando-se de alguns parâmetros dos produtos como; peso específico, ângulo de atrito interno, ângulo de atrito com a parede e o coeficiente K com as combinações propostas por CALIL et al (1997). Nos cálculos das pressões laterais levou-se em consideração a rigidez da estrutura, a deslocabilidade da mesma (rotação ou translação), e a deslocabilidade relativa entre a estrutura e o maciço.

Os modelos teóricos empregados foram : Coulomb, Rankine, Airy, Reimbert & Reimbert e as normas internacionais : AS 3774 (1996) e ANSI (1996). Os modelos e as normas descritos foram empregadas por serem os únicos que tratam das pressões para este tipo de estrutura.

4.1.2 Pressões na tremonha (fundo do silo)

Foram calculadas as pressões no fundo de um silo horizontal elevado. Para efeito comparativo com os valores empíricos foram estimadas as pressões de acordo com a teoria de Walker e a norma Australiana e o método de Safarian & Harris.

4.2 LEVANTAMENTO DAS PRINCIPAIS INSTALAÇÕES

Foram realizadas várias visitas técnicas de inspeção com levantamento das principais unidades armazenadoras com o objetivo de caracterizar os sistemas construtivos adotados, as patologias e terapias ocorridas e problemas gerais de manuseio dos produtos. O critério de escolha das instalações visitadas considerou a capacidade de armazenamento, a importância da instalação na região produtora, as patologias, o tipo de projeto executado.

- 1 - Instalações da CONAB: Ponta Grossa (PR) e Uberaba (MG).
- 2 - Instalações da CEAGESP (SP) : São Joaquim da Barra e Araraquara.
- 3 - Instalações da CIA Mogiana de Óleos Vegetais - Orlandia (SP).
- 4 - Instalações da COPACENTRO – Dourados –(MS)
- 5- Instalações da unidade de Boa Vista (CNAGA) – Sumaré (SP).

De cada visita técnica resultou um relatório, onde são caracterizadas as estruturas identificando detalhes de construção, patologias e terapias, equipamentos e um breve relato histórico das unidades e sua importância estratégica para o armazenamento, processamento e escoamento da produção e uma ficha técnica apresentada no ANEXO I, desta pesquisa.

O objetivo principal destas visitas foi o levantamento das unidades, para a posteriori definir as condições de ensaio em função das disponibilidades e limitações, como produto armazenado, período de safra, equipamentos disponíveis, mão-de-obra especializada, entre outros.

4.3 ENSAIOS

4.3.1 Determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados

Nos projetos de silos, a determinação das propriedades do produto armazenado é de grande importância para a definição das ações e fluxo devidas as características inerentes de cada produto. O objetivo deste ensaio foi determinar o ângulo de atrito interno, o ângulo de atrito do produto com a parede e o peso específico. Para a determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados, foi empregada a metodologia proposta por MILANI (1993). Para isto foi utilizada a máquina de cisalhamento, disponível no LaMEM / EESC – USP. Os valores do peso específico, umidade e temperatura foram fornecidos pelo de Laboratório de propriedades da CEAGESP-Araraquara.

4.3.1.1 Produtos

Os produtos caracterizados foram areia seca ao ar e milho ($U = 12,9\%$). A areia foi utilizada para os ensaios do modelo piloto, devido ao seu alto peso específico e para o ensaio do silo real foi utilizado o milho devido à sua grande disponibilidade por ocasião da realização do ensaio e ainda por apresentar um valor de peso específico característico dos produtos agrícolas. Foram retiradas amostras aleatórias para os dois produtos, em diversos pontos da massa de grãos.

Os produtos foram considerados granulares de fluxo livre de acordo com a classificação feita em função das dimensões do diâmetro de suas partículas, baseada nas considerações de CALIL JR. (1984):

TABELA 06 – Classificação dos produtos de acordo com a granulometria

| | |
|-----------------------|--------------------------------------|
| $D > 0,42 \text{ mm}$ | Granulares |
| $0,42 < D < 0,149$ | Pulverulentos coesivos |
| $0,149 < D < 0,079$ | Pulverulentos coesivos finos |
| $D < 0,079$ | Pulverulentos coesivos extra – finos |

Fonte: Calil (1984)

4.3.1.2 Máquina de Ensaio de cisalhamento

A máquina de ensaio para a determinação das propriedades dos produtos foi a TSG 70-140 - AVT, construída com base no aparelho de cisalhamento de Jenike (Jenike Shear Cell). Para execução dos ensaios foram utilizados as seguintes referências :

- 1 - Operating Instructions for Translational Shear tester TSG 70-140
- 2 - Manual SSTT(Standart shear Testing Technique). Trabalho desenvolvido pela Federação Européia de Engenharia Química WPMS – 1989.
- 3 - JENIKE & JOHANSON (1979): Instruções de operações do aparelho de fator fluxo e da bancada de consolidação.
- 4 - MILANI (1993): Determinação das propriedades de produtos armazenados para o projeto de pressões e fluxo em silos.

4.3.1.3 – Método

Neste ensaio os produtos passaram por dois estágios; no primeiro o sólido sofre rotação em células de cisalhamento sob pressão com a finalidade de uniformizar a amostra. No segundo estágio, chamado de pré-shear, uma camada do sólido é levada à deformação sob pressão e tensão cisalhante, até atingir um nível estável de cisalhamento.

Foram realizados três carregamentos, para a obtenção do lugar geométrico instantâneo de deslizamento, através da pressão σ , no pré – cisalhamento (pré-shear), $W_p = 100N, 70N$ e $50N$ e correspondentes a estes carregamentos, têm-se os carregamentos de cisalhamento, W_s , apresentados na tabela abaixo. De posse dos resultados dos ensaios com areia e milho, utilizou-se o software YOLCUS, desenvolvido por CALIL (1989), onde os resultados são mostrados no capítulo V.

TABELA 07- Carregamentos - padrão (N), para determinação do lugar geométrico.

| W_p | W_s | W_p | W_s | W_p | W_s |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 100 | 70 | 70 | 50 | 50 | 35 |
| 100 | 50 | 70 | 35 | 50 | 20 |
| 100 | 35 | 70 | 20 | 50 | 10 |

4.3.1.4 Material da parede

Para os testes, dois tipos de materiais de parede foram utilizados, o primeiro foi o concreto (liso e rugoso), e o segundo a chapa de compensado com o objetivo de submeter o produto armazenado aos 3 tipos diferentes de superfície e avaliar o seu comportamento em condições reais.

Para a obtenção do IWYL (lugar geométrico instantâneo de deslizamento com a parede) de cada produto, foram utilizadas 6 cargas de consolidação de cisalhamento (shear) dadas por Ww (50, 40, 30, 20, 10, e 0 N). Nesta fase, utilizou-se a mesma célula de cisalhamento do IYL e três tipos de materiais de parede a ser testada; concreto liso e rugoso para o silo real e compensado para o modelo piloto.

4.3.2 Determinação direta das pressões

As medições de pressão em silos apresentaram grande avanço nos últimos anos através das medidas diretas obtidas pelo desenvolvimento das células de pressão e dos sistemas de aquisição de dados mais estáveis e rápidos. A utilização destes equipamentos tornou-se indispensável no estudo do comportamento dos meios granulares e pulverulentos, tais como solos e produtos diversos destinados ao armazenamento agrícola e industrial.

A escolha do equipamento se baseou na análise das exigências mínimas impostas pelo fabricantes e das condições de ensaio. O tipo de célula de pressão, sua calibração, a posição das células nas paredes, as condições para se realizar as medições (sistemas de carregamento e descarga, tipo de fluxo) e o método de coleta de dados foram os requisitos considerados.

4.3.2.1 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o de marca LINX (ADS – 2000), composto por uma placa controladora e placas de condicionador de sinais, formando um sistema compacto e de fácil manuseio. O controlador do ADS-2000 utiliza um circuito integrado projetado para diversas aplicações que é conectado ao computador com interface paralela (usada para impressoras). A escolha pelo

emprego deste sistema foi pela sua aplicabilidade em ensaios de carregamentos estáticos e dinâmicos, bem como a sua disponibilidade no LaMEM. As principais características são apresentadas a seguir:

Controlador AC-2120 : É o elemento principal do sistema, realizando todas as tarefas de comunicação com o computador, leitura e controle de placas condicionadoras.

Condicionador de sinais AI-2160 : Apresenta as seguintes características gerais:

- 16 canais de entrada
- Entrada implementada com amplificador de instrumentação integrado. Ganhos pré-definidos: x1, x10, x50 e x600 (selecionáveis por jumpers).
- Sensor de temperatura de junta fria para compensação de medida de temperatura.

Alimentação de sensores : Para alimentação de sensores, o AI-2160 possui 4 fontes com saída regulada configurável em tensão ou corrente. A tensão de saída pode ser selecionada entre 10 ; 7,5 ; 5,0 e 2,5 volts. Quando configurada, cada fonte serve a 4 canais de entrada analógica.

4.3.2.2 Células de pressão- características gerais

O desenvolvimento das técnicas e dos equipamentos de medição de pressão se deve à evolução das pesquisas em mecânica dos solos. Com a substituição dos simplificados manômetros por sensores de maior precisão, as análises das pesquisas empíricas se tornaram mais refinadas. Vários modelos de células vem sendo desenvolvidos juntamente com as técnicas de instalação, o que tem permitido a execução de ensaios "*in loco*", sem o comprometimento do processamento dos produtos e da integridade das estruturas.

A utilização destas células, projetadas com novos materiais, tem confirmado as hipóteses de cálculo adotadas e provendo os técnicos e pesquisadores de informações para os projetos futuros. Os novos modelos de sensores tem proporcionado a avaliação das tensões que ocorrem em uma estrutura, durante ou após a construção, isolando-se uma parte da mesma. Em medições dinâmicas as células de pressão são projetadas para se obter as respostas mais rápidas, como por exemplo no carregamento e descarga dos silos, GEOKON (1998).

De forma geral, as células de pressão são compostas por duas partes: sensor e transdutor. Também podem ser chamadas de transdutores de pressão ou sensores de pressão.

Os transdutores de pressão são instrumentos que convertem pressão em um sinal elétrico, através de medida de deslocamento, deformação ou resposta piezoelétrica. Os transdutores são classificados conforme o tipo de medição convertida em pressão: *tipo - deslocamento*, LVDT e manômetro; *tipo - diafragma* com strain gage e sensor com fio de arame vibrante; *tipo - semiconductor*. Este último é o mais moderno devido as vantagens apresentadas: alto módulo de elasticidade, alta frequência de ressonância, linearidade e baixa histerese, (DALLY et al,1984).

Categorias e aplicações

As células de pressão aplicadas em medições de pressão em produtos armazenados estão divididas em duas categorias, conforme a sua instalação. Aqui destacamos duas categorias básicas de células, a primeira chamamos de ***célula inserida na massa*** e a segunda, ***célula de contato***.

As células inseridas são instaladas para determinar a distribuição, magnitude, e direção da pressão total dentro de uma barragem de terra ou dentro de massa de grãos. As aplicações para as células de contato incluem medidas de pressão contra muros de contenção e retenção, fundações rasas, etc.

Células inseridas na massa

Existem dois tipos básicos de células de pressão para esta categoria: células de diafragma e células hidráulicas.

A célula tipo diafragma é composta por uma membrana circular que, apoiada em um anel de extremidade rígida, se deforma pela pressão externa do produto. A deformação é medida por resistência elétrica ou fio de arame vibrante, instalados internamente no transdutor, figura 38(a).

O tipo de célula hidráulica consiste em duas placas de aço retangulares ou circulares soldados em seu contorno, tendo entre elas cavidades preenchidas de forma pressurizada por um fluido. O fluido utilizado para o preenchimento da célula pode ser água, óleo, álcool, dependendo da aplicação, considerando os efeitos da temperatura.

O corpo da célula está ligado a um transdutor. A pressão que age externamente entra em equilíbrio com a pressão induzida ao líquido interno que preenche a cavidade interna da célula. As células podem ter uma ou duas faces ativas, permitindo a coleta de sinais na região vizinha às duas faces onde foi instalada.

As configurações das células do tipo hidráulica a serem embutidas na massa são mostradas na figura 39(b), indicando os componentes de atuação.

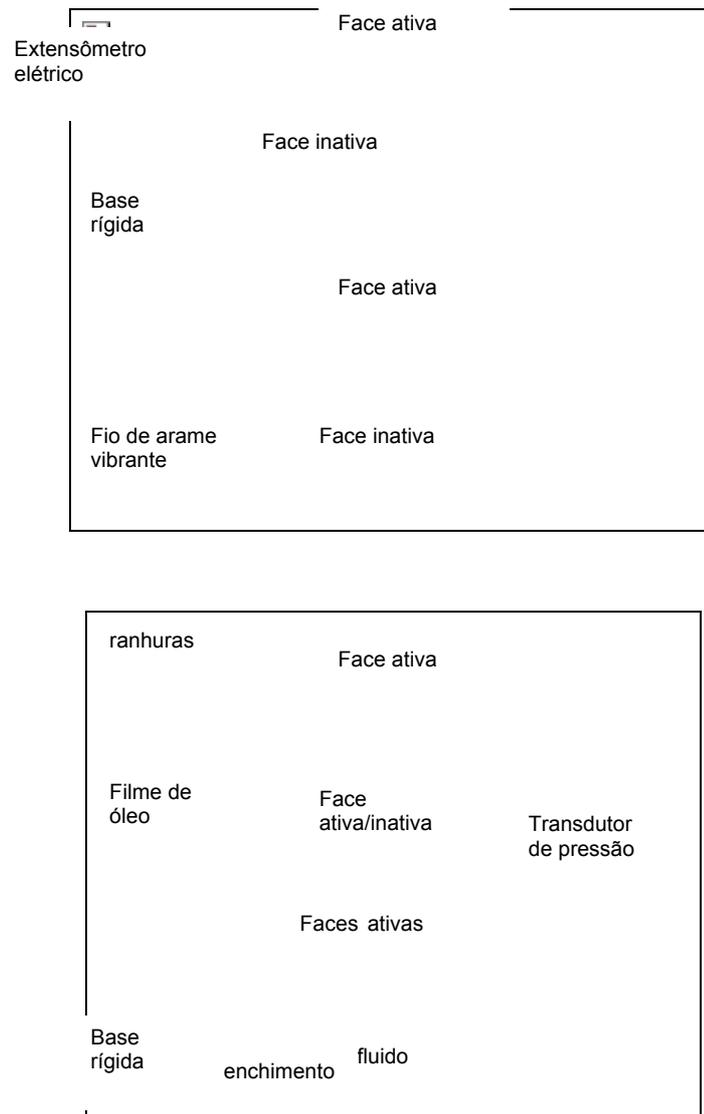


FIGURA 39 – Tipos básicos de células de pressão – (a) células de diafragma (b) células hidráulicas

As células com uma única face ativa são relativamente espessas (2,5 – 6,0 mm). As vezes são feitos entalhes nas bordas do anel para aumentar sua flexibilidade e dessa forma a face ativa tende a trabalhar como pistão. As células podem apresentar as duas faces ativas com a mesma espessura. A camada de fluido é fina (0,5 – 2,0 mm), de forma que rigidez da célula é maior na região próxima das bordas e a célula instalada experimenta mínimos efeitos de expansão térmica e contração do líquido. Um outro tipo de célula hidráulica é fabricado com duas chapas finas de metal. A camada de líquido é mais espessa (2,5 – 10mm) e a célula é menos rígida o que a torna mais susceptível aos efeitos da temperatura. Algumas avaliações dos modelos de células de pressão, critérios de projetos e construção são mostrados por BROWN (1977), COBERT et al (1971), HVORSLEV (1976) e ainda pela INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS – ISRM – (1981).

Células de contato

Estas células são utilizadas com grande eficiência para medir as pressões em elementos estruturais como paredes de contenção. As células utilizadas para medir pressão na massa, podem ser aplicadas nas medições em contato com as paredes. Alguns cuidados na instalação destas células devem ser tomados por apresentarem duas faces ativas. Em medições já realizadas, ocorreram interferências na face em contato com a superfície da parede e algumas recomendações são feitas para a sua instalação. Um dos cuidados é a colocação de uma manta de borracha entre a face da célula e a superfície da parede, o que permite a melhor distribuição da pressão sobre a superfície da célula, DUNNICLIFF & GREEN (1988). O modelo de células embutidas pode ser usado como célula de contato. Algumas restrições são feitas para as células do tipo hidráulica de baixa rigidez pois estão sujeitas às variações de temperatura. A célula de diafragma com duas faces ativas é recomendável para a condição de carregamentos não uniformes e variações de temperatura que possam vir a ocorrer entre a superfície de concreto e o produto.

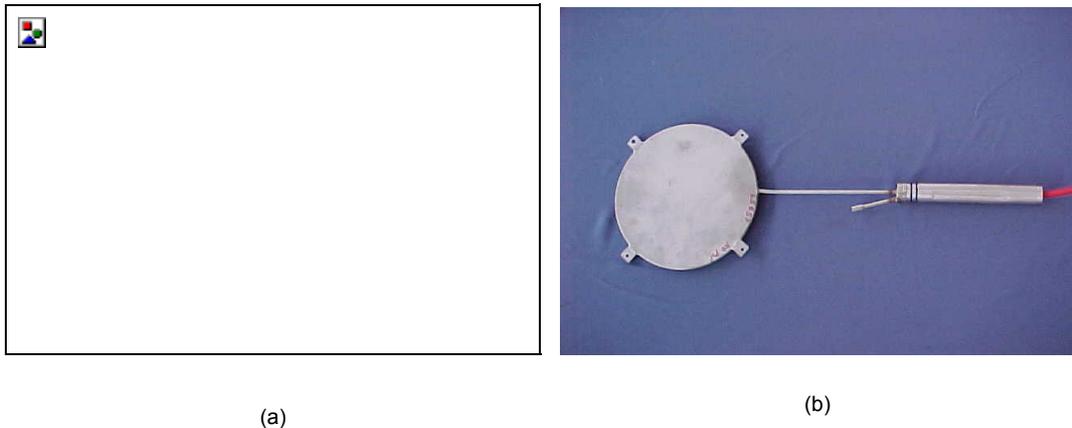


FIGURA 40 - Modelos de célula EPC – (a) tipo diafragma. (b) – tipo hidráulica

Detalhes gerais de instalação

A instalação das células de pressão depende dos objetivos do ensaio, atentando para o número de células e sua distribuição no silo. Alguns fatores como o tipo de fluxo que podem promover picos de pressão localizados ou mesmo locais de interesse para análise estrutural foram escolhidos.

As células de pressão são instaladas de modo que o contato com a parede fosse o melhor possível. Detalhes são mostrados a seguir. Nas medições dinâmicas é importante verificar o número de células usadas e resposta de medição. A sensibilidade, frequência, tempo de resposta e a faixa de pressão são itens importantes na escolha do sensor.

Alguns métodos de instalação são propostos por DI BIAGIO & MYRVOLL (1985), que recomendam a colocação da célula sobre uma placa quadrada de 60cm, inserida na massa. A célula do tipo diafragma com uma face ativa é fixada à placa de aço ou concreto. A vantagem desta instalação é que a distribuição da pressão é uniforme. Outra vantagem é que não ocorre mudanças de orientação da célula durante as fases de carregamento e descarga do silo, figura (41). Outra maneira de instalar as células de pressão do tipo contato, é alojando-a na parede onde serão feitas as medições. As células podem ser fixadas durante a concretagem da parede ou executando aberturas, após a concretagem. Em alguns casos o segundo procedimento pode comprometer a estrutura. Um terceiro método de instalação é recomendado com a colocação de uma manta de borracha ou camada de epoxi para minimizar os efeitos da rugosidade da parede, ISRM (1981).

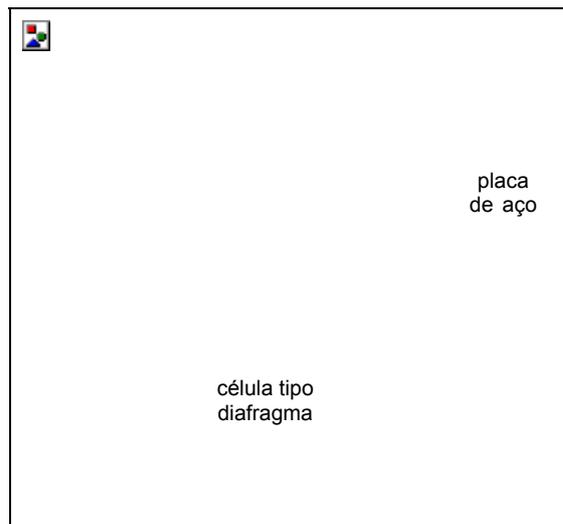


FIGURA 41 – Instalação da célula de pressão sobre placas. (DUNNICLIFF e GREEN, 1994)

Célula de pressão : modelo utilizado

Para a medição das pressões na massa de grãos e nas paredes do modelo piloto foi utilizado o modelo de célula, do tipo hidráulica – EPC 3500-1-100 (GEOKON). São montadas com duas placas circulares de aço inoxidável- 304, soldadas em seu contorno com diâmetro de 22,86cm e espessura de 6,35mm. Apresentam uma faixa de pressão que varia de 0 a 700kPa, com sensibilidade de 0,175kPa (700/4000) com duas faces ativas. Seguindo as curvas de calibração em anexo, as células apresentaram um fator gage de aproximadamente 7kPa/mV/V e precisão de +/- 0,5%. A resistência da ponte para o modelo é de 5000Ω, considerando que o sensor é aplicado para baixas pressões. A faixa de temperatura para sua aplicação está entre os limites – 40 a +150°C.

Fatores observados na instalação e medição

Alguns cuidados devem ser tomados para que não haja interferências na coleta de dados. O de maior importância é a conformação da célula e problemas de instalação criando mudanças no estado de tensão na interface *célula - produto* e *célula - superfície da parede*. A tabela 08 fornece as principais medidas de correção dos prováveis erros que podem ocorrer durante as medições de pressão.

TABELA -08- Principais fatores que afetam as medições das células de pressão.

| Fator | Descrição do erro | Método de correção |
|---|--|--|
| Relação espessura/diâmetro | Altera o campo de tensões ao redor da célula | $e/d < 1/10$ |
| Relação entre a rigidez da célula e do produto (solo, cereais, etc) | Registros abaixo ou acima dos valores reais de tensão | Dimensionamento da célula para alta rigidez e uso do fator de correção |
| Tamanho da célula | Células muito pequenas estão sujeitas ao efeito de escala e posicionamento incorreto | Tamanho adequado : $\phi = 230-300$ mm |
| Comportamento das tensões e deformações do produto | Influência das condições de confinamento | Calibração das células nas condições mais próximas de uso |
| Efeitos de localização | Alteração das propriedades do produto e campo de tensões ao redor da célula | Técnicas de instalação minimizam estes efeitos |
| Excentricidade, não uniformidade e pontos de carga | Tamanho dos grãos dos produtos e carregamento incorreto | Aumento do tamanho da célula e uso de células hidráulicas |
| Proximidade de estruturas e outros instrumentos | Interação dos campos de tensão dos instrumentos e estruturas causam erros | Espaçamento adequado. Instalação nos pontos de interesse. |
| Orientação das células | Mudança de orientação alteram as leituras | Métodos de localização das células que minimizem os efeitos de mudança de orientação. |
| Concentração de tensões nas bordas das células | Obtenção de dados incorretos em função da rigidez relativa entre a célula e o material | São feitas ranhuras na face ativa das células e utiliza-se camadas mais espessas de líquido. |
| Deflexão da face ativa | Deflexão excessiva da face ativa pode promover mudanças na distribuição de tensões | Ocorrem nas células do tipo diafragma. Os projetos devem considerar tais efeitos. |
| Localização das tensões | Sobretensões podem ocorrer quando ocorre compactação do material | É importante que a célula e o transdutor sejam dimensionados para suportar as sobrepressões |
| Temperatura | Gradientes de temperaturas podem causar distorções das leituras | Aplicação do fator de correção na calibração. Para os nossos ensaios foi desnecessário. |
| Medidas de tensões dinâmicas | Tempo de resposta, frequência e inércia das células causam erros. | Uso correto da célula e do transdutor juntamente com a calibração dinâmica correta. |

Fonte: DUNNICLIFF & GRENN (1994).

4.3.3 Calibração e testes das células de pressão

Foram testadas e calibradas 20 células de pressão do tipo hidráulica modelo EPC – 3500-1-100, utilizando o sistema de aquisição de dados (LINX). Para que este sistema fosse empregado algumas mudanças de configuração foram necessárias para obtenção dos valores de calibração fornecidos pelo fabricante. Nos canais utilizou-se a configuração de ponte completa, tensão de excitação de 10 volts e ganho do sinal igual 10. Na calibração foi utilizada a metodologia proposta por BLIGHT et al (1996), seguindo a montagem descrita a seguir. No sistema foram usados um anel dinamométrico com capacidade de 2 toneladas para as leituras das cargas através de um atuador hidráulico. A célula de pressão foi colocada sobre um manta de borracha e sobre a face superior da mesma um disco de madeira e duas mantas de borracha. Esta montagem é sugerida para melhor distribuição das pressões em toda a superfície da célula. Foram realizadas duas repetições para cada célula com coleta dos dados durante o carregamento e descarga. A montagem dos equipamentos para a calibração das células de pressão são mostradas nas figuras 42 (a) e (b) abaixo. Os resultados da calibração são apresentados no capítulo V, indicando o comportamento das células de pressão adotadas e confrontando os resultados de laboratório com os do fabricante. O processamento e tratamento dos dados foi feito pelo software AQD5 para o ambiente WINDOWS. A tabela de calibração para as células de pressão é mostrada no ANEXO II, deste trabalho, indicando o fator para cada sensor individualmente.

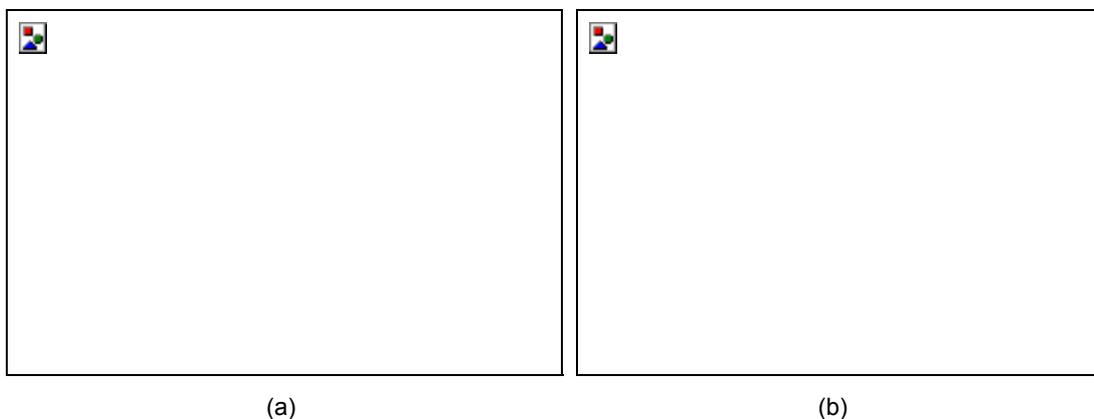


FIGURA 42 – Calibração das células de pressão. (a) Sistema de aquisição de dados (LINX), conectado ao Notebook. (b) Mantas de borracha nas faces da célula. Montagem para aplicação de carregamentos utilizando um anel dinamométrico ($k = 1,815 \text{ kg/div.}$).

4.3.4 Cálculo e ensaio do modelo piloto

Seguindo o projeto de um silo horizontal elevado de fundo V, foi calculado e construído um modelo piloto. Este foi montado em chapa de compensado e a estrutura de sustentação em madeira maciça de ipê, com capacidade para 5 toneladas. Os trabalhos de montagem foram realizados pelos técnicos da marcenaria do LaMEM, seguindo as etapas de corte, furação, pré-montagem e fixação dos parafusos. Nos cálculos foi empregado o peso específico da areia seca ($\gamma = 15,6\text{kN/m}^3$), determinado no LaMEM. O desenvolvimento dos cálculos e as fases de montagem são mostradas detalhadamente no ANEXO 3, deste trabalho.

4.3.4.1 Instalação das células de pressão no modelo

A instrumentação do modelo é mostrada no esquema da figura 43, indicando a posição das células para medição das pressões. Na primeira fase do ensaio foram instaladas 16 células de pressão do modelo EPC 3500-1-100. O esquema de instalação indica as células posicionadas nas paredes do silo e na tremonha, de forma simétrica, figura 44(a). Duas células (11,12) foram instaladas dentro da massa do produto (areia) na posição vertical, figura 44(b), direcionadas ortogonalmente, para medição das pressões horizontais e avaliação da variação do valor de K na seção transversal do modelo. Na segunda fase, a direção das células (1, 2, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 11, 12) foi alterada para medição das pressões verticais, exceto as das células instaladas na parede da tremonha. Foram realizadas 2 repetições para cada fase de ensaio. Na tabela 12 são indicadas as posições das células. Para a instalação das células, entre a face da célula e a parede foi colocada uma manta de borracha. Esta recomendação permite a melhor distribuição das tensões sobre a superfície da célula, devido às imperfeições de superfície, TAKEYA*, (1999). A utilização da areia se justifica, pois este produto apresenta peso específico elevado, sendo de fácil obtenção, apresentando características de produto granular e melhor distribuição das pressões, o que é de grande vantagem para aplicação de ensaios em modelos.

Os terminais das células foram conectados ao sistema de aquisição de dados e este último ao notebook. O tratamento de dados foi feito pelo software AQD5 (LINX) para ambiente WINDOWS.

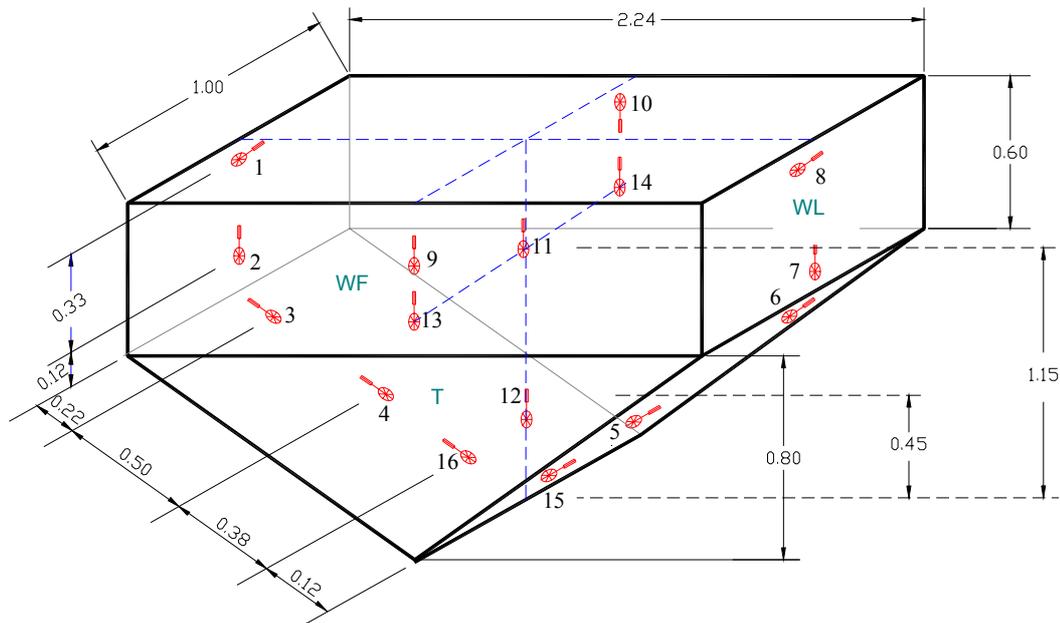


FIGURA 43- Disposição das células de pressão no modelo piloto

TABELA 09- Posicionamento das células - Simbologia para indicação.

| CÉLULA – EPC | POSIÇÃO 1 | POSIÇÃO 2 |
|--------------|-----------|-----------|
| 01 | WL1 | WL1h |
| 02 | WL2 | WL2h |
| 03 | T1 | - |
| 04 | T2 | - |
| 05 | T2 | - |
| 06 | T1 | - |
| 07 | WL2 | WL2h |
| 08 | WL1 | WL1h |
| 09 | WF1 | WF1h |
| 10 | WF1 | WF1h |
| 11 | C1 | C1h |
| 12 | C2 | C2h |
| 13 | WF2 | WF2h |
| 14 | WF2 | WF2h |
| 15 | T3 | - |
| 16 | T3 | - |

LEGENDA:

W = paredes. L1 e L2 = laterais e F1 e F2 = frontais

T = tremonha, C = centro (inserida na massa dos grãos)

h = indica que a célula foi instalada na posição horizontal para medir pressões verticais

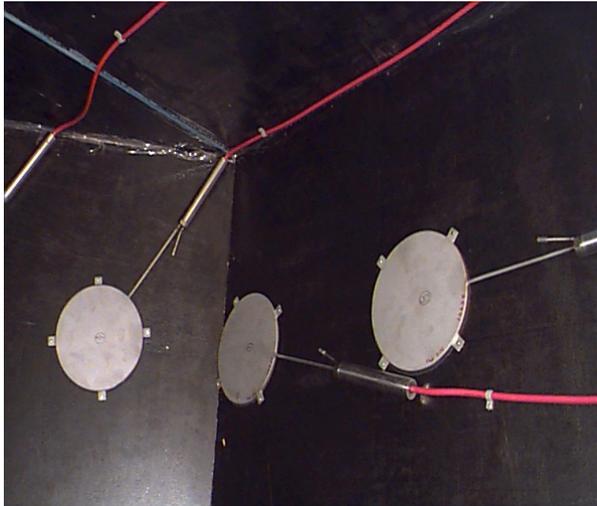


FIGURA 44(a) – Instalação das células de pressão nas paredes e na tremonha do modelo piloto

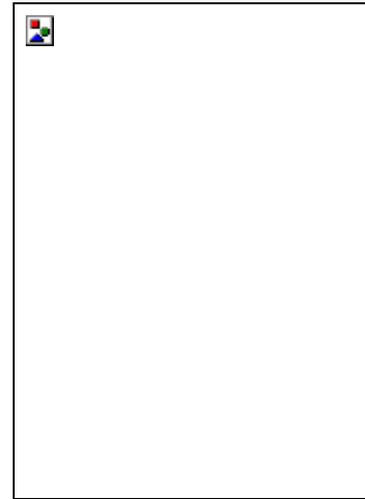


FIGURA 44 (b) – Instalação das células centrais para medição das pressões na massa de grãos na seção transversal

4.3.4.2 Ensaio

Com o objetivo de determinar as pressões estáticas no modelo piloto foram realizados três repetições de carregamento para medir as pressões normais às paredes e um carregamento para medição das pressões verticais. Os valores foram coletados no decorrer do carregamento e no período de 24 horas de armazenamento. Este procedimento teve como objetivo avaliar as pressões após o carregamento considerando os efeitos de consolidação do produto.



FIGURA 45 – Montagem do modelo



FIGURA 46– Instrumentação do modelo

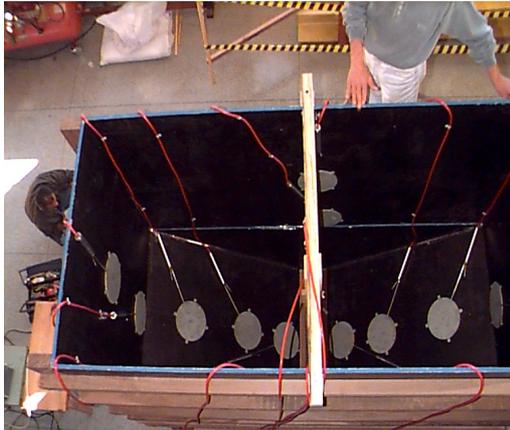


FIGURA 47 – Disposição das células dentro do modelo



FIGURA 48 – Execução do ensaio do modelo

4.3.5 Ensaio em silo horizontal elevado

4.3.5.1 Informações básicas sobre ensaios em silos reais (*in loco*)

Algumas informações básicas devem ser fornecidas para melhor entendimento da montagem, instalação dos equipamentos e condução dos ensaios. Devem iniciar com uma breve descrição da localização do silo, principais formas e dimensões, o material estrutural, a capacidade de armazenamento, o produto a ser armazenado e as formas de enchimento e esvaziamento do silo. No casos de silos industriais é interessante obter alguns dados históricos como: idade, tipos de produtos já armazenados, a ocorrência de algum problema estrutural são dados importantes para avaliação geral das condições de ensaio. As circunstâncias de ocorrência dos danos, sua localização bem como os métodos de reparação passam a ser fatores que devem ser considerados. Em silos de concreto a ocorrência de fissuras e imperfeições devem ser verificadas. As descontinuidades e rugosidades das paredes podem alterar a velocidade e o tipo de fluxo do produto e ainda influenciar as pressões nas paredes. Em silos multicelulares é importante informar sobre utilização das células vizinhas, forma de enchimento e esvaziamento durante os ensaios que estão sendo conduzidos. Informações sobre o tipo de fundação (dimensões, localização e número das estacas) e propriedades do solo também são importantes, pois formam a base da estrutura de reação durante a execução dos ensaios.

4.3.5.2 Detalhes do silo

Para avaliação direta das pressões um silo horizontal elevado de concreto armado instalado na CEAGESP – Araraquara/(SP), foi instrumentado. Esta unidade foi escolhida devido à proximidade e condições técnicas para execução do ensaio, sabendo-se que as características geométricas são comuns às unidades em estudo. Construída em 1977 e mantendo-se em operação até os dias atuais sua capacidade total é de 20.000t, dividida em 10 células de 2.000t. A estrutura de sustentação é do tipo viga-parede, onde se apoia a tremonha. A obra foi executada utilizando o processo de formas trepantes, tornando a estrutura monolítica sendo o silo considerado hermético. O sistema de carregamento centrado é feito através de elevadores de canecas (sentido vertical) localizados na torre do silo e correias transportadoras (sentido horizontal), localizadas em sua parte superior com uma vazão de 180t/hora. A descarga é feita através de saídas múltiplas localizadas no vértice de uma tremonha em cunha, que conduzem o produto até uma correia transportadora, localizada no túnel sob a tremonha, retornando o produto até os elevadores de canecas. Outras saídas também são localizadas nas paredes das tremonhas. As dimensões externas da unidade são; comprimento total = 100m e largura = 23m. O fundo em tremonha apresenta paredes de 35cm de espessura sendo as paredes laterais e das divisórias dos séptos de 20cm.

4.3.5.3 Instrumentação

Foram instaladas 16 células de pressão (EPC-3500-1-100/GEOKON) para avaliação das ações de carregamentos e descargas dos silos. As células foram fixadas nas paredes por meio de parafusos fixados sobre pressão. Entre a parede do silo e a face da célula foi colocada uma manta de borracha para permitir um contato perfeito de toda a superfície da célula e superfície da parede. Este detalhe de montagem permite que a distribuição das tensões seja uniforme em toda a área da célula. As células foram instaladas nas paredes e na tremonha do silo conforme a disposição mostrada nas figuras 49(b) e 50. Quatro células foram instaladas nas paredes divisórias das células e duas foram instaladas na massa de grãos, fixadas ao cabo de termometria com dispositivo para garantir que a célula não mudasse sua orientação. As temperaturas foram monitoradas por cabos de termometria instalados no silo.

4.3.5.4 Ensaio

Os ensaios foram realizados *in loco*, sendo a estrutura de reação, a própria fundação. As ações foram aplicadas pelo carregamento do silo utilizando o produto milho para o armazenamento.

O monitoramento das pressões ocorreu durante um ciclo completo correspondendo às fases de carregamento, armazenamento e descarga do silo, através do sistema de aquisição de dados analógico/digital de marca LINX, acoplado a um computador equipado com o software AQD5. Os dados experimentais foram confrontados com os valores teóricos estimados para os valores de pressão nas paredes e no fundo do silo (tremonha).

Após a calibração das células ligadas ao sistema de aquisição LINX, iniciou-se a primeira etapa de carregamento do silo. O carregamento foi realizado através da transilagem do produto de uma célula para a que estava instrumentada. A transilagem foi realizada utilizando dois elevadores de canecas e quatro correias transportadoras, duas localizadas no túnel inferior e duas localizadas no túnel superior. A figura 49(c), ilustra as duas correias superiores em fase de carregamento. A vazão do sistema de transporte era de 180ton/hora o que permitiu o carregamento total do silo em aproximadamente 11 horas. Foram realizados duas repetições para o ciclo completo – carregamento, armazenamento e descarga. O ensaio durante as três fases permitiu a coleta de dados, para as duas condições de carregamento, estático e dinâmico. Para a avaliação do carregamento estático foram coletados dados durante 52 horas de armazenamento. Para averiguação do efeito da aeração da massa do produto, foram coletados dados de pressão durante 2 horas de insuflação de ar. A temperatura externa medida próxima à parede do silo foi de 26°C e as temperaturas na massa de grãos variaram dentro de uma faixa de temperatura de 22° a 25°C. De acordo com as curvas de calibração fornecidas pelo fabricante não houve necessidade de correção das leituras para este gradiente de temperatura observado. O sistema de aquisição foi configurado para uma frequência de 10 hertz com coletas de dados a cada 5 segundos. Tal configuração permitiu monitorar o ensaio dinâmico para condição de carregamento e descarga aumentando a resposta do sistema. Os dados são mostrados no capítulo VI de resultados e análise dos dados.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados das fases teórica e experimental são mostrados no capítulo V (Resultados e discussão). Os cálculos das pressões utilizando os modelos teóricos são comparados entre si dadas as condições de aplicação.

O relatório técnico das visitas são apresentados em anexo, enquanto os resultados da fase experimental são divididos em três grupos para melhor compreensão: 1- Determinação das propriedades físicas dos produtos; 2- Ensaio no modelo piloto e 3- Ensaio no silo horizontal. São caracterizadas as células de pressão juntamente com as curvas de calibração comparadas com as informações do fabricante. Os resultados dos ensaios do modelo serviram, além da determinação do valor de K, como ensaios preliminares para a segunda fase da pesquisa que foi o ensaio do silo horizontal. Os valores de pressão estática e dinâmica são apresentados para cada célula, individualmente, nos ensaios do modelo piloto e do silo horizontal, respectivamente.

Após a realização das visitas nas unidades, pôde-se avaliar as condições de realização de ensaio. A escolha do silo da CEAGESP- Araraquara foi devido às condições impostas para a execução da fase experimental, como a proximidade do local, o pessoal técnico especializado e a disponibilidade de produto. Outra razão também a ser ressaltada é que os silos horizontais apresentam as mesmas características geométricas e de funcionamento, o que nos permitiu avaliar de forma generalizada as ações nestas unidades.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 PROPRIEDADES DOS PRODUTOS ARMAZENADOS

Como comentado anteriormente, a escolha dos produtos foi feita em função de suas propriedades para o ensaio do modelo e pela disponibilidade e quantidade necessárias para a execução do ensaio em escala real.

A utilização da máquina de cisalhamento (TSG 70-140) é justificada pela sua aceitação no meio internacional e indicação das normas para a determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados. Para cálculo e análise dos parâmetros utilizou-se o software YLOCUS, desenvolvido por CALIL(1994).

Para os valores dos ângulos de atrito interno e de atrito com a parede foram definidos o valor superior e inferior a serem aplicados nos cálculos das pressões nas paredes do corpo e da tremonha do silo, de acordo com CALIL et al (1997). Os resultados são apresentados nas tabelas 10 e 11 a seguir.

TABELA 10- Resultados obtidos nos ensaios de propriedades do milho

| Propriedades | | |
|--|------------------------|-----------------|
| Peso específico (γ) | 7,59 kN/m ³ | |
| Ângulo de atrito interno (ϕ_i) | 32 – 35 ⁰ | |
| Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) | Liso | Rugoso |
| | 25 ⁰ | 29 ⁰ |
| Teor de umidade | 12,9% | |

TABELA11 – Resultados obtidos nos ensaios de propriedades da areia

| Propriedades | |
|---|-----------------------------------|
| Peso específico (γ) | 15,6 kN/m ³ |
| Ângulo de atrito interno (ϕ_i) | 36 ^o – 39 ^o |
| Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) (chapa de compensado) | 20 ^o - 22 ^o |

Os resultados das propriedades físicas dos produtos estão de acordo com os valores tabelados pelas normas internacionais. Estes parâmetros determinados inicialmente, na primeira fase experimental, foram aplicados nos cálculos das pressões, considerando-se os valores inferior e superior fornecidos, considerando a variabilidade das propriedades.

5.2 CÁLCULO DAS PRESSÕES E DO COEFICIENTE K

São apresentados e discutidos os valores obtidos no cálculo do coeficiente K e das pressões através das teorias apresentadas no capítulo III. O coeficiente K foi determinado de forma indireta levando em consideração o ângulo de atrito interno. As pressões horizontais foram calculadas na condição estática de carregamento para o modelo piloto, enquanto que para o silo horizontal foram analisadas sob as condições estática e dinâmica. Adota-se a condição estática como aquela correspondente às pressões de carregamento. A condição dinâmica é considerada durante o escoamento do produto, quando são produzidas as máximas pressões. Normalmente esta condição ocorre na descarga, com início logo após a abertura da boca da tremonha.

5.2.1 Determinação indireta do coeficiente K

Os valores fornecidos pelas normas internacionais são mostrados na tabela 13. Os valores do ângulo de atrito interno são o menor e o maior valor observados entre as normas internacionais.

Nas teorias das pressões a relação entre as pressões verticais e horizontais são consideradas constantes na seção transversal e ao longo da altura do silo.

TABELA 12- Valores do coeficiente K fornecidos pelas normas internacionais.

| Coeficiente K | | | | | |
|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
| ϕ_i (graus) | Milho | | ϕ_i (graus) | Areia | |
| 28 | 0,361 | 0,640 | 25 | 0,406 | 0,697 |
| 32 | 0,307 | 0,561 | 40 | 0,222 | 0,415 |

Os valores de K, determinados indiretamente, são apresentados na tabela 13. Os limites inferior e superior foram calculados considerando as equações 28 e 29 (cap. III), consideradas de consenso pelo pesquisadores para o cálculo das pressões para os estados limites ,(CALIL,1990).

TABELA 13 – Limites de K em função do ângulo de atrito interno.

| Coeficiente K | | | | | |
|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
| ϕ_i (graus) | Milho | | ϕ_i (graus) | Areia | |
| 32 | 0,307 | 0,560 | 36 | 0,260 | 0,486 |
| 35 | 0,271 | 0,505 | 39 | 0,227 | 0,433 |

Como pode ser observado há grandes diferenças quanto a estimativa dos valores de K para um mesmo produto em função das variações do valor do ângulo de atrito interno. Ao compararmos com os valores tabelados pela norma ISO 1697 (cap III, tabela 04), verificamos que o milho está na classe 1, com o valor de $K = 0,3$ e a areia na classe 5, com um valor de $K = 0,75$, superando as demais estimativas.

Na tremonha, considerando a teoria de Walker e a norma Australiana, os valores de K foram estimados para a condição estática no modelo piloto e nas condições dinâmica e estática para o silo horizontal, em função dos produtos armazenados utilizados nos ensaios. Foram consideradas as características geométricas da tremonha e ainda o ângulo atrito interno.

Em função dos valores propostos pelas normas internacionais e os valores calculados foi definido um intervalo para os valores limites de K; $0,706 \leq K \leq 0,7969$.

5.2.2 Pressões na parede do modelo piloto

Como pode ser observado na figura 51, o gráfico ilustra o comportamento das pressões ativas nas paredes do modelo piloto. Os modelos teóricos forneceram um relação linear em função da altura exceto para o modelo de Reimbert & Reimbert. As equações de Coulomb, Rankine forneceram um valor médio de 1,34 kPa a uma altura 0,2 metros. Considerando a altura efetiva de 0,705m observa-se que os valores estimados pelos modelos são : a norma ANSI/96, forneceu um valor de pressão de 5,5kPa, enquanto que o valor calculado por Reimbert foi igual a 1,29kPa e Safarian & Harris de 8,25kPa e para a norma Australiana o valor é 2,87kPa. As pressões médias para os modelos de Coulomb, Airy e Rankine é de 4,8kPa. Portanto, o intervalo das estimativas das pressões horizontais varia de 1,29 a 8,25kPa, o que confirma a grande variabilidade e incertezas envolvidas nos cálculos.

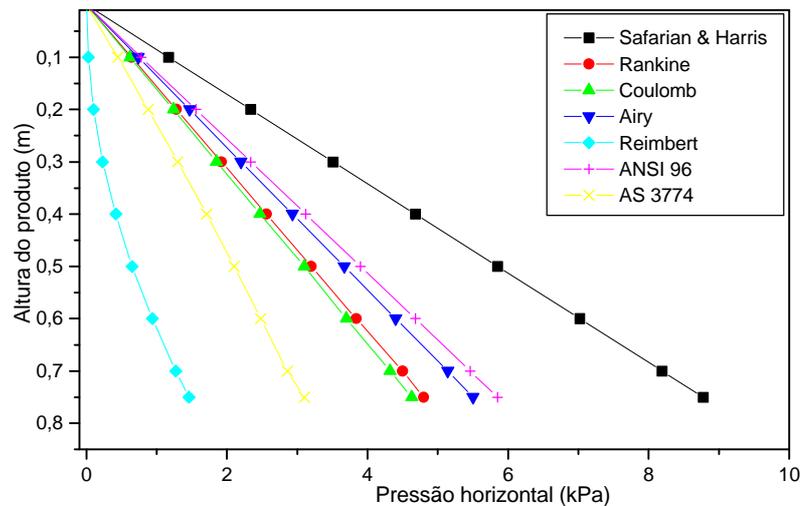


FIGURA 51 – Pressões ativas nas paredes do modelo piloto.

5.2.3 Pressões na parede do silo horizontal

A mesma avaliação feita para o modelo foi realizada para o silo horizontal, considerando as formulações teóricas já citadas. Na figura 52, são ilustradas as curvas de pressão ativas nas paredes do silo horizontal. Estas curvas são comparadas com as normas ANSI/96 e AS 3774/96. O valor médio das pressões

estimados pelas teorias de Colulomb e Airy é 8,3kPa a uma altura de produto de 2,0 metros. Para a AS 3774 o valor é 5,3kPa. Considerando a altura efetiva do produto na parede do silo (7,05m), o valor médio estimado entre as teorias de Safarian & Harris, Coulomb e Airy é 29kPa; para o modelo de Reimbert o valor é de 63kPa, enquanto que a pressão estimada por Rankine é de 45,2kPa. Para a altura efetiva a norma Australiana fornece um valor médio de 16,5 kPa.

É interessante observar que na teoria de Reimbert & Reimbert a pressão é uma função da altura ao quadrado, mostrando que no modelo é a menor pressão estimada e no silo horizontal é a maior. Nos demais modelos a relação entre a pressão e altura é linear. O comportamento das pressões estimadas pela equação de Rankine foi diferenciado quando comparado os valores para o modelo piloto e o silo horizontal. A norma ANSI/96, foi utilizada para comparação, por ser reconhecida e aplicada para o cálculo das pressões em paredes de silos horizontais. No cálculo das pressões, a norma recomenda um coeficiente K igual a 0,5 fornecendo valores próximos ao modelo de Airy. Em contrapartida a norma Australiana fornece valores abaixo dos estimados pelas outras equações.

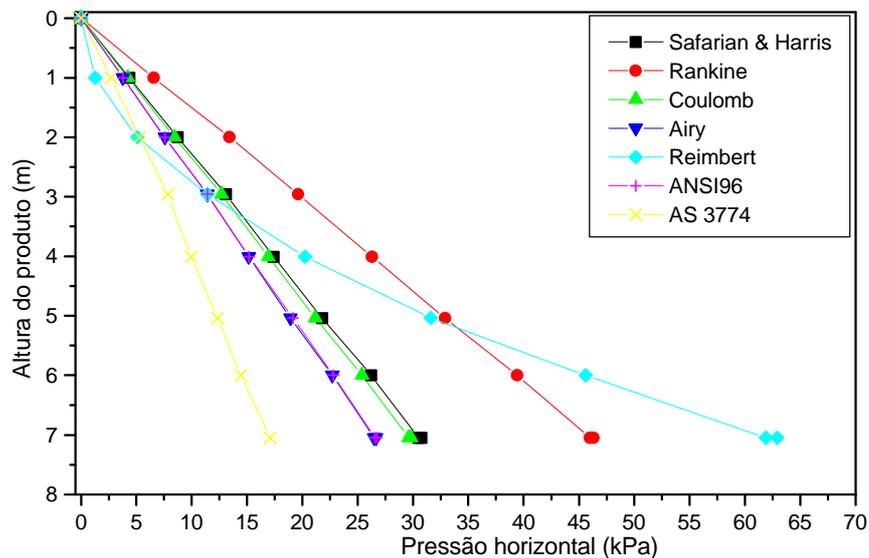


FIGURA 52 – Pressões ativas nas paredes do silo horizontal.

5.2.4 Pressões normais na tremonha do modelo piloto

No cálculo das pressões nas paredes da tremonha do modelo piloto, na condição estática, são comparados dois modelos teóricos Walker e Safarian & Harris com a norma AS 3774. A adoção destas duas teorias e a norma Australiana justifica-se por serem específicas para o cálculo das pressões nas paredes de tremonhas deste tipo de estrutura.

Ao observarmos o gráfico da figura 53, constatamos que as pressões máximas no vértice da tremonha são 18,5 kPa e 23,65 kPa, estimadas por Walker e Safarian & Harris, respectivamente. A variação entre os dois modelos se deve ao procedimento de cálculo que considera de forma diferenciada as pressões verticais na transição entre o corpo do silo e a tremonha. No modelo de Safarian & Harris há uma sobreposição de carregamento ao longo da altura da tremonha, enquanto que, nos métodos de Walker e AS 3774 consideram um valor médio e constante de pressão na linha de transição. Para a norma Australiana o valor máximo no vértice da tremonha é 14,3kPa.

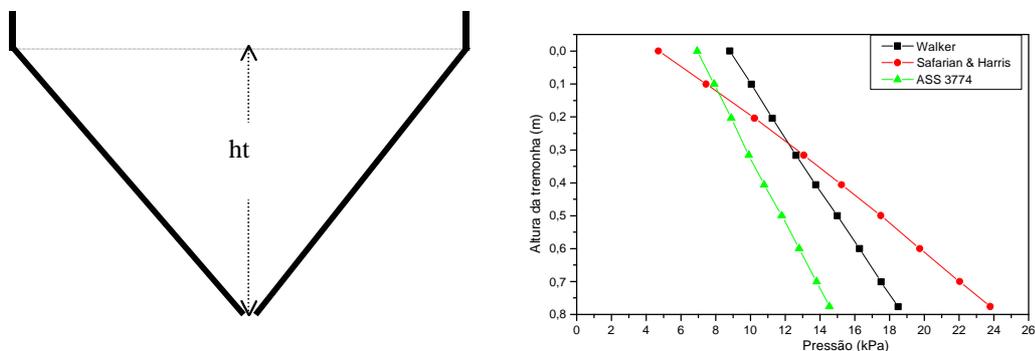


FIGURA 53 – Pressões estáticas nas paredes da tremonha do modelo piloto

5.2.5 Pressões normais na tremonha do silo horizontal

Foram estimadas os valores das pressões na condição estática pelos modelos teóricos de Safarian & Harris e Walker e a norma Australiana. Na condição dinâmica foram comparados valores teóricos estimados pela teoria de Walker e a norma Australiana que é a única que trata da estimativa das pressões de descarga em silos tipo tremonha e horizontais.

5.2.5.1 Condição estática

As pressões normais estáticas estimadas pelo modelo de Walker tem um comportamento linear ao longo da altura da tremonha. A pressão na linha de transição é maior para o modelo de Walker e menor na saída da tremonha, comparado com o modelo de Safarian & Harris onde a pressão é menor na linha de transição e maior na boca de descarga do silo. A figura 54 ilustra o comportamento para as duas teorias comparando-as com a norma Australiana que forneceu valores de 27kPa na linha de transição e 64kPa na saída da tremonha, ao passo que as teorias de Walker e Safarian & Harris forneceram valores de 85kPa e 115kPa, respectivamente.

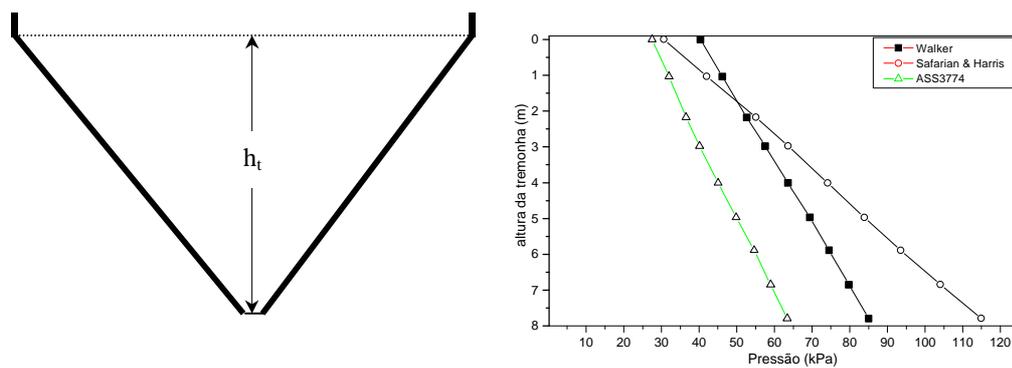


FIGURA 54 – Pressões estáticas nas paredes da tremonha do silo horizontal

5.2.5.2 Condição dinâmica

As pressões foram estimadas utilizando o modelo teórico de Walker e a norma Australiana ASS 3774-1996. Foram calculadas as pressões verticais e as pressões normais às paredes da tremonha. O valor máximo de pressão estimado por Walker é 67kPa para a pressão vertical e 49 kPa para a pressão normal à parede. Pela norma Australiana esses valores são 69,5 e 50,7 kPa.

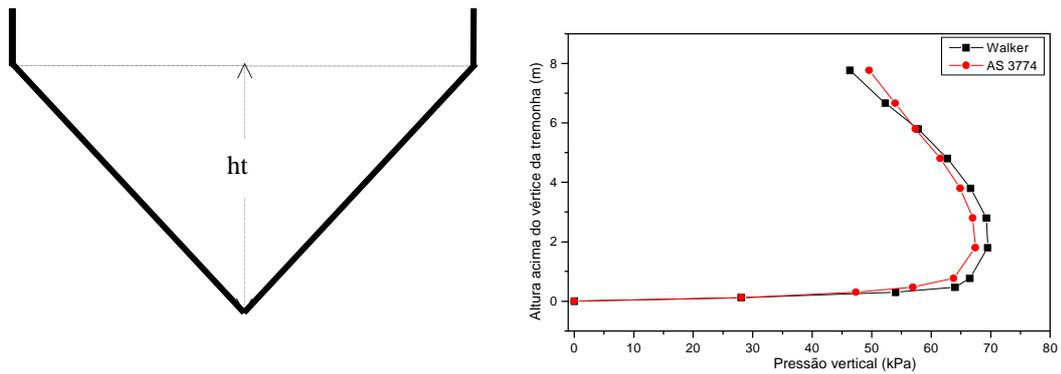


FIGURA 55 Pressões dinâmicas verticais na tremonha de acordo com Walker e AS 3774

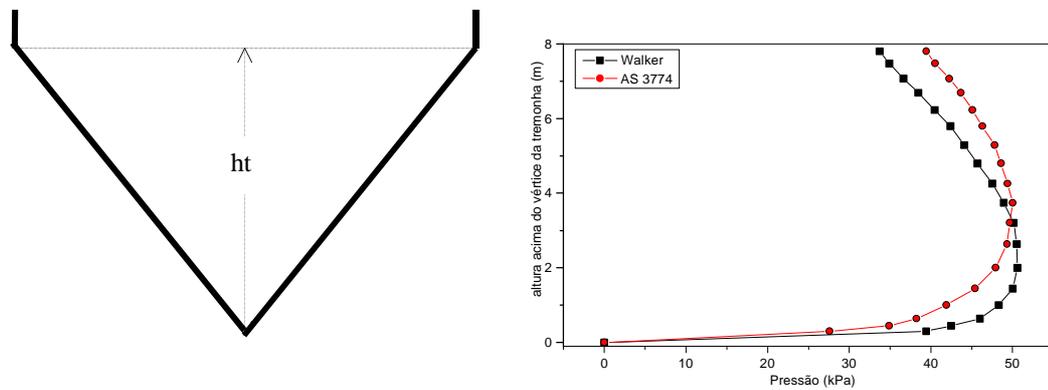


FIGURA 56 – Pressões dinâmicas normais às paredes da tremonha do silo horizontal de acordo com Walker e a Norma Australiana.

Em função dos valores estimados pela norma Australiana e a teoria de Walker para a pressão vertical na tremonha podemos afirmar que as formulações teóricas fornecem valores com grande aproximação.

Comparando os dois modelos, verifica-se que as pressões normais máximas são 49,7 e 50,7 kPa. O que difere é a posição de ocorrência das máximas pressões; no modelo de Walker a máxima pressão normal ocorre a uma distância de 2,0 metros do vértice da tremonha enquanto que para Norma Australiana a máxima pressão ocorre a 3,8 metros do vértice.

5.2.6 Análise dos resultados dos cálculos teóricos das pressões

- 1- Os valores das pressões apresentam pequena variação para uma mesma altura, quando calculadas pelas teorias de Coulomb, Rankine e Airy.
- 2- Os valores obtidos para Coulomb e Rankine confirmam as proposições relativas ao atrito com a parede, considerando que para pequenas alturas o ângulo de atrito pode ser desconsiderado.
- 3- Os valores de pressão obtidos pela equação de Reimbert e Safarian & Harris divergem dos valores obtidos pelas demais teorias.
- 4 Na tremonha o modelo de Safarian & Harris forneceu valores de pressão máximas superiores ao modelo teórico de Walker e à norma australiana, na condição estática.
- 5 A norma Australiana foi a que forneceu os menores valores de pressão na parede, na condição estática para o modelo piloto e para o silo horizontal.
- 6 Os valores de pressão fornecidos pelas teorias e normas são bastante divergentes para as pressões ativas nas paredes, apresentando uma variação de $1,29\text{kPa} < p_h < 8,25\text{kPa}$ para o modelo piloto e para o silo horizontal uma variação $16,55\text{kPa} < p_h < 65,5\text{kPa}$.
- 7 De acordo com as estimativas das pressões dinâmicas nas paredes da tremonha podemos observar que o seu comportamento é diferenciado da pressão estática. Enquanto na avaliação da condição estática de carregamento as pressões aumentam da linha de transição até a boca de descarga, configurando um carregamento trapezoidal, na condição dinâmica, as pressões são maiores nas alturas $h/2$ e $h/4$ da tremonha para a norma AS 3774 e o modelo de Walker, respectivamente.

5.3 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PRESSÕES E DE K

A medição das pressões no modelo piloto e no silo horizontal foi realizada utilizando as células de pressão já descritas anteriormente no capítulo IV. Inicialmente são mostrados os resultados da calibração das células de pressão EPC – 47089, caracterizando a fase inicial da etapa experimental.

5.3 1 Calibração das células de pressão

Esta etapa foi de grande importância pois serviu como ensaios preliminares para conhecimento do comportamento dos sensores e balizamento para os ensaios do modelo e do silo horizontal.

Como resultado desta fase de ajuste do sistema de aquisição de dados as células de pressão foram calibradas a uma tensão de alimentação de 10 volts para um ganho de 0,05 volts/7kPa. A faixa de leitura do sistema para esta configuração foi de ± 700 kPa. Cada célula foi calibrada individualmente e os resultados comparados com a calibração fornecida pelo fabricante. Uma das curvas de calibração é ilustrada na figura 57. Os valores obtidos durante o carregamento e descarga são mostrados na tabela 14. Os demais resultados são apresentados no ANEXO II. Na conexão das células ao sistema de aquisição de dados foi respeitado rigorosamente esta calibração para posterior aplicação nos ensaios. Aplicada as equações de regressão linear, obteve-se um coeficiente de regressão de 0,98.

TABELA 14 – Dados de calibração da célula de pressão EPC – 47089

| Leitura (div.anel) | Carga (N) | $P_{estimada}$ (kPa) | P_C (kPa) | P_D (kPa) |
|-----------------------|--------------|-------------------------|----------------|----------------|
| 0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 100 | 1815,0 | 44,0 | 44,21 | 43,4 |
| 200 | 3630,0 | 88,0 | 88,44 | 91,0 |
| 300 | 5445,0 | 133,0 | 132,66 | 136,5 |
| 400 | 7260,0 | 177,0 | 176,89 | 180,6 |
| 500 | 9075,0 | 221,0 | 221,1 | 222,6 |
| 600 | 10890,0 | 265,0 | 265,33 | 268,8 |
| 700 | 12705,0 | 310,0 | 309,55 | 312,2 |
| 800 | 14520,0 | 354,0 | 353,77 | 357,0 |
| 900 | 16335,0 | 398,0 | 397,99 | 401,1 |
| 1000 | 18150,0 | 442,0 | 442,22 | 445,2 |
| 1100 | 19965,0 | 486,0 | 486,44 | 490,0 |

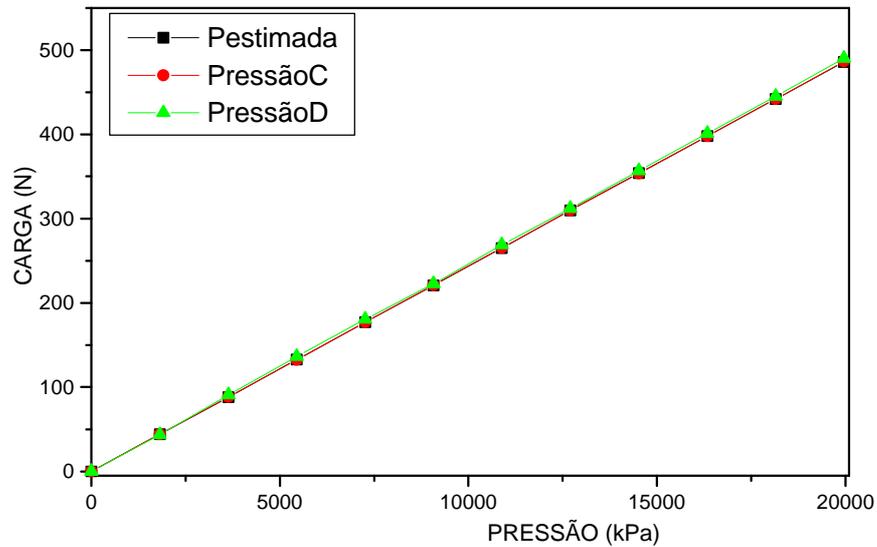


FIGURA 57 - Curvas de calibração das células de pressão EPC 3500-1-100 (47089)

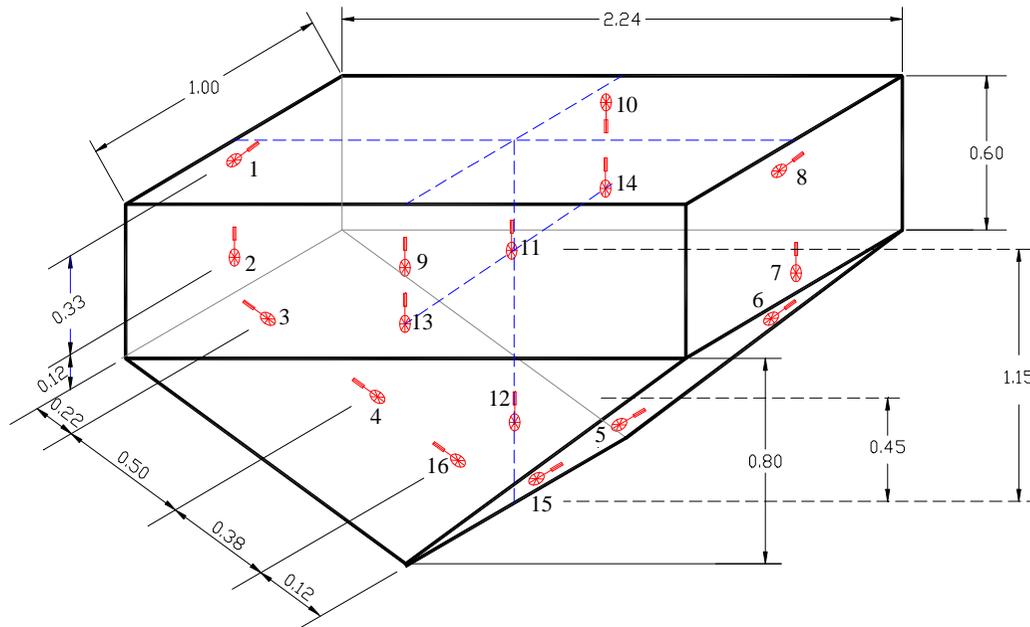
Como pode ser observado o comportamento das células é linear. Os valores de P_C e P_D , referem-se aos ciclos 1 e 2, respectivos ao carregamento e descarga da célula de pressão. Pode-se notar que, considerando o tempo de resposta das células e a frequência na qual as leituras foram feitas pelo sistema de aquisição de dados, os valores de pressão medidos foram iguais para os dois ciclos. Esta observação é importante pois os ensaios exigiram medições nas fases de carregamento e descarga do silo. Para a calibração acima foi obtido o valor do fator gage linear de $7,024\text{kPa/mV/V}$, para uma temperatura ambiente média de 24°C . Considerando a temperatura média no silo de 24°C (medida com os cabos de termometria) e que gradientes de temperatura não foram significativos, não houve necessidade de correção considerando este efeito durante os ensaios.

5.3.2 Ensaio do modelo piloto

Os resultados das 4 repetições do ensaio do modelo piloto são mostrados no quadro 1, considerando a condição estática. Foram obtidos os valores de pressões horizontal e vertical nas posições indicadas. As pressões verticais e horizontais na tremonha foram calculadas a partir das pressões normais obtidas nos ensaios. As pressões verticais próximas às paredes foram medidas conforme indicado a seguir.

Quadro 01 – Valores de pressão médios, em kPa, medidos nas paredes do corpo e da tremonha do modelo piloto.

| Célula | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Posição. | WI1 | WI2 | T1 | T2 | T2 | T1 | WI2 | WI1 | Wf1 | Wf1 | C1 | C2 | Wf2 | Wf2 | T3 | T3 |
| RESULTADOS DE ENSAIOS | | | | | | | | | | | | | | | | |
| * D_h, D_n | 1,31 | 2,47 | 5,60 | 6,53 | 6,63 | 5,27 | 2,01 | 1,19 | 1,42 | 1,35 | 4,86 | 8,24 | 3,08 | 3,43 | 17,34 | 10,71 |
| * D_v | 3,87 | 9,02 | 4,58 | 5,35 | 5,43 | 4,32 | 8,6 | 4,01 | 4,85 | 4,45 | 5,60 | 10,50 | 11,03 | 10,05 | 14,20 | 8,77 |



LEGENDA :

- ◆ pressão horizontal
- ◆ pressão vertical
- ◆ pressão normal
- ◆ pressão vertical calculada

Obs:
 * Resultados médios obtidos de 4 repetições de carregamento para medição do valor de p_h , p_n e p_v .

FIGURA 58 - Disposição das células no modelo piloto.

5.3.2.1 Determinação experimental do coeficiente K no modelo piloto

Para a medição das pressões verticais foram instaladas células de pressão nas mesmas cotas das células instaladas nas paredes do modelo. As células foram fixadas na superfície de uma placa de compensado orientadas para a medição das pressões verticais, exceto nas posições das células instaladas nas paredes da tremonha

TABELA 15 – Valores limites, médios, das pressões verticais, horizontais e de K.

| Célula | 15,16 | 4,5 | 3,6 | 12 | 11 | 13,14 | 2,7 | 1,8 | 9,10 |
|----------------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| PRESSÃO | | | | | | | | | |
| Pn | 10,01 17,54 | 6,09 6,86 | 4,20 6,30 | - | - | - | - | - | - |
| Pv | 8,30 14,37 | 4,99 5,62 | 3,44 5,16 | 10,50 11,50 | 7,50 8,72 | 10,05 11,03 | 8,60 9,02 | 3,87 4,01 | 4,55 4,85 |
| Ph | 5,74 10,06 | 3,49 3,93 | 2,41 3,61 | 7,84 8,47 | 4,23 5,53 | 2,80 4,06 | 1,96 3,01 | 1,05 1,47 | 1,05 1,73 |
| K_L | 0,692 | 0,696 | 0,698 | 0,737 | 0,564 | 0,278 | 0,227 | 0,271 | 0,236 |
| K_u | 0,700 | 0,699 | 0,701 | 0,747 | 0,634 | 0,368 | 0,334 | 0,367 | 0,357 |

Na seção transversal, considerando o plano definido pelas células 2, 7, 13 e 14, pode-se observar que o valor do coeficiente K, é maior na parte central. Os valores médios, inferior e superior, nas paredes é 0,253 e 0,351, respectivamente. Na seção das células 1, 8, 9, e 10 os valores médios, inferior e superior de K é 0,253 e 0,362. Observa-se valores de K elevados no centro, medidos pelas células 11 e 12; 0,564 e 0,747 respectivamente. Os valores de K ao longo da altura do corpo do silo são crescentes e nas paredes da tremonha os valores inferior e superior, médios, são 0,695 e 0,712.

5.3.2.2 Discussões finais sobre os resultados dos ensaios do modelo

A figura 59 ilustra a curva das pressões horizontais nas paredes do modelo e as pressões normais às paredes da tremonha. Para efeito de análise são indicados os valores experimentais, obtidos no ensaio.

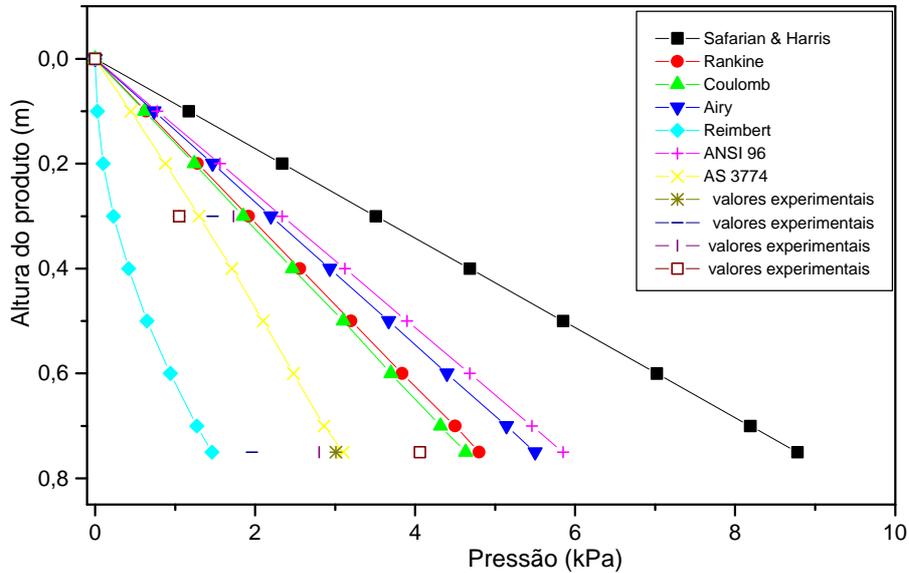


FIGURA 59 – Gráfico - Pressões ativas nas paredes do modelo e valores experimentais

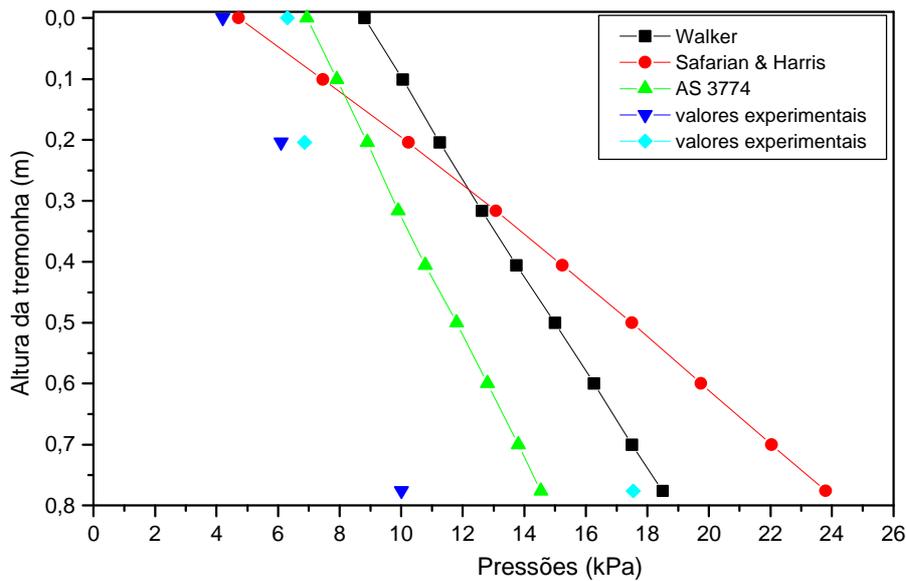


FIGURA 60 – Gráfico - Pressões estáticas na tremonha do modelo e valores experimentais

A partir dos resultados obtidos, podemos afirmar que:

- 1- A utilização das células de pressão nos permitiu avaliar o comportamento das pressões do produto nas paredes do modelo.
- 2- Os valores obtidos pelas teorias de Coulomb, Rankine e AS 3774 foram os que mais se ajustaram aos valores de medições das pressões nas paredes do modelo. Isto pode ser constatado através dos valores

obtidos nas células 1, 2, 7, 8, 9, 10, 13 e 14. Considerando a altura de produto de 0,25m, no modelo, a pressão média horizontal foi de 1,4kPa, enquanto que para uma altura efetiva de 0,705m este valor foi de 3,3kPa. Nesta altura os dados se ajustaram à norma australiana.

- 3- Na tremonha, comparando os valores teóricos com os valores experimentais podemos constatar que a Teoria de Walker e o modelo de Safarain & Harris apresentaram valores superiores aos medidos. Os valores experimentais médios das pressões normais na parede da tremonha variaram de 5,4 a 14 kPa ao longo da altura. Estes dados podem ser observados através dos valores medidos pelas células 3, 4, 5, 6, 15 e 16. Na linha de transição as melhores estimativas são dadas pelo modelo de Safarian & Harris e pela norma Australiana para os valores inferiores de pressão, entretanto, ao longo da altura da tremonha, as pressões estáticas máximas são melhor estimadas pela teoria de Walker.
- 5- A utilização das células de pressão inseridas na massa do produto nos permitiu avaliar o comportamento das pressões em uma seção do silo. Foram observadas diferenças significativas das pressões horizontais na seção transversal. Isto pode ser constatado através dos resultados obtidos no ensaio através dos valores medidos pelas células 11 e 12, o que para a condição estática são valores elevados.

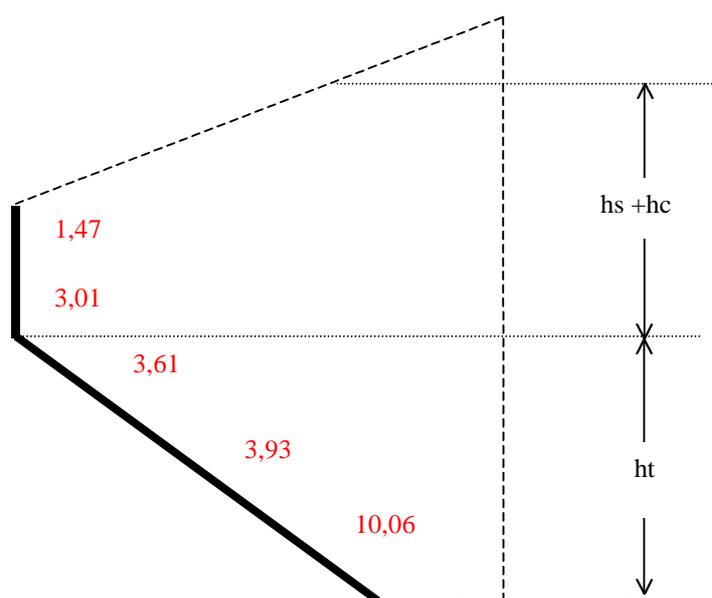


FIGURA 61 – Mapeamento das pressões no modelo piloto.

5.3.3 Ensaio do silo horizontal

A figura 62 ilustra a disposição das células indicando os pontos de medição das pressões para um ciclo completo de operação. Os gráficos apresentados nas figuras 63 a 70, ilustram o comportamento das pressões do silo horizontal. Em cada gráfico são ilustradas as curvas *tempo(min) x pressão(kPa)* horizontais e normal às paredes e normal às paredes da tremonha do silo em células simetricamente posicionadas.

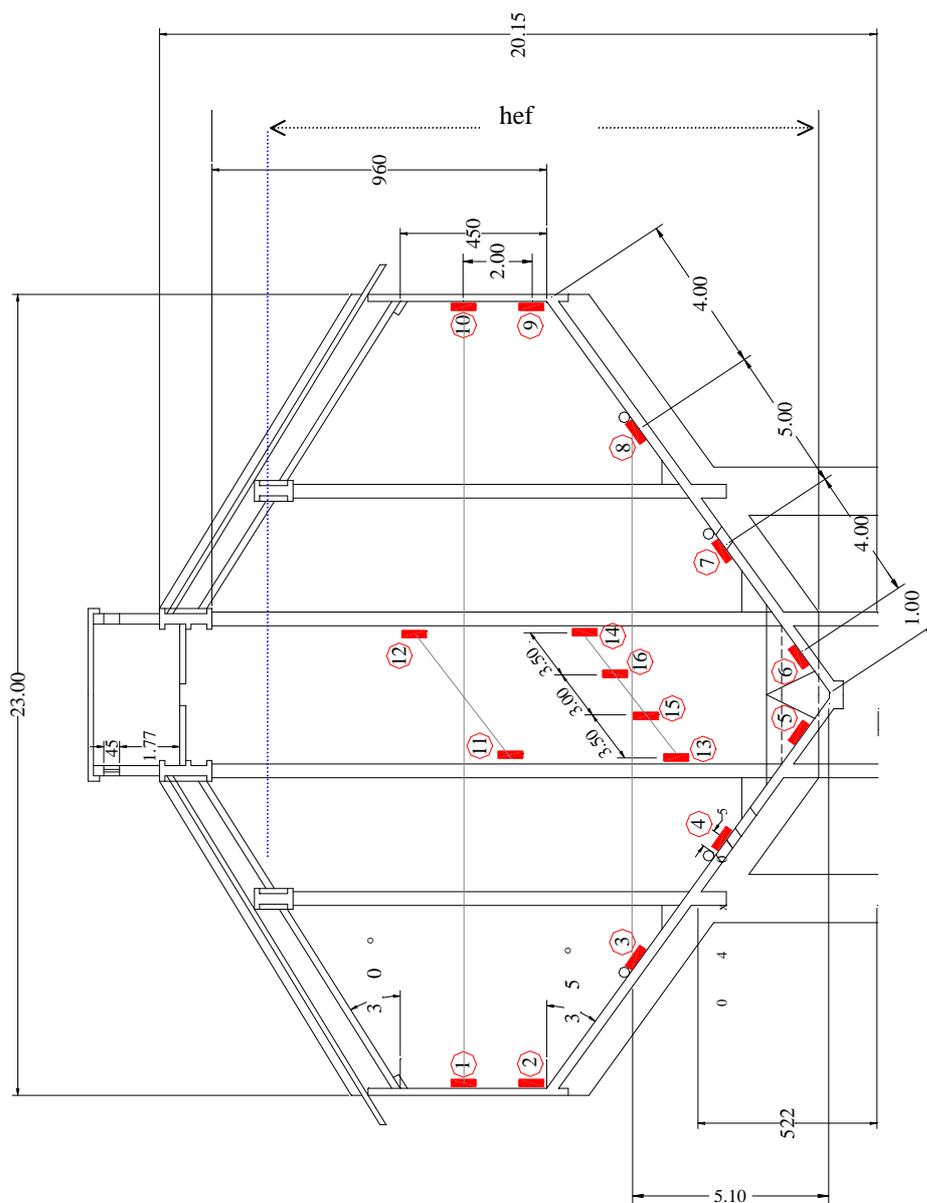
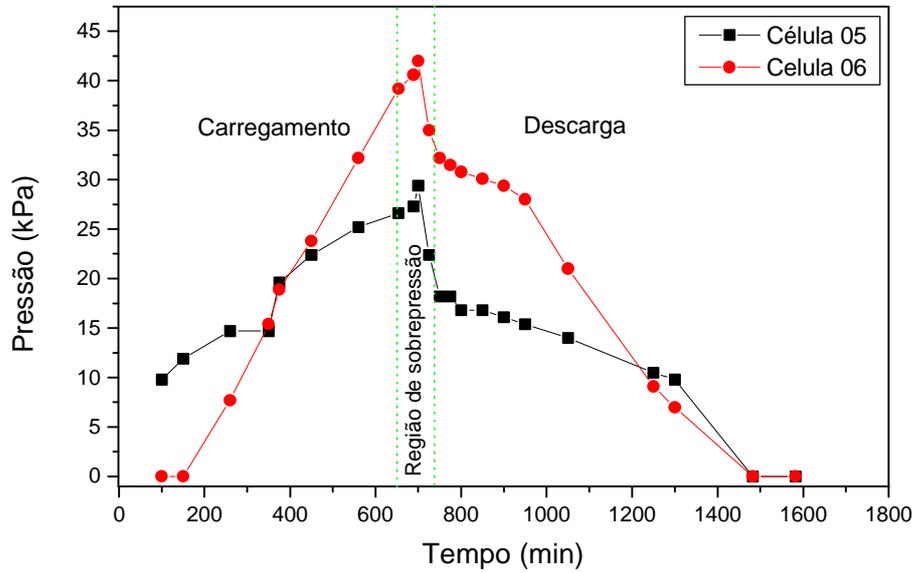
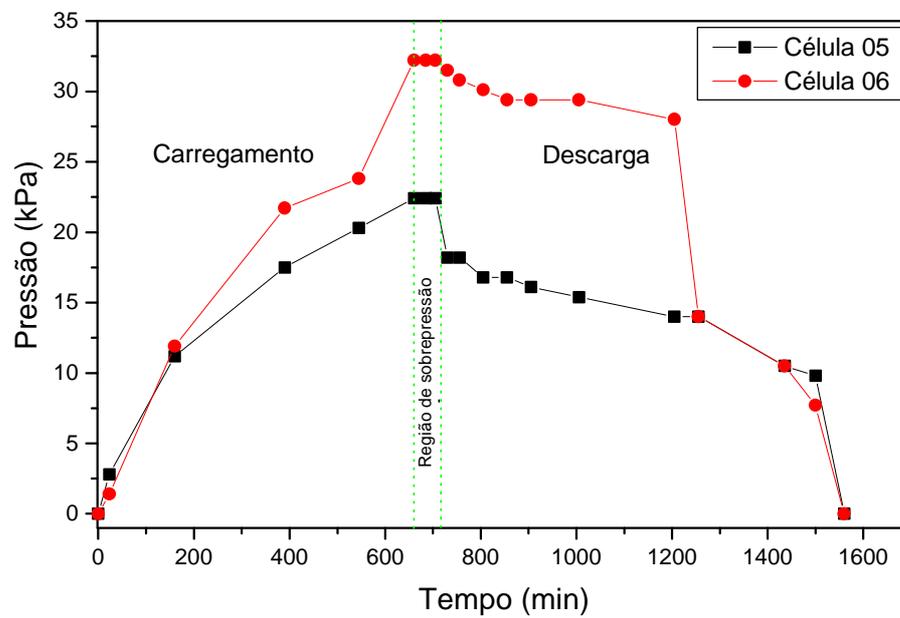


FIGURA 62 – Disposição das células de pressão no silo horizontal. – Corte.

5.3.3.1 Resultados das pressões na tremonha

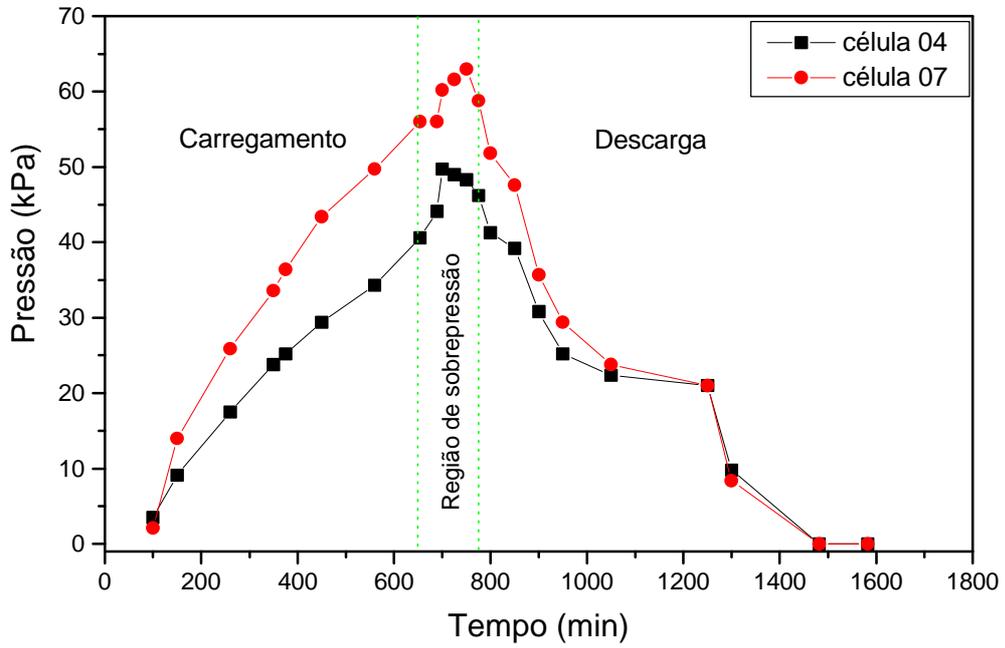


(a) - Ensaio 1

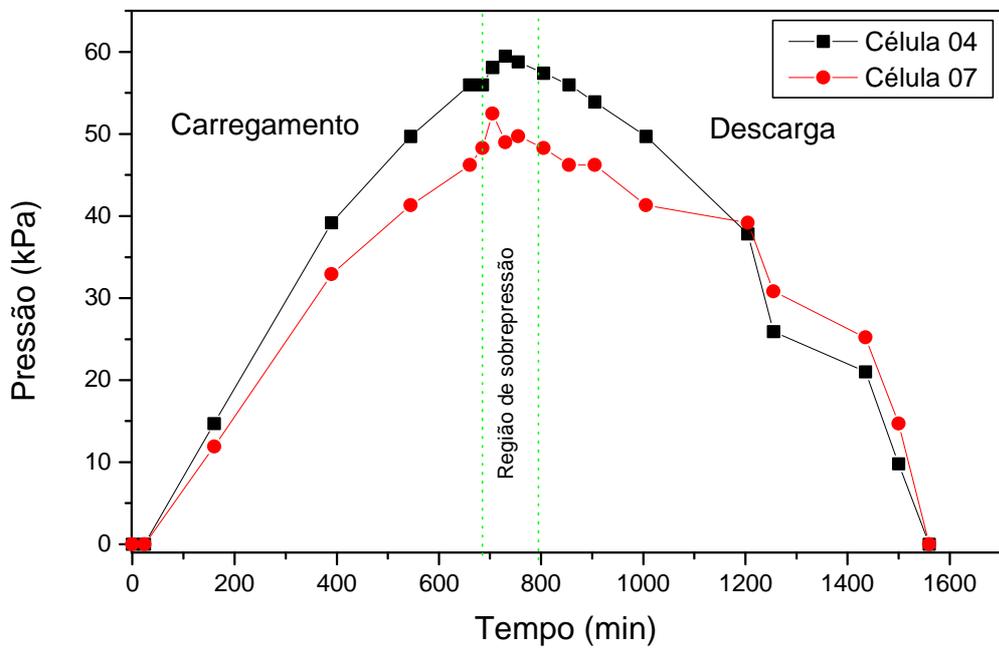


(b) Ensaio 2

Figura 63 - Pressões dinâmicas no silo horizontal.- Células 05 e 06.

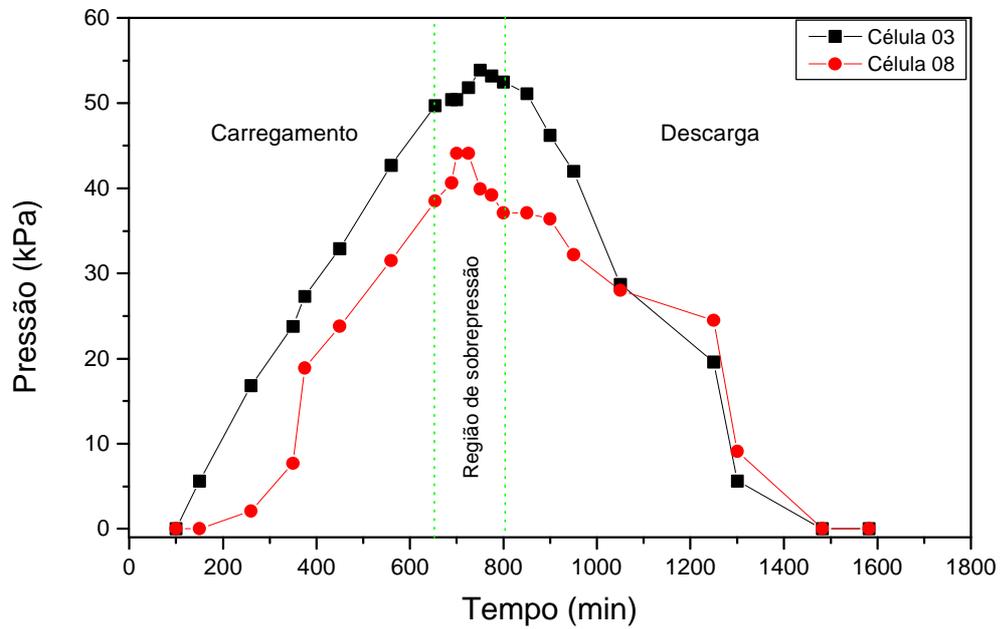


(a) - Ciclo completo do ensaio 1

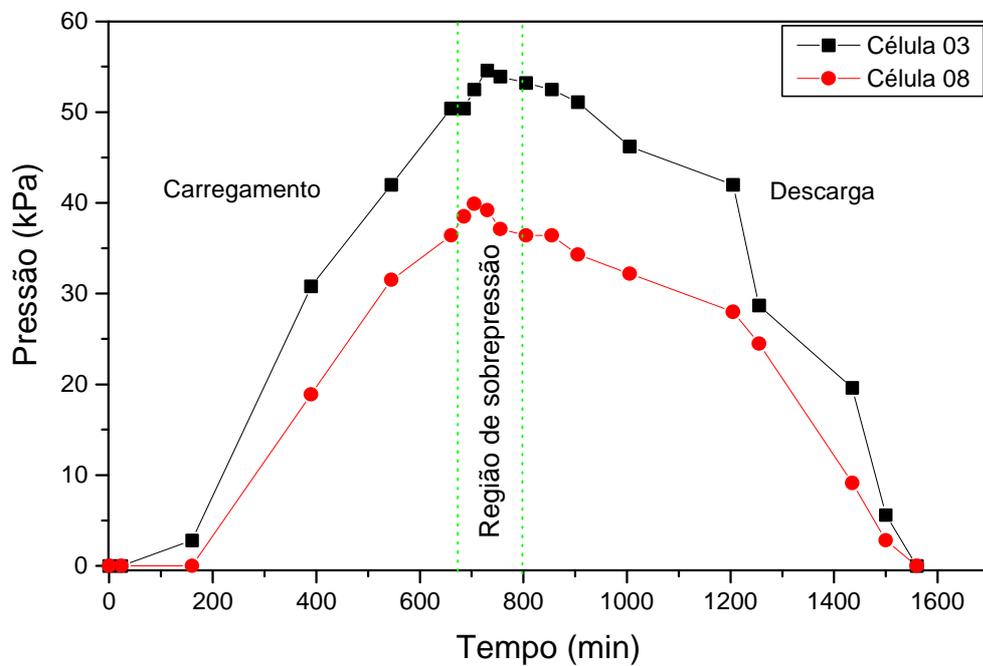


(b) - Ciclo completo do ensaio 2

Figura 64 - Pressões dinâmicas no silo horizontal.- Células 04 e 07.



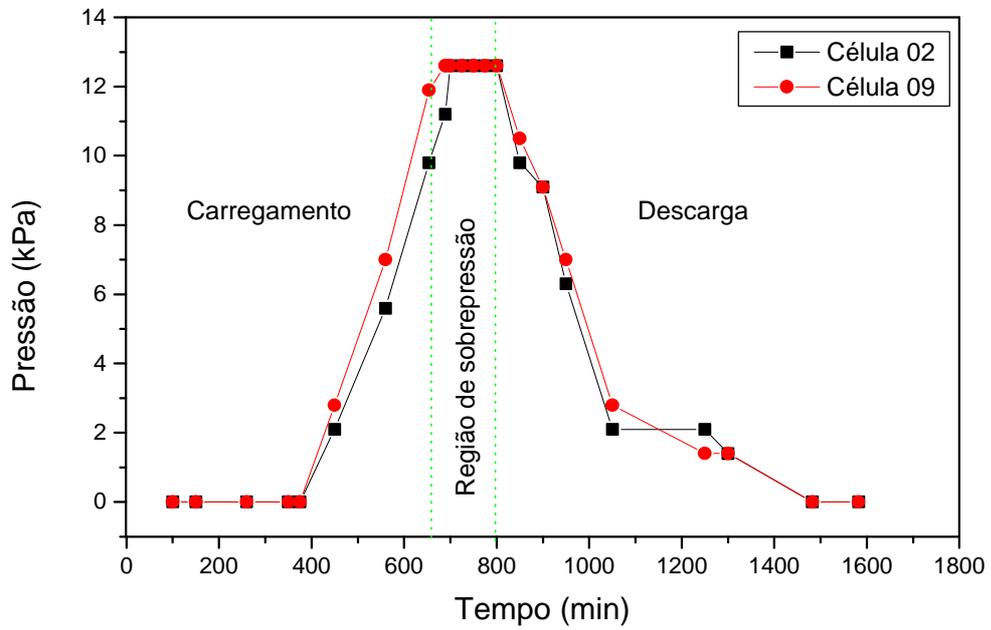
(a) - Ciclo completo do ensaio 1



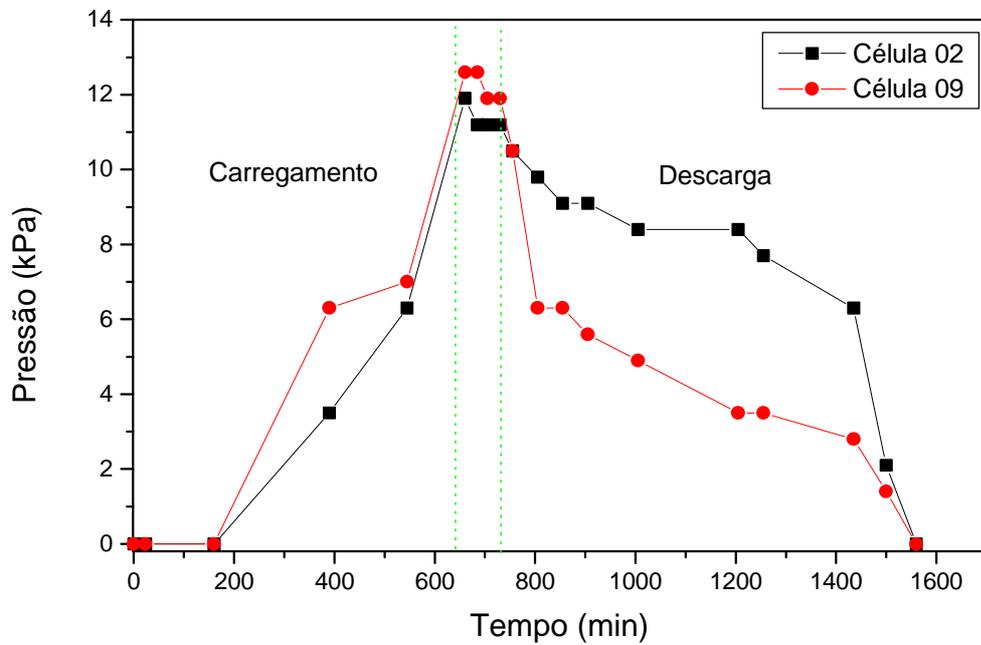
(b) - Ciclo completo do ensaio 2

Figura 65 - Pressões dinâmicas no silo horizontal.- Células 03 e 08.

5.3.3.2 Resultados das pressões nas paredes

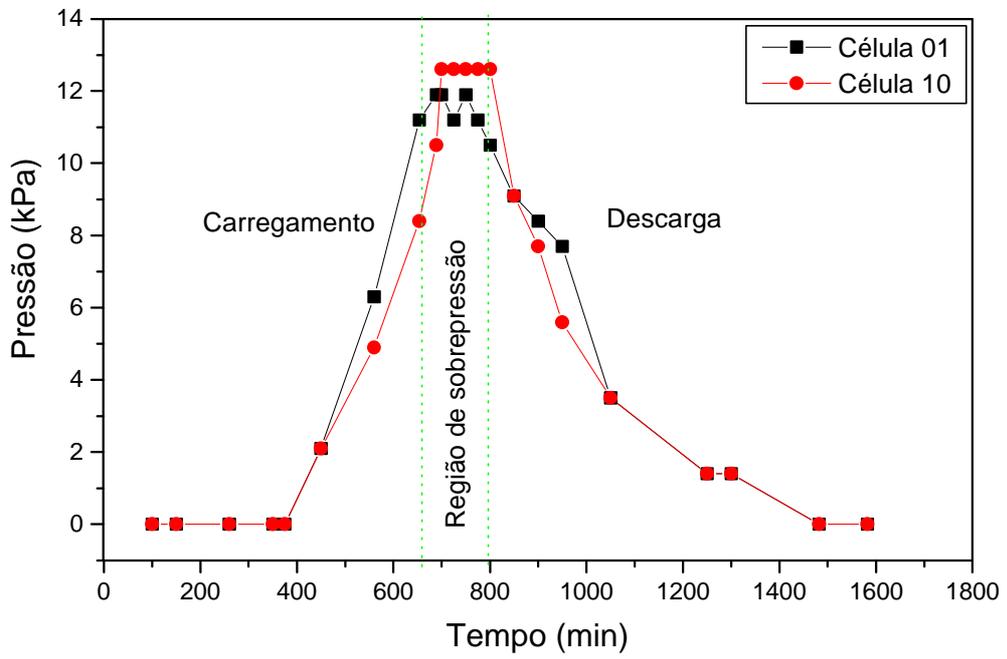


(a) - Ciclo completo do ensaio 1

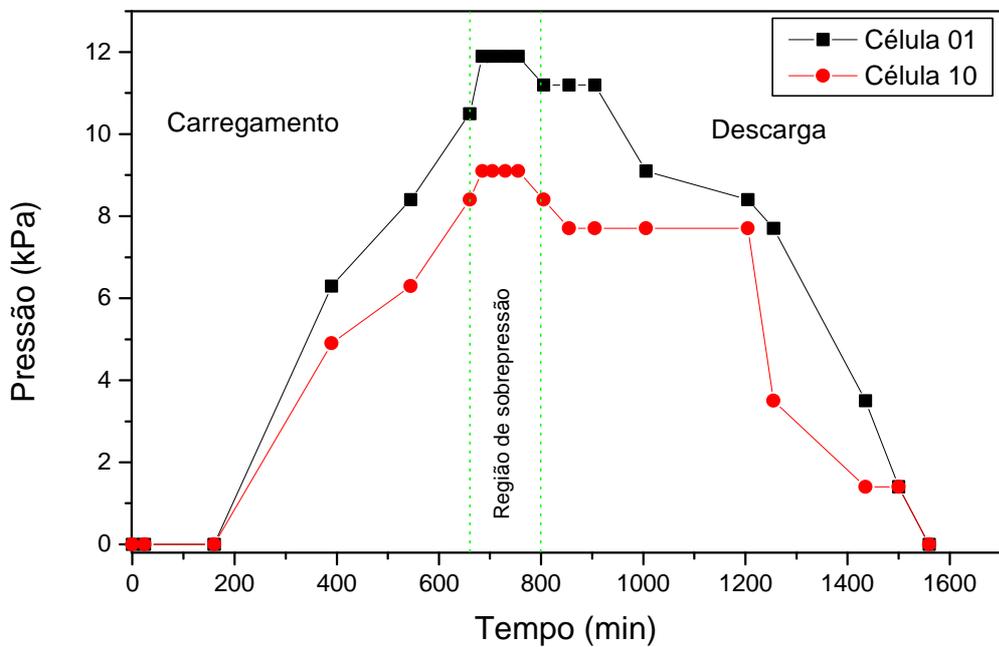


(b) - Ciclo completo do ensaio 2

Figura 66 - Pressões dinâmicas no silo horizontal.- Células 02 e 09.

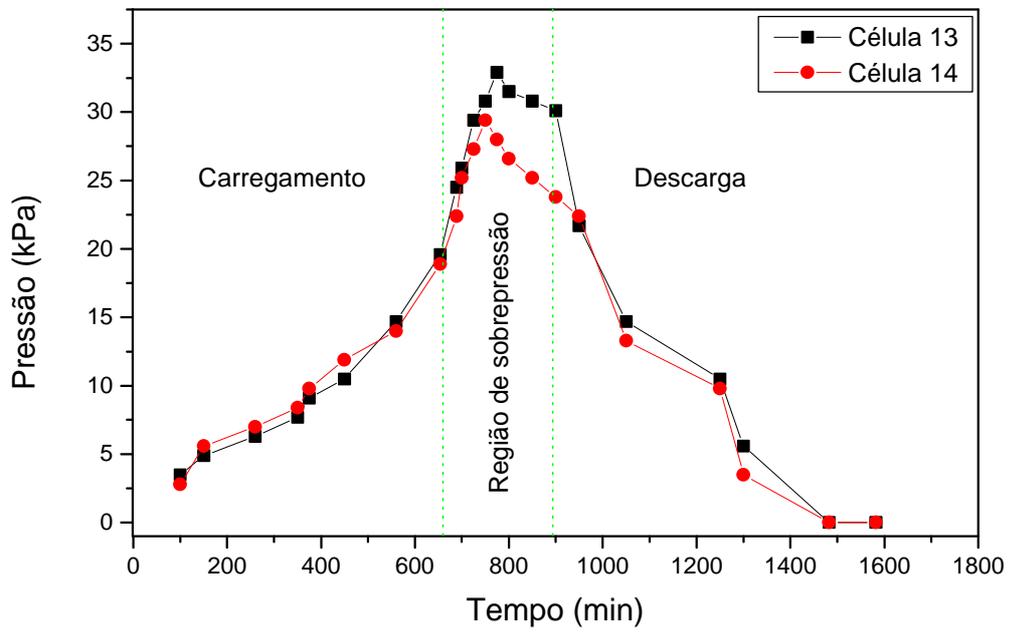


(a) - Ciclo completo do ensaio 1

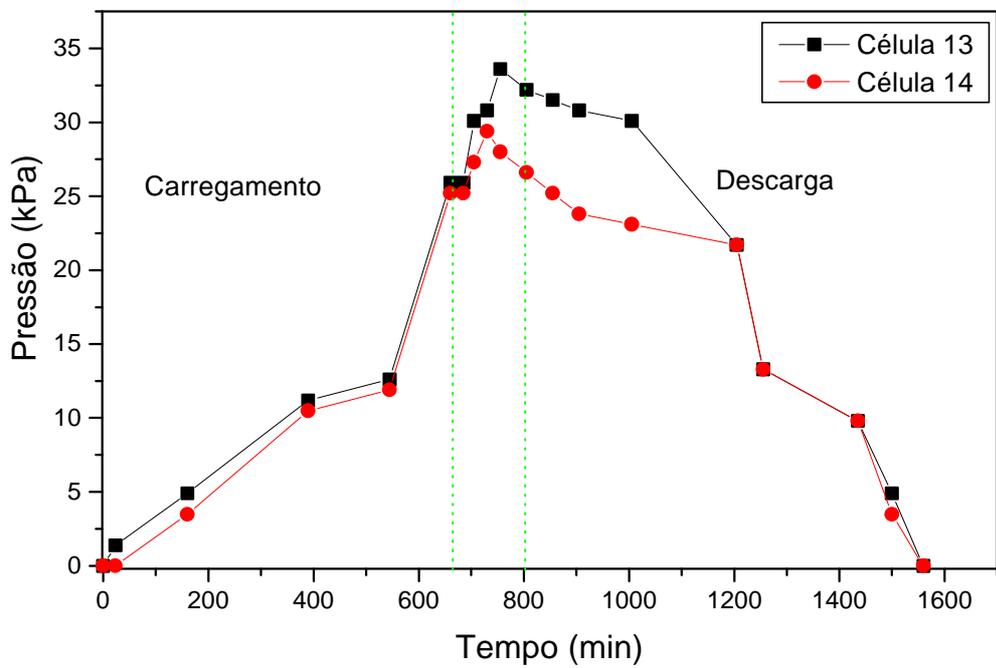


(a) - Ciclo completo do ensaio 2

Figura 67 - Pressões dinâmicas no silo horizontal.- Células 01 e 10.

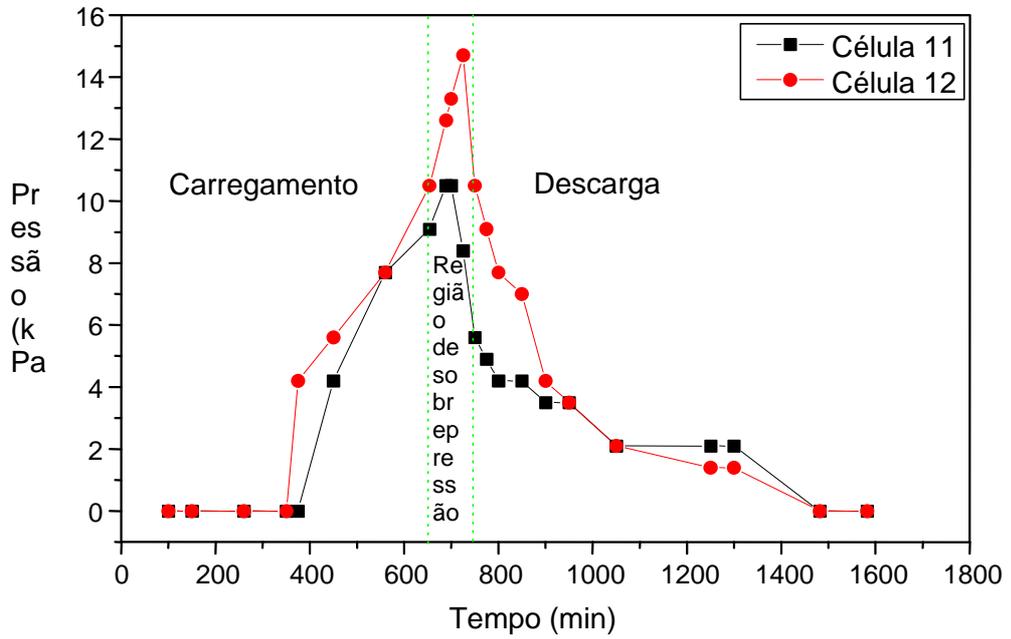


(a) - Ciclo completo do ensaio 1

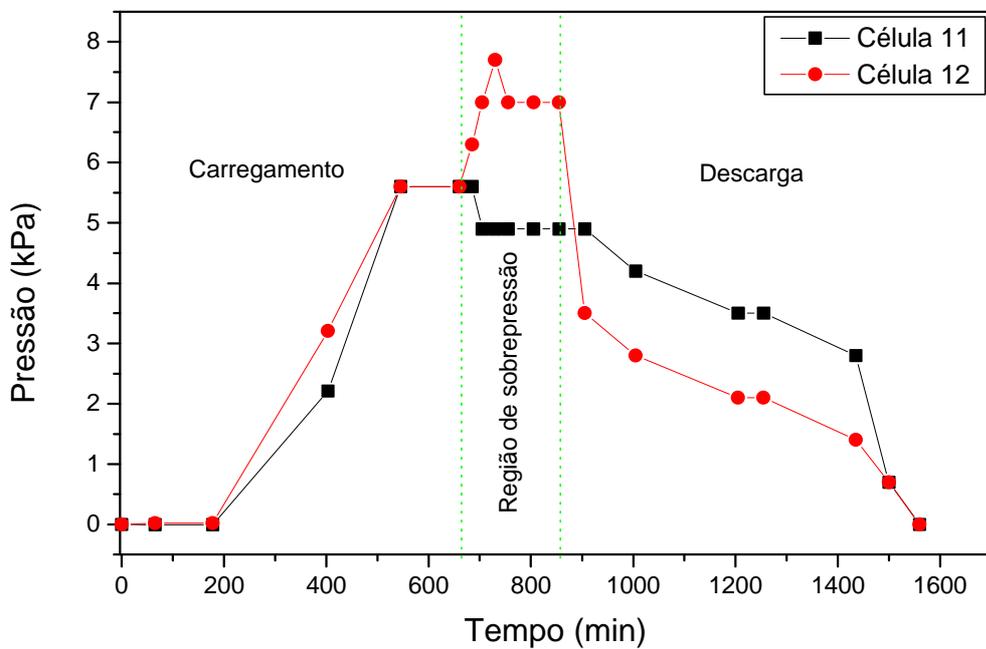


(b) - Ciclo completo do ensaio 2

Figura 68 - Pressões dinâmicas no silo horizontal.- Células 13 e 14.



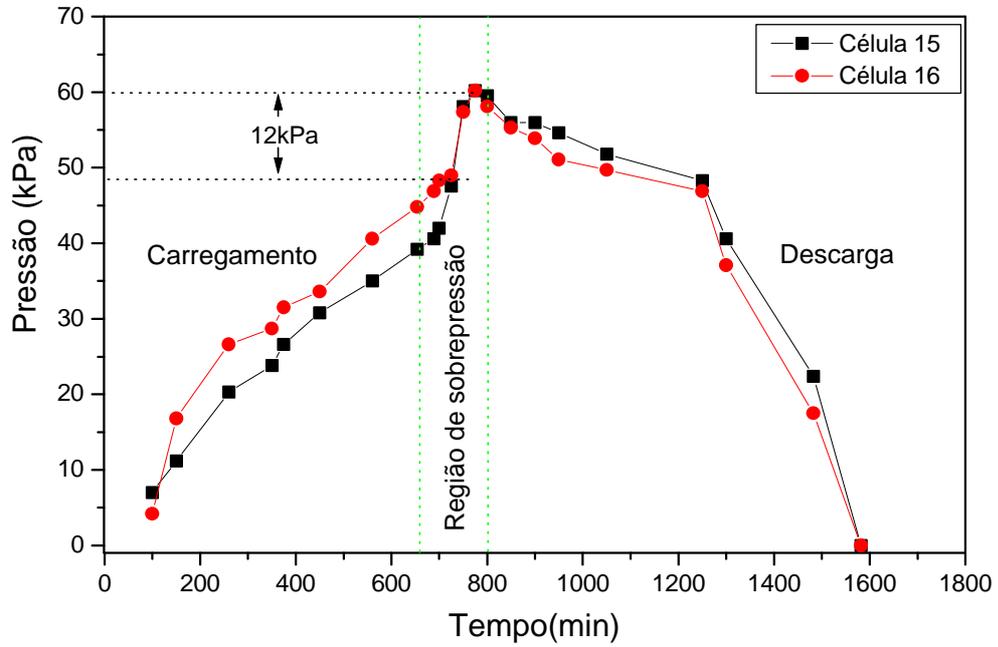
(a) - Ciclo completo do ensaio 1



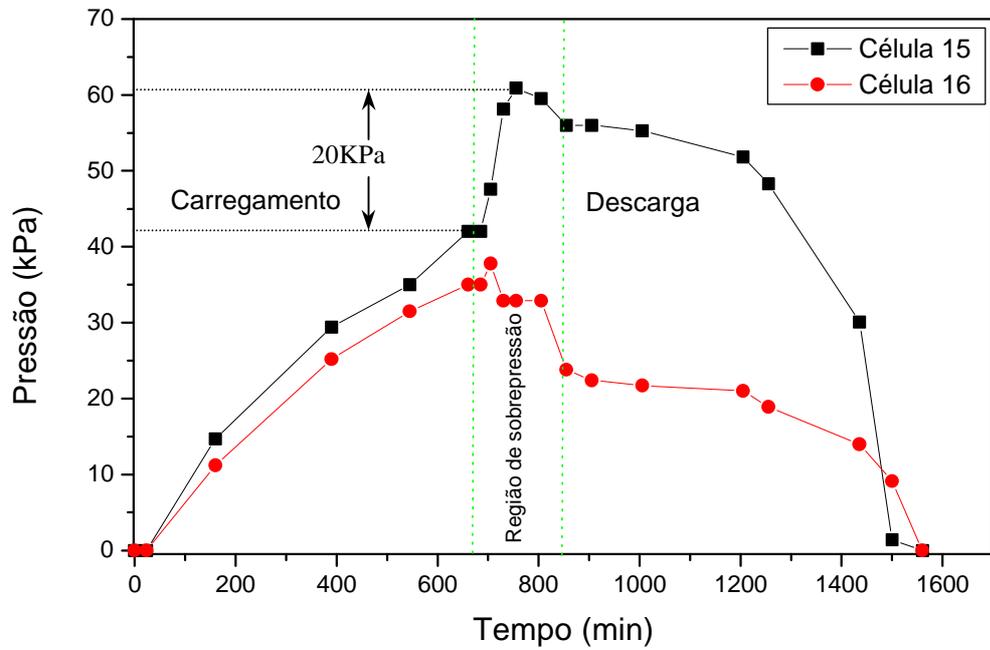
(b) - Ciclo completo do ensaio 2

Figura 69 - Pressões dinâmicas no silo horizontal.- Células 11 e 12.

5.3.3.3 Resultados das pressões na massa do produto



(a) - Ciclo completo do ensaio 1



(b) - Ciclo completo do ensaio 2

Figura 70 - Pressões dinâmicas no silo horizontal.- Células 15 e 16.

A partir dos dados observados durante as medições das pressões diretas das pressões, normais na tremonha e horizontais na parede, os valores médios foram calculados. A tabelas 16 e 17 fornecem os valores inferiores e superiores das pressões normais horizontais e verticais e o valor de K nas fases de carregamento e descarga do silo.

TABELA 16 – Valores de pressão de carregamento (kPa) e do coeficiente K.

| Células | p_{nt} | p_{vt} | p_h | K |
|--|----------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------|
| Tremonha | | | | |
| 05/06 | 22,4 - 39,2 | 18,35 – 32,11 | 12,85 – 22,48 | 0,701 – 0,702 |
| 04/07 | 40,6 - 56,0 | 33,26 – 45,87 | 23,28 – 32,12 | 0,699 - 0,702 |
| 03/08 | 36,4 - 50,4 | 29,82 – 41,28 | 21,00 – 28,91 | 0,701 – 0,703 |
| Paredes | | | | |
| Pressões horizontais (p_h) | | | | |
| 02/09 | | 9,80 – 12,10 | | |
| 01/10 | | 8,40 – 11,20 | | |
| 11/12 | | 5,60 – 10,50 | | |
| 13/14 | | 18,90 – 25,90 | | |
| 15/16 | | 35,00 – 44,80 | | |

TABELA 17 – Valores de pressão de descarga (kPa) e do coeficiente K.

| Células | p_{nt} | p_{vt} | p_h | K |
|--|----------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------|
| Tremonha | | | | |
| 05/06 | 23,4 - 44,0 | 18,35 - 36,04 | 14,57 - 25,24 | 0,699 - 0,702 |
| 04/07 | 44,1 - 63,0 | 36,12 - 51,60 | 25,29 - 36,14 | 0,698 - 0,703 |
| 03/08 | 38,5 - 54,6 | 31,54 - 44,73 | 22,08 - 31,32 | 0,701 - 0,703 |
| Paredes | | | | |
| Pressões horizontais (p_h) | | | | |
| 02/09 | | 11,20 – 13,40 | | |
| 01/10 | | 9,10 - 12,06 | | |
| 11/12 | | 4,30 - 14,70 | | |
| 13/14 | | 22,40 - 33,60 | | |
| 15/16 | | 35,00 - 60,90 | | |

Após observarmos os gráficos ilustrados nas figuras 63 a 70, verificamos a ocorrência de sobrepressões no início da descarga. As células 5, 6, 4, 7, 13, 14, 15 e 16 indicaram picos de pressão mais notadamente superiores. Os valores máximos de sobrepressão de descarga observado foi de 13,5kPa para as células 13 e 14 e 20kPa para a célula 15. O valor médio de pico de pressão na descarga nas células 4 e 7 foi de 7,7kPa, nas células 13 e 14, de 9,65kPa e de 18kPa para as células 15 e 16, representando um acréscimo de 12,5%, 31,5% e 30%, nos valores de pressão, respectivamente.

Observou-se que os valores medidos pelas células simétricas também variaram durante as fases de carregamento e descarga. Isto pode ser explicado pela natureza aleatória das pressões, forma de carregamento e impacto do produto sobre as paredes.

As pressões de descarga foram sensivelmente maiores e como consequência não foram observados valores significativos de variação do coeficiente K entre as fases de carregamento e descarga. A relação entre as pressões horizontais e verticais na tremonha se mantiveram constantes para valores médios de K inferior igual a 0,698 e superior de 0,703.

Para melhor ilustrar os resultados obtidos durante as medições são mostrados as curvas plotadas pelo software AQD5 (LINX), extraídas dos relatórios de ensaios. Estas referem-se aos valores medidos na célula 04, instalada na tremonha, indicando o ciclo completo de operação do silo horizontal (carregamento – armazenamento – descarga).

O primeiro conjunto de curvas ilustra a fase de carregamento do silo. São mostradas as pressões de carregamento nas fases inicial e final. Na última curva, observa-se a pressão máxima obtida, correspondente ao final do carregamento, (figura 71).

No segundo conjunto de curvas, (figura 72), observa-se a fase de descarregamento do silo, iniciada 52 horas após o término do carregamento. Pôde-se constatar que as pressões se mantiveram constantes, não havendo variação entre a fase de carregamento e o período em que o produto se manteve em repouso. A constatação mais importante nesta curva é a elevação do valor de pressão no momento em que a descarga se inicia mantendo-se elevada até os 100 minutos seguintes. Após este período as pressões decrescem até o final da descarga. A figura 73 ilustra este pico e o comportamento da pressão durante o período inicial da descarga.

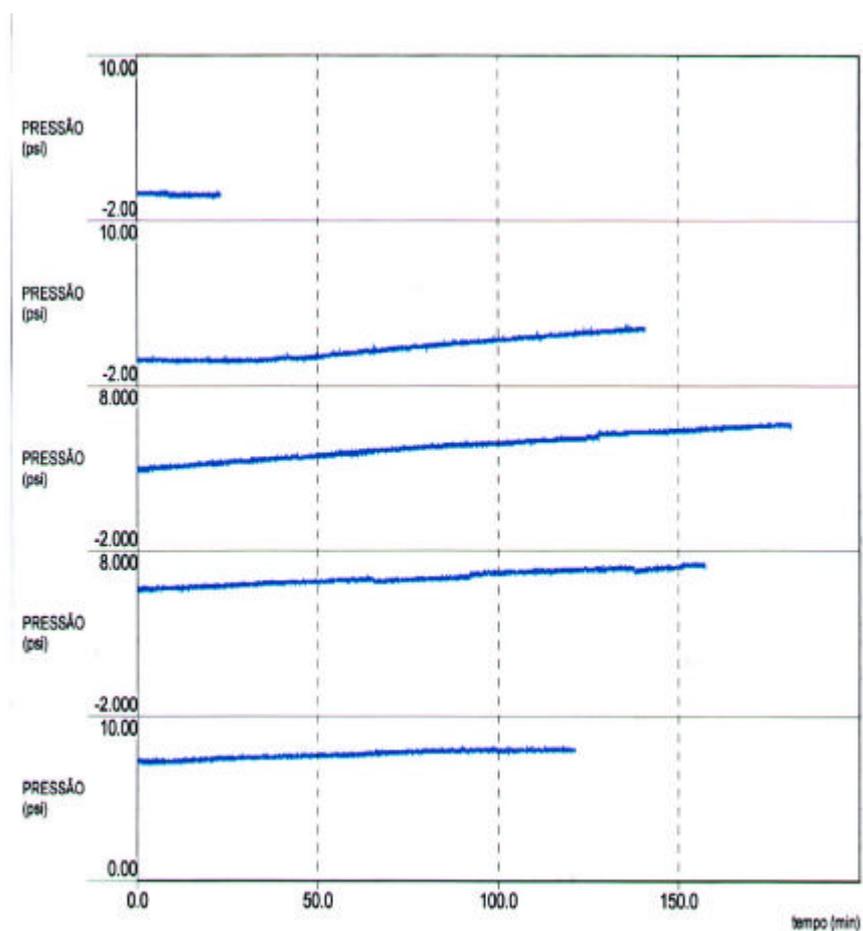


FIGURA 71 – Gráfico de pressão x tempo - ciclo de carregamento

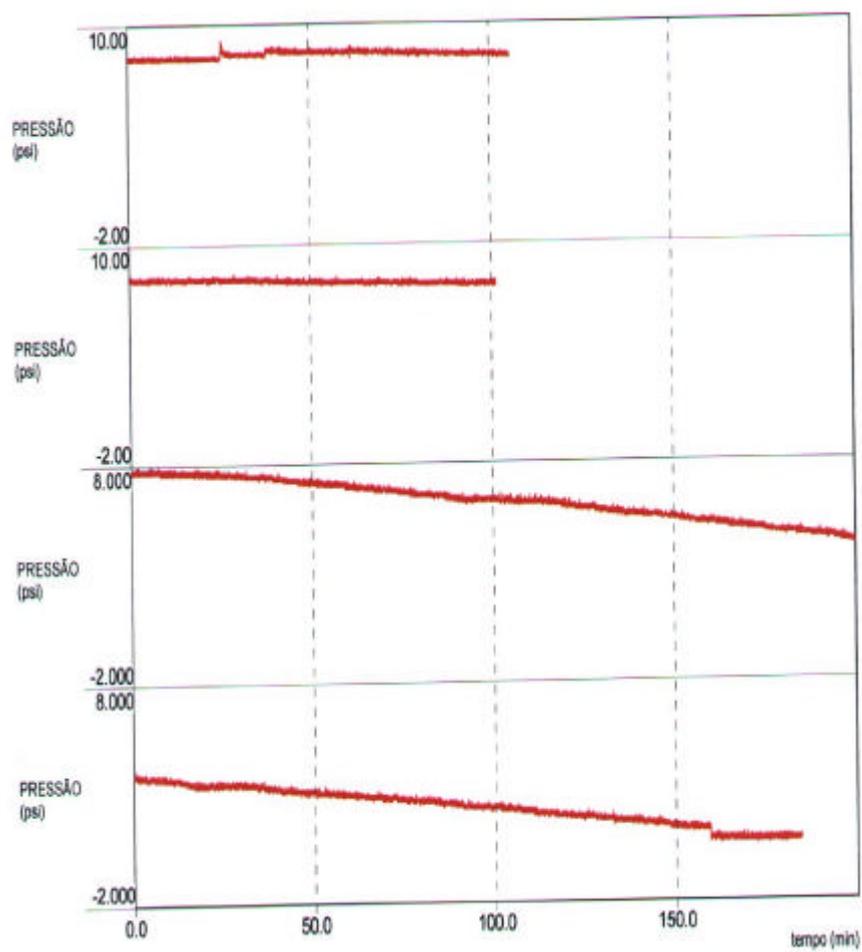


FIGURA 72 – Gráfico de pressão x tempo – ciclo de descarga.

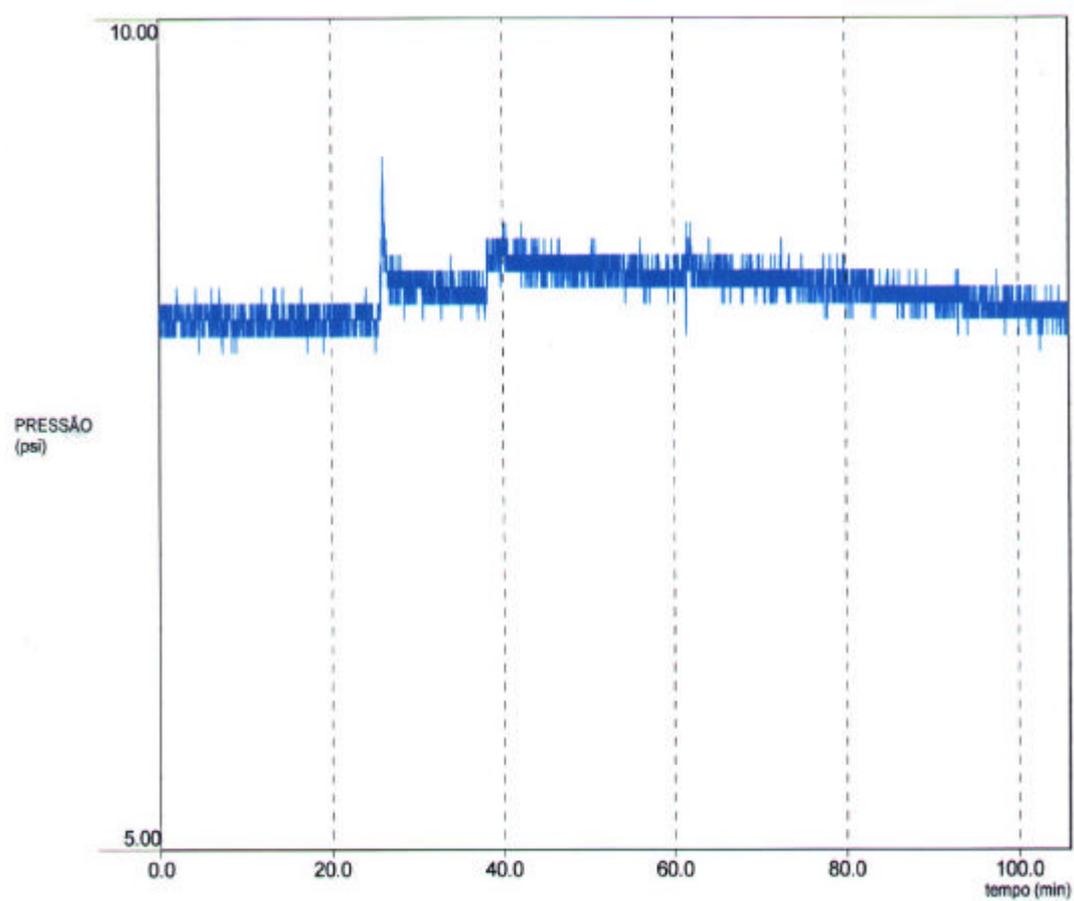


FIGURA 73 – Pico de pressão na descarga do silo

Na figura 74 são mostrados os valores de pressão horizontais máximas nas paredes do corpo e da tremonha do silo horizontal. À esquerda são mostradas as pressões de carregamento e à direita as pressões de descarga

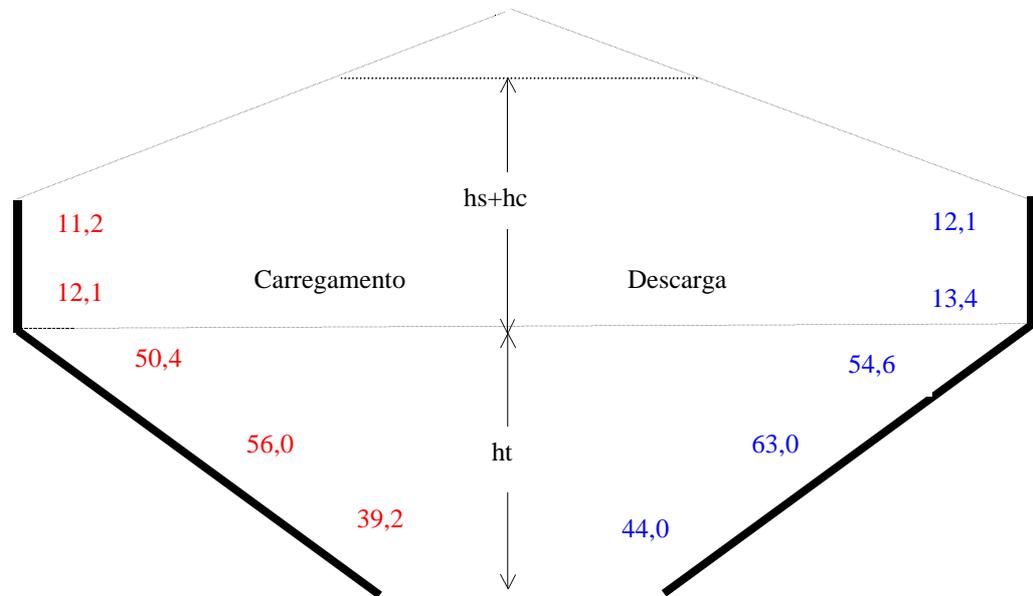


Figura 74 – Mapeamento das pressões máximas nas paredes e na tremonha durante o carregamento e descarga do silo horizontal.

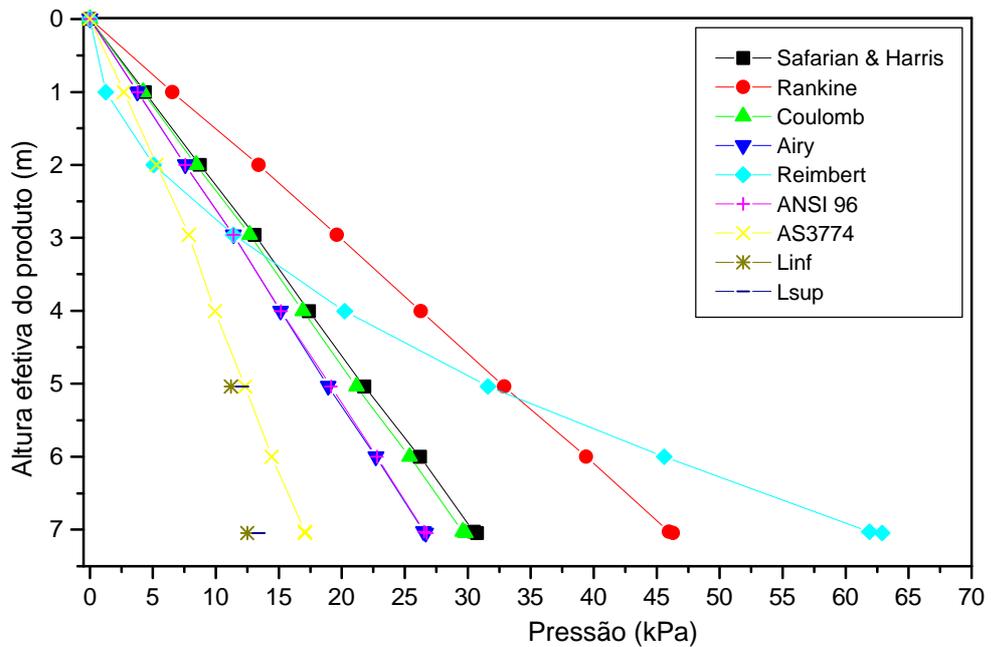


FIGURA 75 – Gráfico das pressões ativas e valores experimentais na parede do silo horizontal.

Considerando as pressões dinâmicas medidas nas paredes do silo o método que melhor estima as pressões é o da norma Australiana sendo os modelos de Reimbert & Reimbert e Rankine conservadores. O primeiro modelo teórico estima as pressões considerando a altura elevada ao quadrado e o segundo modelo desconsidera o atrito.

As pressões estáticas, experimentais e teóricas, na tremonha são mostradas na figura 76. Pode ser observado que os valores observados foram compatíveis com a norma Australiana, configurando uma distribuição trapezoidal das pressões ao longo da altura da tremonha.

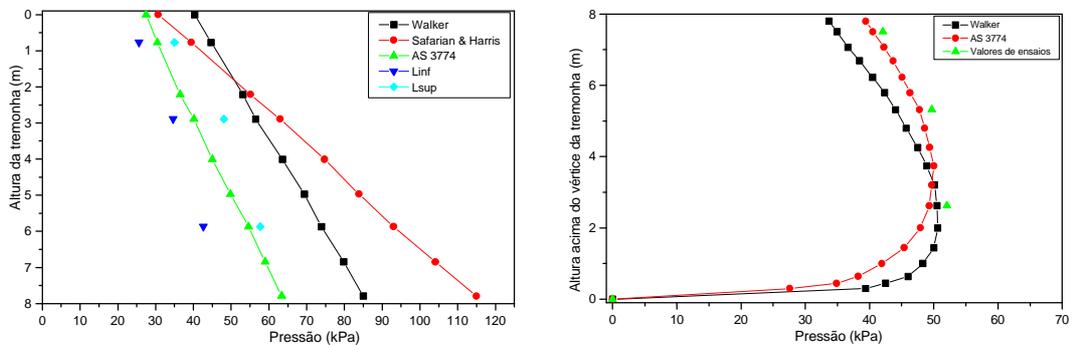


FIGURA 76 (a) – Pressões estáticas normais. (b) – Pressões dinâmicas normais - Tremonha

Para as pressões nas paredes da tremonha, na condição mais desfavorável que é a fase de descarga, a teoria de Walker e a norma Australiana forneceram boas estimativas. Na figura 76(b), observa-se os valores experimentais e que as maiores pressões foram medidas pelas células 4 e 7, instaladas a 5,2 metros da linha de transição entre o corpo do silo e a tremonha (figuras 62, 64). Comparando com os valores de ensaios a estimativa das pressões na transição é mais compatível com o método da norma Australiana enquanto que para as pressões máximas o método de Walker apresenta maior compatibilidade com os valores experimentais.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

As unidades horizontais são estruturas indispensáveis para a otimização e expansão da rede armazenadora em nosso país. Em função das vantagens que apresentam, podemos considerar o seu desempenho bastante satisfatório para a manutenção das condições de armazenamento de produtos agrícolas e industriais. Alguns cuidados devem ser tomados para que não haja comprometimento da estrutura. Um grande problema ainda a ser sanado é a aeração, que requer equipamentos de custo mais elevado que as unidades verticais e ainda os problemas de infiltração pelo lençol freático.

Propõe-se que a notação “*silos horizontais*” seja empregada para as estruturas conhecidas como armazéns graneleiros em função das características construtivas, da finalidade a qual se destinam e da utilização de equipamentos empregados nestas estruturas de armazenamento como cabos de termometria o que permite um controle sobre a qualidade do produto armazenado. A utilização do fundo inclinado, ao contrário do silos de fundo plano, permite a fácil operação e como consequência a diminuição dos custos de processamento dos produtos. Considerando os silos horizontais elevados os custos de sua construção podem ser compensados pela facilidade de operação e processamento rápido, tornando-o bastante funcional. A grande vantagem da sua utilização reside no processamento de grandes volumes a baixos custos por tonelada estocada, e ainda a fácil expedição dos produtos. Tais características, permitem a sua utilização para armazenamento de produtos de fluxo livre, com

características bem distintas, como os resíduos industriais, açúcar, e os granulares sem comprometimento da estrutura.

Este trabalho, pioneiro no estudo dos silos horizontais corresponde principalmente à análise das pressões devidas ao produto armazenado, dando ênfase às teorias empregadas e aos procedimentos experimentais.

A seguir são relatados alguns aspectos conclusivos considerados de relevância, quando analisados os métodos de cálculos das ações para as paredes do corpo do silo e da tremonha nas condições estáticas e dinâmicas.

Com relação aos métodos teóricos empregados:

- 1- As teorias aplicadas são conservadoras. Os métodos de Coulomb e Rankine e a norma Australiana, mostraram-se de boa compatibilidade com os conseguintes resultados medidos no ensaio do modelo. Para o silo horizontal o método proposto pela norma Australiana é compatível com os valores experimentais. Os métodos de Reimbert & Reimbert e Rankine não foram adequados para o estudo em questão, vistos os resultados apresentados tanto nos ensaios do modelo piloto quanto para o silo horizontal.
- 2- Na avaliação das ações na tremonha, na condição estática, o método proposto pela norma Australiana se mostrou compatível com os resultados obtidos nos ensaios do modelo piloto. O método de Walker se mostrou mais conservador em função da estimativa das pressões na linha de transição entre o corpo do silo e a tremonha. Na condição dinâmica os dois métodos foram compatíveis com os resultados obtidos nos ensaios do silo horizontal.

Com relação às propriedades físicas dos produtos armazenados:

- 1- A estimativa das ações baseada nas determinações dessas propriedades nos fornecem resultados mais consistentes, comparados com os valores tabelados, fornecidos pelas diversas normas internacionais.
- 2- As formulações teóricas devem levar em consideração a influência do atrito do produto com as paredes e a variabilidade do peso específico dos produtos armazenados. Com isto, para o estado limite de dimensionamento propõe-se o intervalo para o peso específico $0,75 \leq \gamma \leq 1,20$.

Com relação aos ensaios no modelo piloto:

- 1- O modelo piloto (escala pouco reduzida) pode ser empregado com vantagens para avaliação das ações e do coeficiente K, pois os resultados obtidos, foram compatíveis com os obtidos no silo horizontal em escala real. A grande vantagem da utilização de modelos reside na praticidade e economia nos ensaios. O controle das variáveis envolvidas foi facilitado e permitiu a obtenção de resultados confiáveis.
- 2- A utilização de produtos como areia, tendo como características, alto peso específico e fluxo livre, permitiu a avaliação das pressões e do valor de K considerando os limites máximos para o dimensionamento.

Com relação às medições diretas das pressões:

- 1- As determinações experimentais fornecem resultados sem a interferência do material estrutural. As células de pressão, empregadas na instrumentação geotécnica, mostraram-se de grande aplicabilidade, tanto no ensaio do modelo piloto quanto no ensaio no silo horizontal.

- 2- A forma de instalação das células de pressão nas paredes não comprometeu a integridade do silo horizontal.
- 3- Recomenda-se o emprego das células de pressão EPC-GEOKON para avaliação direta das pressões estáticas e dinâmicas nos silos, considerando a calibração precisa, sensibilidade e resposta rápida do equipamento.

Com relação ao valor do coeficiente K:

- 1- Para produtos granulares, de fluxo livre, os valores de K não variam em função da relação altura/lado do silo, pois os ângulos de atrito não variam com a compactação do produto. As variações ocorridas no modelo piloto para o valor de K medido na massa do produto se devem à influência do estado de pressões decorrentes da geometria e rugosidade das paredes da tremonha.
- 2- Na descarga, o valor de K é maior, pois há um aumento das pressões horizontais e uma diminuição das pressões verticais.
- 3- Pela análise geral dos resultados teóricos e experimentais obtidos, os valores propostos pela maioria das normas e pesquisadores são conservadores e que a variabilidade natural dos valores exige uma análise estrutural pelo método dos estados limites de dimensionamento.
- 4- Considerando os valores experimentais obtidos e a variabilidade encontrada para as propriedades dos produtos nas normas internacionais, recomenda-se os limites inferiores e superiores para o valor de K: $0,25 \leq K \leq 0,55$ no corpo do silo e $0,60 \leq K \leq 0,80$ para a tremonha. Estes intervalos abrangem também as sobrepressões devidas ao fluxo do produto durante a descarga.

Com relação às pressões nas paredes laterais e na tremonha:

- 1- Para as pressões nas paredes dos silos horizontais recomenda-se utilizar a expressão matemática : $p_h = \gamma h K$, com os valores de K definidos no item anterior a partir do modelo empírico.
- 2- Para o cálculo das pressões estáticas e dinâmicas, na tremonha, recomenda-se o método de Walker em função dos valores máximos observados. Para a condição dinâmica deve-se considerar os valores máximos a uma altura $h_v/4$ do vértice da tremonha.

Sugestões para trabalhos futuros

- 1- Estudo experimental utilizando células de pressão tipo sondas inseridas na massa de grãos, aplicado em medições de silos pilotos com várias repetições para mapeamento das pressões na seção transversal do silo.
- 2- Estudo experimental em silos de baixa relação altura/lado e fundo plano para avaliação das pressões utilizando a metodologia aqui definida.
- 3- Estudo experimental de um silo padrão para avaliação das propriedades físicas dos produtos armazenados com base nas recomendações das várias normas internacionais.
- 4- Estudo numérico, através de elementos finitos, para melhor definição do comportamento das pressões na massa dos produtos.
- 5- Estudo teórico através das leis constitutivas para definição de um modelo que avalie as tensões na massa dos produtos.

ANEXO I

FICHAS CATALOGRÁFICAS

Foram levantados os dados para a composição de um arquivo cadastral enfocando a importância estratégica e econômica da instalação das unidades armazenadoras para a região. O modelo de ficha proposto, tem como objetivo identificar as principais unidades existentes no país, caracterizando-as estruturalmente, indicando algumas soluções para as principais patologias encontradas. A proposta final é de recuperação destas estruturas tão importantes para o setores agrícola e civil. As fichas foram elaboradas a partir das visitas técnicas às unidades e consulta à projetos dando ênfase aos seguintes itens:

I - HISTÓRICO : Localização geográfica dos silos no Brasil, capacidade estática de estocagem, ano de construção e outros dados pertinentes que permitiram a sua instalação.

II - CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE : Foram levantados o seguintes dados; Capacidade estática, plantas (projetos e fotos), tipo de silo (elevado, enterrado, etc), tipos de material construtivo empregado, sistema estrutural (infra estrutura e super estrutura), tipo de produto armazenado, sistema de carregamento e descarga e sistema de aeração.

III - DESCRIÇÃO DAS PATOLOGIAS : Problemas estruturais : paredes, colunas, cobertura, piso (análise das principais causas das fissuras e recalques).

IV - PROCESSO DE CÁLCULO : Análise dos procedimentos de cálculo e critérios de dimensionamento (estimativa das ações), das unidades visitadas.

O resultado destas visitas possibilitou uma análise comparativa entre silos horizontais e verticais, verificadas as suas vantagens e desvantagens, no tocante aos custos de construção, transporte, equipamentos e mão de obra, mostrando a atual situação em que se encontra o sistema de armazenamento no país.

ANEXO II**RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO**

QUADRO 02 - Valores de calibração das células de pressão – EPC 3500 -1- 100

| Número da célula | Temperatura de calibração °C | Fator Gage Linear (psi/mV/V) |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 47843 | 24,6 | 0,99131 |
| 47844 | 24,8 | 0,99341 |
| 47845 | 25,0 | 1,00464 |
| 47846 | 25,1 | 0,99182 |
| 47847 | 24,1 | 1,00186 |
| 47848 | 23,8 | 0,99373 |
| 47849 | 24,1 | 1,00444 |
| 47850 | 23,2 | 1,00152 |
| 47851 | 24,0 | 1,00071 |
| 47852 | 23,8 | 1,00106 |
| 47089 | 22,7 | 1,00343 |
| 47090 | 22,4 | 1,00302 |
| 47091 | 22,8 | 1,00384 |
| 47092 | 22,5 | 0,99605 |
| 47093 | 21,7 | 1,00174 |
| 47094 | 22,8 | 0,99597 |
| 47095 | 22,7 | 0,99904 |
| 47096 | 22,0 | 1,00208 |
| 47097 | 22,2 | 1,00083 |
| 47098 | 22,6 | 1,00428 |

Coeficiente de regressão médio = 0,98.

ANEXO III

DIMENSIONAMENTO DO MODELO PILOTO

Material:

Madeira compensada

Dimensões:

Espessura nominal: $e = 0,12\text{cm}$

Comprimento = 244cm

Largura = 122cm

Número de lâminas = 9

Características Mecânicas:

Tensão de ruptura à flexão: $\sigma_{adm} = 650,36 \text{ kgf/cm}^2$

Módulo de elasticidade à flexão paralela às fibras: $E_{comp,||} = 871,56 \text{ kN/cm}^2$

Módulo de elasticidade à flexão normal às fibras: $E_{comp,\perp} = 410,80 \text{ kN/cm}^2$

Resistência média à compressão: $f_{c,m,comp} = 3,00 \text{ kN/cm}^2$

Resistência característica à compressão: $f_{c,k,comp} = 0,7 \times 3,00 = 2,1 \text{ kN/cm}^2$

Coefficientes de modificação: k_{mod}

$$k_{mod} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3}$$

$$k_{mod,1} = 0,9 \text{ (carregamento de curta duração)}$$

$$k_{mod,2} = 1,0 \text{ (classe de umidade 1)}$$

$$k_{mod,3} = 1,0 \text{ (prévia classificação das peças)}$$

$$k_{mod} = 0,9 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,9$$

Coeficiente de ponderação: γ_w

Para compressão paralela às fibras: $\gamma_w = 1,4$

Resistência de cálculo à compressão:

$$f_{c,d,comp} = \frac{k_{mod}}{\gamma_w} \cdot f_{c,k,comp} = \frac{0,9}{1,4} \cdot 2,1 = 1,35 \text{ kN / cm}^2$$

Material:

Madeira Maciça : Ipê

Nome científico: *Tabebuia serratifolia*

Classe de Resistência: C60

Resistência característica à compressão paralela às fibras:

$$f_{c,0,k} = 60 \text{ MPa} = 6,0 \text{ kN/cm}^2$$

Resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras:

$$f_{v,k} = 8 \text{ MPa} = 0,8 \text{ kN/cm}^2$$

Peso específico aparente:

$$\rho_{apar} = 1000 \text{ kgf/m}^3 = 10 \text{ kN/m}^3$$

Módulo de elasticidade médio na direção paralela às fibras:

$$E_{c0,m} = 2450 \text{ kN/cm}^2$$

Coeficientes de modificação: k_{mod}

$$k_{mod} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3}$$

$$k_{mod,1} = 0,9 \text{ (carregamento de curta duração)}$$

$$k_{mod,2} = 1,0 \text{ (classe de umidade 1)}$$

$$k_{mod,3} = 0,8 \text{ (prévia classificação das peças)}$$

$$k_{mod} = 0,9 \cdot 1,0 \cdot 0,8 = 0,72$$

Módulo de elasticidade efetivo na direção paralela às fibras:

$$E_{c0,ef} = k_{mod} \cdot E_{c0,m} = 0,72 \cdot 2450 = 1764 \text{ kN / cm}^2$$

Coeficiente de ponderação: γ_w

$$\text{Para compressão paralela às fibras: } \gamma_w = 1,4$$

Resistência de cálculo à compressão paralela às fibras:

$$f_{c0,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_w} \cdot f_{c0,k} = \frac{0,72}{1,4} \cdot 6,0 = 3,09 \text{ kN / cm}^2$$

Dimensionamento:

O dimensionamento será feito considerando que o modelo reduzido será carregado com areia ($\gamma = 16.kN / m^3$)

Os critérios de dimensionamento serão os seguintes:

Para as chapas de madeira compensada

1) Estado Limite de Utilização:

$$\text{flecha máxima: } a_{\max} = \frac{L_s}{500}$$

onde L_s é o espaçamento entre sarrafos de madeira maciça

2) Estado Limite Último:

verificação da resistência à flexão

$$\sigma \leq f_{c,d,comp}$$

Para os sarrafos de madeira maciça:

1) Estado Limite de Utilização:

$$\text{flecha máxima: } a_{\max} = \frac{L}{500},$$

onde L é o espaçamento entre os pontos de apoio do sarrafo.

2) Estado Limite Último:

verificação da resistência à flexão

$$\sigma \leq f_{c0,d}$$

Ações nas peças:

Para todas as peças, exceto na Tremonha:

$$\text{Pressão horizontal: } P_h = \gamma \cdot h \cdot k$$

onde:

$$\text{Peso específico da areia: } \gamma = 1,6 \cdot \text{kN} / \text{m}^3$$

$$\text{Coeficiente de empuxo horizontal: } k = 0,5$$

$$\text{Altura considerada para adoção da pressão uniforme: } h = \frac{2}{3} \cdot H$$

$$\text{Altura total da camada de areia: } H$$

Para a Tremonha:

$$\text{Pressão Normal: } Q_n = P_v \cdot \cos^2 \alpha + P_h \cdot \sin^2 \alpha$$

onde:

$$\text{Ângulo de inclinação da tremonha: } \alpha = 35^\circ$$

$$\text{Pressão vertical: } P_v = \gamma \cdot H$$

$$\text{Pressão horizontal: } P_h = \gamma \cdot H \cdot k$$

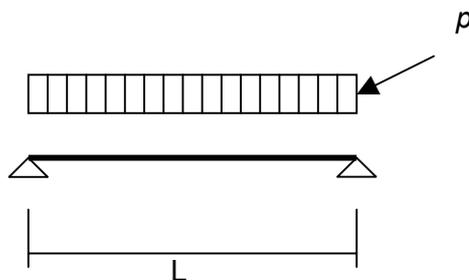
Coeficientes de majoração das ações:

$$\text{Para os Estados Limites Últimos: } \gamma_Q = 1,2$$

$$\text{Para os Estados Limites de Utilização: } \gamma_{Q,util} = 1,0$$

Esquema estático:

viga bi-apoiada



$$\text{Flecha: } a = \frac{5 \cdot p_{d,util} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$\text{Momento fletor máximo: } M = \frac{p_d \cdot L^2}{8}$$

$$\text{Tensão de compressão: } \sigma = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2}$$

onde:

$$\text{Momento de inércia: } I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$\text{Carga uniformemente distribuída última: } p_d = \gamma_Q \cdot P_h \cdot b$$

$$p_d = \gamma_Q \cdot Q_n \cdot b \text{ (Tremonha)}$$

$$\text{Carga unif. distribuída de utilização: } p_{d,util} = \gamma_{Q,util} \cdot P_h \cdot b$$

$$p_{d,util} = \gamma_{Q,util} \cdot Q_n \cdot b \text{ (Tremonha)}$$

onde:

Largura unitária: b

Chapa Frontal Inferior

$$H = 2,30\text{m}$$

$$h = 1,53\text{m}$$

$$\text{Pressão horizontal: } P_h = \gamma \cdot h \cdot k = 1,23 \cdot 10^{-4} \text{ kN / cm}^2$$

Estado Limite de Utilização:

$$p_{d,util} = \gamma_{Q,util} \cdot P_h \cdot b = 1,23 \cdot 10^{-4} \cdot b \text{ kN/cm}$$

$$\text{Flecha: } a = \frac{5 \cdot p_{d,util} \cdot L_s^4}{384 \cdot E_{comp,\perp} \cdot I} \leq \frac{L_s}{500}$$

$$L_s \leq \sqrt[3]{\frac{384 \cdot 410,80 \cdot b \cdot 1,2^3}{5 \cdot 1,23 \cdot 10^{-4} \cdot b \cdot 500 \cdot 12}} \quad L_s \leq 42 \text{ cm}$$

Estado Limite Último:

$$p_d = \gamma_Q \cdot P_h \cdot b = 1,48 \cdot 10^{-4} \cdot b \text{ kN/cm}$$

$$\text{Momento fletor máximo: } M = \frac{p_d \cdot L_s^2}{8} = 0,03 \cdot b \text{ kN.cm}$$

$$\text{Tensão de compressão: } \sigma = \frac{M}{I} \cdot \frac{e}{2} = \frac{0,03 \cdot b}{\frac{b \cdot 1,2^3}{12}} \cdot \frac{1,2}{2} = 0,13 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{c,d,comp}$$

Sarrafos Frontais Inferiores

Seção adotada: (6x6)cm²

$$I = 108 \text{ cm}^4$$

Estado Limite de Utilização:

$$b = 20 \text{ cm}$$

$$p_{d,util} = \gamma_{Q,util} \cdot P_h \cdot b = 1,23 \cdot b \cdot 10^{-4} = 2,46 \cdot 10^{-3} \text{ kN/cm}$$

$$\text{Flecha: } a = \frac{5 \cdot p_{d,util} \cdot L^4}{384 \cdot E_{c0,ef} \cdot I} \leq \frac{L}{500}$$

$$L \leq \sqrt[3]{\frac{384 \cdot 1764 \cdot 108}{5 \cdot 2,46 \cdot 10^{-3} \cdot 500}} \quad L \leq 228 \text{ cm}$$

Estado Limite Último:

$$p_d = \gamma_Q \cdot P_h \cdot b = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ kN / cm}$$

$$\text{Momento fletor máximo: } M = \frac{p_d \cdot L^2}{8} = \frac{2,95 \cdot 10^{-3} \cdot 228^2}{8} = 19,2 \text{ kN.cm}$$

$$\text{Tensão de compressão: } \sigma = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} = \frac{19,2}{108} \cdot \frac{6}{2} = 0,53 \text{ kN / cm}^2 \leq f_{c0,d}$$

Chapa Frontal Superior e Chapa Lateral

$$H = 1,50 \text{ m}$$

$$h = 1,00 \text{ m}$$

$$\text{Pressão horizontal: } P_h = \gamma \cdot h \cdot k = 0,80 \cdot 10^{-4} \text{ kN/cm}^2$$

Estado Limite de Utilização:

$$p_{d,util} = \gamma_{Q,util} \cdot P_h \cdot b = 0,80 \cdot b \cdot 10^{-4} \text{ kN / cm}$$

$$\text{Flecha: } a = \frac{5 \cdot p_{d,util} \cdot L_s^4}{384 \cdot E_{comp,\perp} \cdot I} \leq \frac{L_s}{500}$$

$$L_s \leq \sqrt[3]{\frac{384 \cdot 410,80 \cdot b \cdot 1,2^3}{5 \cdot 0,80 \cdot 10^{-4} \cdot b \cdot 500 \cdot 12}} \quad L_s \leq 48cm$$

Estado Limite Último:

$$p_d = \gamma_Q \cdot P_h \cdot b = 0,96 \cdot b \cdot 10^{-4} \text{ kN / cm}$$

$$\text{Momento fletor máximo: } M = \frac{p_d \cdot L_s^2}{8} = 0,028 \cdot b \text{ kN.cm}$$

$$\text{Tensão de compressão: } \sigma = \frac{M}{I} \cdot \frac{e}{2} = \frac{0,028 \cdot b}{\frac{b \cdot 1,2^3}{12}} \cdot \frac{1,2}{2} = 0,12 \text{ kN / cm}^2 \leq f_{c,d,comp}$$

Sarrafos Frontais Superiores e Sarrafos Laterais

Seção adotada: (6x6)cm²

$$I = 108 \text{ cm}^4$$

Estado Limite de Utilização:

$$b = 20 \text{ cm}$$

$$p_{d,util} = \gamma_{Q,util} \cdot P_h \cdot b = 0,8 \cdot b \cdot 10^{-4} = 1,60 \cdot 10^{-3} \text{ kN / cm}$$

$$\text{Flecha: } a = \frac{5 \cdot p_{d,util} \cdot L^4}{384 \cdot E_{c0,ef} \cdot I} \leq \frac{L}{500}$$

$$L \leq \sqrt[3]{\frac{384 \cdot 1764 \cdot 108}{5 \cdot 1,60 \cdot 10^{-3} \cdot 500}} \quad L \leq 263 \text{ cm}$$

Estado Limite Último:

$$p_d = \gamma_Q \cdot P_h \cdot b = 1,92 \cdot 10^{-3} \text{ kN / cm}$$

$$\text{Momento fletor máximo: } M = \frac{p_d \cdot L^2}{8} = \frac{1,92 \cdot 10^{-3} \cdot 263^2}{8} = 16,6 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\text{Tensão de compressão: } \sigma = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} = \frac{16,6}{108} \cdot \frac{6}{2} = 0,46 \text{ kN} / \text{cm}^2 \leq f_{c0,d}$$

Chapa da Tremonha

$$H = 2,30 \text{ m}$$

$$\text{Pressão horizontal: } P_h = \gamma \cdot H \cdot k = 1,84 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$\text{Pressão vertical: } P_v = \gamma \cdot H = 3,68 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Pressão Normal: } Q_n &= P_v \cdot \cos^2 \alpha + P_h \cdot \sin^2 \alpha = 3,68 \cdot \cos^2 35^\circ + 1,84 \cdot \sin^2 35^\circ \\ Q_n &= 3,07 \text{ kN} / \text{m}^2 \end{aligned}$$

Estado Limite de Utilização:

$$p_{d,util} = \gamma_{Q,util} \cdot Q_n \cdot b = 3,07 \cdot b \cdot 10^{-4} \text{ kN} / \text{cm}$$

$$\text{Flecha: } a = \frac{5 \cdot p_{d,util} \cdot L_s^4}{384 \cdot E_{comp,II} \cdot I} \leq \frac{L_s}{500}$$

$$L_s \leq \sqrt[3]{\frac{384 \cdot 871,56 \cdot b \cdot 1,2^3}{5 \cdot 3,07 \cdot 10^{-4} \cdot b \cdot 500 \cdot 12}} \quad L_s \leq 40 \text{ cm}$$

Estado Limite Último:

$$p_d = \gamma_Q \cdot Q_n \cdot b = 3,68 \cdot b \cdot 10^{-4} \text{ kN} / \text{cm}$$

$$\text{Momento fletor máximo: } M = \frac{p_d \cdot L_s^2}{8} = 0,074b \cdot kN \cdot cm$$

$$\text{Tensão de compressão: } \sigma = \frac{M}{I} \cdot \frac{e}{2} = \frac{0,074 \cdot b}{b \cdot 1,2^3} \cdot \frac{1,2}{2} = 0,31 kN / cm^2 \leq f_{c,d,comp}$$

Sarrafos da Tremonha

Seção adotada: (6x6)cm²

$$I = 108 \text{cm}^4$$

Estado Limite de Utilização:

$$b = 40 \text{cm}$$

$$p_{d,util} = \gamma_{Q,util} \cdot P_h \cdot b = 3,07 \cdot b \cdot 10^{-4} = 1,22 \cdot 10^{-2} kN / cm$$

$$\text{Flecha: } a = \frac{5 \cdot p_{d,util} \cdot L^4}{384 \cdot E_{c0,ef} \cdot I} \leq \frac{L}{500}$$

$$L \leq \sqrt[3]{\frac{384 \cdot 1764 \cdot 108}{5 \cdot 1,22 \cdot 10^{-2} \cdot 500}} \quad L \leq 134 \text{cm}$$

$$L = 100 \text{cm}$$

Estado Limite Último:

$$p_d = \gamma_Q \cdot P_h \cdot b = 1,46 \cdot 10^{-2} kN / cm$$

$$\text{Momento fletor máximo: } M = \frac{p_d \cdot L^2}{8} = \frac{1,46 \cdot 10^{-2} \cdot 100^2}{8} = 18,3 kN \cdot cm$$

$$\text{Tensão de compressão: } \sigma = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} = \frac{18,3}{108} \cdot \frac{6}{2} = 0,51 \text{ kN} / \text{cm}^2 \leq f_{c0,d}$$

Tremonha

Seção adotada: (6x12)cm²

$$I = 864 \text{ cm}^4$$

Estado Limite de Utilização:

$$b = 50 \text{ cm}$$

$$p_{d,util} = \gamma_{Q,util} \cdot P_h \cdot b = 3,07 \cdot b \cdot 10^{-4} = 1,54 \cdot 10^{-2} \text{ kN} / \text{cm}$$

$$\text{Flecha: } a = \frac{5 \cdot p_{d,util} \cdot L^4}{384 \cdot E_{c0,ef} \cdot I} \leq \frac{L}{500}$$

$$L \leq \sqrt[3]{\frac{384 \cdot 1764 \cdot 108}{5 \cdot 1,54 \cdot 10^{-2} \cdot 500}} \quad L \leq 124 \text{ cm}$$

Estado Limite Último:

$$p_d = \gamma_Q \cdot Q_n \cdot b = 1,84 \cdot 10^{-2} \text{ kN} / \text{cm}$$

$$\text{Momento fletor máximo: } M = \frac{p_d \cdot L^2}{8} = \frac{1,84 \cdot 10^{-2} \cdot 140^2}{8} = 45,1 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\text{Tensão de compressão: } \sigma = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} = \frac{45,1}{864} \cdot \frac{12}{2} = 0,31 \text{ kN} / \text{cm}^2 \leq f_{c0,d}$$

Pilares

Volume de areia máximo: $V = 3,2m^3$

Seção adotada: $(6 \times 12)cm^2$

Força normal de compressão de cálculo: $F_d = \frac{\gamma_Q \cdot \gamma_{areia} \cdot V}{4} = \frac{1,2 \cdot 16 \cdot 3,2}{4} = 15,4kN$

Raio de giração: $i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \frac{h}{\sqrt{12}}$

Esbeltez: $\lambda = \frac{L}{i} = 80 \cdot \frac{\sqrt{12}}{12} = 23 \leq 40$ (peça curta)

Estado Limite Último

$$\sigma_d = \frac{F_d}{A} = \frac{15,4}{72} = 0,21kN/cm^2 \leq f_{c0,d}$$

Ligações:

No dimensionamento das ligações de estruturas de madeira por pinos duas situações devem ser verificadas: o embutimento da madeira ou a flexão do pino. Estes dois fenômenos são função da relação entre a espessura da peça de madeira e o diâmetro do pino, dada pela seguinte expressão:

$$\beta = \frac{t}{d} \quad \text{com:}$$

t = espessura convencional da madeira;

d = diâmetro do pino

A comparação deste coeficiente com o valor de β_{lim} , que leva em conta as resistências da madeira e do aço, determina a forma de cálculo da resistência de uma seção de corte do pino. O coeficiente β_{lim} é determinado pela seguinte expressão:

$$\beta_{lim} = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \quad \text{sendo:}$$

f_{yd} = resistência de cálculo de escoamento do pino metálico, podendo ser admitida como igual à resistência normal característica de escoamento;

f_{ed} = resistência de cálculo de embutimento da madeira. Neste caso, considerada igual a resistência à compressão paralela às fibras.

Com isto têm-se as seguintes situações de cálculo:

I) $\beta \leq \beta_{lim}$ (embutimento da madeira)

$$R_{vd,1} = 0,40 \cdot \frac{t^2}{\beta} \cdot f_{ed}$$

II) $\beta > \beta_{lim}$ (flexão do pino)

$$R_{vd,1} = 0,625 \cdot \frac{d^2}{\beta_{lim}} \cdot f_{yd}$$

Ligação Pilar/Tremonha

$d = 0,95\text{cm}$

$t = 6\text{cm}$

$$\beta = \frac{t}{d} = \frac{6}{0,95} = 6,3$$

$$f_{ed} = f_{c55,d}$$

$$f_{c55,d} = \frac{f_{c0,d} \cdot f_{c90,d}}{f_{c0,d} \cdot \text{sen}^2 55^\circ + f_{c90,d} \cdot \text{cos}^2 55^\circ}$$

$$f_{c90,d} = 0,25 \cdot f_{c0,d} \cdot \alpha_n = 0,25 \cdot 3,09 \cdot 1,95$$

$$f_{c90,d} = 1,51 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

substituindo:

$$f_{c55,d} = 1,82 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

se:

$$f_{yd} = 21,8 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$f_{ed} = f_{c55,d} = 1,82 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

temos:

$$\beta_{\text{lim}} = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{21,8}{1,82}} = 4,3$$

$\beta > \beta_{\text{lim}}$, portanto flexão no pino.

a resistência de 1 parafuso para 1 seção de corte é:

$$R_{Vd,1} = 0,625 \cdot \frac{d^2}{\beta_{\text{lim}}} \cdot f_{yd} = 0,625 \cdot \frac{0,95^2}{4,3} \cdot 21,8 = 2,9 \text{ kN}$$

o número de parafusos:

$$n = \frac{F_d}{R_{Vd,1}} = \frac{11}{2,9} = 3,8 \quad \text{portanto 4 parafusos.}$$

Ligação Tremonha/Cobrejunta

$$d = 0,95\text{cm}$$

$$t = 3\text{cm}$$

$$\beta = \frac{t}{d} = \frac{3}{0,95} = 3,2$$

$$f_{ed} = f_{c35,d}$$

$$f_{c55,d} = \frac{f_{c0,d} \cdot f_{c90,d}}{f_{c0,d} \cdot \text{sen}^2 35^\circ + f_{c90,d} \cdot \text{cos}^2 35^\circ}$$

$$f_{c90,d} = 0,25 \cdot f_{c0,d} \cdot \alpha_n = 0,25 \cdot 3,09 \cdot 1,95$$

$$f_{c90,d} = 1,51\text{kN} / \text{cm}^2$$

substituindo:

$$f_{c55,d} = 2,3\text{kN} / \text{cm}^2$$

se:

$$f_{yd} = 21,8\text{kN} / \text{cm}^2$$

$$f_{ed} = f_{c55,d} = 2,3\text{kN} / \text{cm}^2$$

temos:

$$\beta_{\text{lim}} = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{21,8}{2,3}} = 3,8$$

$\beta \leq \beta_{\text{lim}}$, portanto embutimento da madeira

a resistência de 1 parafuso para 1 seção de corte é:

$$R_{Vd,1} = 0,40 \cdot \frac{t^2}{\beta} \cdot f_{ed} = 0,40 \cdot \frac{3^2}{3,2} \cdot 2,3 = 2,6kN$$

o número de parafusos:

$$n = \frac{F_d}{R_{Vd}} = \frac{22}{2 \cdot 2,6} = 4,1$$

portanto 4 parafusos.

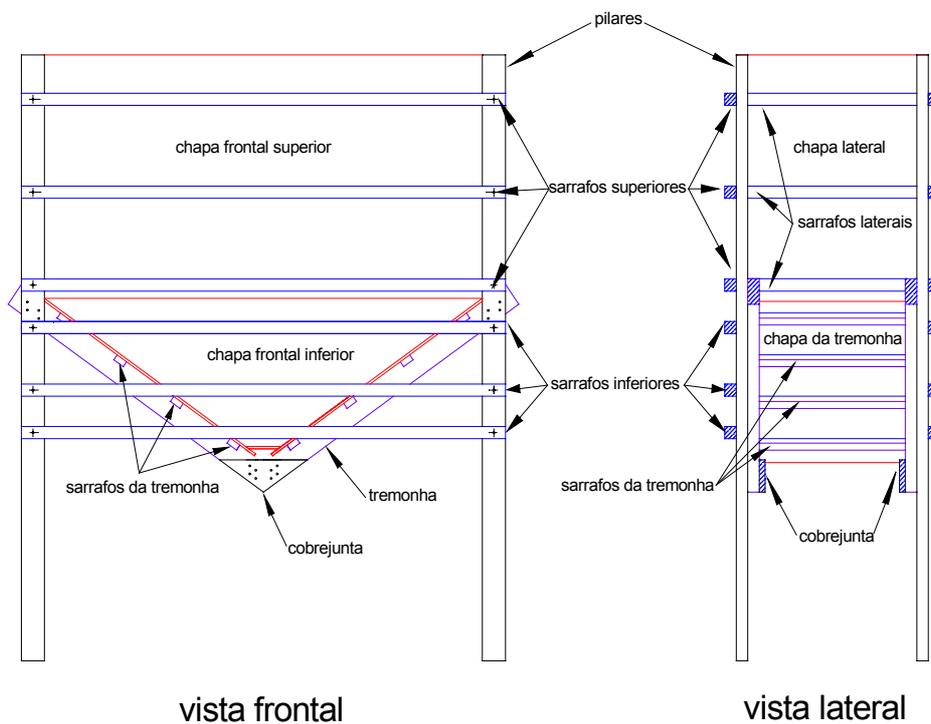


FIGURA 117 – Esquema geral

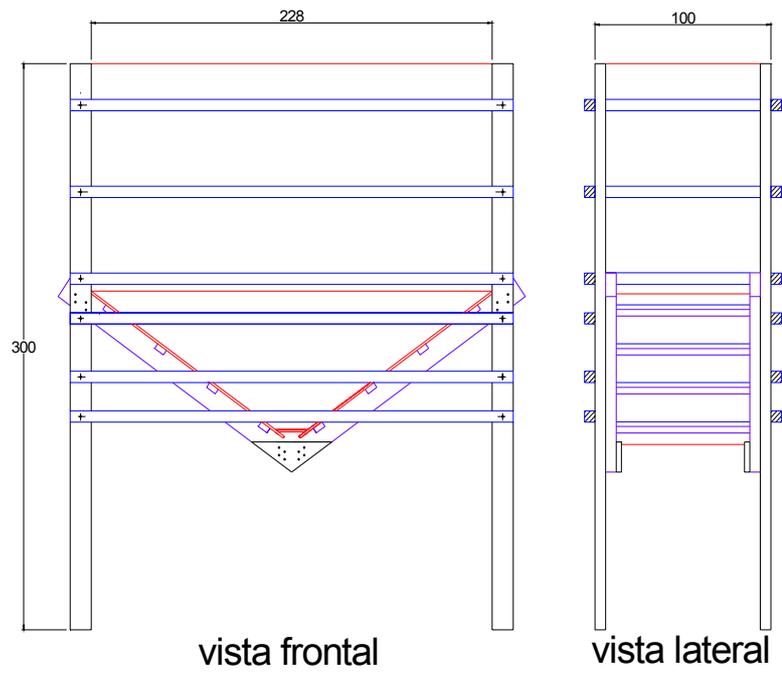


FIGURA 118 -Dimensões gerais

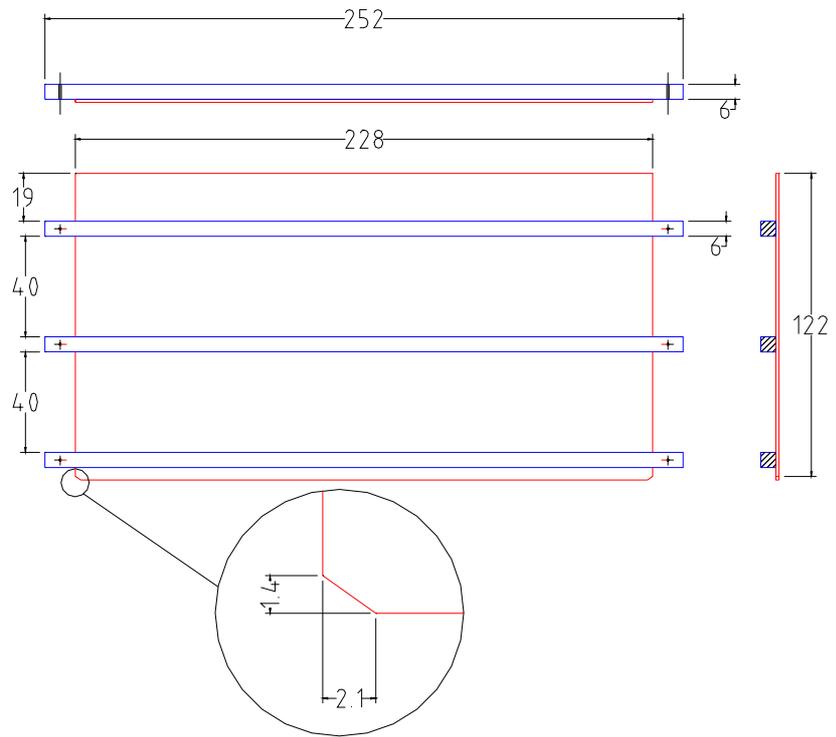


FIGURA 119 - Frontal Superior

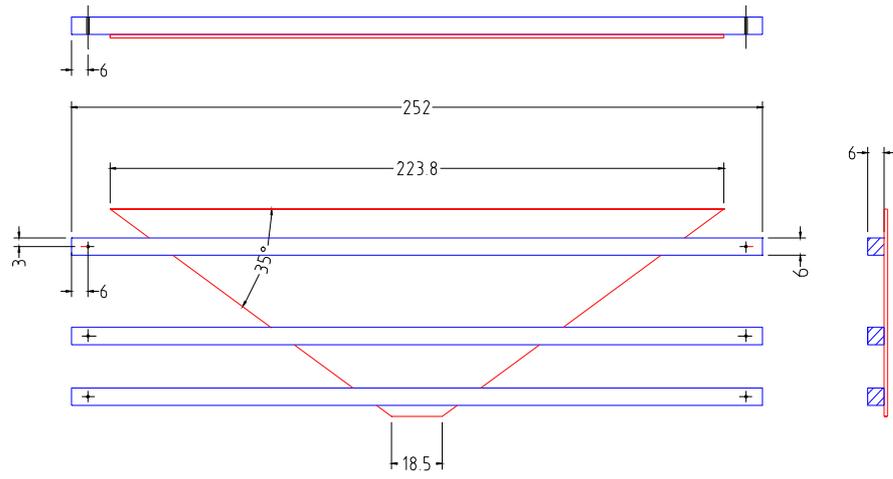


FIGURA 120 - Frontal Inferior

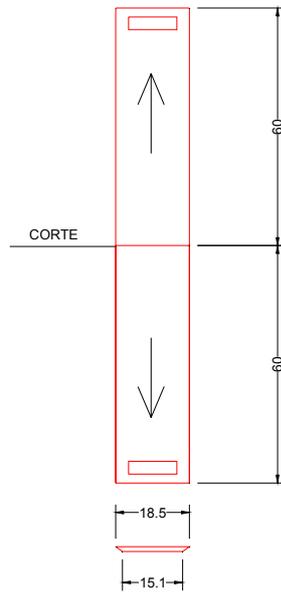


FIGURA 121 – Gaveta de abertura da tremonha.

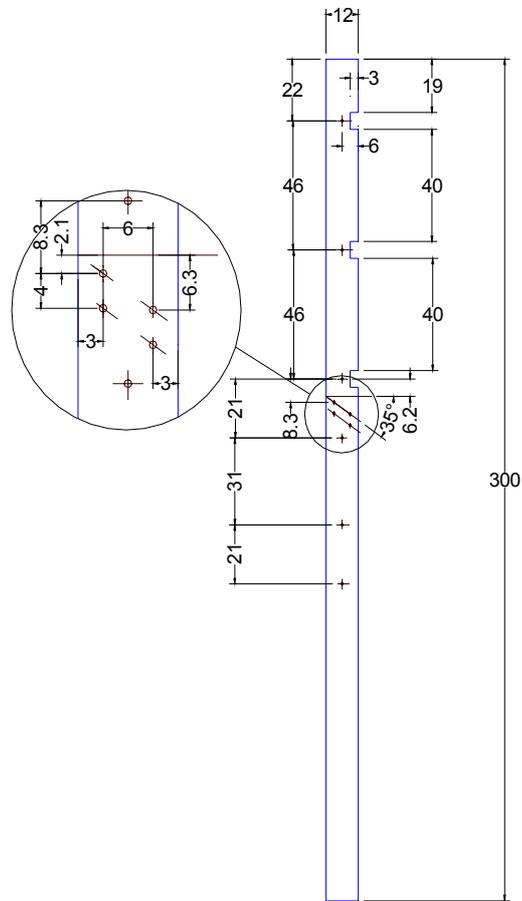


FIGURA 122 - Pilar

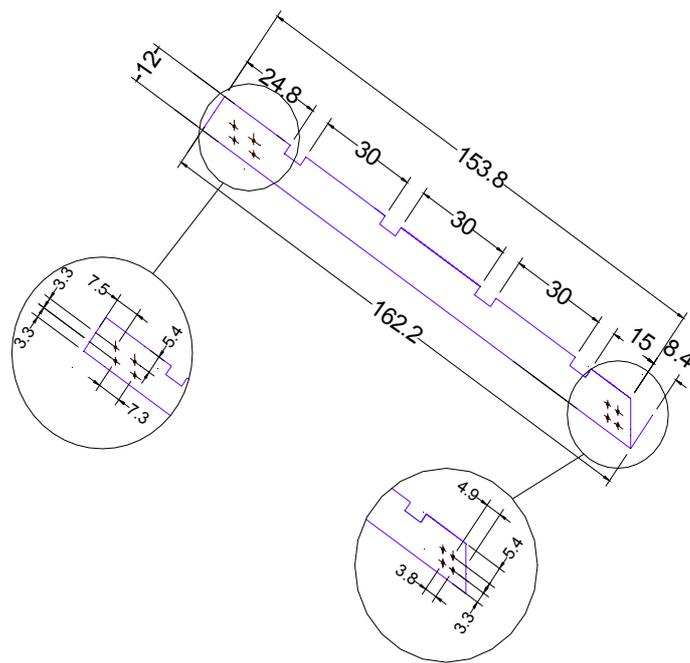


FIGURA 123 - Tremonha

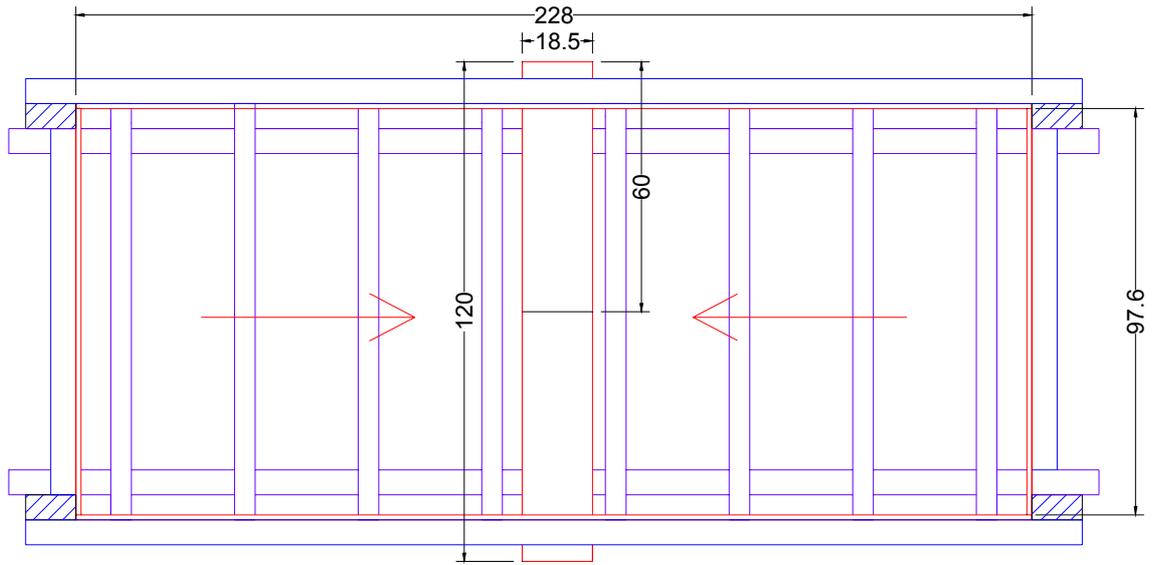


FIGURA 124 - Vista Superior (sem a chapa da tremonha)

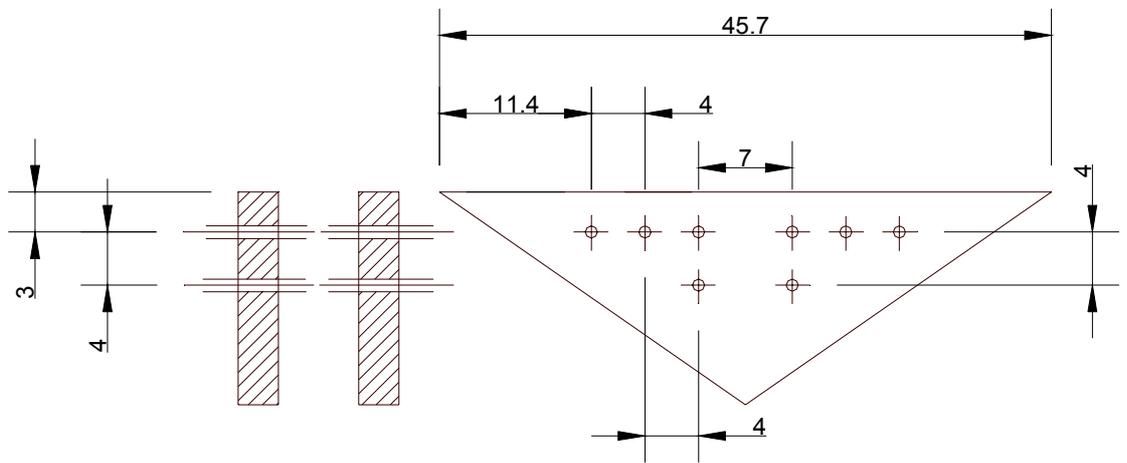


FIGURA 125 - Cobrejunta

ANEXO IV

RELATÓRIOS DOS ENSAIOS (EXEMPLOS)

**CEAGESP ARARAQUARA
Silo horizontal elevado**